

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN
GÖMÜLÜ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMININ EN
UYGUNLAŞTIRILMASINA KATKILAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Hakan OĞUZ

Elektrik Mühendisliği Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN
GÖMÜLÜ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMININ EN
UYGUNLAŞTIRILMASINA KATKILAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Hakan OĞUZ
504151005**

Elektrik Mühendisliği Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Derya Ahmet KOCABAŞ

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504151005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet Hakan OĞUZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMININ EN UYGUNLAŞTIRILMASINA KATKILAR” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üy. Derya Ahmet KOCABAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Juri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üy. Murat YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 4 Mayıs 2018
Savunma Tarihi : 11 Haziran 2018



ÖNSÖZ

Bu bitirme tasarım tezini hazırlamamda fikirlerini ve yardımlarını esirgemeyen, bana yol gösteren, değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet Kocabaş'a,

Bu projeye başladığımızdan beri teknik anlamda yardımlarını ve manevi desteğini hiç esirgemeyen, bana bir dost olan Araş. Gör. Mehmet Onur Gülbahçe'ye,

Gerektiğinde her türlü altyapı imkanlarını sağlayan ve bu konunun ülkemizde gelişmesi için çaba harcayan TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü yönetimine

Bu tezin ortaya çıkmasında yaptıkları çalışmalarla yol gösteren değerli çalışma arkadaşlarım Hasan Fatih Ertuğrul' a ve Erkan Sunan' a

Üzerimde emeklerini hiç esirgemeyen, her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

Mayıs 2018

Ahmet Hakan Oğuz
Elektrik mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER..	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Elektrikli ve Hibrit Araç Teknolojisi	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Literatür Araştırması	2
2. SMSM GENEL BİLGİLER.....	11
2.1 Analitik Hesaplamalarla Motor Tasarımı.....	11
2.2 . SMSM Moment İfadesi ve Temel Kontrol İlkeleri	15
2.3 GSMSM Mekanik İncelemesi	17
2.4 Makinenin Isıl İncelemesi	18
3. BAŞLANGIÇ TASARIMI VE EN UYGUNLAŞTIRMA	21
3.1 Analitik Tasarım.....	21
3.2 Mıknatıs Uzunluğunun Belirlenmesi	23
3.3 Mekanik Dayanım Analizleri	25
3.4 Makine Elektromanyetik En Uygunlaştırılması	29
3.4.1 Tasarım değişkenlerin moment bileşenine etkisi	32
3.4.2 Tasarım değişkenlerin moment dalgalılığına etkisi	36
3.4.3 Tasarım değişkenlerin moment/mıknatıs hacmi oranına etkisi.....	40
3.4.4 En baskın değişkenlerin etkisinin tespiti.....	44
3.4.5 En uygunlaştırılmış tasarımın eldesi	46
3.5 En Uygunlaştırılmış Tasarımın Detaylı İncelemesi Sonuçları	50
3.6 Isıl Analizler	56
4. SONUÇ.....	61
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ.....	71



KISALTMALAR

ÇKV-SMSM : Çift katlı V mıknatıs yapıda sürekli mıknatıslı senkron makine

DAM : Doğru akım makinesi

EM : Elektrik motoru

EMK : Elektromotor kuvveti

EO : Elektrikli otomobil

GSMSM : Gömülü-sürekli mıknatıslı senkron makine

HO : Hibrit otomobil

MTPA : Akım başına en büyük moment

PWM : Darbe genişlik modülasyonu

SEA : Sonlu elemanlar analizi

SEY : Sonlu elemanlar yöntemi

SGHA : Sabit güç hız aralığı

SKAM : Bilezikli asenkron makine

SM : Sürekli mıknatıs

SMDSRM : Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans makinesi

SMSM : Sürekli mıknatıslı senkron makine

SRM : Senkron relüktans makinesi

Ü-SMSM : Üçgen mıknatıs yapıda sürekli mıknatıslı senkron makine

V-SMSM : V mıknatıs yapıda sürekli mıknatıslı senkron makine

(BH)_{mak} : Mıknatıs en büyük enerjisi



SEMBOLLER

A	: Çevre akım yoğunluğu
A_m	: Mıknatıs kalınlığı
B	: Akı yoğunluğu
B_{br}	: Artık mıknatısıyet
B_g	: Hava aralığı akı yoğunluğu
D_i	: Stator iç çapı
D_r	: Rotor dış çapı
D_o	: Stator dış çapı
f	: Frekans
H	: Gideren manyetik alan şideti
H_t	: Ters manyetik alan
I_{mak}	: En büyük faz akımı tepe değeri
I_s	: Stator akımı
i_d	: d-eksen akımı
i_q	: q-eksen akımı
K	: Moment katsayısı
k_w	: Sargı faktörü
k_{w1}	: Sargı faktörü 1. harmoniği
L_d	: d-eksen endüktansı
L_{stk}	: Stator ve rotor sac paketi uzunluğu
L_q	: q-eksen endüktansı
l	: Mıknatıs uzunluğu
M	: Elektromanyetik moment
MMF	: Manyetomotor kuvvet
m	: Faz sayısı
N	: Oluk sayısı
n	: Dakikadaki devir sayısı
n_{ey}	: En büyük hız
$P1$: Rotor değişkeni-1
$P2$: Rotor değişkeni-2

P3	: Rotor değişkeni-3
P4	: Rotor değişkeni-4
P5	: Rotor değişkeni-5
P6	: Rotor değişkeni-6
P7	: Rotor değişkeni-7
<i>p</i>	: Kutup sayısı
<i>P</i>	: Güç
<i>TRV</i>	: Birim hacimde üretilen moment
<i>V_{dc}</i>	: Batarya gerilimi
<i>Z</i>	: Toplam iletken sayısı
<i>v</i>	: Harmonik derecesi
<i>q</i>	: Faz ve kutup başına oluk sayısı
<i>y</i>	: Sargı adımı
<i>w</i>	: Açısal hız
<i>w_a</i>	: Faz başına sarım sayısı
<i>ψ_m</i>	: Mıknatıs akısı
<i>φ</i>	: Yük açısı
<i>τ_o</i>	: Oluk adımı
<i>τ_p</i>	: Kutup adımı
<i>φ</i>	: Kutup başına akı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Elektrikli Araçlardaki Elektrik Makineleri (+ avantajlı, 0 nötr, dezavantajlı) [14].....	4
Çizelge 2.1 : Farklı ticari EA ve HA' lar için bölünme oranları ve kutup sayıları....	15
Çizelge 3.1 : Temel Tasarım Büyüklükleri	23
Çizelge 3.2 : Mekanik analizler için malzeme özellikleri	26





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1 : Ticari otomobillerin elektrik motor güç değerleri ve araç ağırlıkları (motor gücü belirlenirken çalışma süreleri ile ilgili teknik detay ilgili kaynaklarda bulunamamıştır) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, ,8,9 10, 11].....	1
Şekil 2: EO' larda kullanılan farklı tiplerde EM' ler [12]	3
Şekil 3: SM' lerdeki tarihsel gelişim [26].....	6
Şekil 4 : Marka, model ve yıla göre elektrikli ve hibrit otomobillerin rotor laminasyonları [53, 54, 55, 56, 57]	9
Şekil 5 : GSMSM rotorundan d-q eksen takımı	17
Şekil 6 : Mıknatıs köprülerinin gösterimi	18
Şekil 7 : Laminasyon malzemesi M270 35A [72]	22
Şekil 8 : Mıknatıs NdFeB S41EH [28]	22
Şekil 9: Demanyetizasyon analizinde incelenen mıknatıs kısımları.....	24
Şekil 10 : 140 °C' de mıknatıs üzerindeki noktaların uyarıtıma bağlı olarak B-H değişimi(X, Y değerleri üçgen şeklinin kordinatlarını göstermektedir)24	
Şekil 11 : 180 °C' de mıknatıs üzerindeki noktaların uyarıtıma bağlı olarak B-H değişimi(X, Y değerleri üçgen şeklinin kordinatlarını göstermektedir)25	
Şekil 12 : Başlangıç tasarımında mıknatıs köprü kısımlarının gösterimi	25
Şekil 13 : Mekanik analizler için ağ yapısı.....	26
Şekil 14 : Rotor mekanik zorlanmaları	27
Şekil 15 : Başlangıç tasarımı mıknatıs köprüsü orta kısım mekanik kuvvetler.....	27
Şekil 16 : Başlangıç tasarımı mıknatıs köprüsü uç kısımları mekanik kuvvetler.....	28
Şekil 17 : En uygunlaştırma sonrası orta kısım gerilme kuvvetleri.....	28
Şekil 18 : Toplam şekil değiştirme (130 kat abartılmış görüntü)	29
Şekil 19 : Ansys Workbench çalışma alanı	30
Şekil 20 : Değişkenlerin model üzerinde gösterimi.....	30
Şekil 21 : Elektromanyetik en uygunlaştırma ve elektromanyetik tasarımın detaylı incelenmesi için oluşturulan ağ yapısı	31
Şekil 22 : Örnek tasarımların P1 ile moment değerleri	32
Şekil 23 : Örnek tasarımların P2 ile moment değerleri	33
Şekil 24 : Örnek tasarımların P3 ile moment değerleri	33
Şekil 25 : Örnek tasarımların P4 ile moment değerleri	34
Şekil 26 : Örnek tasarımların P5 ile moment değerleri	34
Şekil 27 : Örnek tasarımların P6 ile moment değerleri	35
Şekil 28 : Örnek tasarımların P7 ile moment değerleri	35
Şekil 29 : Moment duyarlılık analizi sonuçları.....	36
Şekil 30 : Örnek tasarımların P1 ile moment dalgalılığı değerleri	37
Şekil 31 : Örnek tasarımların P2 ile moment dalgalılığı değerleri	37
Şekil 32 : Örnek tasarımların P3 ile moment dalgalılığı değerleri	38
Şekil 33 : Örnek tasarımların P4 ile moment dalgalılığı değerleri	38
Şekil 34 : Örnek tasarımların P5 ile moment dalgalılığı değerleri	39
Şekil 35 : Örnek tasarımların P6 ile moment dalgalılığı değerleri	39

Şekil 36 : Örnek tasarımların P7 ile moment dalgalılığı değerleri	40
Şekil 37 : Moment dalgalılığı duyarlılık analizi sonuçları	40
Şekil 38 : Örnek tasarımların P1 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri.....	41
Şekil 39 : Örnek tasarımların P2 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri.....	41
Şekil 40 : Örnek tasarımların P1 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri.....	42
Şekil 41 : Örnek tasarımların P4 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri.....	42
Şekil 42 : Örnek tasarımların P1 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri.....	43
Şekil 43 : Örnek tasarımların P6 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri.....	43
Şekil 44 : Örnek tasarımların P7 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri	44
Şekil 45: Moment/Mıknatıs hacmi duyarlılık analizi sonuçları.....	44
Şekil 46 : P1 ve P5 değişkenlerinin moment üzerine etkisi (her kutu farklı bir örnek tasarımı ifade etmektedir.)	45
Şekil 47 : P3 ve P5 değişkenlerinin moment dalgalılığına etkisi	45
Şekil 48 : P1 ve P5 değişkenlerinin moment/mıknatıs hacmi oranına etkisi.....	46
Şekil 49 : Moment ve moment dalgalılığı ilişkisi.....	47
Şekil 50 : Moment ve moment/mıknatıs hacmi oranı ilişkisi	47
Şekil 51 : Moment dalgalılığı ve moment/mıknatıs hacmi oranı ilişkisi.....	48
Şekil 52 : Örnek tasarım hedef büyüklükleri	48
Şekil 53 : En uygunlaştırma sonrası en uygun örnek tasarımların analiz programı içindeki ekran görüntüsü (P1, P2, P3, P4, P5, P6 ve P7 verilen tasarım değişkenlerini, P8 moment bileşenini, P9 moment dalgalılığını, P10 moment/(mıknatıs hacmi/0,136) değerini verir. Referans tasarım 5 numaralıdır. Yeşil ve kırmızı yazılar referans tasarım ile karşılaştırmaların sonucudur.).....	49
Şekil 54 : En iyileştirilmiş makine geometrisi.....	49
Şekil 55 : En yüksek yüklenmekoşulunda (4100 min ⁻¹ , 265 N.m.) manyetik akı çizgilerinin değişimi.....	51
Şekil 56 : Boşta çalışmada motor üzerindeki manyetik akı çizgilerinin değişimi.....	51
Şekil 57 : En yüksek yüklenme koşulunda (4100 min ⁻¹ , 265 N.m.) manyetik akı yoğunluğunun değişimi.....	52
Şekil 58 : Boşta çalışmada motor üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun değişimi	52
Şekil 59 : En yüksek yüklenme koşulunda (4100 min ⁻¹ , 265 N.m.) manyetik akı vektörleri	53
Şekil 60 : Boşta çalışmada motor üzerindeki manyetik akı vektörleri	53
Şekil 61 : Bir kutup boyunca hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.....	54
Şekil 62 : Hava aralığı akı yoğunluğu harmonikleri.....	54
Şekil 63 : Zıt Elektromotor Kuvveti (EMK) (12 000 min ⁻¹).....	55
Şekil 64 : Verim haritası	56
Şekil 65 : Moment dalgalılığı haritası.....	56
Şekil 66 : Isıl analizler için Infolytica MotorSolve motor modeli.....	57
Şekil 67 : Soğutma kanalları	58
Şekil 68 : Makinenin 4500 min ⁻¹ hızda farklı yüklenmelerine bağlı sıcaklık değişimi	58
Şekil 69 : 4500 min ⁻¹ hızda tam yüklenme sonrası sürekli rejimde makine parçalarının sıcaklıklarını gösteren ekran görüntüsü	59
Şekil 70 : Makinenin 7000 min ⁻¹ hızda farklı yüklenmelerine bağlı sıcaklık değişimi	60
Şekil 71 : 7000 min ⁻¹ hızda %75 yüklenme sonrası makine parçalarının sıcaklıklarını gösteren ekran görüntüsü	60

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GÖMÜLÜ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMININ EN UYGUNLAŞTIRILMASINA KATKILAR

ÖZET

Tüklenen fosil yakıtları, bu yakıtların maliyetlerinin artışı, çevre kirliliği, daha verimli ve daha dinamik sistemlere yönelik araştırmalar hibrit araçların ve nihayetinde ise elektrikli araçların gelişiminde etkili olmuştur. Bu araçların gelişimine paralel olarak, elektrikli tahrik sistemlerinin, dolayısı ile bu tahrik sistemlerinin elektrik makinelerinin gelişimine yönelik araştırmalar hız kazanmıştır.

Geçmişten günümüze elektrikli ve hibrit araçlarda farklı türlerde elektrik motoru kullanılmıştır. İlk elektrikli araçlarda doğru akım motoru, asenkron motor, basit rotor yapılı sürekli mıknatıslı senkron motorlar sıkça tercih edilirken teknolojik gelişmelerle birlikte başarımları daha iyi olan gömülü sürekli mıknatıslı senkron makineler ve sürekli mıknatıs destekli senkron makineler daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Literatürde bu elektrik makinelerinin üstünlük ve olumsuzlukları araştırılarak belirtilmiştir. Günümüzde gömülü sürekli mıknatıslı senkron makineler, verimliliklerinin, güç yoğunluklarının, güç faktörlerinin yüksek, alan zayıflatma yeteneklerinin iyi olmasından dolayı ticari otomobil üreticiler tarafından en çok tercih edilen makine türü olmuştur. Bunun yanında ticari elektrikli otomobil elektrik makinelerinde motor başarımını iyileştirmek ve maliyetini azaltmak amacı ile iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Bu çalışmada gömülü mıknatıslı senkron makinenin işletme başarımı üzerine etki eden birincil ve ikincil tasarım değişkenlerinin etkisi incelenmiştir. Birincil tasarım değişkenleri olarak motorun ana boyutları, stator oluk tasarımı tanımlanmış ve bu büyüklükler analitik olarak hesaplanmıştır. İkincil tasarım değişkenleri olarak rotorun analitik denklemlerle modellenmesi fazlası ile karmaşık olan büyüklükleri sınıflandırılmıştır. Rotorda mıknatısların gömülerek yerleştirildiği boşlukların boyutlandırılması ve mıknatısların konumu motor başarımı üzerinde doğrudan etkilidir. Ancak bu tasarım büyüklüklerinin etkisinin analitik olarak ifade edilmesi fazlası ile zordur. Buradan yola çıkarak mıknatısların ve mıknatıs boşluklarının boyutları ile şekilleri ve ayrıca rotor hacmindeki konumları ikincil tasarım büyüklükleri olarak tanımlanmıştır. Toplam olarak 7 ayrı rotor değişkeninin irdelenmesi hedeflenmiştir.

Tasarıma ticari elektrikli otomobil modellerinin kütleleri ile birlikte, kullandıkları elektrik motor gücü ve buradan yola çıkılarak tasarlanacak olan elektrik motorunun gücü belirlenerek başlanmıştır. Yine ticari elektrikli otomobillerde kullanılan sürekli mıknatıslı motorların rotor yapıları incelenmiştir.

Tasarımın ilk boyutlandırmasına analitik denklemler ile başlanmış olup, temel boyutlandırmalarda kullanılan moment yoğunluğu, stator dış çapının iç çapına oranı gibi büyüklükler yine ticari otomobil motorları literatürde incelenerek elde edilmiş ve tasarımda kullanılmıştır.

Makinede kullanılan mıknatıs ve laminasyon malzemesi özellikleri verildikten sonra makinenin güvenilirliği açısından kritik olan mıknatısların kalıcı demanyetize olma riskleri göz önünde bulundurularak mıknatısların en küçük uzunluğu sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir.

Makinenin başarımı üzerine en etkili faktörlerden biri olan mıknatısların kaçak akısının olabildiğince azaltılması amacıyla, mıknatıs köprü boyutlarının en küçük sınırı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak mekanik analizlerle belirlenmiştir. Mıknatıs köprü boyutları belirlenirken mekanik olarak güvenli bir rotor tasarımı hedeflenmiş ve merkez kaç kuvvetlerinden kaynaklı rotordaki mekanik zorlanmalar ve şekil değişiklikleri incelenmiştir. İlk tasarımda rotor bazı noktalarda yüksek mekanik zorlanmalara maruz kalmıştır. Ancak bu durumun köşeli geometrilere kaynaklandığı görülmüş, köşeli geometriler giderilerek ilk tasarımda sorunlu olan yüksek mekanik zorlanmalar azaltılmıştır.

Farklı güçlerde ve boyutlarda makine tasarımının ve analizinin çok hızlı bir şekilde yapılıp modellenebilmesi ve makine başarımının en iyileştirilmesi amacıyla, makine geometrisi değişkenlere bağlı olarak oluşturulmuştur. Bu değişkenlerden stator boyutları sabit olmak üzere, 7 tanesi kullanılarak rotor üzerinde bilgisayar destekli en uygunlaştırma yapılmıştır. En uygunlaştırmada hedef tasarım yüksek moment, yüksek moment/mıknatıs hacmi oranı ve düşük moment dalgalılığı olmuştur. En uygunlaştırma çalışmalarında örnek tasarımlar yine bilgisayar destekli olarak analiz edilmiş ve değişkenlerin, ulaşılmak istenen her bir motor başarım ölçütüne etkisi incelenmiştir. Değişkenler hedef işletme büyüklüğü üzerindeki etki derecelerine göre sınıflandırılmış ve o işletme büyüklüğü üzerinde en etkili olanların hedef başarım büyüklükleri ile olan ilişkileri yüzey grafiklerle incelenerek detaylandırılmıştır. Böylece analizlerde her tasarım değişkeninin her bir başarım hedefine duyarlılığı detaylandırılmıştır. Her bir hedef işletme büyüklüğü için etkili olan boyutlar seçilerek nihai tasarıma ulaşılmıştır.

Elde edilen en uygunlaştırılmış makine bilgisayar destekli sonlu elemanlar yöntemi ile zamana bağlı detaylı olarak analiz edilmiş, elektromanyetik başarımı incelenmiştir. Buna ek olarak makine moment-hız karakteristiği ile birlikte, bu tüm çalışma aralığında verim ve moment dalgalılıkları elde edilmiştir.

Son olarak makinenin sıvı soğutma kanalları tasarlanmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile farklı yüklenmelerde ve farklı hızlarda sargı sonu ve mıknatıs sıcaklıkları incelenmiştir. Ayrıca sıcaklık analizleri sonucunda makinenin her bir parçasının ulaştığı sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

Çalışmanın sonucunda motor başarımı üzerine etkili olan rotor geometrik tasarım büyüklüklerinin ve şekillerinin belirlenmesi ve hesaplanması konusunda katkı yapan sonuçlara ulaşılması, başarımları daha yüksek motor tasarımının önü açılmıştır.

CONTRIBUTIONS TO OPTIMISATION OF DESIGNING INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE FOR ELECTRIC MACHINES

SUMMARY

Decreasing fossil fuels, increasing cost of these fuels and environmental pollution, research into more efficient and more dynamic systems are effective in the development of hybrid vehicles and later in electrical vehicles. Electric drive systems develop parallel to the development of these vehicles. Therefore electric motors of these electric drive systems are being studied lots of the researchers.

Different types of electric motors have been used in electric and hybrid vehicles. Direct-current motors, induction motors, switched reluctance motors, permanent magnet assisted synchronous motors, interior permanent magnet synchronous motors are the main ones. Direct current motors are no longer preferred by the electric vehicle manufacturers. Other type of machines are being used by different manufacturers in different rate. Internal permanent magnet synchronous motors are the most preferred ones on electric cars. This type of electric motors have high torque density, high efficiency, high power factor and good field weakening ability.

In this study, the effect of the primary and secondary design variables on the operating performance of the interior permanent magnet synchronous machine was investigated. The main dimensions of electric motor and stator slots are defined as primary design variables. Primary design variables are calculated with analytic equations. Internal permanent magnet rotor has a complex geometry so it is hard to design and optimize with analytic equations. These rotor dimensions are defined as secondary design variables. Dimensions of magnet holes and location of magnet are directly effect the electric motor performance. However, it is difficult to quantify the effect of these design parameters analytically. From here, it is aimed to analyze the effect of 7 different rotor parameters on internal permanent magnet rotor.

Firstly, design specifications and rotor structures of commercial electric car electric motors which are mostly interior permanent magnet synchronous motors are studied. Also the masses and the motor power ratings of commercial electric car models are studied. The power rating of EM and the V-shaped interior permanent magnet synchronous motor geometry is determined in design with this information.

Permanent magnets are the most expensive component in an electric motor. Therefore commercial car manufacturers are trying to reduce the amount of permanent magnet used in electric motors. Also their second purpose is to produce high torque density from their motors. These challenging goals are achieved by using V magnet shaped interior permanent synchronous motors which are the most magnet efficient electric motors.

Analytic equations are used for initial design of PMSM. Also some coefficients such as torque per volume and the split ratio are determined from the commercial car electric motors.

Before the optimization of permanent magnet synchronous motor, some design criteria must be defined. Firstly the effect of the magnet length on the moment component is very small. It is directly related to the demagnetization of permanent magnets. Secondly, magnet bridges are critical in terms of machine reliability. Magnet bridges must be design as thick as possible considering mechanical loads on rotor due to the centrifugal forces however, must be as thin as possible considering electromagnetic performance. In order to minimize the leakage flux of the magnets which is one of the most effective factors on the performance of the machine, the smallest limit of the magnet bridge dimensions must be determined by static mechanical analysis with finite element method. The mechanical stress and deformation of rotor due to centrifugal force were investigated. Magnet bridge thickness determined as small as possible considering mechanically safe rotor design. However, high mechanical stress occurred at initial design due to the sharp cornered geometries. These high mechanical stresses at the initial design have been eliminated at the optimized geometry with rounded corners. In this way, the preliminary design limits are kept constant in parametric optimization.

The machine geometry parametrically created in order to design and analyze the machine with different power ratings and sizes very quickly and optimize the machine performance. Within the scope of this thesis, computer assisted optimization of the rotor was carried out by using some of these parameters with constant stator dimensions. Permanent magnet synchronous motor geometry is built in parametric using Ansys Electronic Desktop. In this study the rotor is optimized with 7 parametric variable. High torque density, high torque per magnet volume and low torque ripple are the main goals of optimization. 1000 different electric motor are analyzed with the help of Ansys Response Surface Optimization tool. Each parametric variable have different effect on optimization goals, so these sensitivity analysis are given in this project. Results are showed that all aims could not be reached at the same time. For example most torque density design has very high torque ripple. That's why it is hard to determine the most suitable design. Ansys Response Surface Optimization suggests the most suitable 5 designs to make the selection easier.

The optimized machine detailly analyzed using Ansys Electronics Desktop. This computer application solves non-linear electromagnetic problems with finite element analysis. 2D machine geometry is used in the analysis. Transient solution is applied and the EMs electromagnetic performance analysis. Flux lines, flux vectors, flux density of stator and rotor are given. Also air gap flux density along a pole is determined with its harmonics. It is important to obtain sinusoidal flux density with low harmonics in the air gap. But it is not possible to obtain pure sinusoidal wave shape on the air gap. Stator slot openings with high reluctance cause deformation on the air gap flux. The back electromotive force of the machine at maximum speed is determined. Its maximum dc value is greater than battery voltage. So the flux weakening must be applied when using this electric motor at its full speed range. In addition to this, torque speed characteristics with efficiency map and torque ripple map are determined. Maximum efficiency of the motor is 97,2 % and maximum torque ripple is lower than 25 %.

Finally, the liquid cooling channels of the machine designed. Infolytica MotorSolve application is used in thermal analysis. Motorsolve uses finite element method to solve the electromagnetic problems. After calculation of losses with electromagnetic analysis, the thermal behaviour of electric motor is calculated. The Motorsolve can perform successive electromagnetic and thermal iterative solutions to obtain the most

accurate result. The electric motor is analyzed at the speed of 4500 min^{-1} with 25%, 50%, 75%, 100% torque respectively. It is analyzed for 90 minutes in each load. The end-coil and magnet temperature at different power ratings were obtained by finite element method. Also the EM is analyzed at the speed of 7000 min^{-1} with 25%, 50%, 75% torque respectively. The end-coil and magnet temperature at different power ratings were obtained.

In conclusion, designed and optimized EM has 125 kW power. The most efficient operation point is 97,2% and the maximum torque ripple is lower than 25%.

As a result of the work, the result that contribute to the determination and calculation of rotor geometric design parameters which are effective on electric motor performance have been reached leading to a higher design performance.



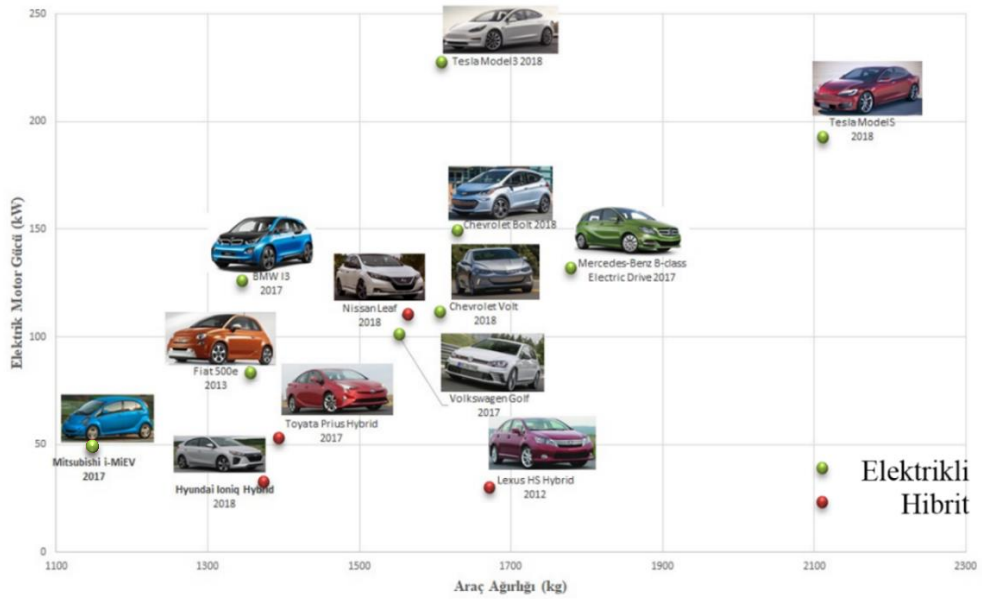


1. GİRİŞ

1.1 Elektrikli ve Hibrit Araç Teknolojisi

Günlük hayatta kullanılan elektrikli otomobil (EO) ve hibrit otomobil (HO) sayısı günden güne artmaktadır. EO' ların tercih edilme sebeplerinin başında, yüksek yakıt verimlilikleri ve düşük yakıt masrafları gelmektedir. Bunların yanında sessiz çalışmaları, kalkış anında bile yüksek moment üretmeleri, hızlı ivmelenmeleri, bakım masraflarının az oluşu elektrikli araçlara olan ilginin artmasına neden olmaktadır. Elektrikli araç sayısındaki artış, bu araçların tahrik sistemlerinde kullanılan elektrik makinelerindeki gelişmelere hız kazandırmıştır.

Elektrikli araç üreticileri hedef kitlelerine göre farklı segmentlerde araç tasarımlarına sahiptir. HO' larda içten yanmalı benzin motoruna ek olarak elektrik motoru (EM) bulunmaktadır. Bu yüzden hibrit araçlar için tasarlanan elektrik makineleri EO tahrik makinelerine göre daha düşük güçlerde [1]. Ticari EO' ler incelendiğinde araç ağırlıkları 1300 ila 1800 kg aralığında, elektrik makinesinin gücü 80 ile 150 kw, maksimum momenti 200 ile 400 N.m. arasında olduğu Şekil 1' de görülmektedir.



Şekil 1: Ticari otomobillerin elektrik motor güç değerleri ve araç ağırlıkları (motor gücü belirlenirken çalışma süreleri ile ilgili teknik detay ilgili kaynaklarda bulunamamıştır) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

1.2 Tezin Amacı

Elektrikli araç teknolojisi, elektrikli tahrik sistemlerinin gelişmesi ile birlikte ulaşımda yeni bir dönemi beraberinde getirmiştir. İçten yanmalı araçlarla karşılaştırıldığında daha yeni ve gelişmeye açık bir teknoloji olsa da kısa zamanda bu alanda ulaşılan nokta göz önünde bulundurulduğunda EO' ların gelecekte içten yanmalı otomobillere büyük bir rakip olması ve nihayetinde de bunların yerini alması muhtemel görünmektedir.

Elektrikli araçların tahrik sistemlerinin önemli bir parçası olan EM, araç başarımı üzerinde direk olarak etkilidir. Ancak EM tasarımında ve üretiminde EM' nin başarımından maliyetine, güvenilirliğinden, kütesine kadar pek çok açıdan ticari EO' larda uygulanabilir kalitede olması beklenmektedir. Bu da ancak elektrik, elektromanyetik, mekanik, ısı, gürültü, titreşim gibi birden fazla disiplinin bir arada çalışılması ile mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada EM gücü piyasada bulunan güncel eşdeğerleri göz önünde bulundurularak belirlenmiş, elektromanyetik açıdan işletme başarımı artırılmış, mekanik ve ısı açıdan güvenli bir EM tasarımı gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda tasarlanan EM' nin başarımı moment, moment dalgalılığı ve moment/mıknatıs hacmi oranı göz önünde bulundurularak en uygunlaştırılması hedeflenmiştir.

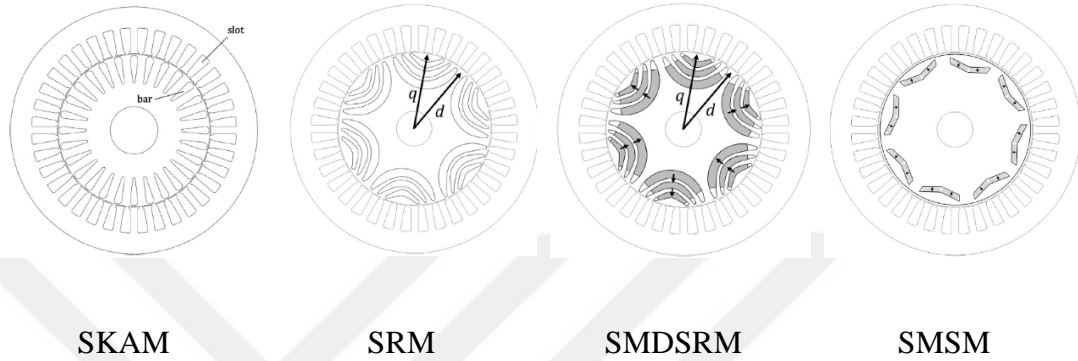
Bu tez kapsamında ülkemizde geliştirilip üretilmesine büyük önem verilen yerli elektrikli otomobil teknolojisinin, yine ülkemizde geliştirilmesine katkıda bulunması adına 1500 kg ile 1800 kg arasındaki bir ticari elektrikli otomobil için rahatlıkla kullanılabilir 125 kW gücünde tahrik amaçlı sürekli mıknatıslı senkron makine (SMSM) tasarımı yapılmıştır.

Çalışmanın sonucunda motor başarımını artırmaya yönelik, tasarım değişkenlerinin seçilmesi ve belirlenmesi konusunda katkı sağlanarak başarımları daha yüksek elektrik motor tasarımlarının önü açılmıştır.

1.3 Literatür Araştırması

Elektrikli araçlarda elektrik makineleri, aracın hareketlenmesi sırasında motor olarak çalışarak bataryalarda depolanmış enerjiyi harekete dönüştürür. Aracın frenlenmesi esnasında ise geri kazanımlı çalışarak, hareketi elektrik enerjisine dönüştüren bir

generatör görevi görür. Günümüz elektrikli araçlarında, gücü, moment yoğunluğu, verimi yüksek, maliyeti ve moment dalgalılığı az elektrik makineleri tercih edilmektedir. Ayrıca makinenin en yüksek hızının taban hızına oranı olarak bilinen sabit güç hız aralığının (SGHA) da yüksek olması istenmektedir. Bu amaçla geçmişten günümüze ticarileşmiş elektrikli ve hibrit araçlarda farklı tiplerde elektrik makineleri kullanılmıştır. Bu makinelerden başlıcaları Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2: EO' larda kullanılan farklı tiplerde EM' ler [12]

Doğru akım makineleri (DAM) bilinen en eski makinelerdendir. Rotorunda ve statorunda doğru akım sargıları ile birlikte fırça, kolektör sistemine sahip bu makinelerin kontrolü çok kolay olmasına rağmen güvenilirlikleri az, bakım gereksinimleri fazladır. Ayrıca verim ve güç yoğunlukları düşük, hızlanma kapasiteleri mekanik açıdan kısıtlıdır [13]. DAM' ler 2000' li yıllara kadar bazı elektrikli araçlarda kullanılmış olsa da günümüzde üreticiler tarafından tercih edilmemektedir [14].

Sincap kafesli asenkron makineler (SKAM) de bilinen eski makinelerdendir. Statoru, 3 fazlı alternatif akım sargılarından, rotoru, birbirine kısa devre bakır iletkenlerden oluşmaktadır. SKAM' lerin en büyük üstünlüğü düşük maliyetli olmalarıdır. Bunun yanında iyi tasarlanmış bir SKAM' nin SGHA' sı 3 ila 5 arasındadır [15]. Ayrıca basit yapılarından dolayı güvenilirlikleri ve üretimleri kolaydır. Ancak stator ve rotor döner alan frekanslarının farklı olmasından dolayı rotor kayıpları yüksektir yani verimleri düşüktür [16]. Ayrıca rotor kayıplarından dolayı açığa çıkan ısının makineden uzaklaştırılması, statorda oluşan ısının uzaklaştırılmasından daha zor olduğundan, soğutma için gereken enerji ihtiyacı da daha fazla olacaktır [17]. Araç uygulamaları için tasarlanan SKAM' lerin maksimum verimleri %92, %93 mertebelerindedir [18, 19]. Tesla halen çoğu modelinde SKAM kullanmaktadır ancak bu makinelere karmaşık soğutma sistemleri tasarlamak zorunda kalmıştır [20].

Senkron relüktans makineleri (SRM) genellikle 3 faz alternatif akım sargıları ile beslenir. Rotorunda ise sargı yoktur. Bunun yerine relüktans farkını artırmaya yönelik rotorunda kanallar açılmıştır. Böylece sadece relüktans momenti ile hareketi oluşmaktadır. Bu sayede SGHA yüksektir. Yapıları basit, üretim maliyetleri az, güvenilirlikleri yüksek olmasına rağmen moment ve güç yoğunlukları düşüktür. Ayrıca moment dalgalılığı da yüksektir. Güç faktörü ve kontrol kolaylığı açısından asenkron makinelere rakip konumdadır [12].

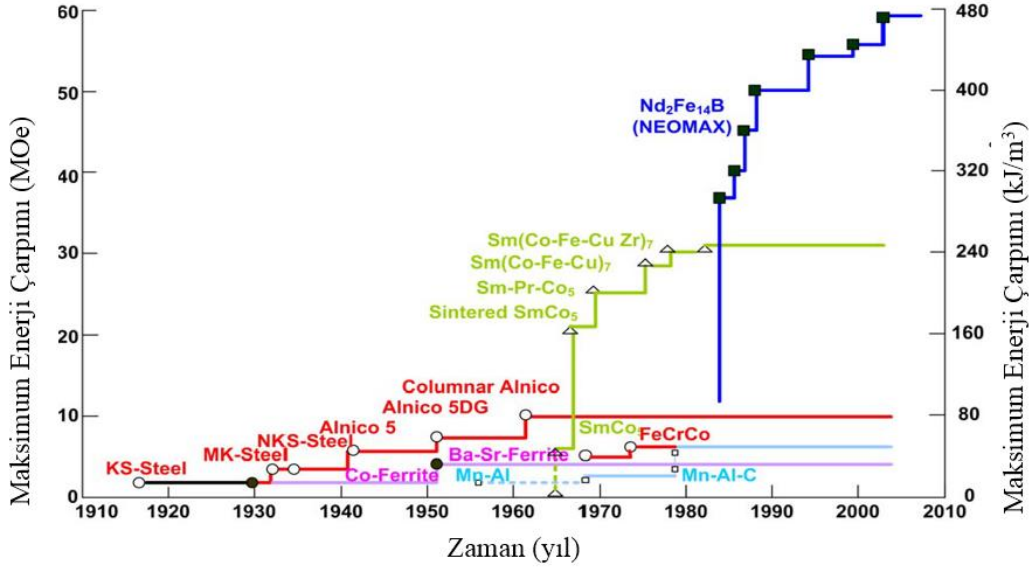
Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans makineleri (SMDSRM) yapı olarak SRM' lere çok benzerdir. Sadece rotorundaki kanalların belli bir kısmına mıknatıs yerleştirilerek relüktans momentinin yanında, mıknatıs momenti üretilmesi sağlanmıştır. SRM' lere oranla daha yüksek güç ve moment yoğunluğuna sahip ve maliyetleri çok yüksek olmayan bu makineler bazı üreticiler tarafından ticarileştirilmeye başlanmış olsa da sürekli mıknatıs (SM) olarak ferrit kullanıldığında boyut ve ağırlık olarak SMSM' lerin gerisinde kalmakta NdFeB kullanıldığında ise maliyetleri artmaktadır. Ancak NdFeB mıknatıslı SMDSRM başarımları yine SMSM' ler kadar olmamaktadır [21]. Bahsi geçen makinelerin özelliklerinin topluca karşılaştırılması Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Elektrikli Araçlardaki Elektrik Makineleri (+ avantajlı, 0 nötr, - dezavantajlı) [14]

Özellik	Makine Tipi				
	DAM	SKAM	SRM	SMDSRM	SMSM
Maliyet	0	++	+	+	-
Moment/güç yoğunluğu	-	0	0	+	++
Verim	-	+	+	++	++
Basitlik/üretilebilirlik	++	++	++	+	0
Kontrol edilebilirlik	++	+	0	+	+
Güvenilirlik	-	++	++	+	+
Boyut/ağırlık/hacim	-	+	+	+	++
Aşırı yüklenme kapasitesi	-	+	+	++	+
Sağlamlık	0	++	++	+	+
Alan zayıflatma yeteneği	++	++	++	++	+
Hata toleransı	+	++	++	+	-
Termal sınırları	0	+	++	+	-
Gürültü/titreşim/moment dalgalılığı	-	++	-	0	++
Ömür	-	++	++	+	+
Olgunluk	++	++	+	-	+
Geliştirilebilirlik	-	++	++	++	++

SMSM' nin statorunda üç fazlı alternatif akım sargısı bulunur. Uyarma manyetik alanı rotordaki nadir toprak elementi içeren SM' ler ile sağlanırken, senkron çalışmadan dolayı rotor kayıpları asenkron makinelere oranla 2 ile 3 kat daha azdır [17]. Demir kayıplarının büyük çoğunluğu stator nüvesinde olduğundan makine soğutması için gerekli enerji ihtiyacı daha azdır. Verimleri % 96, % 97 seviyelerine çıkmaktadır [22]. Güç ve moment yoğunlukları, diğer rakiplerine göre daha yüksektir. Ayrıca güç faktörü de asenkron makinelerden daha iyidir [15]. Araç uygulamalarında EO' ların geniş bir moment-hız aralığında çalışmaları istenildiğinden, yüzey mıknatıslı yerine gömülü mıknatıslı yapı tercih edilmektedir [23, 24]. Disporsiyum veya terbiyum nadir toprak elementlerini içeren NdFeB mıknatısların Çin tekelinde olması ve bunların maliyetlerinin fazla olması bu makinelerin en büyük olumsuzluklarından [17, 25]. SMSM' ler ticari EO' ların tahrik sitemlerinde en çok kullanılan EM çeşididir [14].

SMSM' lerin gelişimi, yüksek enerjili SM' lerin son 50 yıldaki gelişimi ile paralel ilerlemiştir [26]. SM' lerde manyetik akı yoğunluğunun (B) ve gideren manyetik alan şiddetinin (H) dolayısı ile mıknatısların maksimum enerjisinin ((BH)_{mak}) yüksek olması istenir. Ayrıca bu değerlerin sıcaklık değişimine karşı toleranslı olması gerekir. SmCo 1970' lerde bu özelliklere sahip olup ticari olarak kullanılan mıknatıslardandı. Bu mıknatısların (BH)_{mak} 4 ile 6 MOe civarındaydı. Sm içeren mıknatıslardaki gelişmeler devam ederken, 1980' lerde (BH)_{mak} 14 MOe' lere ulaşan NdFeB mıknatıslar ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır [26]. NdFeB mıknatısların gelişimi ile birlikte yüksek güç yoğunluklu EM' lerin tasarımı ve üretimi mümkün olmuştur. Şimdi (BH)_{mak} 50 MOe üzerinde mıknatıslar farklı üreticiler tarafından üretilip ticari olarak satılmaktadır [27, 28].



Şekil 3: SM' lerdeki tarihsel gelişim [26]

SMSM' lerin başarımı, makine topolojisi ile yakından ilişkilidir [29-30]. Mıknatısların rotorda farklı şekillerde konumlandırılması ile farklı yapılarda gömülü-sürekli mıknatıslı senkron makineler (GSMSM) tasarlanmıştır. 2013' de Yılmaz, mıknatısların rotordaki konumlarına bağlı olarak literatürdeki farklı GSMSM' leri karşılaştırmış, yüzey mıknatıslı makinelerin relüktans momenti üretemediğini, mıknatısların kolay demanyetize olduğunu ve alan zayıflatma kabiliyetlerinin düşük olduğunu belirtmiştir. Gömülü mıknatıslı yapılardan mıknatısların W şeklinde tasarlanması ile moment, verim ve alan zayıflatma açısından yüksek performans alınabileceğini; V şeklinde mıknatıs yapısı ile mıknatıstan en verimli seviyede faydalanılabileceğini belirtmiştir [14]. Sorgdrager tarafından yapılan başka bir çalışmada ise mıknatısların yerleştirilme şekillerinin ve mıknatıs boyutlarının makinenin hava aralığı akı yoğunluğu dalga şekli üzerindeki etkileri incelenmiştir [31]. Yang tarafından 2016' da, üçgen mıknatıs yapıda SMSM (Ü-SMSM), V mıknatıs yapıda SMSM (V-SMSM) ve çift katlı V mıknatıs yapısında SMSM (ÇKV-SMSM) tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımların elektromanyetik başarımları, geniş bir hız aralığında momentleri, moment dalgalılıkları, verimleri, mıknatıslarının kalıcı demanyetizasyona karşı dayanımları ve mekanik dayanımları karşılaştırılmıştır. [32]. Yamazaki 2013 yılındaki çalışmasında Ü-SMSM tasarımını, en yüksek moment elde etmeyi ve demir kayıplarını azaltmayı amaçlayarak gerçekleştirmiştir [33].

Uygun rotor yapısının yanında rotor tasarım ve en uygunlaştırmasının da makine başarımı üzerine etkisi oldukça fazladır. Bu bağlamda Xu, V-SMSM yapısını baz alarak mıknatısların uçlarına akı engelleri açmış ve bu akı engeli şekillerinin makine başarımı üzerine etkilerini incelemiştir. Makine çukuk kutupluluğunu artırmayı ve hava aralığı akı yoğunluğunu iyileştirmeyi amaçlamış; rotor yapısının, relüktans momenti, moment dalgalılığı ve vuru mu momenti üzerine etkilerini yaptığı testler ile göstermiştir [34]. Rotordaki akı engellerinin asimetrik tasarlanmasının etkileri Ren ve Kim tarafından incelenmiş ve bu yöntemle moment dalgalılığının azaltılabileceği önerilmiştir [35-36]. Rotor tasarım değişkenlerinin makinenin elektromanyetik başarımı üzerine etkileri başka birçok araştırmacı tarafından analitik ve SEY yaklaşımları ile benzer şekilde incelenmiştir [37-38-39].

EM' nin elektromanyetik başarımının yanında ısı ve mekanik başarımları da oldukça önemlidir. Bu amaçla Fatemi ilk olarak V-SMSM' nin statorunda ve rotorunda birbirinden bağımsız birçok değişkenin, motor elektromanyetik başarımı üzerine etkilerini incelemiştir. Daha sonra makinenin analitik olarak ısı analizini ve SEY ile rotor mekanik dayanım analizini yapmıştır. Makinede, en yüksek mekanik zorlanmaların rotordaki mıknatıs köprülerinde meydana geldiğinin ve bunun temel sebebinin merkezkaç kuvveti olduğunu belirtmiştir [40]. Benzer şekilde farklı yapılarda ve farklı büyüklüklerde GSMSM tasarımlarının rotor mekanik dayanımları incelenmiştir [41-42-43-44]. Ford Motor Company bu çalışmayı bir adım ileriye taşıyarak akı engellerinin ve rotorun farklı bölgelerinde açılan oyukları oluşturan bağımsız birden fazla değişkenin motor elektromanyetik başarımı ve mekanik dayanımı üzerine etkisini çoklu-fizik yöntemlerle incelemiştir. Bunu yaparken makinenin ağırlığını da azaltmayı hedeflemişlerdir [45]. Kim ise rotor mekanik dayanımı üzerine yaptığı çalışmada, yüksek hızlardan dolayı mıknatıs yapıştırıcısının etkisini kaybedeceğinden, mıknatısların yapıştırılmadan modellenmesi gerektiğini önermiş ve bu durumu incelemiştir [46].

GSMSM' lerin farklı açılardan başarımını artırmaya yönelik birçok farklı çalışma yapılmıştır. Makinenin moment dalgalılığını azaltmak amacı ile rotordaki mıknatıslar, aksel uzunluk boyunca belli bir açı ile yerleştirilebilmektedir. Zhang ve Wang mıknatısları tek yönde kademeli olarak kaydırarak yerleştirmiş. Kaykının moment dalgalılığını azaltırken, elde edilen toplam momenti de azalttığını SEA' ları ile gösterilmiştir. [47-48]. Tek yönde kaykı yerine, 11 farklı şekilde kaykı verilerek

tasarlanan rotorların toplam momente ve aksel kuvvetlerdeki iyileşme üzerine etkisi Jiang tarafından incelenmiştir [49]. Zhao ise çalışmasında farklı rotor kaykık şekillerinin yanında, segmentler arasındaki kaykık açısının da makinenin elektromanyetik başarımı üzerine etkilerini incelemiştir [50].

Otomobil üreticileri, EO' ları için, yüksek güç yoğunluklu elektrik makinelerinin başarımlarını kaybetmeden daha ucuza üretmenin yollarını aramaktadır. Yapılan tasarımlarda temel hedef bu olmuştur. Bu kapsamda 2016' da Chevrolet Bolt elektrikli aracın EM' si General Motors tarafından geliştirilmiştir. Aracın elektrik motorunun en çok çalıştığı moment ve hız değerleri de göz önüne alınarak eski tasarımında uygunlaştırmalar yapılmıştır. Standart çok damarlı iletken yerine, şerit iletken kullanılmış, paralel iletken sayısının makinenin yüksek hızlardaki başarımı üzerine etkisi incelenerek tasarım yapılmıştır. Böylece oluk doluluk oranı artırılmıştır. Ayrıca stator oluklarında iki parça yalıtım malzemesi kullanarak stator üretimini basitleştirmiştir. Statordaki oluk açıklıklarının uzunlukları ve konumları farklı şekillerde tasarlanarak moment dalgalılığı ve radyal kuvvetler azaltılmıştır. Rotorda ise V-SMSM yapısı seçilmiş, bazı noktalarında oyuklar açılmış böylece moment dalgalılığı rotorda kaykığa gerek kalmadan azaltılmıştır. Chevrolet Bolt için tasarlanan elektrik makinesinde Chevrolet Spark modeline oranla %30 daha az mıknatıs kullanılmıştır [51].

Nissan Leaf 2013 model aracında kullanılmak üzere 2011 model aracındaki EM' sinde bir dizi iyileştirmeler yapılmıştır. Ü-SMSM tasarımı tercih edilen makinede motor boyutları küçültülerek ve SM' lerde Dy elementi azaltılarak malzeme maliyeti ve makine kütlesi azaltılmıştır. Makinenin faz bağlantı kutusu kolay soğuyacak şekilde motorun dış gövdesine yakın yerleştirilmiştir. Mıknatıs genişliği ve rotor üzerinde açılan oyuklar en uygunlaştırılmış, ayrıca makinenin gürültü seviyesini azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [52].

Ticari EO' ların EM' leri ile ilgili daha birçok araştırma yapılmıştır. Burrell çalışmasında, Nissan Leaf, Lexus 600h 2008, Toyota Prius 2010, Toyota Camry 2007, Hyundai Accord 2005 araçlarında kullanılan GSMSM' lerin laminasyonlarını incelemiştir. Ayrıca bu elektrik makinelerinden Leaf için güç değerleri, en büyük çalışma hızı, çalışma sıcaklığı, verimi ve sürekli çalışma durumundaki momentini ile birlikte deneysel sonuçları vermiştir [53]. Ayrıca burada belirtilen ve ticari başka pek

çok elektrikli ve hibrit araçların tahrik elektrik makineleri ile ilgili detaylı tasarım parametreleri verilmiş ve tersine mühendislik çalışmaları ilgili yayınlar yapılmıştır [54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61]. Şekil 4’ de farklı marka ticari EO’ ların EM’ lerinde tercih edilen rotor yapıları verilmiştir. Bunlardan Ford, Camry, Prius V-SMSM yapısını tercih ederken, Leaf, Lexus 600h Ü-SMSM yapısını, Chevy Volts ÇKV-SMSM yapısını, Honda ve 2013 model Prius ise düz SMSM yapısını tercih etmiştir. Bunlardan BMW i3 modelinde ise NdFeB mıknatısları kullanılarak SMDSRM tercih edilmiştir.



Şekil 4 : Marka, model ve yıla göre elektrikli ve hibrit otomobillerin rotor laminasyonları [53, 54, 55, 56, 57]



2. SMSM GENEL BİLGİLER

Günümüz EO' ları kullanıcıya en iyi performansı sunmaya çalışırken, verimli ve güvenilir de olmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda yüksek verimlilik, yüksek moment yoğunluğu, geniş SGHA, yüksek güç faktörü, düşük eylemsizlik, güvenilirlik özelliklerinin hepsinin bir arada bulundurmasından dolayı [62] otomotiv uygulamalarında son yıllarda sıkça tercih edilmeye başlanmıştır.

SMSM' ler çalışması itibari ile hem asenkron motor hem de fırçasız doğru akım motoruna benzerlik gösterir. Fırçasız doğru akım makinelerinde olduğu gibi rotorunda uyarım sürekli mıknatıslar ile sağlanırken, faz sargıları asenkron motorlarda olduğu gibi sinüs formunda hava aralığı akısını oluşturur. Bu sinüs formundaki stator akısına karşılık rotorun hava aralığında oluşturduğu akı da sinüzoidal olmalıdır [63].

2.1 Analitik Hesaplamalarla Motor Tasarımı

Yüksek güç yoğunluklu makine tasarımında önemli parametrelerden biri olan motor boyutları üzerinde en etkili büyüklük, makineden elde edilebilecek elektromanyetik momenttir. Belirli çıkış gücü (P) ve mildeki açısal hız (w) değerinde elde edilebilecek moment (T) miktarı denklem 2.1 kullanılarak hesaplanabilir.

$$T = P/w \quad (2.1)$$

Elektrik motorlarından elde edilebilecek sürekli moment ve sınırlı belirli süre elde edilebilecek en yüksek moment, rotor hacmiyle orantılıdır. EM' nin gücünden bağımsız olarak bütün EM' lerin temel boyutlandırılmasında denklem 2.2 ve denklem 2.3 kullanılır [1].

$$M = \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 60} \cdot k_w \cdot A \cdot B_g \cdot D_r^2 \cdot L_{stk} = K \cdot D_r^2 \cdot L_{stk} \quad (2.2)$$

$$TRV = \frac{M}{\frac{\pi}{4} \cdot D_r^2 \cdot L_{stk}} \quad (2.3)$$

Burada M momenti, k_w sargı faktörünü, A çevre akım yoğunluğunu, B_g hava aralığı manyetik akı yoğunluğunu, D_r rotor dış çapını, L_{stk} rotor sac paketi uzunluğunu, K moment katsayısını, TRV birim rotor hacminde üretilen moment miktarını göstermektedir.

Tasarlanacak elektrik makinesinde TRV değeri soğutma yöntemine bağlı olarak seçilmelidir. Elektrikli araçlar kullanılan EM' ler yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve genellikle %50 etilen, %50 su soğutmalı olarak tasarlanmaktadır. Bu tip motorlar için sürekli çalışma TRV değeri sürekli çalışmada 10-21 kNm/m³ arasında seçilmesi uygundur [1, 64].

Hesaplama yöntemi açısından sürekli mıknatıslı senkron makinelerin stator ve oluk yapıları geleneksel asenkron motor yapısı ile benzerlik gösterir. Bunların tasarımında asenkron motor stator ve oluk tasarımında kullanılan denklemler ve daha önceden imal edilmiş SMSM benzer örnekleri referans alınabilir.

Bir elektrik makinesinin kutup sayısının belirlenirken ilk olarak makine hızı göz önünde bulundurulur. En yüksek çalışma hızına göre EM' nin kutup sayısı denklem 2.4' e göre hesap edilir. Burada f frekans, n bir dakikadaki devir sayısı, p kutup sayısıdır. Ticari araçlar için EM sürücüsü temel frekansı 1000 Hz olarak düşünüldüğünde uygulanabilir kutup sayısı 1, 2, 3, 4, 8 ve 10 olabilmektedir [64].

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (2.4)$$

Kutup sayısının artması kutup başına düşen akı ihtiyacını azaltarak stator boyunduruk uzunluğunu kısaltır; sargı adımını kısaltarak, bakır kayıplarını azaltır; kaçak akı miktarını da azaltarak motorun güç yoğunluğunu artırır. Ayrıca yüksek kutuplu makineler elektromanyetik dengesizliğe karşı daha dayanıklıdır. Diğer taraftan frekansın artması motorun çalışma frekansını artacağından mıknatıs girdap akım kayıplarını artıracak olsa da bu oldukça düşük miktardadır [1, 64].

Faz ve kutup başına düşen oluk sayısı q olmak üzere makinenin toplam oluk sayısı N denklem 2.5' e göre hesap edilir. Burada m faz sayısıdır.

$$N = 2 \cdot p \cdot q \cdot m \quad (2.5)$$

Makinenin oluk adımı τ_o denklem 2.6' ya göre kutup adımı τ_p denklem 2.7' ye göre hesap edilir.

$$\tau_o = \frac{D_i \cdot \pi}{N} \quad (2.6)$$

$$\tau_p = \frac{D_i \cdot \pi}{2p} \quad (2.7)$$

Tasarım aşamasında diğer bir önemli faktör sargılardır. Sargıların dağılma ve kirişleme durumları dikkate alınarak sargı faktörü k_w denklem 2.8' e göre hesap edilir. Burada k_d sargı dağılma faktörü, k_p sargı kirişleme faktörüdür. v harmonik seviyesini gösterir. Kirişleme, harmonikleri azaltmak amacıyla sargı adımı y ' nin kutup adımı τ_p ' den farklı yapılmasıdır [65].

$$k_w = k_d k_p \quad (2.8)$$

$$k_d = \frac{\sin\left(v \cdot \frac{90}{m}\right)}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{90}{m}\right)} \quad (2.9)$$

$$k_p = \sin\left(v \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot 90\right) \quad (2.10)$$

Sargılarda indüklenen gerilim E ampirik denklemler ile hesap edilerek gerekli faz başına sarım sayısı w_a denklem 2.9' dan bulunur. Burada k_{w1} sargı adımı 1. harmoniği, ϕ kutup başına düşen akı miktarını, B_g hava aralığı akı yoğunluğunu göstermektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu yine daha önceden imal edilmiş benzer özellikteki makineler referans alınarak belirlenebilir [65]

$$w_a = E \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot k_{w1} \cdot f \cdot \phi \quad (2.11)$$

$$\phi = \frac{2}{\pi} \cdot B_g \cdot \tau_p \cdot L \quad (2.12)$$

Buradan toplam iletken sayısı Z denklem 2.13' den, oluk başına iletken sayısı z_0 denklem 2.14' den hesap edilir. Sargı kesiti q_{cu} ise sargı akım yoğunluğu bilgisi kullanılarak denklem 2.15' e göre belirlenir.

$$Z = 2 \cdot m \cdot w_a \quad (2.13)$$

$$z_0 = \frac{Z}{N_s} \quad (2.14)$$

$$q_{cu} = \frac{I_s}{j_s} \quad (2.15)$$

Burada q_{cu} akım yoğunluğudur ve motor soğutmasına bağlı olarak seçilmelidir. En yüksek çalışma koşulları göz önüne alındığında sıvı soğutmalı makineler için akım yoğunluğu 10-30 A/mm² arasında seçilebilmektedir. [1, 64]. Ancak bu makinelerin tamamen sıvı içerisinde çalıştığı göz önünde bulundurulmalıdır. Ticari EO' ler göz önünde bulundurulduğunda soğutma sıvısı etilen glikol karışımı, soğutma sıvısı akış hızı 10-15 litre/dakika ve soğutma sıvısı motora giriş sıcaklığı da 65-70 °C olacaktır. BMW i3 2016 elektrik makinesinin en büyük yüklenme için akım yoğunluğu hesap edilirse 12,6 A/mm² bulunur [56].

Makinenin olukları belirlenirken hem oluk doluluk oranı gözetilerek sargıların sığabileceği yeterli alan bırakılmalıdır hem de dışlerdeki manyetik yükler göz önünde bulundurulmalıdır. Statorun dış kısımlarında manyetik akı yoğunluğu, laminasyon malzemesini manyetik olarak doyuma götürmemelidir [65].

Araç tahrik uygulamaları için SMSM tasarımında stator iç çapının (D_i) dış çapına (D_o) oranına bölünme oranı (split ratio) denmektedir. Bu oran hava aralığı akı yoğunluğu, stator bakır kayıpları, ısı yükler, TRV değeri ve maliyet üzerinde etkilidir. Bölünme oranı piyasadaki elektrikli araç SMSM' leri incelendiğinde 0,6 ila 0,75 arasında seçildiği Çizelge 2.1' de görülmektedir. Yüksek değerler yüksek kutup sayıları içindir. Ayrıca Çizelge 2.1' de farklı marka araçların hava aralığı uzunlukları da verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Farklı ticari EA ve HA' lar için bölünme oranları ve kutup sayıları [58]

Model/Özellik	D_i/L_{stk}	D_i/D_o	Hava aralığı	Kutup sayısı
Leaf	0,86	0,66	Bilinmiyor	8
2010 Prius	3,19	0,61	0,73 mm	8
Camry	0,96	0,65	0,73 mm	8
LS 600h	2,67	0,61	0,89 mm	8
2004 Prius	1,93	0,6	Bilinmiyor	8
2016 i3	1,36	0,74	Bilinmiyor	12

Makinede kullanılacak SM' ler, makine en yüksek çalışma sıcaklığı göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Ayrıca denklem 2.16' ya göre mıknatıstan elde edilecek uyarım akı miktarı ψ_m ' yi, yüksek tutmak için mıknatıs artık mıknatısiyet değeri B_{br} ve mıknatıs kalınlığı A_m yüksek seçilmelidir. Diğer taraftan mıknatısın ters manyetik alanda (H_t) kalıcı olarak demanyetize olmaması için denklem 2.17' ye göre mıknatıs uzunluğu l nin yeterince büyük seçilmesi gerekmektedir. Mıknatıs uzunluğu, mıknatısın manyetik alanı doğrultusundaki uzunluğudur. Çok uzun seçilen mıknatıslar, makinenin maliyetini artıracığı gibi üretilen elektromanyetik momente de etkisi çok fazla olmayacaktır. Tasarımın ilk aşamasında mıknatıs uzunluğu kabaca hava aralığı genişliğini 10 katı alınabilir [1].

$$\psi_m = B_{br} \cdot A_m \quad (2.16)$$

$$MMF = \frac{H_t}{l} \quad (2.17)$$

2.2 . SMSM Moment İfadesi ve Temel Kontrol İlkeleri

Bu çalışma kapsamında GSMSM' lerin tasarımı ve en uygunlaştırılması üzerinde durulmuştur. Ancak tasarımda bahsi geçen konuların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla genel kontrol mantığına da kısaca değinilmiştir. Ayrıca SMSM' lerin kontrolünde farklı sürüş algoritmaları kullanılsa da bu tez kapsamında sabit moment bölgesinde akım başına en büyük moment (MTPA) algoritması ve baz hızı üzerindeki hızlar için alan zayıflatma kullanılmıştır.

GSMSM' ler modellenirken 3 fazlı sinüzoidal ifadeler yerinde, doğru akım bileşenleri kullanılması kolaylık sağlamaktadır. Bu bağlamda birbirine dik, senkron hızda dönen d-q eksen takımı kullanılır. Belli varsayımlar yapılarak makine iki eksen takımında

modellenir. Rotordaki bu eksen takımı 2 boyutlu makine üzerinde Şekil 5' de gösterilmiştir.

Mıknatısların manyetik geçirgenliği hava ile neredeyse aynıdır. Bu sebeple rotor d eksenini manyetik geçirgenliği q eksenini manyetik geçirgenliğinden daha az olduğundan d eksenini endüktansı q eksenini endüktansından küçüktür. Bu $(L_d - L_q)$ farkı sayesinde denklem 2.1' deki SMSM moment denkleminde de görüldüğü üzere ek bir moment üretilmektedir. Bu momente relüktans momentini denmektedir.

$$M = \frac{3}{2}p(\psi_m i_q + (L_d - L_q)i_q i_d) \quad (2.1)$$

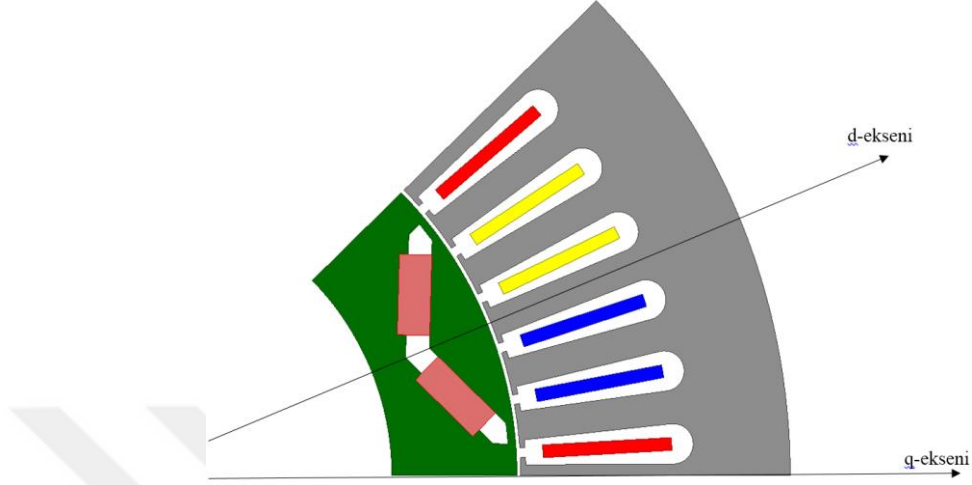
$$i_d = I_s \cos \varphi \quad (2.2)$$

$$i_q = I_s \sin \varphi \quad (2.3)$$

Burada M elektromanyetik momentini, ψ_p mıknatıs akısını, L_q q eksenini endüktansını, i_q q eksenini stator akımını, L_d d eksenini endüktansını, i_d d eksenini stator akımını, ifade etmektedir. I_s stator faz akımının d-q eksen takımına indirgenmesi sırasında kullanılan φ açısı, faz gerilimleri ile uyarma alanı arasındaki açıdır ve yük açısı olarak tanımlanır.

Makinenin kontrolünde i_d ve i_q faz akımlarının genlikleri değiştirilerek geniş bir hız aralığında kontrolü sağlanır. MTPA algoritması ile sabit moment bölgesinde çalışırken temel mantık, mıknatıs momentini ile relüktans momentinin bileşiminin en büyük olduğu noktada motorun çalıştırılmasıdır. Bu sayede motordan en büyük moment alınabilmektedir. Bu nokta tasarlanan makineye göre değişiklik göstermektedir. Sabit güç bölgesinde yani alan zayıflatma kontrolünde ise bu durum değişmektedir. Belli bir hızdan sonra mıknatısların oluşturduğu zıt elektromotor kuvveti (EMK) batarya gerilimini aşar. Daha yüksek hızlara çıkılabilmesi için bu gerilimin, yani mıknatısların oluşturduğu akının azaltılması gerekir. Burada, faz gerilimleri ile uyarma alanı arasındaki yük açısı kontrol yöntemi ile değiştirilir. Bu, mıknatıslar tarafından üretilen momentin azaltılarak relüktans momentinin artırılması anlamına gelmektedir. Bu sayede sınırlı batarya gerilimi ile yüksek hızlara çıkılabilmektedir. Ancak bu durum mıknatıslara ters manyetik alan uygulanması anlamına gelmektedir [66]. Dolayısı ile mıknatısların kalıcı olarak demanyetize olma riski artar. Makinenin sabit batarya

geriliminde, yük açısının, hıza ve rotor çıkıklık miktarına bağlı olarak alabileceği değerler makine tasarımına göre 90° ile 180° arasında değişmekle birlikte tamamen relüktans momenti üreterek çalışan makinelerde bu açı 180° olmaktadır.

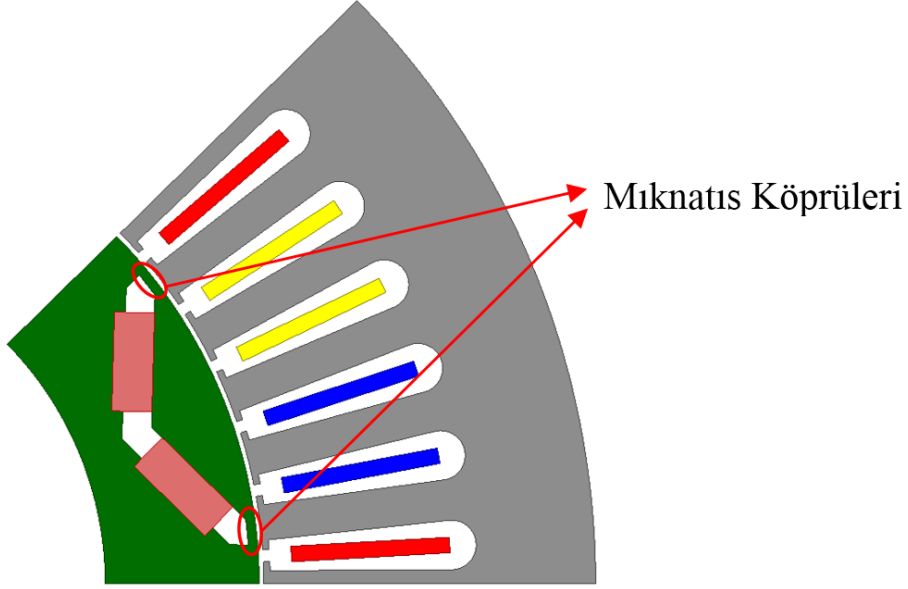


Şekil 5 : GSMSM rotorundan d-q eksen takımı

2.3 GSMSM Mekanik İncelemesi

GSMSM'lerin rotoru her ne kadar mekanik açıdan sağlam olsalar da bu ancak güvenilir bir tasarım sonucu olmaktadır. Bu tip makinelerin rotorunda oyuklar açılarak mıknatıslar bu oyuklara yerleştirilir.

EO için üretilen makineler yüksek hızlara çıkacağından, mıknatısı tutan nüve parçaları, yüksek merkezkaç kuvvetlerinden dolayı yüksek mekanik zorlanmalara maruz kalacaktır. Mıknatısı tutan bu mıknatıs köprüleri temsili olarak Şekil 6' da gösterilmiştir. Şekilde mıknatıs uç kısımlarında iki tane mıknatıs köprüsü bulunmaktadır.



Şekil 6 : Mıknatıs köprülerinin gösterimi

Mıknatıs köprüleri, mıknatısları rotor içerisinde sabit tutarken, mıknatıs akısı için düşük relüktans oluşturarak mıknatıs kaçak akısının artmasına sebep olmaktadır. Artan kaçak akı ile hava aralığındaki faydalı akı, dolayısı ile akı yoğunluğu ve güç yoğunluğu azalmaktadır. Bu sebeple mıknatıs köprüleri elektromanyetik açıdan olabildiğince ince tasarlanmalıdır. Ancak çok ince tasarlanan mıknatıs köprüleri yüksek merkezkaç kuvvetlerine dayanamaz ve rotorun kalıcı olarak şekil değiştirmesine ve hatta tek parça yapısının bozulmasına sebep olabilir. Bu durumların önüne geçilmesi açısından mıknatıs köprü tasarımı hassasiyetle yapılmalıdır.

2.4 Makinenin Isıl İncelemesi

Makineyi oluşturan malzemelerin sıcaklık ile özellikleri değişebilmekte hatta faydalı özellikleri kaybolabilmektedir. Özellikle SMSM' lerde NdFeB mıknatısların manyetik başarımı sıcaklık ile düşmekte dolayısı ile makinenin başarımını etkilemektedir. Bunun yanında NdFeB mıknatısların yüksek sıcaklıklarda ters manyetik alana maruz kalmaları, onların kalıcı olarak demanyetize olma riskini de beraberinde getirir. Böyle bir durumda makine başarımı kalıcı olarak düşer. Diğer taraftan makine sargılarını oluşturan bakır malzemesinin direnci de sıcaklık ile artmaktadır. Artan direnç beraberinde ilave kayıplara sebep olur ve bu durum makinenin daha fazla ısınmasına sebep olur. Tüm bunların yanında makinede ve bakırda kullanılan yalıtım malzemelerinin ömürleri yüksek sıcaklıklarda hızlı şekilde azalmakta ve hatta belli bir

sıcaklıktan sonra işlevini yerine getirememektedir. Bu sebeplerden ötürü makinenin çalışma sıcaklığı, başarımı ile yakından ilişkilidir [65].

Makinenin çalışma sıcaklığını belirleyebilmek için analitik yöntemler ve SEY kullanan bilgisayar programları vardır. Özellikle SEY ile makine sıcaklığı belirlenirken makinenin doğru bir şekilde modellenmesi büyük önem arz eder. Isıl analizlerde modelin doğru oluşturulabilmesi sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Bu amaçla makinenin birbirine dokunan parçaları arasındaki ısı iletkenlik belirlenirken bu parçalar arasındaki boşluk doğru tanımlanmalıdır [67, 68].

İmalattan kaynaklı ek kayıplar da makine ısıl modellemesinde önemlidir. Laminasyonların kaynak ile birleştirilmesi, paket halinde sıkıştırılması ve hatta kesim yöntemi ilave kayıplara sebebiyet vermektedir [69, 70]. Analizlerde bu gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır.

EO uygulamaları için kullanılan EM' ler her zaman en büyük gücünde çalışmaz. Araç en büyük gücünü ivmelenirken, özellikle durur vaziyette kalkış yaparken kullansa da, aracın yüksek eğimlerdeki en büyük hız sınırı da elektrik motorunun en büyük gücü ile ilişkilidir. Bazı kaynaklarda en büyük yüklenme durumunda EO' lar için en düşük çalışma süresi 30 dakika olarak tanımlanmıştır [71].



3. BAŞLANGIÇ TASARIMI VE EN UYGUNLAŞTIRMA

Makinenin ilk olarak analitik tasarımı genel bilgiler kısmında verilen analitik denklemler ve daha önceden imal edilmiş elektrik motoru bilgilerinden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir.

Analitik tasarımdan sonra makinenin elektromanyetik açıdan uygun, mekanik açıdan güvenilir olması adına en uygunlaştırmadan önce belli tasarım büyüklüklerine karar verilmelidir.

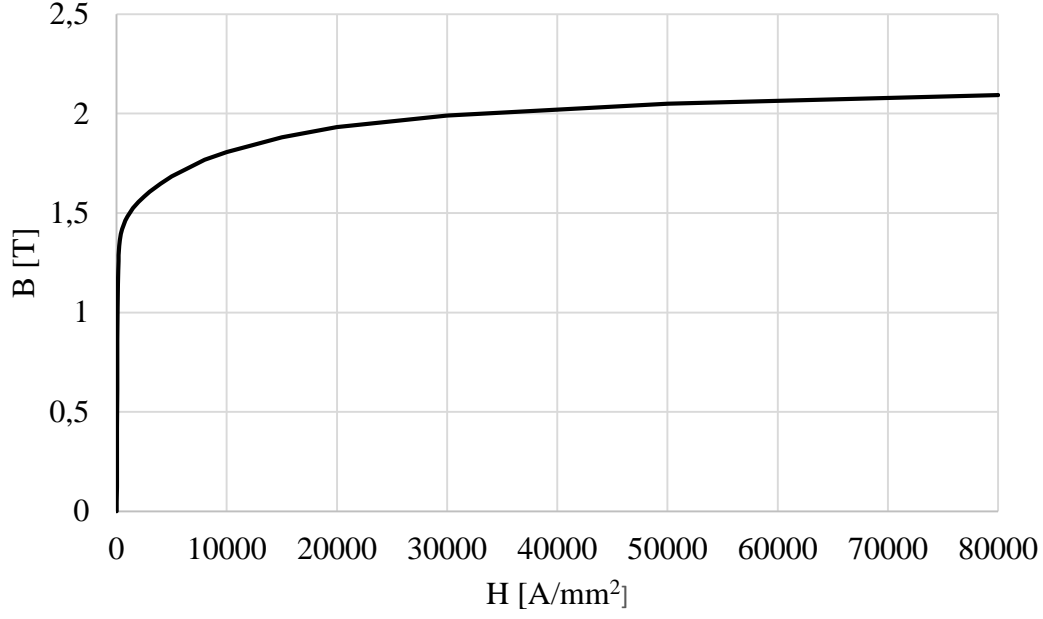
Mıknatıs uzunluğunun üretilen elektromanyetik momente etkisinin az olduğundan bölüm 2' de bahsedilmiştir. Bu sebeple mıknatıslar kalıcı demanyetize olmayacak şekilde en küçük uzunluk belirlenmelidir. Bu uzunluk belirlendikten sonra sabit büyüklük alınarak elektromanyetik en uygunlaştırma analizleri yapılmıştır.

Mıknatıs köprü boyutlandırılmasındaki ölçütlerden bölüm' 2 de bahsedilmiştir. Mekanik açıdan güvenilir bir rotor tasarımı için mıknatıs köprülerinin en küçük uzunluğu mekanik dayanım analizleri ile belirlendikten sonra bu boyutlar elektromanyetik en uygunlaştırma analizlerinde sabit büyüklük alınmıştır.

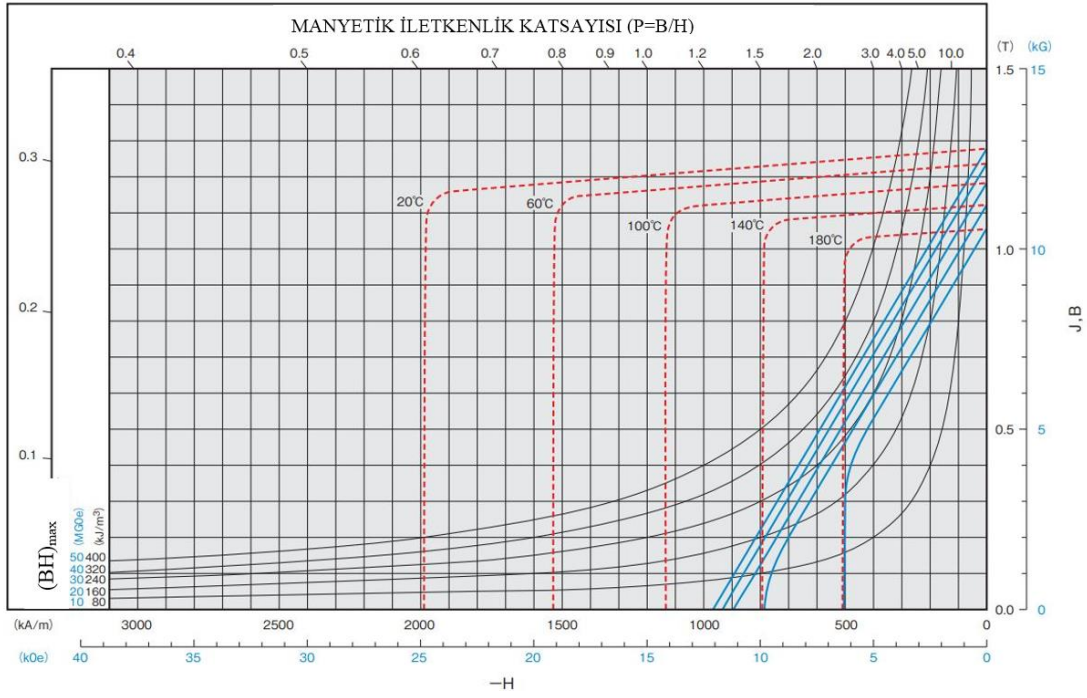
3.1 Analitik Tasarım

Tasarımda birim mıknatıs hacminden en verimli seviyede faydalanmak amacıyla V-SMSM tercih edilmiştir. Ayrıca bu yapının alan zayıflatma özellikleri de iyidir [14].

Makinede laminasyon malzemesi olarak 0,35 mm kalınlığında M270 çelik kullanılmıştır. Rotordaki uyartım ise S41EH NdFeB mıknatısları ile sağlanmıştır. Malzemelerin özellikleri sırası ile Şekil 7' de ve Şekil 8' da verilmiştir. Mıknatıslar Şekil 8' de görüldüğü üzere 180 °C sıcaklıkta çalışabilecek şekilde seçilmiştir. Yine de ters manyetik alanda kalıcı demanyetize olma durumları detaylı incelenmelidir.



Şekil 7 : Laminasyon malzemesi M270 35A [72]



Şekil 8 : Mıknatıs NdFeB S41EH [28]

Makinenin genel bilgiler kısmında verilen analitik denklemler ile tasarımı sonucu elde edilen büyüklükleri Çizelge 3.1' de verilmiştir. Ayrıca kutup sayısı, paralel kol sayısı, stator iç çapı, üretilebilirlik göz önünde bulundurularak oluk sayısı 60, paralel kol sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Tek tabakalı oluk tasarımı seçilerek oluk doluluk oranı yüksek tutulmuş, faz direnci azaltılmıştır. Bu sarım şekline uygun bobin adımı 6, her

bir iletken 13 paralel AWG 20,5 kısmi iletken oluşturulmuştur. Tasarımda ticari araç modellerinin elektrikli araçları referans alınarak oluk doluluk oranı %47 belirlenmiştir.

Çizelge 3.1 : Temel Tasarım Büyüklükleri

Özellik	Birim	Değer
Nominal Batarya Gerilimi	V_{dc}	360 V
En yüksek faz akım (tepe değer)	I_{mak}	530 A
En yüksek hız	n_{ey}	12000 min ⁻¹
Kutup sayısı	$2p$	10 adet
Stator dış / iç çapı	D_i/D_o	167 / 245 mm
Stator uzunluğu	L_{skt}	136 mm
Sargı faktörü	k_w	0,977
Oluk sayısı	N	60 adet
Hava aralığı genişliği	g	0,7 mm
Mıknatıs uzunluğu	l	7 mm

Bu kısımda yapılan mıknatıs uzunluğunun belirlenmesi ve elektromanyetik en uygunlaştırma analizlerinde sargı ve mıknatıs sıcaklıkları göz önünde bulundurulmuştur.

3.2 Mıknatıs Uzunluğunun Belirlenmesi

Mıknatısların uzunluğu motorun en kötü çalışma şartlarında bile kalıcı demanyetize olmayacak şekilde belirlenmelidir. Bu amaçla mıknatıslar yük açısı hatasına da dayanacak şekilde aşağıdaki koşullarda demanyetizasyon analizleri yapılmıştır:

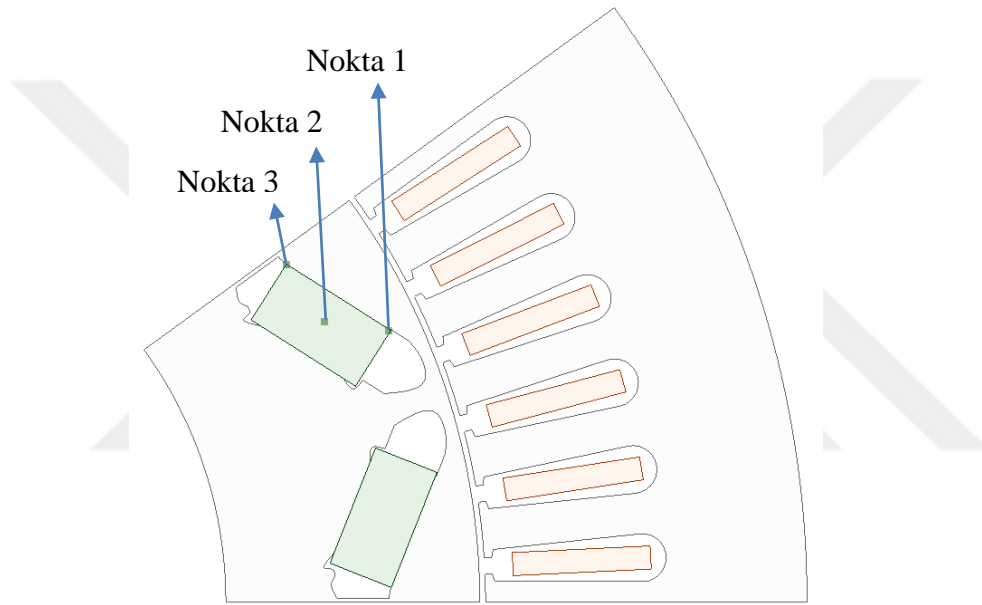
- Yük açısı 180 ° iken mıknatısların 140 °C' ye ulaştığı durum
- Yük açısı 180 ° iken mıknatısların kalıcı olarak demanyetize olmaya başladığı sıcaklık

Yapılan analizlerde mıknatısın Şekil 9' da gösterilen 3 noktası belirlenmiş ve bu noktalarda uyartıma bağlı olarak değişen B-H değerleri mıknatısın o sıcaklıktaki histerisis eğrisi üzerine Şekil 10' da ve Şekil 11' de çizdirilmiştir.

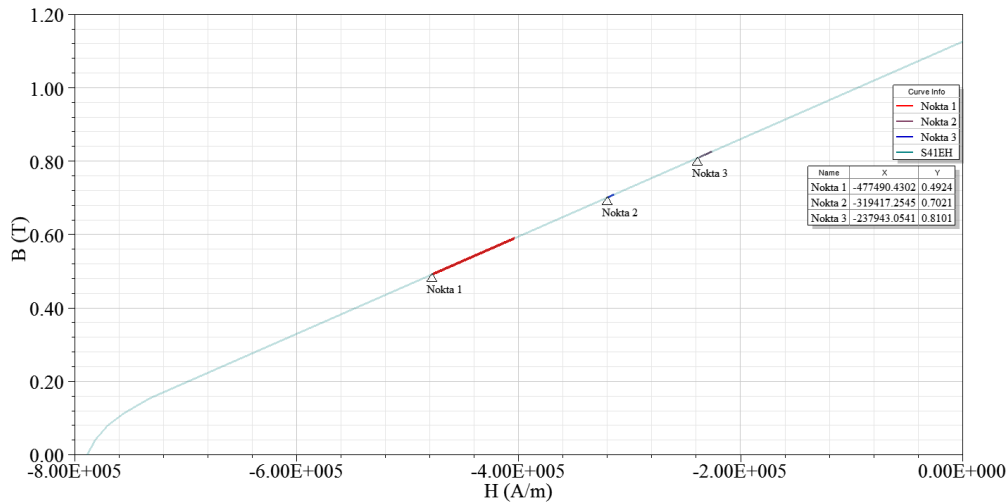
Şekil 10' da 140 °C sıcaklıkta mıknatıs ters manyetik alana maruz kaldığında Şekil 9' da belirtilen noktalarda akı yoğunluğu azalmış, ancak manyetik alan azaldığında bu noktalardaki akı yoğunluğu yeniden eski değerine aynı yoldan ulaşabilmiştir. Nokta 1 üzerinde mıknatısın manyetik akı yoğunluğu 0,4924 T değerine düşmesine rağmen, bu nokta, mıknatısın dirsek bölgesinin üzerinde kaldığından mıknatıs kalıcı olarak demanyetize olmamıştır.

Diğer taraftan Şekil 11’de mıknatıs sıcaklığı 180 °C’ ye çıkarıldığında 1 noktasındaki akı yoğunluğu 0.4455 T değerine düşmüştür. Bu değer dirsek bölgesindedir. Bu durumda mıknatıs 1 noktasından demanyetize olmaya başlamıştır.

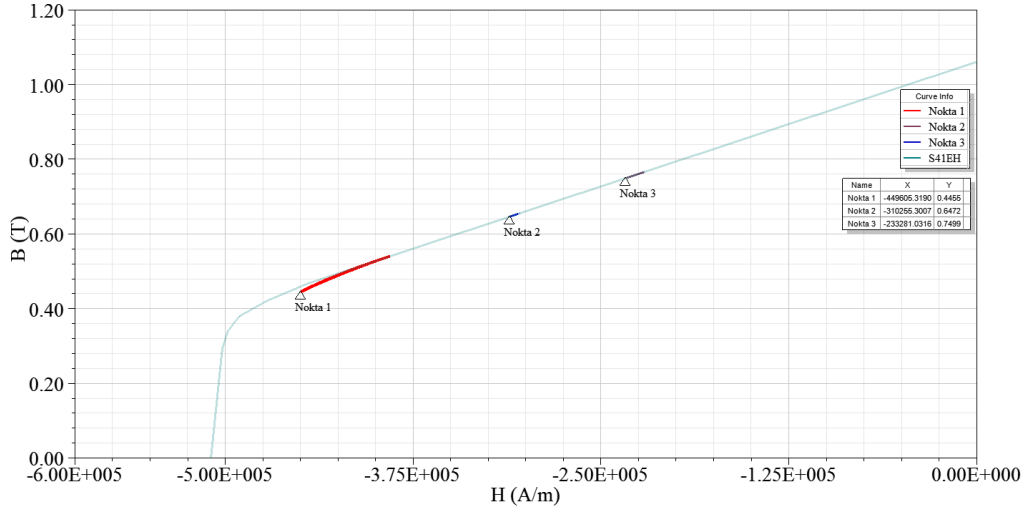
Şekil 11’ dan anlaşılacağı üzere mıknatısların sıcaklığının 180 °C’ ye ulaşması 180° yük açısında makine için uygun olamayacaktır. Makine en büyük gücü belirlenirken bu durum göz önünde bulundurulacaktır. Ayrıca Şekil 10’ dan ve Şekil 11’ den NdFeB mıknatısların demanyetizasyona karşı dirençleri sıcaklıktan çok fazla etkilendiği ve mıknatısların en çok demanyetize olduğu kısmın mıknatısların hava aralığına en yakın olan bölgesinde gerçekleştiği çıkarılmaktadır.



Şekil 9: Demanyetizasyon analizinde incelenen mıknatıs kısımları



Şekil 10 : 140 °C’ de mıknatıs üzerindeki noktaların uyartıma bağlı olarak B-H değişimi (X, Y değerleri üçgen şeklinin kordinatlarını göstermektedir)

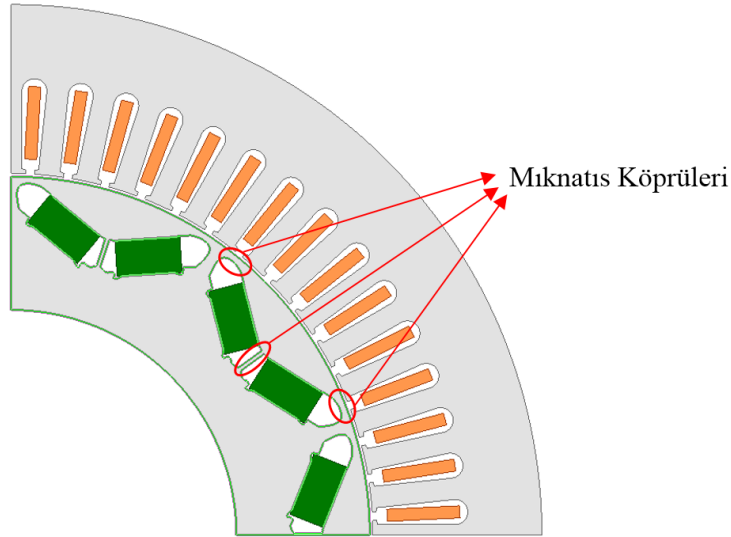


Şekil 11 : 180 °C’ de mıknatis üzerindeki noktaların uyarıtıma bağlı olarak B-H değişimi (X, Y değerleri üçgen şeklinin kordinatlarını göstermektedir)

3.3 Mekanik Dayanım Analizleri

Başlangıç tasarımında mıknatisı tutan bu mıknatis köprüleri Şekil 12’ de gösterilmiştir. Tasarımda iki tane mıknatis uç kısımlarında bir tane ise iki mıknatis arasında olmak üzere üç parça mıknatis köprüsü bulunmaktadır.

Tasarımın bu aşamasında mekanik analizler yapılarak mıknatis köprüleri için en küçük boyut belirlenmiştir. Bu sayede bilgisayar destekli elektromanyetik en iyileştirmede mıknatis köprü uzunlukları sabit parametre olarak kabul edilebilmiştir.

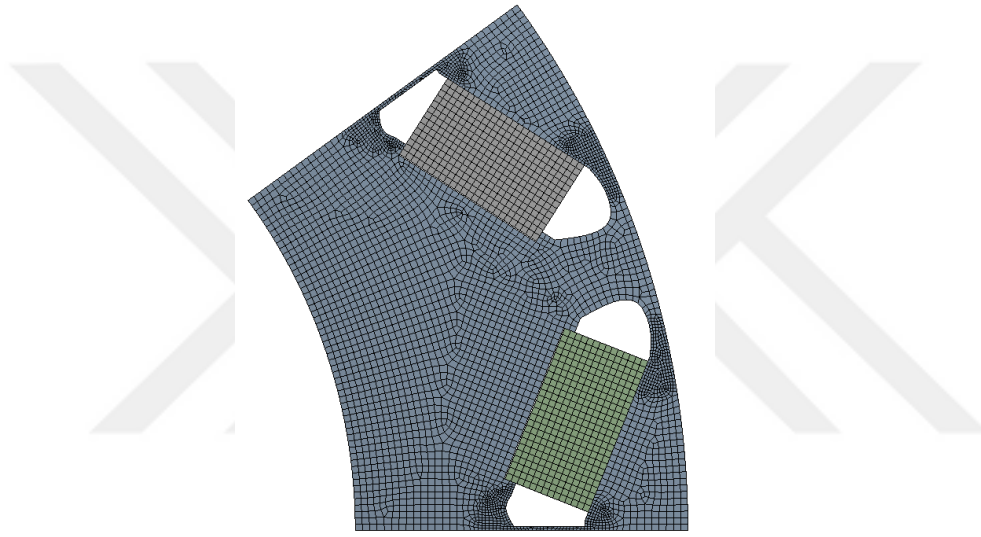


Şekil 12 : Başlangıç tasarımında mıknatis köprü kısımlarının gösterimi

Mekanik SEA' larda simetri koşulu ile 1/5 geometri kullanılmış ve geometri 12 000 min^{-1} hızda döndürülmüştür. Mekanik zorlanacak bölgeler dikkate alınarak dikdörtgen ağ Şekil 13' deki gibi tanımlanmıştır. Tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Mekanik analizler için malzeme özellikleri

Özellik	Birim	M270-35A	NdFeB
Yoğunluk	kg/m^3	7650	7500
Young modülü	MPa	185000	150000
Poisson oranı	-	0,29	0,24
Gerilme dayanımı	MPa	450	70

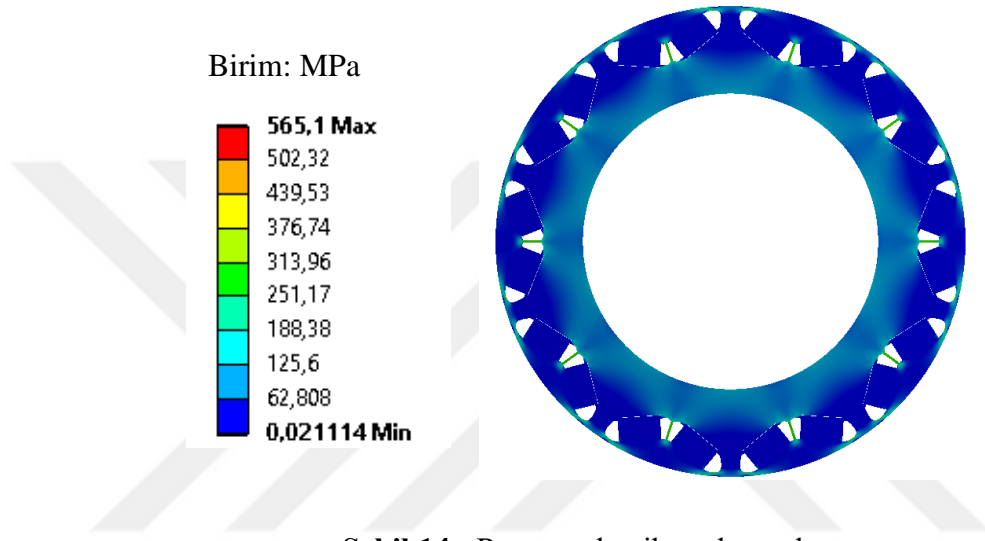


Şekil 13 : Mekanik analizler için ağ yapısı

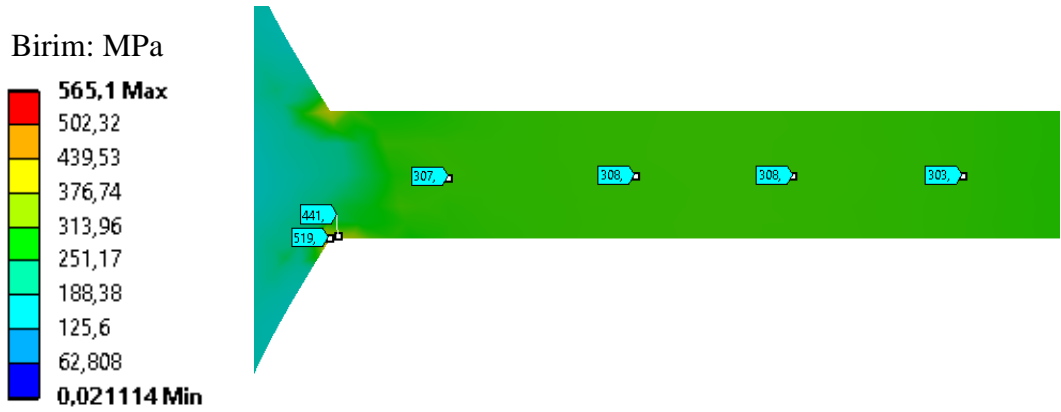
Makinenin imalatı sırasında mıknatıslar, mıknatıs yuvalarına yapıştırılır. Ancak yüksek hızlarda uzun süre çalışan makinede bu yapıştırıcı özelliğini kaybedebilir. Bu durumun oluşması rotordaki mekanik zorlanmaları artıracaktır. Bu nedenle, analizlerde en kötü durumu inceleyebilmek amacı ile mıknatıslar yapıştırılmadan modellenmiştir.

Elde edilen analiz sonuçlarında tam geometri üzerinde dönmeden kaynaklanan mekanik kuvvetler Şekil 14' de verilmiştir. Bu mekanik zorlanmalar Şekil 15' de ve Şekil 16' da detaylı incelenmiştir. Mıknatıs ortasındaki mıknatıs köprüsünde, bazı noktalarda güvenlik sınırı olan 450 MPa değeri aşılmış, rotor köşeli geometriden dolayı 519 MPa değerine çıkan kuvvetlere maruz kalmıştır. Bu köşeli yapı elektromanyetik en iyileştirmeden sonra düzeltilerek yeniden analiz edilmiş ve bu

kısımdaki gerilmeler Şekil 17’ de görüldüğü üzere azaltılmıştır. Mıknatıs uçlarındaki mıknatıs köprüsünde ise gerilmeler tehlikeli sınırlara ulaşmamıştır. Mıknatıs köprülerinde en yüksek gerilme değeri 340 MPa olarak tasarım yapılmış ve böylece bir miktar da güvenlik payı bırakılmıştır. Şekil 18’ de ise gerilmelerden kaynaklı malzemedeki toplam şekil değiştirme verilmiştir. Şekil 18’ deki görselde yer değiştirme normalden 130 kat abartılarak oluşturulmuştur. Malzemedeki yer değiştirmenin en büyük değeri 0,044 mm’ dir.

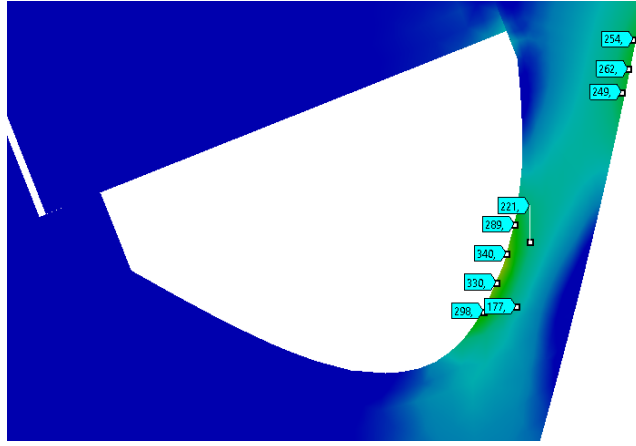
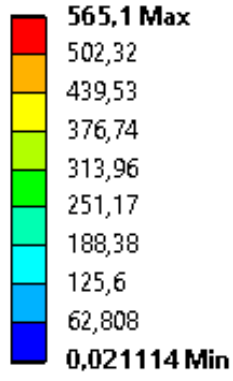


Şekil 14 : Rotor mekanik zorlanmaları



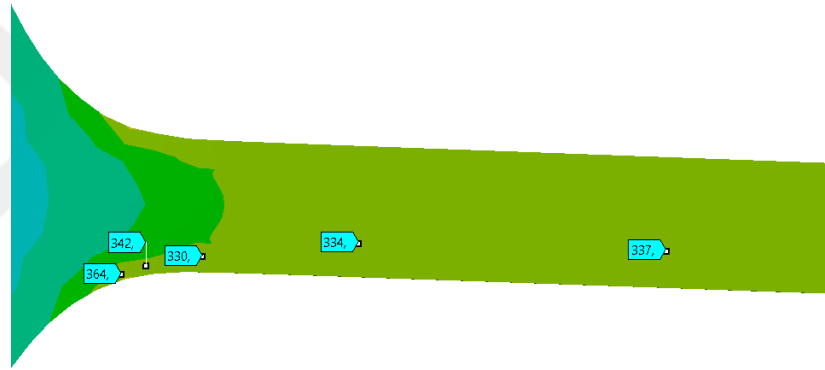
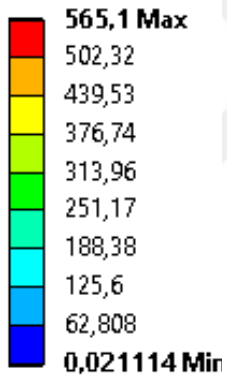
Şekil 15 : Başlangıç tasarımı mıknatıs köprüsü orta kısım mekanik kuvvetler

Birim: MPa



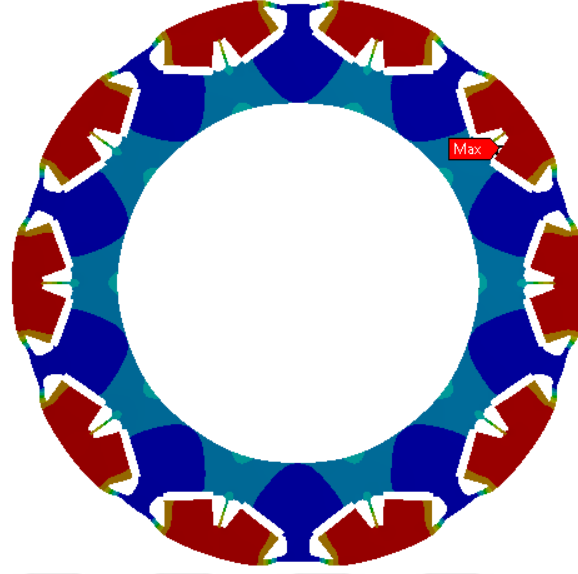
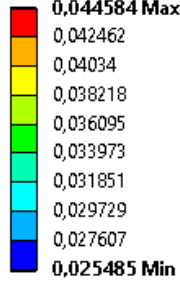
Şekil 16 : Başlangıç tasarımı mıknatıs köprüsü uç kısımları mekanik kuvvetler

Birim: MPa



Şekil 17 : En uygunlaştırma sonrası orta kısım gerilme kuvvetleri

Birim: mm

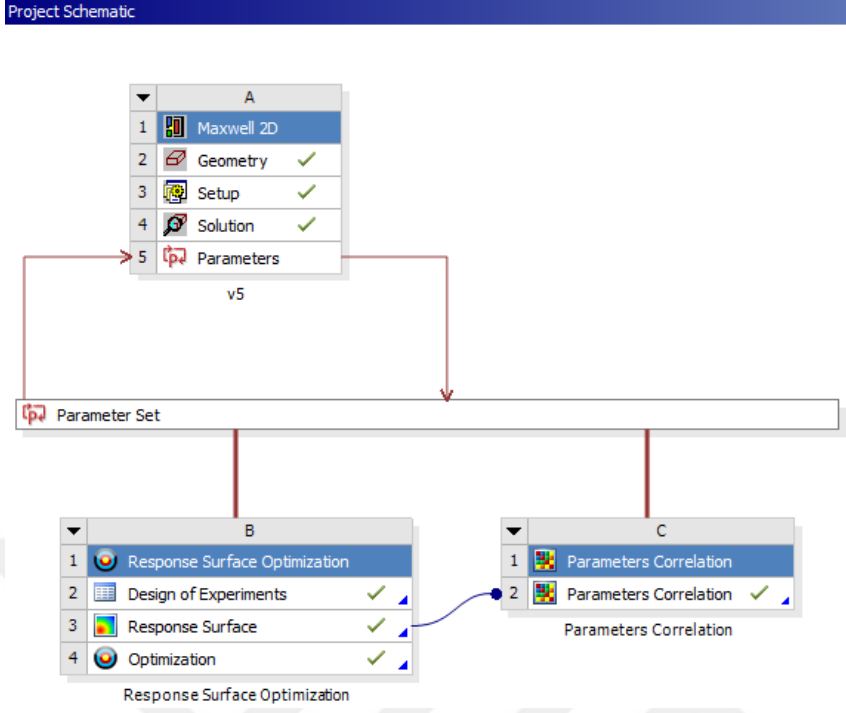


Şekil 18 : Toplam şekil değiştirme (130 kat abartılmış görüntü)

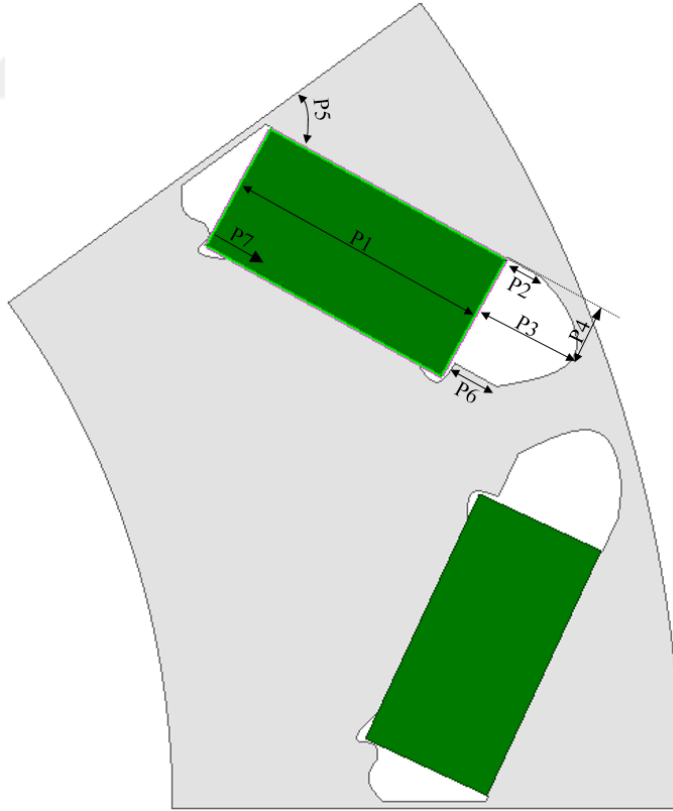
3.4 Makine Elektromanyetik En Uygunlaştırılması

Temel boyutları belirlenen makinenin Ansys Electronic Desktop’ da iki boyutlu, 40 değişkene bağlı geometrisi oluşturulmuştur. Bu değişkenler, makinenin boyutlarının hızlı bir şekilde değiştirilmesini, böylece farklı güçte ve boyutta makine tasarımının hızlıca yapılabilmesini sağlarken, makine başarımının bilgisayar destekli programlar yardımı ile bu değişkenlere bağlı olarak en iyileştirilmesine ve uygunlaştırılmasına da olanak sağlamaktadır.

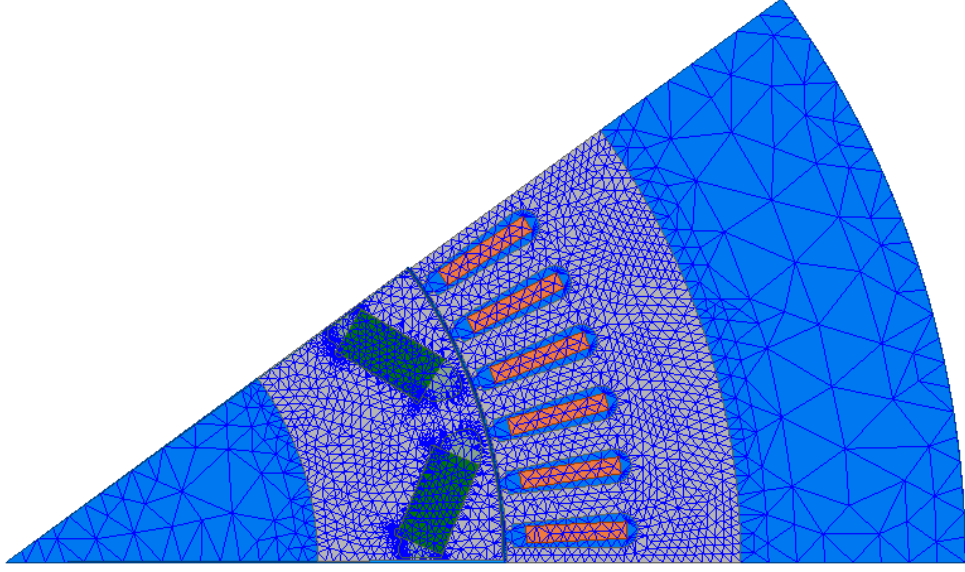
Çalışmanın bu kısmında, değişkenlere bağlı model, Ansys Electronics Desktop yazılımı üzerinden oluşturulmuş ve Ansys Design Exploration ve Response Surface Optimization araçları ile en uygunlaştırılmıştır. En uygunlaştırmada başarımlar ölçütü olarak en yüksek moment, en yüksek moment/mıknatis hacmi oranı, en düşük moment dalgalılığı alınmıştır. Bu amaçla, rotorda başarımlar ölçütlerine etkisi fazla olacağı düşünülen 6 adet değişken seçilmiştir. Bu değişkenlerin en uygunlaştırma sırasında olası en yüksek ve en küçük sınırları da belirlenmiştir. Bu sınırlar sayesinde rotor bölümlerinin birbiri ile girişim oluşturması önlenmekte ve mantıklı sınırlar içerisinde analiz yapılması sağlanmaktadır. Bu değişkenler Şekil 19’ da, Ansys Workbench’ de kurulan model Şekil 20’ de ve geometrinin ağ yapısı Şekil 21’ da gösterilmiştir.



Şekil 19 : Ansys Workbench çalışma alanı



Şekil 20 : Değişkenlerin model üzerinde gösterimi



Şekil 21 : Elektromanyetik en uygunlaştırma ve elektromanyetik tasarımın detaylı incelenmesi için oluşturulan ağ yapısı

Değişkenlerden P1 mıknatıs kalınlığını, P2 akı engeli Şekil 20' gösterilen uzunluğunu, P3 akı engeli Şekil 20' de gösterilen doğrultuda mıknatısa olan dik uzaklığını, P4 akı engeli Şekil 20' de gösterilen doğrultuda dik uzaklığı, P5 mıknatıslar arasındaki açıyı, P6 akı engeli Şekil 20' de gösterilen uzunluğunu, P7 mıknatısın yuvası içerisindeki konumunu göstermektedir. Bunlardan P2' nin artması ile mıknatıs ve mıknatıs yuvaları rotor merkezine doğru kaymakta, böylece mıknatıs köprüsünün uzunluğu sabit tutulmaktadır. Diğer değişkenler makine boyutlarından ve birbirinden bağımsızdır.

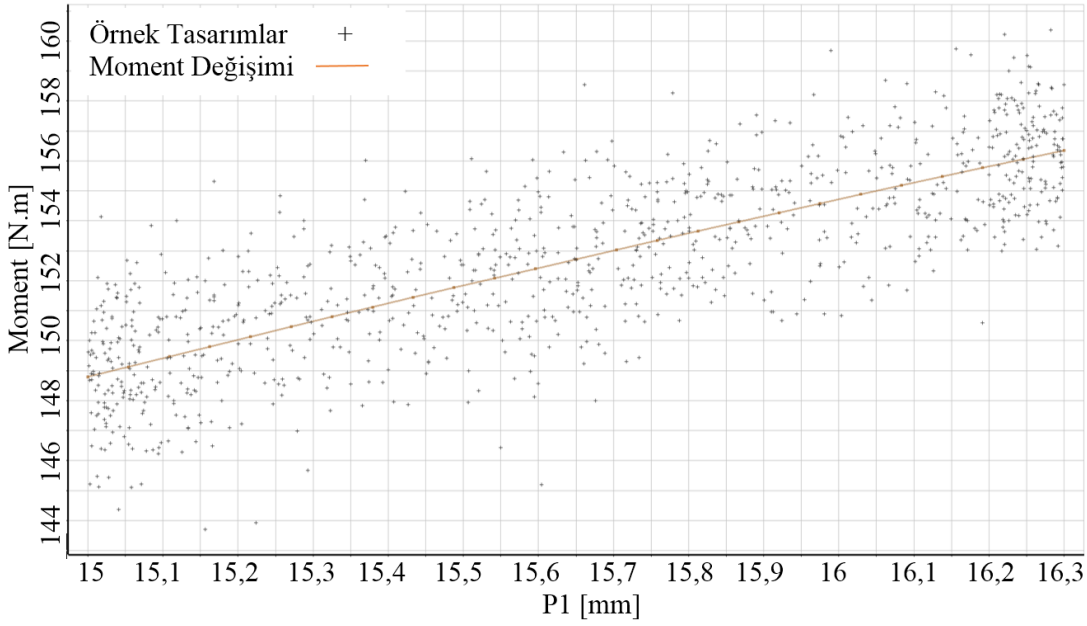
Rotor üzerinde belirlenen 6 adet değişkene bağlı olarak 1000 farklı örnek tasarım Ansys Response Surface Optimization üzerinden oluşturulmuştur. Her bir örnek tasarımın Ansys Electronics Desktop' da zamana bağlı otomatik SEA' ları yapılmıştır. Örnek tasarımlar oluşturulurken sadece bir değişken değil aynı andan birden fazla değişkenin değeri farklılık göstermektedir. Bu nedenle yapılan analizlerden sadece bir değişkenin doğrudan etkisinin görülmesi olanaklı olmasa da örnek tasarım sayısının fazla oluşu bu etkinin dolaylı olarak gözlemlenebilmesini sağlamıştır.

Analizler sonucu elde edilen, makine tasarım ölçütlerinin 6 adet değişkene bağlı değişimi elde olunmuş ve bu değişimlerin her bir değişkene bağlı detaylı incelemesi yapılmıştır.

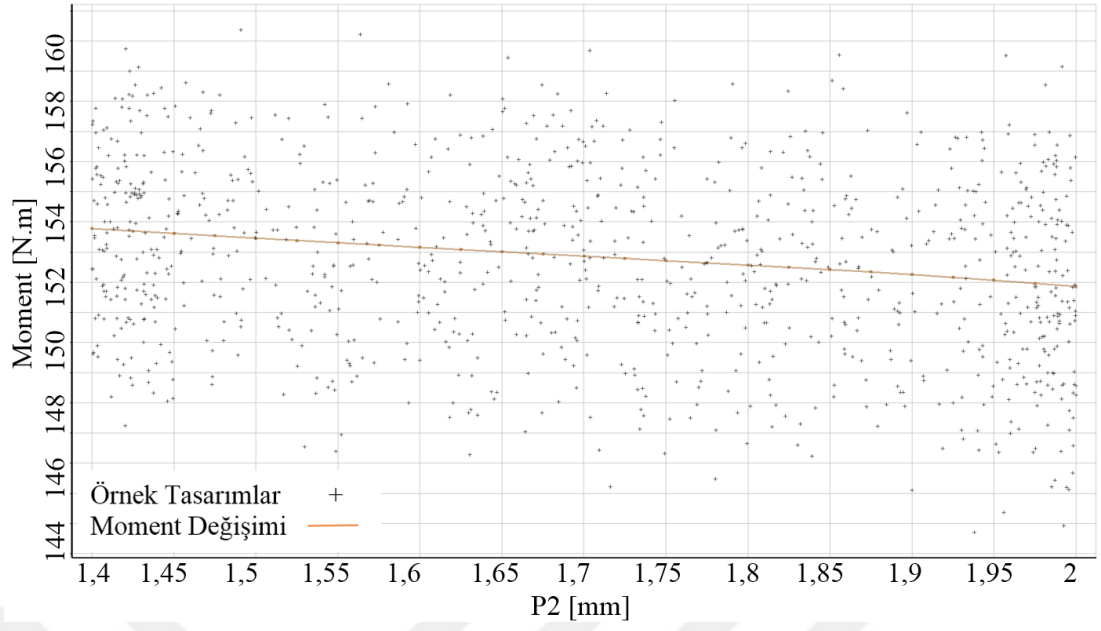
3.4.1 Tasarım değişkenlerin moment bileşenine etkisi

En uygunlaştırma amacıyla yapılan analizler sonucu her bir tasarım değişkeninin moment bileşeni ile değişimine bu bölümde yer verilmiştir. Grafiklerdeki çizgi örnek tasarımların ilgili motor başarımına ortalama etkisini göstermektedir.

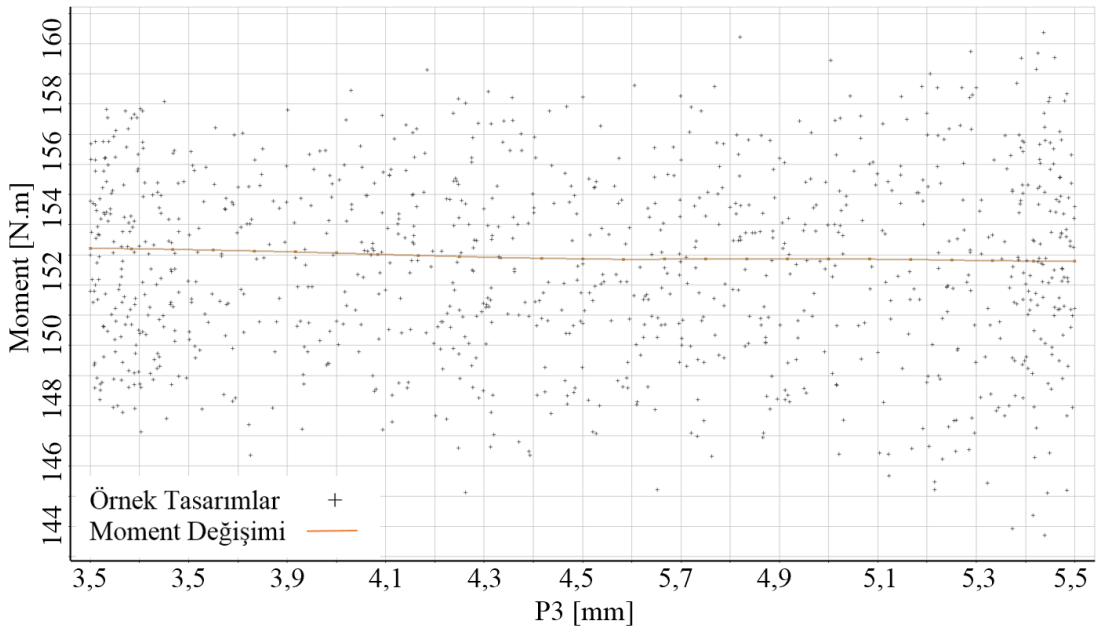
Şekil 22’ de momentin tasarım değişkenlerinden P1’ e bağlı değişimi elde edilmiştir. P1 mıknatıs uzunluğu ile moment belirgin bir şekilde artmakta mıknatıslar arası açı P5 ile Şekil 26’ da görüldüğü üzere azalmaktadır. Sırasıyla Şekil 23, Şekil 24, Şekil 25 ve Şekil 27 de görüldüğü gibi P2, P3, P4, P6 akı engeli değişkeninden az miktarda veya hiç etkilenmemektedir. Mıknatısın boşluk içerisindeki konumunu belirten P7’ nin ise momente etkisi Şekil 28’ de görüldüğü üzere olmamıştır. Şekil 29’ da bütün değişkenlerin birden üretilen elektromanyetik momente etkisi bir grafik üzerinde verilmiştir.



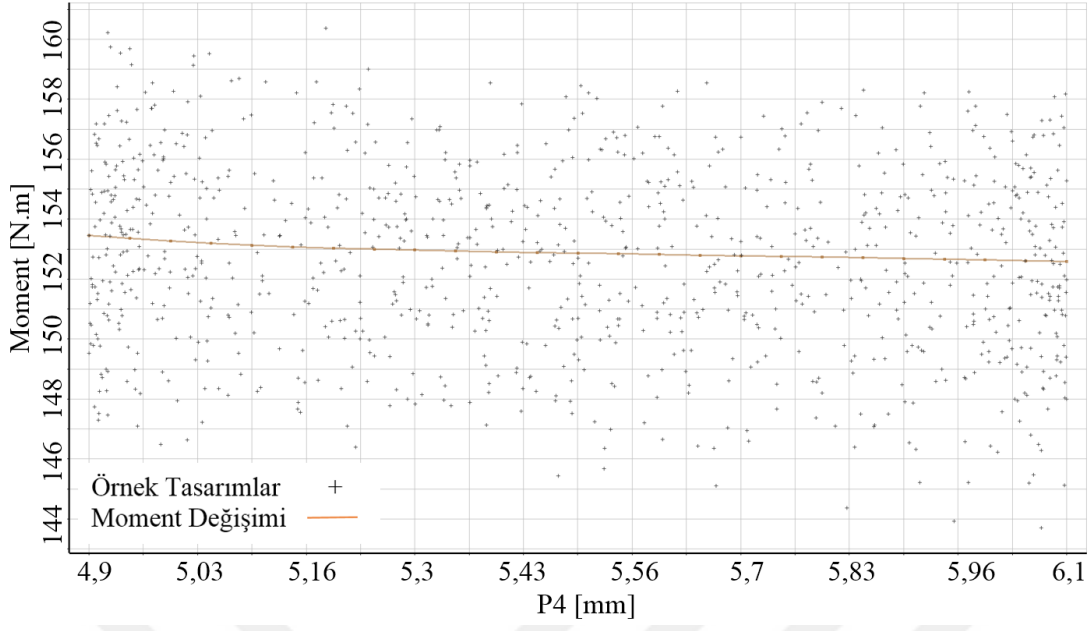
Şekil 22 : Örnek tasarımların P1 ile moment değerleri



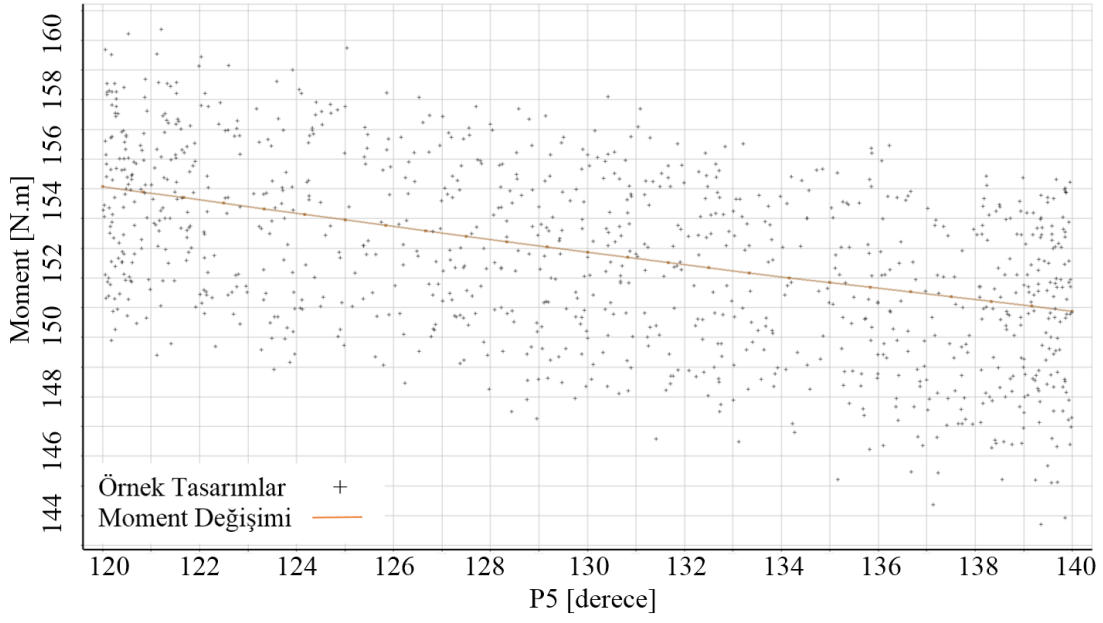
Şekil 23 : Örnek tasarımların P2 ile moment değerleri



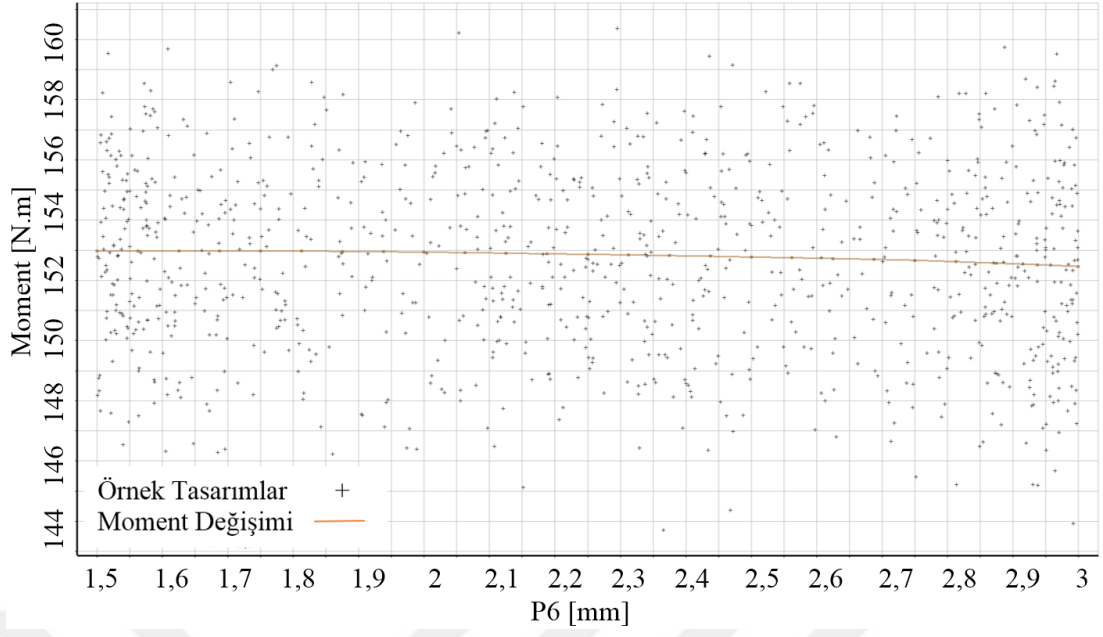
Şekil 24 : Örnek tasarımların P3 ile moment değerleri



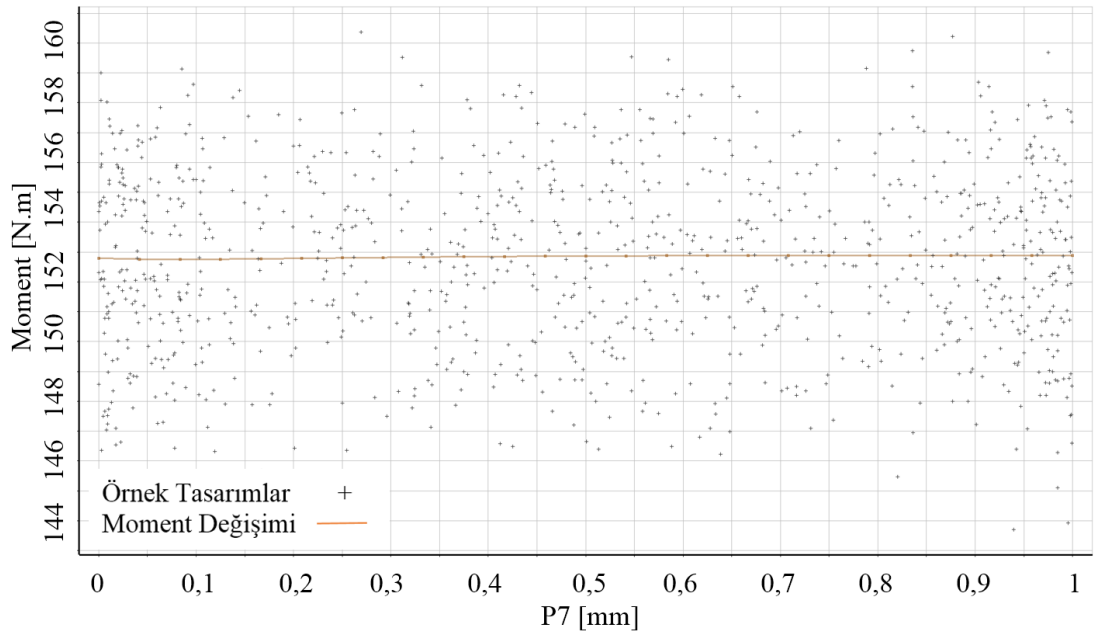
Şekil 25 : Örnek tasarımların P4 ile moment değerleri



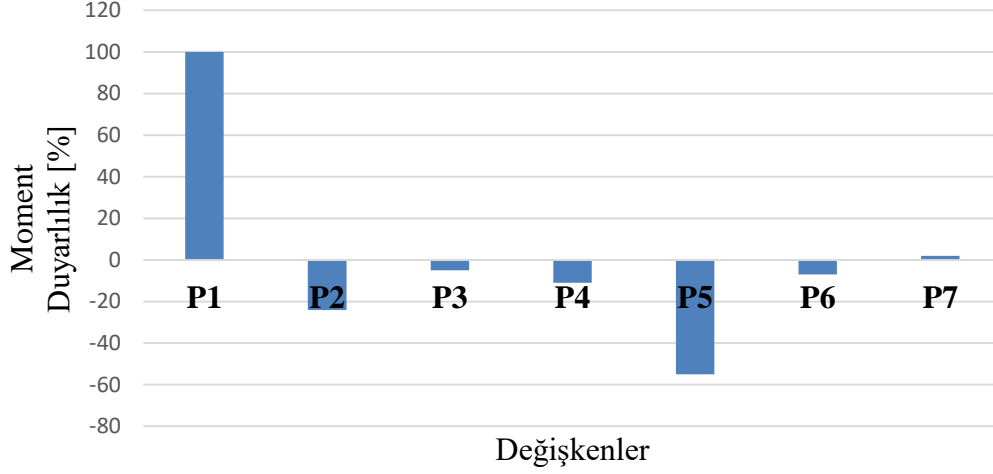
Şekil 26 : Örnek tasarımların P5 ile moment değerleri



Şekil 27 : Örnek tasarımların P6 ile moment değerleri



Şekil 28 : Örnek tasarımların P7 ile moment değerleri

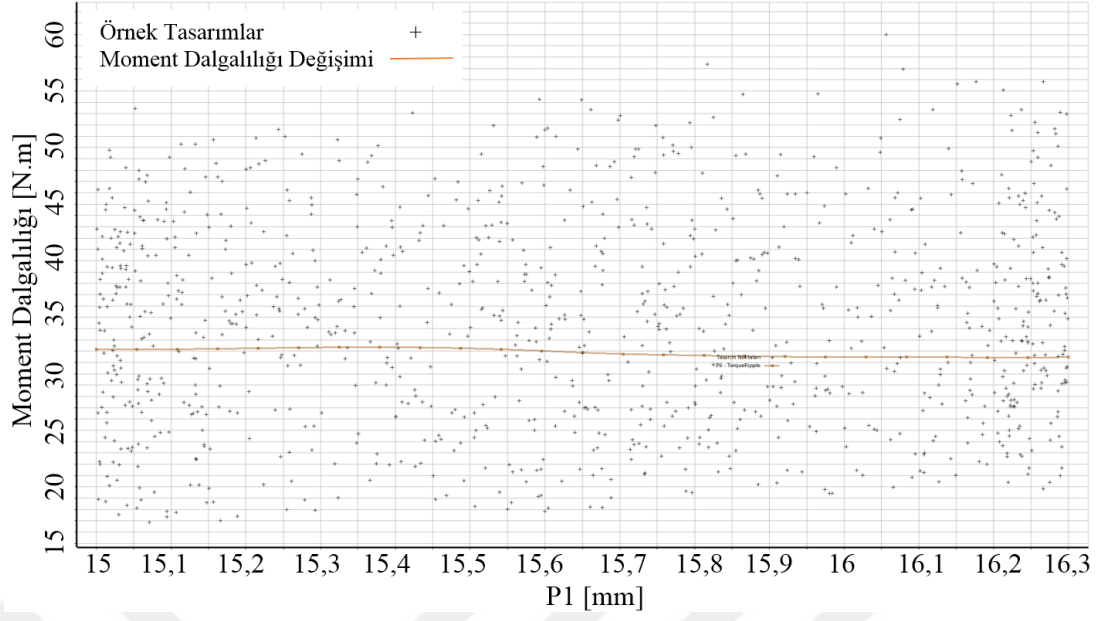


Şekil 29 : Moment duyarlılık analizi sonuçları

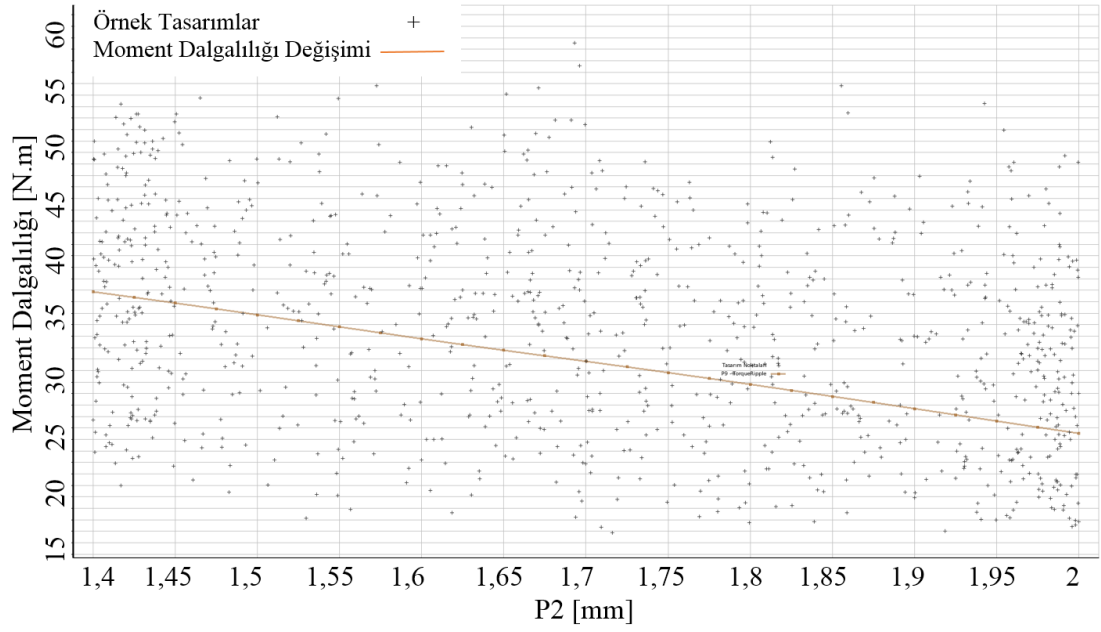
3.4.2 Tasarım değişkenlerin moment dalgalılığına etkisi

Bu kısımda rotor tasarım değişkenlerinin moment dalgalılığına etkisi grafikler ile verilmiştir. Grafiklerdeki çizgi örnek tasarımların ilgili motor başarımına ortalama etkisini göstermektedir.

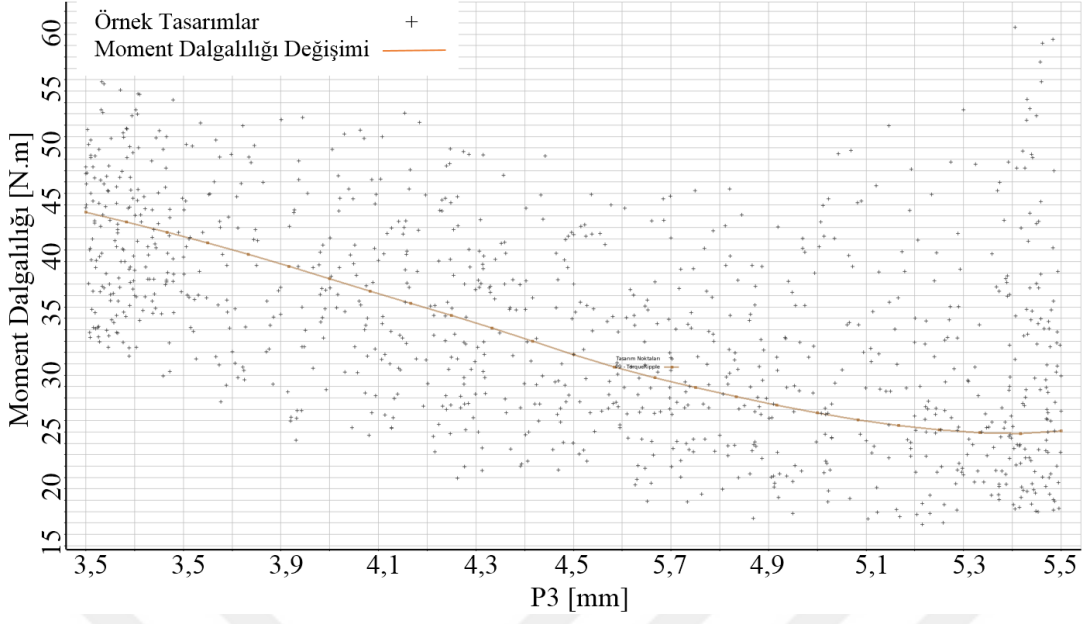
Şekil 30' da moment dalgalılığının (P1) mıknatıs kalınlığı ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere moment bileşeninde en etkili olan tasarım büyüklüğü moment dalgalılığında hiç etkili değildir. Moment dalgalılığına olumlu etki yapan değişkenler sırasıyla P2 Şekil 31, P3 Şekil 32 ve P5 Şekil 34 ile gösterilmiştir. P3 ve P5 değişkenleri moment dalgalılığını bir seviyeye kadar düşürmüştü ancak daha sonra bu etki azalmıştır. P4 Şekil 33, P6 Şekil 35 ve P7 Şekil 36 ile gösterilmiştir. Bu değişkenlerin moment dalgalılığına etkisi olmamıştır. Şekil 37' de bütün değişkenlerin moment dalgalılığına etkileri bir grafikte verilmiştir.



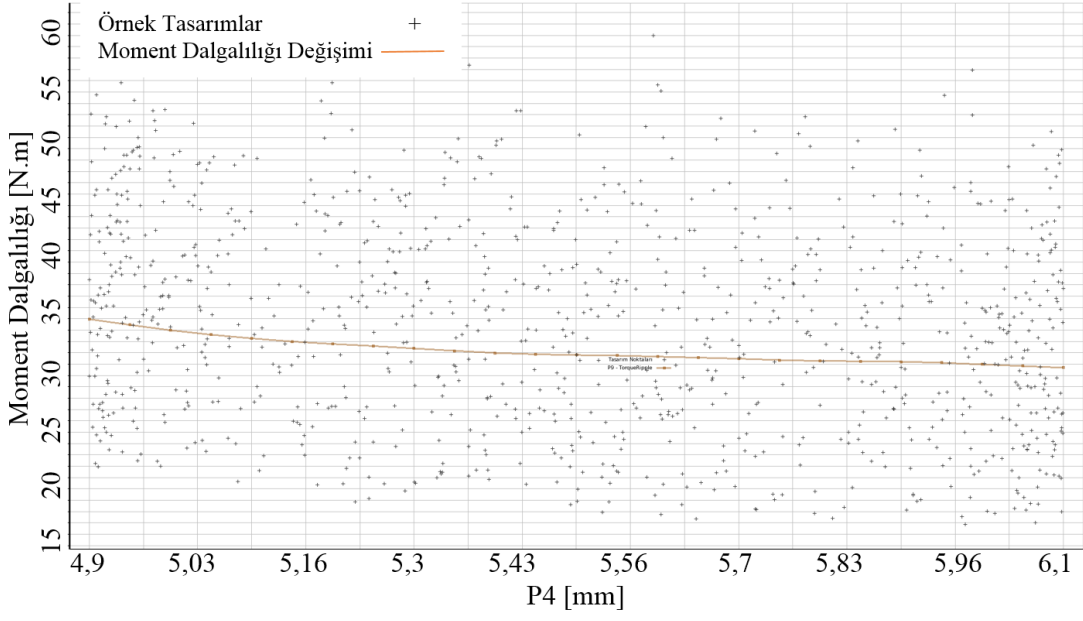
Şekil 30 : Örnek tasarımların P1 ile moment dalgallığı değerleri



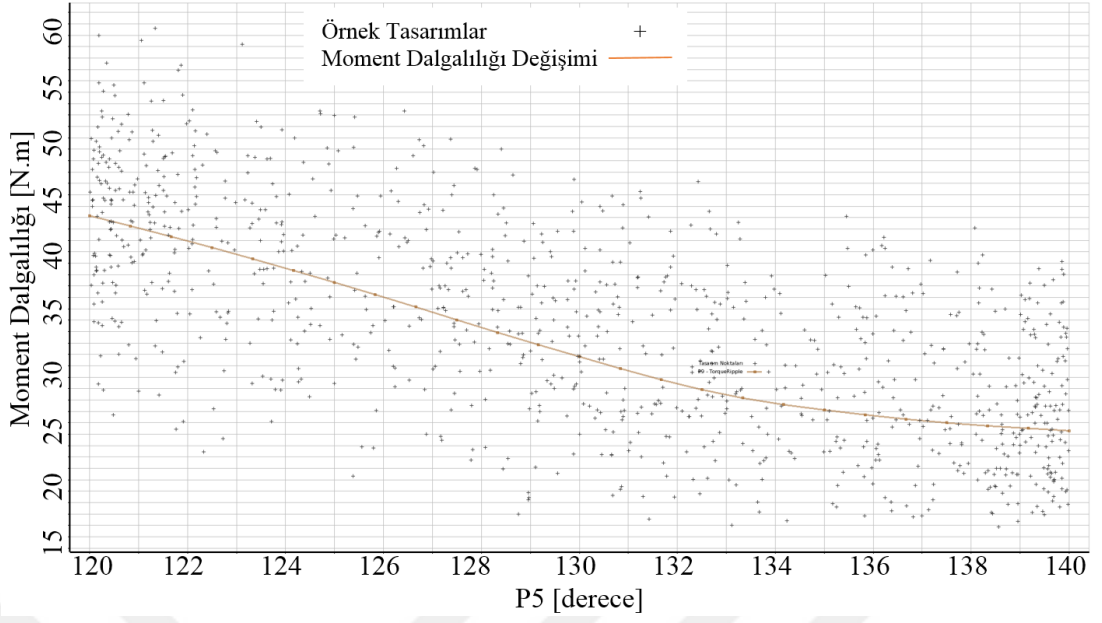
Şekil 31 : Örnek tasarımların P2 ile moment dalgallığı değerleri



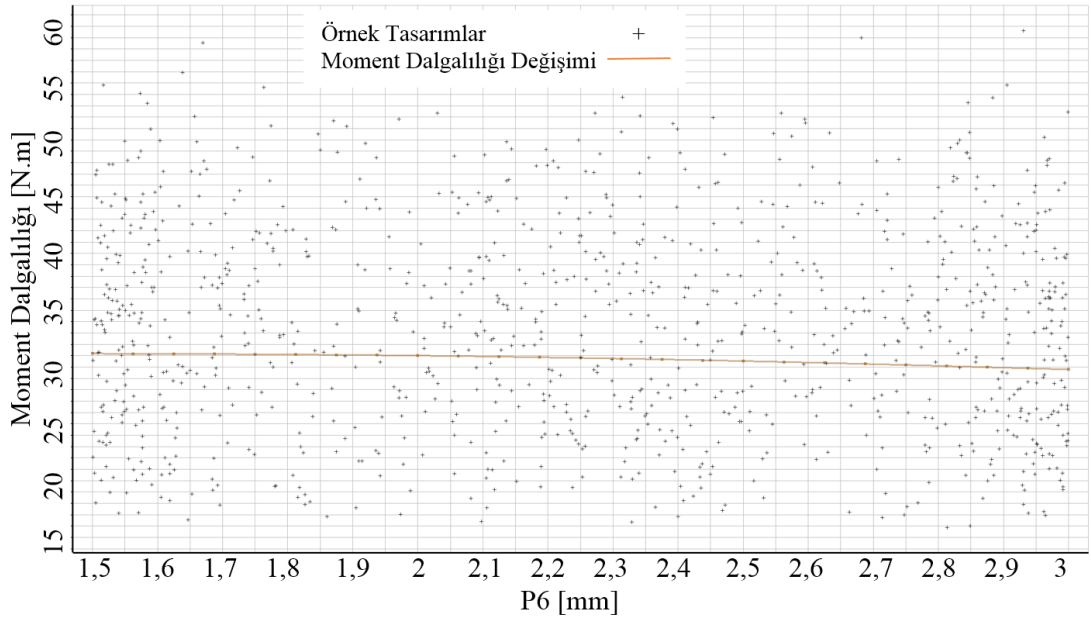
Şekil 32 : Örnek tasarımların P3 ile moment dalgallığı değerleri



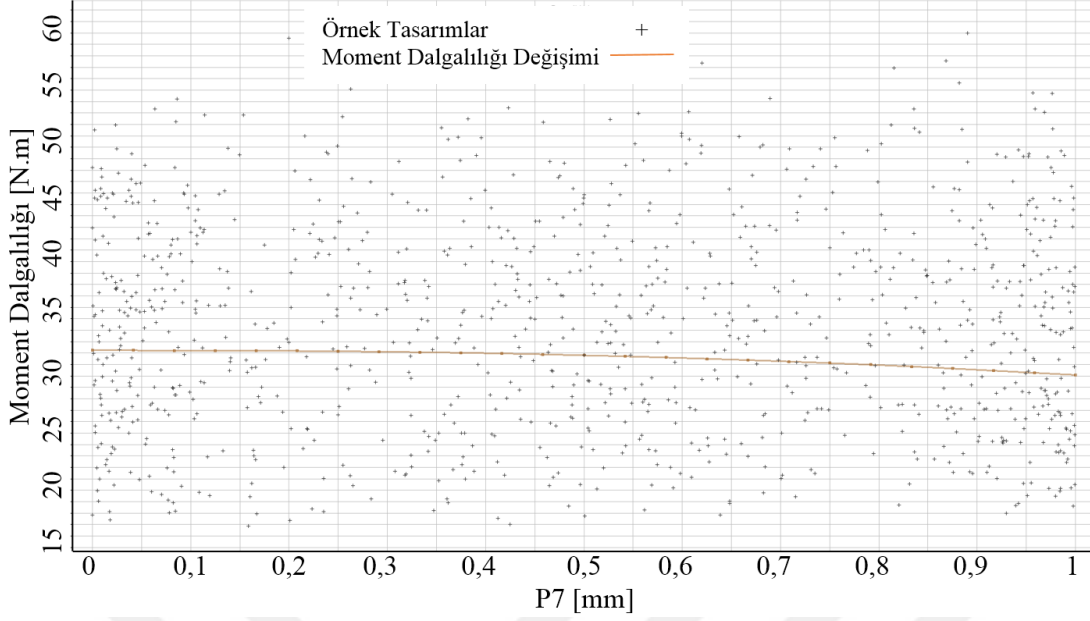
Şekil 33 : Örnek tasarımların P4 ile moment dalgallığı değerleri



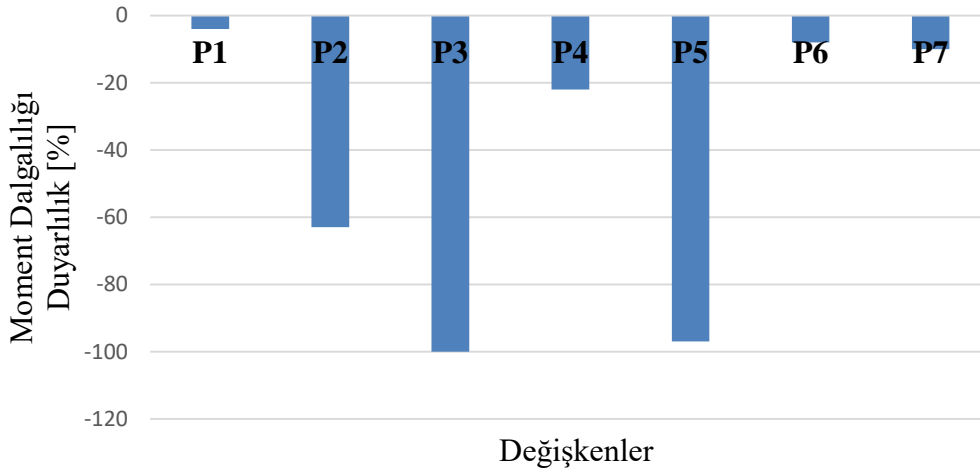
Şekil 34 : Örnek tasarımların P5 ile moment dalgalığı değerleri



Şekil 35 : Örnek tasarımların P6 ile moment dalgalığı değerleri



Şekil 36 : Örnek tasarımların P7 ile moment dalgallığı değerleri



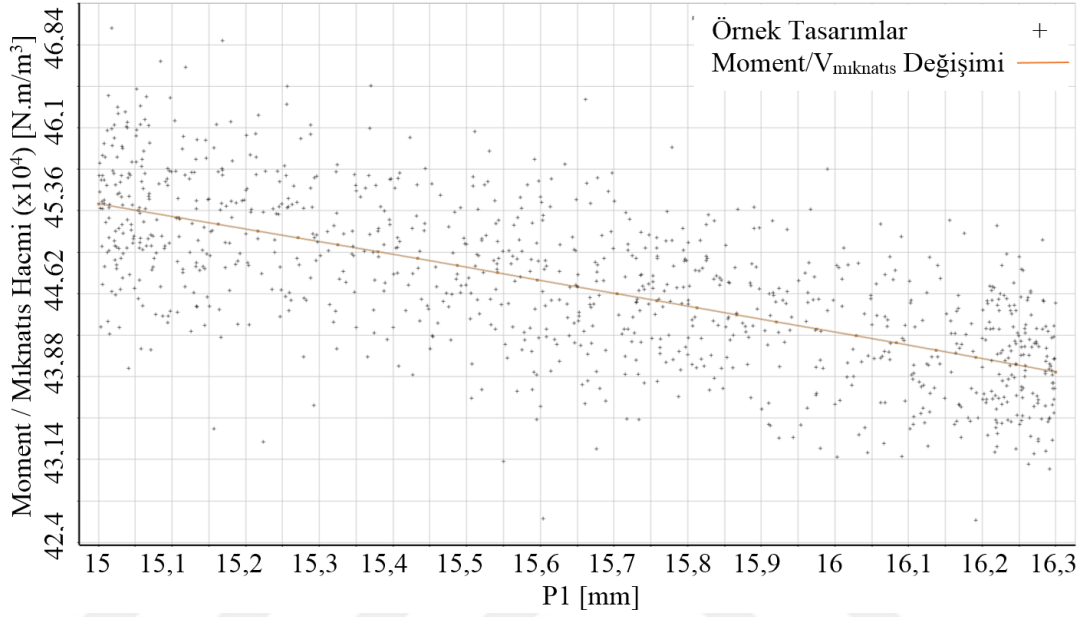
Şekil 37 : Moment dalgallığı duyarlılık analizi sonuçları

3.4.3 Tasarım değişkenlerinin moment/mıknatıs hacmi oranına etkisi

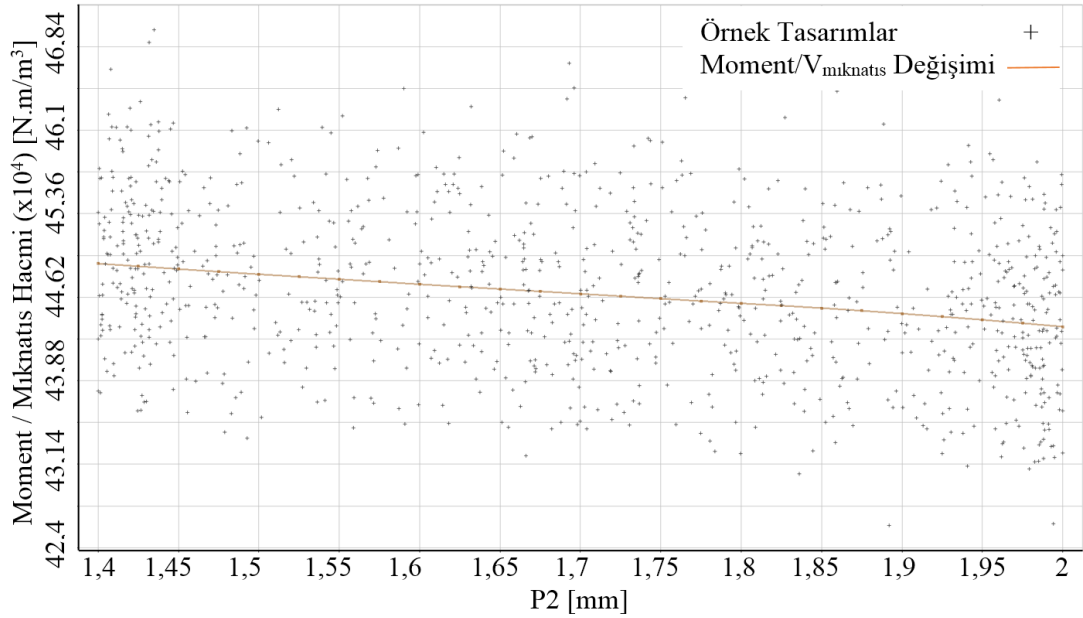
Bu kısımda tasarım değişkenlerinin moment/mıknatıs hacmi oranına etkisi verilmiştir. Moment / mıknatıs hacmi oranının artırılması ile birim mıknatıs hacminden alınacak moment artırılarak makinenin güç yoğunluğu artırılabilir gibi, daha az mıknatıs kullanılarak yine aynı moment elde edilebilir. Bu sayede makine maliyetinde azalmaya da gidilebilir. Grafiklerdeki çizgi örnek tasarımların ilgili motor başarımına ortalama etkisini göstermektedir.

Şekil 38 de verilen P1 ve Şekil 42 de verilen P5 değişkeni ile moment /mıknatıs hacmi oranı belirgin seviyede artarken Şekil 39' da verilen P2 değişkeninin etkisi daha az

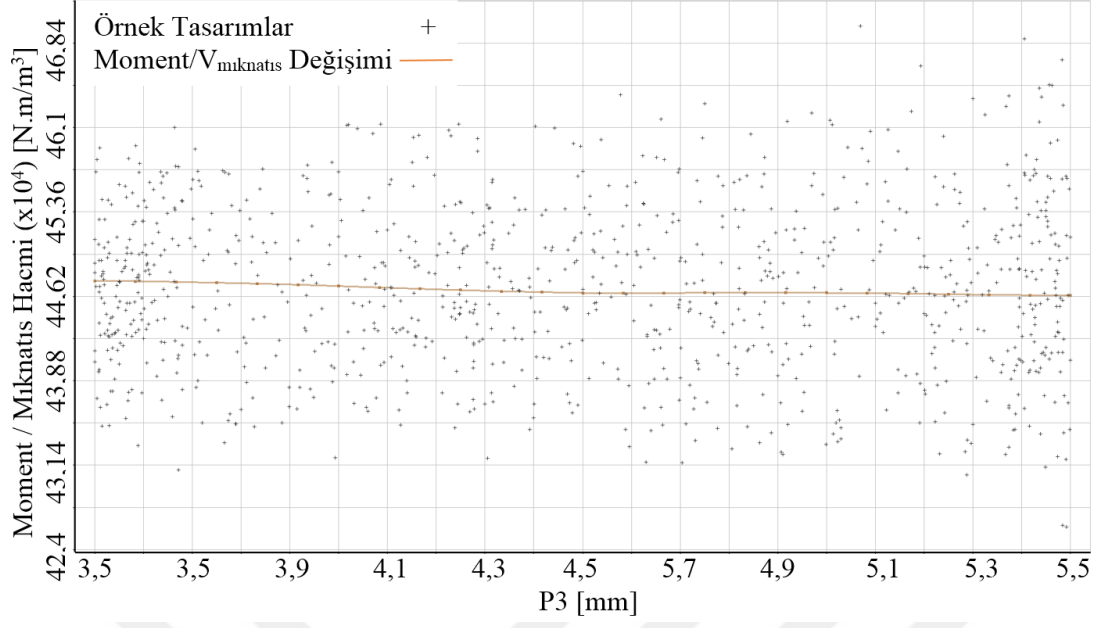
olmuştur. Şekil 40, Şekil 41, Şekil 43 ve Şekil 44 ile verilen P3, P4, P6 ve P7 değişkenlerinin moment/mıknatıs hacmi başarımına etkisi çok daha az olmuştur. Bütün değişkenlerin moment/mıknatıs hacmi oranına etkisi Şekil 45’ de toplu olarak verilmiştir.



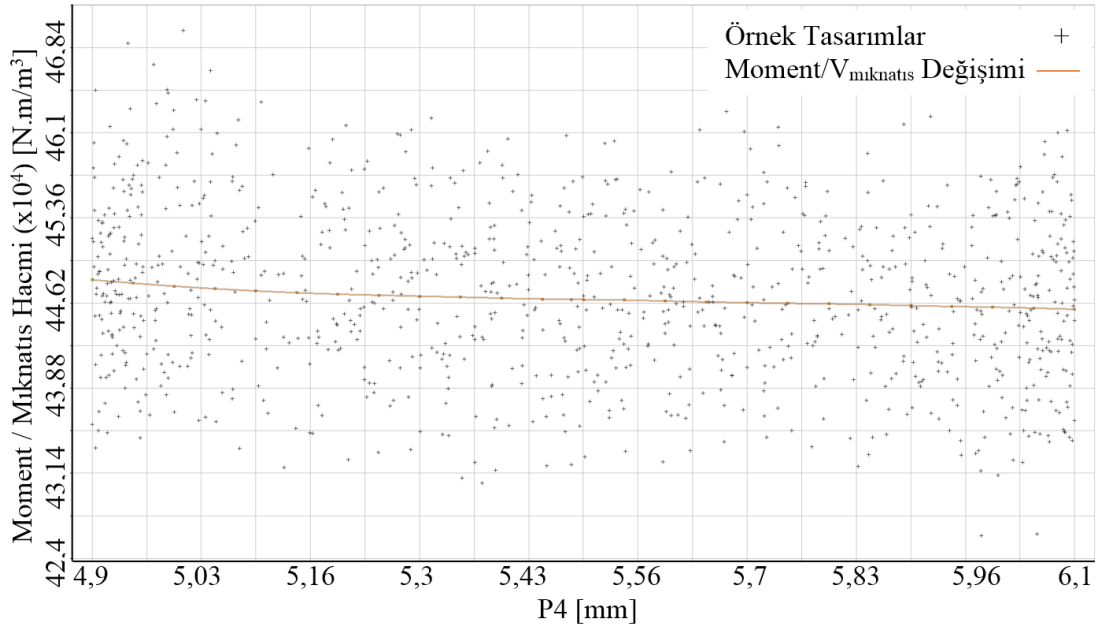
Şekil 38 : Örnek tasarımların P1 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri



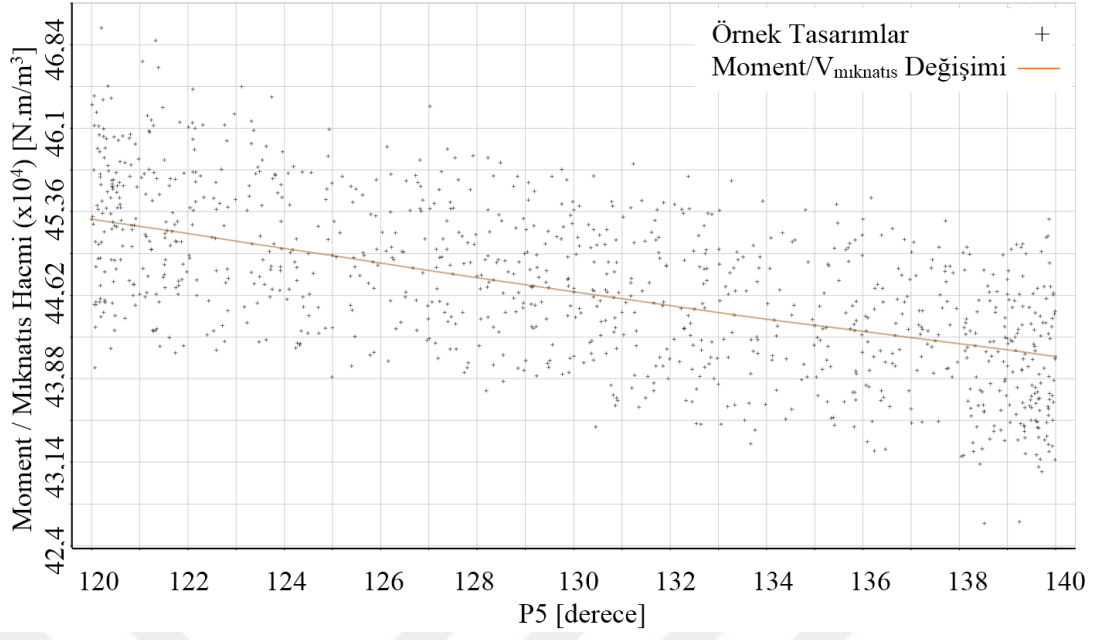
Şekil 39 : Örnek tasarımların P2 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri



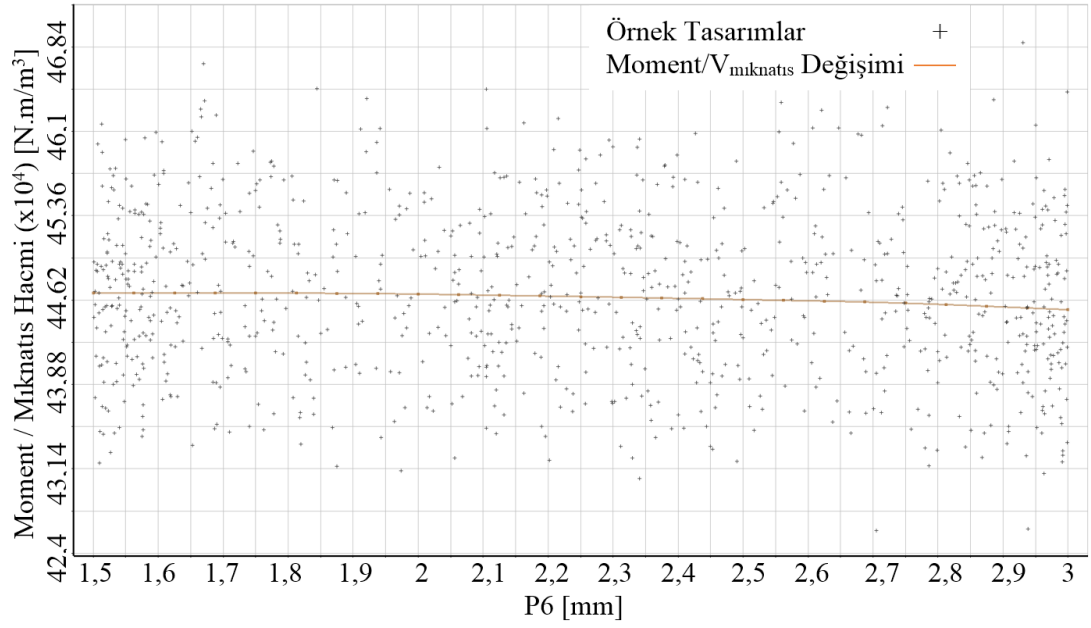
Şekil 40 : Örnek tasarımların P1 ile moment/mıknatis hacmi değerleri



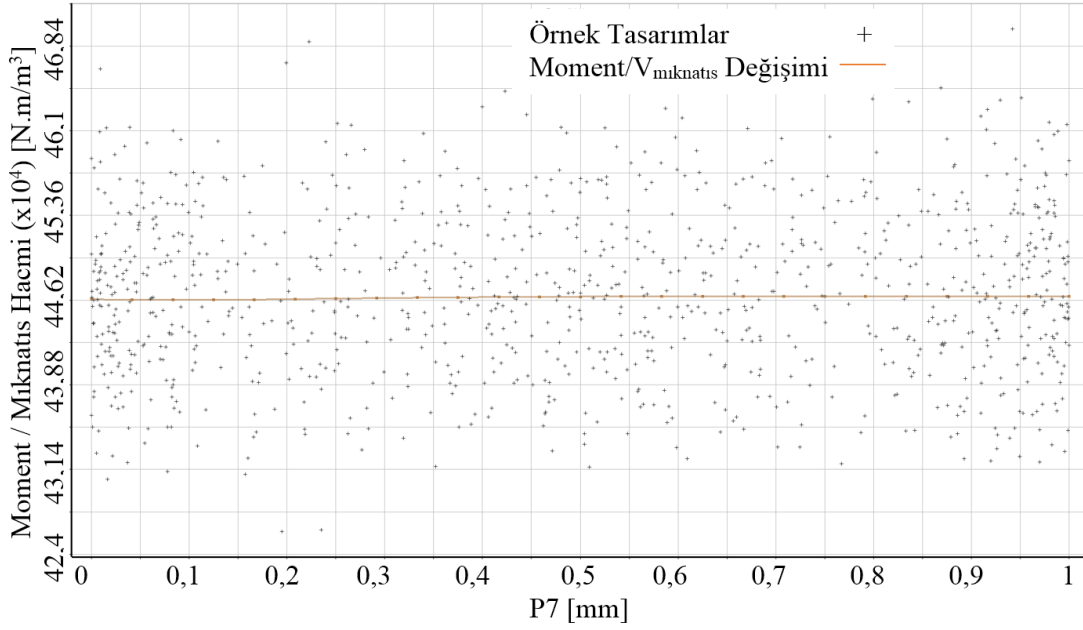
Şekil 41 : Örnek tasarımların P4 ile moment/mıknatis hacmi değerleri



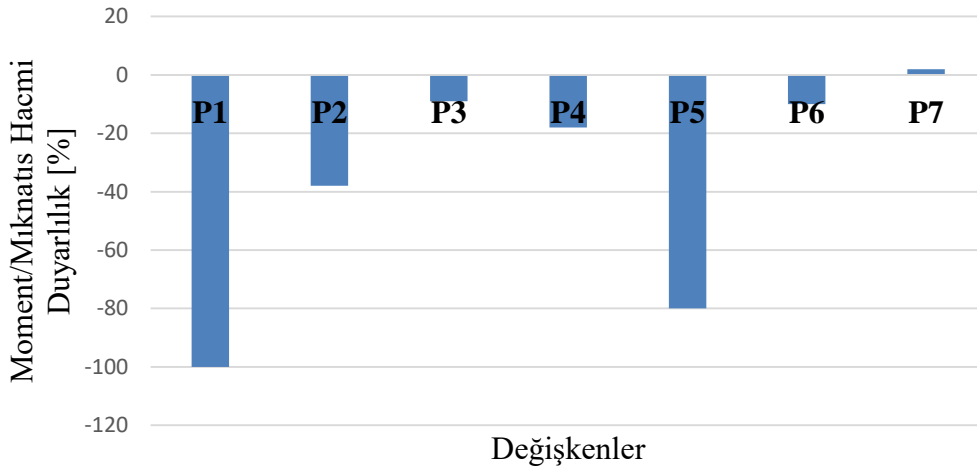
Şekil 42 : Örnek tasarımların P1 ile moment/mıknatis hacmi değerleri



Şekil 43 : Örnek tasarımların P6 ile moment/mıknatis hacmi değerleri



Şekil 44 : Örnek tasarımların P7 ile moment/mıknatıs hacmi değerleri



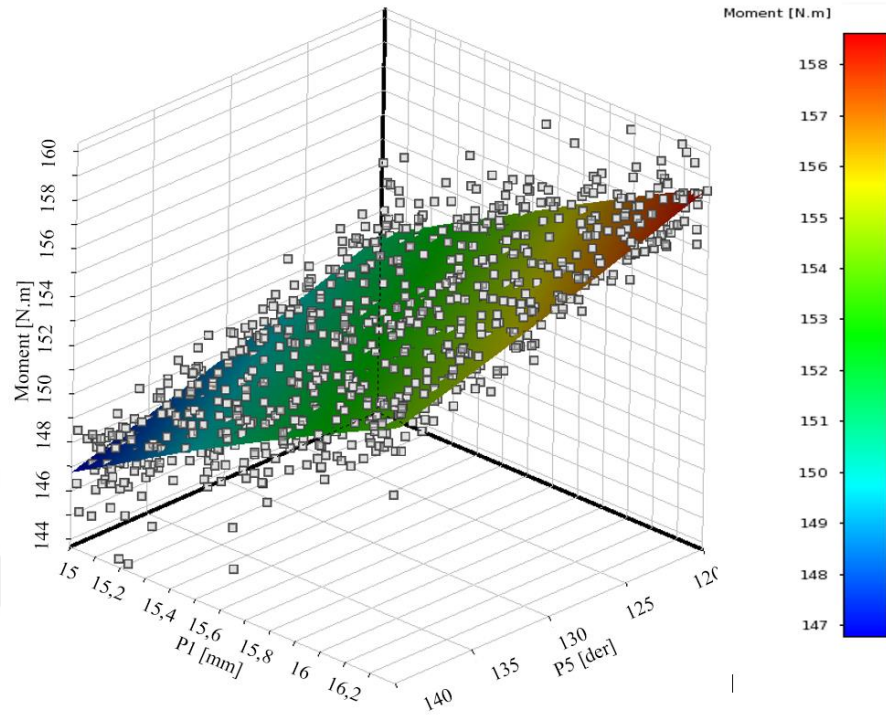
Şekil 45: Moment/Mıknatıs hacmi duyarlılık analizi sonuçları

3.4.4 En baskın değişkenlerin etkisinin tespiti

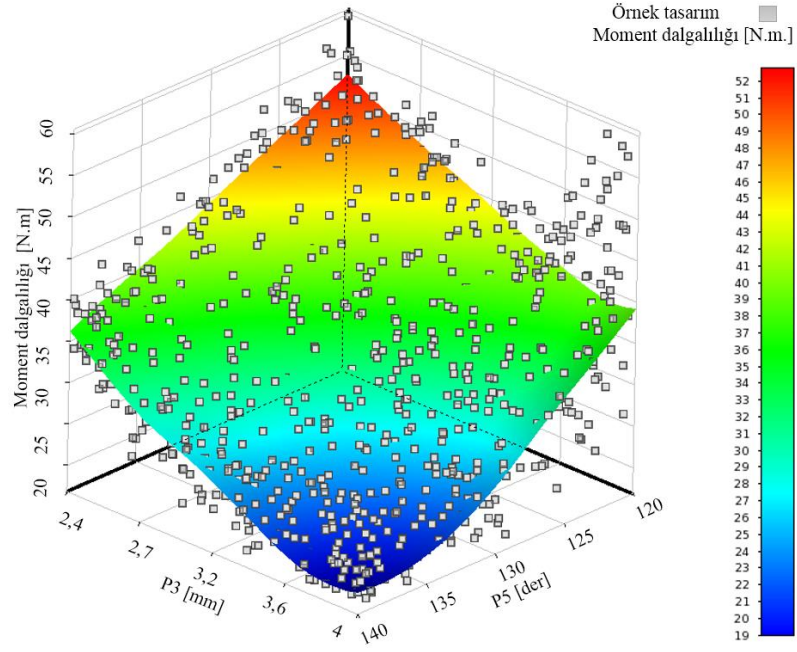
Bu aşamadan sonra her bir başarımlı ölçütünün en duyarlı olduğu iki değişkenle ilişkisi 3 boyutlu grafik üzerinde incelenmiştir. Her bir örnek tasarım için Şekil 46' da momentin P1 ve P3 ile, Şekil 47' de moment dalgalılığının P3 ve P5 ile, Şekil 49' da ise moment/mıknatıs hacmi oranının P1 ve P5 ile değişimi verilmiştir. Renkli olarak çizdirilen düzlemde ise ilgili değişkenlere bağlı başarımlı ölçütünün genel yönelimi verilmiştir.

Genel olarak moment, mıknatıs kalınlığı ile artmakta, mıknatıslar arasındaki açı ile azalmakta, moment dalgalılığı, akı engelleri ve mıknatıslar arasındaki açı ile

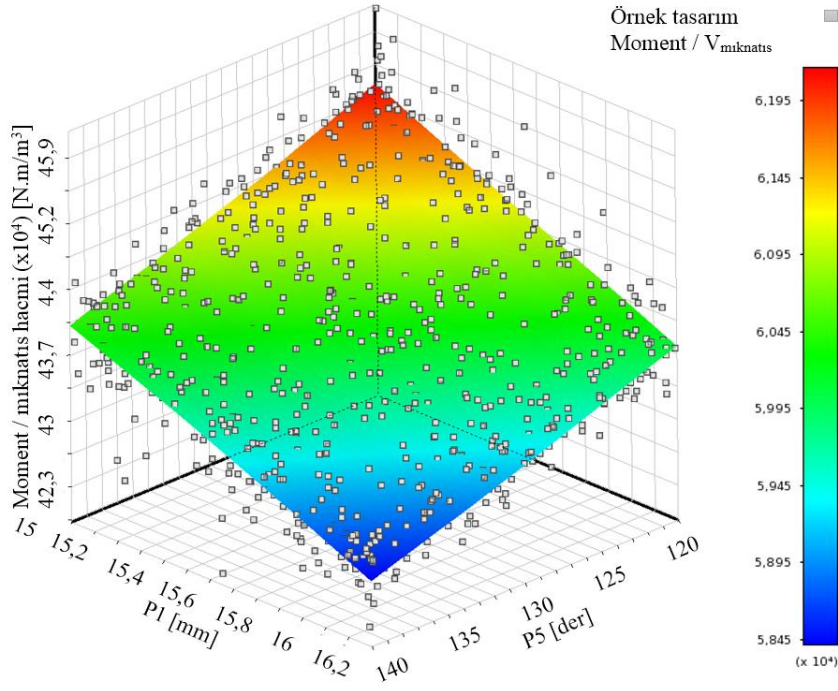
azalmakta, moment/mıknatıs hacmi ise mıknatıs kalınlığı ve mıknatıslar arasındaki açı ile azalmaktadır.



Şekil 46 : P1 ve P5 değişkenlerinin moment üzerine etkisi (her kutu farklı bir örnek tasarımı ifade etmektedir.)



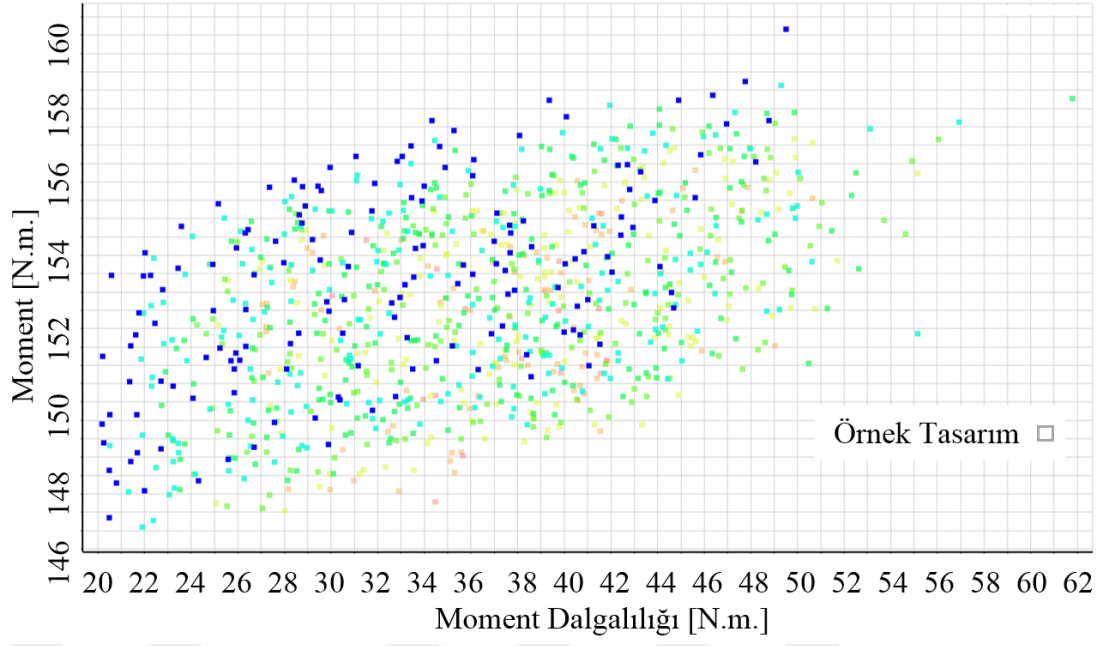
Şekil 47 : P3 ve P5 değişkenlerinin moment dalgalılığına etkisi



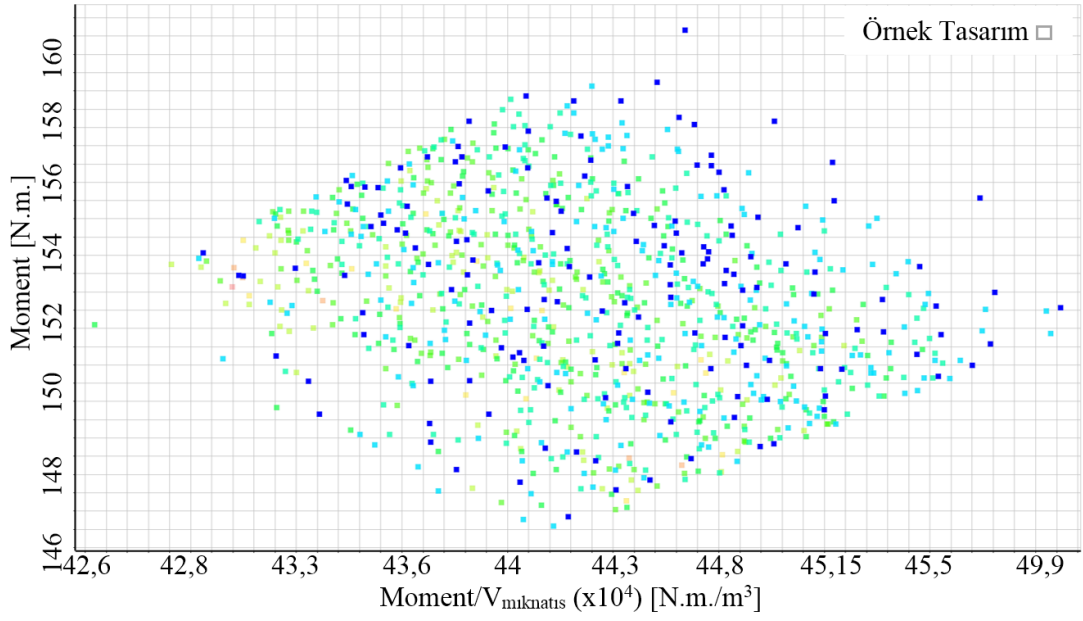
Şekil 48 : P1 ve P5 değişkenlerinin moment/mıkknatis hacmi oranına etkisi

3.4.5 En uygunlaştırılmış tasarımın eldesi

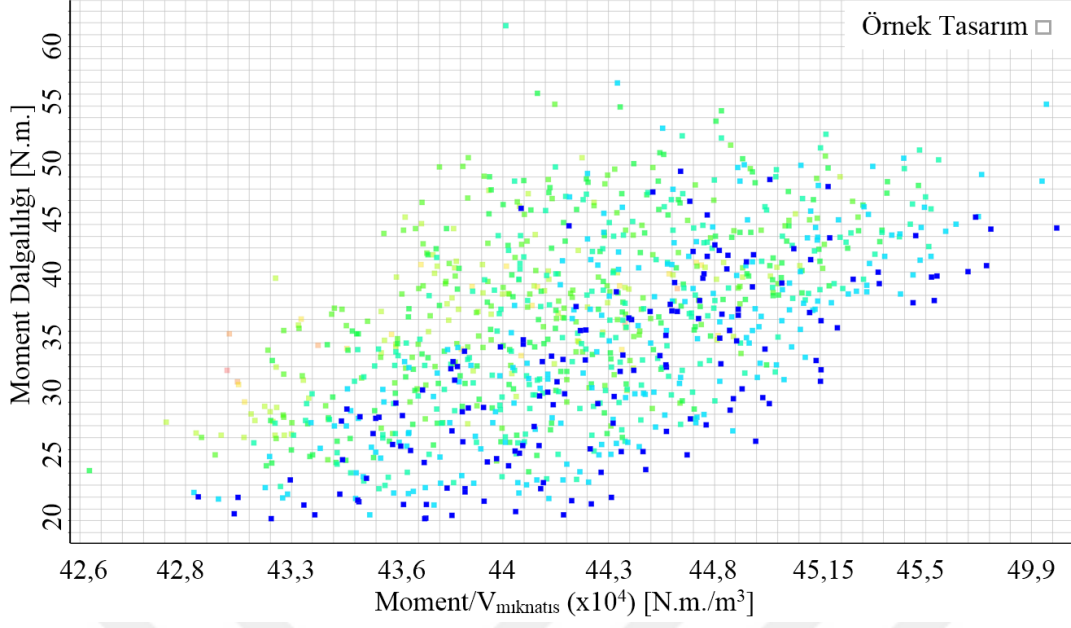
Yukarıda verilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, değişkenler her bir başarıım ölçütünü farklı şekilde etkileyebilmektedir. Mıkknatislar arası açı momenti artırırken moment dalgallılığını da artırmaktadır. Başka bir açıdan bakılacak olursa Şekil 49' a göre momentin en yüksek olduğu örnek tasarımlarda moment dalgallılığı da en yüksek seviyelerindedir. Şekil 50' a göre moment/mıkknatis hacmi oranının en düşük olduğu tasarımda moment en büyük değerini almamıştır. Şekil 51' de ise moment/mıkknatis hacmi en küçük değerinde iken moment dalgallılığı da en küçük değerlerindedir. Bu üç başarıım büyüklüğü 3 boyutlu grafik üzerinde Şekil 52' deki gibi görünmektedir. Bütün bu durumların tamamı göz önünde bulundurularak en uygun tasarımın belirlenmesi gerekmektedir.



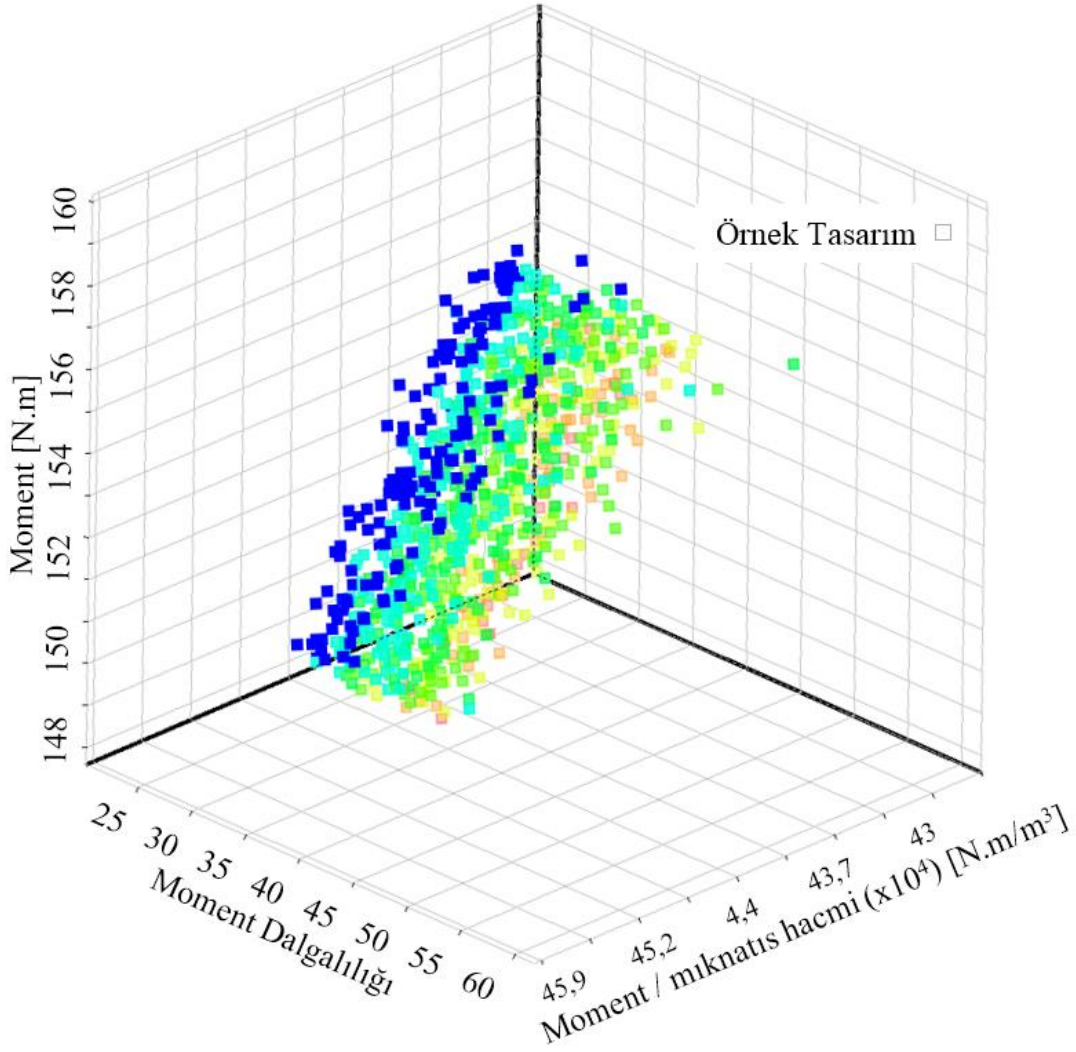
Şekil 49 : Moment ve moment dalgalılığı ilişkisi



Şekil 50 : Moment ve moment/mıknatis hacmi oranı ilişkisi



Şekil 51 : Moment dalgalılığı ve moment/mıknatis hacmi oranı ilişkisi



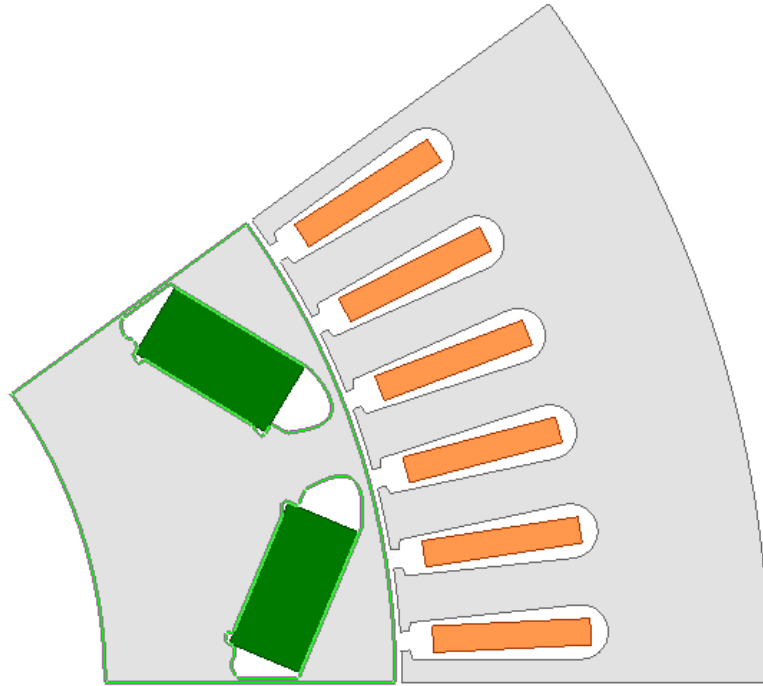
Şekil 52 : Örnek tasarım hedef büyüklükleri

Ansys başarımlar ölçütlerine göre Şekil 53’ de beş adet örnek tasarımı önermiştir. Bu önerilerden 5 numaralı örnek tasarımda 153,45 N.m moment, 20,596 N.m. moment dalgalılığı ve 58630/0,136 N.m./m³ moment/mıknatıs hacmi oranı elde edilmiştir (Burada 0,136 motor uzunluğu boyunca mıknatıs hacmini göz önünde bulundurmak amacıyla eklenmiştir). Diğerleri ile kıyaslandığında momentte %0,25’ lik ve moment/mıknatıs hacmi oranında %1,72’ ik bir artış için moment dalgalılığı %10,68 artmaktadır. Diğer önerilende moment dalgalılığı daha fazla artmaktadır. Bu sebeple 5 numaralı örnek tasarım seçilmiştir.

Bu aşamadan sonra rotordaki köşeli kısımlar giderilmiştir. Elde edilen en uygunlaştırılmış rotor geometrisi Şekil 54’ de verilmiştir.

Reference	Name	P1 - m_w [mm]	P2 - b_o1_w [mm]	P3 - b_o2_p3_x [mm]	P4 - b_o2_p3_y [mm]	P5 - real_angle [deg]	P6 - b_o1_w2 [mm]	P7 - M_dist [mm]	P8 - Torque		P9 - TorqueRipple		P10 - TorquePerMagnet	
									Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
○	Candidate Point 1	16,126	2,988	2,3725	2,486	127,55	2,2029	0,39331	★ 154,73	%0,87	★★ 23,597	%14,57	✗ 59256	%1,07
○	Candidate Point 2	16,22	2,9388	2,3264	1,38	131,75	1,6078	0,96136	★ 155,41	%1,28	★★ 25,181	%22,26	✗ 59144	%0,88
○	Candidate Point 3	16,228	2,8263	2,2227	1,812	129,3	2,426	0,42881	★ 155,86	%1,57	★ 27,378	%32,93	✗ 59288	%1,12
○	Candidate Point 4	15,844	2,9282	2,393	2,2095	129,35	2,7708	0,83027	⇒ 153,07	-%0,25	★★ 22,797	%10,68	✗ 59636	%1,72
⊙	Candidate Point 5	16,157	2,9599	2,2343	2,0712	134,55	2,5004	0,2513	⇒ 153,45	%0,00	★★ 20,596	%0,00	✗ 58630	%0,00

Şekil 53 : En uygunlaştırma sonrası en uygun örnek tasarımların analiz programı içindeki ekran görüntüsü (P1, P2, P3, P4, P5, P6 ve P7 verilen tasarım değişkenlerini, P8 moment bileşenini, P9 moment dalgalılığını, P10 moment/(mıknatıs hacmi/0,136) değerini verir. Referans tasarım 5 numaralıdır. Yeşil ve kırmızı yazılar referans tasarım ile karşılaştırmaların sonucudur.)



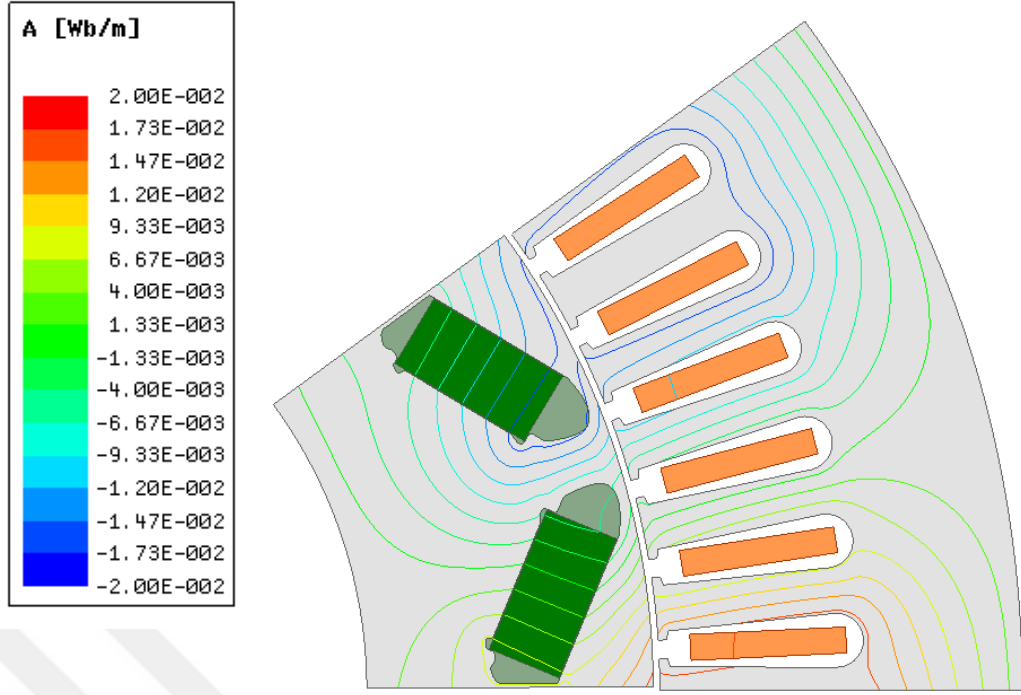
Şekil 54 : En iyileştirilmiş makine geometrisi

3.5 En Uygunlaştırılmış Tasarımın Detaylı İncelemesi Sonuçları

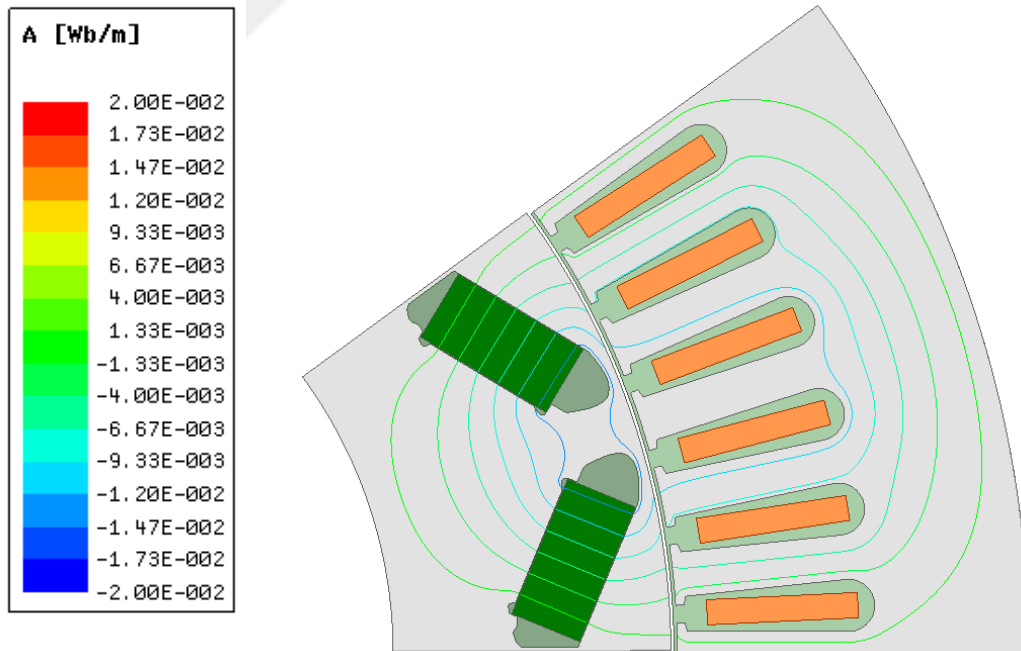
Bu aşamada moment dalgalılığını daha da azaltmak ve hava aralığı akı şeklini düzgünleştirmek amacı ile rotora, 5 segmentten oluşan tek yönde ve toplamda 1 oluk adımı kadar kaykıt verilmiştir. Daha sonra 2 boyutlu makine geometrisi Ansys Electronics Desktop programında analiz edilmiştir. Analizlerde, en iyileştirmede oluşturulan ağ yapısı kullanılmış, makine çalışma sıcaklığı göz önünde bulundurularak elektromanyetik analizler yapılmıştır. Verim ve moment dalgalılığı haritaları çizdirilmiş ve nihai tasarımın ısıl incelenmesi tamamlanarak tasarım doğrulanmıştır.

Makinenin en büyük yükünde ve boşta çalışmada akı yolları Şekil 55' de ve Şekil 56' de verilmiştir. En büyük yüklenme durumunda mıknatısların akısı ile sargılardan dolayı meydana gelen akının etkileşimi gözlemlenirken, boşta çalışmada sadece mıknatıslardan dolayı oluşan akı çizgileri gözlemlenmektedir. Ayrıca boşta çalışmadaki akı çizgilerinden mıknatıs köprülerinden geçen kaçak akı da görülmektedir.

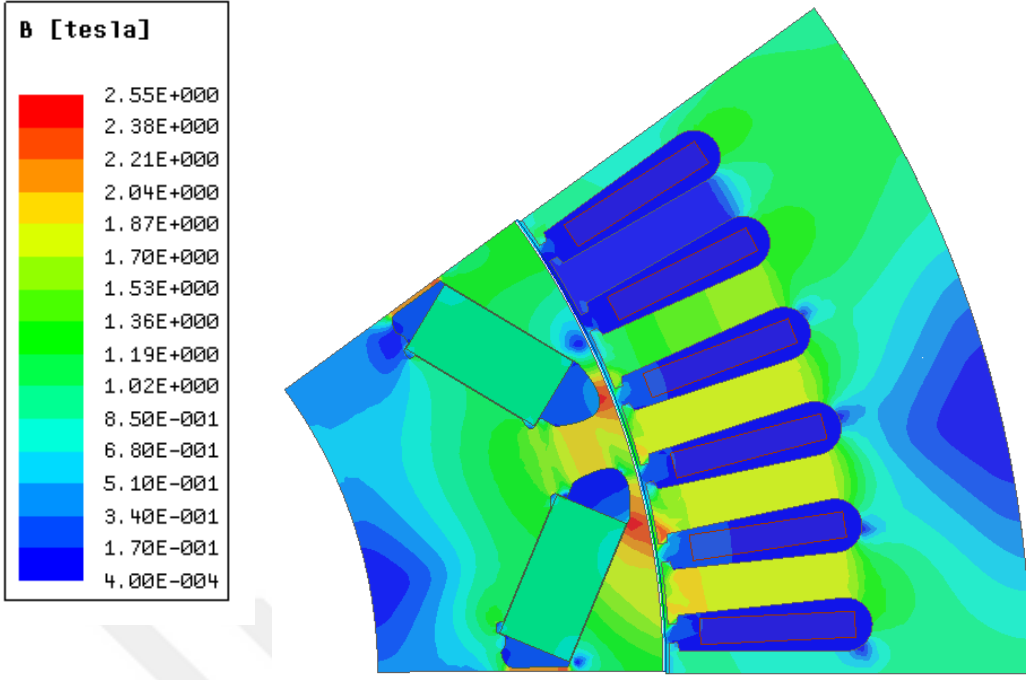
Şekil 57' de ve Şekil 58' de ise sırası ile en büyük yüklenmede ve boşta çalışmada akı yoğunlukları verilmiştir. Tam yükte stator dişlerinde akı yoğunluğu en yüksek değeri 1,7 T civarında iken mıknatıs köprülerindeki akı yoğunluğu 2,4 T değerine kadar çıkabilmektedir. Mıknatıs köprülerindeki bu yüksek akı yoğunluğu değerlerinden dolayı laminasyon malzemesi manyetik olarak doyuma gitmektedir. Ancak bu durum bu tip bir makine için olağandır. Ayrıca mıknatıslardaki akı yoğunluğu da 0,8 T civarındadır. Bu değer, mıknatısların 180 °C sıcaklıktaki dirsek bölgesi olan 0,4 T değerinin çok üzerinde olduğundan mıknatıslar demanyetize olmayacaktır.



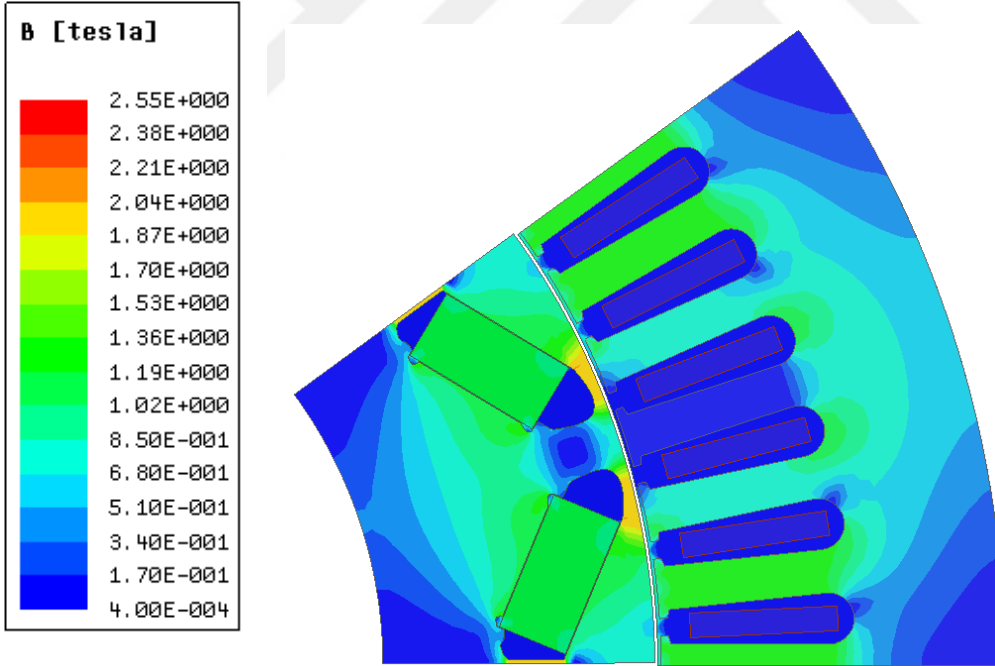
Şekil 55 : En yüksek yüklenme koşulunda (4100 min-1, 265 N.m.) manyetik akı çizgilerinin değişimi



Şekil 56 : Boşta çalışmada motor üzerindeki manyetik akı çizgilerinin değişimi

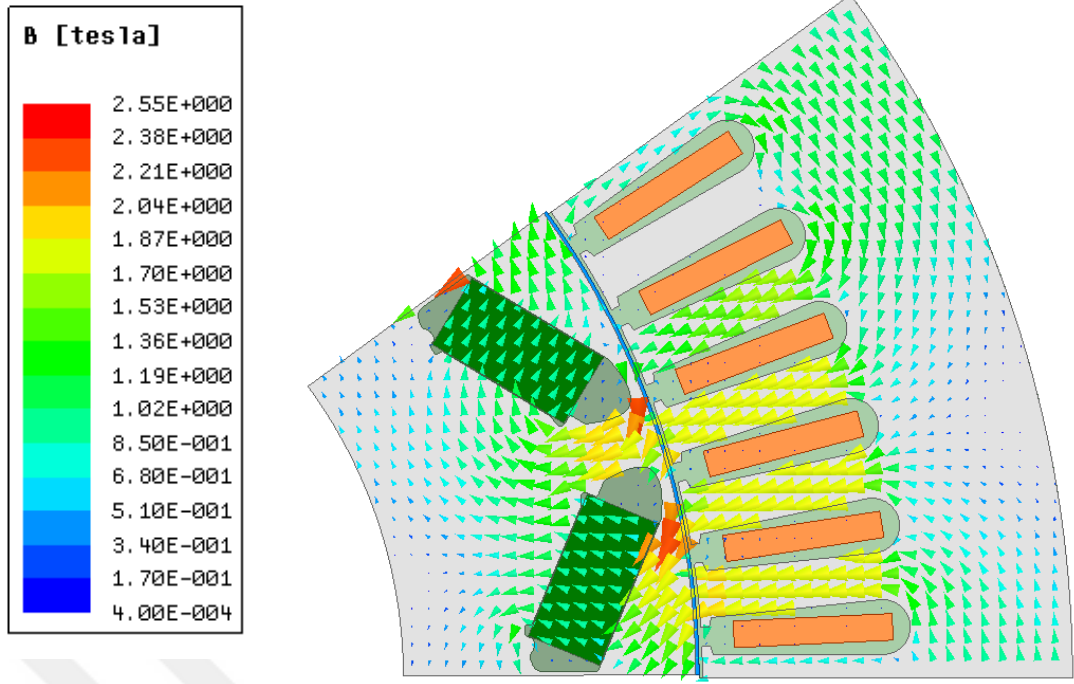


Şekil 57 : En yüksek yüklenme koşulunda (4100 min-1, 265 N.m.) manyetik akı yoğunluğunun değişimi

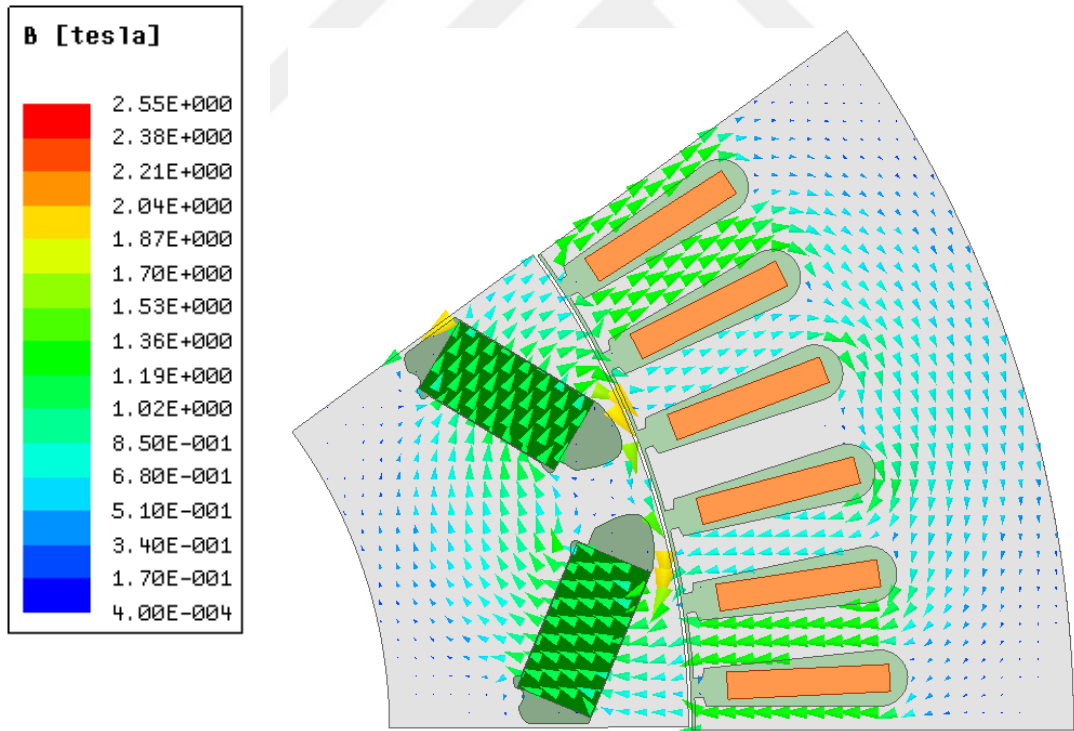


Şekil 58 : Boşta çalışmada motor üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun değişimi

Manyetik akı yönünün doğruluğunu belirleyebilmek için en büyük yüklenmede ve boşta çalışmada akı vektörleri Şekil 59' da ve Şekil 60' da verilmiştir.

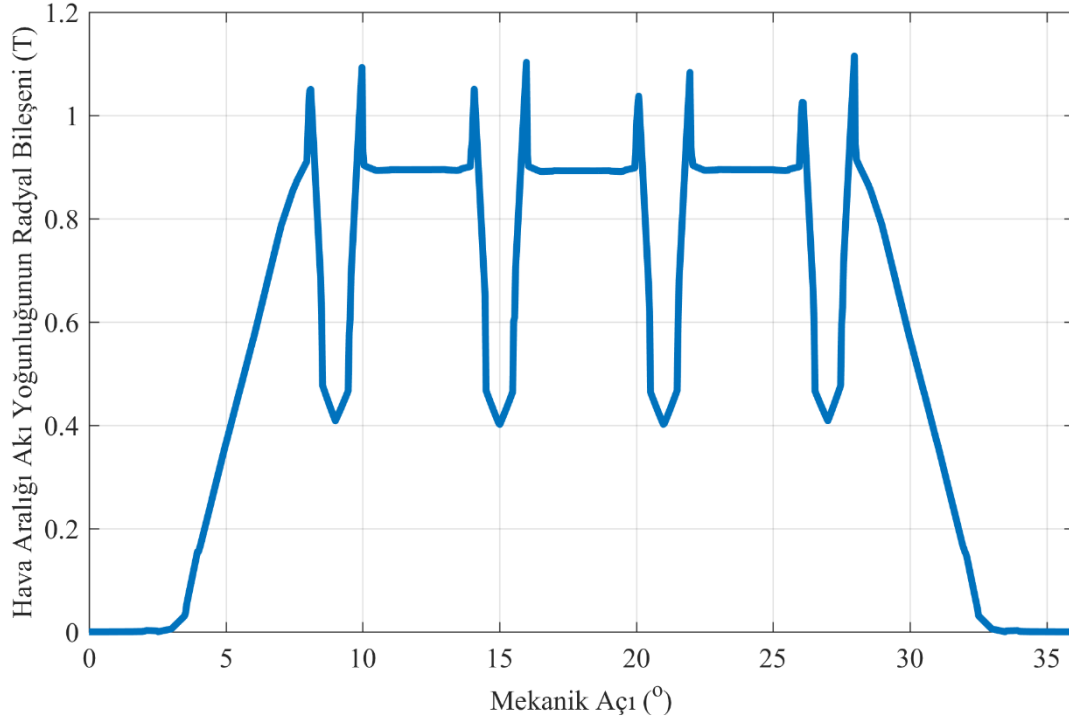


Şekil 59 : En yüksek yüklenme koşulunda (4100 min-1, 265 N.m.) manyetik akı vektörleri

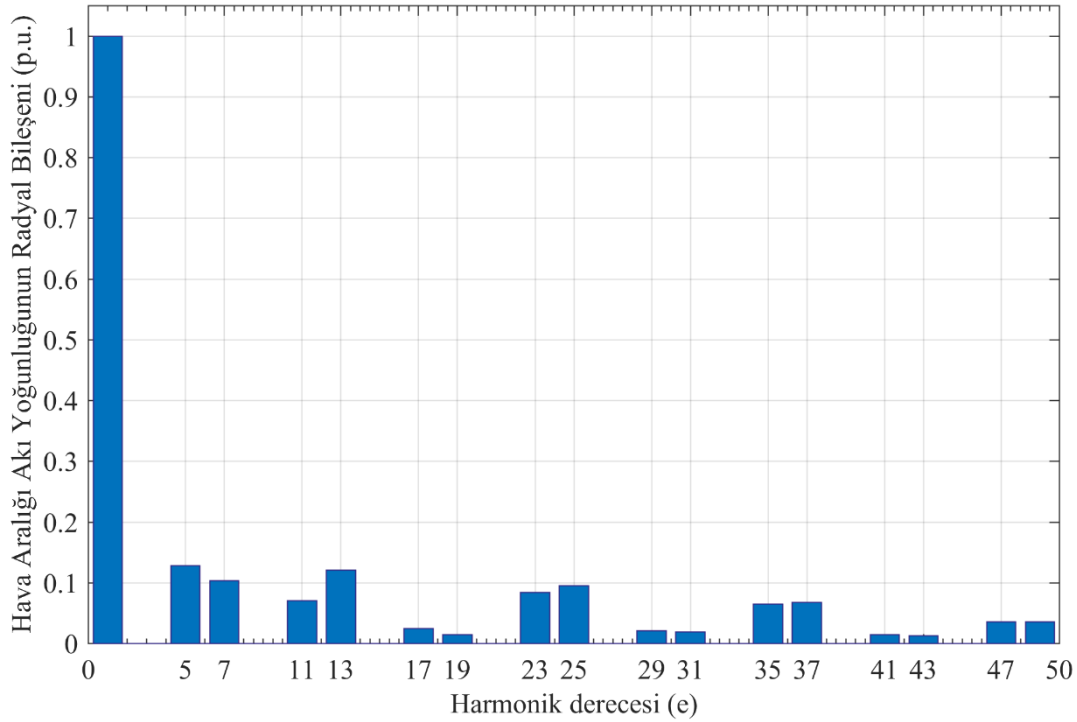


Şekil 60 : Boşta çalışmada motor üzerindeki manyetik akı vektörleri

Şekil 61’ de bir kutup boyunca hava aralığı akı yoğunluğu gösterilmiştir. Dalga şeklindeki bozulmalar stator oluklarındaki yüksek relüktanstan dolayıdır. Şekil 62’ de ise hava aralığı akı yoğunluğunun Fourier dönüşümü yapılarak harmonik mertebeleri belirlenmiştir.



Şekil 61 : Bir kutup boyunca hava aralığı akı yoğunluğu değişimi

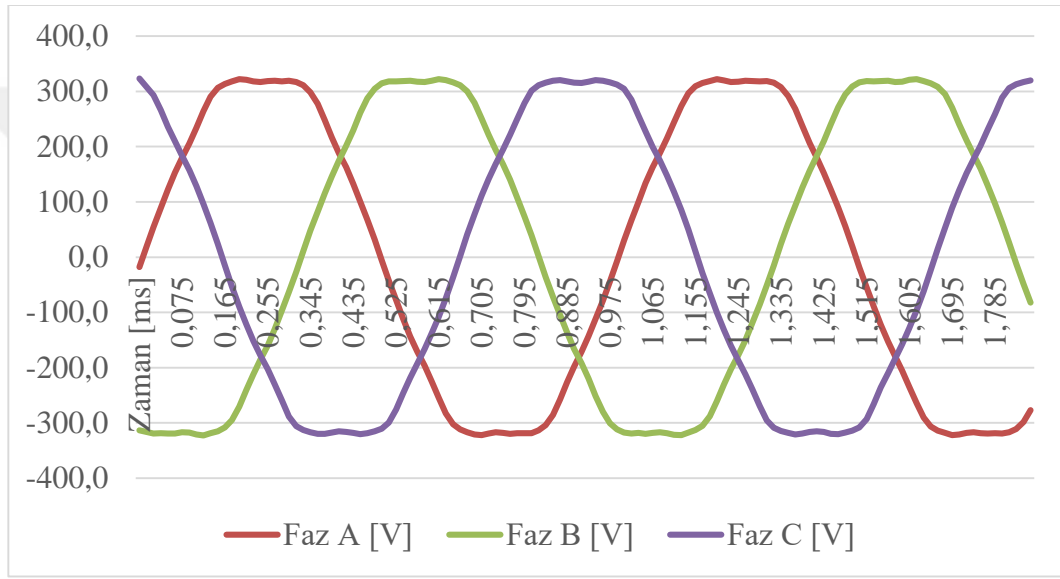


Şekil 62 : Hava aralığı akı yoğunluğu harmonikleri

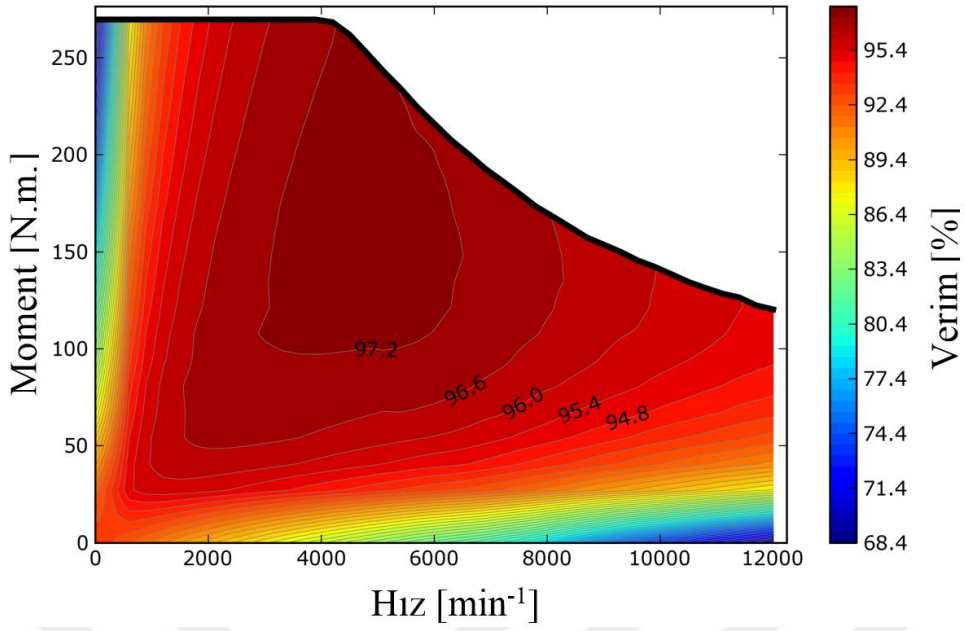
Şekil 63' de makine en büyük hızı 12000 min^{-1} ' de faz nötr arası indüklenen gerilimler verilmiştir. Bu dalga şeklinin doğrultulması durumunda 550 V gerilim elde edilir. Bu değer batarya geriliminin üzerindedir. Şekil 64' deki moment hız grafiğinden de

görüldüğü üzere 4100 min^{-1} hızdan sonra alan zayıflatma yapılmış böylece sınırlı batarya geriliminde 12000 min^{-1} hızlara kadar çıkılabilmektedir.

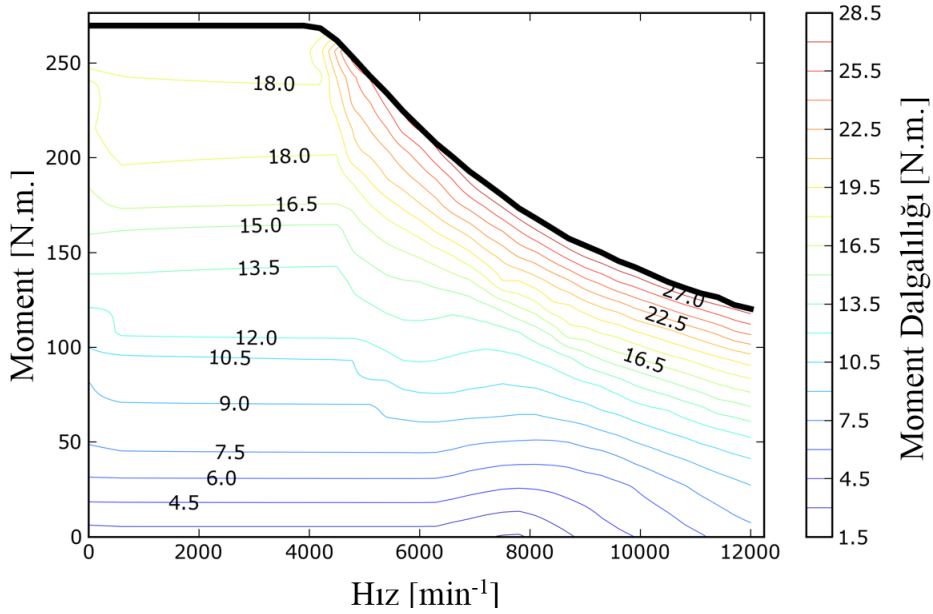
Makine 360 V batarya geriliminde, uzay vektörü darbe genişlik modülasyon yöntemi (Space-Vector PWM) ve en büyük moment/akım (MTPA) algoritması kullanılarak sürülmüştür. DC gerilimi modülasyon oranı olarak 0,8, en büyük akım sınırı 530 A dir. Mekanik kayıplar 6000 min^{-1} hızda 500 W referans alınarak motorun moment hız grafikleri ile birlikte verim ve moment dalgalılıkları sırası ile Şekil 64' deki ve Şekil 65' deki gibi elde edilmiştir. En büyük verimi %97,2 elde edilirken, moment dalgalılığı alan zayıflatma bölgesinde bile % 25 seviyesini geçmemektedir.



Şekil 63 : Zıt Elektromotor Kuvveti (EMK) ($12 000 \text{ min}^{-1}$)



Şekil 64 : Verim haritası



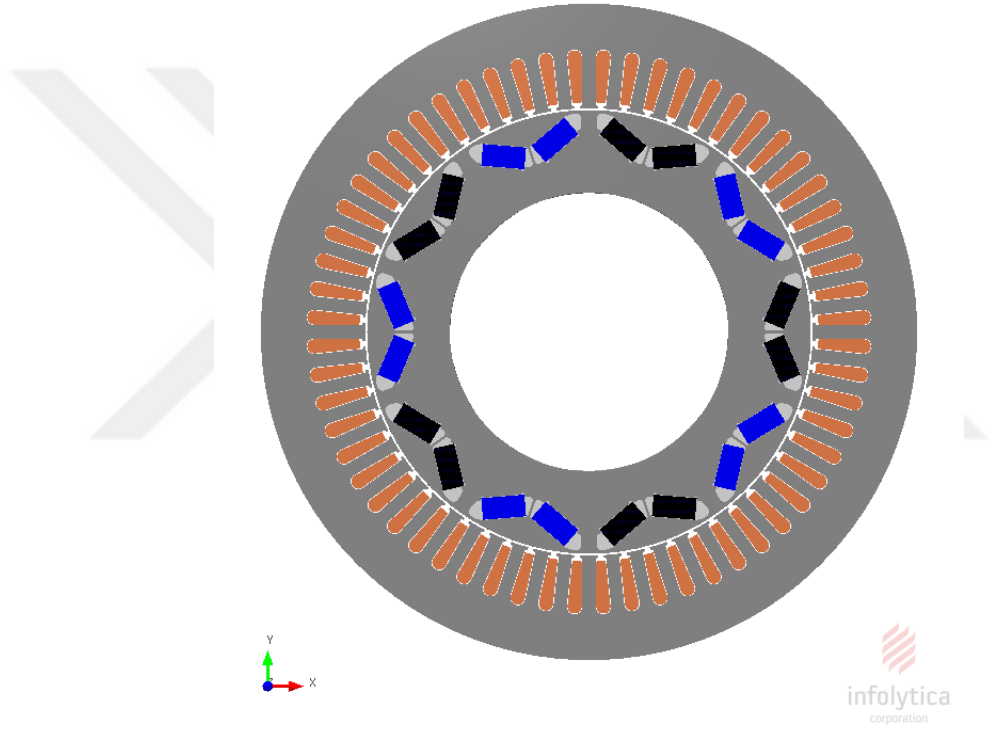
Şekil 65 : Moment dalgalılığı haritası

3.6 Isıl Analizler

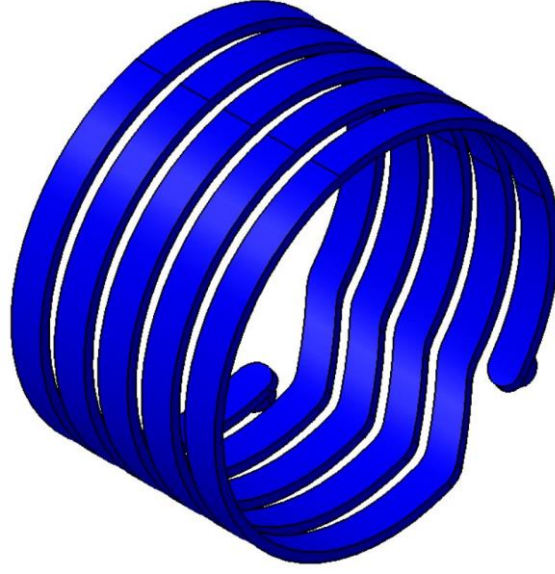
Isıl analizlerde modelin doğru oluşturulabilmesi sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Bu amaçla ilk olarak makinenin birbirine dokunan parçaları arasındaki aralıklar tanımlanmıştır. Bu aralıklar stator ve dış gövde arasında 0,003 mm alınması uygundur [68]. Diğer taraftan demir kayıpları 1,4 düzeltme faktörü ile çarpılarak imalat kaynaklı demir kayıpları da analizlere dahil edilmiştir. Sıcaklık analizlerine Infolytica MotorSolve programı kullanılmıştır. MotorSolve elektromanyetik SEA ile

makine kayıpları hesap etmekte ve ardından bu kayıpları kullanarak zamana bağlı olarak makine ısısal davranışını belirleyebilmektedir. Analizlerde elektromanyetik ve ısısal analizler iteratif olarak çözdürülerek en doğru sonuca ulaşılması hedeflenmiştir. Isısal analizlerde kullanılan MotorSolve modeli Şekil 66' de verilmiştir.

Soğutmasında %50 su, %50 glikol karışımı kullanılan makinenin soğutma kanalları Şekil 67' de verilmiştir. Toplamda 5 seri sarmaldan oluşan kanalların her biri 24,5 mm kalınlığında ve 2,4 mm yüksekliğinde dikdörtgen şekillidir. Soğutma sıvısı giriş sıcaklığı 65 °C' makine ortam sıcaklığı ise 35 °C alınarak ısısal analizler gerçekleştirilmiştir.

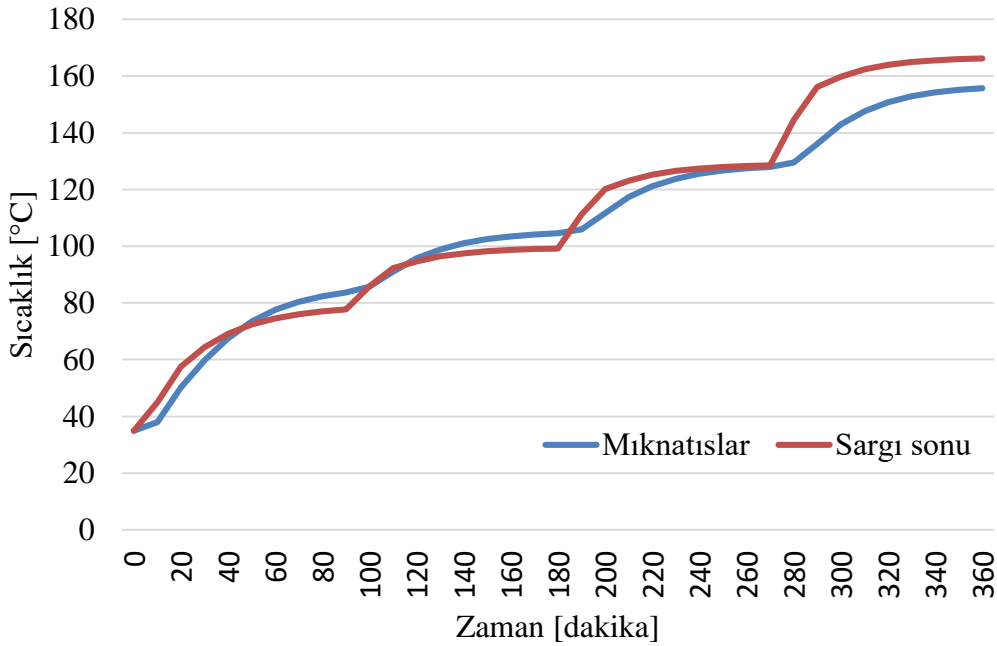


Şekil 66 : Isısal analizler için Infolytica MotorSolve motor modeli

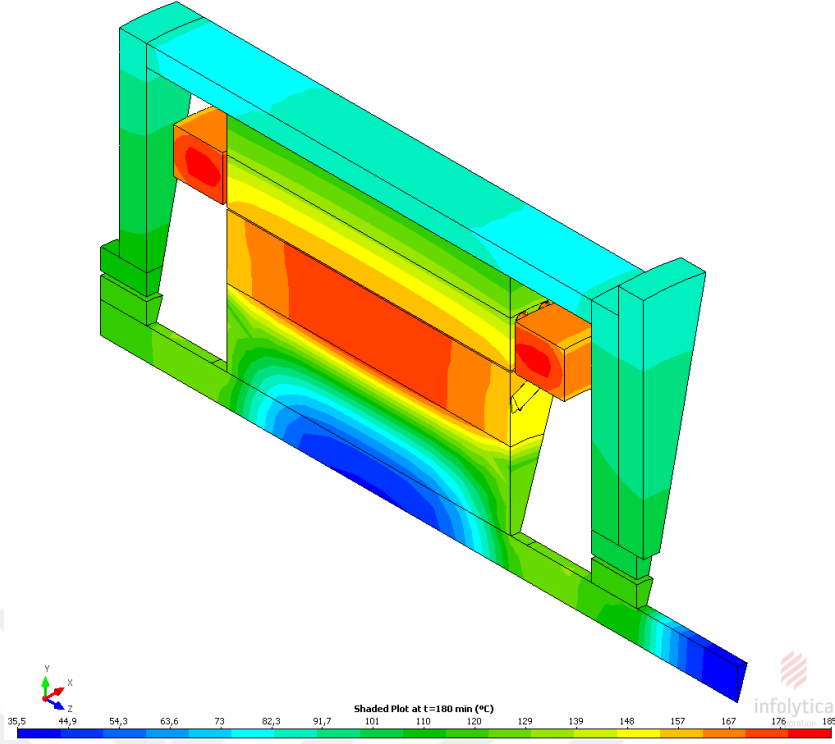


Şekil 67 : Soğutma kanalları

Makine 4500 min^{-1} hızda ilk olarak %25 momentte 90 dakika yüklenmiştir. Daha sonra artarda sırası ile 90' ar dakika %50, %75 ve %100 momentte yüklenmiştir. Makinenin sargı sonu ve mıknatis sıcaklıkları değişimi zamana bağlı olarak Şekil 68' de verilmiştir. 360 dakika sonunda makine sargı sonları ve mıknatisler $160 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta sabit kalmıştır. Bu süre sonunda makine bütün parçalarının sıcaklıkları ise Şekil 69' da verilmiştir.

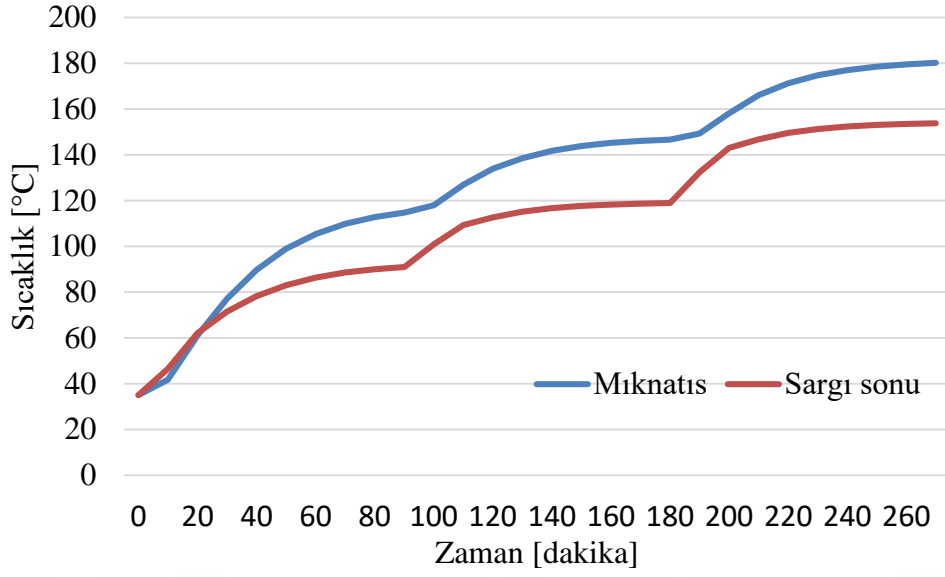


Şekil 68 : Makinenin 4500 min^{-1} hızda farklı yüklenmelerine bağlı sıcaklık değişimi

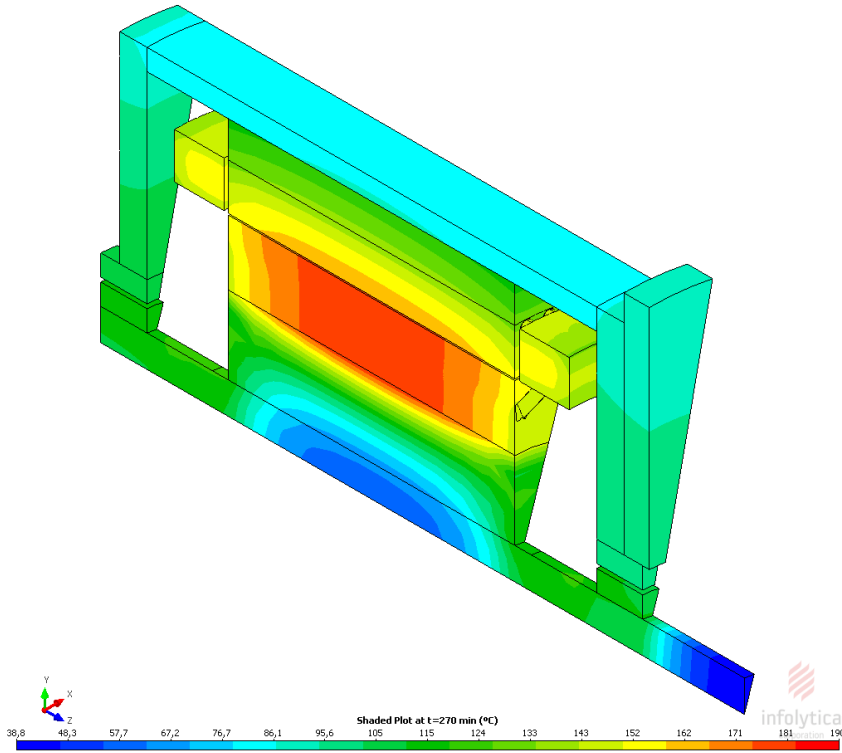


Şekil 69 : 4500 min⁻¹ hızda tam yüklenme sonrası sürekli rejimde makine parçalarının sıcaklıklarını gösteren ekran görüntüsü

Makinenin 7000 min-1 hızda art arda ve sırasıyla %25, %50 ve %75 momentte yüklenmesi sonucu elde edilen sargı sonu ve mıknatıs sıcaklıkları değişimi Şekil 70’ de verilmiştir. Yüksek hızlarda, frekansın artmasından dolayı mıknatıslardaki girdap akım kayıpları artmış ve mıknatıslar sargı sonlarından daha fazla ısınmıştır. Şekil 71’ de ise %75 yüklenme sonrası makinenin bütün parçalarının sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 70 : Makinenin 7000 min^{-1} hızda farklı yüklenmelerine bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 71 : 7000 min^{-1} hızda %75 yüklenme sonrası makine parçalarının sıcaklıklarını gösteren ekran görüntüsü

Elektrik motorunun en çok ısınan kısmı düşük hızlarda sargılar olurken, yüksek hızlarda mıknatıslar olmuştur.

4. SONUÇ

Elektrikli araçların tahriklerinde kullanılan elektrik makineleri, hibrit ve elektrikli araçların gelişimi ile paralel ilerlemektedir. Bu gelişmelerle birlikte moment yoğunluğu, verimleri, güç faktörleri yüksek, alan zayıflatma kabiliyetleri iyi olan GSMSM' ler bu alanda en çok tercih edilen aday olmuştur.

Bu tez kapsamında ilk olarak geçmişten günümüze EO' larda tercih edilen EM türleri ile bunların olumlu ve olumsuz yanları belirtilmiştir. Ticari EO' larda en çok tercih edilen tür olarak GSMSM kullanıldığı belirlendikten sonra, bu motoru kullanan EO' ların EM' lerinin tasarım özellikleri araştırılmıştır. Farklı marka EO EM topolojileri literatürde incelenerek olumlu ve olumsuz yanları ile birlikte verilmiştir. Ayrıca ticari EO üreticilerinin EM başarımlarını geliştirmeye yönelik yaptıkları çalışmalar incelenmiş, en yüksek gücü en düşük maliyete ve sınırlı hacimde üretmeye yönelik çalışmalara ağırlık verildiği belirlenmiştir. Ticari EO kütleleri ile birlikte motor güçleri belirlenerek, tasarlanan EM gücünü belirlemede bu bilgi referans olarak kullanılmıştır.

SMSM tasarımında kullanılan ve dikkat edilmesi gereken noktalar üzerinde durulmuş ve her tasarımda kullanılabilir temel bilgilere yer verilmiştir. Makinenin ana boyutlarının ve genel tasarım büyüklüklerinin belirlenmesinde analitik denklemlerden faydalanılmıştır. Tasarlanan makinenin birim hacminden alınabilecek moment, stator iç çapının dış çapına oranı, kutup sayısı gibi tasarım büyüklükleri belirlenirken ticari EO EM' lerinin tasarım ölçütleri ve güncel motor sürücü teknolojisi referans alınmıştır. İncelenen EM' lardan elde edilen referans büyüklükleri tez kapsamında verilmiştir.

Tez kapsamında ilk olarak tasarımı yapılan GSMSM topolojisi göz önünde bulundurularak, makinenin moment ifadesi ile birlikte, temel sürüş ilkeleri verilmiştir. Daha sonra manyetik, mekanik ve ısı zorlanmalar göz önünde bulundurularak başlangıç tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada SEY ile çözüm yapan ticari bilgisayar programı kullanılmıştır.

Rotordaki mıknatıs köprü boyutlarının rotorun güvenilirliği açısından uzun ancak maliyet açısından ince yapılması gerektiği ve bu tasarım büyüklüğünün

belirlenmesindeki yöntem anlatılmıştır. Son olarak SMSM' nin ısı davranışının doğru belirlenmesinin önemi ve ısı davranışı belirlerken imalat koşullarının etkisi verilmiştir.

Tez kapsamında analitik denklemler ile temel boyutları belirlenen makinenin ilk en uygunlaştırma analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak moment bileşenine etkisi az, ancak demanyetizasyon direnci ile direkt etkili büyüklük olan mıknatıs uzunluğu en küçük değeri SEA' lar ile belirlenmiştir. Makine başarımı ve güvenilirliği üzerine etkili olan mıknatıs köprü kalınlığının en küçük güvenli değeri de statik SEA' lar ile belirlenmiştir. Sonuç olarak makinenin mıknatıs köprü kalınlığı ve mıknatıs uzunluğu belirlenmiştir. Böylece bu belirlenen büyüklükler, tasarımın bir sonraki aşaması olan elektromanyetik en uygunlaştırmada sabit büyüklük olarak kabul edilebilmiştir.

Makinenin elektromanyetik olarak en uygunlaştırılması amacıyla 7 değişkene bağlı rotor geometrisi Ansys Electronics Desktop üzerinden oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometrinin analiz modeli kurularak Ansys Response Surface Optimization ile Ansys Workbench üzerinde en uygunlaştırma yapılmıştır. Burada 7 değişkene bağlı 1000 farklı rotor geometrisi Ansys Electronics Desktop ile analiz edilmiştir. Analizlerde hedef başarımların büyüklüğü, makinenin momentini ve moment/mıknatıs hacmi oranını artırmak iken moment dalgalılığını azaltmak olmuştur. 7 adet değişkene bağlı olarak makinenin her bir hedef başarımların büyüklüklerinin değişimi detaylı olarak incelenmiştir. Bunun yanında her bir başarımların büyüklüğünün başka bir başarımların büyüklüğü ile değişimi de incelenmiş ancak momentin ve moment/mıknatıs hacmi oranının en büyük, moment dalgalılığının en küçük olduğu bir tasarım elde edilememiştir. Bir başarımların büyüklüğü iyileşirken başka bir başarımların büyüklüğünün kötüleştiği gözlenmiştir. En iyi tasarım oluşturulamadığından en uygun tasarımın seçimi yine Ansys önerileri üzerinden yapılmıştır.

En uygun tasarım belirlendikten sonra, bu tasarımın Ansys Electronics Desktop üzerinden detaylı SEA yapılarak manyetik akı çizgileri, manyetik akı yoğunlukları, manyetik akı vektörleri boşta ve tam yüklenme durumunda verilmiştir. Ayrıca bir kutup boyunca hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı, bu dağılımın harmonik dereceleri, sargılarda indüklenen zıt emk değerleri gösterilmiştir. Makinenin moment-hız grafiği ile birlikte verim haritası ve moment dalgalılığı haritası da elektromanyetik analizler kapsamında elde edilmiştir.

Son olarak en uygunlaştırılmış makine geometrisi, Infolytica MotorSolve programına aktarılmış ve ısı analizleri yapılmıştır. Makine 4500 min^{-1} hızda sırasıyla 90' ar dakika %25, %50, %75 ve %100 yüklenme durumları için ısı analizleri yapılmıştır. Ayrıca motorun 90' ar dakika %25, %50 ve %75 moment yüklenme durumlarında da sıcaklık analizleri yapılmıştır. Sıcaklık analizlerinde sargı sonu ve mıknatıs sıcaklıklarının zamana bağlı anlık değişimleri verilmiştir. Bunun yanında sıcaklık analizleri sonucunda makinenin bütün parçalarının sıcaklıkları da gösterilmiştir.

En büyük verimi %97,2 olan ve en yüksek moment dalgalılığı %25 in altında olan 120 kW (4500 min^{-1} , 255 N.m.) sürekli gücünde (S1 çalışma koşulu) EO EM tasarımı yapılmıştır.

Cari açığın kapatılması, güncel teknolojinin takibi, istihdamın artırılması ve sürekliliğinin sağlanması gibi önemli amaçlara hizmet eden elektrikli otomobillerin geliştirilmesine ve üretimine ülkemizde büyük önem verilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar elektrikli araçlar için başarımlı yüksek elektrik motorlarının geliştirilmesine katkı sağlamış ve başarımları daha yüksek yeni motor tasarımlarının önünü açmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Hendershot, J.R. & Miller, T. J. E. (1994). Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford, Magne Physics Publishing and Clarendon Press
- [2] Url-1 < <https://www.tesla.com/>>, erişim tarihi 05.01.2018.
- [3] Url-2 < <http://www.chevrolet.com/>>, erişim tarihi 05.01.2018.
- [4] Url-3 < <https://www.mercedes-benz.com/en/>>, erişim tarihi 05.06.2017.
- [5] Url-4 < <https://www.bmw.com.tr/tr/index.html/>>, erişim tarihi 05.06.2017.
- [6] Url-5 < <https://www.nissanusa.com/>>, erişim tarihi 05.01.2018.
- [7] Url-6 < <http://www.vw.com/>>, erişim tarihi 05.06.2017.
- [8] Url-7 < <https://www.toyota.com.tr/>>, erişim tarihi 05.06.2017.
- [9] Url-8 < <https://www.adandp.media/articles/5-things-about-the-fiat-500e/>>, erişim tarihi 05.01.2018.
- [10] Url-9 < <https://www.autoblog.com/buy/2012-Lexus-HS+250h/expert-review/>>, erişim tarihi 05.01.2018.
- [10] Url-10 < <https://m.hyundaiusa.com/>>, erişim tarihi 05.01.2018.
- [11] Url-11 < <https://www.mitsubishi-motors.com/en/showroom/i-miev/>>, erişim tarihi 05.06.2017.
- [12] Riba J. R., Lopez-Torres C., Romeral L., Garcia A. (2016). Rare-Earth-Free propulsion motors for electric vehicles: A technology reviews. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 367–379 doi: 10.1016/j.rser.2015.12.121.
- [13] Finken T., Felden M., Hameyer K. (2008). Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles, *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*. Aachen, Germany: RWTH Aachen University.
- [14] Yılmaz M. (2015). Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 80–99 doi: 10.1016/j.rser.2015.07.033.
- [15] Lee S., (2005). *The French Experience in Integrating the Program FLUX2d in the Undergraduate Curriculum at the Institute National Polytechnique de Grenoble* (Master's thesis). The University of Tennessee, Knoxville.
- [16] Kılıç F., Kuyumcu F. E. (2014). Deniz araçlarında kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motor ve sürücülerinde kayıpların azaltılması. *Journal of ETA Maritime Science*, 2 (2), 119-130.

- [17] **Widmer J. D., Martin R., Kimiabeigi M.** (2015). Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable Material and Technologies*, 3 7-13 doi: 10.1016/j.susmat.2015.02.001.
- [18] **Hlinovský T.** (2015). *Optimal Control of Mathematical Model of the Electrovehicle (Master's thesis)*. Faculty of Electrical Engineering Department of Electric Drives and Traction, Czech Technical University Prague.
- [19] **Ulu C., Kömürgöz G.** (t.y.). Elektrikli Araç Uygulamaları için 75 kW Asenkron Motor Tasarımı. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [20] **Motor Design Limited** (2017). *CWIEME: Berlin: Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors* [PowerPoint slides]. Retrieved from <https://www.coilwindingexpo.com/berlin/>
- [22] **Internal Copper Association, Copper Alliance** (2013). *Tokyo: Performance / cost comparison of induction-motor & permanent-magnet-motor in a hybrid electric car* [PowerPoint slides]. Retrieved from <http://www.coppermotor.com/>
- [23] **Pellegrino G., Vagati A., Guglielmi P., Boazzo B.** (2012). Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 59(2), 803–811 doi: 10.1109/TIE.2011.2151825
- [24] **Zhu Z. Q., Howe D.** (2007). Electrical machines and drives for electric, hybrid and fuel cell vehicles, *Proceedings of IEEE*, 95(4) 746–765.
- [25] **Hirosawa S.** (2015). Permanent magnet beyond Nd-Dy-Fe-B, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 67(6) 1304-1305.
- [26] **Rahman M. A., Masrur M. A.** (2009). Advances on IPM Technology for Hybrid Electric Vehicles, *Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 92-97). Canada: Memorial University of Newdoundland.
- [27] **Url-12** < <http://www.arnoldmagnetics.com/>>, erişim tarihi 01.05.2018.
- [28] **Url-13** < <https://www.hitachi-metals.co.jp/e//>>, erişim tarihi 01.05.2018.
- [29] **Kim S. I., Lee G. H., Hong J. P., Jung T. U.** (2008). Design process of interior PM synchronous motor for 42-V electric air conditioner system in hybrid electric vehicle, *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(6) 1590–1593, doi: 10.1109/TMAG.2007.916136
- [30] **Yamazaki K. and Kumagai M.** (2014). Torque analysis of interior permanent magnet synchronous motors by considering cross-magnetization: Variation in torque components with permanent-magnet configurations, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(7) 3192–3201.
- [31] **Sorgdrager A. J., Grobler A. J.** (2013). Influence of Magnet Size and Rotor Topology on the Air-gap Flux Density of a Radial Flux PMSM, *Industrial Technology (ICIT)*, (pp. 337-343). South Africa North-West University.

- [32] **Yang Y., Castano S., Yang R., Kasprzak M., Bilgin B., Sathyan A., Dadkhah H., Emadi A.** (2016). Design and comparison of interior permanent magnet topologies for traction applications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(1) 86-97 doi: 10.1109/TTE.2016.2614972.
- [33] **Yamazaki K., Kumagai M., Ikemi T., Ohki S.** (2013). A Novel Rotor Design of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors to Cope with Both Maximum Torque and Iron-Loss Reduction, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 49(6) doi: 10.1109/TIA.2013.2262662.
- [34] **Xu L., Lin M., Fu X., Liu K., Lin K.** (2016). Torque performance enhancement of V-shaped interior permanent magnet synchronous motor by rotor shape optimization, *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, China: Southeast University.
- [35] **Ren W. Xu Q., Li Q.** (2015). Asymmetrical V-Shape Rotor Configuration of an Interior Permanent Magnet Machine for Improving Torque Characteristics, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), doi: 10.1109/TMAG.2015.2450931.
- [36] **Kim K.** (2014). A Novel Method for Minimization of Cogging Torque and Torque Ripple for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2).
- [37] **Toulabi M. S., Salmon J., Knight A. M.** (2015). Design and Performance Assessment for the V Shaped Magnet IPM Synchronous Motor, *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, (pp. 214-219), USA, Coeur d'Alene.
- [38] **Isfahani A. H., Sadeghi S.** (2008). Design of a Permanent Magnet Synchronous Machine for the Hybrid Electric Vehicle, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2(9), 566-570 doi: 10.1999/1307-6892/4408.
- [39] **Kazerooni M., Hamidifar S., Kar N. C.** (2012). Analytical modelling and parametric sensitivity analysis for the PMSM steady-state performance prediction, *IET Electric Power Applications*, 7(7) 586-596, doi: 10.1049/iet-epa.2011.0281.
- [40] **Fatemi A., Demardash N. A. O., Nehl T. W., Ionel D. M.** (2016). Large-Scale Design Optimization of PM Machines Over a Target Operating Cycle, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 54(5) 3772-3782 doi: 10.1109/TIA.2016.2563383.
- [41] **Lovelance E. C., Jahns T. M., Keim T. A., Lang J. H.** (2004). Mechanical Design Considerations for Conventionally Laminated, High-Speed, Interior PM Synchronous Machine Rotors, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 40(3), 806-812 doi: 10.1109/TIA.2004.827440.
- [42] **Hahlbeck S., Gerling D.** (2008). Design Considerations for Rotors with Embedded V-Shape Permanent Magnets, *Electrical Machines (ICEM)*, (pp. 1-4) Vilamoura, Portugal.

- [43] **Han Z., Yang H., Chen Y.** (2009). Investigation of the Rotor Mechanical Stresses of Various Interior Permanent Magnet Motors, *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Tokyo, Japan.
- [44] **Chai F., Li Y., Liang P., Pei Y.** (2016). Calculation of the Maximum Mechanical Stress on the Rotor of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6) 3420-3432 doi: 10.1109/TIE.2016.2524410
- [45] **Groschup B., Leonardi F.** (2017). Combined electromagnetic and static structural simulation to reduce the weight of a permanent magnet machine rotor for HEV application, *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, Florida, USA.
- [46] **Jung J. W., Lee B. H., Kim D. J., Hong J. P., Kim J. Y., Jeon S. M. Song D. H.** (2012). Mechanical Stress Reduction of Rotor Core of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2) 911-914, doi: 10.1109/TMAG.2011.2172582.
- [47] **Zhang J. C., Huang Z. Y., Fang Y. T., Ma Z. K.** (2012). Design of Interior PM Synchronous Traction Motor with Novel Approximate Skewed Rotor, *IECON*, (pp. 1726-1730). China: College of Electrical Engineering.
- [48] **Wang A., Li H., Lu W., Zhao H.** (2009). Influence of Skewed and Segmented Magnet Rotor on IPM Machine Performance and Ripple Torque for Electric Traction, *Electric Machines and Drives Conference*. China: NorthChina Electric Power University.
- [49] **Jiang J. W., Bilgin B., Yang Y., Sathyan A., Dadkhah H., Emadi A.** (2015). Rotor skew pattern design and optimisation for cogging torque reduction, *IET Electrical Systems in Transportation*, 6(2) 126-135, doi: 10.1049/iet-est.2015.0021.
- [50] **Zhao W., Lipo T. A., Kwon B.** (2015). Torque Pulsation Minimization in Spoke-type Interior Permanent Magnet Motors With Skewing and Sinusoidal Permanent Magnet Configurations, *IEEE Transactions on Magnetics*. USA: Florida State University.
- [51] **Momen F., Rahman K., Son Y., Savagian P.** (2016). Electrical Propulsion System Design of Chevrolet Bolt Battery Electric Vehicle, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Michigan, General Motors Global Propulsion System.
- [52] **Nakada T., Ishikawa S., Oki S.** (2014). Development of an electric motor for a newly developed electric vehicle, *SAE 2014 World Congress & Exhibition*, doi: 10.4271/2014-01-1879.
- [53] **Burress T., Campbell S.** (2013). Benchmarking EV and HEV Power Electronics and Electric Machines, *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. Knoxville: Oak Ridge National Laboratory.
- [54] **Burress T. A., Coomer C. L., Campbell S. L., Seiber L. E., Marlino L. D., Staunton R. H., Cunningham J. P.** (2008). Evaluation of the 2007 Toyota Camry Hybrid Synergy Drive System (Rapor No. 2007/190), Washington D. C.: U. S. Department of Energy Raporu.

- [55] Warner D. T., Sathya R., Schug J., Fosso S., Bubna P., Karwa M., Zaklan N. (2017). Advanced strong hybrid and plug-in hybrid engineering evaluation and cost analysis. CARB Agreement Raporu.
- [56] U. S. Department of Energy. (2017). FY 2016 Annual Progress Report for Electric Drive Technologies Program (Rapor No: DOI/EE-1532).
- [57] Sarlioglu B., Morris C. T., Han D., Li S. (2015). Benchmarking of Electric and Hybrid Vehicle Electric Machines, Power Electronics, and Batteries, *Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP)*, (pp. 519-526). USA: University of Wisconsin-Madison.
- [58] Buress T. A., Coomer C. L., Campbell S. L., Wereszczak A. A., Cunningham J. P., Marlino L. D., Seiber L. E., Lin H. T. (2009). Evaluation of the 2008 Lexus LS600H hybrid Synergy Drive System, Washington D. C.: U. S. Department of Energy Raporu.
- [59] Staunton R. H., Buress T. A., Marlino L. D., (2006). Evaluation of the 2005 Honda Accord hybrid electric drive system, Washington D. C.: U. S. Department of Energy Raporu.
- [60] Hsu J. S., Nelson S. C., Jallouk P. A., Ayers C. W., Wiles R. H., Campbell S. L., Coomer C. L., Lowe K. T., Buress T. A. (2005). Report on Toyota Prius motor thermal management, Washington D. C.: U. S. Department of Energy Raporu.
- [61] Staunton R. H., Ayers C. W., Marlino L. D., Chiasson J. N., Buress T. A. (2006). Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system, Washington D. C.: U. S. Department of Energy Raporu.
- [62] Sivadas S. V. (2012). *Sensorless control of permanent Magnet synchronous Magnet motor at low speed* (Master's thesis). Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology, Netherlands.
- [63] Grunditz E. A. (2016). *Design and assessment of battery electric vehicle powertrain, with respenct to performance, energy consumption and electric motor thermal capacity* (Doktora tezi). Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [64] Rosu M., Zhou P., Lin D., Popescu M., Blaabjerg F., Rallabandi V., Staton D. (2018). *Multiphysics Simulation by Desing for Electrical Machines, Power Electrocnics, and Drives*. IEEE Press Wiley, New Jersey.
- [65] Bodurođlu T. (1984). *Elektrik makinaları dersleri, Asenkron makinaların hesap ve konstrüksiyonu Cilt 2, Kısım 3*. Gümüşsuyu: Teknik Üniversite Matbaası.
- [66] Çimen M. A. (2010). *Elektrikli ve seri hibrit araçlarda simülatör kullanarak kalıcı miknatsız senkron tahrik motoru kontrolü* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [67] Stator D., Boglietti A., Cavagnino A. (2005). Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(3), doi: 10.1109/TEC.2005.847979.
- [68] Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcova V. (2008). *Design of Rotating Electrical Machines*. United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd.

- [69] **Bourchas K.** (2015). *Manufacturing effects of iron losses in electrical machines* (Master's thesis). Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [70] **Krings A.** (2014). Iron losses in electrical machines-Influence of material properties, manufacturing process and inverter operation (Doktora tezi). KTH School of Electrical Engineering, Sweden.
- [71] **E/ECE Standarts.** (2013). Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions, Addendum 84: Regulation No. 85 Rev. 1.
- [72] **Url-14** < https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m270-35a_1.pdf/>, erişim tarihi 01.05.2017.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ahmet Hakan Oğuz
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.12.1990, Tosya
E-posta : oguzah@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016-2017 yıllarında TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü' nde elektrikli araç elektrik motoru geliştirilmesi üzerine çalıştı
- 2015 yılında Elektrik Mühendisleri Odası 10. Bitirme Tasarım Projesi Yarışması' nda 1. lik ödülünü kazandı