KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TANECİK - YÖNELİMLİ MANYETİK MALZEMENİN KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİ

BURAK ÖZDİNÇER

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TANECİK - YÖNELİMLİ MANYETİK MALZEMENİN KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİ

BURAK ÖZDİNÇER

Doç.Dr. Metin AYDIN		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Prof.Dr. Zafer BİNGÜL		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Dr.Öğr. Üyesi Emin YILDIRIZ		
Jüri Üyesi,	**Düzce Üniversitesi**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 25.06.2020

ÖNSÖZ VETEŞEKKÜR

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar yüksek moment yoğunluklarına ve yüksek verimlere sahip olduklarından dolayı asenkron motorlara göre tercih edilme sebebi olmaktadırlar. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar yüksek verime sahip olmalarına rağmen kayıplarındaki en büyük etki demir kayıplarıdır.

Demir kayıplarının azaltılmasıyla motor performansının arttırılabileceği bilinmektedir. Bu sebeple tane yönelimsiz manyetik malzeme yerine manyetik akının yoğun olduğu bölgelerde tane yönelimli manyetik malzeme kullanılması amaçlanmıştır. Ulusal ve uluslararası literatürde bu konuda çalışmaların azlığı danışman hocam Doç. Dr. Metin Aydın tarafından fark edilmiş ve beni bu konuda araştırma yapmaya sevk etmiştir. Bu sebeple, bu çalışmada tane yönelimsiz manyetik malzemeden üretilmiş kalıcı mıknatıslı senkron motorun performansı ile sadece dişlerdeki malzemenin tane yönelimli manyetik malzeme olduğu kalıcı mıknatıslı senkron motorun performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bilgisayar ortamında motorların analizlerinin yapılmasıyla analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Prototip üretimi gerçekleştirilen motorların testleri yapılarak test sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu bağlamda çalışmalarımda tecrübesiyle beni her zaman yönlendiren, tez çalışmamın başından sonuna kadar beni titizlikle takip eden değerli hocam Doç. Dr. Metin Aydın’a, bilgi birikimini ve desteğini esirgemeyen hocam Dr. Mehmet Güleç’e, yardımlarından dolayı Sn. Murat Yörüden ve Sn. Ersin Yolaçan’a teşekkür ederim. Tez kapsamında ortaya çıkan motor prototipinin üretiminde çalışmakta olduğum Akım Metal San. ve Tic. A.Ş.'ne ve malzeme konusundaki desteklerinden dolayı Enpay A.Ş. ve Enis Ceylan'a ve şirket içerisindeki çalışma arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren sevgisini, desteğini ve inancını benden esirgemeyen güç kaynaklarım annem Öznur Özdinçer, babam Fehmi Özdinçer ve ağabeyim Barış Özdinçer 'e, son olarak her zaman ve her konuda yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ocak -2020 Burak ÖZDİNÇER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VETEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 4
1.1. Senkron Motorlar 4
1.2. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda Kullanılan Sac Malzemeler 6
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 9
2.1. TY Malzemelerin Kullanıldığı SM Literatürü 9
2.2. SM Motorlarda Demir Kayıpları 13
3. ÖRNEK SERVO MOTORUN SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ 17
3.1. Örnek Servo Motor ve Tasarım Süreci 17
3.2. Örnek Servo Motorun Yüksüz ve Yüklü Durum Analizleri 20
3.3. Örnek Servo Motorun Detaylı Kayıp Analizleri 23
3.4. SMC Malzemeli Servo Motorun Performans Analizleri 24
3.4.1. SMC Malzemenin Özellikleri 24
3.4.2. SMC Malzemeli Servo Motorun Yüksüz Durum Analizi 25
3.4.3. SMC Malzemeli Servo Motorun Yüklü Durum Analizi 27
4. TY MANYETİK MALZEMELİ KMSM SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ 29
4.1. TY Manyetik Malzemeli Servo Motorun Yüksüz ve Yüklü Durum Analizleri 29
4.2. TY Manyetik Malzemeli KMSM Detaylı Kayıp Analizleri 32
5. MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE TESTLERİ 34
5.1. Motor Prototip Üretimi 34
5.2. Motor Testleri ve Sonuçları 40
6. TY MANYETİK MALZEMELİ MOTOR TASARIM ALTERNATİFLERİ 44
6.1. KMSM Tasarım Alternatifleri 46
6.2. Alternatif Tasarımların SEA Sonuçları 49
7. DURUM 2 TASARIMININ PROTOTİP ÜRETİMİ VE TESTLERİ 52
7.1. Motor Prototip Üretimi 52
7.2. Motor Testleri ve Sonuçları 55
7.3. Direnç ve Endüktans Ölçümleri 58
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 59
KAYNAKLAR 61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 63
ÖZGEÇMİŞ 64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Fırçalı ve fırçasız motor arasındaki fark 4
Şekil 1.2. Elektrik motorlarının sınıflandırılması 5
Şekil 1.3. Kalıcı mıknatıslı senkron motor yapısı 6
Şekil 1.4. Manyetik sac malzemelerin B-H eğrisi karşılaştırması 7
Şekil 1.5. Manyetik sac malzemelerin μ-H eğrisi karşılaştırması 7
Şekil 1.6. Manyetik sac malzemelerin B-P eğrisi karşılaştırması 8
Şekil 1.7. (a) NO manyetik malzeme kullanılmış motor modeli, (b) boyundurukta NO manyetik malzeme, dişlerde TY manyetik malzeme kullanılmış motor modeli, (c) SMC malzeme kullanılmış motor modeli 8
Şekil 2.1. TY manyetik sacının oryantasyon yönünde ve oryantasyon yönünün tersi durumundaki B-H eğrisi 9
Şekil 2.2. TY manyetik sacının yapısı 10
Şekil 2.3. TY manyetik sacının kesim sonrası bozulan yapısı 10
Şekil 2.4. TY manyetik sacının tavlama sonrasındaki yapısı, boyunduruk(a), dişler(b) 10
Şekil 2.5. NO ve TY manyetik malzemeli motorun demir kayıpları karşılaştırması 12
Şekil 2.6. TY manyetik malzemenin laminasyon dizilimi 12
Şekil 2.7. Stator dişlerinin yapısı ve kullanılan manyetik malzeme çeşidi 13
Şekil 3.1. Servo motorun tasarım aşamaları 18
Şekil 3.2. Servo motorun güç yoğunluğuna göre optimum kutup sayısının belirlenmesi 19
Şekil 3.3. Servo motorun ön tasarımı sonrası optimum kutup sayısının belirlenmesi 19
Şekil 3.4. Örnek servo motorun 2B modeli 20
Şekil 3.5. Örnek servo motorun mesh yapısı ve hava aralığındaki mesh yoğunluğu 20
Şekil 3.6. Örnek servo motorun 3000rpm hızdaki hat Zıt EMK değişimi 21
Şekil 3.7. Örnek servo motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu değişimi 21
Şekil 3.8. Örnek servo motorun 3000rpm, 5Arms akımdaki çıkış momenti değişimi 22
Şekil 3.9. Örnek servo motorun yüklü durumdaki akı yoğunluğu değişimi 22
Şekil 3.10. Örnek servo motorun hıza göre moment değişimi 23
Şekil 3.11. Örnek servo motorun hıza göre stator kayıpları değişimi 23
Şekil 3.12. Örnek servo motorun hıza göre rotor kayıpları değişimi 24
Şekil 3.13. Somaloy® 1000 5P - 800MPa B-H eğrisi 25
Şekil 3.14. SMC malzemeli servo motorun 2B modeli 25
Şekil 3.15. SMC malzemeli servo motorun mesh yapısı ve hava aralığındaki mesh yoğunluğu 26
Şekil 3.16. SMC malzemeli servo motorun 3000rpm hızdaki hat Zıt EMK değişimi 26

Şekil 3.17. SMC malzemeli servo motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu değişimi 27
Şekil 3.18. SMC malzemeli servo motorun 3000rpm, 5Arms akımdaki çıkış momenti değişimi 27
Şekil 3.19. SMC malzemeli servo motorun yüklü durumdaki akı yoğunluğu değişimi 28
Şekil 4.1. TY manyetik malzemeli KMSM 2B modeli 29
Şekil 4.2. TY manyetik malzemeli KMSM mesh yapısı 30
Şekil 4.3. TY manyetik malzemeli servo motorun 3000rpm hızdaki hat Zıt EMK değişimi 30
Şekil 4.4 TY manyetik malzemeli servo motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu değişimi 31
Şekil 4.5. TY manyetik malzemeli KMSM çıkış moment değişimi 31
Şekil 4.6. TY manyetik malzemeli servo motorun yüklü durumdaki akı yoğunluğu değişimi 32
Şekil 4.7. TY manyetik malzemeli KMSM hıza göre moment değişimi 32
Şekil 4.8. TY manyetik malzemeli KMSM hıza göre stator kayıpları değişimi 33
Şekil 4.9. TY manyetik malzemeli KMSM hıza göre rotor kayıpları değişimi 33
Şekil 5.1. TY manyetik malzeme lazer kesimi 34
Şekil 5.2. Lazer kesimi tamamlanmış TY manyetik sacları 35
Şekil 5.3. TY manyetik sac malzemeden kesilmiş stator segment sacları 35
Şekil 5.4. NO manyetik sac malzemenin lazer kesimi 36
Şekil 5.5. NO manyetik sac malzemeden kesilmiş stator boyunduruk sacı 36
Şekil 5.6. NO manyetik sac malzemenin fikstürü ve paketlenmesi 37
Şekil 5.7. TY manyetik sac malzemenin fikstürü ve paketlenmesi 37
Şekil 5.8. Stator boyunduruğunun laminasyon paketi ve gövdeye çakılması 38
Şekil 5.9. Sargı fikstürü yardımı ile segment plastiklerine yapılan sarım 38
Şekil 5.10. Sargı plastiklerinin stator segmentlerine yerleştirilmesi sonrası segmentlerin stator boyunduruğuna çakılması 39
Şekil 5.11. Epoksi dökülmüş motor gövdesinin ön ve arka kısmının görüntüsü 39
Şekil 5.12. Motor gövdesinin X-ray görüntüsü 40
Şekil 5.13. Motorun rotoru, gövdesi, ön ve arka kapakları 40
Şekil 5.14. Motor test düzeneği 41
Şekil 5.15. Yüksüz durum analiz sonuçlarının karşılaştırılması 41
Şekil 5.16. Yüksüz durum test sonuçlarının karşılaştırılması 42
Şekil 5.17. Yüklü durum analiz sonuçlarının karşılaştırılması 42
Şekil 5.18. Yüklü durum test sonuçlarının karşılaştırılması 43
Şekil 6.1. Tasarım alternatifleri modelleri Durum 1 (a), Durum 2 (b), Durum 3 (c), Durum 4 (d), Durum 5 (e), Durum 6 (f) 45
Şekil 6.2. Durum 1 için detaylı analiz sonuçları 46
Şekil 6.3. Durum 2 için detaylı analiz sonuçları 47
Şekil 6.4. Durum 3 için detaylı analiz sonuçları 47
Şekil 6.5. Durum 4 için detaylı analiz sonuçları 48
Şekil 6.6. Durum 5 için detaylı analiz sonuçları 48
Şekil 6.7. Durum 6 için detaylı analiz sonuçları 49

Şekil 6.8. Yüksüz durum analizleri sonucunda hat tepe değerlerinin karşılaştırılması 49
Şekil 6.9. Yüklü durum analizleri sonucunda ortalama tork çıkışının karşılaştırılması 50
Şekil 6.10. Stator boyunduruk kayıplarının karşılaştırılması 50
Şekil 6.11. Stator diş kayıplarının karşılaştırılması 50
Şekil 6.12. Toplam stator kayıplarının karşılaştırılması 50
Şekil 6.13. Tork-Akım analizi sonucunda ortalama tork değerlerinin karşılaştırılması 51
Şekil 7.1. Durum 2 stator saclarının lazer kesimi 52
Şekil 7.2. Lazer kesimi tamamlanmış Durum 2 stator sacları 53
Şekil 7.3. Lazer kesimi tamamlanmış Durum 2 stator saclarının fikstüre yerleştirilmesi 53
Şekil 7.4. Stator paketi boyunca 40° açıyla döndürülmüş 9 adet sac paket grubunun yerleştirilmesi 54
Şekil 7.5. Stator fikstüründen çıkarılan stator sac paketi 54
Şekil 7.6. Stator sac paketinin gövdeye çakılması ve sargı plastiklerinin yerleştirilmesi 55
Şekil 7.7. Yüksüz durum test sonuçlarının karşılaştırılması 56
Şekil 7.8. Yüklü durum test sonuçlarının karşılaştırılması 57

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. KM doğrusal senkron motor tasarım kriterleri 11
Tablo 2.2. Demir kayıpları yaklaşımı için ayrık modeller 14
Tablo 3.1. KM senkron motor tasarım kriterleri 18
Tablo 6. TY Motor Tasarım Alternatifleri 44
Tablo 7. Elektrik zaman sabiti karşılaştırması 58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
BLAC	: Brushless Alternative Current (Fırçasız Alternatif Akım)
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
NdFeB	: NeodymiumIronBoron
SE	: Sonlu Eleman
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
KM	: Kalıcı Mıknatıs
SM	: Senkron Motor
KMSM	: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor
NO	: Non – Oriented (Tanecik - yönelimsiz Manyetik Malzeme)
TY	: Tanecik - Yönelimli Manyetik Malzeme
SMC	: Soft Magnetic Composite (Yumuşak Manyetik Kompozit Malzeme)
Zıt-EMK	: Zıt Elektro Motor Kuvveti
3B	: 3 boyutlu
2B	: 2 boyutlu
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)

TANECİK - YÖNELİMLİ MANYETİK MALZEMENİN KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİ

ÖZET

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların son yıllarda asenkron motorların yerini almasıyla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motorların geliştirilmesi önem kazanmıştır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda verim arttırma ve kayıpları minimuma düşürme çalışmaları yapılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle motor maliyetleri düşerken verimin artması beklenmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada tanecik - yönelimsiz manyetik malzeme ile üretilmiş kalıcı mıknatıslı senkron motorun analizleri ve testleri yapılmıştır. Sadece dişlerinin tanecik - yönelimli manyetik malzemeden üretildiği kalıcı mıknatıslı senkron motorun da analizleri ve testleri yapılmıştır. İki motorun analiz ve test sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda dişlerin tanecik - yönelimli manyetik malzemeden üretildiği motorun daha yüksek moment verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AC Senkron Motor Tasarımı, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor, Senkron Motor, Tanecik-Yönelimli Manyetik Malzeme, Tanecik-Yönelimsiz Manyetik Malzeme.

INFLUENCE OF ORİENTED SİLİCON STEEL ON THE PERFORMANCE OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

ABSTRACT

Permanent magnet synchronous motors have replaced the asynchronous motors in recent years. For this reason, the development of permanent magnet synchronous motors has gained importance. In permanent magnet synchronous motors, it is important to increase efficiency and minimize losses. With the development of technology, motor costs are expected to decrease while efficiency is increased. In this study, permanent magnet synchronous motor produced with non-oriented magnetic material has been analyzed and tested. The permanent magnet synchronous motor, where only stator teeth are made of oriented magnetic material, was also analyzed and tested. The analysis and test results of the two motors were examined comparatively. As a result of the investigations, it was observed that the teeth produced from oriented magnetic material gave higher torque to the motor.

Keywords: AC Synchronous Motor Design, Permanent Magnet Synchronous Motor, Synchronous Motor, Non-Oriented Magnetic Material, Oriented Magnetic Material.

GİRİŞ

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlardaki kullanım oranlarının artmasıyla birlikte KM senkron motorlarda gelişim ihtiyacı doğmuştur. Son yıllarda verimliliğin önem kazandığı dünyada, sınıfında verim seviyesi yüksek olan KM senkron motorlarının bile daha verimli olması beklenmektedir.

KM senkron motorlarda verimi arttırmak için kullanılan manyetik malzemelerin kalitesinin arttırılması gerekmektedir. Kalite ile birlikte özellikleri iyi olan manyetik malzemeler kullanılarak verim arttırılabilir. Bu çalışma ile KM senkron motorlarda kullanılan manyetik malzeme farkının performansa olan etkisi incelenmektedir.

Bu çalışmanın amacı, tanecik - yönelimsiz manyetik malzeme ile üretilmiş KM senkron motorun analizlerini yapmak, testlerini gerçekleştirmek, sadece dişleri tanecik - yönelimli manyetik malzeme ile üretilen KM senkron motorun analizlerini yapmak, testlerini gerçekleştirmek ve iki motorun analizlerini ve testlerini karşılaştırmalı olarak incelemektir.

Tez kapsamında, tanecik - yönelimsiz manyetik malzemeden üretilmiş KM senkron motorun detaylı kayıp ve performans analizleri yapılmıştır. Performans testleri yapılan motorun test sonuçlarından kayıp verileri ayrıştırılmıştır. Dişleri tanecik - yönelimli manyetik malzemeden üretilecek olan KMSM modellenmiştir ve detaylı kayıp ve performans analizleri yapılmıştır. Prototip üretimi gerçekleştirilen motorun performans testleri yapılmıştır. Test sonuçlarından kayıp verileri ayrıştırıldıktan sonra NO KMSM ile TY KMSM sonuçları karşılaştırılmalı incelenmiştir.

Bölüm 1'de KM senkron motorların temelleri ve kullanılan manyetik malzemeler ile ilgili bilgiler verilmiştir. Kullanılan tanecik - yönelimsiz manyetik malzeme ile kullanılan tanecik - yönelimli manyetik malzeme ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2'de literatür araştırmasına yer verilmiştir ve KM senkron motorlarda kullanılan malzemeler ile ilgili gerçekleştirilen makale araştırmasından bir özet sunulmuştur. Araştırma kapsamında farklı tip KM senkron motorlarda kullanılan NO

ve TY manyetik malzeme etkisine, incelenen performans kriterlerine ve kayıp kriterlerine odaklanılmıştır.

Bölüm 3'te tanecik - yönelimsiz manyetik malzeme kullanılarak üretilen örnek KM senkron motorun model yapısına ve yapılan SE analizlerine yer verilmiştir. Yapılan SEA sonuçlarının detaylarına, hıza göre değişen performans ve kayıp kriterlerinin grafiklerine yer verilmiştir.

Bölüm 4'te tanecik - yönelimli manyetik malzeme kullanılarak üretilen KM senkron motorun model yapısına ve yapılan SE analizlerine yer verilmiştir. Yapılan SEA sonuçlarının detaylarına, hıza göre değişen performans ve kayıp kriterlerinin grafiklerine yer verilmiştir.

Bölüm 5'te tanecik - yönelimli manyetik malzeme kullanılan motorun prototip üretimindeki detaylara ve motorların performans testlerine yer verilmiştir. Anma momenti ve anma akımında farklı hızlarda ölçülen moment ve güç verileri incelenmiştir. Test sonuçları grafiklerle detaylı olarak gösterilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak da grafiklerde gösterilmiştir.

Bölüm 6'da tanecik - yönelimli manyetik malzeme kullanılarak tasarlanabilecek motor tasarım alternatiflerine yer verilmiştir. Tasarım alternatifleri hakkında detaylı bilgiler verilmiş olup detaylı analizlerinin sonuçları grafiklerde gösterilmiştir. Alternatif tasarımlar arasındaki sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafiklerde incelenmiştir.

Bölüm 7'de tasarım alternatiflerinden en verimli olan Durum 2 tasarımının prototip üretimine ve test sonuçlarına yer verilmiştir. Ayrıca üretilen motorların elektrik zaman sabitleri hesaplanmıştır ve karşılaştırmalı olarak tabloda gösterilmiştir.

Son olarak Bölüm 8'de ise yapılan çalışmaların sonucundan ve yaşanılan sıkıntılardan bahsedilmiştir. Avantajlı durumun açıklaması yapılarak tez sonlandırılmıştır.

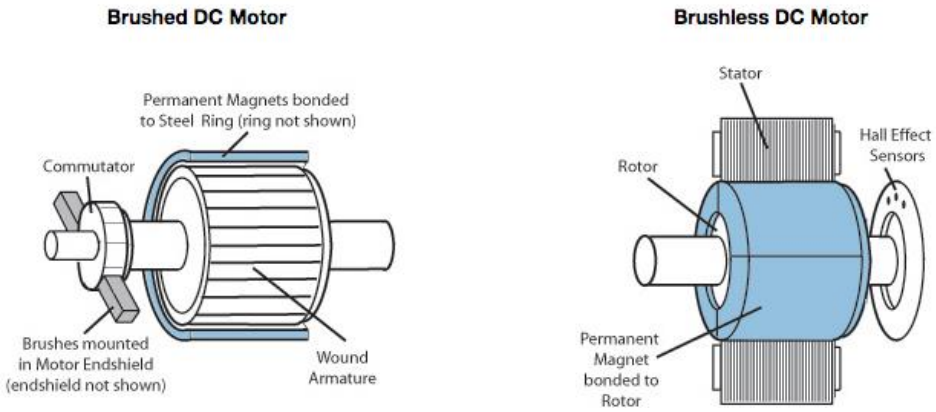
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Senkron Motorlar

Elektrik motoru, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren aygıttır. Her elektrik motoru biri sabit (stator) ve diğeri kendi çevresinde dönen (rotor ya da endüvi) iki ana parçadan oluşur.

Elektrik motorları DC motorlar ve AC motorlar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. DC ve AC motorlardaki temel fark motorların beslenme şekilleridir.

DC ve AC motorlar da kendi içerisinde fırçalı ve fırçasız olmak üzere iki farklı yapıda bulunabilirler. Fırçalı motorların rotorunda sargısı vardır ve komütatör yardımı ile dönen rotora elektrik akımı iletilir. İletilen elektrik akımı rotor sargılarında manyetik alan oluşumunu sağlar. Fırçasız motorlarda ise stator kısmında sargılar varken rotor kısmında kalıcı mıknatıslar bulunmaktadır ve rotordaki manyetik alan sürekli olarak mıknatıslar aracılığı ile sağlanmış olur. Fırçalı ve fırçasız motorların arasındaki fark Şekil 1.1'de gösterilmiştir.

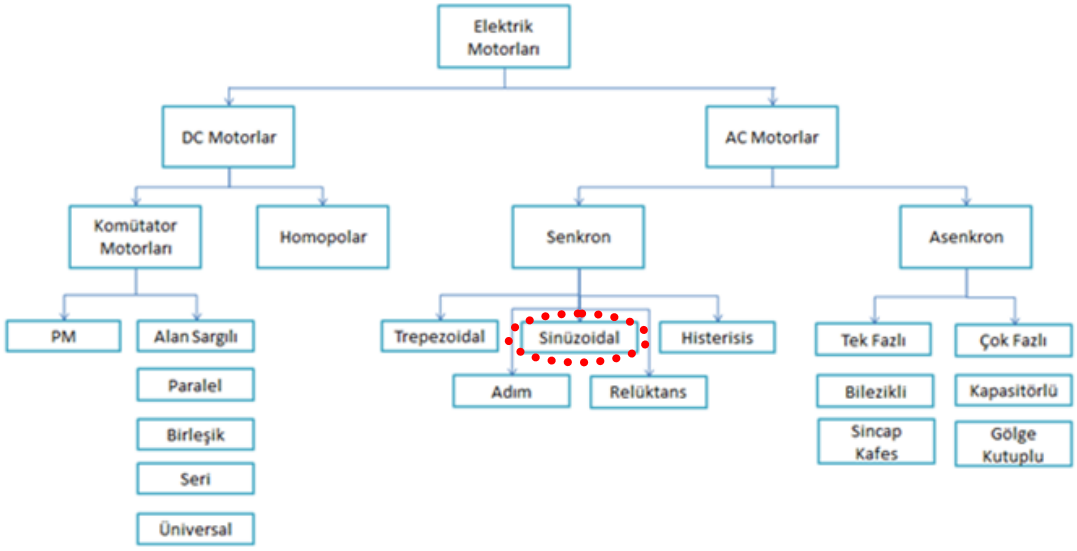


Şekil 1.1. Fırçalı ve fırçasız motor arasındaki fark [18]

Fırçasız motorlarda DC (BLDC) ve AC (BLAC) motor farkını incelemek gerekirse; BLDC motorlarda motor zıt EMK'sı trapezoidal dalga şeklinde olmakla birlikte motor akımı kare dalga şeklindedir. Bu sebeple bu tip motorlarda moment

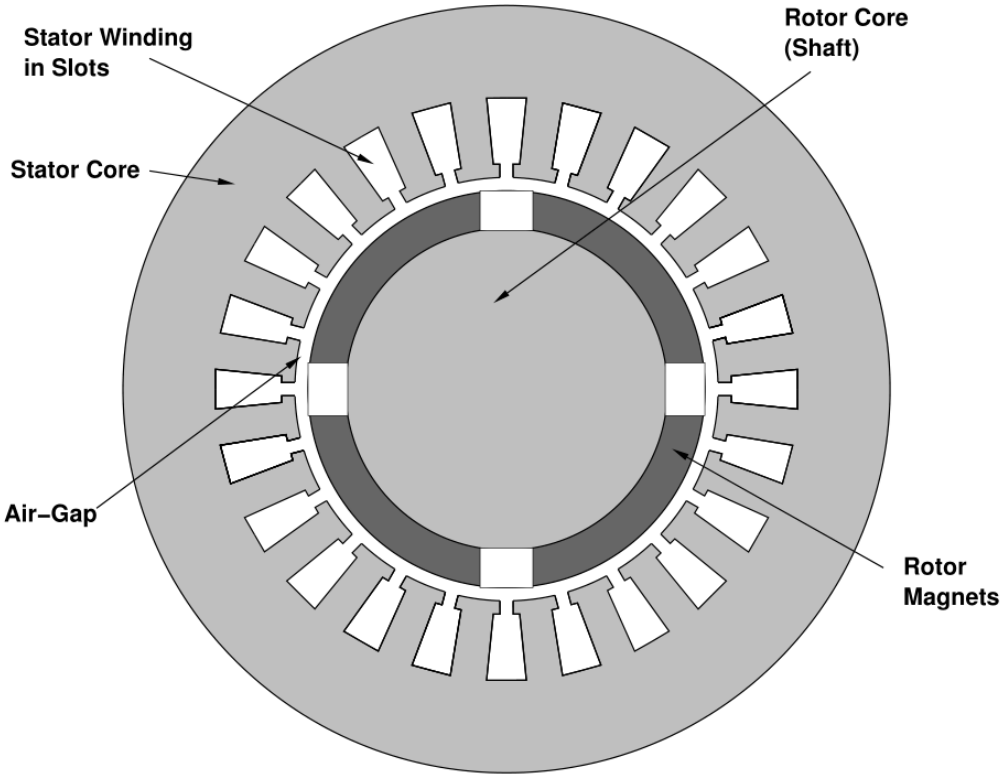
dalgalanması oldukça yüksektir. BLAC motorlarda ise; motor zıt EMK'sı sinüsoidal dalga şeklinde olmakla birlikte motor akımı da sinüsoidal dalga şeklindedir. Bu sebeple bu tip motorlarda moment dalgalanması oldukça düşüktür. Bu çalışmamızda kullandığımız motor BLAC motor yani kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) tipindedir.

Elektrik motorlarının sınıflandırmaları çok geniştir. Şekil 1.2'de elektrik motorlarının sınıflandırılması gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere elektrik motorlarının çok farklı çeşitleri bulunmaktadır. Bu çalışmada sinüzoidal beslemeli kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (BLAC, KMSM) incelenmiştir.



Şekil 1.2. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

KM senkron motorların manyetik yapısındaki bileşenler Şekil 1.3'deki gibidir. Statorda ve rotorda manyetik malzemeler kullanılırken, stator sargılarında bakır iletkenler kullanılmaktadır. Rotor üzerinde kalıcı manyetik akı kaynağı olarak NdFeB mıknatıslar kullanılmaktadır. Bu motorların oluk-kutup sayısı ve yapısı her motorda aynı olmak zorunda değildir. Motor parametrelerine göre farklı yapıda mıknatıs ve rotor yapılarına sahip olabilirler.

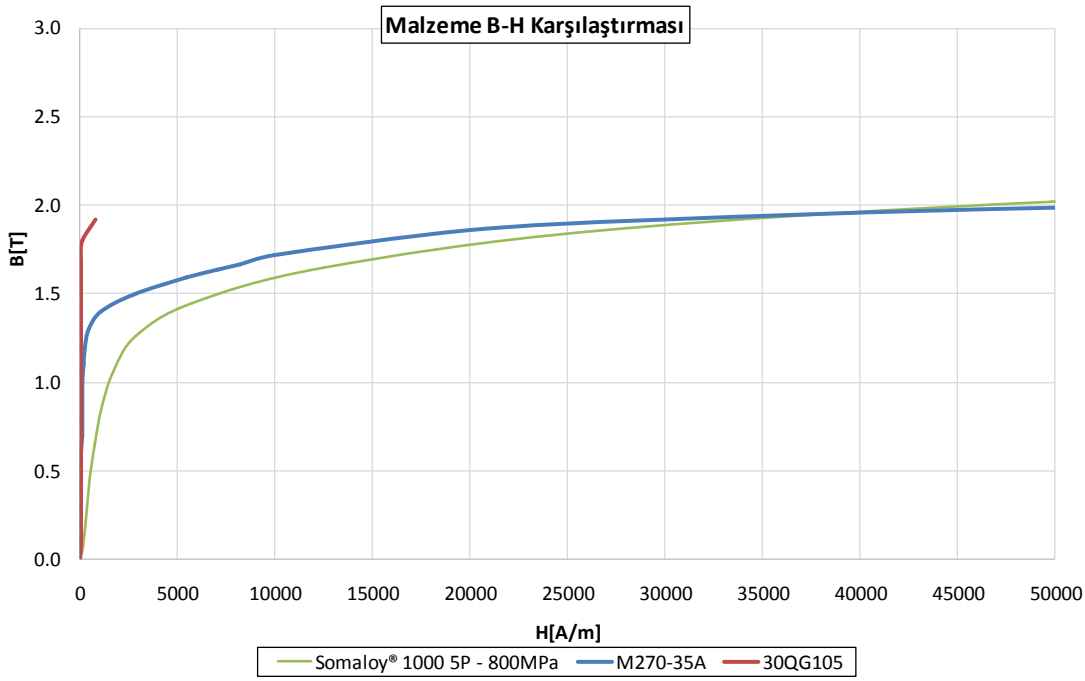


Şekil 1.3. Kalıcı mıknatıslı senkron motor yapısı [1]

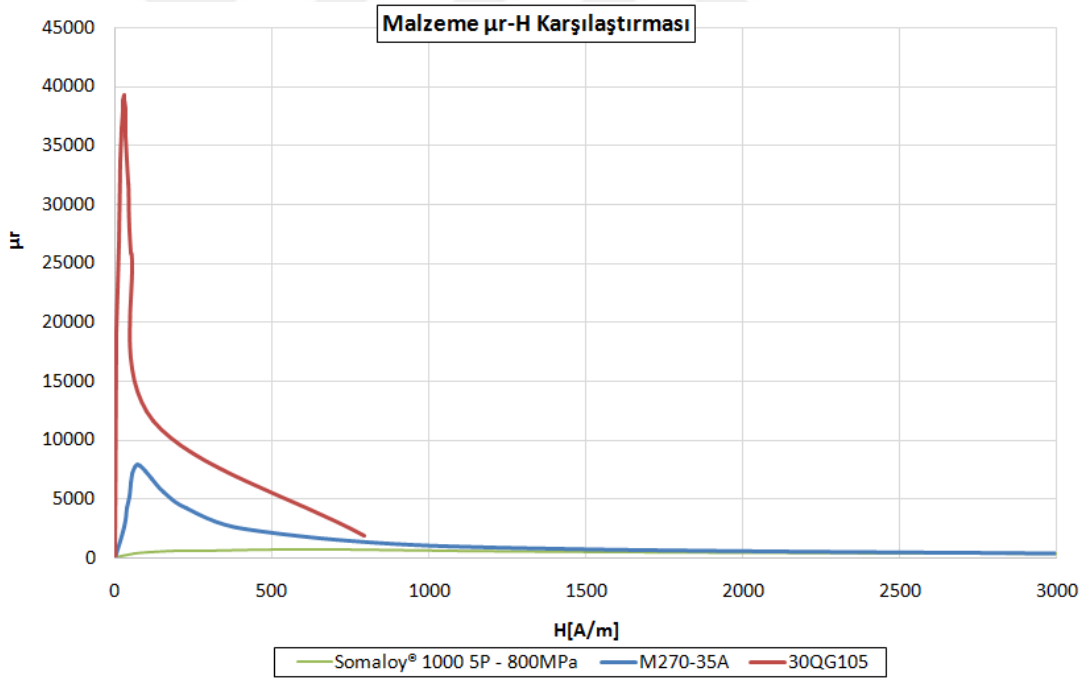
1.2. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda Kullanılan Sac Malzemeler

KM senkron motorların stator ve rotorunda düşük kayıplı manyetik sac laminasyonları kullanılır. Genellikle 0.35mm ve 0.50mm kalınlığındaki manyetik sac malzemeler tercih edilmektedir.

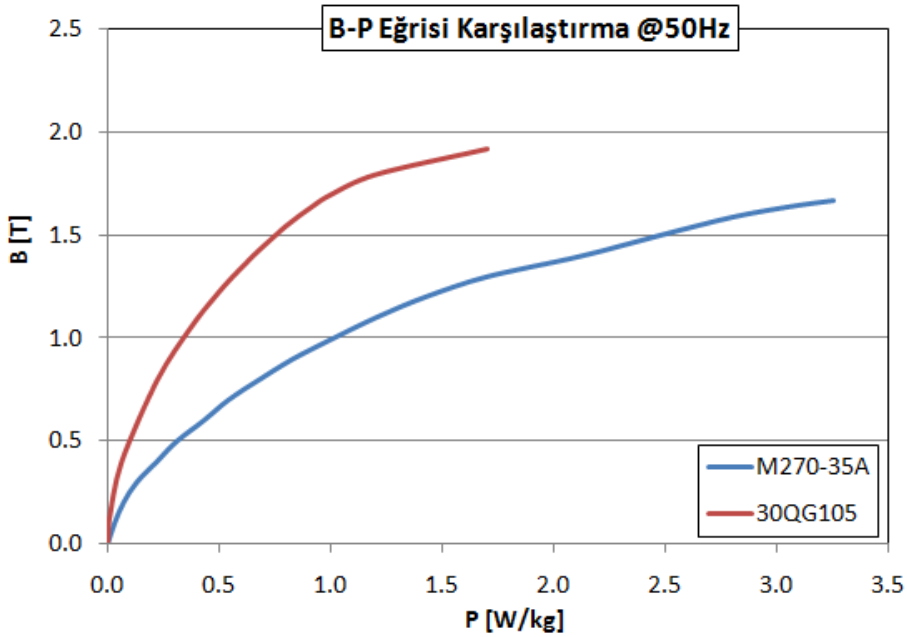
Manyetik malzeme olarak NO manyetik malzeme, TY manyetik malzeme ve SMC malzeme kullanılmıştır. Kullanılan NO manyetik malzeme M270-35A manyetik sacıdır. M270-35A manyetik sacı 0.35mm kalınlığa sahip 1.5T'da 2.47W/kg [19] kayıp değerine sahip manyetik sac malzemedir. Kullanılan TY manyetik malzeme ise 30QG105 (M105-30P) manyetik sacıdır. 30QG105 manyetik sacı 0.30mm kalınlığa sahip 1.5T'da 0.75W/kg kayıp değerine sahip TY manyetik malzemedir. Kullanılan SMC malzeme Somaloy 1000 5P manyetik toz malzemedir ve 1.5T'da 6.5W/kg kayıp değerine sahiptir. Sac malzemelerin B-H eğrileri Şekil 1.4'te B-μ eğrileri Şekil 1.5'te ve B-P eğrileri Şekil 1.6'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Manyetik sac malzemelerin B-H eğrisi karşılaştırması

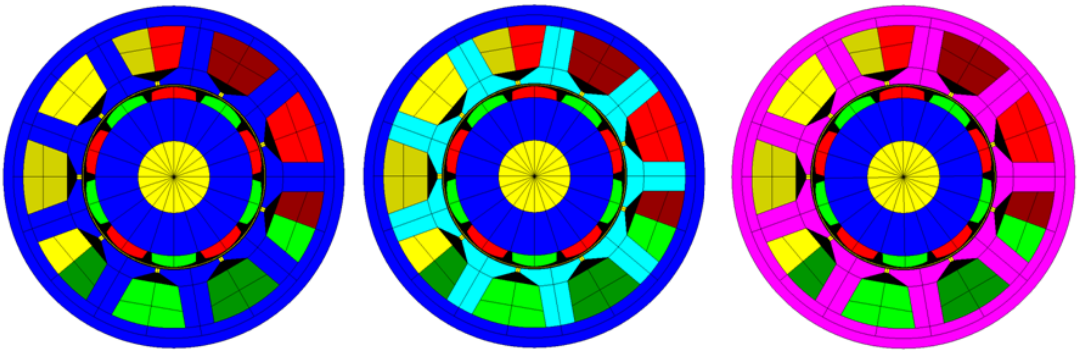


Şekil 1.5. Manyetik sac malzemelerin µ-H eğrisi karşılaştırması



Şekil 1.6. Manyetik sac malzemelerin B-P eğrisi karşılaştırması

Bu çalışmada üç tip motor ele alınacaktır. Birincisi tüm manyetik malzemesi NO manyetik malzemeden üretildiği KMSM, ikincisi stator boyunduruğu NO fakat stator dişlerinin TY manyetik malzemeden üretildiği KM senkron motor ve üçüncü olarak statorunda SMC malzeme kullanılan KM senkron motordur. Şekil 1.7'da motor modelleri ile ilgili görseller verilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 1.7. (a) NO manyetik malzeme kullanılmış motor modeli, (b) boyundurukta NO manyetik malzeme, dişlerde TY manyetik malzeme kullanılmış motor modeli, (c) SMC malzeme kullanılmış motor modeli

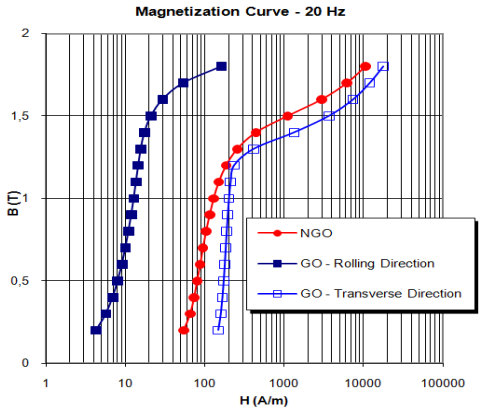
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde KM senkron motorlarla ilgili NO ve TY manyetik malzemenin kullanılmasına ilişkin oluşan farklarla alakalı literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda TY manyetik malzemenin üretim şeklinin yapısına etkisi [2] ve kullanılan motorlardaki performans etkisi [3]-[7] özetlenmiştir.

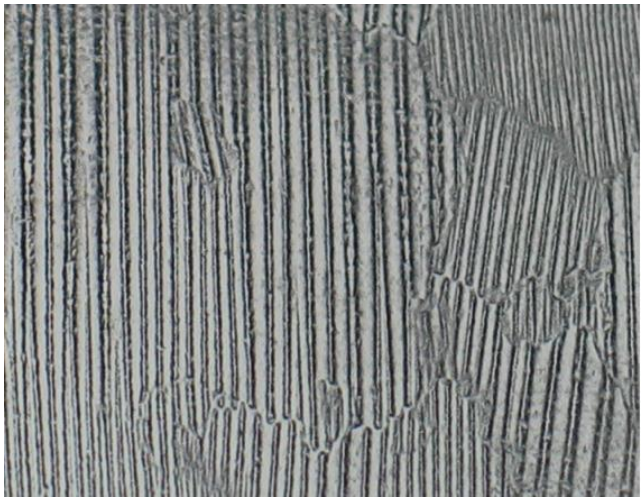
2.1. TY Malzemelerin Kullanıldığı SM Literatürü

Literatürde bu konudaki çalışmalar incelendiğinde TY manyetik malzemenin yapısıyla ilgili ve kullanıldığında performansa olan etkisini inceleyen çalışmalar ağırlıktadır.

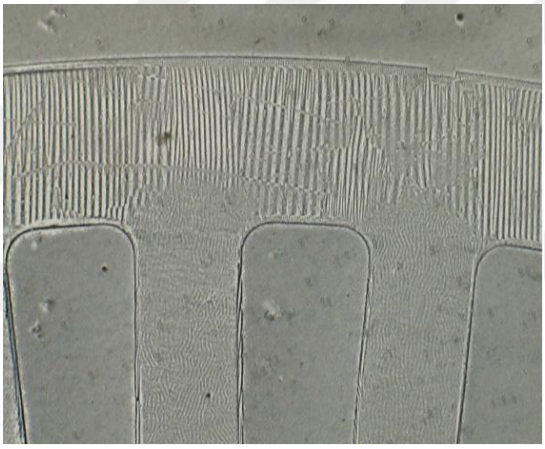
Cicale ve Albini [2] tarafından gerçekleştirilen çalışma KMSM üzerinde TY manyetik malzemenin etkisi ve üretilirken karşılaşılabilecek sorunları ele almıştır. Lazer kesim sonrası TY yapının bozulduğunu ve 1 saat boyunca 840°C'de hidrojen bulunan ortamda bekletmesiyle eski yapısını geri kazandığını ele almıştır. Şekil 2.1'de NO ve TY manyetik sacının B-H eğrilerinin karşılaştırılmalı görseli bulunmaktadır. Ayrıca oryantasyon yönünün de B-H eğrisine etkisi görülmektedir. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de TY manyetik malzemenin yapısı ile ilgili görseller bulunmaktadır.



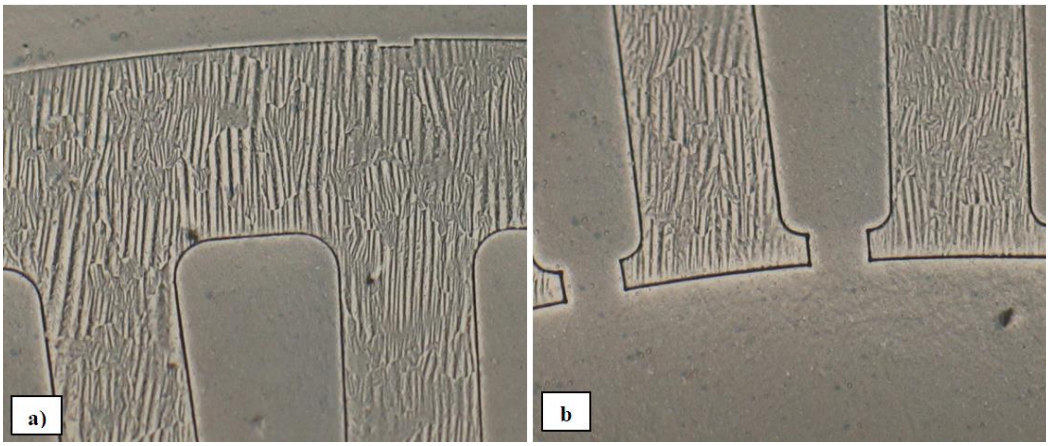
Şekil 2.1. TY manyetik sacının oryantasyon yönünde ve oryantasyon yönünün tersi durumundaki B-H eğrisi [2]



Şekil 2.2. TY manyetik sacının yapısı [2]



Şekil 2.3. TY manyetik sacının kesim sonrası bozulan yapısı [2]



Şekil 2.4. TY manyetik sacının tavlama sonrasındaki yapısı, boyunduruk(a), dişler(b) [2]

TY manyetik malzeme kullandığı motorun prototip üretimini gerçekleştirip testlerini de tamamlandıktan sonra motor moment farkının yaklaşık %5 olduğunu ele almıştır.

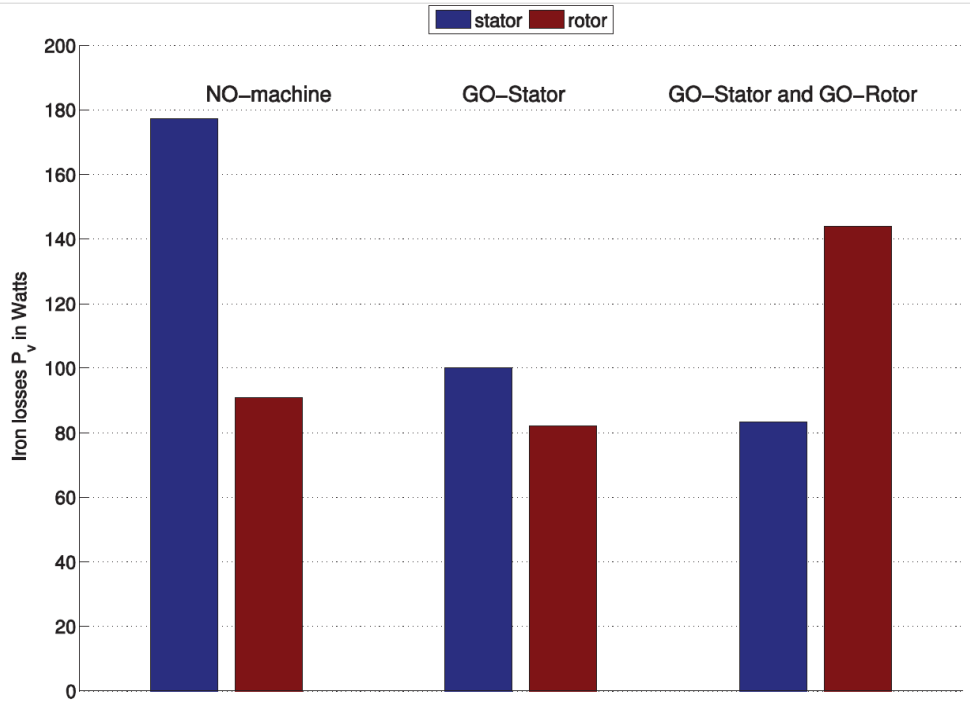
Fernando ve Hanin [3] tarafından yapılan çalışma kayıpları düşük, manyetik geçirgenliği yüksek manyetik malzemelerin araştırmasını ele almıştır. Referans açısından zengin ve kaliteli olan çalışmada bazı manyetik malzemeleri ele alarak testlere tabi tutmuşlar ve kayıp katsayıları ile ilgili tablo çıkarmışlardır. Steinmetz kayıp katsayıları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. KM doğrusal senkron motor tasarım kriterleri

		$P_c = K_h f^\alpha B^\beta + K_e f^2 B^2$				$P_c = K_h \int HdB + K_e \int \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 dt + K_{ex} \int \left(\frac{dB}{dt}\right)^{3/2} dt$		
		K_h [W/kg]	alpha	beta	K_e [W/kg]	K_h [W/kg]	K_e [W/kg]	K_{ex} [W/kg]
Somaloy500	[33]	0.1236	1	1.84	1.88×10^{-4}	0.1045	1.79×10^{-4}	8.35×10^{-4}
Somaloy700	[33]	0.08	1	1.75	1.6×10^{-4}	0.061	1.51×10^{-4}	8.36×10^{-4}
Somaloy700 7.3 g/cm^3 density	[33]	0.1022	1	1.6	8.49×10^{-5}	0.0641	6.65×10^{-5}	1.68×10^{-3}
Somaloy700 7.4 g/cm^3 density	[30]	0.0918	1	1.6	6.17×10^{-5}	0.0576	4.52×10^{-5}	1.51×10^{-3}
Somaloy700 7.5 g/cm^3 density	[30]	0.0913	1	1.6	4.22×10^{-5}	0.0573	2.57×10^{-5}	1.5×10^{-3}
Transil300	[30]	0.0155	1	2.45	1×10^{-4}	0.0183	1×10^{-4}	≈ 0
Arnon7	[40]	0.0103	1.1702	1.5813	9.61×10^{-6}	0.0147	5.87×10^{-6}	6.77×10^{-4}
NO20	[40]	0.0168	1.0764	1.7671	2.01×10^{-5}	0.0201	1.83×10^{-5}	3.03×10^{-4}
M250-50A	[40]	0.0078	1.2307	1.7902	6.42×10^{-5}	0.0221	6.58×10^{-5}	4.29×10^{-4}
M330-50A	[40]	0.0075	1.2951	1.7962	6.36×10^{-5}	0.0301	6.85×10^{-5}	6.71×10^{-4}
Hiperco 50A 0.006	[40]	0.0074	1.153	1.7224	9.26×10^{-6}	0.0125	8.31×10^{-6}	2.87×10^{-4}
HyMu 80 0.006	[40]	0.0002	1.3821	1.8865	3.78×10^{-6}	0.0015	4.38×10^{-6}	2.08×10^{-5}
VITROPERM 500F	[42]	1.19×10^{-6}	1.747	2.19	0	6.06×10^{-4}	0	≈ 0
6.5% Si steel						0.0244	2.96×10^{-6}	≈ 0

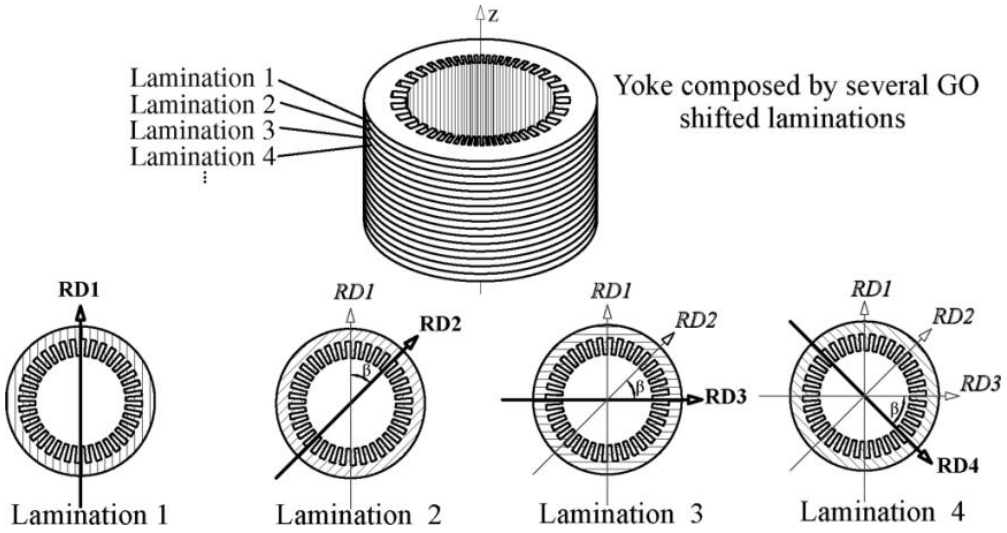
Kowal ve Sergeant [4] tarafından yapılan çalışma eksenel akılı KM senkron motorun NO manyetik malzemede ve TY manyetik malzemedeki performans karşılaştırmasını ele almıştır. Yaptığı testler sonucunda aynı hızdaki kayıp farkının 7 kat daha iyi olduğunu, aynı akımda %10 daha yüksek moment ölçtüğünü ele almıştır.

Lindner ve Hahn [5] tarafından yapılan çalışmada farklı oluk yapıları üzerinde tasarım çalışması yapmıştır. Tasarım çalışmalarını tamamladıktan sonra NO ve TY manyetik malzemeleri üzerinde analiz denemeleri yapmıştır. NO manyetik malzemeli motor ile statoru TY ve hem stator hem rotor TY manyetik malzemeli motor analizlerini karşılaştırmıştır. Şekil 2.5'te karşılaştırmaya ait grafik verilmiştir.



Şekil 2.5. NO ve TY manyetik malzemeli motorun demir kayıpları karşılaştırması [5]

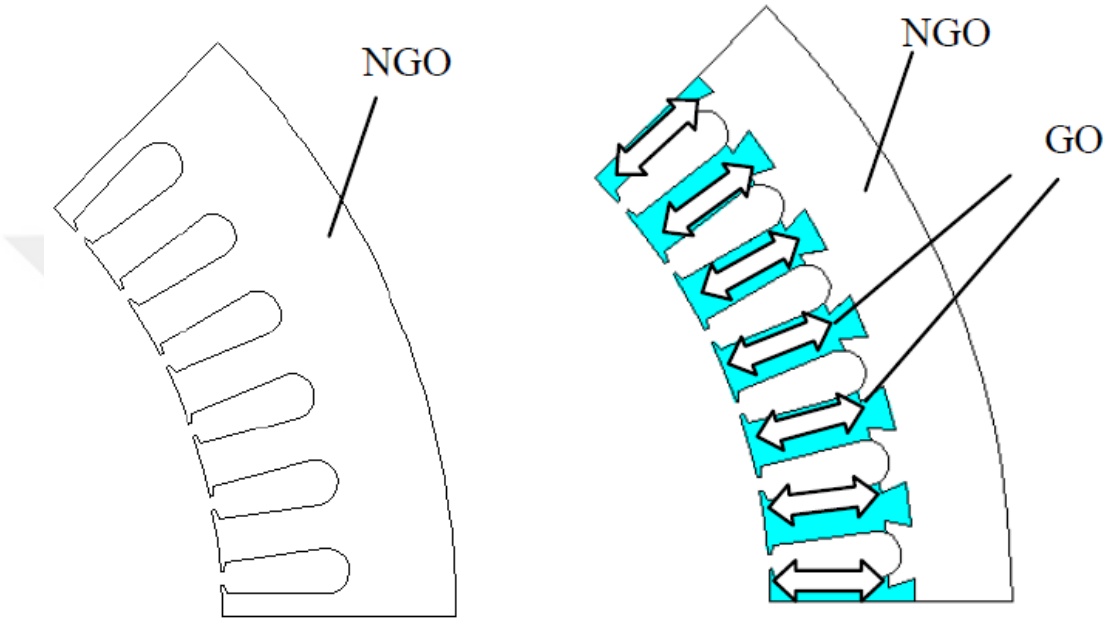
Lopez ve Cassoret [6] tarafından yapılan çalışmada TY manyetik malzemenin yönelimsiz malzemeyle olan karşılaştırması yapılmıştır. Ancak TY manyetik malzemenin laminasyon dizilimini farklı açılarda dizmiştir. Dizilimle ilgili görsel Şekil **2.6** gösterilmektedir.



Şekil 2.6. TY manyetik malzemenin laminasyon dizilimi [6]

Pei ve Zeng [7] tarafından yapılan çalışmada tez konusuna benzer bir konuda çalışmışlardır. Stator boyunduruğunda yönelimsiz manyetik malzeme kullanırken

stator dişlerinde tanecik - yönelimli manyetik malzeme kullanmıştır. Prototip üretimi yapıp testlerini gerçekleştirmiştir. Testler sonucunda performansın arttığını gözlemlemiştir. Stator dişlerinin yapısı tez konusundaki yapıdan farklılık göstermektedir. Ve karşılaştırma yapabilmek adına önemli bir çalışmadır. Stator dişlerinin yapısı Şekil **2.7**'da gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Stator dişlerinin yapısı ve kullanılan manyetik malzeme çeşidi [7]

2.2. SM Motorlarda Demir Kayıpları

Literatürde manyetik malzemelerle ilgili çalışmalar dışında demir kayıpları ile ilgili çalışmalar da araştırılmıştır. Demir kayıplarının modellenmesi ile ilgili farklı yaklaşımları ele alan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bizim çalışmamızda Bertotti demir kayıpları modeli esas alınarak kayıp analiz sonuçları çıkartılmıştır.

Steinmetz, 1892'de demir kayıplarını tahmin etmek için analitik bir yaklaşım geliştiren ilk kişiydi [8], [9]. Denklem 2.1, Steinmetz Denklemi olarak adlandırılır ve malzemenin demir kayıplarını ifade eder. Bu denklem sadece sinüzoidal akı yoğunluğu dalga formları için geçerlidir.

$$p_{Fe} = k_{SE} f^{\alpha} \widehat{B}^{\beta} \tag{2.1}$$

Burada p_{Fe} özel demir kaybı (W/kg), f frekans ve $\widehat{B}$ ise akı yoğunluğunun tepe değeridir. k_{SE}, α ve β katsayıları ise deneysel sonuçlara uyularak elde edilir.

Steinmetz'in ilk ampirik denklemine dayanarak, birkaç demir kaybı modeli geliştirilmiştir. Değiştirilmiş Steinmetz Denklemi [10] böyle bir modeldir ve herhangi bir akı yoğunluğu dalga formları için kullanılabilir. Değiştirilmiş Steinmetz Denklemi Denklem 2.2'de verilmiştir.

$$p_{Fe} = k_{SE} f_{eq}^{\alpha-1} \widehat{B}^{\beta} f \tag{2.2}$$

Burada f_{eq}, akı yoğunluğunun değişim hızına bağlı olan ve şu şekilde ifade edilen eşdeğer bir frekanstır:

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 dt \tag{2.3}$$

Steinmetz gibi yaklaşımın dışında başka bir yaklaşım, demir kayıplarını iki veya üç terimle bölmektir. Bu terimler histerezis, girdap akımı ve düzensiz kayıplara karşılık gelir. Tablo 2.2'de ayırma yaklaşımına dayanan modeller özetlenmektedir.

Tablo 2.2. Demir kayıpları yaklaşımı için ayrık modeller [11]

Jordan [1]	$p_{Fe} = p_{hyst} + p_{ec} = k_{hyst} f \widehat{B}^2 + k_{ec} f^2 \widehat{B}^2$	(2.4)
Pry and Bean [14]	$p_{Fe} = p_{hyst} + n_a p_{ec} = k_{hyst} f \widehat{B}^2 + n_{exc} k_{ec} f^2 \widehat{B}^2$	(2.5)
Bertotti [15]	$p_{Fe} = p_{hyst} + p_{ec} + p_{exc}$ $= k_{hyst} f \widehat{B}^2 + k_{ec} f^2 \widehat{B}^2 + k_{ec} f^{1.5} \widehat{B}^{1.5}$	(2.6)
Jacobs [16]	$p_{Fe} = k'_{hyst} f \widehat{B}^2 + \left(k_{ec} + \alpha_1 \widehat{B}^{\alpha_2}\right) f^2 \widehat{B}^2$ $k'_{hyst} = k_{hyst}\left(1 + \frac{B_{min}}{B_{max}}(r-1)\right)$	(2.7)

Jordan [1]'de,histerezis ve girdap akım kayıplarındaki demir kayıplarını ayırmaktadır. Her iki terim de akı yoğunluğunun genliğine bağlıdır. Bununla birlikte, histerezis terimi f (statik kayıplar), girdap akımı kayıpları f^2'ye (dinamik kayıplar) bağlıdır [1].

Denklem 2.4, NiFe laminasyonları için geçerli olmasına rağmen, SiFe için doğru değildir [1]. Bu nedenle, [14]'daki Pry ve Bean, ölçülen ve öngörülen girdap akım kayıpları arasındaki tutarsızlığı en aza indirmek için bir düzeltme faktörü n_{exc} ortaya koymuştur.

Bertotti [15]'de, fazla (veya düzensiz) kayıplar anlamına gelen üçüncü bir terim getirerek bu tutarsızlığa fiziksel bir anlam verdi. Bu terim, mıknatıslanma sürecinde mezoskopik ölçeğe karşılık gelir ve histerezis kayıplarının ve Barkhausen etkisinin göz ardı edildiği varsayılarak, alan duvarı hareketinden kaynaklanan girdap akımlarına bağlıdır [15].

Jacobs [16]'de manyetik doygunluğun neden olduğu dönme kayıplarını (r sabiti üzerinden) ve yüksek dereceli kayıpları (a_2 sabiti üzerinden) hesaplamak için Bertotti'nin modelini geliştirdi. Ayırma modelleri, yüzey etkisinin göz ardı edilebildiği bir frekans aralığı için geçerlidir [17].

Özetlemek gerekirse; senkron makinelerde demir kayıpları temel olarak manyetik alanın frekans değişiminden kaynaklanmaktadır. Manyetik alanın demir kaybı üzerindeki etkilerini dikkate almak için stator nüvesi boyunca manyetik akı yoğunlukları doğru şekilde bilinmesi gerekir.

Çekirdek kayıpları histerezis ve girdap akım kayıplarının toplamıdır. Uzun yıllar kapsamlı incelenmesine rağmen kayıplar atom seviyesindeki malzeme özelliklerinden kaynaklandığı için kayıpların doğru tahmini zor olmuştur.

Çekirdek kayıplarının tahminlerini yaparken karşılaşılan diğer zorlukların nedenleri aşağıda anlatılmıştır:

- Çekirdek kayıpları bir malzemenin içinde mikroskobik ölçüde oluşurken, kayıp tahminleri cihazların ölçebildiği manyetik alan bütünlüğü varsayımlarına dayanan makroskopik ölçek kullanır.
- Malzemelerdeki çekirdek kayıp verileri yalnızca sinüs uyarımı kullanılarak 50 veya 60Hz işlemi için kullanılabilir.
- Malzeme özellikleri partiden partiye ve aynı partide %30 kadar değişebilir.
- Çekirdek kayıpları malzemenin herhangi bir yerindeki fiziksel streslerden önemli ölçüde etkilenir. Bu nedenle laminasyonlar genellikle işlem gördükten sonra tavlanır.

- Motor içindeki manyetik alanın zamanla değişimi nadiren sinüsoidal olduğu için ve çekirdek kayıp verilerinin sinüs uyarımına göre olmasından dolayı farklılık oluşur.
- Bazı malzemeler histerezis ve girdap akımlarına ek olarak ek kayıp bileşeni sergilerler. Bu kayıp bileşeni pek anlaşılamamış olmakla birlikte geleneksel çekirdek kaybı verilerinden tespiti zordur ve genel olarak dikkate alınmaz.

Çekirdek kayıpları aşağıdaki bilgileri kullanarak azaltılabilir:

- Laminasyon kalınlığının azaltılması, girdap akım kayıpları laminasyon kalınlığının karesi ile doğru orantılıdır.
- Laminasyon malzemesinin direncini arttırma, girdap akım kayıpları malzeme direnci ile ters orantılıdır ve silikon eklemek direnci arttırmak için sık kullanılan bir yöntemdir.
- Laminasyonun işlem gördükten sonra tavlanması
- Malzemedeki manyetik alanın tepe değerini azaltmak, histerezis kayıpları manyetik alan genliği ile doğru orantılıdır.
- Kutup sayısını azaltmak, Histerezis kayıpları elektriksel frekansla doğru orantılıdır. Girdap akım kayıpları ise elektriksel frekansın karesi ile doğru orantılıdır.

3. ÖRNEK SERVO MOTORUN SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

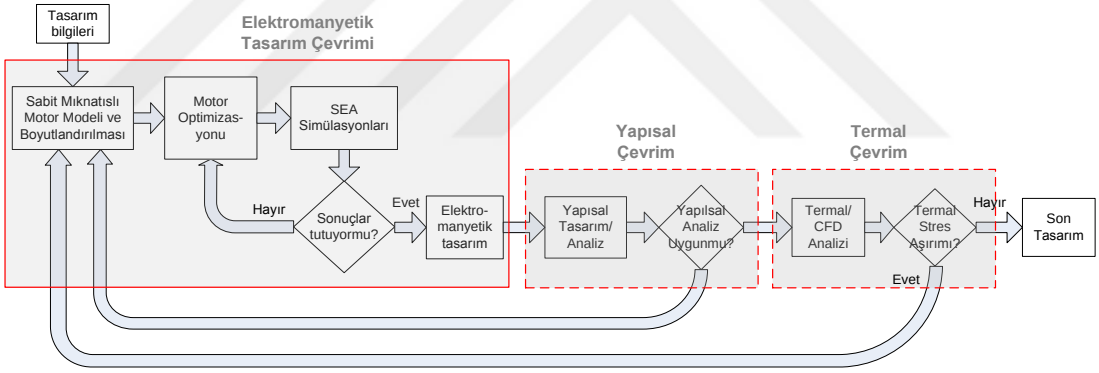
Bu bölümde belirli olan tasarım parametreleri doğrultusunda 9-oluk 10-kutuplu NO malzemeli KM senkron motorun detaylı performans ve kayıp analizleri yapılmıştır. Yüklü durum analizleri yapılan KM senkron motorun farklı hızlar için stator ve rotor kayıplarına bakılmıştır. Stator kayıpları stator boyunduruk ve stator diş kayıpları şeklinde ayıklanmıştır.

3.1. Örnek Servo Motor ve Tasarım Süreci

Kalıcı mıknatıslı radyal akılı motor adı da verilen standart SM motorların tasarımı, tüm dünyada sınırlı sayıda firma tarafından belirli güç ve hızlarda yapılmaktadır. Her ne kadar tasarımda kullanılabilecek yazılımlar mevcut olsa bile, özel bir uygulama için motor tasarımı uzmanlık istemektedir. Standart dışı kalıcı mıknatıslı motorların tasarımı ise başlı başına uzmanlık gerektiren, motor yapısına bağlı olarak denklemleri değişen, modelleme ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi analizler olmaksızın tasarımın sonlandırılamayacağı, zaman alıcı ve güç bir iştir.

Kalıcı mıknatıslı motorların tasarım süreci günümüzde artık sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret değildir. Şekil 3.1'den görüldüğü gibi, özel uygulamalar için tasarlanacak SM motor elektromanyetik, yapısal ve termal tasarım ya da analiz aşamalarını geçtikten sonra sonlandırılmalıdır. Tasarım aşamalarının her biri tasarımı bulabilmek için kendi içinde bir çevrim oluşturmak zorundadır. Elektromanyetik tasarım kendi içerisinde motor modeli, optimizasyon, 2 yada 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi gibi uzun, yorucu ve zaman alıcı aşamalardan ibarettir. Motor modeli, kalıcı mıknatıslı motorun yapısına bağlı olarak, sonlu elemanlar yazılımının türünün 2 ya da 3 boyutlu olmasına göre değişir. Elde edilen tasarım ya da tasarımlardan uygulamanın özelliklerine uygun olanı ya da olanları SEA ile çözümlenerek tasarım kriterlerine uygunluğu belirlenir. Bu döngülü süreç, kriterlerin zorluk derecesine göre birkaç defa tekrarlanabileceği göz ardı edilmemelidir. Elektromanyetik tasarım aşamasını geçmiş bir motor, yapısal tasarım ya da analiz aşamasını geçemez ise elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönülmeli ve rotor

yapısı uygulamanın hızına göre değiştirilmelidir. Unutulmaması gereken noktalardan biri yüksek hızlı uygulamalarda, rotorun yapısal bütünlüğünü korumak için tasarımın bu aşaması çok kritiktir. Şayet uygulamada yüksek rotor hızları söz konusu değilse yapısal analize gerek kalmayabilir ancak çoklukla maksimum hızda mıknatıs kaynaklı stresler hesaplanmalıdır. Tasarım sürecinde son aşama ise termal streslerin kontrol edilmesidir. Bu bir SEA olabileceği gibi CFD türü bir çalışma da olabilir. Benzer şekilde elektromanyetik ve yapısal tasarım aşamalarını geçen bir motorun termal tasarım aşamasında sorun yaratması, elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönülmesi demektir. Akım yoğunluğu düşük uygulamalarda veya çok sıcak ortamlarda çalışmayan kalıcı mıknatıslı motorlarda termal tasarıma gerek kalmayabilir. Tasarımcının tecrübesi, bu tip yapısal ve termal analizlere gerek olup olmayacağını belirleyen en önemli unsurdur. Ancak, özel bir uygulama için tasarlanan kalıcı mıknatıslı bir motor, tüm tasarım aşamalarını geçtikten sonra prototip ve üretim aşamasına aktarılmalıdır.



Şekil 3.1. Servo motorun tasarım aşamaları

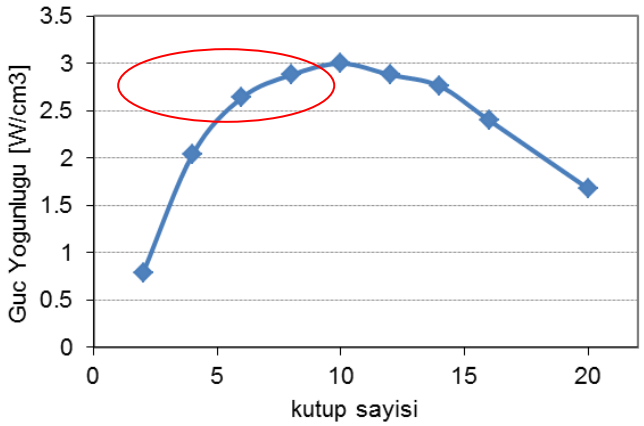
Bir proje kapsamında tasarımı gerçekleştirilen örnek servo motor yaklaşık 5 yıl önce endüstriyel bir uygulama için tasarlanmış 80mm gövdeye sahip bir servo motordur. Bu kalıcı mıknatıslı motorun ön tasarım kriterleri ise aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 3.1. KM senkron motor tasarım kriterleri

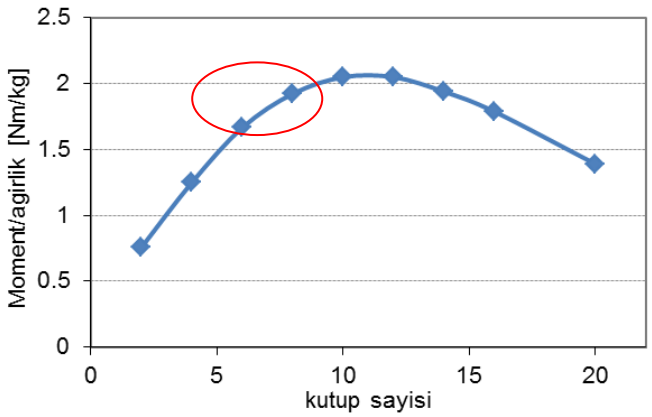
Tasarım Kriterleri	**Değer**
DC bara gerilimi	310V
Anma momenti	2.39Nm
Anma akımı	$5A_{rms}$
Anma hızı	3000rpm

Motorun optimum kutup sayısını belirleyebilmek için bir seri tasarım çalışması tasarım kriterleri sıkı bir biçimde tasarımı sınırlandırmadan uygulanmış ve farklı

parametrelerin kutup sayısına etkisi incelenmiştir. Her bir tasarım için motor güç yoğunluğu, moment yoğunluğu gibi önemli parametreler maksimum güç yoğunluğu (veya maksimum verim) noktası için belirlenmiş Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de sonuçlar verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi bu motorun optimum kutup sayısı 10 ve 12 arasında değişmekte, 10 ve 12 kutupta maksimum güç yoğunluğuna ulaşılmaktadır. Motorda kullanılan aktif malzeme ağırlığı ise yine 10 ve 12 kutuplu yapılarda minimuma ulaşmakta, düşük ve yüksek kutuplu yapılarda ise kullanılan malzeme miktarı artmakta, dolayısıyla motor hacmi ve ağırlığı artmaktadır. Bu parametrik çalışma ışığında, bu güç seviyesi ve hızda optimum kutup sayısı 10 olması gerektiği sonucuna varılmıştır.



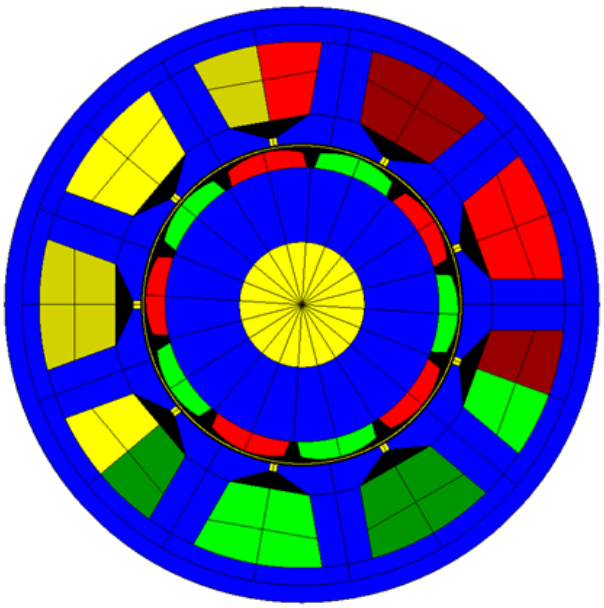
Şekil 3.2. Servo motorun güç yoğunluğuna göre optimum kutup sayısının belirlenmesi



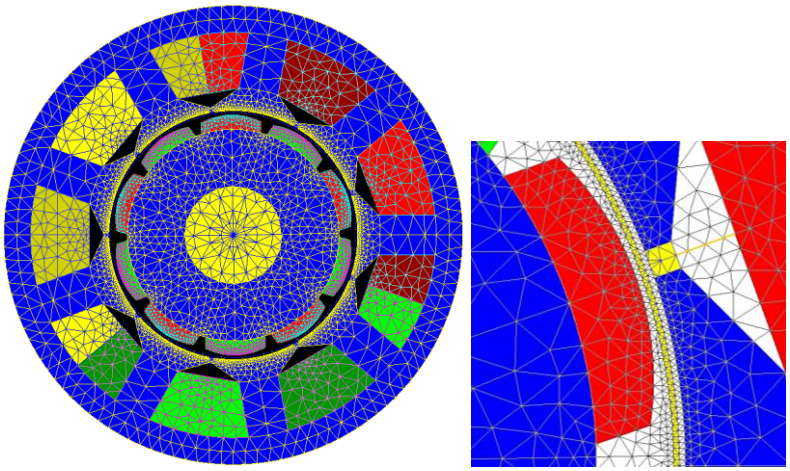
Şekil 3.3. Servo motorun ön tasarımı sonrası optimum kutup sayısının belirlenmesi

3.2. Örnek Servo Motorun Yüksüz ve Yüklü Durum Analizleri

KM senkron motorun Flux® SEA paket programı ile oluşturulmuş modeli Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Modelin mesh yapısı hava aralığında olması gerektiği gibi yoğun yapılmıştır. Bu da sonuçlarda doğruluğu arttırmak için gereklidir. Modele ait mesh yapısı Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

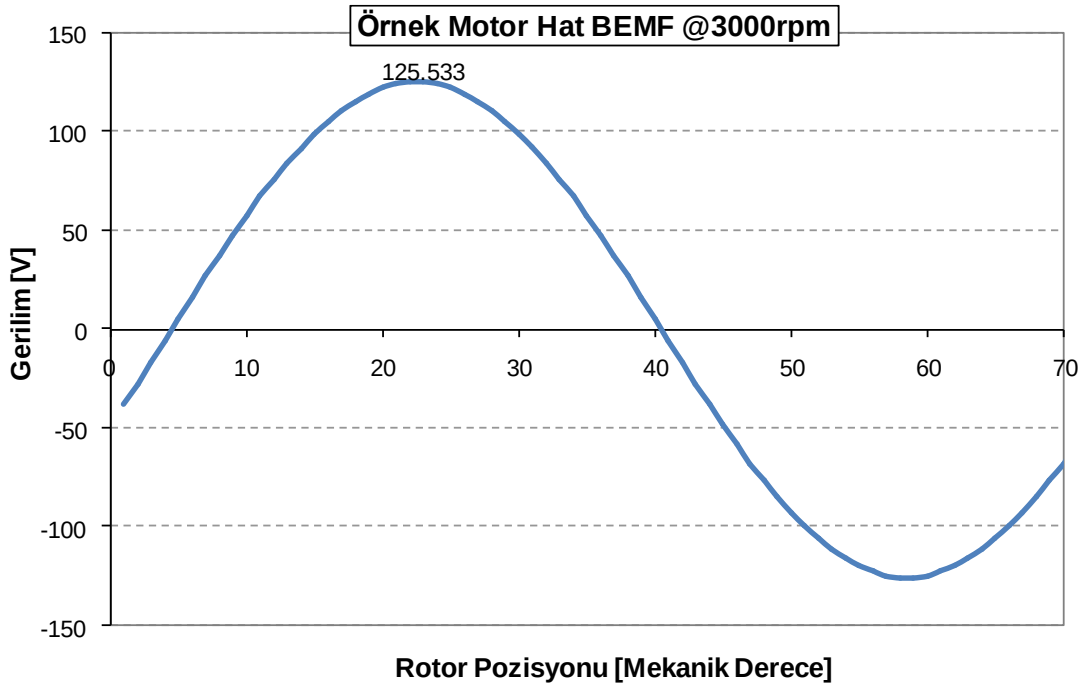


Şekil 3.4. Örnek servo motorun 2B modeli

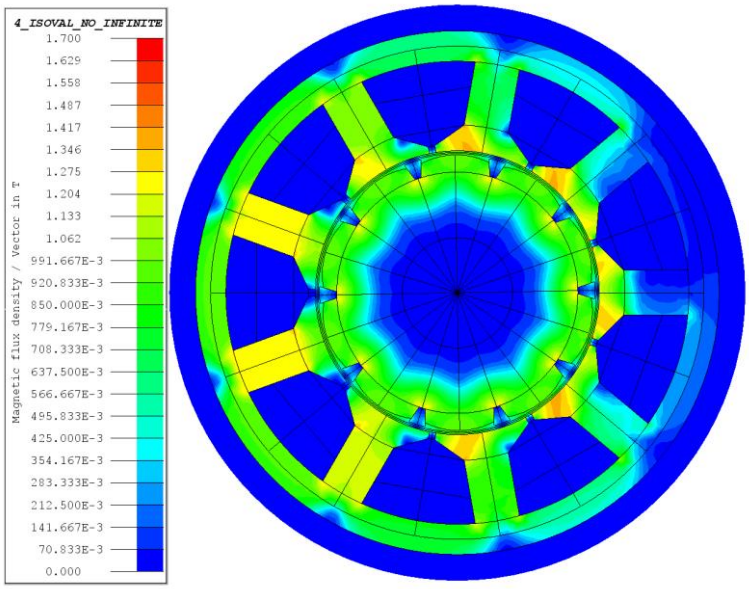


Şekil 3.5. Örnek servo motorun mesh yapısı ve hava aralığındaki mesh yoğunluğu

2B modeli yapılan örnek servo motorun yüksüz durum analizleri yapılmıştır. Yüksüz durum analizleri sonucunda hat zıt EMK'sına ve yüksüz durum akı yoğunluklarına bakılmıştır. Motorun anma hızı olan 3000rpm hızda yapılan analizler sonucu motorun hat zıt EMK'sı Şekil 3.6'te yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi Şekil 3.7'te gösterilmiştir.

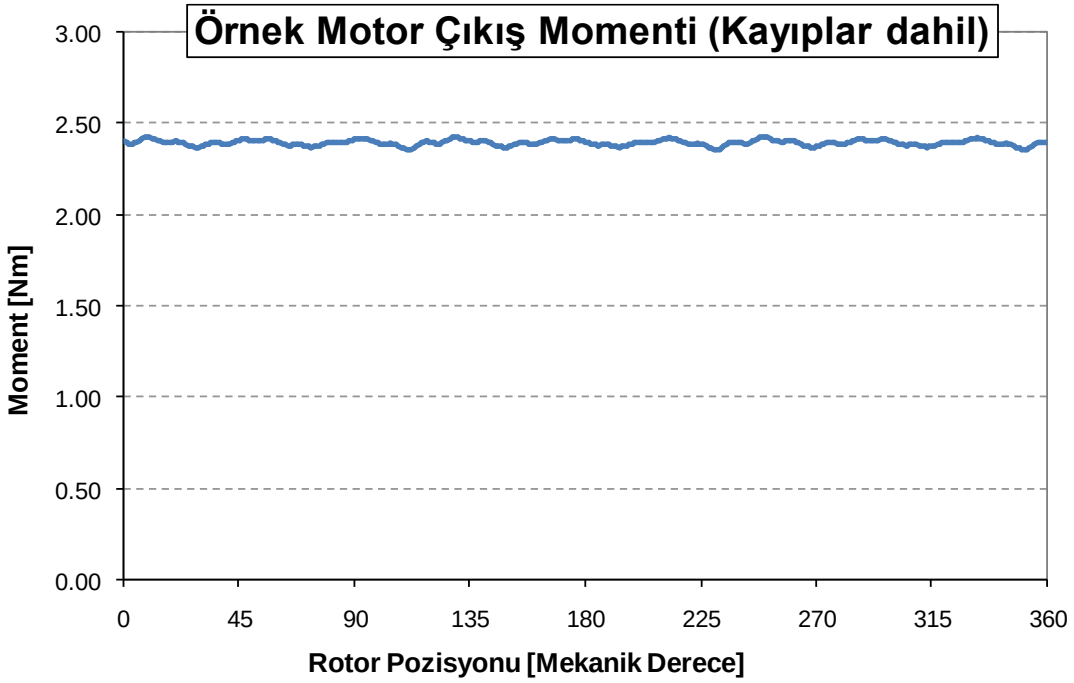


Şekil 3.6. Örnek servo motorun 3000rpm hızdaki hat Zıt EMK değişimi

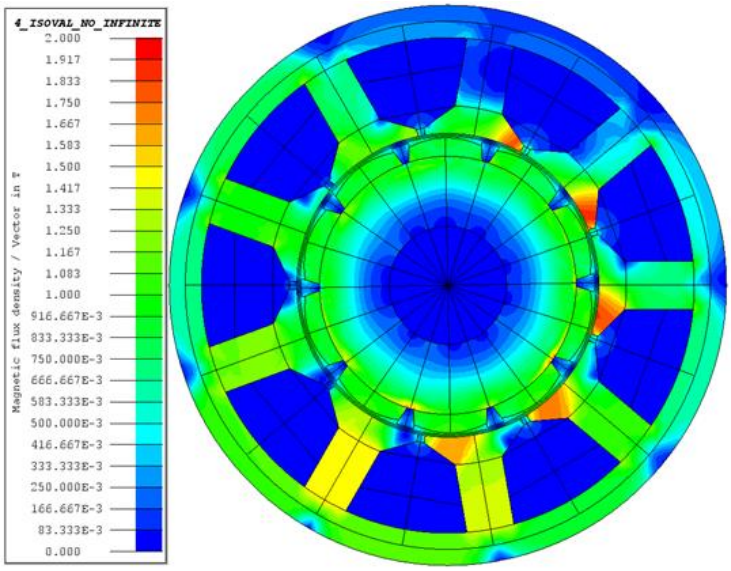


Şekil 3.7. Örnek servo motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu değişimi

Motor sargılarına $5A_{rms}$ akım uygulayarak ve anma hızında yüklü durum analizleri yapılmıştır. KM senkron motorun çıkış moment değişimi Şekil 3.8'te verilmiştir. Analizler incelendiğinde 2.39Nm ortalama moment ve %2.95 moment dalgalanması elde edilmiştir. Yük altındaki akı yoğunluğu değişimi Şekil 3.9'te gösterilmiştir.



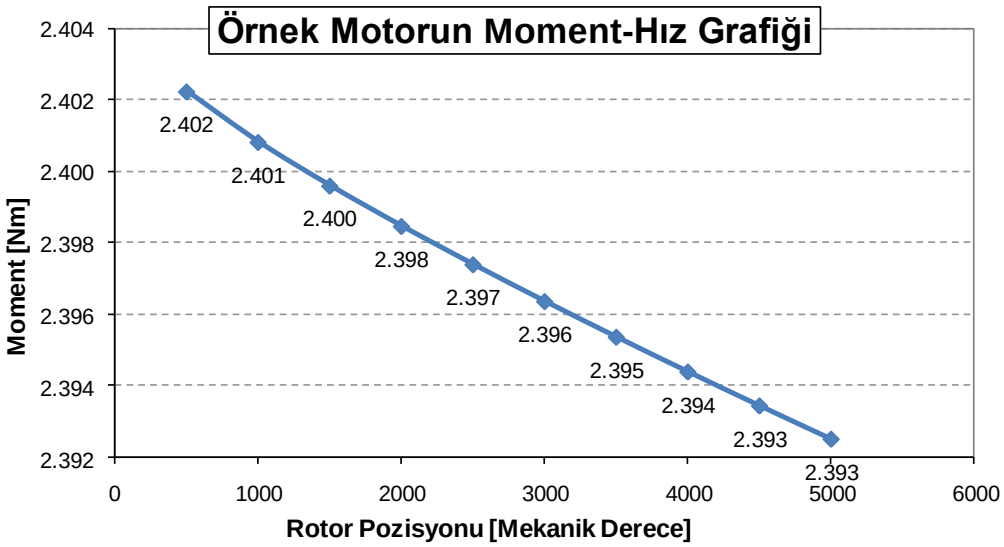
Şekil 3.8. Örnek servo motorun 3000rpm, 5Arms akımdaki çıkış momenti değişimi



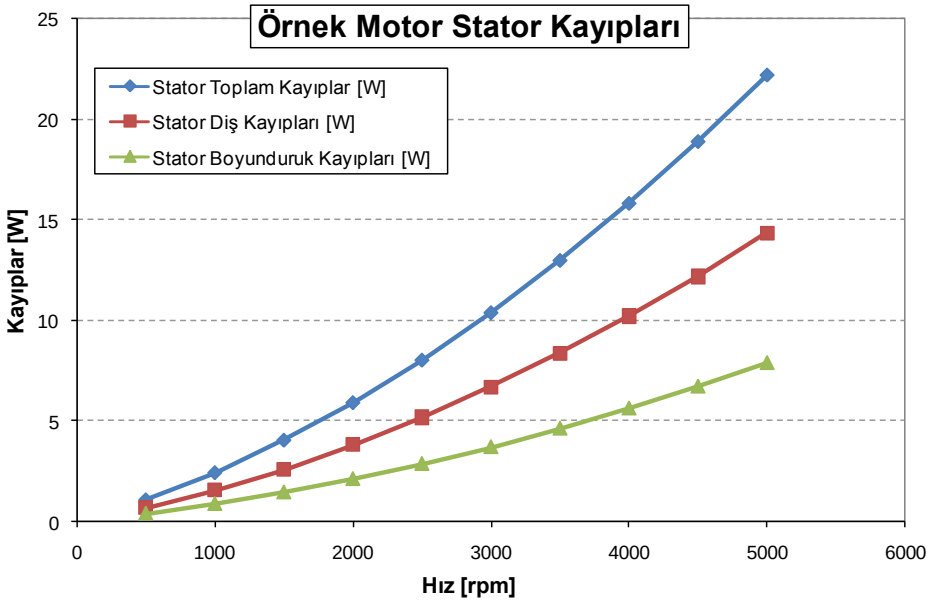
Şekil 3.9. Örnek servo motorun yüklü durumdaki akı yoğunluğu değişimi

3.3. Örnek Servo Motorun Detaylı Kayıp Analizleri

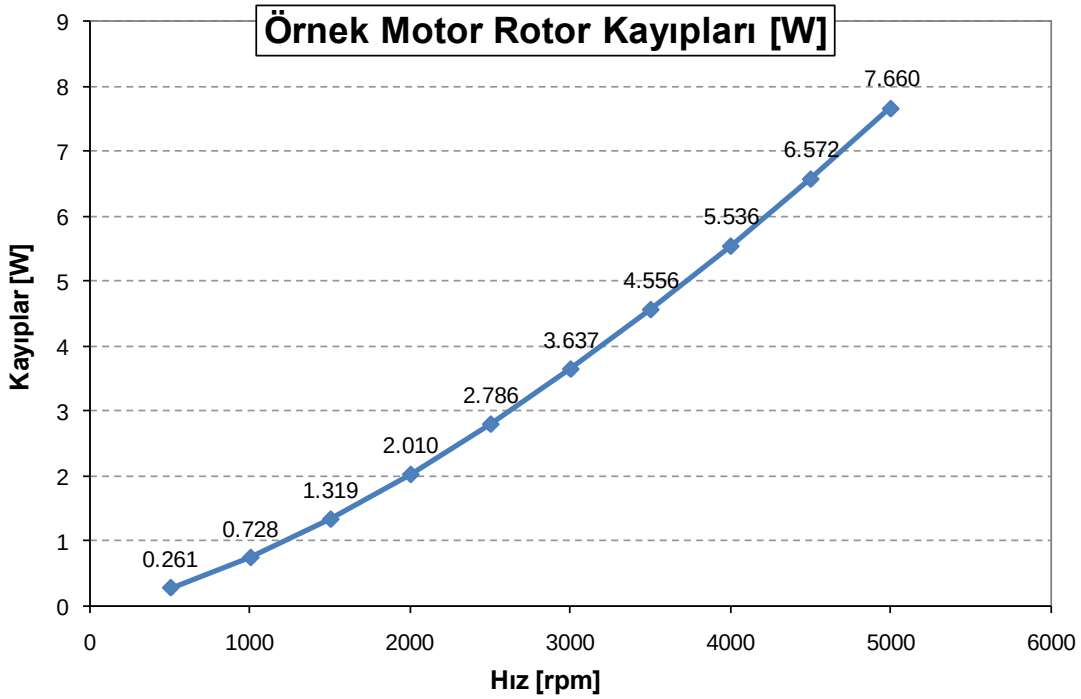
Bu bölümde motorun farklı hızlardaki kayıp ve performans analizleri yapılmıştır. Farklı hızlardaki moment değişimi, stator kayıpları ve rotor kayıpları incelenmiştir. Stator kayıpları detaylı olarak boyunduruk ve diş kayıpları olarak da incelenmiştir. Farklı hızlardaki moment değişimi Şekil 3.10'te, stator kayıplarının hıza göre değişimi Şekil 3.11'da ve rotor kayıplarının hıza göre değişimi Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Örnek servo motorun hıza göre moment değişimi



Şekil 3.11. Örnek servo motorun hıza göre stator kayıpları değişimi



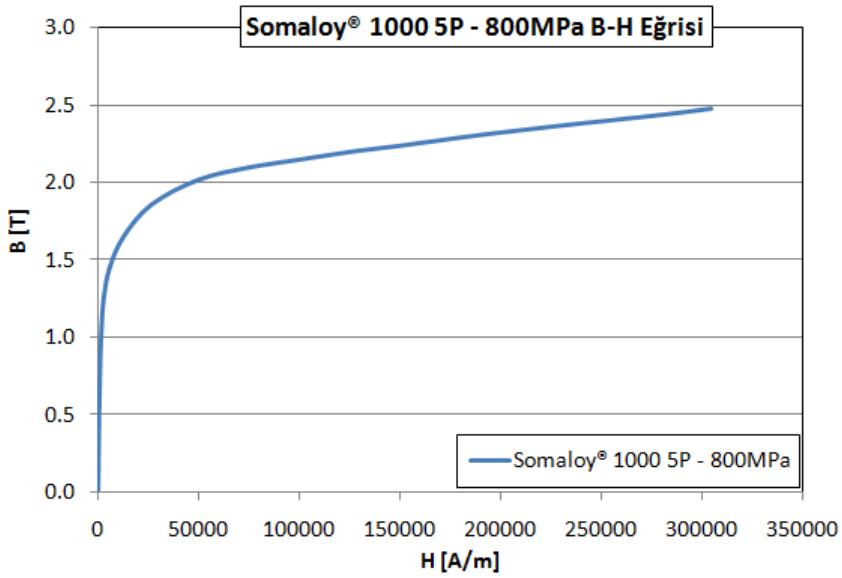
Şekil 3.12. Örnek servo motorun hıza göre rotor kayıpları değişimi

3.4. SMC Malzemeli Servo Motorun Performans Analizleri

3.4.1. SMC Malzemenin Özellikleri

Manyetik malzeme modellemesinde kullanılan SMC malzeme, Höganäs firmasına ait Somaloy® adlı ürün kullanılmıştır. Somaloy® elektromanyetik uygulamalar için izotropik ve yüksek dirençli bir Yumuşak Manyetik Kompozit (SMC) malzemedir. Bu ürünün özelliği presle manyetik toz karışımından elde edilmesidir. Manyetik tozun preslenmesiyle üretilen malzemede akı 3 boyutlu olarak akmaktadır. Bu da özel elektromanyetik uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Manyetik toz karışımından elde edilmesi özel uygulamalar için üretim kolaylığı sağlamaktadır.

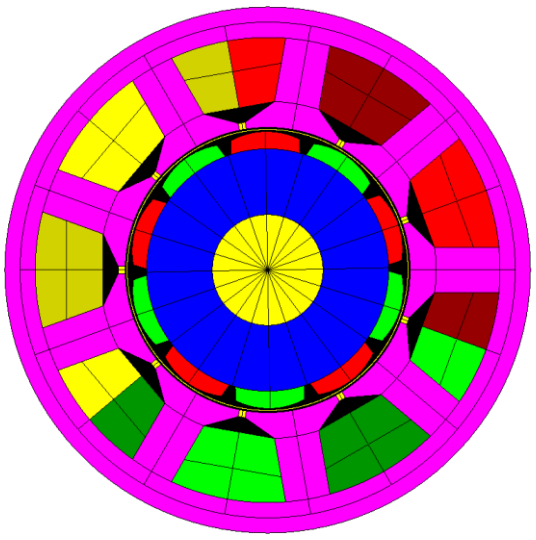
Manyetik sac malzemelerde kullanılan Epstein test yöntemi bu malzemelerde kullanılamadığı için direkt olarak verileri karşılaştırılamaz. Bu bölümde, motorun manyetik modelinde SMC malzeme kullanılarak performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Böylelikle, servo motorda kullanılan diğer manyetik malzemeler arasında karşılaştırma yapabilme imkanı elde edilecektir. Şekil 3.13'de servo motorun manyetik modelinde kullanılan Somaloy® malzemenin B-H eğrisi verilmiştir.



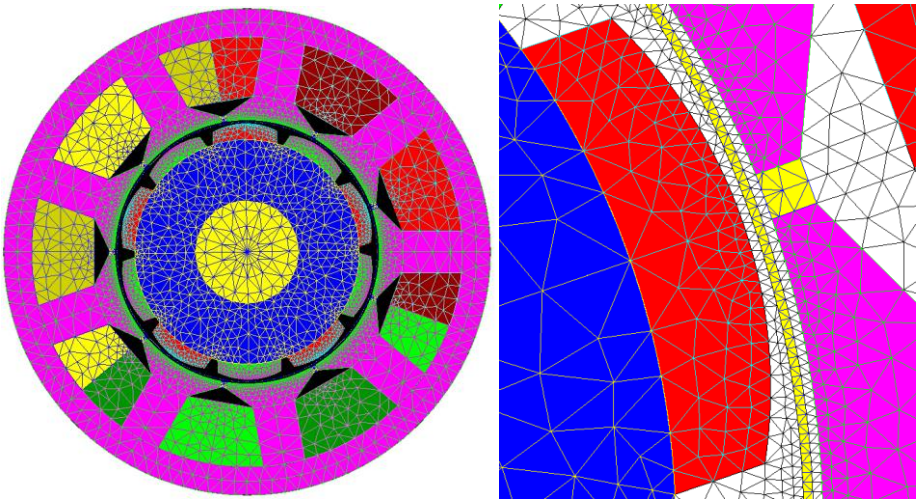
Şekil 3.13. Somaloy® 1000 5P - 800MPa B-H eğrisi

3.4.2. SMC Malzemeli Servo Motorun Yüksüz Durum Analizi

Örnek servo motorda yapıldığı gibi statorun tümüne SMC malzeme tanımlanmıştır. Şekil 3.14'te SMC malzemeli motorun 2 boyutlu modeli gösterilmiştir. Statordaki macenta rengi SMC malzemeyi belirtmektedir. Modelin mesh yapısı hava aralığında olması gerektiği gibi yoğun yapılmıştır. Bu da sonuçlarda doğruluğu arttırmak için gereklidir. Modele ait mesh yapısı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

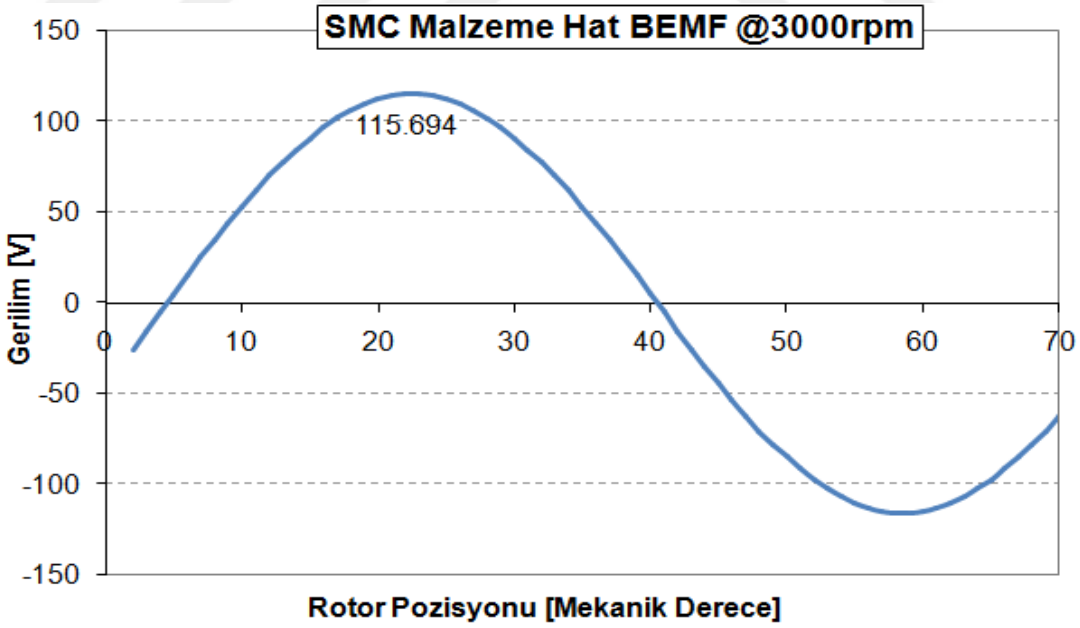


Şekil 3.14. SMC malzemeli servo motorun 2B modeli

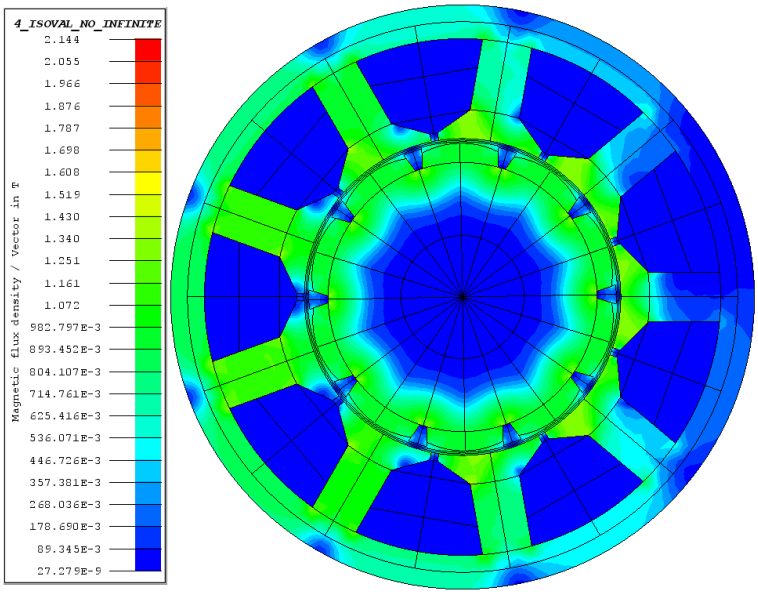


Şekil 3.15. SMC malzemeli servo motorun mesh yapısı ve hava aralığındaki mesh yoğunluğu

SMC manyetik malzemeli servo motorun yüksüz durum analizleri yapılmıştır. Yüksüz durum analizleri sonucunda hat zıt EMK'sına ve yüksüz durum akı yoğunluklarına bakılmıştır. Motorun anma hızı olan 3000rpm hızda yapılan analizler sonucu motorun hat zıt EMK'sı Şekil 3.16'da yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



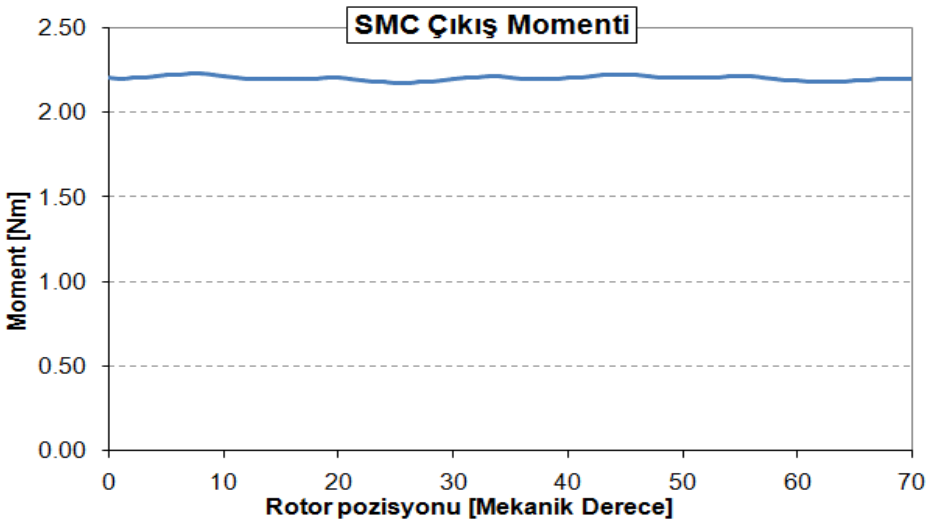
Şekil 3.16. SMC malzemeli servo motorun 3000rpm hızdaki hat Zıt EMK değişimi



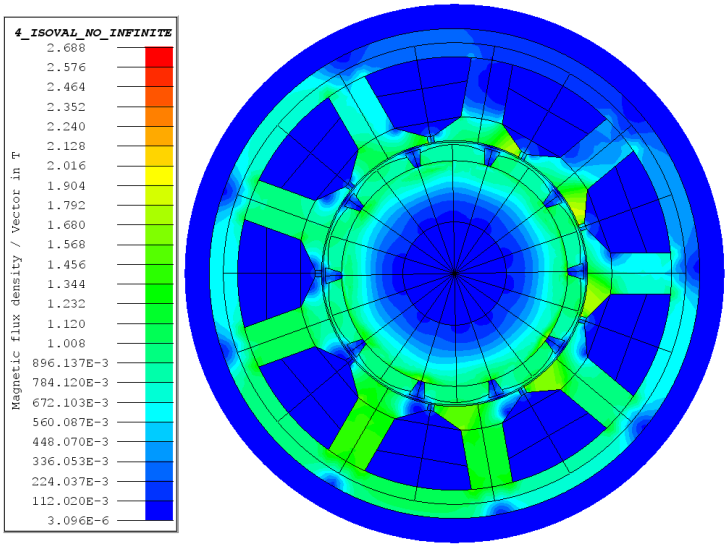
Şekil 3.17. SMC malzemeli servo motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu değişimi

3.4.3. SMC Malzemeli Servo Motorun Yüklü Durum Analizi

Motor sargılarına $5A_{rms}$ akım uygulayarak ve anma hızında yüklü durum analizleri yapılmıştır. KM senkron motorun çıkış moment değişimi Şekil 3.18'te verilmiştir. Analizler incelendiğinde 2.20Nm ortalama moment ve %2.65 moment dalgalanması elde edilmiştir.Yük altındaki motor akı yoğunlukları Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.18. SMC malzemeli servo motorun 3000rpm, 5Arms akımdaki çıkış momenti değişimi



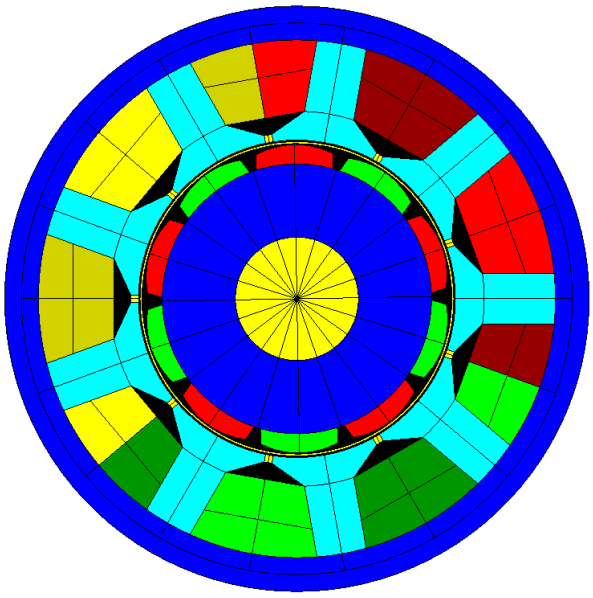
Şekil 3.19. SMC malzemeli servo motorun yüklü durumdaki akı yoğunluğu değişimi

4. TY MANYETİK MALZEMELİ KMSM SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

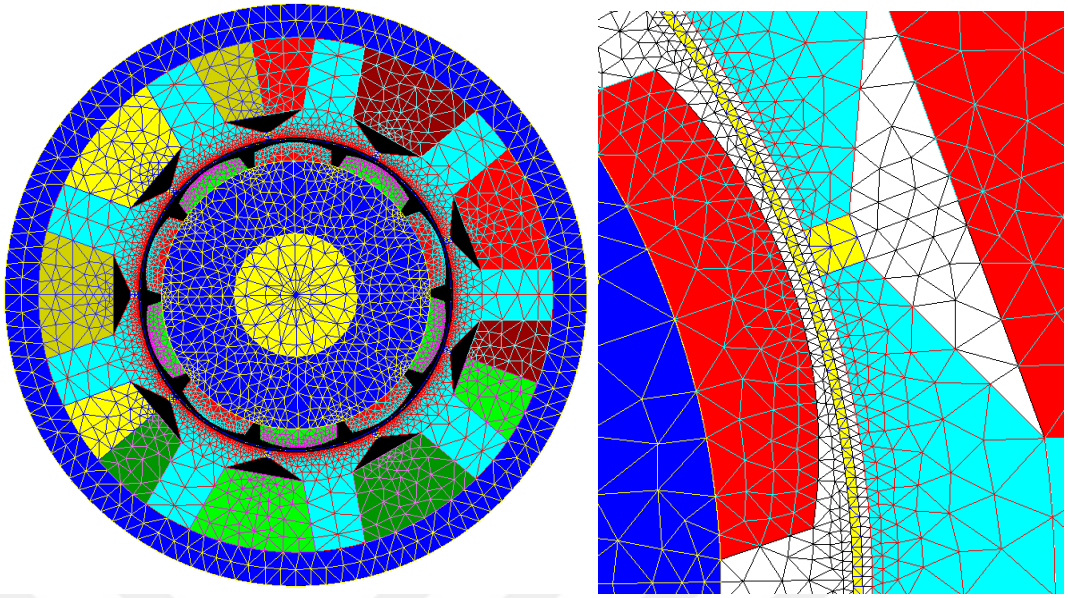
Bu bölümde NO manyetik malzemeli KM senkron motorun sadece stator dişleri TY manyetik malzeme tanımlanarak detaylı performans ve kayıp analizleri yapılmıştır. Yüklü durum analizleri yapılan KM senkron motorun farklı hızlar için stator ve rotor kayıplarına bakılmıştır. Stator kayıpları stator boyunduruk ve stator diş kayıpları şeklinde ayıklanmıştır.

4.1. TY Manyetik Malzemeli Servo Motorun Yüksüz ve Yüklü Durum Analizleri

Stator dişleri TY manyetik malzeme tanımlanan KM senkron motorun Flux® SEA paket programı ile oluşturulmuş modeli Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Stator dişlerindeki türkuaz rengi TY manyetik malzemeyi belirtmektedir. Modelin mesh yapısı hava aralığında olması gerektiği gibi yoğun yapılmıştır. Bu da sonuçlarda doğruluğu arttırmak için gereklidir. Modele ait mesh yapısı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

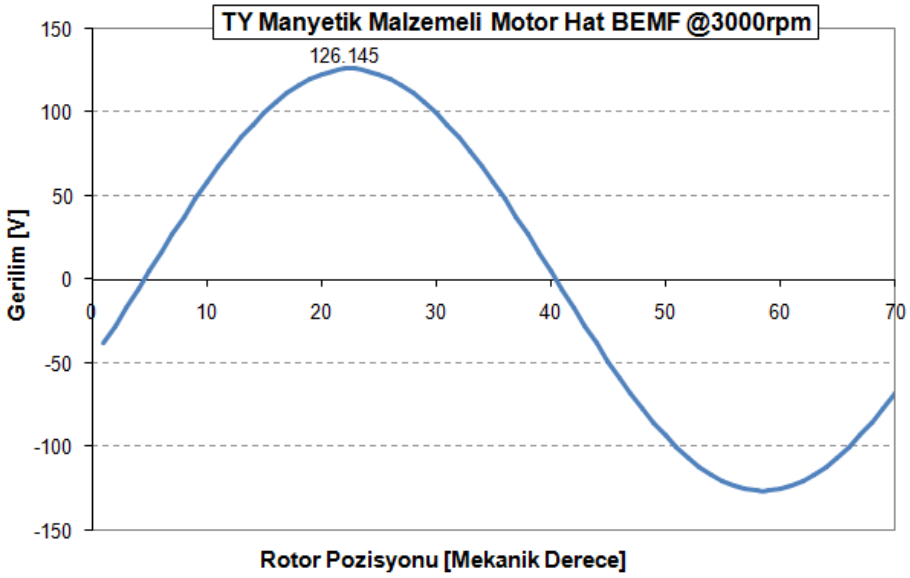


Şekil 4.1. TY manyetik malzemeli KMSM 2B modeli

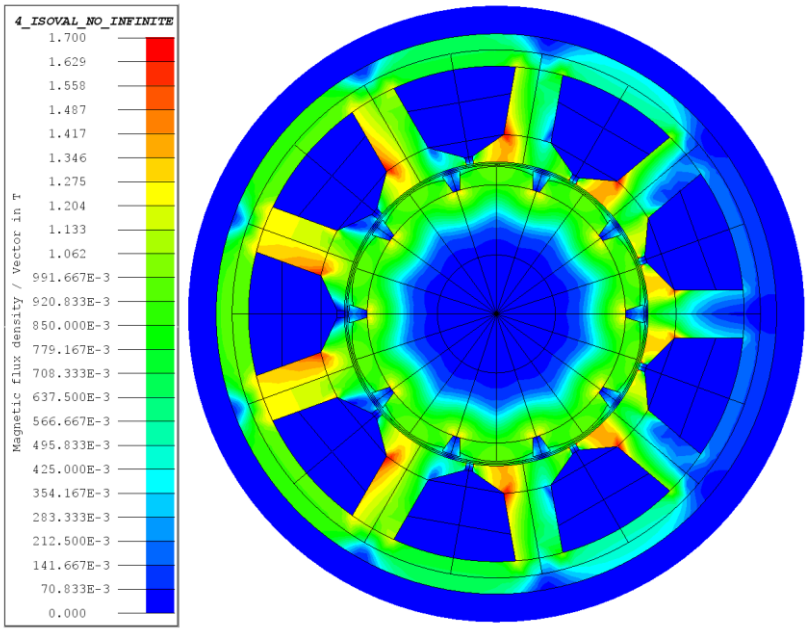


Şekil 4.2. TY manyetik malzemeli KMSM mesh yapısı

TY manyetik malzemeli servo motorun yüksüz durum analizleri yapılmıştır. Yüksüz durum analizleri sonucunda hat zıt EMK'sına ve yüksüz durum akı yoğunluklarına bakılmıştır. Motorun anma hızı olan 3000rpm hızda yapılan analizler sonucu motorun hat zıt EMK'sı Şekil 4.3'te yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

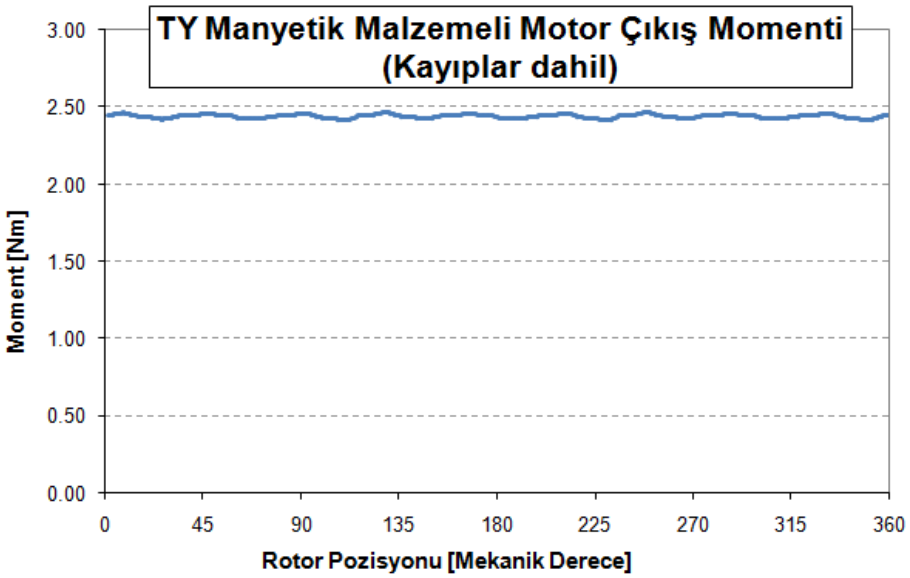


Şekil 4.3. TY manyetik malzemeli servo motorun 3000rpm hızdaki hat Zıt EMK değişimi

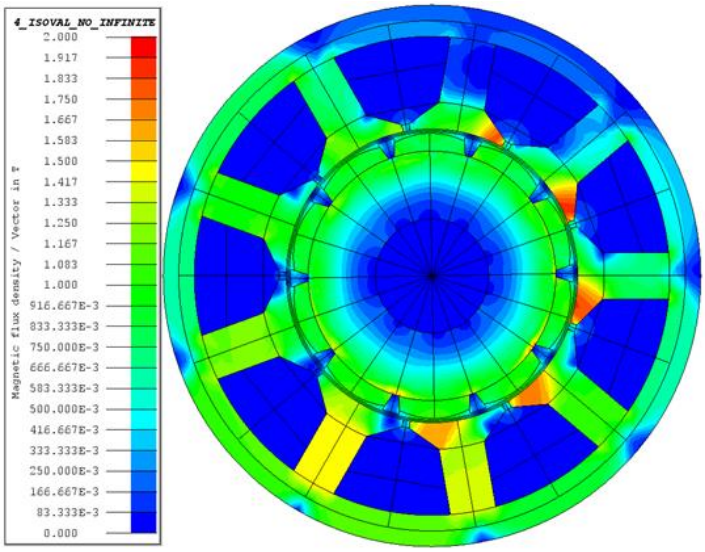


Şekil 4.4 TY manyetik malzemeli servo motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu değişimi

Motor sargılarına $5A_{rms}$ akım uygulayarak ve anma hızında yüklü durum analizleri yapılmıştır. KM senkron motorun çıkış moment değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Analizler incelendiğinde 2.45Nm ortalama moment ve %1.99 moment dalgalanması elde edilmiştir.Yük altındaki motor akı yoğunlukları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



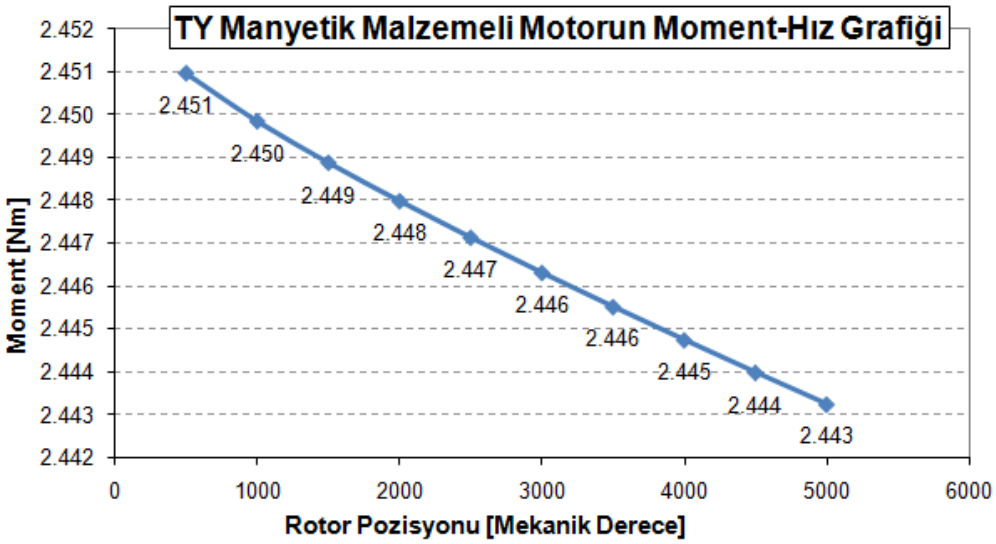
Şekil 4.5. TY manyetik malzemeli KMSM çıkış moment değişimi



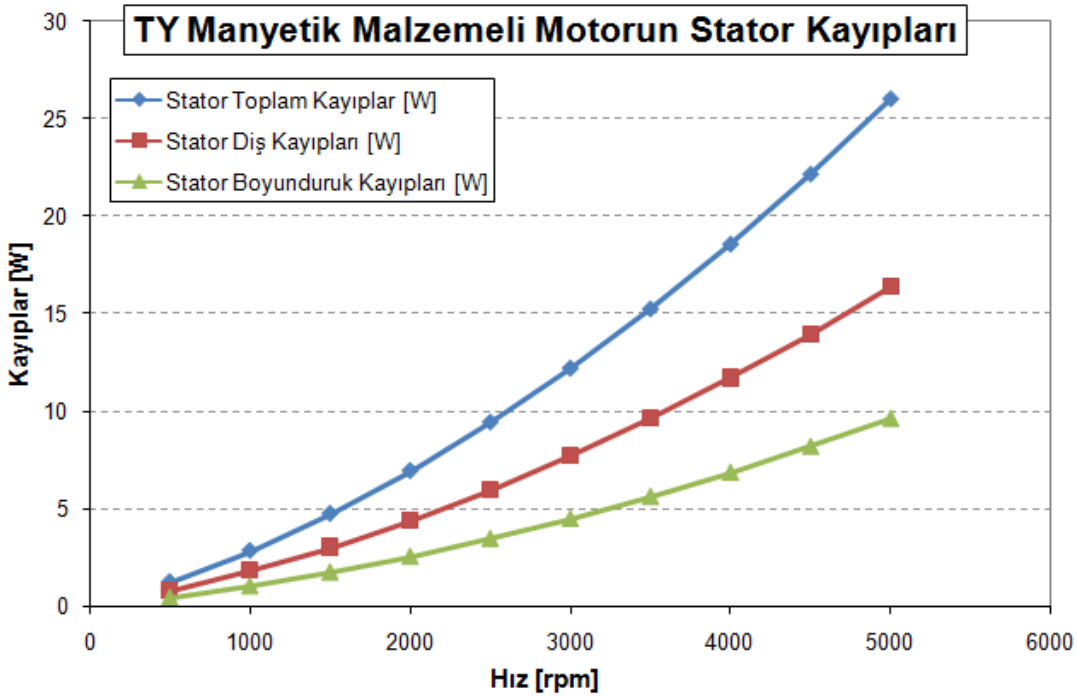
Şekil 4.6. TY manyetik malzemeli servo motorun yüklü durumdaki akı yoğunluğu değişimi

4.2. TY Manyetik Malzemeli KMSM Detaylı Kayıp Analizleri

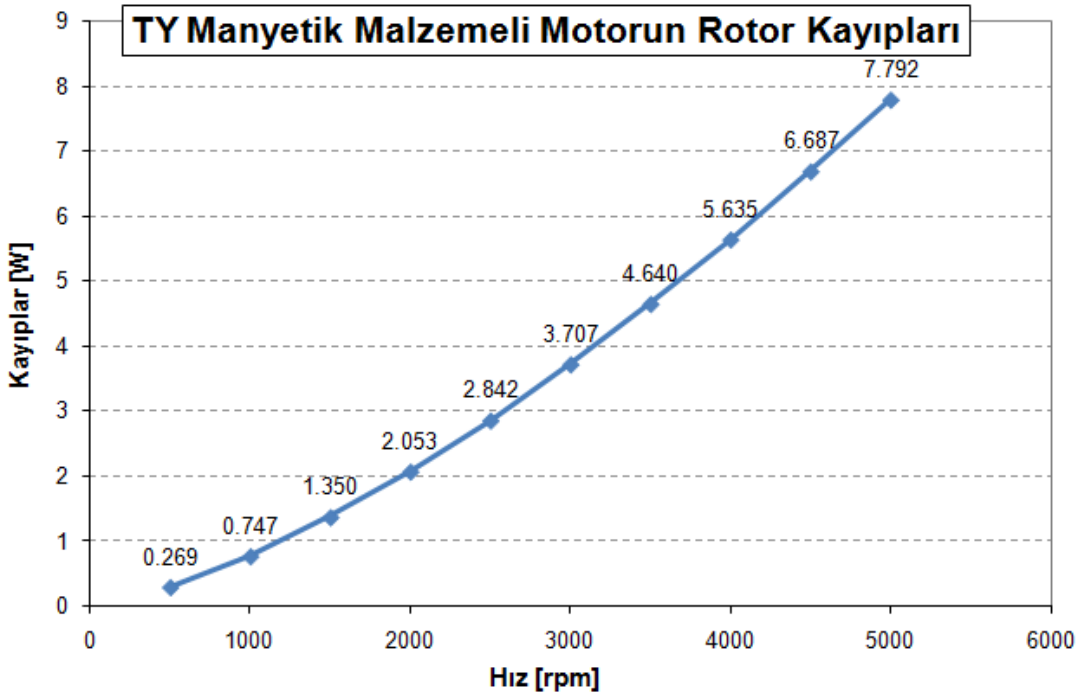
Bu bölümde motorun farklı hızlardaki kayıp ve performans analizleri yapılmıştır. Farklı hızlardaki moment değişimi, stator kayıpları ve rotor kayıpları incelenmiştir. Stator kayıpları detaylı olarak boyunduruk ve diş kayıpları olarak da incelenmiştir. Farklı hızlardaki moment değişimi Şekil 4.7'te, stator kayıplarının hıza göre değişimi Şekil 4.8'da ve rotor kayıplarının hıza göre değişimi Şekil 4.9'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. TY manyetik malzemeli KMSM hıza göre moment değişimi



Şekil 4.8. TY manyetik malzemeli KMSM hıza göre stator kayıpları değişimi

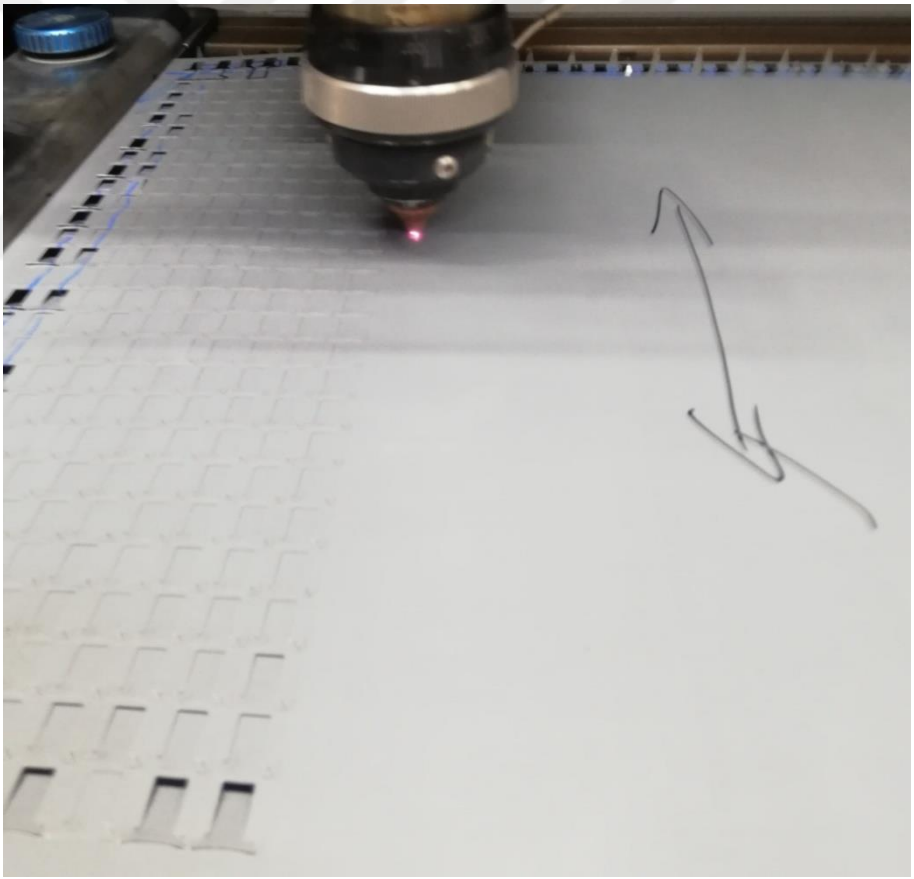


Şekil 4.9. TY manyetik malzemeli KMSM hıza göre rotor kayıpları değişimi

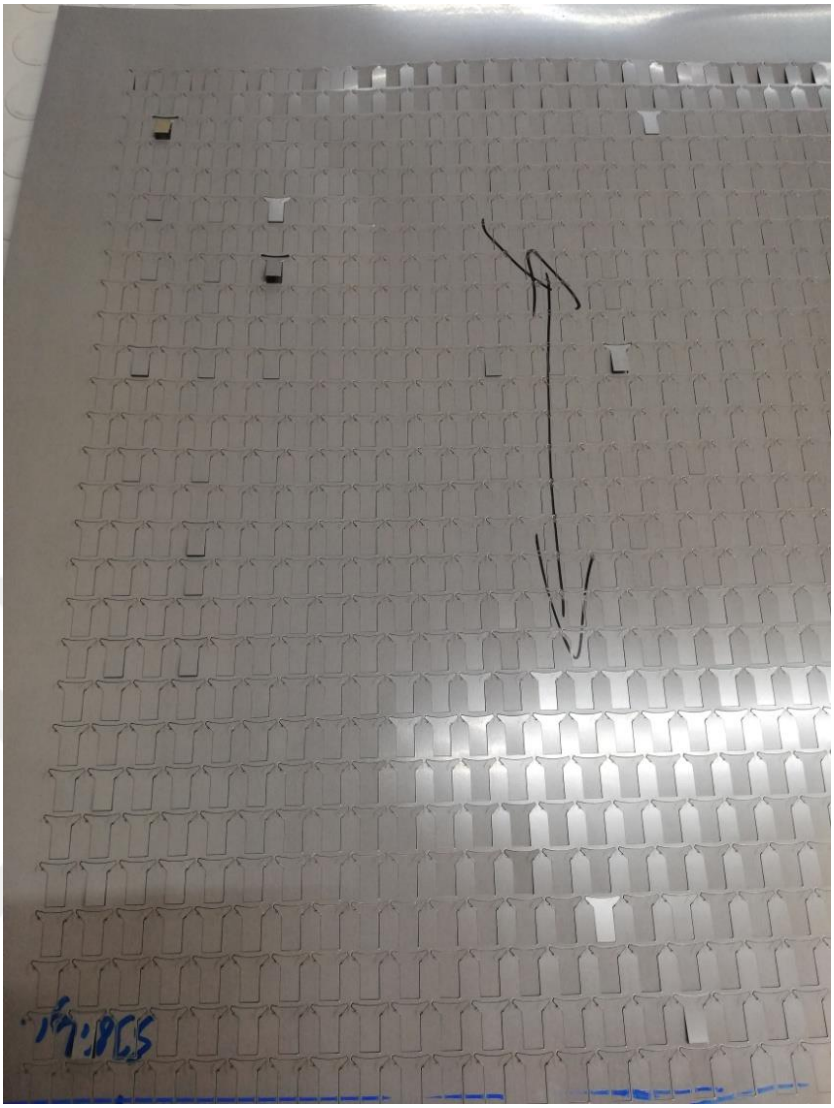
5. MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE TESTLERİ

5.1. Motor Prototip Üretimi

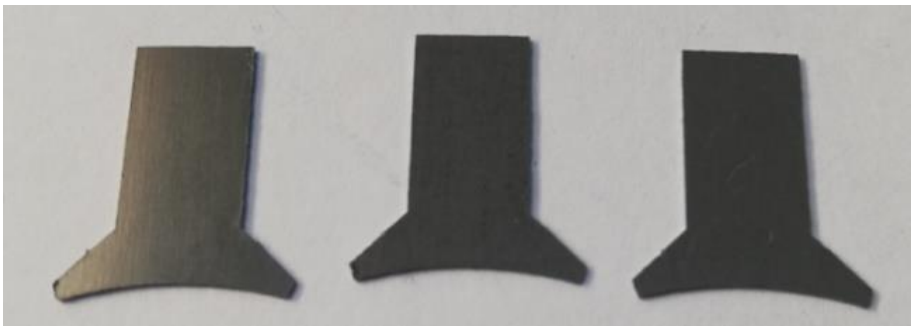
Manyetik analizleri tamamlanmış olan TY manyetik malzemeli motor için prototip üretimi yapılmıştır. Çelik sac üreten firmadan temin edilen TY manyetik malzeme, segmentlerin kesimi için kullanılmıştır. Lazer kesim cihazında kesilen saclarda kritik nokta; bütün segmentlerin laminasyonlarının aynı yönelimde olacak şekilde kesilmiş olmasıdır. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de stator segmentinin laminasyon kesimlerin ait görseller gösterilmiştir.



Şekil 5.1. TY manyetik malzeme lazer kesimi

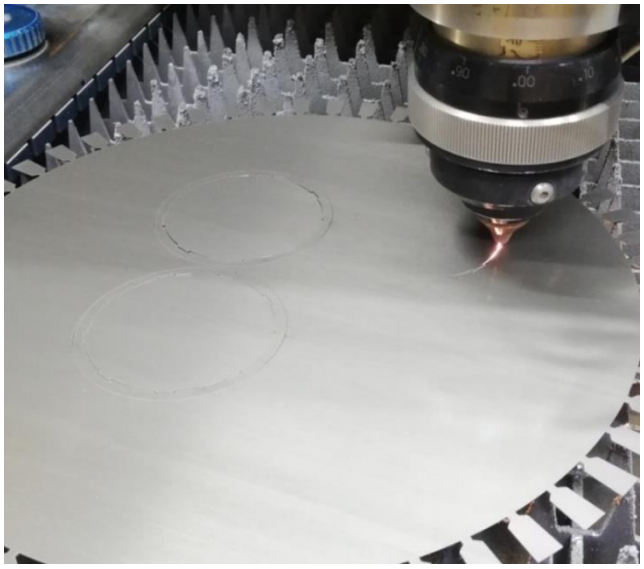


Şekil 5.2. Lazer kesimi tamamlanmış TY manyetik sacları

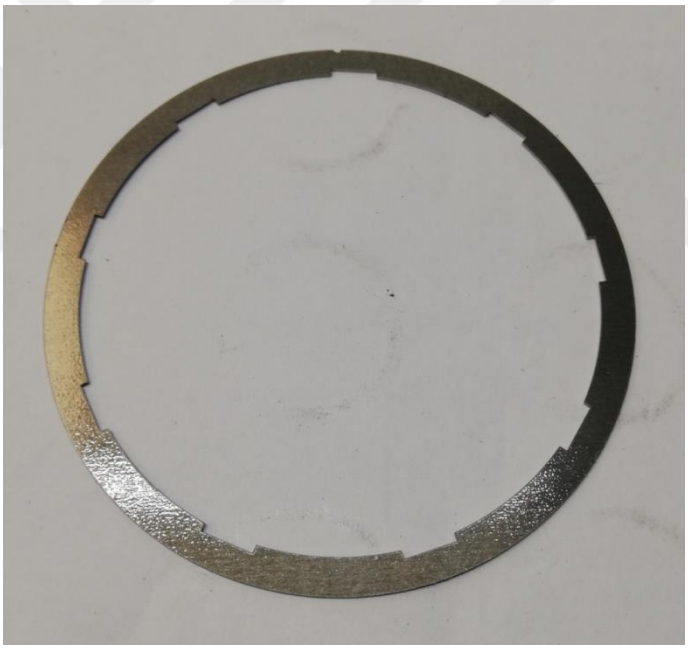


Şekil 5.3. TY manyetik sac malzemeden kesilmiş stator segment sacları

Stator segmentlerinin laminasyonlarının kesilmesi sonrasında stator boyunduruğunun laminasyonları da lazer kesim makinesinde kesilmiştir. NO manyetik sac malzemeden kesilen laminasyonlar Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. NO manyetik sac malzemenin lazer kesimi

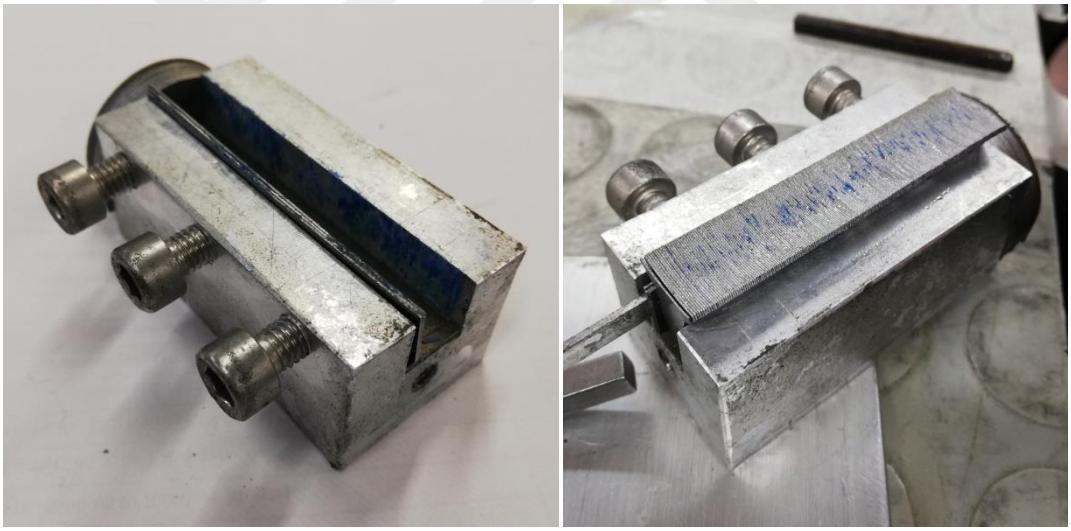


Şekil 5.5. NO manyetik sac malzemeden kesilmiş stator boyunduruk sacı

Sac laminasyonlarının kesilmesi sonrasında laminasyonların istenen ölçüde paketlenebilmesi için fikstürler tasarlandı ve üretildi. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de laminasyonların fikstürleri ve paketlenmeleri gösterilmektedir.

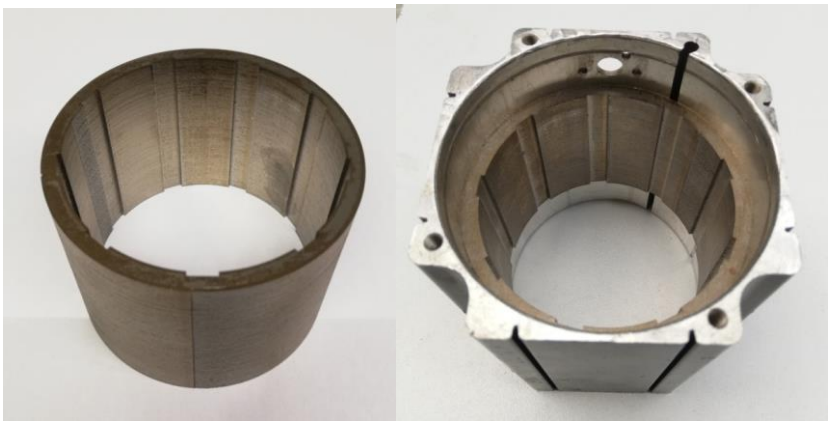


Şekil 5.6. NO manyetik sac malzemenin fikstürü ve paketlenmesi



Şekil 5.7. TY manyetik sac malzemenin fikstürü ve paketlenmesi

Laminasyon paketleri hazırlandıktan sonra stator boyunduruğunun laminasyon paketi motor gövdesine çakılmıştır. Şekil 5.8'de stator boyunduruğu laminasyon paketi ve gövdeye çakılmış hali gösterilmektedir.



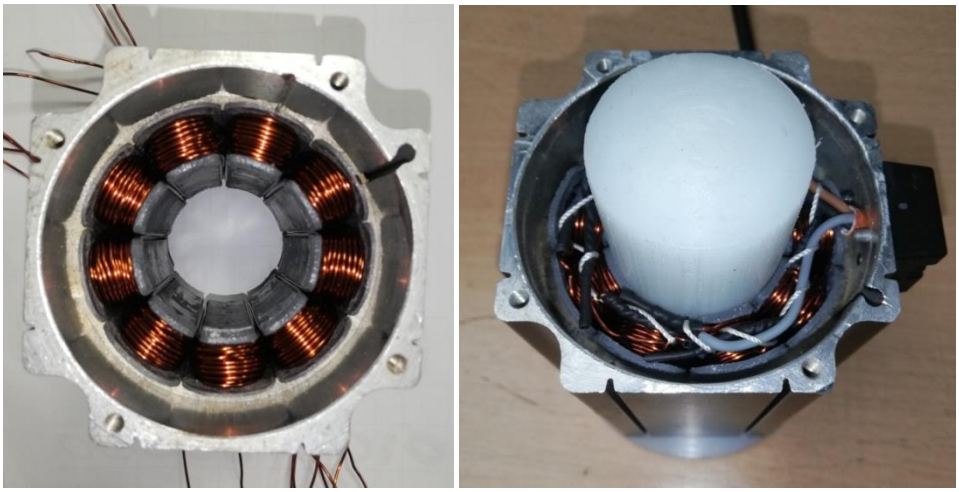
Şekil 5.8. Stator boyunduruğunun laminasyon paketi ve gövdeye çakılması

Stator segmentlerinin paketlenmesi sonrası sargı fikstürü ve izolasyon sağlaması için segment plastikleri tasarlanıp üretildi. Sargı fikstürü yardımıyla stator segmentlerinin sargısı segment plastiklerine yapıldı. 9 oluklu motorumuzun segmentleri sarıldıktan sonra stator boyunduruğuna yerleştirilmek üzere yuvalarına yerleştirildi. Stator iç çapı ölçüsünde üretilen silindirik parça yardımı ile stator segmentleri stator boyunduruğuna sıkıca oturtuldu.

Segment plastiklerine yapılan sarımlar Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Stator segmentlerinin stator boyunduruğuna yerleştirilmesi ve silindirik parçanın yerleştirilerek segmentlerin sıkıca oturtulması Şekil 5.10'da gösterilmektedir.

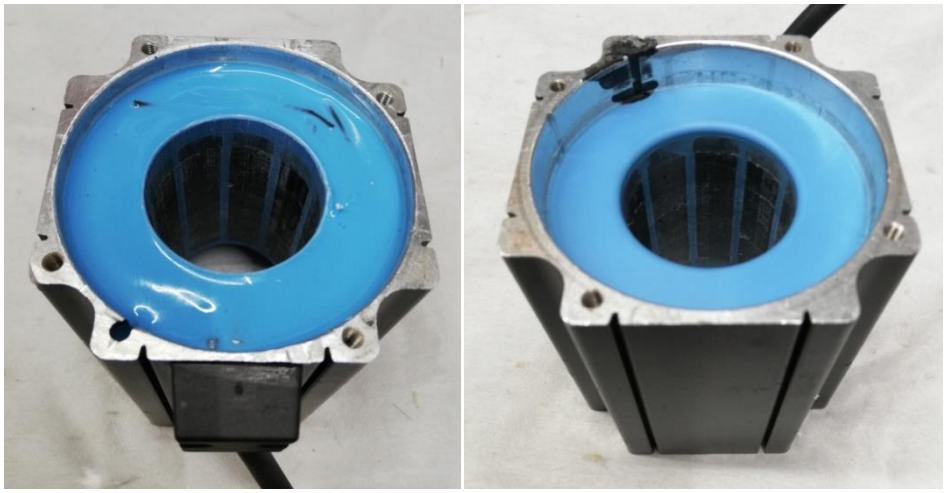


Şekil 5.9. Sargı fikstürü yardımı ile segment plastiklerine yapılan sarım

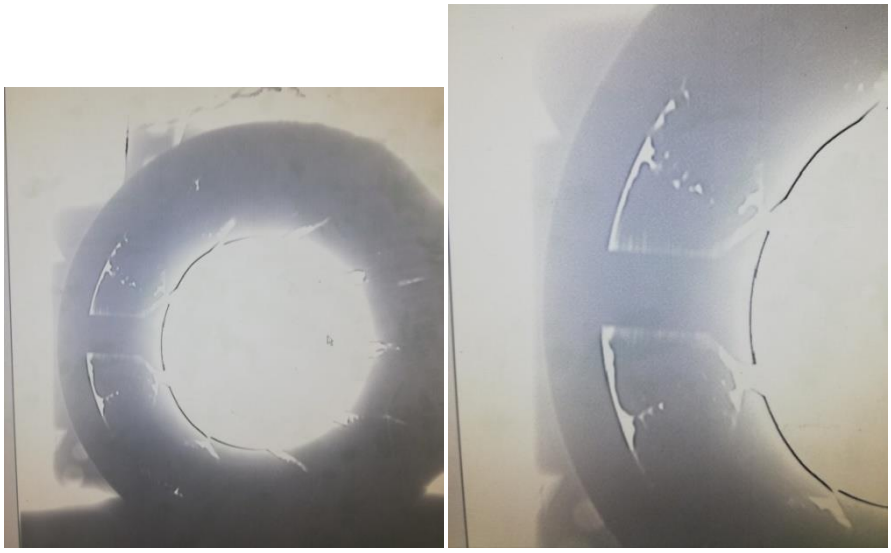


Şekil 5.10. Sargı plastiklerinin stator segmentlerine yerleştirilmesi sonrası segmentlerin stator boyunduruğuna çakılması

Stator segmentleri boyunduruğa sıkıca oturtulduktan sonra içindeki silindirik parça da kullanılarak motor gövdesine epoksi dökümü gerçekleştirilmiştir. NO manyetik malzemeli motorda epoksi olmasından dolayı ve segmentlerin boyundurukta sabit kalmasını sağlamak için epoksi dökülmesine ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 5.11'de epoksi dökülmüş motor gövdesi gösterilmiştir. Epoksi dökülen motor gövdesini kontrol etmek amaçlı X-ray cihazı kullanılarak segmentlerin yerleşimi kontrol edilmiştir. X-ray görüntüleri ... gösterilmiştir.

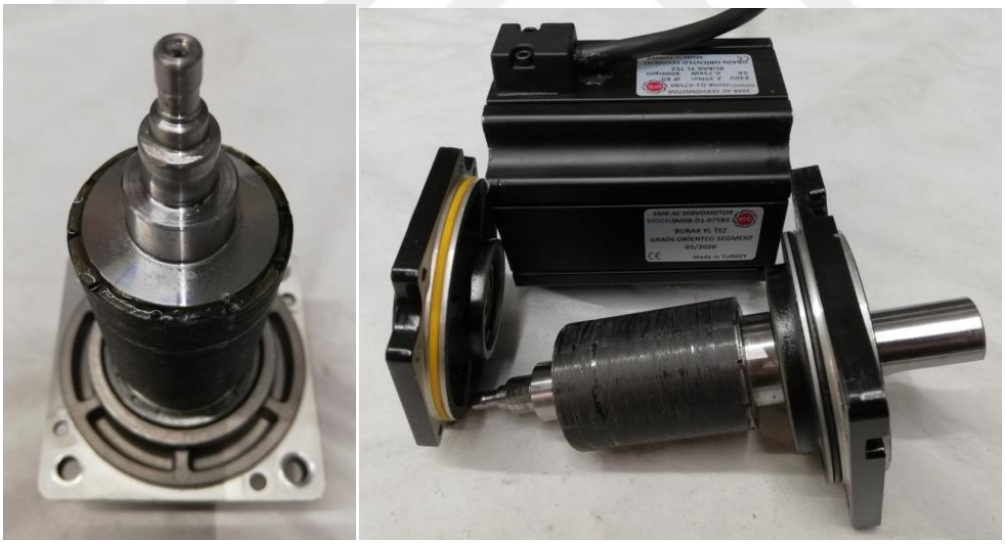


Şekil 5.11. Epoksi dökülmüş motor gövdesinin ön ve arka kısmının görüntüsü



Şekil 5.12. Motor gövdesinin X-ray görüntüsü

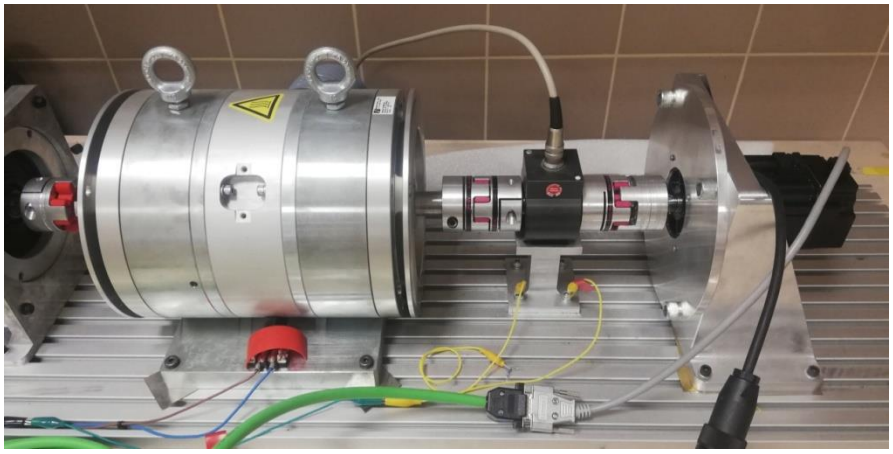
Epoksi dökülmüş motor gövdesine NO manyetik malzemeli motordan çıkarılan rotor, ön ve arka kapaklar takılmıştır. Test doğruluğu amacıyla aynı mıknatıslar ve aynı rotorlar kullanılmıştır. Toplanan motor test edilmeye hazır hale getirilmiştir. Şekil **5.13**'de motorun gövdesi, rotoru, ön ve arka kapakları gösterilmektedir.



Şekil 5.13. Motorun rotoru, gövdesi, ön ve arka kapakları

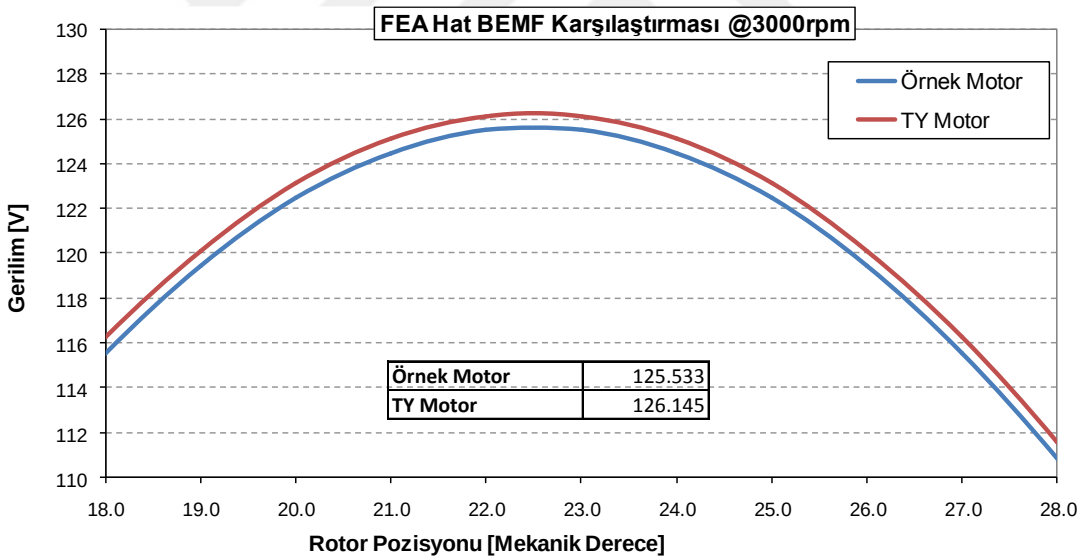
5.2. Motor Testleri ve Sonuçları

Prototip üretimi tamamlanan motorların uygun test düzeneğinde yüksüz ve yüklü durum testleri yapılmıştır. Test düzeneği Şekil **5.14**'de gösterilmiştir.

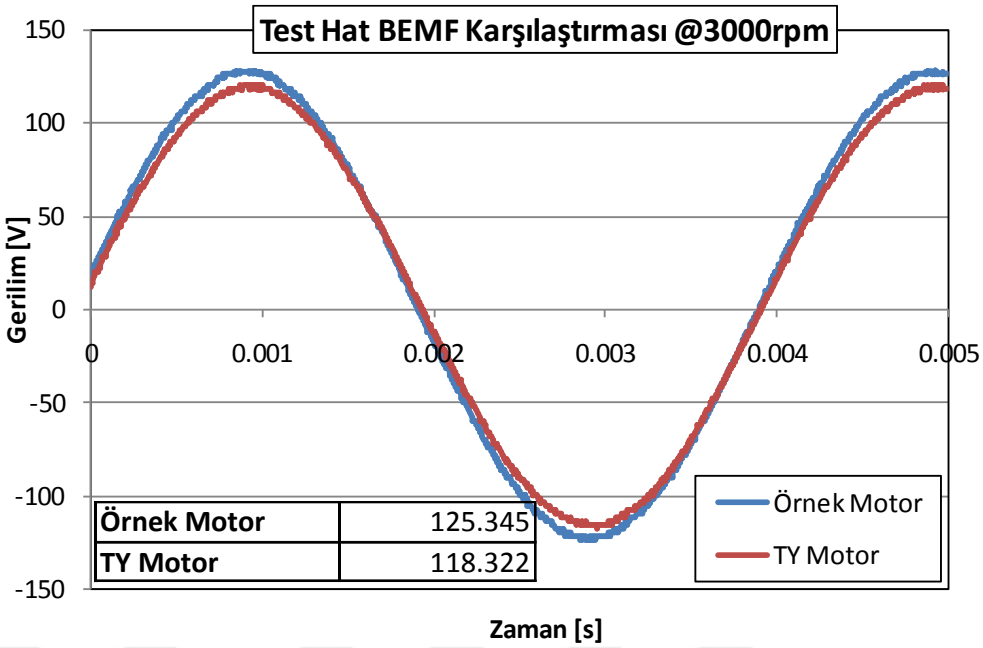


Şekil 5.14. Motor test düzeneği

Yüksüz durum testleri ile birlikte yüksüz durum analizlerinin karşılaştırılması yapılan motorların anma hızındaki hat zıt EMK sonuçları Şekil **5.15**'te gösterilmiştir. Yüksüz durum testleri farklı hızlar için yapılmasına rağmen Şekil **5.16**'te anma hızındaki yüksüz durum testlerinin sonucu gösterilmektedir.

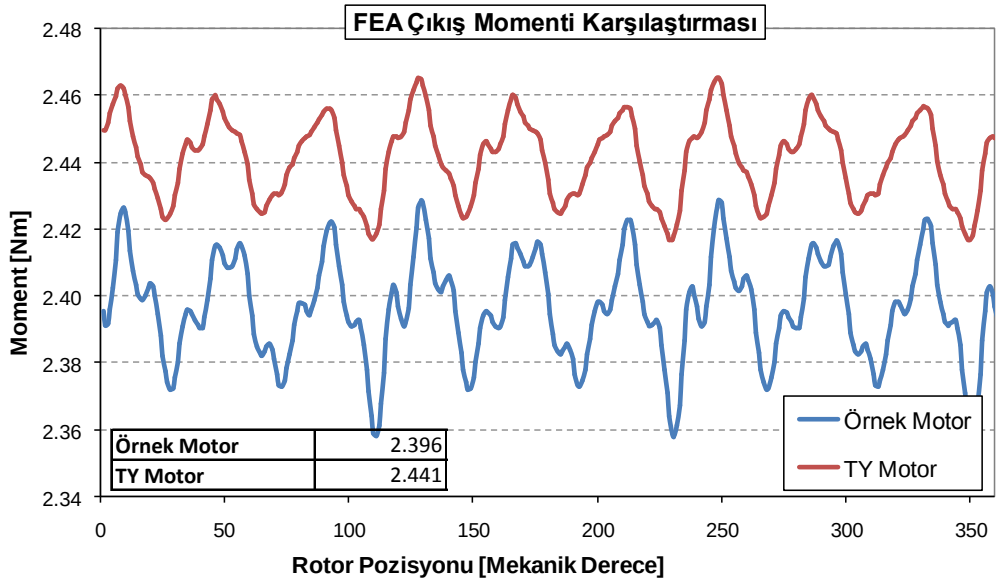


Şekil 5.15. Yüksüz durum analiz sonuçlarının karşılaştırılması

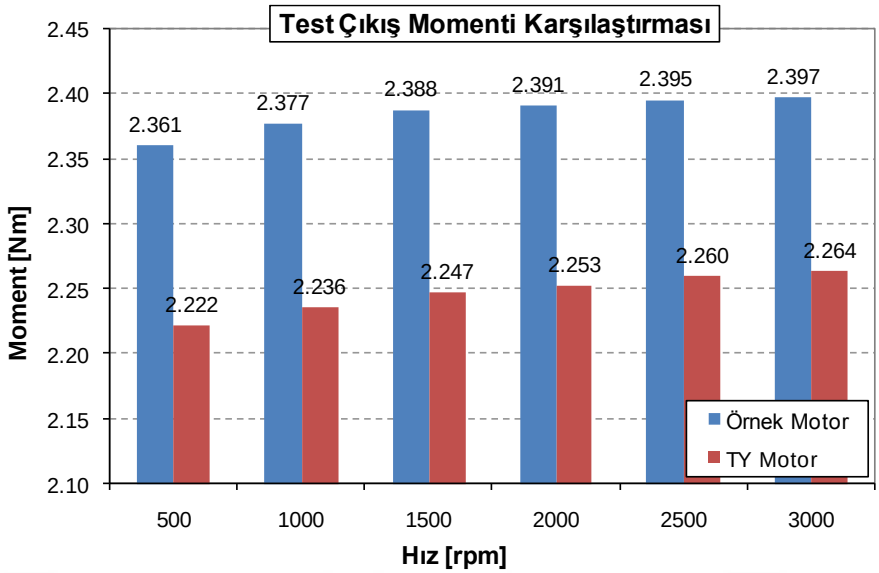


Şekil 5.16. Yüksüz durum test sonuçlarının karşılaştırılması

Yüklü durum testleri $5A_{rms}$ akımda ve 500rpm hızdan başlayarak 3000rpm hıza kadar yapılarak tork değerleri alınmıştır. Yüklü durum analiz sonuçları arasında ve yüklü durum test sonuçları arasında da karşılaştırmalar yapılmıştır. Yüklü durum analiz sonuçları arasında yapılan karşılaştırma Şekil **5.17**'da, yüklü durum test sonuçları arasında yapılan karşılaştırma Şekil **5.18**'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Yüklü durum analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.18. Yüklü durum test sonuçlarının karşılaştırılması

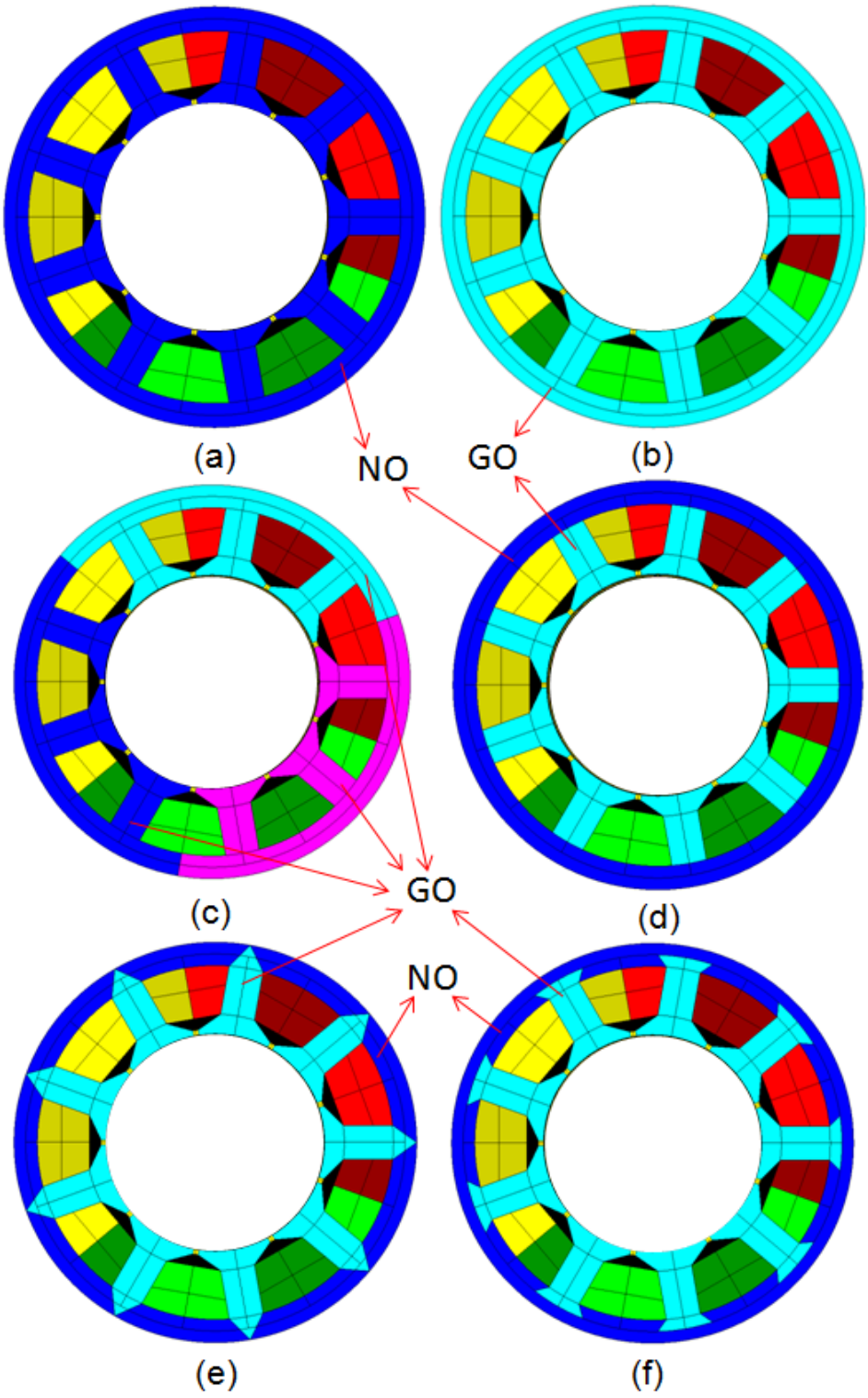
6. TY MANYETİK MALZEMELİ MOTOR TASARIM ALTERNATİFLERİ

TY manyetik sac malzemeli motorun (Durum 4) prototip üretimi ve test düzeneği kullanılarak yüksüz ve yüklü durum testleri yapılmıştır. Test sonuçlarının incelenmesi sonrasında test sonuçlarının örnek motorun (Durum 1) sonuçlarına göre daha iyi olması beklenirken daha düşük geldiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple üretilen motorun dışında alternatif tasarımlar üzerinde de çalışmalar yapılmıştır.

Örnek motorun dışında beş adet farklı TY manyetik sac malzemeli motor tasarımı üzerinde durulmuştur. Altı farklı tasarım için detaylı FEA analizleri yapılmıştır ve sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tasarım alternatifleri ile ilgili tanımlamalar Tablo 'da yapılmıştır. Tasarım alternatiflerinin 2B model görüntüsü detaylı olarak Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6. TY Motor Tasarım Alternatifleri

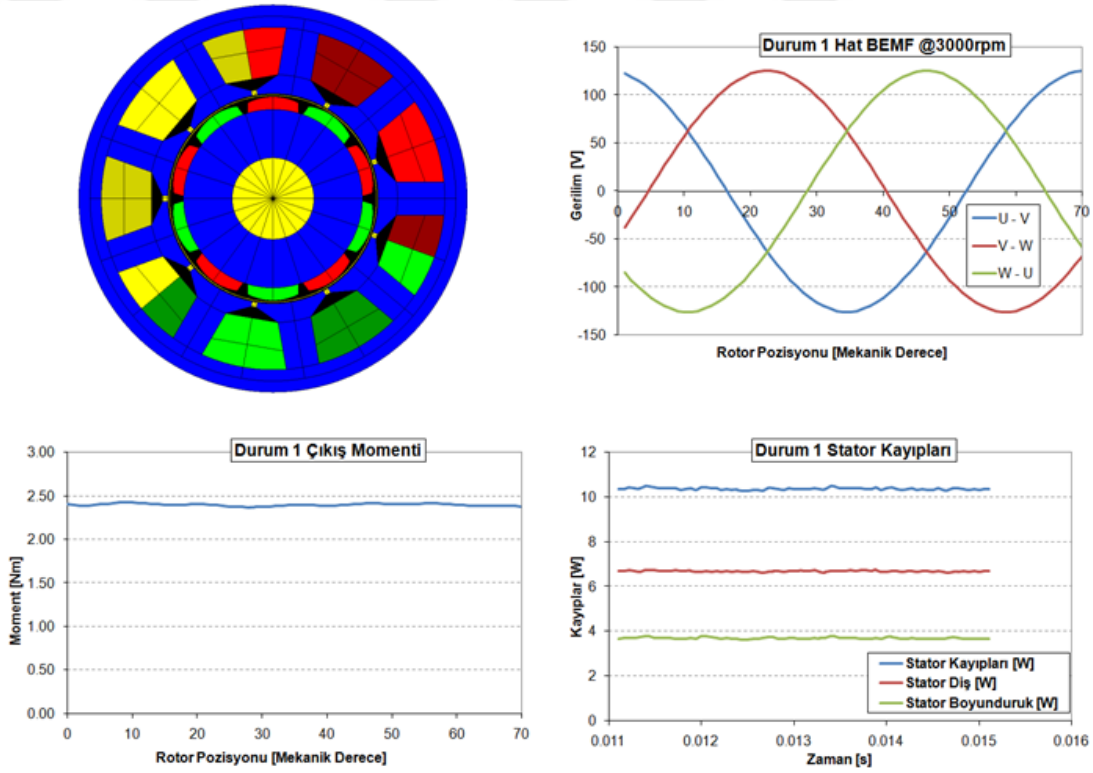
Durum 1 (a)	Stator boyunduruk ve stator dişleri tanecik - yönelimsiz (NO) manyetik sac malzeme
Durum 2 (b)	Stator boyunduruk ve stator dişleri tanecik - yönelimli (GO) manyetik sac malzeme
Durum 3 (c)	Stator boyunduruk ve stator dişleri tanecik - yönelimli (GO) manyetik sac malzeme ancak 120° açıyla yerleştirilmiş
Durum 4 (d)	Stator boyunduruk tanecik - yönelimsiz (NO), stator dişleri tanecik - yönelimli (GO) manyetik sac malzeme, birleşim yerleri düz yapıda
Durum 5 (e)	Stator boyunduruk tanecik - yönelimsiz (NO), stator dişleri tanecik - yönelimli (GO) manyetik sac malzeme, birleşim yerleri üçgen yapıda
Durum 6 (f)	Stator boyunduruk tanecik - yönelimsiz (NO), stator dişleri tanecik - yönelimli (GO) manyetik sac malzeme, birleşim yerleri kırlangıç yapıda



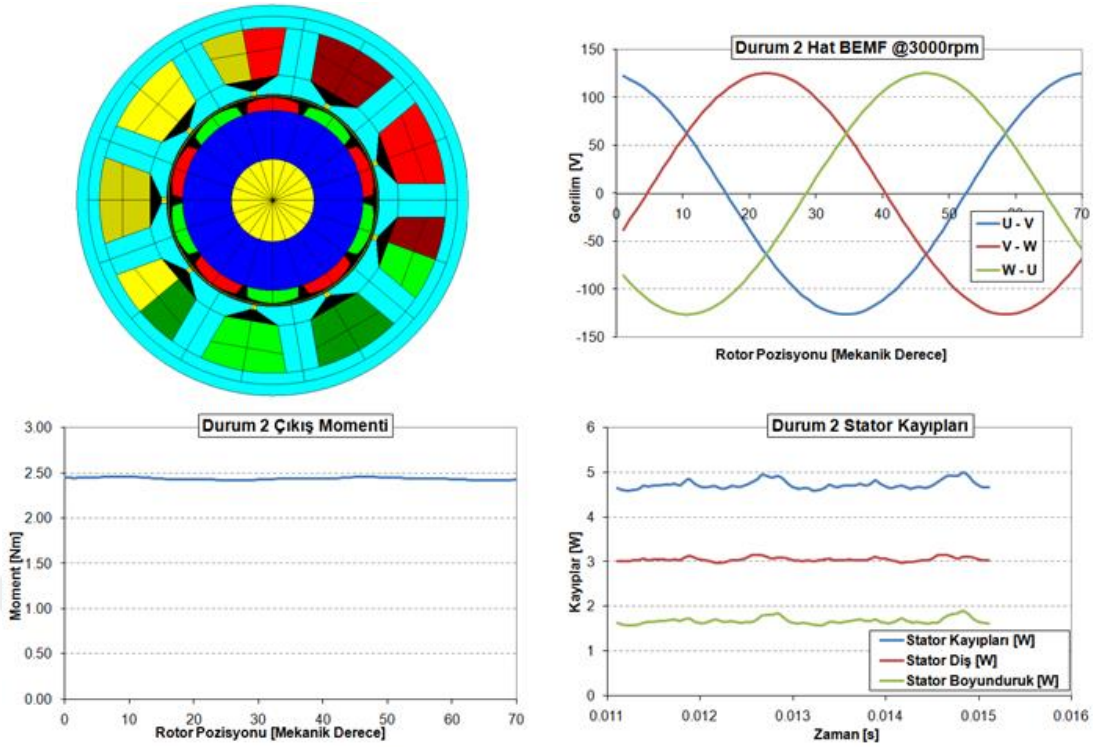
Şekil 6.1. Tasarım alternatifleri modelleri Durum 1 (a), Durum 2 (b), Durum 3 (c), Durum 4 (d), Durum 5 (e), Durum 6 (f)

6.1. KMSM Tasarım Alternatifleri

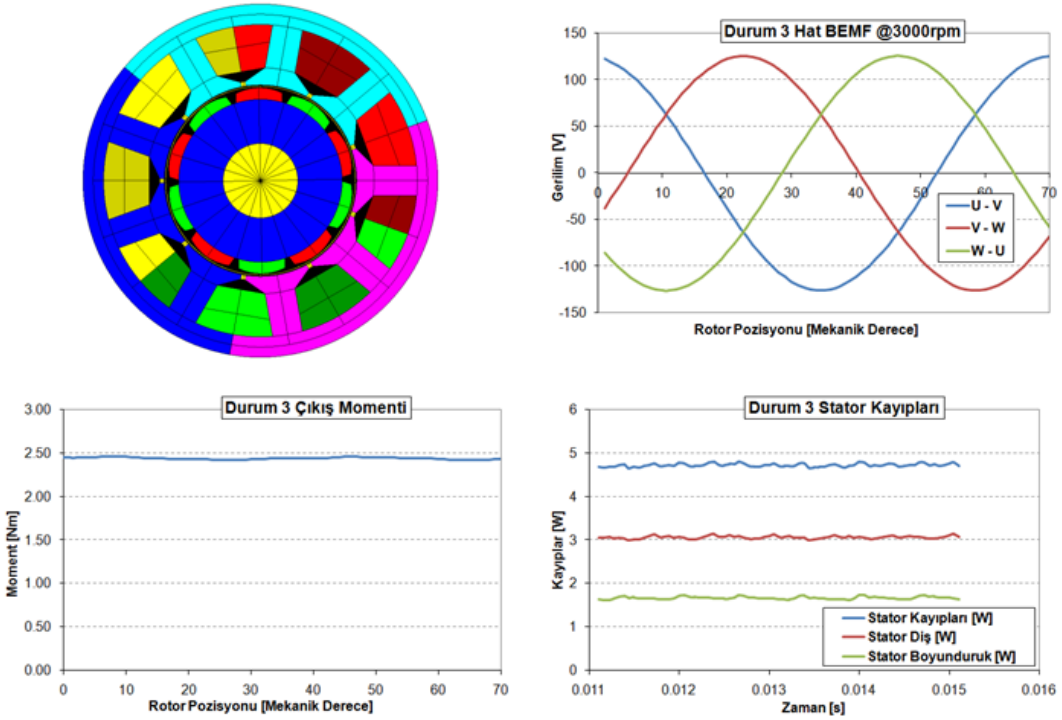
Önceki bölümde tanımlamaları yapılan altı durum için aynı koşullar altında yüklü ve yüksüz detaylı analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları üzerinden stator kayıpları da çıkartılmıştır. Altı farklı durum için yüksüz durum, yüklü durum ve kayıp analizlerinin sonuçları sırasıyla Şekil **6.2**, Şekil **6.3**, Şekil **6.4**, Şekil **6.5**, Şekil **6.6** ve Şekil **6.7**'de gösterilmiştir. Bu çalışmalardaki amaç TY manyetik malzemenin farklı açılarda ve yerleşimlerde motorun performansına etkisini incelemektir. Örnek motora göre kayıplardaki ve performanstaki değişimi gözlemlemektir. Ayrıca TY manyetik malzemeli motorlar arasında da diş tasarımlarının etkisini incelemek ve sonuçlara etkisini gözlemlemek amaçlanmıştır.



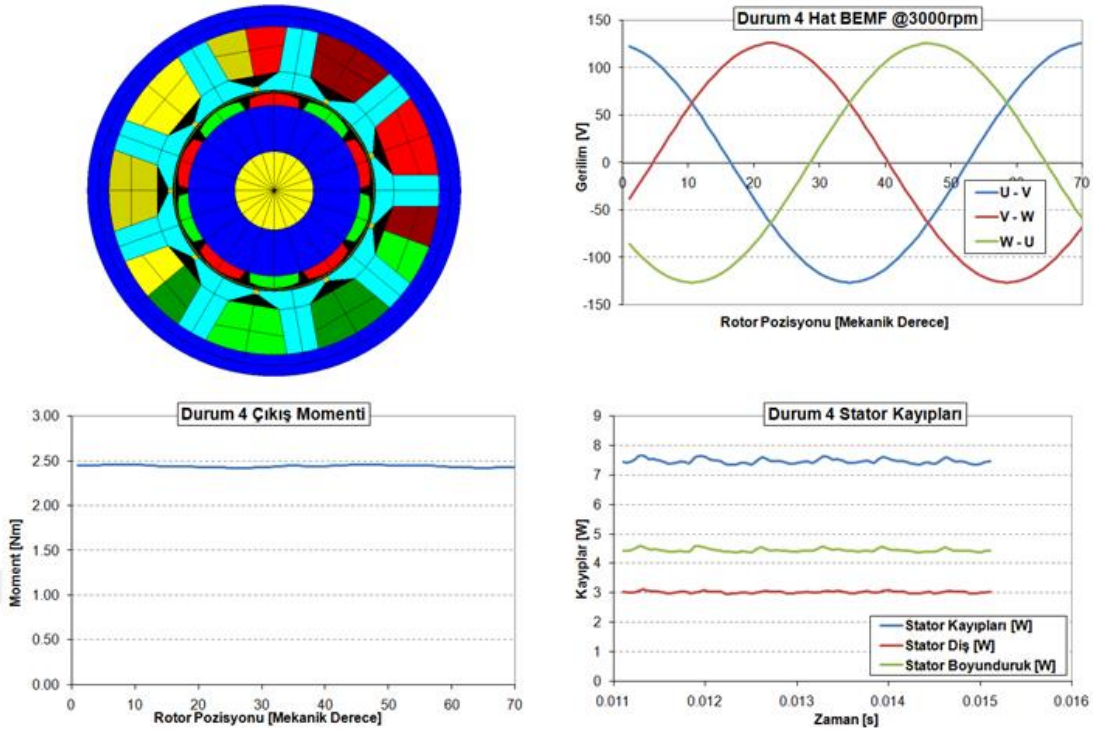
Şekil 6.2. Durum 1 için detaylı analiz sonuçları



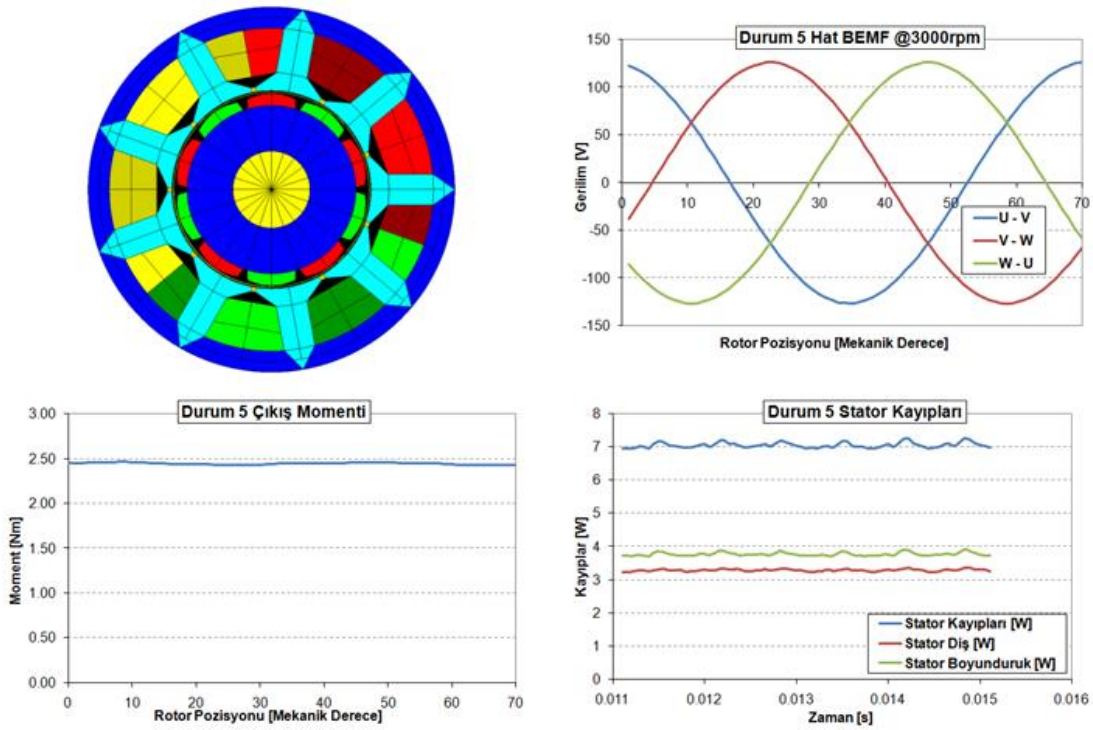
Şekil 6.3. Durum 2 için detaylı analiz sonuçları



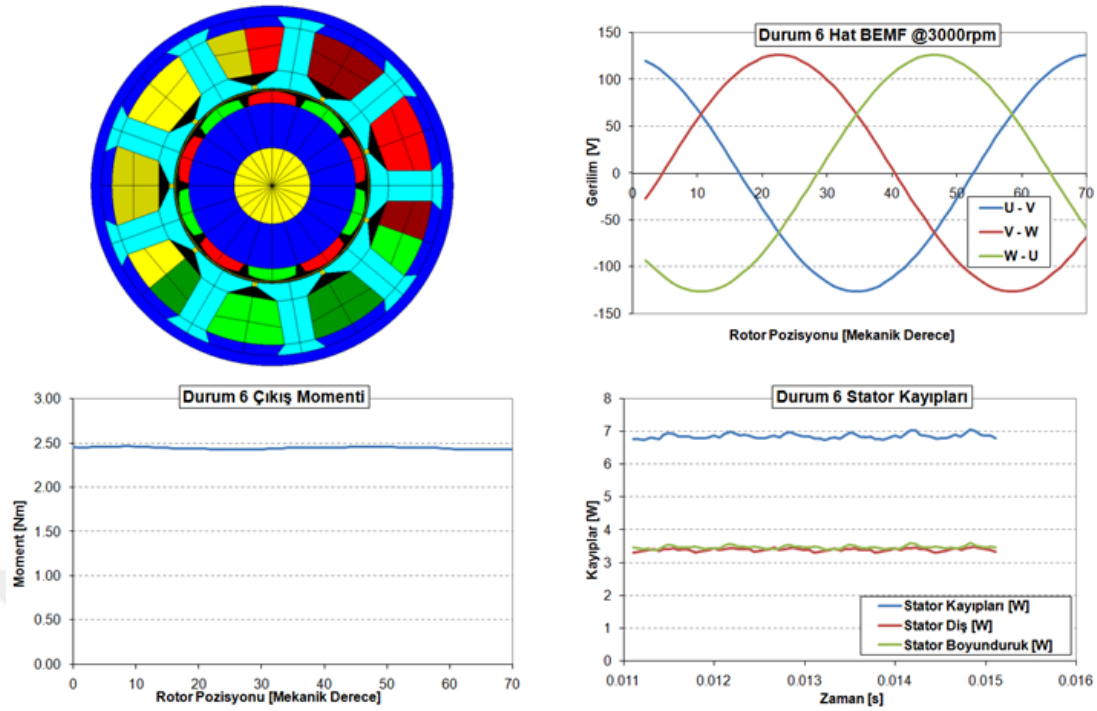
Şekil 6.4. Durum 3 için detaylı analiz sonuçları



Şekil 6.5. Durum 4 için detaylı analiz sonuçları



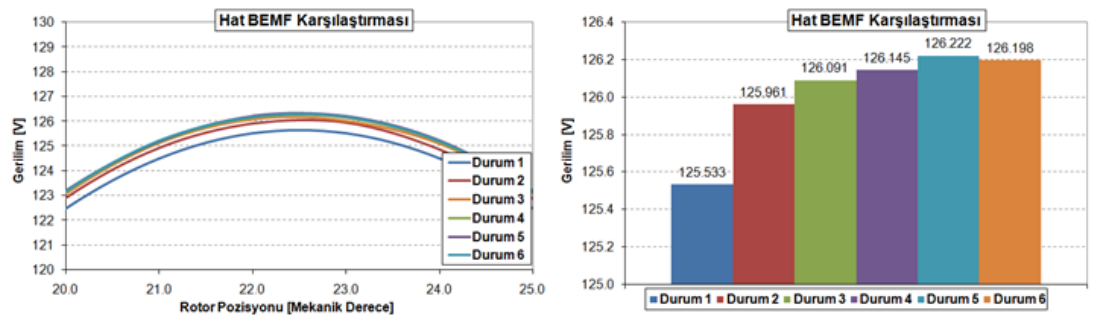
Şekil 6.6. Durum 5 için detaylı analiz sonuçları



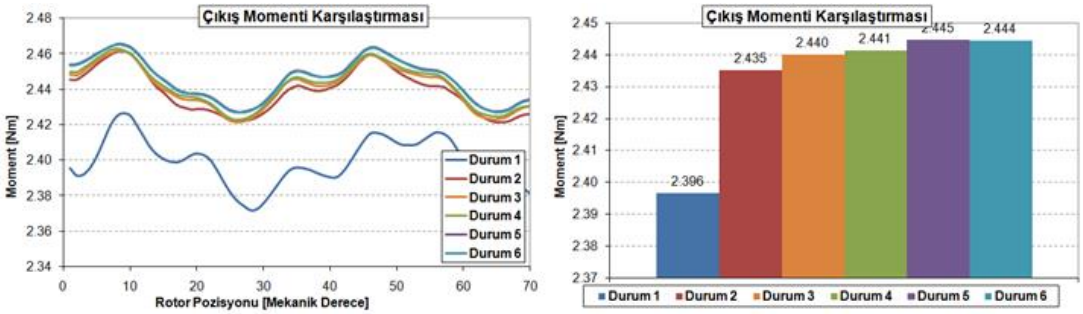
Şekil 6.7. Durum 6 için detaylı analiz sonuçları

6.2. Alternatif Tasarımların SEA Sonuçları

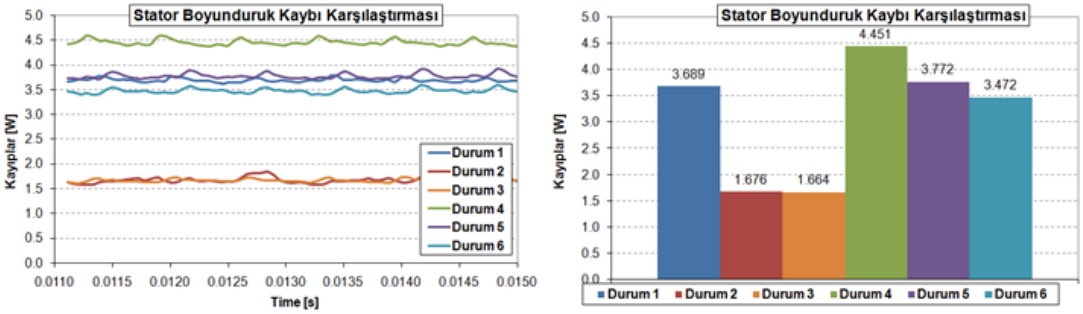
Detaylı analizleri yapılan tasarım alternatiflerinin karşılaştırmalı sonuçları grafikler halinde incelenmiştir. Yüksüz durum analiz sonuçları Şekil 6.8'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Yüklü durum analiz sonuçları Şekil 6.9'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Stator kayıpları; stator boyunduruk, stator diş ve stator toplam kayıpları şeklinde sırasıyla Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca motorun aşırı yüklemelerdeki tork ilişkisini incelemek amacıyla tork-akım analizleri yapılmıştır. Tork-akım analiz sonuçları Şekil 6.13'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



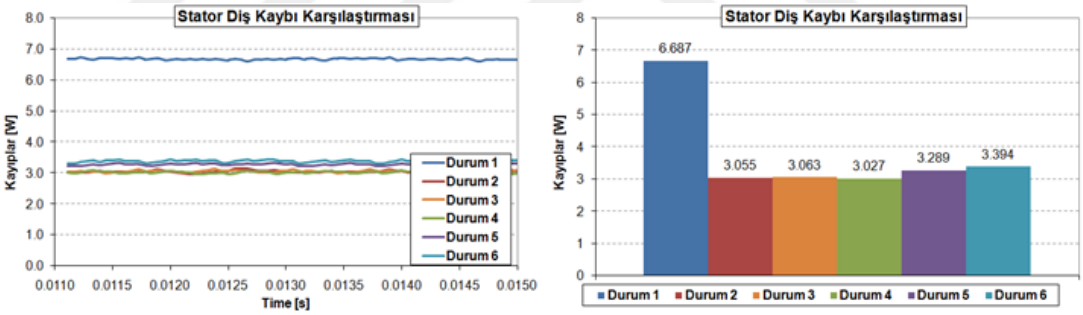
Şekil 6.8. Yüksüz durum analizleri sonucunda hat tepe değerlerinin karşılaştırılması



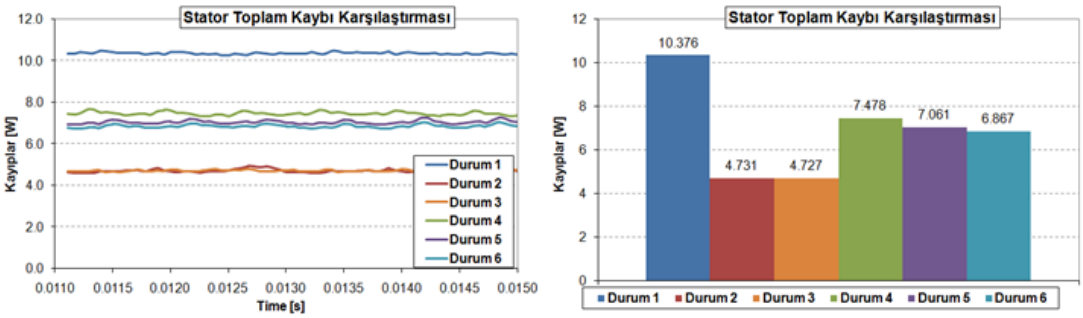
Şekil 6.9. Yüklü durum analizleri sonucunda ortalama tork çıkışının karşılaştırılması



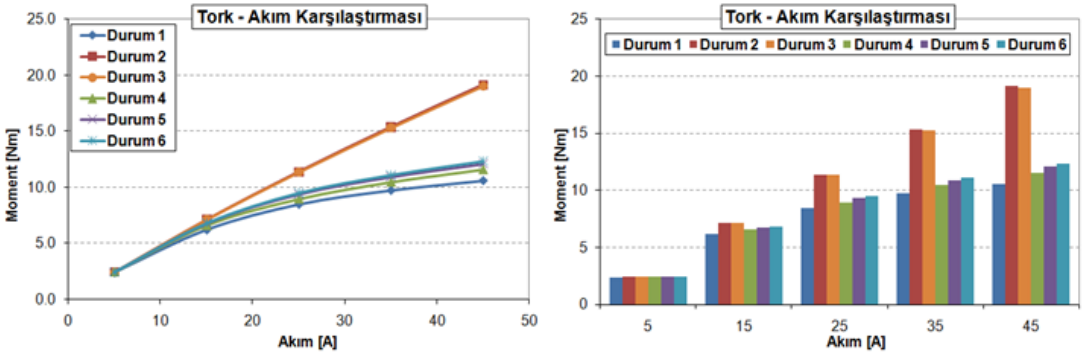
Şekil 6.10. Stator boyunduruk kayıplarının karşılaştırılması



Şekil 6.11. Stator diş kayıplarının karşılaştırılması



Şekil 6.12. Toplam stator kayıplarının karşılaştırılması



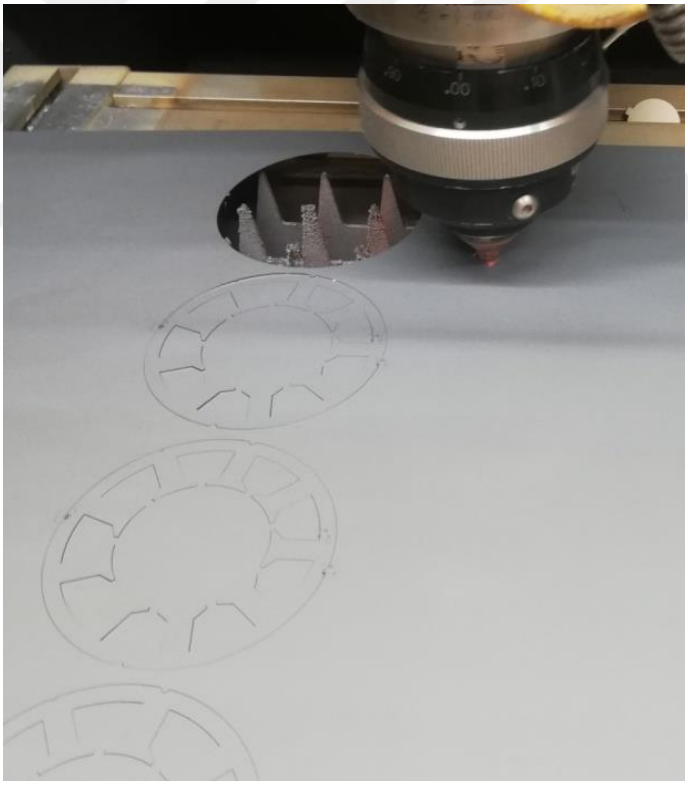
Şekil 6.13. Tork-Akım analizi sonucunda ortalama tork değerlerinin karşılaştırılması

7. DURUM 2 TASARIMININ PROTOTİP ÜRETİMİ VE TESTLERİ

Test sonuçlarının beklendiği gibi çıkmamasıyla birlikte üretimi daha kolay ve sıkıntısız olabilecek olan Durum 2 tasarımının üretimi ve ardından doğrulama testleri yapılmıştır.

7.1. Motor Prototip Üretimi

Durum 2 tasarımının üretiminde önceki prototip üretiminde kullanılan sac malzemenin aynısı kullanılmıştır. Aynı hassasiyet ve titizlikle kesilen sac laminasyonlarına ait görseller Şekil **7.1** ve Şekil **7.2**'de verilmiştir.

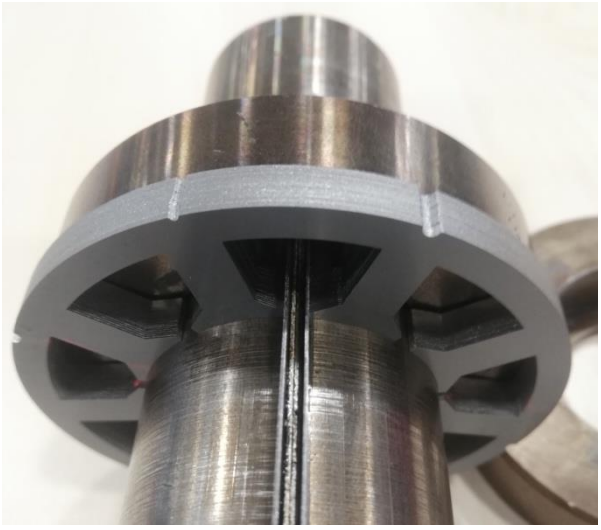


Şekil 7.1. Durum 2 stator saclarının lazer kesimi

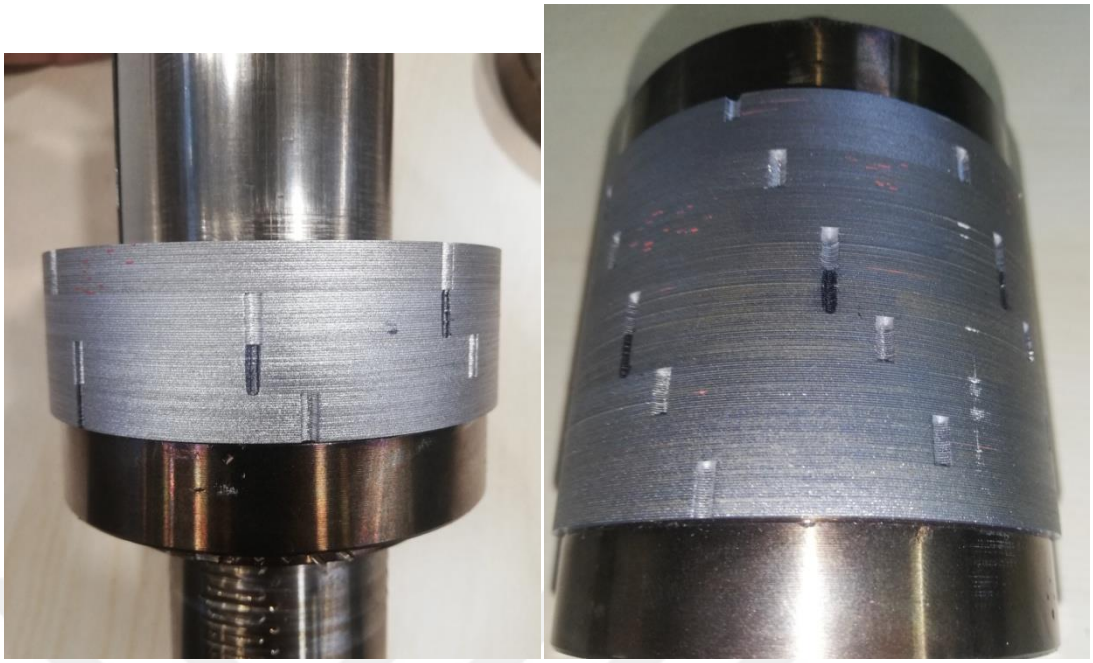


Şekil 7.2. Lazer kesimi tamamlanmış Durum 2 stator sacları

Stator sacları kesildikten sonra sac laminasyonları paketlenirken farklı bir yöntem izlenmiştir. Tanecik - yönelimli malzemenin oryantasyon yönünün stator paketinin tamamına yayılabilmesi için 40° açıyla 9 parça halinde döndürülmüştür. Stator 9 oluklu olduğu için aralarındaki açı 40° olarak belirlenmiştir. Şekil **7.2**'de görüldüğü gibi stator paketi 9 parçaya bölünmüştür. Her parçanın birbirine göre açısı 40° olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sac laminasyonlarının yerleştirilmesi ile ilgili görseller Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.3. Lazer kesimi tamamlanmış Durum 2 stator saclarının fikstüre yerleştirilmesi

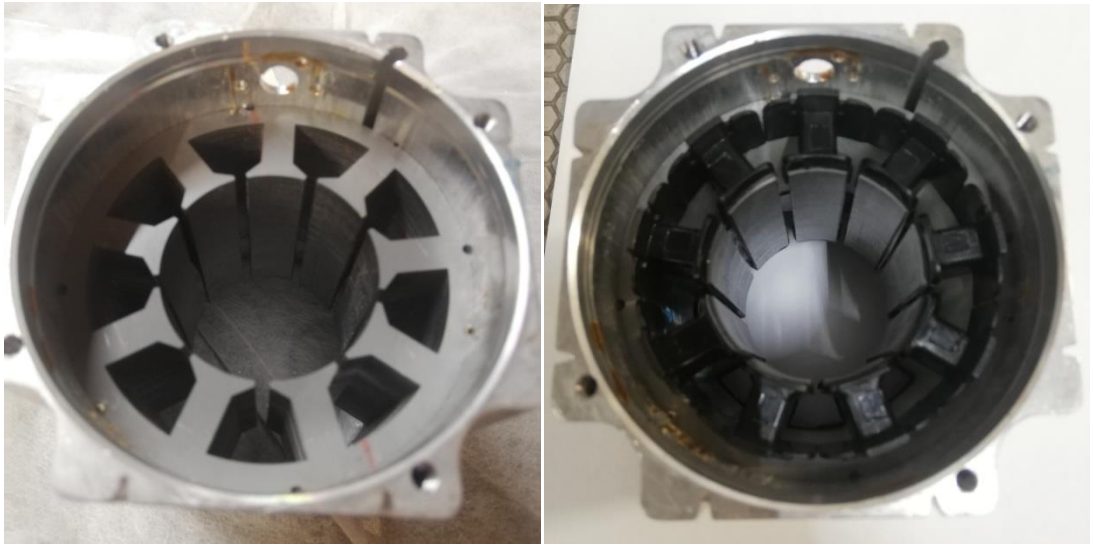


Şekil 7.4. Stator paketi boyunca 40° açıyla döndürülmüş 9 adet sac paket grubunun yerleştirilmesi

Stator sac paketi fikstürden çıkartıldıktan sonra motor gövdesine çakılmıştır. Motor gövdesine çakılan statora sargı izolasyonunu sağlamak için sargı plastikleri yerleştirilmiştir. Stator sac paketi ile ilgili görseller Şekil 7.5ve Şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.5. Stator fikstüründen çıkarılan stator sac paketi



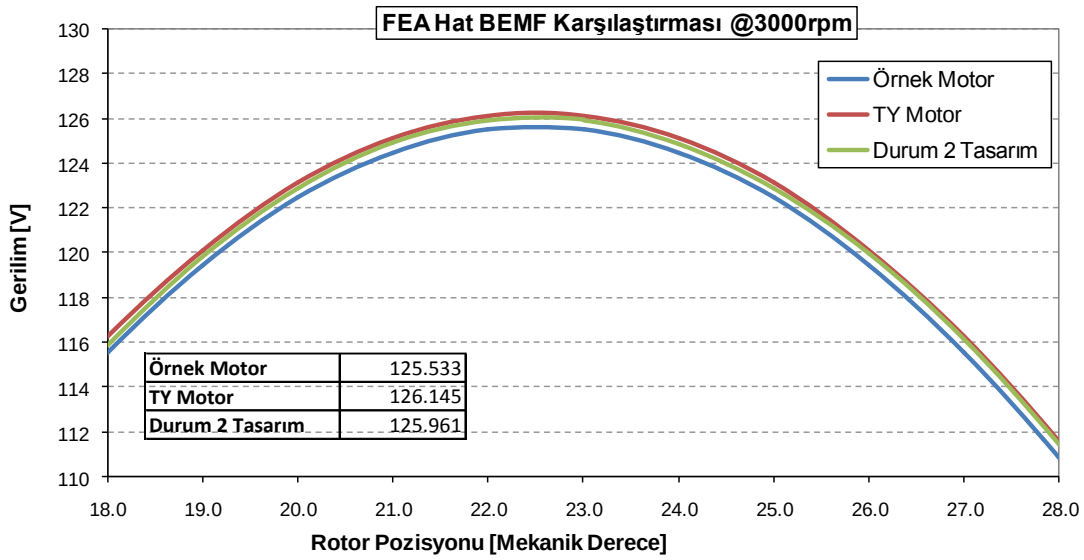
Şekil 7.6. Stator sac paketinin gövdeye çakılması ve sargı plastiklerinin yerleştirilmesi

Sargı plastiklerinin yerleştirilmesi sonrasında sarım özellikleri değiştirilmeden aynı sarım yapılmıştır. Sarımı yapılan motora aynı epoksi fikstürü kullanılarak epoksi dökülmüştür. Epoksi malzemenin kuruması sonrasında önceki motorlarda kullanılan rotor, mil ve kapaklar kullanılarak motor toplanmıştır.

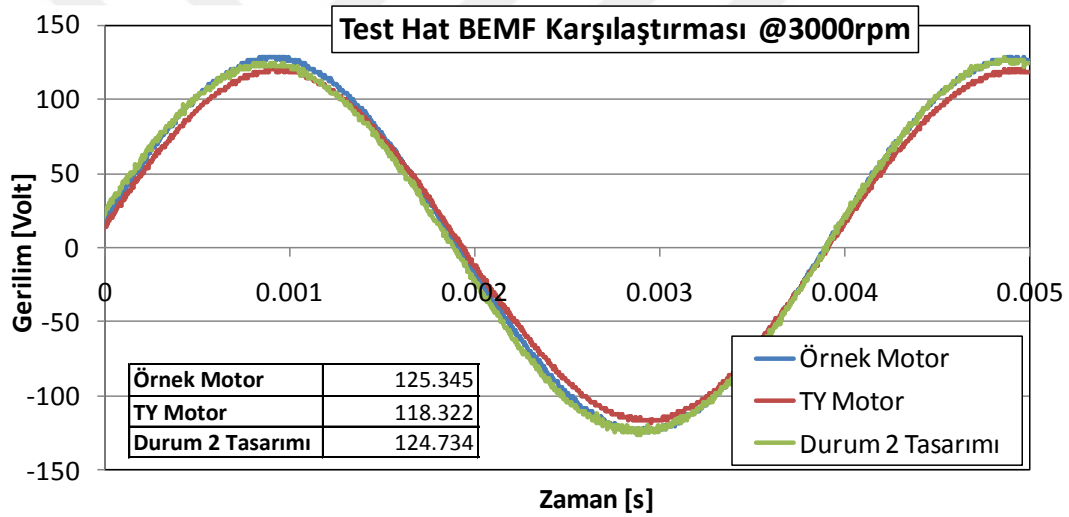
7.2. Motor Testleri ve Sonuçları

Prototip üretimi tamamlanan Durum 2 motorunda aynı test düzeneği kullanılarak yüksüz ve yüklü durum testleri yapılmıştır.

Yüksüz durum analizlerinin karşılaştırılması anma hızındaki hat zıt EMK sonuçları için Şekil 7.7'de gösterilmiştir. Yüksüz durum testlerinin karşılaştırılması yapılan motorların anma hızındaki hat zıt EMK sonuçları Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Yüksüz durum testleri farklı hızlar için yapılmasına rağmen anma hızındaki yüksüz durum testlerinin sonucu gösterilmektedir.

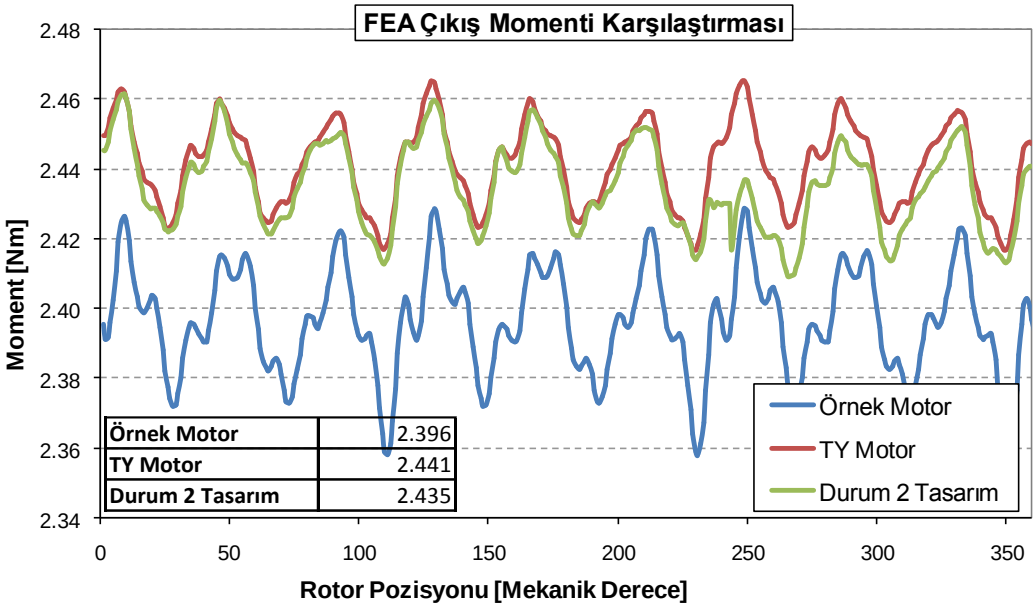


Şekil 7.7. Yüksüz durum analiz sonuçlarının karşılaştırılması

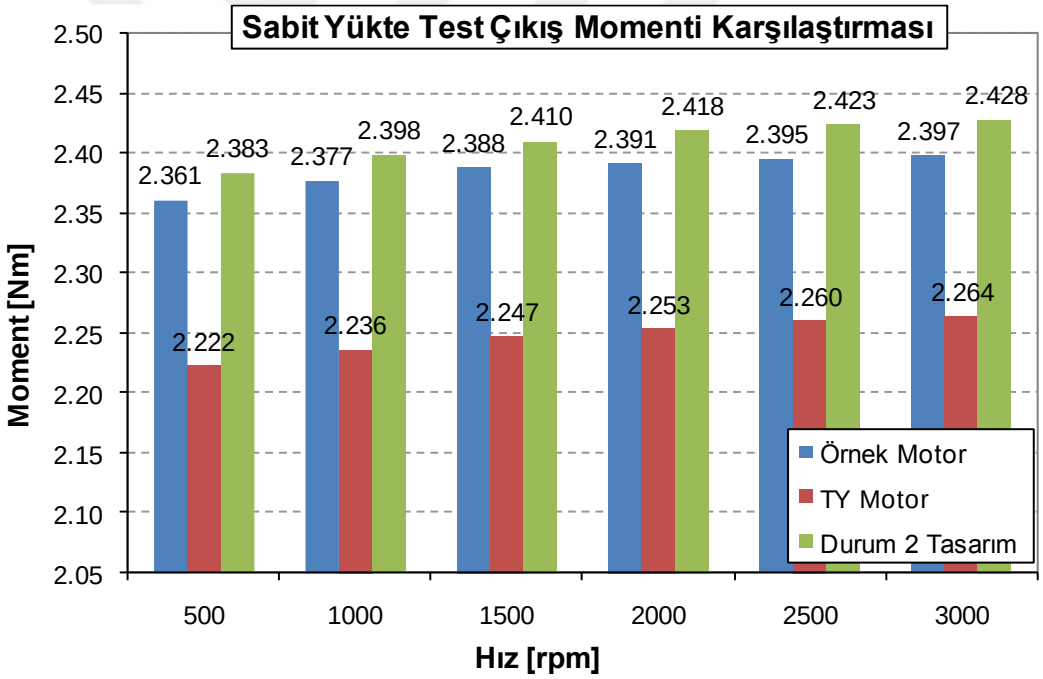


Şekil 7.8. Yüksüz durum test sonuçlarının karşılaştırılması

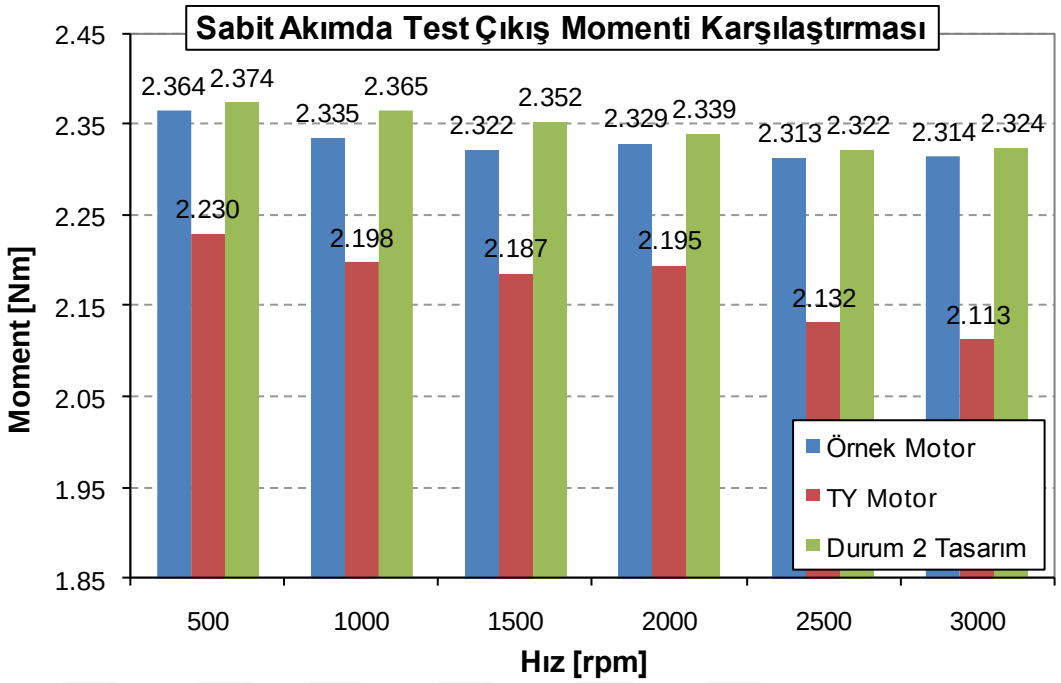
Yüklü durum analizlerinin karşılaştırılması anma akımındaki çıkış momenti sonuçları için Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Yüklü durum testleri 500rpm hızdan başlayarak 3000rpm hıza kadar iki farklı şekilde yapılmıştır. İlk olarak sabit yük altında 500rpm hızda $5A_{rms}$ akım verilerek teste başlanmıştır ve 3000rpm hıza kadar tork verileri alınmıştır. Bu sırada karşı yük hiç değiştirilmemiştir ve hız artışıyla akımda bir miktar artma gözlemlenmiştir. Şekil 7.10'de sabit yük altında yapılan testin karşılaştırmalı grafiği gösterilmiştir. İkinci olarak 500rpm hızda ve $5A_{rms}$ akımda teste başlanmıştır. Hızı 3000rpm'e yükseltirken artan akımı $5A_{rms}$'de sabit tutabilmek için karşı yük uygun değere düşürülmüştür. Şekil 7.11'da sabit akımda yapılan testin karşılaştırmalı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 7.9. Yüklü durum analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.10. Sabit yük altında yüklü durum test sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.11. Sabit akımda yüklü durum test sonuçlarının karşılaştırılması

7.3. Direnç ve Endüktans Ölçümleri

Servomotorlarda kontrol dinamikleri açısından elektrik zaman sabiti önemli bir parametredir. Elektrik zaman sabiti, ölçülen endüktans değeri ile hat direncinin birbirine bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada üretilen üç motorun da elektrik zaman sabitleri hesaplanmıştır ve karşılaştırmalı olarak Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Elektrik zaman sabiti karşılaştırması

	Direnç [ohm]	Endüktans [H]	Elektrik Zaman Sabiti [s]
Örnek Motor	0.788	0.00434	0.00551
TY Motor	0.763	0.00409	0.00536
Durum 2 Tasarımı	0.800	0.00427	0.00533

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, KM senkron motorlarda manyetik malzemenin performansa olan etkisi incelenmiştir. Servo motor endüstrisinde çoğunlukla kullanılan manyetik sac malzemeden farklı olarak tanecik-yönelimli manyetik sac malzeme kullanılmıştır. Ayrıca SMC manyetik malzeme kullanımında motor performansına olan etkisi SEA ile incelenmiştir.

Analiz ve üretimlere başlamadan öncesinde literatür araştırması yapılmıştır. Literatür araştırması ile bu konuda farklı manyetik malzemelerde çalışılan makaleler incelenmiştir. Makale incelemelerinde tanecik-yönelimli manyetik sac malzeme çalışmaları incelenmiştir ve yakın olan çalışmalar üzerinde durulmuştur.

Örnek motor için SEA çalışmaları yapılmıştır. Örnek motorda M270-35A manyetik sac malzeme ele alınmıştır. Yüksüz ve yüklü durum analizleri yapılan örnek motorda kayıplar detaylı olarak ayrıştırılmıştır.

Örnek motorla birlikte tanecik-yönelimli manyetik sac malzemeli motorun ve SMC manyetik malzemeli motorun detaylı SEA yapılmıştır. Aynı şekilde yüksüz ve yüklü durum analizleri yapılan motorların kayıpları detaylı olarak ayrıştırılmıştır.

Üretimi zaten yapılmış olan örnek motorun analizlerdeki sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için yüklü ve yüksüz durum testleri yapılmıştır.

TY manyetik malzemeli motorun üretimi yapılmıştır. Üretimi için gereken fikstürler tasarlanıp üretilmiştir. Üretimi tamamlanan TY manyetik malzemeli motorun testleri örnek motor ile karşılaştırılabilmesi için aynı şekilde ve koşullarda yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde motor momentinde %2.5'lik bir artış gözlemlenmiştir ancak test sonuçları incelendiğinde TY manyetik malzeme kullanılan motorun tork çıkışının örnek servo motora göre %5.5 düşük olduğu gözlemlenmiştir. Analizlerde performans yüksek çıkarken testlerde düşük çıkmasının sebebi üretim kaynaklı olarak düşünülmektedir. Bu sebeple farklı tasarım alternatifleri üzerinde modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Örnek motor tasarımı dahil toplamda altı adet motor tasarımı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Tasarım alternatifleri ile ilgili detaylı tanımlamalar yapılıp modellerin görselleri verilmiştir. Detaylı analiz çalışmaları yapılan tasarım alternatifleri arasında karşılaştırmalı sonuçlara da yer verilmiştir. Karşılaştırmalı grafikler incelendiğinde Durum 5 tasarımının en ideal tasarım olduğu belirlenmiştir. Ancak tork-akım grafikleri incelendiğinde maksimum duruma en dayanaklı motor tasarımının TY manyetik malzeme kullanılan motor tasarımlarının (Durum 2, Durum 3) olduğu sonucuna varılmıştır.

Hem üretilebilirlik açısından hem de performans açısından değerlendirdikten sonra Durum 2 tasarımının üretilmesine karar verilmiştir. Durum 2 tasarımının prototip üretimi yapılmıştır ve testleri yapılmıştır.

Analiz sonuçları incelendiğinde Durum 2 tasarımının motor momentinde örnek motora göre %1.6'lik bir artış gözlemlenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde ise grafiklerle ve tablolarla karşılaştırıldığında anma değerlerinde Durum 2 tasarımının tork değerinin örnek motora göre %1.3 daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Analizleri ve üretimleri yapılan ardından testleri yapılan üç tip motorun kontrol sistemlerindeki hassasiyeti açısından elektrik zaman sabitleri tablo ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Tolba A., Development of a simulation environment to investigate the control behaviour of a permanent magnet synchronous motor, Master Thesis, Universitat Paderborn, Almanya, 2015.

[2] Cicalé S., Albini L., Parasiliti F., Villani M., Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Grain Oriented Electrical Steel for Direct-Drive Elevators, IEEE, 2012, 978-1-4673-0142-8.

[3] Fernando N., Hanin F., Magnetic Materials for Electrical Machine Design and Future Research Directions: A Review, IEEE, 2017, 978-1-5090-4281-4.

[4] Kowal D., Sergeant P., Dupré L., Van den Bossche A., Comparison of Non-oriented and Grain-Oriented Material in an Axial Flux Permanent-Magnet Machine, IEEE, 2010, 0018-9464.

[5] Lindner A., Hahn I., Investigation of a large air-gap E-core flux-switching machine with arbitrary magnet shapeand grain-oriented material, IEEE, 2016, 978-1-5090-2538-1.

[6] Lopez S., Cassoret B., Brudny J. F., Lefebvre L., Vincent J. N., Grain Oriented Steel Assembly Characterization for the Development of High Efficiency AC Rotating Electrical Machines, IEEE, 2009, 10.1109/TMAG.2009.2023243.

[7] Pei R., Zeng L., Li S., Coombs T., Studies on Grain-Oriented Silicon Steel Used in Traction Motors, IEEE, 2017.

[8] Steinmetz C., On the law of hysteresis, IEEE, vol. 72, pp. 197-221, Feb 1984.

[9] Reinlein M., Hubert T., Hoffmann A., Kremser A., Optimization of analytical iron loss approaches for electrical machines, Electric Drives Production Conference (EDPC), 2013 3rd International, pp. 1-7, Oct 2013.

[10] Reinert J., Brockmever A., De Doncker R., Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified steinmetz equation, Industry Applications Conference, Thirty-Fourth IAS Annual Meeting Conference Record of the 1999 IEEE, vol. 3, pp. 2087-2092, 1999.

[11] Bourchas K., Manufacturing Effects on Iron Losses in Electrical Machines, pp 6, PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015.

[12] Jordan H., Die ferromagnetischen konstanten für schwache wechselfelder, Elektr. Nach. Techn., vol. 1, p. 8, 1924.

[13] Krings A., Iron Losses in Electrical Machines- Inuence of Material Properties, Manufacturing Processes and Inverter Operation, PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2014.

[14] Pry R. H., Bean C. P., Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model, Journal of Applied Physics, vol. 29, no. 3, 1958.

[15] Bertotti G., Chapter 7 - magnetic domains and domain walls," in Hysteresis in Magnetism (G. Bertotti, ed.), Electromagnetism, pp. 189-221, San Diego: Academic Press, 1998.

[16] Jacobs, S., Henrotte F., Gracia M. H., Hameyer K., Goes P., Hectors D., Magnetic material optimization for hybrid vehicle PMSM drives, World Electric Vehicle Journal (www.evs24.org/wevajournal), vol. 3, 2009.

[17] Broddefalk A., Lindenmo M., Dependence of the power losses of a non-oriented and Magnetic Materials, Proceedings of the 17th International Symposium on Soft Magnetic Materials vol. 304, no. 2, pp. e586-e588, 2006.

[18] Gearbox Motors vs Integrated Gearmotors, http://www.dolin.com.vn/en/news/industry-news/gearbox-motors-vs-integrated-gearmotors-175.html, (Ziyaret tarihi: 30 Mayıs 2020).

[19] Altair Flux 2D Material Manager

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Burak Özdinçer**, Oğuzhan Ocak, Zuhal Payza, Enes Maksut Kocabalkan, Metin Aydın, Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda Epoksi Malzemesinin Motor Termal Performansına Etkisi, 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), 2016, 978-605-01-0923-8.

[2] **Burak Özdinçer**, Ali Alperen BAŞARAN, Enes Maksut KOCABALKAN, Mustafa Ersad PALA, Limit Açılı Tork Motor Tasarımı, İyileştirmesi ve Deneysel Doğrulanması, ELECO 2018 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, 2018, 978-605-01-1240-5.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Edirne'de doğdu. Liseyi Kırklareli Remzi Yapıcı Anadolu Öğretmen Lisesinde okudu. 2011-2015 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliğinde okudu. Mezun olduktan sonra 2015 yılında Akım Metal San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezinde işe başladı. Kalıcı mıknatıslı servo motorlar üzerine halen çalışmaya devam ediyor. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doç. Dr. Metin Aydın danışmanlığında elektrik motorları üzerine yüksek lisans yapmaya devam ediyor.