



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



EKLEMELİ ÜRETİM İLE 400 HZ ASENKRON MOTOR TASARIMI

MUSTAFA AYVAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mekatronik Mühendisliği Dalı
Mekatronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa Caner AKÜNER

İSTANBUL, 2024

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince danışmanlığımı yapan, kıymetli zamanını bana ayıran, güler yüzünü ve samimiyetini esirgemeyen, tüm sorularıma içtenlikle cevap verip desteğini eksik etmeyen, meslek hayatımda bana çok büyük katkıları olan değerli hocam Prof. Dr. M. Caner AKÜNER'e sonsuz teşekkürlerimi ve sevgimi sunuyorum.

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi İsmail TEMİZ'e, 3B baskı işlemlerinde desteğini ve yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Alper YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Mekatronik mühendisliği öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine teşekkür ediyorum.

Polimer laboratuvarında ABS ekstrüzyon işlemlerinde yardımcı olan Prof. Dr. Münir TAŞDEMİR ve Arş. Gör. Elif ULUTAŞ'a teşekkür ediyorum.

Filament üretme işlemlerinde şirketinin imkanlarını sunan, değerli zamanını ve emeğini harcayan Filamex Teknoloji Ltd.Şti. kurucu ortağı Mekatronik Müh. Burak HORUZ'a teşekkürlerimi sunuyorum.

3B baskı işlemlerinde teknik imkanlarını sunan, zamanını ve emeğini esirgemeyen değerli arkadaşım H. Recep KURT'a, çalışmalarım da her zaman destek olan mesai arkadaşlarıma ve amirlerime teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu günlere gelmemi, yetişmemi sağlayan, hayatıma dokunmuş tüm eğitim kademelerindeki öğretmenlerime, öğretim üyelerine ve görevlilerine teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımda olduğu günden beri beni her zaman ve her konuda destekleyen, sabır gösteren, eksiklerimi tamamlayan eşime, çalışmalarım sırasında beni meraklı gözlerle sürekli izleyen oğluma ve bugünlere gelmemde, yetişmemde büyük emeği olan, desteğini her zaman yanımda hissettiğim anneme, babama, kardeşime sonsuz teşekkürlerimi ve sevgimi sunuyorum.

Çalışmamı kıymetli aileme ithaf ediyorum.

Haziran 2024

Mustafa AYVAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
YENİLİK BEYANI.....	vii
SEMBOLLER.....	viii
KISALTMALAR.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti.....	3
1.2. Tez Amacı ve Orijinal Katkı	5
2. GENEL BİLGİLER.....	6
2.1. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Yapısı.....	7
2.1.1. Stator.....	8
2.1.2. Rotor.....	8
2.2. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi	9
2.3. Asenkron Motorlarda Kayıplar ve Verim Sınıfları.....	11
2.4. Yüksek Frekans için İmal Edilmiş Asenkron Motorlar.....	12
2.4.1. Yüksek Frekanslı Asenkron Motorlarının Kullanım Alanları.....	13
2.4.2. Yüksek Frekanslı Asenkron Motorlarda Tasarım Teknolojisi.....	17
3. EKLEMELİ ÜRETİM TEKNİKLERİ VE UYGULAMALARI.....	24
3.1. SMC'ler İle Eklemeli Üretim Üzerine Çalışmalar.....	24
3.2. Eklemeli Üretimde Malzeme Teknolojisi.....	25
3.3. Elektrik Makineleri İçin Eklemeli Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi.....	28
3.3.1. Selektif Lazer Eritme (SLM).....	29
3.3.2. Erimiş Biriktirme Modellemesi (FDM).....	30
3.3.3. Bağlayıcı Püskürtme Teknolojisi (BJT).....	31
3.4. ASM'lerde Eklemeli Üretim Çalışmaları.....	32
4. MALZEME ANALİZİ.....	33
4.1. Kısıtlılıklar.....	33
4.2. Ekstrüzyon ile Metal Eklemeli ABS Filament Üretimi.....	34

4.2.1. ABS ile Demir Tozu Karıştırma Ekstrüzyonu.....	34
4.2.2. ABS-Demir Tozu arışımının 3B Baskı Filamenti Haline Getirilmesi..	38
4.3. Malzemelerde Toroid Yöntemi ile B-H Eğrisinin ve Kayıpların Belirlenmesi.....	42
4.4. ABS ve PLA Filamentlerinin Elektromanyetik Özelliklerinin Analizi.....	47
4.4.1. Ekstrüzyon ile Üretilen %6 Demir Tozu Katkılı ABS Filamentinin Analizi.....	48
4.4.2. Örnek-1 PLA Filamentin Toroid İmali ve Analizi.....	51
4.4.3. Örnek-2 PLA Filamentten Üretilmiş Toroid ve Analizi.....	54
4.4.4. Örnek-3 PLA Filamentin Toroid İmali ve Analizi.....	57
4.4.5. Toroid Örneklerinin Değerlendirilmesi.....	60
5. ASM MODELLEMESİ.....	61
5.1. Boyut.....	62
5.2. Malzeme.....	62
5.3. ASM Tasarımı.....	62
5.4. ASM Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi ve Simülasyonu.....	66
5.4.1. Stator Tasarımı.....	66
5.4.2. Rotor ve Mil Tasarımı.....	68
5.4.3. ASM'un Farklı Çalışma Durumlarındaki Parametrelerin İncelenmesi.....	69
5.4.3.1. Stator Uzunluğuna Göre Analiz.....	69
5.4.3.2. Stator Oluk Uzunluğuna Göre Analiz.....	70
5.4.3.3. Rotor Oluk Uzunluğuna Göre Analiz.....	71
5.4.3.4. Uygulanan Gerilime Göre Analiz.....	71
5.4.3.5. Stator Oluğunda Bulunan İletken Sipir Sayısına Göre Analiz.....	72
5.4.3.6. Stator Oluğunda Bulunan İletken Çapı Değerine Göre Analiz.....	73
5.4.3.7. Stator Dış Çapına Göre Analiz.....	73
5.4.3.8. Analizlerin Değerlendirilmesi.....	74
5.4.3.9. Örnek-3 Ferromanyetik PLA ile Elektriksel Çeliğin Karşılaştırılması.....	75
6. ASM PROTOTİP ÜRETİMİ.....	77
6.1. Statorun Baskı İşlemi.....	77
6.2. Rotorun Baskı İşlemi.....	79

6.3. Mil ve Yataklama Elemanlarının Baskı İşlemi.....	80
6.4. Stator ve Rotor Bobinaj İşlemleri.....	81
6.4.1. Stator Bobinaj İşlemi.....	81
6.4.2. Rotor Bobinaj İşlemi.....	83
6.5. ASM Prototipinin Hazır Hale Getirilmesi.....	84
7. PROTOTİP ASM TEST İŞLEMİ.....	86
7.1. Prototip ASM Testi.....	86
7.2. Prototip ASM Eşdeğer Devresi.....	89
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	92
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	99



ÖZET

EKLEMELİ ÜRETİM İLE 400 HZ ASENKRON MOTOR TASARIMI

Geleneksel elektrik makinalarında nüve malzemesi olarak çelik kullanıldığı için preslenmiş demir çekirdeklerin aksine Yumuşak Manyetik Kompozit(SMC)'lerden yapılan demir çekirdekler, demir parçacıklarına eklenen katkı maddeleri ile çeşitli üç boyutlu(3B) baskı teknikleri kullanılarak kolay şekil verilebilir ve istenen yapıda ucuz olarak üretilmektedir. 3B baskı ile daha az mekanik işlem gerektiğinden perçin ve kaynak gibi mekanik işlem adımları gerekli olmamaktadır; böylelikle üretim aşamaları kolaylaştırılarak maliyetin azaltılması hedeflenmektedir. Yeni nesil elektrik makinaları yüksek verimlilik ve güç yoğunluğuna sahiptir, bunun yanında günümüzde bir diğer husus ise ağırlığın azaltılması, minimum malzeme atığı ve geri dönüştürülebilir özelliklere sahip makinaların imalinin önemli hale gelmesidir. 3B baskı olarak eklemeli üretim yeni nesil elektrik makinalarının üretimini kolaylaştıran gelişmekte olan bir üretim teknolojisidir. Ham maddenin geri dönüşümü ve yeniden kullanılması maliyeti düşürmek için kritik öneme sahiptir. Eklemeli üretim geleneksel üretim süreciyle ilişkili malzeme israfını ve hurda parçaları azaltabilecek bir teknolojidir. Eklemeli üretimdeki son teknolojik gelişmeler bakır, seramik ve manyetik malzemeler dahil olmak üzere PLA, ABS vb. çok çeşitli polimer malzemelerin kullanılmasına izin vermektedir. PLA, ABS vb. polimerlere farklı yüzdelerde ferromanyetik madde eklenerek elektrik makinalarının imalinde kullanılması geliştirilmeye ve araştırmaya açık bir konudur. Bu çalışmada mekanik bütünlükten ödün vermeden ağırlığın azaltıldığı ve geleneksel üretime göre özellikle yüksek frekansta elektriksel avantajları olan 3B baskı teknolojisi ile imal edilebilecek elektrik makinalarının tasarımının potansiyelini göstermek hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra parçaları (rotor, stator, mil ve gövde) 3B yazıcı teknolojisi ile kolayca üretilebilecek daha hafif, kompakt, geri dönüşüme uygun bakım ve kurulumu kolay bir asenkron motor tasarlanmıştır. İlk aşamada küçük boyutlu asenkron motorlar ve mıknatıs temelli makinaların üretiminde yaygınlaşmasına katkı sağlayacağı ve literatüre yeni bir üretim modeli kazandıracağı düşünülmektedir.

ABSTRACT

APPLICATIONS OF ADDITIVE MAGNETIC MATERIALS IN 400 HZ INDUCTION MOTOR DESIGN

Since steel is used as the core material in traditional electrical machines, unlike pressed iron cores, iron cores made of Soft Magnetic Composite (SMC) can be easily shaped using various Three-dimensional (3D) printing techniques with additives added to the iron particles and can be produced in the desired structure because they are cheap. Since less mechanical processing is required with 3D printing, mechanical processing steps such as rivets and welding are not required; Thus, it is aimed to reduce the cost by facilitating the production stages. New generation electrical machines have high efficiency and power density, but another issue today is that reducing weight, producing machines with minimum material waste and recyclable features has become important. Additive manufacturing as 3D printing is an emerging manufacturing technology that facilitates the production of new generation electrical machines. Recycling and reusing raw material is critical to reducing cost. Additive manufacturing is a technology that can reduce material waste and scrap parts associated with the traditional manufacturing process. The latest technological advances in additive manufacturing include PLA, ABS, etc., including copper, ceramics and magnetic materials. It allows the use of a wide variety of polymer materials. PLA, ABS etc. Adding different percentages of ferromagnetic material to polymers and using them in the manufacture of electrical machines is a subject open to development and research. In this study, it is aimed to show the potential of the design of electrical machines that can be manufactured with 3D printing technology, which reduces weight without compromising mechanical integrity and has electrical advantages, especially at high frequency, compared to traditional production. In addition, a lighter, compact, recyclable, easy-to-maintain and install induction motor whose parts (rotor, stator, shaft and body) can be easily produced with 3D printer technology has been designed. In the first stage, it is thought that it will contribute to the widespread production of small-sized induction motors and magnet-based machines and introduce a new production model to the literature.

YENİLİK BEYANI

Analizi ve uygulaması yapılan bu çalışmada polimer esaslı demir tozu katkılı PLA ve ABS filament malzemelerinin üretimi, 3B baskısı ve manyetik analizleri yapılmış olup uygun olan filament ile stator ve rotoru FDM yöntemi ile 3B basılabilen, 400Hz frekansa göre bir prototip ASM tasarlanmıştır. Bu çalışma; polimer esaslı filament ile FDM 3B baskı tekniği kullanılarak ASM imali literatürde ilk defa yapıldığından dolayı orjinal bir çalışmadır. FDM tekniği yakın gelecekte; ferromanyetik filament teknolojisinin daha fazla gelişmesiyle prototip makina ve küçük güçlü makinaların imalinde etkin olabileceği değerlendirilmektedir. Bu çalışma ile literatüre yenilikçi bir elektrik makinası imalat tekniği getirilmek istenmiş ve demir dolgulu(eklemeli) PLA ve ABS filament kullanılarak prototip imal edilmiştir. Bu çalışma ile eklemeli üretim ve 3B baskı tekniğinin gelişmeye açık olduğunun önemine vurgu yapmak ve bu teknikler ile üretilmiş elektrik makinalarının tanınması, kullanılması ve akademik araştırmalara kaynak olması ve katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Haziran, 2024

Prof. Dr. M. Caner AKÜNER

Mustafa AYVAZ

SEMBOLLER

f	: Frekans (Hertz, Hz)
V, U	: Gerilim (Volt)
A	: Akım (Amper)
kV	: Kilo Volt
W	: Güç (Watt)
kW	: KiloWatt
MW	: Mega Watt
mm	: Milimetre
W/kg	: Demir Kaybı Birimi (Watt/Kilogram)
V/f	: Volt/Frekans
n_s	: Stator Döner Alan Devri (d/dk)
n_r	: Rotor Devri (devir/dakika d/dk, devir/saniye d/s)
S	: Kayma
e	: EMK gerilim
N	: Sarım Sayısı
$\emptyset$	: Manyetik Alan
μ	: Nüve Manyetik Geçirgenliği
A	: Sarım İletken Kesiti
l	: Çekirdek Uzunluğu
ω	: Açısal Sinyal Frekansı, Açısal Hız
M	: Moment (Newtonmetre)
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
ac	: Çevre Akım Yoğunluğu, elektriksel yükleme
D	: Stator İç Çapı
L	: Stator Boyu
P_{fe}	: Toplam Demir Kaybı
P_h	: Histeriz Kaybı
P_e	: Eddy(Girdap,Fuko) Akımı Kaybı
k_h	: Histeriz Kaybı Faktörü
P	: Güç
k_e	: Girdap Akımı Kaybı Faktörü
B_m	: Maksimum Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
B_{ort}	: Ortalama Manyetik Akı Yoğunluğu (T)

T	: Tesla
d/d	: Devir/Dakika
H	: Manyetik Alan Şiddeti, Mıknatıslanma Kuvveti (A/m)
H_c	: Koersif kuvvet
μm	: Mikro Metre
$^{\circ}C$	: Sıcaklık (santigrat derece)
rpm	: Ratio perminute (dakikada devir sayısı)
gr	: Gram
Br	: Artık Manyetizasyon
ρ_v	: Yoğunluk (kg/m^3)
m	: Ağırlık (gr)
h	: Yükseklik
n_{Fe}	: Demir doldurma faktörü
A_m	: Kesit Alan (cm^2)
VA/kg	: Demir Kaybı (VoltAmper/kg)
mm/S	: Baskı Hızı (Milimetre/saat)
i	: Akım (A)
Wb	: Weber (Manyetik Akı)
K_w	: Sargı faktörü
K_d	: Sargı Dağılım Faktörü
K_c	: Kısaltma Faktörü
τ	: Kutup Adımı
l_g	: Hava Aralığı Uzunluğu
T_s	: Faz Başına Stator Sarım Sayısı
a_s	: Stator İletkeninin Kesit Alanı
δ_s	: Akım Yoğunluğu (A/mm^2)
P	: Kutup Çifti Sayısı
2P	: Tek Kutup Sayısı
S_s	: Stator Oluk Sayısı
S_r	: Rotor Oluk Sayısı
D_r	: Rotor Çapı
D_o	: Stator Dış Çapı
R_K	: kısa devre direnci (ohm)
R_1	: Stator Direnci (ohm)
R'_2	: Rotorun Statora İndirgenmiş Direnci (ohm)

Z_K	: Kısa devre Empedansı (ohm)
X_k	: Kısa devre Reaktansı (Ohm)
$X_{1\sigma}$	: Stator Reaktansı (ohm)
$X'_{2\sigma}$	: Rotorun Statora İndirgenmiş Reaktansı (ohm)
R_{fe}	: Demir Direnci (ohm)
X_m	: Mıknatıslanma Reaktansı (ohm)
Ω .	: Direnç Birimi (ohm)
MPa	: Mega Paskal
Yx	: Oluk Adımı
C	: Sarım Renk Sayısı



KISALTMALAR

ABS	: Acrylonitrile Butadiene Styrene
PLA	: Poliaktik Asit
ASM	: Asenkron Motor
3B	: Üç Boyutlu
SMC	: Soft Magnetic Composites (Yumuşak Manyetik Kompozit)
PM	: Permanent Magnet (Kalıcı Tip Mıknatıs)
SMSA	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör
AM	: Additive Manufacturing (Eklemeli Üretim)
PMSM	: Permanent Magnet Synchronous Motor (Kalıcı Mıknatıslı Senkron)
FDM	: Fused Deposition Modeling (Erimiş Biriktirme Modellemesi)
SLM	: Selective Laser Melting (Selektif Lazer Eritme)
BJT	: Binder Jetting Technology (Bağlayıcı Püskürtme Teknolojisi)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
MMK	: Manyetomotor Kuvvet
EMK	: Elektro Motor Kuvvet
SRIM	: Solid-Rotor Induction Motor (Katı Rotorlu Endüksiyon Motoru)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Dizayn)
IM	: Induction Motor (Endüksiyon motoru, Asenkron Motor)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Sincap kafesli asenkron motorun yapısı.....	7
Şekil 2.2. Lamine sac paket ve sargıların yerleşimi.....	8
Şekil 2.3. Alüminyum ve bakır kısa devre çubuk rotor yapısı.....	9
Şekil 2.4. Üç fazlı döner alan oluşumu.....	10
Şekil 2.5. 2, 4 ve 6 kutuplu motorlarda kutupların oluşumu.....	10
Şekil 2.6. Havacılıkta kullanılan yüksek frekanslı asenkron motor örnekleri.....	14
Şekil 2.7. Gemi cayro sistemlerinde kullanılan dış rotorlu 333 Hz asenkron motor...	14
Şekil 2.8. Sinkro sistemleri ile bir top namlusunun pozisyon kontrolü.....	15
Şekil 2.9. Sinkro sistemleri ile hata büyüklüğünün ölçülmesi.....	16
Şekil 2.10. 115V 400Hz Sinkro Motor.....	16
Şekil 2.11. Katı ve Lamine çekirdeklerde girdap akımları.....	19
Şekil 2.12. M43 Çeliği Örneğinden Farklı Frekanslarda Elde Edilen Kayıp Grafiği.....	21
Şekil 2.13. Oluksuz ve Radyal Oluklu Tip Katı Rotor.....	24
Şekil 3.1. SMC’de mikro boyutta demir tozu parçacıkları ve aralarındaki yalıtım.....	26
Şekil 3.2. Bir elektrik stator çekirdeğinin SLM tekniği ile baskısı.....	29
Şekil 3.3. FDM, kaynaşık biriktirme modellemesi.....	30
Şekil 3.4. BJT ile Stator elektrik çekirdeği üretimi ve ısıl işlemin şeması.....	31
Şekil 4.1. Demir Tozu ve ABS Granül.....	34
Şekil 4.2. Ekstrüzyon öncesi %6 Demir Tozu karıştırılmış ABS granül.....	35
Şekil 4.3. Çift Vidalı Ekstrüzyon Makinası.....	35
Şekil 4.4. ABS ve Demir tozu karışımının homojen bir karışım elde etmek için çift vidalı ekstrüzyon makinası eritme-karıştırma besleme oluğuna bırakılması.....	36
Şekil 4.5. ABS ve Demir tozu karışımının birbirine kaynamış ve homojen olarak çift vidalı ısıtıcı bölümünden soğutucu havuza çıkışı.....	36
Şekil 4.6. Eriyik ABS ve Demir tozu karışımının şerit halde su dolu havuzda soğutulması.....	37
Şekil 4.7. Soğutulan şerit haldeki karışımın tekrar granül hale getirmek için kesim ünitesine girişi.....	37
Şekil 4.8. Karışımın kurutularak kesilmesi ve tekrar granül hale getirilerek bir kaptan toplanması.....	38
Şekil 4.9. %6-%10 oranlarda ayrı işlem ile üretilmiş granüller vakum poşetlerine alınarak nemden korunması.....	38

Şekil 4.10. Filamex FX-20 ekstruder makinesi ve Kısımları.....	39
Şekil 4.11. Besleme kısmı kontrol paneli, haznesi ve vidası.....	39
Şekil 4.12. Filamentin eriyik halde besleme kısmı nozulundan soğutma kısmına geçişi.....	40
Şekil 4.13. Çekme-Sarma kısmı.....	41
Şekil 4.14. Filamentin kabarcıklı ve prüzlü çıkışı.....	41
Şekil 4.15. 3B Baskıya hazır olarak elde edilmiş %6 demir tozu katkılı ABS filament.....	42
Şekil 4.16. Ferromanyetik malzeme mıknatıslanma eğrisi.....	42
Şekil 4.17. Ferromanyetik malzeme histeresiz eğrisi.....	43
Şekil 4.18. Toroid Nüve.....	45
Şekil 4.19. Ölçüm devresi.....	46
Şekil 4.20. 400V-50Hz / 115V-400Hz Statik Frekans Konvertörü.....	46
Şekil 4.21. 3B baskı cihazı ve %6Fe-ABS filament.....	48
Şekil 4.22. %6Fe-ABS Toroid 3B basımı.....	49
Şekil 4.23. 3B baskısı alınan %6Fe-ABS Toroid.....	49
Şekil 4.24. %6Fe-ABS Toroid ölçümleri.....	50
Şekil 4.25. %6 Fe-ABS Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri.....	51
Şekil 4.26. Örnek-1 filamentin 3B baskı anı ve PLA filament.....	52
Şekil 4.27. 3B baskısı alınan Örnek-1 Toroid.....	52
Şekil 4.28. Örnek-1 Toroid ölçümleri.....	53
Şekil 4.29. Örnek-1 Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri.....	54
Şekil 4.30. Örnek-2'den imal edilmiş toroid.....	55
Şekil 4.31. Örnek-2 Toroid ölçümleri.....	56
Şekil 4.32. Örnek-2 Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri.....	57
Şekil 4.33. Örnek-3 filamentin 3B baskı anı ve PLA filament.....	57
Şekil 4.34. 3B baskısı alınan Örnek-3 Toroid.....	58
Şekil 4.35. Örnek-3 Toroid ölçümleri.....	59
Şekil 4.36. Örnek-3 Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri.....	60
Şekil 5.1. Örnek-3 PLA Ansys Materyal verileri.....	67
Şekil 5.2. Stator Oluk Geometrisi.....	68
Şekil 5.3. Rotor Oluk Geometrisi.....	69
Şekil 5.4. Farklı Stator Uzunluğu(L) Değerine Göre Verimin Değişimi.....	70
Şekil 5.5. Farklı Stator Oluk Uzunluğu($Hs2$) Değerine Göre Verimin Değişimi.....	70
Şekil 5.6. Farklı Rotor Oluk Uzunluğu($Hs2$) Değerine Göre Verimin Değişimi.....	71

Şekil 5.7. Uygulanan Gerilim Değerine Göre Verimin Değişimi.....	72
Şekil 5.8. İletken Sipir Sayısı Değerine Göre Verimin Değişimi.....	72
Şekil 5.9. İletken Çapı Değerine Göre Verimin Değişimi.....	73
Şekil 5.10. Stator Dış Çapı Değerine Göre Verimin Değişimi.....	74
Şekil 5.11. Statorda Oluşan Anlık Manyetik Akı Hatları ve Yoğunluk Noktaları.....	74
Şekil 5.12. Güç, Tork ve Demir Kayıplarını Gösteren Grafik.....	75
Şekil 5.13. M270-35A Çeliği İçin Statorda Oluşan Anlık Manyetik Akı Hatları ve Yoğunluk Noktaları.....	76
Şekil 6.1. Statorun Ansys Tasarımı ve Solidworks'te Montaj Kulakçığı Eklenmiş Hali.....	78
Şekil 6.2. 3B Baskı İşlemi ve Basım Sonrası Elde Edilen Stator.....	79
Şekil 6.3. Rotorun Ansys Tasarımı ve Solidworks Görüntüsü.....	79
Şekil 6.4. 3B Baskı grid ayarı baskı şekli.....	80
Şekil 6.5. 3B Baskı İşlemi ve Basım Sonrası Elde Edilen Rotor.....	80
Şekil 6.6. Yataklama Elemanlarının 3B Baskı İşlemi.....	81
Şekil 6.7. 3B Basım Sonrası Elde Edilen Yataklama Elemanları ve Mil.....	81
Şekil 6.8. Stator Sarım Diyagramı.....	82
Şekil 6.9. Statora Yerleştirilmiş Sargılar.....	82
Şekil 6.10. Rotor kısadevre çubuk/halka modellemesi.....	83
Şekil 6.11. Rotora lehimlenmiş kısa devre çubuklar ve halkalar.....	83
Şekil 6.12. Motor Bileşenlerinin Solidworks'te Birleştirilmesi.....	84
Şekil 6.13. Prototip ASM'un Görünüşü.....	85
Şekil 7.1. Test Düzeneği.....	86
Şekil 7.2. Ölçüm Anı.....	86
Şekil 7.3. Kısa devre eşdeğer devresi.....	90
Şekil 7.4. Prototip ASM'un "T" Eşdeğer Devresi.....	91

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Yüksek frekansta kullanılan çekirdek malzemeleri.....	20
Tablo 2.2. Vacoflux 50 ve M270-35A çekirdek malzemelerinin elektriksel verileri.....	21
Tablo 3.1. SMC'lerin elektroteknik özelliklerinin karşılaştırılması.....	28
Tablo 4.1. %6Fe -ABS Toroid fiziksel özellikleri.....	50
Tablo 4.2. %6Fe-ABS Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar.....	51
Tablo 4.3. Örnek-1 Toroid fiziksel özellikleri.....	53
Tablo 4.4. Örnek-1 Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar.....	54
Tablo 4.5. Örnek-2 Toroid fiziksel özellikleri.....	55
Tablo 4.6. Örnek-2 Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar.....	56
Tablo 4.7. Örnek-3 Toroid fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 4.8. Örnek-3 Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar.....	59
Tablo 5.1. Temel Motor Parametreleri.....	66
Tablo 5.2. Farklı Stator Uzunluğu(L) Değerine Göre Motor Parametreleri.....	69
Tablo 5.3. Farklı Stator Oluk Uzunluğu($Hs2$) Değerine Göre Motor Parametreleri.....	70
Tablo 5.4. Farklı Rotor Oluk Uzunluğu($Hs2$) Değerine Göre Motor Parametreleri.....	71
Tablo 5.5. Uygulanan Gerilim Değerine Göre Motor Parametreleri.....	71
Tablo 5.6. İletken Sipir Sayısı Değerine Göre Motor Parametreleri.....	72
Tablo 5.7. İletken Çapı Değerine Göre Motor Parametreleri.....	73
Tablo 5.8. Stator Dış Çapı Değerine Göre Motor Parametreleri.....	73
Tablo 5.9. M270-35A Çeliği kullanıldığında elde edilen analiz değerleri.....	75
Tablo 5.10. M270-35A Çeliği ve Örnek-3 PLA karşılaştırması	76
Tablo 7.1. Boş çalışma Ölçümleri.....	87
Tablo 7.2. Kısa Devre Çalışma Ölçümleri.....	88
Tablo 7.3. 50Hz Kaynak Ölçümleri.....	89

1. GİRİŞ

Elektrik makinalarının üretiminde kullanılan geleneksel çelik laminasyonlar tipik olarak silikon, nikel, kobalt ve diğer katkı maddeleri ile alaşımlı demirden oluşur; istenilen stator ve rotor geometrisini oluşturmak için çelik laminasyonlar genellikle mekanik veya lazer kesim tekniği ile delinir; sonra kaynaklanarak ya da vidalanarak demir çekirdek oluşturulur. Mekanik etkilerle manyetik özelliklerde bozulma meydana gelebilmektedir bu nedenle, preslenmiş demir çekirdeğin manyetik özellikleri çok farklı olabilir. Preslenmiş demir çekirdeklerle ilgili bir diğer olumsuz durum, üretim süreciyle ilişkili malzemelerin israfıdır. Parçalı veya komple lamine çekirdekler için, laminasyonların kesilmesi ve delinmesinden kaynaklanan çelik atığı miktarı %50 ile %80 arasında değişebilmektedir[1]. Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle yeni tip malzemelerin elektrik makinalarında kullanımı artmıştır. Geleneksel elektrik makinalarında nüve malzemesi olarak çelik kullanıldığı için preslenmiş demir çekirdeklerin aksine SMC'lerden yapılan demir çekirdekler; demir parçacıklarına eklenen katkı maddeleri ile çeşitli 3B baskı teknikleri kullanılarak kolay şekil verilebilir ve istenen yapıda ucuz olarak üretilebilmektedir, ayrıca daha az mekanik işlem gerektirdiğinden perçin ve kaynak gibi mekanik işlem adımları gerekli olmamaktadır; böylelikle üretim aşamalarının kolaylaştırılarak ve maliyetin azaltılması hedeflenmektedir.

Yeni nesil elektrik makineleri yüksek verimlilik ve güç yoğunluğuna sahiptir, bunun yanında bir diğer önemli husus ağırlığın azaltılması, minimum malzeme atığı ve geri dönüştürülebilir özelliklere sahip makinelerin imalının olmasıdır. 3B baskı ile üretilebilen eklemeli üretim yeni nesil elektrik makinalarının gelişmesini kolaylaştıran, gelişmekte olan bir üretim teknolojisidir. Hammaddenin geri dönüşümü ve yeniden kullanılması yüksek maliyetli hammaddelerde maliyeti düşürmek kritik öneme sahiptir. Eklemeli üretimdeki son teknolojik gelişmeler bakır, seramik ve manyetik malzemeler dahil olmak üzere polimer PLA vb. çok çeşitli malzemelerin kullanılmasına izin vermektedir[1].

Günümüzde özellikle Asenkron motorlar; ekonomik olmaları, yüksek momente sahip olmaları, daha az bakıma ihtiyaç duymaları, sürücü teknolojileri ile devir sayılarının çok geniş aralıklarda ayarlanabilmesi, farklı faz sayılarında çalışacak şekilde üretilebilmeleri, çalışmaları sırasında elektrik arkı oluşturmamaları ve çok küçük güçlerden 3500 kW güce kadar üretilebilmeleri nedeniyle sanayide en fazla kullanılan motor türüdür. Sanayideki elektrik makinaları aracılığıyla gerçekleşen elektrik tüketiminin dünyadaki payı % 69, Türkiye'deki payı da yaklaşık % 70'dir[2].

Asenkron motor(ASM)'ların endüstriyel üretimde önemi çok büyük olduğundan bu çalışma ile eklemeli üretim tekniği kullanılarak ASM imali üzerinde durulacaktır. Yumuşak manyetik malzemeler için ekleme madde üretim çalışmalarında son zamanlarda artış olup; demir çekirdeklerin üretimine alternatif olması ve performansını arttırması için çalışmalar devam etmektedir. Bu tezde; gelecekteki elektrik makinelerinin tasarımları için yeni bir yaklaşım ve tasarım potansiyelini göstermek hedeflenmiştir. Farklı üreticilere ait Demir tozu katkılı PLA filamentler ve bu çalışma kapsamında ekstrüzyon ile imal edilmiş demir tozu eklemeli ABS filamentin; 3B FDM eklemeli üretim tekniği ile toroid baskısının yapılması, elde edilen toroidlerin manyetik analizinin yapılması ve uygun olabilecek bir filament örneği ile ASM tasarımı planlanmaktadır.

Ferromanyetik ve yalıtkan bir özellik göstermesi oldukça önemli bir avantaj olduğundan bobin telleri prensband kullanımına gerek kalmadan oluklara sarılabilecek[3], hafif elektrik makinaları üretilebilecek ve maliyet azaltılacaktır. Bu avantajların yanında uygulama zorluklarının minimuma indirilerek, optimum manyetik enerjiye sahip, düşük demir kayıplı, geleneksel üretim süreciyle ilişkili malzeme israfını, maliyetini ve hurda parçaları azaltabilecek sürdürülebilir bir ASM üretim teknolojisi hedeflenmektedir. Tasarlanacak ASM; maliyeti yüksek donanımlara sahip askeri/havacılık sistemlerinde kullanılan 400 Hz frekansa göre tasarlanıp analizi yapılacak olup elde edilecek sonuçlar, avantajlar ve dezavantajlar belirlenecektir.

Günümüzde, üretim araçlarının çeşitlenmesi, örneğin 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşması ve üretim çeşitliliğinin artmasının yanında yazıcı üretim boyutunun sınırlı olması, metal katkılı filamentlerin ferromanyetik özelliklerinin düşük ve gelişmeye açık olması çalışmaya belirli kısıtlamalar getirmiştir.[3]

Bu çalışmada sırasıyla ASM'ların tanıtımı, günümüzde kullanılan yüksek frekans motorlarının kullanım alanları ve tasarım teknolojisi ve çalışmamızın asıl amacı olan eklemeli üretim ile elde edilen filament malzemelerin analizi ve bu filamentlerden uygun olan ile ASM tasarımı amaçlanmaktadır. ASM tasarımında tasarım parametreleri belirlendikten sonra, Marmara Üniversitesinde lisanslı ANSYS® Maxwell yazılımının Rmxprt modülü ile modelleme yapılmış, performans ve verimi analiz edilmiştir. Demir tozu eklemeli ABS ekstrüzyonunda Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Polimer işleme ve test laboratuvarından ve filament haline getirilmesinde Filamex firmasının imkanlarından faydalanılmıştır. Toroidlerin 3B baskı işlemleri Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği laboratuvarlarında, sarım ve yüksek frekansta ölçüm ve manyetik analiz işlemleri ise Deniz Eğitim Öğretim Komutanlığı bağlısı Derince Eğitim Mrk. Makine Okul Komutanlığı bünyesindeki elektrik laboratuvarında yapılmıştır. Fiziksel olarak tasarımın gerçekleştirilebilmesi için analiz, prototip üretim ve test adımına geçilmiştir. ASM 3B baskı işlemleri yapıldıktan sonra, ölçüm ve testleri Derince Eğitim Mrk. Makine Okul Komutanlığı bünyesindeki elektrik laboratuvarında yapılmıştır.

Bu çalışma ile literatüre yenilikçi bir teknik getirilmek istenmiş ve demir dolgulu(eklemeli) PLA filament kullanılarak prototip üretimi yapılmıştır. Bu çalışma ile eklemeli üretim tekniği ile üretilmiş elektrik makinalarının tanınması, kullanılması ve akademik araştırmalara katkısı amaçlanmıştır. 3B yazıcılar ile farklı ferromanyetik materyallerle çeşitli yoğunluk/doluluk oranlarında stator elde edilebilir. Bu çalışmada; farklı firma üretimi ve farklı metal katkı yüzdelere sahip PLA ve ABS filamentlerin ferromanyetik özellikleri üzerinde çalışmalar yapılarak, Statorun 3B yazıcıda en verimli şekilde üretimi üzerinde çalışılmıştır.

1.1. Literatür Özeti

Thang Pham, Patrick Kwon ve Shanelle Foster makalelerinde eklemeli imalat uygulamaları, topoloji optimizasyonu ve bunların elektrik makinelerindeki manyetik bileşenlere entegrasyonu hakkındaki güncel araştırmaları ve eğilimleri ele almışlardır. Yumuşak manyetik malzemeler için, 3B baskılı parçaların mevcut performansı, geleneksel yöntemlerle üretilen parçalara yaklaşmaktadır. Kalıcı mıknatıslara gelince, eklemeli olarak üretilmiş bağlı NdFeB mıknatısların performansı, ticari muadillerinde görülen performansa benzer olup iyi termal performansa sahip baskı mıknatıslarının yanı sıra geri dönüştürülmüş malzemelerden mıknatıs filamenti üretme konusunda iyi sonuçlar alınmaktadır.[1]

M. Caner Aküner ve Tarık Aslan, 3B yazıcı desteği ile nüvesiz tip alternatör tasarlamışlardır, yapılan çalışmada standart bir 3 Boyutlu yazıcıyla çeşitli PLA filamentleri kullanılarak üretilebilecek bir yüzey mıknatıslı iç rotorlu SMSA(Sürekli mıknatıslı senkron makine) modellenmiş ve analiz edilmiştir. 3 boyutlu yazıcı destekli, statoru çelik dolgulu PLA olan, nüvesiz bir alternatör uygulaması amaçlanmıştır. Üretimin PLA ile olması, elektrik makinelerinde sıklıkla kullanılan ve silisli saç plakaların perçinleştirilmesi ile oluşturulan nüve ihtiyacını ortadan kaldırarak nüvesiz alternatör tasarım ve üretiminin geliştirilmeye açık olduğu görülmüştür. Çelik taneciklerinin PLA içindeki küçük tanecik boyutları nedeniyle Eddy akımlarını sıfıra yakın bir değere getirmekte, bu durum alternatörün verimini arttırmaktadır.[3]

Guo Y.G. ve Zhu J.G., Manyetik alanların üç boyutlu doğası, manyetik devre laminasyonunu ciddi bir dezavantaj haline getirdiğini ve Yumuşak manyetik kompozit malzemenin (SMC Soft magnetic composite), özellikle üç boyutlu manyetik alanlara sahip elektrik makineleri için uygun olan manyetik izotropi gibi bir dizi benzersiz özelliğe sahip olduğunu belirtmiştir. SMC stator çekirdekli 3 fazlı PM(Permanent Magnet) enine akılı motor, fırçasız bir DC sürücü ile test edilmiştir ve performansı, potansiyel olarak azaltılmış üretim maliyetiyle lamine çeliklere sahip benzer motorlarla karşılaştırılabilir özelliklere sahip olduğu görülmüştür.[4]

Abdurrazag Elaskri ve Alex Ellery, sadece tel bobinlerinin 3B olarak basılmadığı bir DC elektrik motoru üzerinde çalışmış; Radyal ve eksenel akılı DC elektrik motorlarının tüm parçaları 3B baskı teknikleriyle üretilip, işlevsellik, ucuz, ticari olarak temin edilebilen ekipman kullanılarak tamamen 3B baskılı bir motor elde etme potansiyelini göstermek istemişlerdir. Açık geometriye sahip kendinden uyarımlı DC motor endüktör kutuplarının çelik ve demir eklenmiş PLA ile üretimini karşılaştırmışlardır, ayrıca demir eklenmiş PLA ile kapalı geometriye sahip DC motor da üreterek, açık geometrili üretime göre kutup elektromanyetik kuvvetinin 8 kat daha fazla olduğunu görmüşlerdir. [5]

T.N. Lamichhane, L. Sethuraman, A. Dalagan, H. Wang, J. Keller ve M.P. Paranthaman makalelerinde elektrik makineleri için yumuşak manyetik malzemelerin basılabilirlik ve performans özelliklerindeki son teknoloji özetlenmiş ve tartışılmıştır. Elektrik makinalarının fiyat, basılabilirlik, ağırlık ve performans açısından yumuşak manyetik malzeme seçimi üzerinde çalışarak, büyük elektrik makinelerinin eklemeli üretiminin (AM Additive Manufacturing) mevcut durumunu, AM yöntemi seçim süreci, hibrit baskı teknolojilerinin fırsatlarını ve zorluklarını vurgulamışlardır.[6]

Abhishek Sarkar, Somashekara M.A., M.Paranthaman, Matthew Kramer, Christopher Haase ve Ikenna C. Nlebedim çalışmalarında, daha fazla işlem gerektirmeden baskı, anizotropik kalıcı mıknatısların hizalanması veya manyetik dolgu malzemelerinin manyetize edilmesini sağlamak için manyetik alan kaynaklarını 3 boyutlu baskı işlemine entegre etme işlemini ele almışlardır.[7]

Muhammad Usman Naseer, Ants Kallaste, Bilal Asad, Toomas Vaimann ve Anton Rassõlkin makalelerinde AM yapımı elektrikli makinelerin büyük ölçekli üretiminin etkinleştirilmesine yönelik mevcut gelişmeleri en iyi adapte edilebileceği bazı makine tiplerini ele almışlardır. Mevcut araştırmalar ve AM'nin elektrikli makinelerin imalatında kullanılmasının gelecekteki potansiyeli araştırılmaktadır. Yaygın çalışmalar, çabaların büyük ölçüde AM'in tek tek makine parçaları veya alt montajlar üretmek için kullanılacağını göstermektedir. Bu açıdan da çeşitli düzeylerde bir ilerleme gözlemlenmektedir. AM henüz büyük ölçekli üretim için geleneksel üretim tekniklerinin yerini alabilecek bir seviyeye ilerlememiştir. Gerçekte AM, geleneksel üretim tekniklerine göre çok çeşitli avantajlar sunar: Optimum malzeme kullanımı, Geliştirilmiş termal ve mekanik performansla sonuçlanan yapısal topoloji optimizasyonu, Karmaşık geometrik şekil gerçekleştirme yoluyla optimum elektromanyetik enerji, Boyut ve ağırlık azaltma, Malzeme bileşimi ve dolayısıyla fiziksel özellikleri üzerinde kontrol. AM, sunduğu olanaklarla geleneksel üretim tekniklerini tamamen değiştirme potansiyeline sahiptir; AM'nin tam potansiyeliyle kullanılmasıyla, kişiselleştirilmiş veya uygulamaya özel elektrik makinelerinin üretimi mümkün olacaktır. Bu makalede açıkça görülen ise General Electric (GE), Boeing ve Rolls Royce gibi birçok endüstrinin, araç çekişinden uydu ve havacılık amaçlarına kadar çeşitli uygulamalar ve yüksek performanslı parçalar üretmek için AM'yi halihazırda kullanıyor olmasıdır. Tüm bunlar, tamamen AM yapımı elektrik makinelerine yönelik araştırmaların geleceğini göstermektedir.[8]

Eklemeli üretim yöntemi ile elektrik makinalarının tasarımı ile ilgili literatür incelemesi yapıldığında birçok çalışmanın yapıldığı ve devam eden çalışmalar olduğu görülmüştür. Yapılan araştırmalarda; araştırmaların yabancı kaynaklar olup ülkemizde bu konu açısından yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Eklemeli üretim tekniği ile üretilmiş makinaların avantajlarına rağmen endüstride hakettiği ilgiyi görememiştir. Elektrik makinelerinde stator ve rotor üretiminin farklı tekniklerde 3B yazıcılar ile sağlanması, üretimi esnekleştireceğinden bu duruma uygun yeni stator ve rotor tasarımları geliştirilebilecektir. Özellikle ferromanyetik malzeme katkılı PLA veya ABS vb. filamentlerin farklı yoğunluk/doluluk, ferromanyetik ve dayanım özelliğini geliştirecek çalışmaların önünün açılacağı değerlendirilmektedir.

1.2. Tez Amacı ve Orijinal Katkı

Literatür araştırmalarına bakıldığında farklı tekniklerde eklemeli üretim ile yapılan elektrik makinaları denemelerinde genellikle sabit mıknatıslı senkron makinalar ve doğru akım makinaları üzerine çalışmalar olduğu görülmektedir. Eklemeli üretim teknikleri ile ASM üretimi denemelerinin çok fazla olmadığı ve kullanılan tekniğin de elektrik makinası geleneksel üretim tekniklerine benzer özellikler sunan SLM eklemeli üretim tekniği ile yapıldığı görülmektedir. Bu tezde; gelecekteki elektrik makinalarının tasarımları için yeni bir yaklaşım ve tasarım potansiyelini göstermek hedeflenmiştir. Demir/çelik tozu katkılı PLA ve ABS 3B baskı filamentinin FDM eklemeli üretim tekniği ile 3B baskısı yapılarak baskının yalıtkan, izole tanecikli yapı ve ferromanyetik bir özellik gösterme avantajından yararlanılarak prototip bir ASM üretimi amaçlanmaktadır.

Çalışma ile varılmak istenen hedefler;

- 400 Hz frekans çalışma gerilimi uygulanarak malzemenin izole tanecikli yapısından dolayı yüksek frekanslarda girdap(Eddy) kayıplarını daha aza indirmek.
- Tasarımı yüksek maliyetli havacılık ve silah sistemlerinde kullanım alanı olan 400 Hz frekanslı ASM'lerinin daha hafif, demir kayıplarının daha az ve düşük maliyetli olabilmesi için bir üretim tekniği geliştirmek.
- FDM eklemeli üretim tekniği ile demir tozu katkılı PLA filamentten üretilmiş bir prototip ASM'un 400Hz frekansta elektriksel ve mekaniksel verilerini gözlemlemek.
- Geleneksel lamine çelik üretime göre daha hızlı, esnek ve ucuz üretim yöntemi geliştirmek.
- PLA, ABS vb. polimer termoplastik filamentlerin ferromanyetik özelliklerinin geliştirilmeye açık olduğunu göstermek.

Tez; literatüre, uygulama zorluklarının minimuma indirildiği, optimum manyetik enerjiye sahip, hafif, düşük demir kayıplı, geleneksel üretim süreciyle ilişkili malzeme israfını, maliyetini ve hurda parçaları azaltabilecek sürdürülebilir yeni bir ASM üretim tekniği kazandırmayı hedeflemektedir.

Özellikle lamine çelik makinalarda yüksek frekansta girdap akımlarından dolayı oluşan demir kayıpları değeri arttığından PLA veya ABS filament ile üretim bu konuda avantaj ve esneklik sağlayacaktır. Eklemeli üretimde filament içindeki izole ve küçük demir tanecikler sayesinde girdap akımları sifıra yaklaşarak makinanın verimine olumlu katkı sağlaması ve yüksek frekanslı makinaların tasarımında önemli bir sorun haline gelen demir kayıplarını azaltmak hedeflenmektedir. Ayrıca stator ve rotorun 3 boyutlu bir yazıcıda basılması üretime yeni bir esneklik getirerek farklı tasarım geometrilerinin önünü açacaktır. Günümüzde 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşması ve üretim yelpazesinin genişlemesinin yanında sürekli mıknaş teknolojisinin gelişmesi ve üretim maliyetlerinin düşmesi elektrik makinalarının üretimi için bir fırsat oluşturmuştur. Fakat bazı sınırlamalar söz konusu olup 3B yazıcıların üretim boyutlarının sınırlı olması, çelik dolgulu PLA filamentinin ferromanyetik özelliklerinin gelişmeye açık olması bazı kısıtlamalar getirmektedir. Bu çalışmada, stator, rotor ve gövde üretimi tek parça halinde üç boyutlu yazıcı yardımı ile üretileceğinden, bu durum makinanın boyutunu 3B yazıcının baskı yüzey alanı ile kısıtlamaktadır. Ayrıca çalışmada bobin telleri, mil yatağı ve vidalar hariç diğer bütün parçalar; stator, rotor, gövde, PLA ve ABS ile basılması hedeflenmiştir. PLA malzemenin göstereceği ferromanyetik özellikler ile oluşturulacak tasarımların modellenmesi incelenecektir. Üretimde PLA kullanılması, elektrik makinalarında sıklıkla kullanılan ve silisli saç plakaların perçinlenmesi ile oluşturulan nüve ihtiyacını ortadan kaldırarak, nüvesiz makina tasarım ve üretimini mümkün hale getirir. Bu çalışmanın kabul görmesi durumunda; Çelik/demir dolgulu PLA ve ABS filamentlerin ferromanyetik özelliğini arttıracak çalışmalar yapılabilir, Stator ve rotor üretimin 3B yazıcı ile sağlanması, üretimi esnekleştireceğinden bu duruma uygun yeni stator ve rotor tasarımları geliştirilebilir.

2. GENEL BİLGİLER

Elektrik makinaları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek elektromekanik enerji dönüşümü yapan cihazlardır. Elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürüldüğünde elektrik motoru; mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürüldüğünde ise jeneratör ismini alırlar. Elektrik makinaları DC ve AC elektrik türüne göre çeşitli sınıflara ayrılır. AC elektrik türünde çalışan makinalardan olan asenkron makinalar motor ve jeneratör olarak çeşitli alanlarda kullanılmakta olup, motor olarak kullanımı endüstrinin tüm alanlarında geniş bir yer bulmaktadır. Asenkron motorlar, indüksiyon motoru olarak da bilinmektedir.

İlk defa Nikola Tesla tarafından 1888 yılında patenti alınmıştır. Motorun imalatı ise Westinghouse firmasında Nikola Tesla yönetiminde gerçekleştirilmiştir. Yapıldığı tarihten günümüze kadar teknolojiye gelişme nedeni ile aynı güç için ağırlığı ve fiyatı onda bire inmiştir[9].

Bir veya üç fazlı olarak üretilen asenkron motorlar yapı olarak sincap kafes(squirrel cage) rotorlu ve bilezikli sargılı(wound) rotorlu olmak üzere iki çeşidi vardır. Asenkron motorlar; dayanıklılığı, ucuzluğu, bakım masraflarının azlığı, bakım periyodlarının uzun olması ve gelişen güç elektroniği teknolojisi ile kontrolünün kolay yapılabilmesi sayesinde endüstrinin çeşitli alanlarında ve evlerdeki cihazlarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

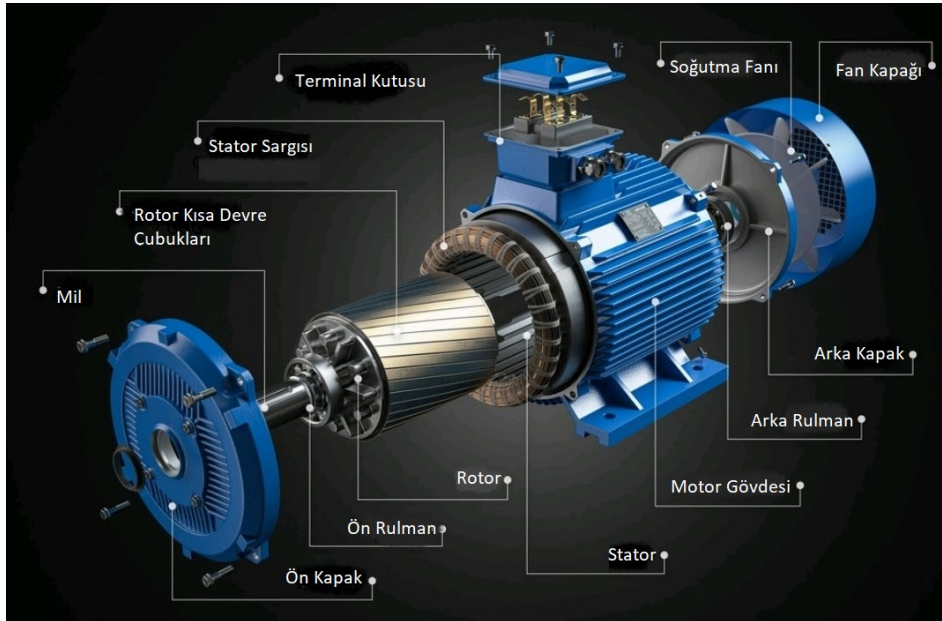
İcadından itibaren günümüze kadar teknolojiye gelişmeler ile birlikte aynı güç değeri için boyutları ve fiyatları oldukça düşmüştür. Bugün birkaç wattan 35 MW'a kadar güçlerde imal edilebilen asenkron motorların gerilim seviyeleri ise 110 V ile 27 kV arasında değişmektedir [10].

Asenkron motorların çalışması için bir AC kaynak gerilimine ihtiyaç vardır. Rotorun uyarılması için ikinci bir kaynağa gerek olmamaktadır. Bu sebepten asenkron motorlar tek uyarımlı motorlar olarak da sınıflandırılırlar [11].

2.1. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Yapısı

Asenkron motorlar yapı olarak temelde durağan kısım olan stator ve hareketli kısım olan rotordan meydana gelir. Stator ve rotor dışında; gövde, kapaklar, mil, rulmanlar, pervane ve bağlantı terminali diğer elemanlardır. Rotor mili ön ve arka rulmanlar vasıtasıyla ön ve arka kapaklara yataklanarak montajı yapılır. Rotor ve stator arasında hava aralığı bulunmakta olup rotorun burada dönmesi sağlanır. Gövde arka kapak üzerinde pervane bulunmakta olup motorun soğumasını sağlamaktadır. Çekilen yük akımı stator sargılarından geçtiğinden dolayı soğutma amacıyla etkin bir ısı transferi yapılabilmesi için gövde dış çevresi kanallı bir şekilde yapılmaktadır.

Motor yapısı Şekil 2.1.'de görülmektedir[12].



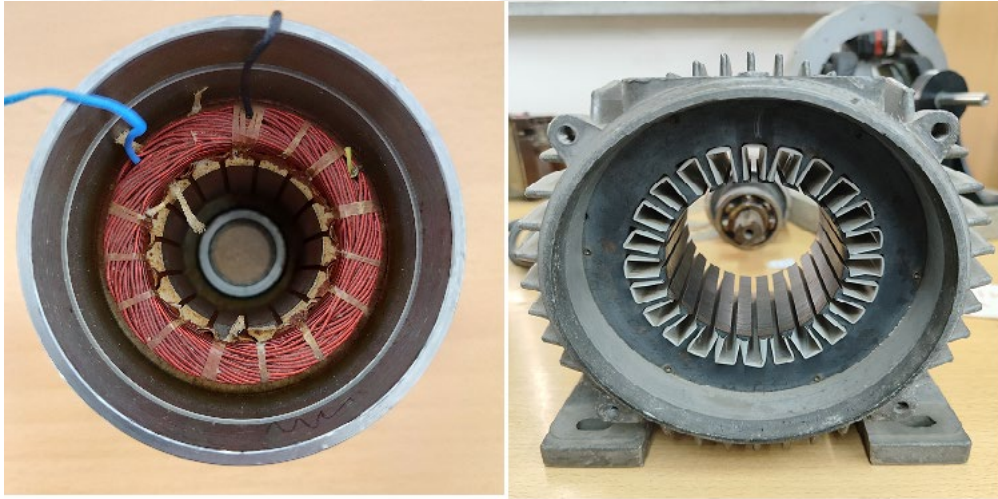
Şekil 2.1. Sincap kafesli asenkron motorun yapısı.

2.1.1. Stator

Asenkron motorun durağan kısmı olup, alternatif akım uygulandığında döner manyetik alanın meydana geldiği sargıların bulunduğu kısımdır. Statora üç fazlı gerilim uygulandığında oluşan bu değişken alan sayesinde rotorun dönmesi sağlanır. Standart asenkron motor statoru, silisyum alaşımlı sacların özel preslerde kesilerek bir araya getirilip preslenmesiyle sac paketi olarak imal edilir. Statorun preslenmiş sac paketi olarak yapılmasının sebebi alternatif akımdan dolayı oluşan değişken manyetik alanın stator üzerinde demir kayıpları oluşturarak ısınmaların ve kayıpların önüne geçmek içindir.

Demir kayıplarının azaltılması için statorda geçirgenliği yüksek ve histeresiz kayıpları küçük olan sacların kullanılması gerekir. Fuko(girdap) kayıplarını da azaltmak gereklidir. Bunun için kullanılan sacların 0,3–0,5 mm kalınlığında silisyum alaşımlı, kilogram başına histeresiz ve fuko kaybı (W/kg) düşük ve geçirgenlik değeri yüksek olması gerekir[13].

Stator sargıları; preslenmiş sac paket üzerinde kesim sırasında açılmış oluklara yerleştirilerek bağlantıları yapılır. Şekil 2.2.'de stator lamine sac paket ve sargıların yerleştirilmesi görülmektedir.



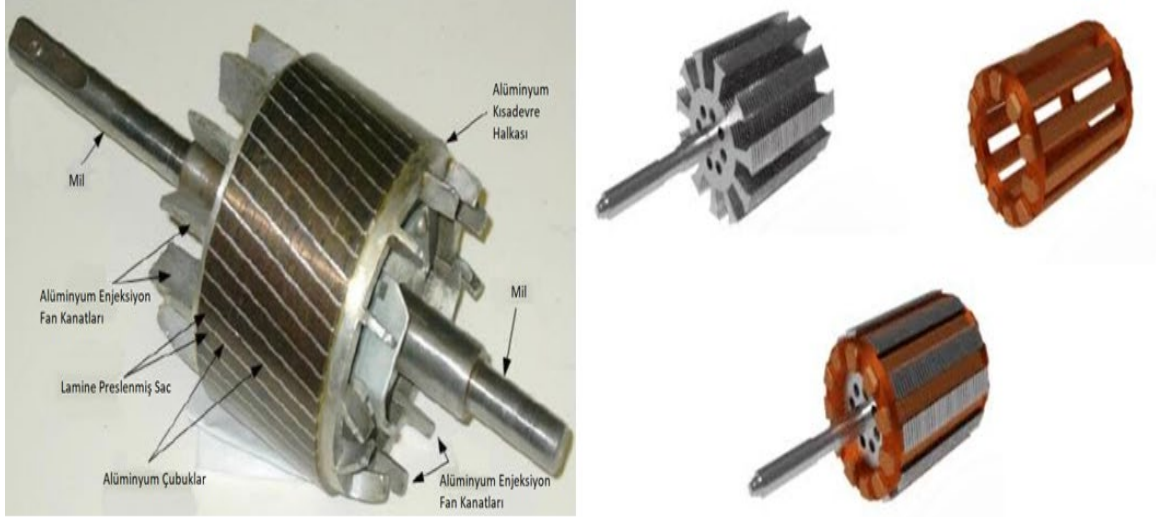
Şekil 2.2. Lamine sac paket ve sargıların yerleşimi

2.1.2. Rotor

Asenkron motorun statorunda meydana gelen döner manyetik alan etkisiyle rotor kısa devre çubuklarında bir akım akışı olur ve dönme hareketinin meydana gelir. Rotor kısmı da stator gibi demir kayıplarını azaltmak için preslenmiş sac paketten yapılmış olup, oluklar arasına eriyik alüminyum enjeksiyon uygulanarak ya da tasarıma göre bakır çubuklar eklenerek sincap kafes çubukları ve kısa devre halkası oluşturulur.

Rotorun iki tarafında rotor çubuklarını kısa devre eden halkalarda alüminyum döküm yapılırken meydana getirilen küçük kanatçıklar, pervane görevi görerek motorun soğumasını sağlar[14].

Alüminyum ve bakır kısa devre çubuk ve halkalarına sahip rotor yapısı Şekil 2.3.'te görülmektedir[15][16].

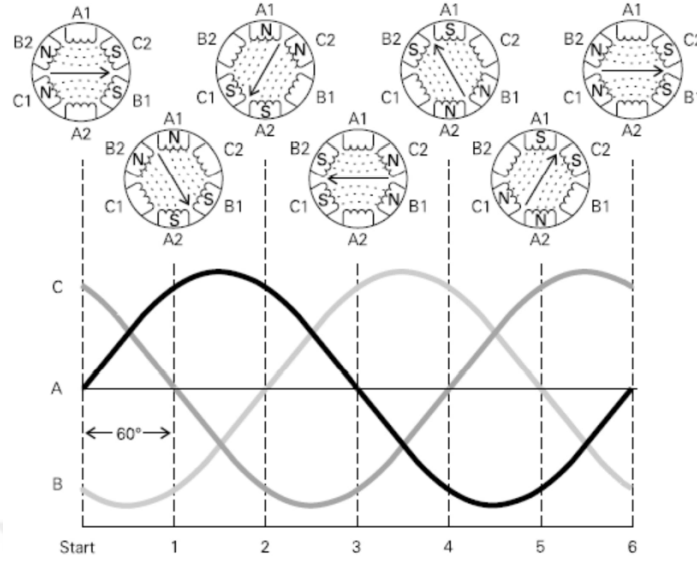


Şekil 2.3. Alüminyum ve bakır kısa devre çubuk rotor yapısı

2.2. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi

Üç fazlı asenkron motorun stator sargıları arasında 120° elektriksel faz farkı bulunmaktadır. Elektriksel 120° faz farklı alternatif gerilimin uygulanmasıyla üç fazlı asenkron motorun stator sargılarında manyetik alan meydana gelir. Stator ve rotor arasındaki hava aralığından geçen manyetik akının etkisiyle rotor üzerinde bulunan kısa devre çubuklarında akım akışı oluşur ve rotor kısa devre çubukları üzerinde oluşan manyetik alan döndürme kuvveti meydana getirir. Bu döndürme kuvvetinin etkisiyle rotor döner manyetik alan yönünde senkron hıza yakın bir hızda döner. Rotor hızı senkron hıza göre daha azdır.

Üç fazlı döner alan oluşumu Şekil 2.4.'te verilmiştir[17]. Stator sargılarına uygulanan alternatif akımlar, N-S kutuplarını oluştururlar.



Şekil 2.4. Üç fazlı döner alan oluşumu

Şekil 2.4. incelendiğinde;

Sinüs eğrisi start anında A ve C fazı pozitif (+), B fazı ise negatif (-) alternanstadır.

Eğrinin 1 anında A ve C fazlarının akım yönü giriş, B fazının akım yönü çıkıştır.

Eğrinin 2 anında A fazının akım yönü giriş, B ve C fazının akım yönü çıkıştır.

Eğrinin 3 anında A ve B fazı akım yönü giriş, C fazının akım yönü çıkıştır.

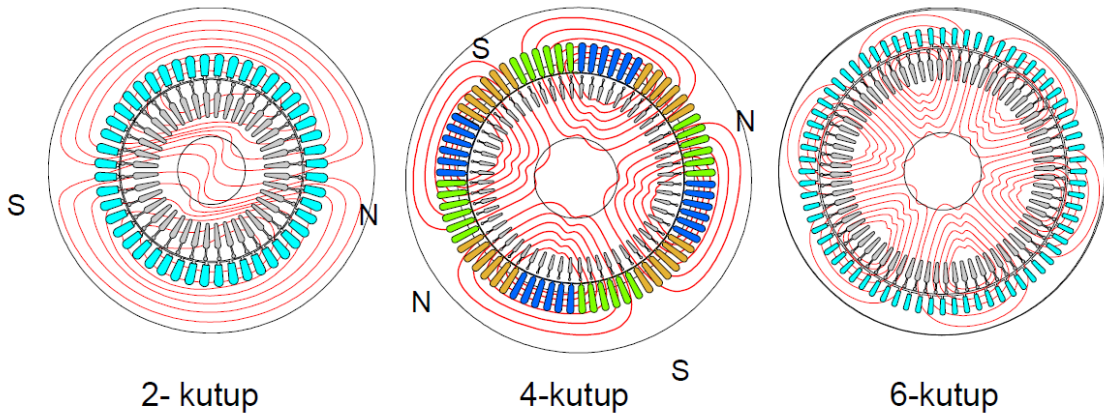
Eğrinin 4 anında A ve C fazı akım yönü çıkış, B fazının giriştir.

Eğrinin 5 anında A fazının akım yönü çıkış, B ve C fazının giriştir.

Eğrinin 6 anında ise A ve B fazının akım yönü çıkış, C fazının giriştir.

Böylece her harekette saat ibresi yönünde 60° lik, toplamda 360° lik bir dönüş meydana gelir.

Asenkron motorlarda devir sayısı statora sarılan sargının kutup sayısına ve şebeke geriliminin frekansına bağlıdır. Şekil 2.5.'te 2, 4 ve 6 kutuplu motorların kutup çifti oluşumları gösterilmiştir[17].



Şekil 2.5. 2, 4 ve 6 kutuplu motorlarda kutupların oluşumu

Döner alan senkron hız (n_s) formülü, eşitlik (2.1)'de devir/dakika cinsinden verilmiştir.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

Burada f şebeke frekansı, p ise (N-S) kutup çifti sayısıdır.

Günümüzde güç elektroniği alanındaki önemli gelişmeler ile invertörlerinin kullanımı artmış olup frekans kontrolü kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu gelişmeler sayesinde inverterlerde V/f oranını sabit tutarak veya vektör kontrol modu ile asenkron motorlarda devir sayısı ayarı kolaylıkla yapılabilmektedir.

Asenkron motorların önemli özelliklerinden biri de rotor hızının döner alan hızından geride olmasıdır. Rotor senkron hızdan belli bir miktarda az devir sayısı ile döner. Senkron devir ve rotor devir arasındaki devir sayısı farkına kayma (S) adı verilmektedir ve eşitlik (2.2) ile hesaplanır.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.2)$$

2.3. Asenkron Motorlarda Kayıplar ve Verim Sınıfları

Asenkron makinelerde kayıplar, boş çalışma kayıpları ve yükte çalışma kayıpları olmak üzere ikiye ayrılır. Boş çalışma kayıpları demir ve sürtünme kayıplarından oluşur. Yükte çalışma kayıpları ise stator ve rotor sargılarındaki iletken kayıpları ve yüke bağlı değişen ek kayıplardır.

Asenkron makinede verim, küçük güçlü bir fazlı makinelerde %54-80, üç fazlı makinelerde ise %80-98 arasında değişir. Güç büyüdükçe verim de artar. Joule kayıpları, makinede oluşan toplam kayıpların yaklaşık olarak %60-65'ini kapsar. Diğer büyük pay sahibi %25-30 ile demir kayıplarıdır. Bu kayıpların, makinenin sabit gerilimle baslenmesinden dolayı yükte ve boşta değişmediği kabul edilir ve sabit bir değer olarak alınır. Geri kalan sürtünme ve ventilasyon kayıpları ise, yaklaşık olarak rotor hızının karesi ile değişir. Fakat asenkron makinelerde hız %3-5 civarında değiştiğinden, toplam kayıpların %1-1,5'i kadar olan sürtünme ve ventilasyon kayıplarının, yükte ve boşta değişmediği ve sabit kaldığı kabul edilir[13].

Elektrik makinalarında endüksiyon ile akım yoğunluğunun sabit kaldığı ve toplam iletken kesitinin lineer boyutlarla karesel büyüdüğü kabul edildiğinde manyetik akı ile sargı amper sarımı, yani MMK de aynı şekilde karesel büyüyecektir. Makinanın gücü MMK ve manyetik akı çarpımı ile orantılı olduğundan, lineer boyutlar makine anma gücünün dördüncü kare kökü ile orantılı büyürler. Asenkron makinanın ağırlığı, lineer boyutların üçüncü kuvveti, dolayısıyla anma gücünün 3/4 üncü kuvveti ile büyür. Sabit akım yoğunluğu ve sabit endüksiyonda kayıplar makinanın ağırlığı ile orantılı olacaktır.[18]

Günümüzde IEC 60034-30 standardında belirtilen sınıflandırmada 0,75 kW ile 375 kW arasındaki elektrik motorları için 4 temel verimlilik sınıfı belirlenmiştir:

- IE1 - Standart Verimlilik
- IE2 - Yüksek Verimlilik
- IE3 - Premium Verimlilik
- IE4 - Süper Premium Verimlilik

Motorun tasarım ve üretim aşamasında kullanılabilecek farklı teknikler sayesinde motor verimi arttırılabilir ve böylece motor verim sınıfı yükseltilebilir. Motor veriminin arttırmak için ise, motor kayıpları olabildiğince azaltılmalıdır. Kayıpları azaltmak için, tasarım ve üretim aşamasında kullanılan tekniklerde amaç sadece motor verimini yükseltmek değil, aynı zamanda motor performansını etkileyen akım, moment, güç faktörü vb. parametreleri de dikkate alarak, optimum yöntemi elde etmektir. Ayrıca kullanılan yöntemlerin maliyetleri de yöntemin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Yapılan geliştirme çalışmalarındaki asıl amaç minimum üretici maliyeti ile verimi yükseltilmiş bir motor ortaya çıkarabilmektir. Motor verimini arttırmada sıklıkla kullanılan tekniklerden bazıları aşağıda verilmiştir [19]:

- Sargılarda %20-60 oranında daha fazla bakır kullanımı.
- Gövdede daha fazla çelik kullanımı.
- Daha ince çelik laminasyonların tercih edilmesi.
- Yüksek kalitede elektriksel çelik tercih edilmesi.
- Rotor oluk iletkeni olarak bakırın kullanımı.
- Daha verimli stator ve rotor oluklarının tasarlanması.
- Stator ve rotor arasındaki hava aralığının optimum seviyede tutulması.
- Nüve boyunun uzatılması.
- Sürtünme kayıpları azaltılmış rulman ve yağ kullanımı.
- Isıl şoklama yapılması.

2.4. Yüksek Frekans için İmal Edilmiş Asenkron Motorlar

Günümüzde yüksek hızlı elektrikli makineleri yüksek devire ihtiyaç duyulan ve aynı zamanda hafiflik ve hacim küçülmesinin istendiği uygulama türlerinde kullanılmaktadır. Sarım sayısı N olan bir bobin, $\emptyset$ weber değerinde olan ve değeri zamana göre değişen bir manyetik alan içine sokulduğunda,

$$e = - N \cdot \frac{d\emptyset}{dt} \quad (2.3)$$

eşitlik (2.3)'e göre bir (e) gerilimi indüklenir. Bu gerilime elektro-motor kuvveti denir ve kısaca EMK şeklinde gösterilir. İşaretin negatif oluşu bu EMK nin devresinden geçireceği akımın kendisini meydana getiren harekete karşı koyacak yönde bir etki yaratacağını ifade eder. Burada denklem (2.3)'e göre daha yüksek frekanslı bir $\emptyset$ manyetik alanında aynı EMK'ni elde edebilmek için daha az (N) sarım sayısı yeterli olacaktır bu da motor hacmi ve ağırlığının önemli oranda azalabileceğini bize göstermektedir.

Frekansın kayıplar ve makine boyutuyla ilişkisi şuradan daha iyi anlaşılabilir[6]:

Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına göre yumuşak bir manyetik malzemede indüklenen EMK eşitlik (2.4)'e göre hesaplanabilir,

μ (geçirgenlik), N (sarım siper sayısı), A (sarım iletken kesiti), l (çekirdek uzunluğu), I_0 (sinyal genliği) ve ω (açısal sinyal frekansı)

$$V = -\frac{\mu N^2 A}{l} I_0 \omega \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

Maksimum indüksiyon durumunda ($\cos(\omega t) = 1$) belirli bir geçirgenliğe sahip malzeme için eşitlik (2.5)' te verildiği gibi makina boyutu frekansla ters orantılıdır;

$$A_{makina} \propto \frac{1}{\omega} \quad (2.5)$$

Bu nedenle, daha yüksek güç değerlerinde daha küçük makinelerin imal edilebilmesi için yüksek frekansta yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler tercih edilir[6].

Hız açısından bakıldığında aynı sayıda kutup çifti göz önüne alınırsa, 400Hz'lik bir asenkron motordan, 50Hz motora göre sekiz kat daha yüksek rotor hızı elde edilebilmektedir.

400 Hz güç hattı kullanmanın avantajlarını sıralarsak, [20]

- Transformatör ve doğrultucu DC güç uygulamalarına dönüşümde, filtreleme çok daha küçük ve daha ucuz bileşenlerle gerçekleştirilebilir ve daha düzgün bir doğru gerilim elde edilebilir.
- Standart 60 Hz'e kıyasla önemli ağırlık ve boyut tasarrufuyla eşdeğer güçlere ulaşılabilmektedir.
- 400 Hz güç sistemleri 60 Hz'den 6 kata kadar daha hızlı yanıt verebilir. Lineer diferansiyel transformatörlerin ve servo tork motorlarının konum doğruluğu da 400 Hz'de çok daha iyi sonuç verir.
- Tork daha yüksektir ve hızlanma daha iyidir.
- 60 Hz'e göre daha az elektriksel gürültü bulunmaktadır.
- Envanter kontrolü daha kolaydır çünkü 60 Hz şebeke elektriğinde kullanılamayan bu parçaların başka bir alanda kullanıma alınması pek mümkün değildir.

2.4.1. Yüksek Frekanslı Asenkron Motorlarının Kullanım Alanları

Günümüz pazarında esas olarak iki tür yüksek hızlı makine bulunmaktadır: Yüksek hızlı asenkron makineler ve kalıcı mıknatıslı yüksek hızlı senkron makineler. Bununla birlikte, pençe kutuplu senkron, senkron relüktans ve anahtarlamalı relüktans yüksek hızlı makinelere ilişkin araştırmalar da yapılmaktadır[21].

Özel amaçlar için 100, 200, 400 Hz gibi çeşitli frekanslar için yüksek devirli ASM'lar üretilmektedir, özellikle 400 Hz güç; havacılık elektroniği, harp gemileri, silah sistemleri, cnc tezgahları ve bakım tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı asenkron motorlar; yüksek devir, tepki hassasiyeti, motor ağırlığı ve ebatlarının azalması gibi avantajlarından dolayı yön belirlemede kullanılan cayro sistemlerinde, havacılıkta yüksek hız gerektiren fan, gaz kompresörleri, gaz türbinleri, pompa ve hareket kontrol amacıyla yaygın kullanım alanı bulunmaktadır.

Yüksek frekanslı asenkron motorlar rüzgar tünellerinde uçak modellerini kontrol etmek için de kullanılmaktadır[22].



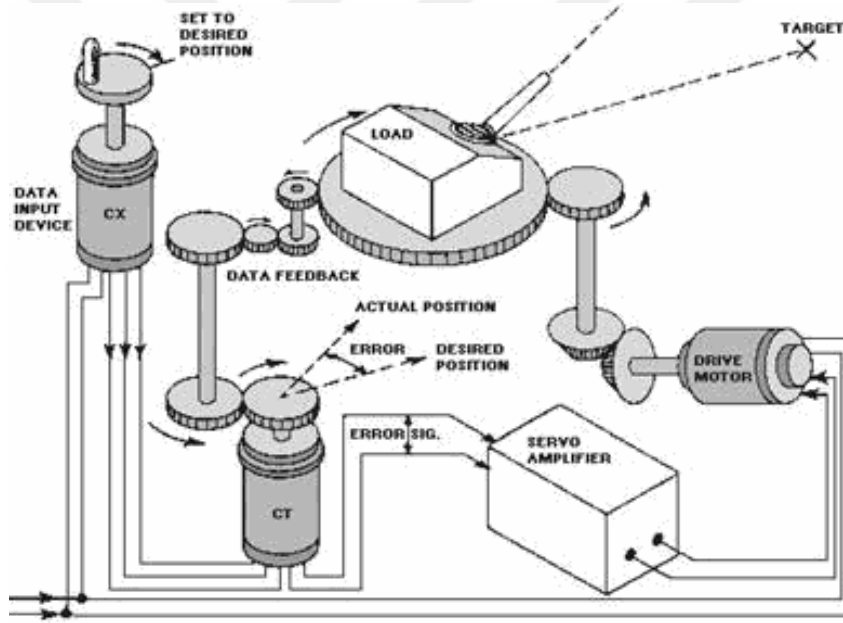
Şekil 2.6. Havacılıkta kullanılan yüksek frekanslı asenkron motor örnekleri



Şekil 2.7. Gemi cayro sistemlerinde kullanılan dış rotorlu 333 Hz asenkron motoru

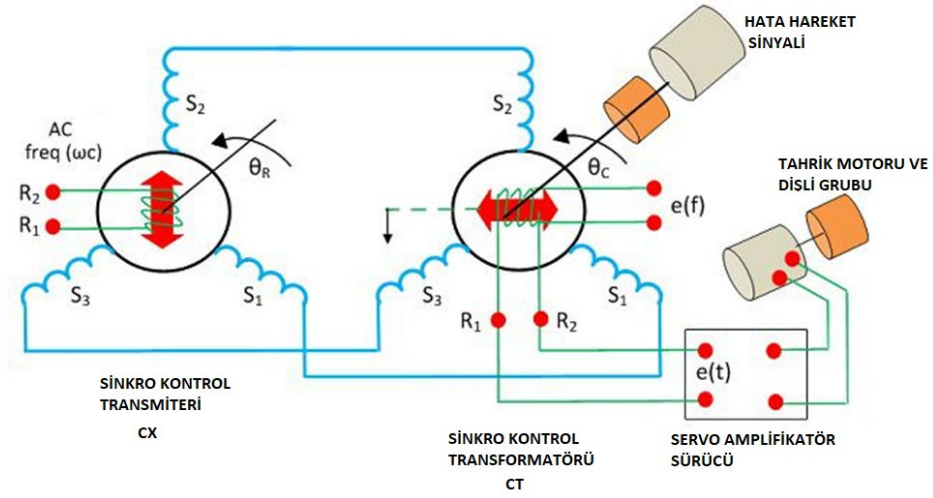
Şekil 2.6.'da Havacılıkta kullanılan yüksek frekanslı asenkron motor örnekleri[23] ve Şekil 2.7.'de Gemi cayro sistemlerinde kullanılan 2 kutuplu 20000d/d, statoru 18 oluk, rotoru 43 oluk olan 115V 333 Hz dış rotorlu yüksek frekans asenkron motoru görülmektedir.

Hareket kontrol amacıyla bir milin momentini başka bir yerde bulunan bir mile elektriksel olarak iletmekte bir tür asenkron makine olan sinkrolar kullanılmaktadır. Sinkrolar özellikle 400 Hz gibi yüksek frekanslarda sıklıkla kullanılan bir asenkron makina türüdür. Sinkrolarda üç fazlı stator sargıları S1-S2-S3 olarak adlandırılır ve yıldız bağlanır, rotorlarında ise R1-R2 bir fazlı sargı bulunmakta olup bu sargıya slip ringler ile alternatif gerilim uygulanır. Rotorun konumuna göre stator sargılarında bir gerilim indüklenir ve hareket elektriksel sinyale çevrilmiş olur, bu sinyal kontrol transformatör ve amplifayer ile uzaktaki yüksek moment ve güç gerektiren bir harekete çevirilmekte kullanılır. Bu sistemler genellikle Şekil 2.8.'de gösterildiği gibi anten veya top namlusunu yönlendirmekte kullanılır[24].



Şekil 2.8. Sinkro sistemleri ile bir top namlusunun pozisyon kontrolü

Sinkrolar, yapılış bakımından, dönme hareketi yapan rotorunda bir faz sargısı olan, statorunda ise üç fazlı sargı bulunan bir asenkron makinadır. Güçleri birkaç watt'tan birkaç yüz watt'a kadar değişir. Sinkrolar bir dönme hareketini elektrik gerilimine dönüştürmeye ya da bir milin M_1 momentini uzakta bulunan bir mile M_2 momenti olarak elektriksel iletmeye yarar. Özellikle otomatik kontrol sistemlerinde hata büyüklüğünün ölçülmesi amacı ile kullanılır[22]. Sinkro hata ölçümü Şekil 2.9.'da verilmiştir[25].



Şekil 2.9. Sinkro sistemleri ile hata büyüklüğünün ölçülmesi.

Bir sinkronun daha yüksek bir frekansta çalıştırılması aynı zamanda fiziksel olarak daha küçük yapılmasına da olanak tanır. Bunun nedeni, 400 Hz'lik uyarma voltajı tarafından üretilen akı hatlarının, 60 Hz'lik uyarma voltajı tarafından üretilenlerden çok daha yoğun olmasıdır. Dolayısıyla Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi; 400 Hz'lik sinkro 60 Hz'lik sinkrodan daha küçük yapılabilir.



Şekil 2.10. 115V 400Hz Sinkro Motor

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan en yaygın yüksek hızlı makineler, lamine ve katı(solid) rotorlu (tek tip ferromanyetikten malzemenin tek parça yapılmış) endüksiyon motorlarıdır. Yüksek hızlı ASM rotoru, yüksek dönme hızlarında merkezkaç kuvvetlerinden kaynaklanan büyük stresi karşılayabilecek kadar sağlam olmalıdır. Sağlamlığa ek olarak, rotorda üretilen ısının azaltılması zor olduğundan, rotorun elektriksel olarak düşük kayıplı olması gerekir. Bu da yüksek hızlı ASM lerin tasarımında termal analizin önemini gösterir. Her türlü elektrikli makinede olduğu gibi yüksek hızlı ASM’lerde kapasite limitini soğutma belirler[26].

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı sebebiyle endüstride kullanılan motorların güç yoğunlukları büyük önem kazanmıştır. Yüksek hızlı asenkron motorlar; yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları, küçük kurulum alanı kaplamaları ve dişli çarklara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaları sebebiyle bu ihtiyaca uygun bir şekilde yanıt vermektedirler. Asenkron motorlar basit bir yapıya sahip olmaları, maliyetlerinin ucuz olması ve bakım masraflarının az olması sebebiyle piyasada büyük ölçüde tercih edilmektedir. Kütlesel katı rotor yapısı ise yüksek hız uygulamalarında artan merkezkaç kuvvetine dayanıklı olmaları sebebiyle yüksek hızlı asenkron motor uygulamalarında özellikle tercih edilmektedir[27].

Katı rotorlu ASM yüksek mekanik bütünlük ve dayanıklılık olarak yüksek hız uygulamalarında tüm rotor tipleri arasında en çok tercih edilenidir[21]. Öne çıkan özellikleri;

- Yüksek termal dayanıklılık.
- Kimyasallara karşı korunması kolaydır.
- Yüksek güvenilirlik.
- Yapısı basit, üretimi kolay ve ucuz.
- Geniş güç ve hız aralıklarında üretilebilir.
- Düşük seviyede gürültü ve titreşim (pürüzsüz yüzey varsa)

2.4.2. Yüksek Frekanslı Asenkron Motorlarda Tasarım Teknolojisi

Yüksek hızlı ASM tasarımında göz önünde bulundurması gereken en önemli unsurlar yüksek sürtünme ve demir kayıplarıdır. Yüksek hızlı makinelerde rotor çapı ve uzunluğu tasarımda sınırlayıcı bir etkidir. Rotor çapı seçimi, malzemenin mukavemeti ve dönme hızı ile sınırlıdır, doğru rotor çapı seçimi ile yüksek dönüş hızı nedeniyle oluşan stres kabul edilebilir sınırlar içinde kalmış olur.

P aktif veya S görünen gücünü verebilecek bir makinenin hesabının yapılması gerektiği zaman, B manyetik akı yoğunluğunun, ac çevre akım yoğunluğunun ve D^2L hacim şeklinin uygun değerlerde seçilmesi ile işe başlanır. Bu değerlerin uygunluğu tecrübeye ve daha önce imal edilmiş makineler üzerinde yapılan testlerden elde edilen sonuçlara bağlıdır. D^2L çarpımının bulunması için güç faktörü ile verimin önceden tahmin yolu ile belirlenmesi gerekir[28].

Asenkron motorun kullanıcı tarafından istenilen güç, moment ve verimi sağlayacak olan çalışma noktalarının elde edilebilmesi için ise motor tasarlanırken, motorun stator ve rotor oluk geometrileri, stator ve rotor iç-dış çap uzunlukları, hava aralığı uzunluğu vb değerlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir[29].

Asenkron motorun stator oluk geometrisi tasarlanırken oluk yüksekliği ve oluk üst genişliği arasında belli bir oran vardır. Bu oran çerçevesinde tasarım yapıldığı takdirde motordan daha iyi performans alınabilir. Düşük güçlü motorlar için bu oranın 0.6 ile 2.6 arasında olması istenir [30].

Genellikle doymaların önüne geçebilmek için oluk kenarları birbirlerine paralel olarak yapılmaya çalışılmaktadır. Ayrıca endüstride son zamanlarda tasarlanan motorların stator ve rotor dış genişliklerinin oluk genişliği kadar yapıldığı ve stator boyunduruk yüksekliğinin düşürüldüğü, buna mukabil rotor boyunduruk yüksekliğinin artırıldığı görülmektedir[31].

Stator oluk yüksekliği artırıldıkça stator ve rotor kaçak reaktans değerlerinin arttığı, direnç değerlerinin ise oluk alanına bağlı olarak azaldığı ve manyetik alan dağılımlarında simetrinin bozulduğu görülmektedir. Bu yüzden oluk yüksekliği belirlenirken birçok önemli noktanın kontrolü yapılarak optimum yükseklik değeri seçilmelidir.[32]

Yüksek hızlı makinelerde eddy(girdap) akımı kaybı, frekansın yüksek olmasından dolayı baskın hale geldiğinden ince laminasyonlar tercih edilir. Belirli bir frekans ve akı yoğunluğu için demir kayıpları öncelikle laminasyon kalınlığından ve tavlama yönteminden etkilenir. Genel olarak laminasyonlar ne kadar ince olursa demir kayıpları o kadar düşük olur. Yüksek frekanslı uygulamalar için özel olarak tasarlanmış, çok düşük çekirdek kayıplarına sahip 0,1 mm kadar ince elektriksel lamine çelikler ticari olarak mevcuttur.

Steinmetz, demir kayıpları üzerinde yaptığı araştırmalar sonunda demir kayıplarının Histerezis ve Fuko kayıplarının toplamından meydana geldiğini ortaya koymuştur[13].

$$P_{fe} = P_h + P_e \quad (2.5)$$

Akı değerinin demir ve çelik gibi manyetik malzeme içinde değişmesi halinde Histeresiz ve fuko kayıpları olarak nitelendirilen iki cins demir kaybı meydana gelir. Histeresiz kayıpları malzemenin moleküler yapısından, Fuko kayıpları malzemenin bünyesinden meydana gelen endüksiyon akımlarından ileri gelmektedir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre levha şeklindeki malzeme ve sinüsoidal olarak değişen alternatif akımlarda histeresiz ve fuko kayıpları sırası ile eşitlik 2.6 ve 2.7’de verilmiştir.

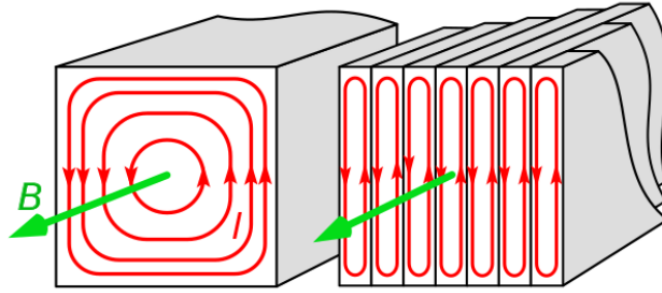
$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^X \quad \text{W/kg} \quad (2.6)$$

$$P_e = k_e \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad \text{W/kg} \quad (2.7)$$

formülleri ile hesaplanır. Burada B_m maksimum akı yoğunluğudur. k_h ve k_e faktörleri malzemenin manyetik bakımından özelliğine , moleküler yapısına ve elektriksel direncine bağlı bulunmaktadır.

Histeresiz kayıp formülünde X üssü 1,5 ile 2,5 arasında değişir. Genellikle $x=2$ alınarak formülün son terimi B_m^2 şekline girer. Malzemenin t kalınlığı ve frekans, fuko kayıplarında önemli miktarda arttırıcı bir rol oynarlar. Malzeme t kalınlığını azaltmak için masif malzeme yerine birbirinden izole edilmiş ince sac levhalar kullanılır[31].

Şekil 2.11’de görüldüğü gibi lamine çekirdeklerdeki girdap akımları katı çekirdeklerdeki akımlardan daha küçüktür[33].



Şekil 2.11. Katı ve Lamine çekirdeklerde girdap akımları

Demir; %4-5 silisyum içermesi halinde yüksek bir manyetik geçirgenlik kazanır ve histeresiz kayıpları azalır[A7]. Düşük karbonlu çeliğe %0.5 ile % 3.25 arası oranlarda silikon eklenirse çeliğin direnci artar böylece girdap(eddy) akım kayıpları azalır[34].

Yüz yılı aşkın bir süre önce Steinmetz tarafından ilk formülasyonunun yapılmasından bu yana ferromanyetik malzemelerdeki güç kayıpları modeli sürekli olarak araştırılmaktadır. Geleneksel modellere göre, genellikle “klasik” kayıp olarak adlandırılan girdap akımı kaybı faktörü denklem (2.8) ile hesaplanan sabit bir değer katsayısı ile hesaplanabilir:

$$k_e = \frac{\pi^2 \sigma \delta^2}{6 \rho_v} \quad (2.8)$$

elektriksel iletkenliğe σ , laminasyon kalınlığına δ ve hacimsel kütle yoğunluğuna ρ_v dayanmaktadır. Histerezis kayıpları ise yalnızca temel frekans (f) ve akı yoğunluğunun (B) dalga formunun tepe değerine bağlıdır ve bu nedenle yüksek harmonik etkisi yoktur[35].

Yüksek hızlı üç fazlı tip elektrik makinelerinde stator lamine çelik tiptedir. Stator sargısı genellikle çift katmanlı tipte dağıtılır ve stator iletkeni için akım yoğunluğu 4 A/mm^2 olarak alınır. Daha yüksek akım kapasiteli makinelerde olumsuzlukları azaltmak amacıyla ve genellikle deri etkisi sebebiyle paralel iletkenler kullanılır. Tablo 2.1.'de yüksek frekanslı uygulamalar için dikkate alınan tipik malzemeler, belirli lamine kalınlık için doyma akı yoğunluğu ve çekirdek kaybı değerleri gösterilmektedir[36].

Tablo 2.1. Yüksek frekansta kullanılan çekirdek malzemeleri

MATERIALS FOR LAMINATION [7]				
S.No.	Material	Thickness (mm)	Saturation flux density (T)	Core loss W/Kg
1.	Silicon Steel	0.35	1.50 - 1.80	61.00
2.	Silectron	0.05	1.50 - 1.80	36.00
3.	Magnesil	0.05	1.50 - 1.80	34.00
4.	Orthonal	0.05	1.40 - 1.60	9.50
5.	Alloy 48	0.10	1.15 - 1.40	14.40
6.	Supermendur	0.10	0.65 - 0.82	27.00
7.	Supermendur	0.05	0.65 - 0.82	25.00
8.	Permalloy	0.05	0.66 - 0.82	3.70
9.	Ferrite (Siemens N27)		0.30 - 0.40	0.28
10.	Ferrox Cube, 3C8		0.30 - 0.40	0.88

S.No. 1 - 5 core loss is at 1.0 T and 1 kHz
S.No. 6 - 8 core loss is at 0.8 T and 1 kHz
S.No. 9-10 core loss is at 0.3 T and 1 kHz

Şekil 2.12.'de Yüksek frekans uygulamalarında kullanılan M43 lamine çelik örneğinin farklı frekanslarda elde edilen kayıplarını gösteren grafiği verilmiştir[37].

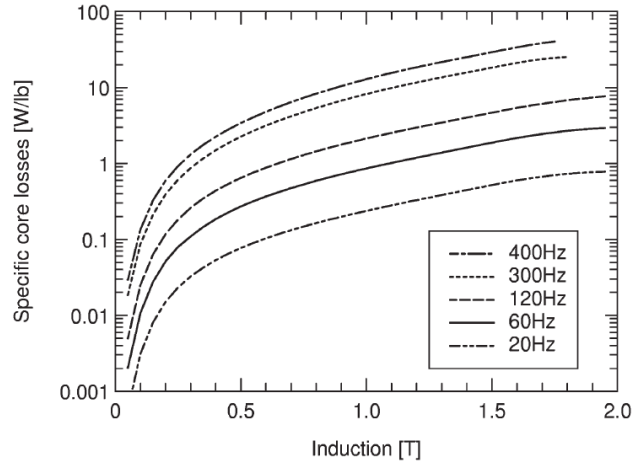
M43 test örneğinin özellikleri:

0,018 inch kalınlık

1,5T ve 60Hz de 1387 geçirgenlik(permeability)

1,5T ve 60Hz de 1,88 w/lb kayıp

7700 kg/m³ yoğunlukta



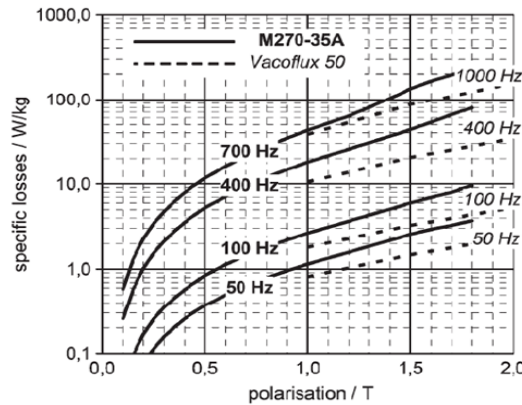
Şekil 2.12. M43 Çeliği Örneğinden Farklı Frekanslarda Elde Edilen Kayıp Grafiği

Yüksek hızlı uygulamalar için ASM tasarımlarının birden büyük kutup çifti sayıları tavsiye edilmez çünkü demir kayıplarını orta seviyede tutmak için hava boşluğu akı yoğunluğunun azaltılması gerekir. Hava boşluğu akı yoğunluğunun maksimuma çıkarılması manyetik malzemeye göre yapılmalıdır. Oldukça geçirgen ve düşük kayıplı bir malzeme tasarım açısından çok uygun olabilir ancak genellikle çok yüksek maliyete neden olur.

Örneğin, toplam kayıplarda demir kayıplarının yüzdesinin %25 olduğu varsayıldığında, on kat daha yüksek hıza sahip makinedeki demir kayıplarının artması, verimliliği %90'dan %70'in altına düşürecektir. Tasarımcının kaliteli, düşük kayıplı, ince laminasyonlu ve yüksek derecede doygunluğa sahip manyetik çelik kullanması gerekir. Kobalt-demir alaşımı olan “Vacoflux 50” ve M270-35A standart lamine çeliğin elektriksel özellikleri ve farklı frekanslarda elde edilen kayıp verileri Tablo 2.2.'de verilmiştir[37].

Tablo 2.2. Vacoflux 50 ve M270-35A çekirdek malzemelerinin elektriksel verileri

	Vacoflux 50	M270-35A
conductivity (MS/m)	2,27	1,81
density (kg/m ³)	8120	7650
specific loss at 50 Hz, 1.5T (W/kg)	1,47	2,57
specific loss at 400 Hz, 1.5T (W/kg)	20,6	43,6
saturation flux density (T)	2,3	1,7



Sacların 0,35mm'lik (M250-35A) laminasyonlardan 0,50mm'lik (M250-50A) laminasyonlar ile değiştirilmesi durumunda spesifik toplam kayıptaki artış 100 Hz'de %14, 200 Hz'de %26 ve 400 Hz'de %37'dir. Bir elektrik motorundaki güç kayıpları ve verimliliği; sıcaklığı üst sınırın altında tutmak için gereken soğutma belirler. Motor torku temel olarak ihtiyaç duyulan rotor boyutunu belirler. Bu nedenle, sıradan makinalara göre daha yüksek hızlar kullanıldığında, eğer yüksek hızlı makina daha iyi bir verime sahipse aynı çıkış gücünde motor boyutunun önemli ölçüde azaltılmasına izin verilebilir. 10000 d/d hızındaki bir motorun aktif kütlesi; 3000 d/d bir motorun aktif kütlesinin 1/3'ü olabilir. Motor boyutunu küçültebilmek için motor veriminin çok yüksek olması gerekir. Motor ıkış güçleri ve verimleri; 3000 d/d için 10000 d/d motor ile aynıysa, yüksek hızlı tasarımdaki kayıp yoğunluğu 3000 d/d makinadan üç kat daha yüksek olabilir. Bu durum, motor soğutma düzeninin tasarımda çok önemli olduğunu gösterir ve bu nedenle yüksek hızlı makinalar genellikle hava boşluğu yoluyla etkili bir şekilde havalandırılır[21].

Yüksek hızlı makinelerde motor soğutmanın ve özellikle rotor soğutmanın etkinliği, makine nominal gücü için ana sınırlayıcı faktörleri oluşturur. IP54, IC01 gibi tamamen kapalı motor muhafazaları talep edilirse, yüksek hızın motor boyutu açısından ek bir avantajı olmaz. Böyle bir durumda 3000 d/d ve 10000 d/d makinelerin fiziksel boyutları yaklaşık olarak eşittir[21].

Yüksek hızlı elektrik motorlarını içeren uygulamalar, özellikle hibrit araçlar söz konusu olduğunda önem kazanmaktadır. Mimariye ve ilgili tahrik gücüne bağlı olarak 13.000 rpm'ye kadar yüksek hızlara ve motorun kutup sayısına bağlı olarak 800 Hz'e kadar yüksek besleme frekanslarına kolaylıkla ulaşılabilir. Motorun çok önemli bir bileşeni, mıknatıslanma yolunu oluşturmak için kullanılan elektriksel çeliktir. Çoğu elik için, akı yoğunluğunun ve geçirgenliğin belirlenmesinde genellikle kullanılan tepe mıknatıslama kuvveti H , malzemeyi yüksek doyma bölgesine getiren 5.000 A/m akı yoğunluğu değeridir. elik kayıpları 1,5 T'da ölçülmüş olup test frekansları 50 ve 60 Hz'dir. Yüksek frekans amaçlı çelikler için kayıplar 1,0 T ve 400 Hz'de, akı yoğunluğu da 5.000 A/m'de ölçülür. Yüksek hızlı elektrik motorları göz önüne alındığında, mıknatıslama kuvveti seviyelerinin düşük devirli makinelerin seviyelerinden tamamen farklı olduğu görülmektedir. Kayıpları daha yüksek frekansta kabul edilebilir seviyelerde tutmak için akı yoğunluğunun azaltılması gerekir. Akı yoğunluğu seviyeleri azaltıldığında, mıknatıslama kuvveti seviyeleri de önemli ölçüde azaltılarak 200 A/m kadar düşük değerlere ulaşır[38].

ASM'ler PM motorlardan daha düşük bir verimlilik ve tork yoğunluğu sunsa bile, otomotiv teknolojisinde basitliği, sağlamlığı, uygun maliyetli üretim yöntemleri nedeniyle EV'ler için (örneğin Tesla Motors) hala uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. ASM'lerde nadir toprak malzemeleri kullanılmaması, daha düşük maliyetle seri üretim yapılabilmesi önemli bir avantajdır. Yüksek hızlı makinelerde bakır, daha yüksek elektrik iletkenliği, daha yüksek mekanik mukavemeti ve daha iyi termal özellikleri

nedeniyle genellikle alüminyuma tercih edilir. Stator ve rotor laminasyonları için farklı silikon-demir (Fe-Si) ve kobalt-demir (Fe-Co) alaşımları düşünüldüğünde Fe-Co, 2T'nin üzerine çıkarak en yüksek mıknatıslanma doygunluğunu sağlar ve böylece en yüksek güç yoğunluklarının elde edilmesini sağlanmış olur. Fe-Co için mıknatıslanma doygunluğunun gerçek değeri tavlama sıcaklığına, tavlama süresine ve tavlama atmosferine bağlıdır; genel olarak tavllanmış malzemenin mekanik özellikleri ne kadar iyi olursa, doyma mıknatıslanması da o kadar düşük olur. Bununla birlikte, optimum mekanik özelliklerde tavlandığında bile Fe-Co'nun doygunluk mıknatıslanması Fe-Si'dan önemli ölçüde daha yüksektir (%20 civarında daha yüksek). Fe-Co tipi malzemeler Fe-Si laminasyonlarına kıyasla çok daha pahalı olduğundan kW başına malzeme ağırlığı daha yüksektir[39].

Fe-Si alaşımının yüksek frekanslı elektrikli makinelerinde uygulanabilmesi için Si içerikli alaşımın yüksek geçirgenliğe ve elektriksel dirence sahip olması gerekir. Daha yüksek Si içeriğiyle alaşımlama kütle yoğunluğu avantajı sağlar; ancak bu, yavaş soğuma sırasında doyma mıknatıslanmasında azalma ve alaşımın kırılgenliğinde artışa sebep olur[6].

Özellikle uçaklar ve rüzgar enerjisi için daha büyük ve ağırlığın önemli olduğu elektrik makinelerinde çoğu Fe-Si levhanın yoğunluğu yaklaşık 7.800 kg/m^3 iken, Fe-Co levhaların yoğunluğu 8.120 kg/m^3 civarındadır ve bu da elektrik makinasını daha ağır hale getirir; bu dezavantaj Fe-Co tabakalarının yüksek doygunluk mıknatıslanmasına sahip olması ve dolayısıyla aynı miktarda manyetik akı oluşturmak için daha az malzemeye ihtiyaç duyulması bu etkiyi telafi ederek ağırlığı %25'e kadar azaltır[2].

Fe-Co alaşımları, boyut ve ağırlığı önemli ölçüde azaltılabilen elektrik makinası tasarımlarına olanak tanır[6].

Darmstadt Üniversitesinde yapılan bir çalışmada; 3 fazlı, 4 kutuplu, 24000 devir/dakika, eksenel olarak yarıklı katı rotorlu asenkron motorda, radyal rotor yüzey oluklarının rotor kayıpları üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma, rotorun dış yüzeyinde radyal oluk açılması ve dolayısıyla yüksek frekanslı rotor harmonik akımlarının yolunun kesilmesi ile rotor girdap akımı kayıplarında önemli ölçüde azalma sağladığını göstermiştir.(Şekil 2.13.) Katı rotorlu endüksiyon motorları (SRIM) mekanik olarak çok dayanıklı olmasına rağmen rotorun elektromanyetik özellikleri zayıftır, çünkü rotorun kayması büyük olabilmektedir, bu da rotor kayıplarını arttırır ve daha düşük bir güç faktörüne neden olur, oysa kalıcı mıknatıslı senkron makineler (PMSM) ile daha iyi verimlilik ve tork yoğunluğu elde edilebilir[40].

Katı rotorda radyal oluk kullanıldığında verimin yüksek, kayıpların az olduğu görülmüştür.



Şekil 2.13: Oluksuz ve Radyal Oluklu Tip Katı Rotor

3. EKLEMELİ ÜRETİM TEKNİKLERİ VE UYGULAMALARI

3.1. SMC'ler İle Eklemeli Üretim Üzerine Çalışmalar

Elektrik makinalarında eklemeli üretim(AM); geleneksel üretim yöntemlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır, özellikle tıp, uzay, havacılık ve otomotiv uygulamalarında kullanımı artmıştır. Günümüzde ulaşım ve özellikle rüzgardan yenilenebilir enerji üretimi dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için yüksek güçlü elektrik makinalarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Özellikle elektrikli drone ve elektrikli yolcu uçakları için elektrik makinası tasarımında güç, verimlilik, ağırlık, güvenlik ve sürdürülebilirlik kriterleri aşılması gereken konulardır. Denizcilikte ise, ticari gemiler karlılığı üst düzeye çıkarmak ve askeri gemiler için kritik görev bileşenlerini taşımak için daha fazla alan, kapasite ve elektriksel bileşenleri için daha yüksek güç yoğunluğu tasarımlar için önem arz etmektedir. Eklemeli üretim teknikleri ile polimer, bakır ve demir katkılı malzemelerden karmaşık, zor yapı ve şekillerde üretim esnekliği; elektrik makinaları için benzersiz fırsatlar ve devrim niteliğinde gelişmeler sunmaktadır. Elektrik makinalarında kullanılan stator, rotor, sargılar, mıknatıslar, yalıtım ve gövde yapısının tamamıyla eklemeli üretim yöntemleriyle üretildiği çalışmalar bulunmakta olup, çoğunlukla kalıcı mıknatıs içeren makina tipleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır.

General Electric (GE), Boeing ve Rolls Royce gibi birçok endüstri kuruluşu, araç çekişinden uydu ve havacılık sistemlerine kadar çeşitli uygulamalar için yüksek performanslı parçaların üretiminde eklemeli üretimi kullanmaktadır[8].

Malzeme israfının çok az olması ve yüksek esneklik modern eklemeli üretim yöntemlerinin özelliklerinden bazılarıdır[41]. Bu özelliklerin yanında üretim süresini, maliyeti, enerji sarfiyatını ve imalat sonrası işlemleri en aza indirmesi ile gelecekte geleneksel üretimin yerini alabilecek potansiyele sahiptir.

Mevcut AM tekniklerinin bazı pratik sınırlılıkları büyük ölçekli üretim endüstrisindeki kullanımını kısıtlamaktadır[8].

3.2. Eklemeli Üretimde Malzeme Teknolojisi

Çok çeşitli dielektrik ve metalik malzemelerin üretimi için eklemeli üretim teknolojilerinin kullanılmasına rağmen, elektromekanik cihazların imalatına ilişkin daha önce yapılan çalışmalar sınırlıdır. Elektrik motorlarını 3B olarak basımına yönelik çalışmalarda yalnızca rotor ve stator yapısı dikkate alınmıştır. Mevcut üretim sistemleriyle elektrik motorları üretmenin temel zorluğu, 3B baskı makineleri kullanılarak işlenebilecek malzemelerin sınırlı olmasıdır. Örneğin sargı bobinleri bir elektrik motorunun temel yapılarından biridir; Ancak bakır gibi yüksek elektriksel iletkenliğe sahip bir malzeme üretebilecek gelişmiş eklemeli üretim teknolojilerinin eksikliği bir engel teşkil etmektedir[5].

Günümüzün makina uygulamalarında yüksek güç yoğunluğu, işlevsellik, geliştirilmiş termal, mekanik ve elektromanyetik özellikler büyük önem kazanmaktadır[41]. Boyutu, ağırlığı ve kayıpları azaltırken performansı ve verimliliği en üst düzeye çıkarmak için elektrikli makinelerin tasarımında en uygun tasarımı yapmak çok önemlidir. Curie sıcaklığına dikkat edilerek kalıcı mıknatısların yazdırılmasını, hizalanmasını veya manyetik dolgu malzemelerinin mıknatıslanmasını sağlamak için mıknatısların 3B baskı ile işleme çalışmaları sürmektedir. Elektrik makinalarında kullanılan mıknatıslar eklemeli üretim tekniğinde polimer karışımli toz ve filament halde kullanılmaktadır.

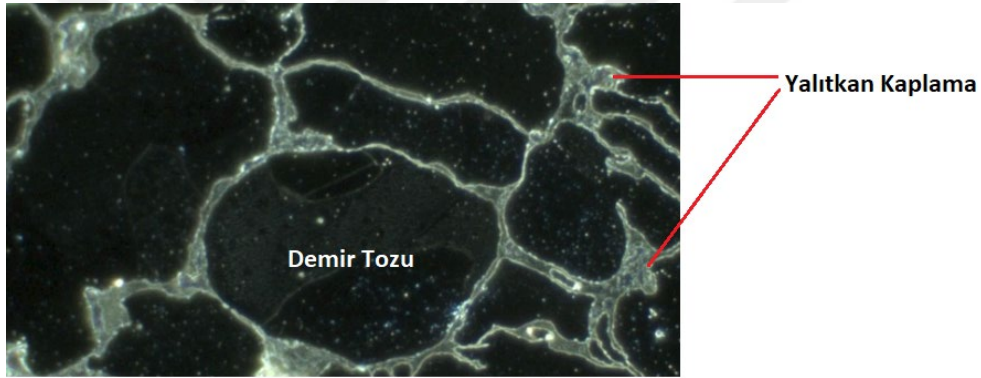
3B baskı mıknatısların manyetik özellikleri baskı teknolojisine, basılan parçaların yoğunluğuna ve 3B baskıda kullanılan filament veya toz karışımının kimyasal bileşimine bağlıdır[2].

Belirli bir manyetik çekirdek tasarımı düşünülürken, bazı malzeme performans ölçümlerinin yapılması gerekir. Bunlar, manyetik doygunluk, manyetik geçirgenlik ve spesifik güç kaybı gibi elektromanyetik özellikleri ile akma mukavemeti ve termal dayanıklılık gibi mekanik özelliklerin testini içerir. Manyetik bir çekirdek genellikle elektriksel çelikten uygun şekilde hazırlanmış profillerin/laminasyon levhalarının sıkıştırılmasıyla veya kompozit toz metal ve yalıtım maddesinin sıkıştırılarak(SMC) kalıplanmasıyla oluşturulur[41].

Geleneksel demir alaşımlarının yanı sıra, SMC(Yumuşak manyetik kompozit)'lere yönelik baskı tekniklerini keşfetmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir. SMC; her bir parçacığı ayıran ve girdap akımlarına karşı çok yüksek direnç sunan ince bir yalıtım malzemesi ile kaplanmış demir parçacıklarının kullanılması temeline dayanır. SMC'ler, istenen geometrik şekli oluşturmak için genellikle yüksek basınç kullanılarak birleştirilen, yalıtım kaplı manyetik parçacıklardır[6].

SMC'ler düşük frekanslarda elektriksel çelik laminasyonlarla karşılaştırıldığında manyetik özellikleri (doygunluk akı yoğunluğu, manyetik geçirgenlik ve demir kayıpları) biraz daha kötüdür. Bunun temel nedeni demir tozu parçacıkları arasındaki manyetik olmayan boşluktur. Ancak büyük elektrik direnci nedeniyle girdap akımı kayıpları çok küçüktür. Bu avantaj, frekans arttıkça önemli hale gelir ve yüksek hızlı elektrik makinalarının tasarımı için çok önemlidir[42].

Şekil 3.1'de SMC'de mikro boyutta demir tozu parçacıkları ve aralarındaki yalıtım görülmektedir[43]



Şekil 3.1. SMC'de mikro boyutta demir tozu parçacıkları ve aralarındaki yalıtım

Bir elektrik makinasındaki çekirdek, manyetik alanı sınırlandırmak ve yönlendirmek için kullanılan, yüksek manyetik geçirgenliğe sahip gövdedir. Tasarımı ve yapısı dikkate alınırken manyetik doygunluk, geçirgenlik, histeresiz kayıpları, girdap akımı kayıpları ve mekanik özellikler gibi özelliklerin dikkate alınması gerekir. SMC ve metal alaşımlar en iyi elektromanyetik özelliklere sahiptir. Mevcut geleneksel yöntemlerde, gerekli geometri ve elektromanyetik özellikleri elde etmek için bu malzemeler kalıplanarak, preslenerek veya sinterlenerek kullanılır. Ancak SMC'lerin zayıf mekanik özellikleri ve karmaşık geometrilerin uygulanmasındaki sınırlamalar nedeniyle geleneksel yöntemler kullanılarak işlenmesi genellikle zordur [8].

Elektrik makinelerinde yaygın olarak görülen üç yumuşak manyetik malzeme demir-kobalt (FeCo), demir-nikel (FeNi) ve demir-silikon (FeSi) alaşımlarıdır. Bu üç yumuşak manyetik malzeme ile üç boyutlu lazer tabanlı baskı ile eklemeli üretim tekniği kullanılarak prototip üretme çalışmaları devam etmektedir. SMC'lerde girdap(eddy) akımı

kayıplarını azaltmak için farklı alaşımlar, karmaşık kesit geometrisi gibi yöntemler üzerinde çalışılmaktadır.

Üç boyut baskılı ferromanyetik malzemeler için çoğu araştırma ve geliştirme faaliyeti demir-silikon üzerine odaklanmaktadır. Maliyet performans oranı göz önüne alındığında, demir-silikon varyantları yüksek manyetik saturasyona, yüksek maksimum bağlı geçirgenliğe, düşük histerezis kaybına ve yüksek frekanslarda düşük girdap akımı(eddy) kaybına sahiptir. Eklemeli üretim çalışmalarında son zamanlarda artış olup; demir çekirdeklerin üretimine alternatif olması, performansı arttırması, demir kayıplarını azaltması, ağırlığı azaltması ve kalıp kullanmadan karmaşık geometrilere olanak sağlayabileceği görülmüştür. SMC'lerin lamine çeliğe kıyasla manyetik karakteristikleri lamine çelik kadar iyi olmasa da yüksek çalışma frekanslarında tanecikli izole yapısından dolayı daha düşük girdap(eddy,foucault) akımı kaybına sahip oldukları görülmüştür. 1000 Hz ve üzeri frekansta, SMC çekirdeğinin girdap akımı kaybı, lamine çelik çekirdeğe kıyasla çok daha düşüktür. Yüksek hızlı çalışmanın bir gereklilik olduğu elektrik makinası örneklerinde SMC'ler büyük fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir. Tipik akma dayanımı SMC'lerde 20 Mpa'nın altında iken, geleneksel laminasyon çeliği için tipik değer 350 MPa civarındadır. Yüksek hızlı elektrik makinaları için SMC'lerden yapılan makineler, rotor çekirdekleri istenmeyen yüksek Von Mises stresi (Şekil Değiştirme Enerjisi)'ne maruz kalabileceğinden eklemeli üretim için bir dezavantajdır[1].

SMC uygulamalarına ilişkin bazı zorluklar.

- Yüksek histerezis kaybına
- Koersif kuvvet H_c ,
- Manyetik geçirgenlik μ_r ,
- Düşük akma dayanımına sahip olmasıdır.

Eklemeli üretim ile ilgili önemli sonuçlar elde edilen çalışmalarda; geometrik şekil gerçekleştirmede esnekliğe ek olarak, 31.000'e kadar yüksek manyetik geçirgenlik, düşük histerezis kayıpları, minimum 16 A/m'lik düşük koersif kuvvet ve torkta %2'den daha az bir azalmaya karşılık makina çekirdeğinde %50'ye kadar ağırlık azalması elde edilmiştir[8]. Elektrik makinalarının çekirdekleri yüksek geçirgenlik, düşük histerezis ve girdap akımı kayıpları ile birlikte, yüksek tork-ağırlık oranına sahip olması gerekir. Eklemeli üretim araştırmalarında üzerinde en çok çalışılan makina kategorileri; Relüktans makinaları, Histeresiz makinaları, Aksial akıllı makinalar ve Fırçasız DC makinalarıdır.

Elektrik Makinalarında çekirdek periyodik mıknatıslanma yaşadıkça ve demanyetizasyon döngülerinde, enerjinin bir kısmı demir kayıpları olarak dağılır ve manyetostriksiyon etkisi adı verilen malzemenin genleşmesi ve büzülmesine sebep olur. Enerji kaybı verimliliği büyük ölçüde etkilediğinden, malzemenin dar histerezis davranışı ve yüksek elektrik direnci sergilemesi gerekir. Bu özellikleri gerçekleştirmek için yumuşak manyetik malzemeler diğer malzemelerle alaşımlanır ve moleküler olarak uygun hale getirmek için ısıtılma tabi tutulur[6].

Tablo 3.1'de farklı SMC lerin elektroteknik özellikleri karşılaştırılmıştır[42].

Tablo 3.1. SMC'lerin elektroteknik özelliklerinin karşılaştırılması

Soft Magnetic Material	Iron Core Losses @50 Hz, 1 T	Saturation Flux Density	Magnetic Permeability	Resistivity
Non-oriented electrical steel (M330-50A)	2	4	2	3
Fe-Si alloy (6.5% Si)	3	4	4	3
Fe-Ni alloy (Permalloy)	4	2	4	3
Fe-Co alloy (Hiperco)	3	5	3	3
SMC (Somaloy 700)	1	3	1	5
Amorphous iron (MetalGlass)	4	4	4	4
Nanocrystalline iron (FINEMET)	5	3	5	4

Note: .

Poor Fair Good Very good Excellent

Yumuşak ferritlerin ideal olabileceğini düşünülebilir fakat düşük mıknatıslanmaları, termal iletkenlikleri ve kırılgenlikleri ferritlerin elektrik makinalarında kullanımını engellemektedir[6].

3.3. Elektrik Makineleri İçin Eklemeli Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi

Manyetik malzemelerin manyetik, elektriksel, termal ve mekanik özellikleri eklemeli üretim yönteminin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir. Elektrik makinalarının eklemeli üretim 3B baskı yöntemleri arasında sırasıyla en çok, Selektif Lazer Eritme(SLM), Erimiş Biriktirme Modellemesi (FDM) ve Bağlayıcı Püskürtme Teknolojisi(BJT) yöntemleri kullanılmaktadır.

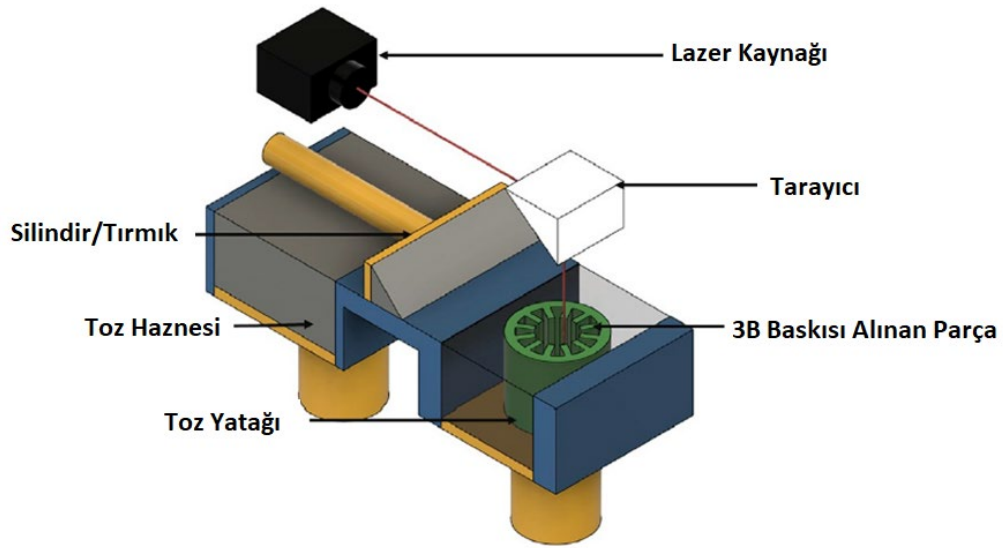
Eklemeli üretim tekniklerinin kalıcı mıknatısların(PM) mekanik ve manyetik özellikleri üzerindeki etkileri hakkında bir karşılaştırma yapılmış ve SLM yöntemiyle üretilen kalıcı mıknatısların %90 yoğunluğa sahip mıknatıslar ürettiği görülmüş olup FDM ve BJT ile üretilen NdFeB(Neodymium) PM'ler birbirlerine benzer özellikler göstermiştir[8].

Baskı işleminde; tanecikler arası gözeneklilik(boşluklar), çatlaklar ve gerilmeler genellikle 3B baskılı parçalarda hem manyetik hem de mekanik özellikleri etkilemektedir. Bu durum demir kaybını azaltır fakat manyetik geçirgenliği, manyetik doygunluğu, ve üretilen elektrik makinalarında performans kaybına yol açar. Manyetik, elektriksel ve mekanik özelliklerin yanı sıra, büyük elektrik makinalarının üretimi için eklemeli üretim baskı makinelerinin olmaması bir engel teşkil etmektedir. Bu çalışmada FDM eklemeli üretim tekniği kullanılacak olup, elektrik makinalarının tasarımında en çok kullanılan eklemeli üretim tekniklerinden bahsedilecektir.

3.3.1. Selektif Lazer Eritme (SLM)

Bu yöntemde, yüksek güçlü bir lazer kullanılarak SMC alaşım tozu tamamen eritilir ve istenen şekilde üretmek için katman katman kaynaştırma yapılır.

SLM teknolojisinde, hammadde tozu füzyon yatağı üzerine bir katman halinde yayılır ve ardından Şekil 3.2'de gösterildiği gibi bir lazer ışını kullanılarak eritilir. Daha sonra numune yatağı indirilir ve başka bir toz tabakası yayılır ve tam yapı elde edilene kadar lazerle tekrar eritilir. Bu işlemde kullanılan toz tanecikleri küreseldir olmak zorunda olup belirli alaşım bileşiklerinin kullanımını sınırlandırabilir[6].



Şekil 3.2. Bir elektrik stator çekirdeğinin SLM tekniği ile baskısı

Literatürde SLM yöntemi kullanılarak FeSi, FeCo alaşımları ile küçük ölçekli motor baskıları tecrübe edilmiştir.

SLM yönteminin avantajları[6];

- Yüksek manyetik doygunluğa sahip parçalar üretebilir.
- Çeşitli tiplerde metal ve polimerler basılabilir.
- Mekanik olarak güçlü parçalar üretilebilir.
- Baskı sonrası önemli bir ek işleme gerek yoktur.
- Parça basımında desteğe gerek yoktur. Ancak baskı plakası gereklidir.
- Kirlenici bir yöntem değildir.

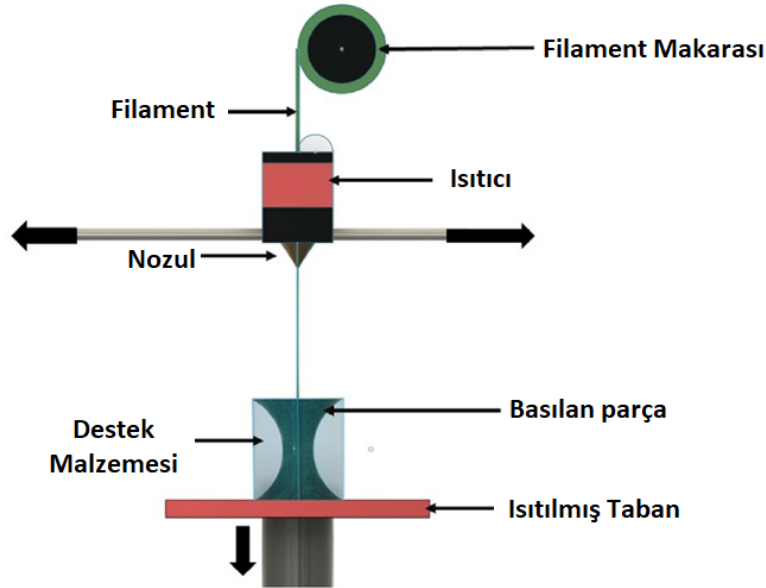
SLM yönteminin dezavantajları[6];

- Gözeneklilik, iç gerilim ve reaksiyona girmemiş toz noktaları oluşabilir.
- BJT ve FDM'ye kıyasla çok daha yavaş bir işlemdir.
- Basılan parçalarda diğer yöntemlere göre daha yüksek girdap akımları oluşabilir.
- Basım makineleri daha pahalı olabilmektedir.
- Sıkı güvenlik önlemleri ve bakım gerektirir.
- Basılan parçanın plakadan çıkarılması oldukça zordur.
- Yüksek güç tüketimine ihtiyaç duyar.

3.3.2. Erimiş Biriktirme Modellemesi (FDM)

Bu yöntem eklemeli üretimde çok kullanılan bir teknik olup; teknolojik olarak uzun geliştirme süreçlerinden geçmiş bir modelleme yöntemidir. 3B baskı sırasında FDM yönteminde düşük erime sıcaklığı değerine sahip bir termoplastik polimer(PLA, ABS vb.) CAD modeli tarafından yönlendirilerek yazıcı tabanında katman katman ekstrüzyon işlemine tabi tutulur. FDM işlemi diğer yöntemlere göre daha kolay baskı yapılabilmesini sağlar. Saf polimerlerden karışım metal kompozitlere kadar çok çeşitli malzemeler FDM tekniği ile işlenebilir. Bu tez çalışmasında FDM 3B baskı tekniği kullanılmıştır.

FDM baskısının basit bir şeması Şekil 3.3.'de gösterilmektedir[6].



Şekil 3.3. FDM, kaynaşık biriktirme modellemesi

SMC'lerin eklemeli üretimine ilişkin FDM tabanlı literatürde örnekler bulunmaktadır. NASA, yüksek güç yoğunluğuna sahip havacılıkta kullanılacak motorlar elde etmek ve karmaşık stator geometrilerini gerçekleştirebilmek için FDM tekniği ile SMC yazdırma çalışmalarını sürdürmektedir[6].

Elektrik makinaları için FDM teknolojisindeki en büyük zorluk, manyetik parçacıkların daha düşük manyetik özelliklere sahip olması ve mekanik dayanımda azalma nedeniyle oluşan kısıtlılıklardır. Bu olumsuzlukların yanında daha yüksek elektrik direnci nedeniyle girdap akımları kayıpları büyük ölçüde azalır. Bazı polimerlerin baskısından sonra sinterleme adı verilen fırınlanma işlemi yapılarak geleneksel üretime yakın mekanik dayanıklılık elde edilebilmektedir.

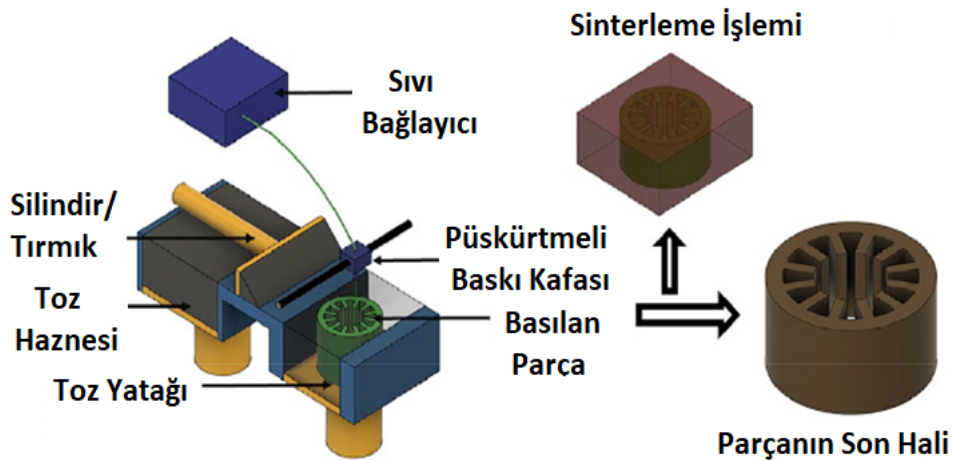
FDM yönteminin avantajları[6];

- Her türlü manyetik malzeme baskısı yapılabilir.
- Polimerlerin yüksek direnci sayesinde girdap akımı kaybı büyük ölçüde azaltılabilir.
- Düşük sıcaklıkta işlem yapılması baskı sırasında manyetik özelliklerin korunmasını sağlar.
- Geliştirilmiş korozyon direnci.
- İşlem süresinin kısalığı ve üretim maliyetinin az oluşu.
- Büyük parça üretimi mümkündür.
- FDM Baskı Makinelerinin kullanımı kolay ve güvenlidir.
- Çoklu malzeme baskısı mümkündür.

FDM yönteminin dezavantajları[6];

- Polimer manyetik olmadığından doyma manyetizasyonu azalır.
- Isı iletkenliği azalır.
- Mekanik özellikler zayıftır.
- Sık sık nozul tıkanması ile karşılaşılır.
- Baskı materyali termoplastik polimerlerle sınırlıdır.

3.3.3. Bağlayıcı Püskürtme Teknolojisi (BJT)



Şekil 3.4: BJT ile Stator elektrik çekirdeği üretimi ve ısıl işlemin şeması.

BJT yönteminde besleme katmanlarına bağlayıcı sıvının enjeksiyonu ile basılıcak parçanın istenen şekli elde edilir ve son işlem olarak sinterleme işlemi ile bağlayıcı ayrıştırılır. Bu yöntemde kalıcı bağlayıcılarla ve düşük erime noktalı metallerle baskı yapılabildiği gibi bağlayıcının çözülebildiği sinterleme işlemi yoluyla nihai olarak tam yoğunluğa ulaşan baskı yapılabilir. BJT baskısının basit bir şeması Şekil 3.4.'te gösterilmektedir[6].

BJT yönteminin avantajları[6];

- Zor ve büyük parçalar üretilebilir.
- Metaller ve seramikler ile baskı yapılabilir.
- Baskı sonrası ayırma veya ek malzeme enjekte etme imkanı sağlar.
- Her türlü toz materyali işleyebilir.
- Destek yapısına gerek yoktur.
- Parçaların imalatı SLM tekniğinden daha ucuzdur.

BJT yönteminin dezavantajları[6];

- Baskı sonrası işleme(sinterleme vb.) ihtiyaç duyar.
- Malzemede gözeneklilik oluşması ve karbon kalıntıları manyetik özelliği bozabilmektedir.
- Daha iyi mekanik özellikler için materyalin filtrasyonuna ihtiyaç vardır.
- Tolerans bakımları zordur.

3.4. ASM'lerde Eklemeli Üretim Çalışmaları

İndüksiyon ve senkron makineler enerji dönüşümünde yaygın bir kullanıma sahiptir. Genellikle tasarımı basit ve büyük boyutlu yapılabilir. Bu tür makinelerin endüstriyel üretiminde elde edilen performansın iyi olması, büyük çaplı üretim için gereksinim, maliyet ve zaman açısından en iyi sonuçları vermesi nedeniyle klasik üretim yöntemleri tercih edilmektedir. Eklemeli üretimin bu tür makinelerin endüstriyel üretiminde kullanılması aşağıdaki etkenlerden dolayı sınırlanmaktadır[8]

- Günümüzde gerçekleştirilebilecek genel boyut sınırlaması ve küçük baskı yatağı boyutu
- Eklemeli üretim malzemelerinin elektromanyetik özelliklerinin gelişimindeki kısıtlılıklar
- Üretim maliyeti ve zamanı

Araştırmacılar ve çeşitli endüstriyel kuruluşlar tarafından bu yönde çalışmalar sarf edilmekte olup bu boşluk dolduruluncaya kadar geleneksel elektrik makinelerinin endüstriyel imalatında eklemeli üretimin kullanımı çoğunlukla;

- Hızlı prototipleme
- Başka yöntem ile üretilmesi mümkün olmayan, uygulamaya özel karmaşık geometrilere sahip makina parçalarının üretimi ile kısıtlı kalmaktadır[8].

ASM'lar temel olarak basit ve sağlam yapıları, düşük bakım gereksinimleri ve uygun maliyetleri nedeniyle elektrik makinalarında pazarın hakimidir. Üretim teknolojisi yıllar içinde oturmuş olmasına rağmen eklemeli üretim bu alanda yeni fikirlere ve yaklaşımlara açıktır. Gelişmiş eklemeli üretim teknolojileri, birden çok farklı malzemenin aynı anda 3B yazdırılmasına olanak tanır. Bu avantajı dikkate alarak Chinthavali, tüm sincap kafesli rotorun tek bir işlem aşamasında üretilebileceğini gösterdi. Bilinen yöntemlerin dışında CS(Cold spray) eklemeli üretim yöntemi aynı zamanda sağlam rotor yapısı üretiminin zor olduğu yüksek hızlı ASM'ler alanında da iyileştirmeler sağlayabilir. Bu teknoloji katı rotorların imalatında kullanılırsa, demir çekirdek ile onu kaplayan bakır katman arasında çok iyi bir difüzyon bağı elde edilebilir, bu da kaplamanın ayrılmasını önler[42]. Elektrik makinalarının karmaşıklığı arttıkça, temel bileşenlerinin eklemeli üretimine olan ihtiyaçta artmaktadır. 3B baskı, özel elektrik makinalarında büyük potansiyele sahiptir[42].

4. MALZEME ANALİZİ

Bu bölümde malzemelerin ASM tasarımı için uygunluğunun değerlendirilebilmesi için filament imali, manyetik analiz için örnek toroid baskı işlemi, ölçümleri ve analiz değerlendirmeleri yapılacaktır. ASM'un geleneksel lamine çekirdeği olmadan; metal eklemeli ABS ve PLA filament ile çekirdeğinin üretilebilmesi için malzemelerin analiz edilmesi, pratikte uygulanabilirliği ve kısıtlılıkları hakkında fikir edinmek hedeflenmektedir.

Bu bölümde sırasıyla;

- FDM tekniği ile 3B baskısı yapılabilecek metal katkılı ABS polimerinin ekstrüzyon ile filament haline getirilmesinden bahsedilecek
- Elektromanyetik analizinin yapılabilmesi için; filament haline getirilen metal eklemeli ABS ve piyasada hazır halde bulunan metal eklemeli PLA filament örneklerinden 3B toroid nüve baskısı yapılacak
- Toroid örneklerinin manyetik analizinin yapılabilmesi için üzerlerine primer/sekonder sargı sarılıp, 400Hz frekanslı alternatif akım kaynağı uygulanarak ölçümleri yapılacak
- Hesaplamalar sonucu manyetik karakteristikleri hakkında yorum yapılarak malzemelerin uygunluğu değerlendirilecektir.

4.1. Kısıtlılıklar

Gelişen teknoloji ile 3B yazıcılar çok gelişmiş ve yeni üretim yöntemleri konusunda büyük kolaylıklar sağlamıştır. Üretimi karmaşık bir çok parçanın imali kolaylaşmıştır. 3B yazıcılarla üretimde kullanılmak üzere çeşitli amaçlar için üretilmiş kompozit malzemeler ve eklemeli filamentler geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanacağımız ferromanyetik metal eklemeli ABS ve PLA filamentlerde bu malzemelere örnektir. Günümüzde elektrik makinalarının üretiminde proses maliyetinin azalması, verimlilik ve sürdürülebilirlik için yeni yöntem arayışları olmuş ve eklemeli filamentler/kompozitler bu

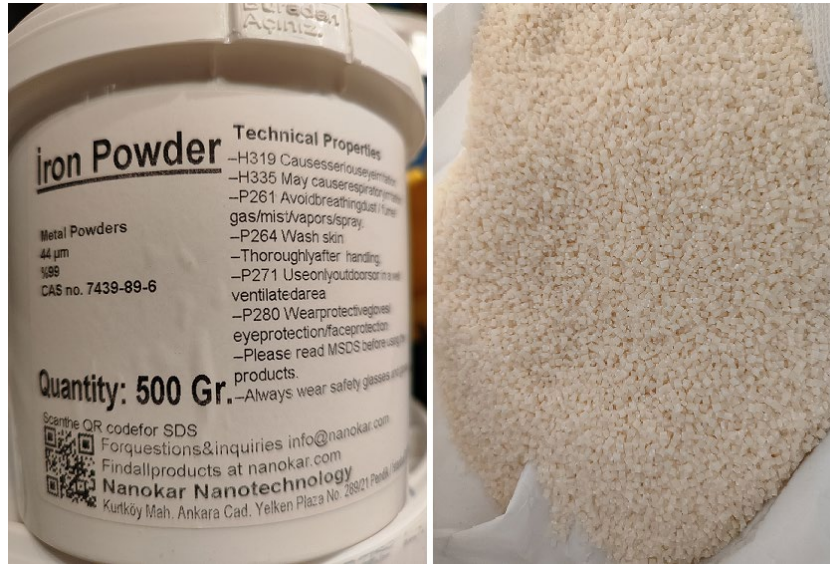
alandaki yeni fırsatlar doğurmuştur. Bu yöntem ile üretimde bazı kısıtlamalar bulunmaktadır, 3B yazıcı özellikleri nedeniyle boyutların sınırlı olması, ferromanyetik metal eklemeli PLA ve ABS filamentlerin elektrik makinalarının çekirdeklerinde kullanılmaya uygun iyi manyetik özellikler göstermemesi, zayıf mekanik özellikler, üzerinde araştırmaların gerekliliği ve gelişmeye açık olması başta gelen kısıtlılıklardır.

4.2. Ekstrüzyon ile Metal Eklemeli ABS Filament Üretimi

4.2.1. ABS ile Demir Tozu Karıştırma Ekstrüzyonu

3B yazıcılarda kullanılan filamentler genellikle PLA ve ABS olarak üretilmektedir. ABS; Akrilonitril Bütadiyen Stiren olarak bilinen ve endüstride çok çeşitli yerlerde plastik ürün imalinde kullanılan bir termoplastik polimer türüdür. PLA ise Polyactic Acid olarak bilinen şeker kamışı, şeker pancarı ve mısır nişastası gibi ürünlerden elde edilmiş bir biyoplastik tipidir. Bu çalışmada ilk önce, ısıl ve mekanik dayanım özellikleri PLA'ya göre daha iyi olan ve piyasada granül halde bulunan ABS polimeri tercih edilerek demir tozu katkı işlemine alınmıştır. Bu işlemde Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Polimer işleme ve test laboratuvarından faydalanılmıştır.

Kullanılan malzemeler şekil 4.1.'de gösterildiği üzere; Samsung® Starex SV-0167 ABS polimeri ve 44µm tanecik boyutlu demir tozu(%99 saflıkta Carbonyl Iron, CAS no:7439-89-6)'dur.



Şekil 4.1. Demir Tozu ve ABS Granül

ABS polimeri ile verimli bir karışım yapabilmek için nemden arındırılmış olması gerekmektedir; bu nedenle demir tozu ile karıştırılmadan önce laboratuvarında etüv cihazında 24 saat boyunca 105 °C sıcaklıkta kurutma işlemine tabi tutulmuştur.

Kurutma işleminden sonra ABS ve demir tozunun %6 ve %10 demir tozu oranlarında hazırlanması için 0,5 gr hassasiyetli tartıda ölçüm işlemi yapılarak şekil 4.2’de görüldüğü gibi ABS granül içine %6 ve %10 oranlarda demir tozu heterojen olarak karıştırılmıştır.



Şekil 4.2. Ekstrüzyon öncesi %6 Demir Tozu karıştırılmış ABS granül

Yapılan karışım işleminden sonra işlem sırasına göre şekil 4.3-4.4-4.5-4.6-4.7-4.8’de görüldüğü gibi çift vidalı ekstrüzyon makinasında ABS ve demir tozu karışımı 240-260 °C’de eriyik hale getirilerek demir tozunun ABS içine kaynaması ve makinadan şerit halde çıkması sağlanır, daha sonra ayrı bir işlem olarak uygulanacak filament yapım ekstrüzyonuna hazır hale gelmesi için eriyik şerit halde çıkan karışım su dolu havuzdan geçirilerek soğutulur. En son aşama olarak soğutulan ve kurutulan ABS-Demir tozu karışımı homojen bir yapı haline gelmiş olup, otomatik kesilerek tekrar tane granül yapı haline getirilir. Yeni üretilen karışım ABS granüllerini nemden korumak için vakumlu poşet içinde muhafaza etmek gerekmektedir. Eldeki malzeme miktarına göre %6 katkı olarak 5kg, %10 katkı olarak 3kg üretilebilmiştir. Ekstrüzyon makinası çift vida kısmını aşındırabileceğine ve ABS baskısının daha kırılgan hale gelmesine sebep olacağından %10’dan daha büyük demir tozu oranı uygulanamamıştır.



Şekil 4.3. Çift Vidalı Ekstrüzyon Makinası



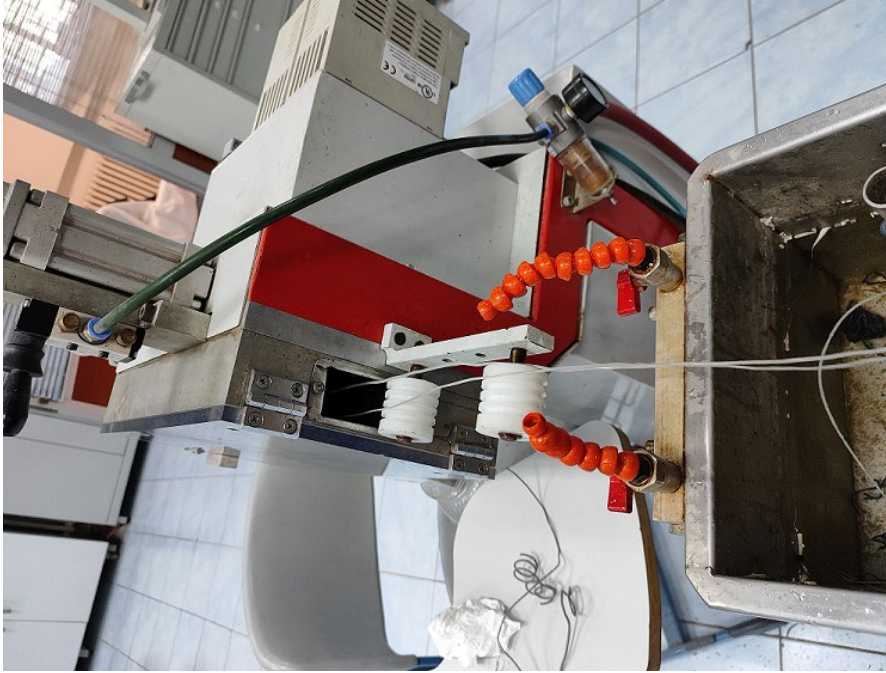
Şekil 4.4. ABS ve Demir tozu karışımının homojen bir karışım elde etmek için çift vidalı ekstrüzyon makinası eritme-karıştırma besleme oluğuna bırakılması



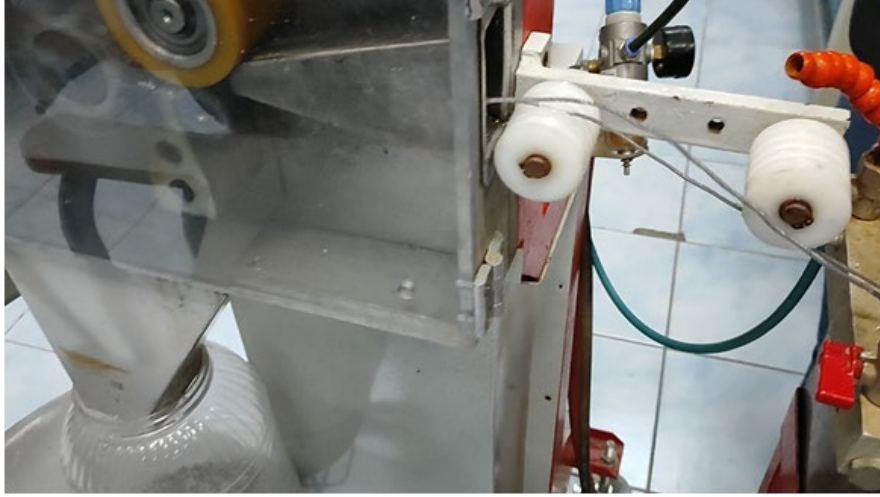
Şekil 4.5. ABS ve Demir tozu karışımının birbirine kaynamış ve homojen olarak çift vidalı ısıtıcı bölümünden soğutucu havuza çıkışı



Şekil 4.6. Eriyik ABS ve Demir tozu karışımının şerit halde su dolu havuzda soğutulması



Şekil 4.7. Soğutulan şerit haldeki karışımın tekrar granül hale getirmek için kesim ünitesine girişi



Şekil 4.8. Karışımın kurutularak kesilmesi ve tekrar granül hale getirilerek bir kaptan toplanması



Şekil 4.9. %6-%10 oranlarda ayrı işlem ile üretilmiş granüller vakum poşetlerine alınarak nemden korunur

4.2.2. ABS-Demir Tozu Karışımının 3B Baskı Filamenti Haline Getirilmesi

Polimer işleme ve test laboratuvarında elde edilen %6 ve %10 demir tozu katkı ABS granülü, Filamex firmasında bulunan (şekil 4.10) FX-20 ekstruder makinesi ile filament haline getirilmiştir[44].



Şekil 4.10. Filamex FX-20 ekstruder makinesi ve Kısımları

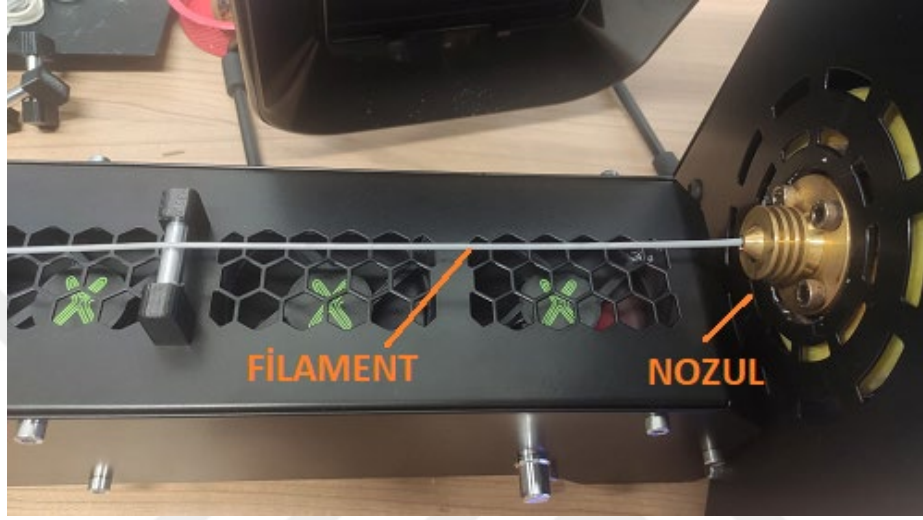
Üç boyutlu yazıcı filament malzemesi plastik ekstrüzyon makineleri ile üretilmektedir. Ekstrüzyon sistemleri bir huni içerisine konulan plastik granül parçacıklarından vidalı mil yardımı ile huni ucundaki ısıtıcı nozul tarafına taşınması burada ısıl işleminden geçerek eritilmesi mantığı ile çalışmaktadırlar. Burada eritilerek akışkanlık özelliği kazandırılan hammadde istenilen çapta (genellikle 1.7mm ya da 3mm) çıkartılarak üç boyutlu yazıcıda kullanıma hazır bir film şerit haline getirilmektedir[45].

FX-20 Ekstruder makinası; Besleme kısmı, Soğutma kısmı ve Çekme-Sarma kısmı olmak üzere 3 kısımdan meydana gelmektedir. Besleme kısmında devir ayarlı vida motoru, 2 kademe ısıtıcı ve kontrol sistemi bulunmaktadır. Vida kısmı sertleştirilmiş çelikten olup L/D oranı 1/20'dir.



Şekil 4.11. Besleme kısmı kontrol paneli, haznesi ve vidası

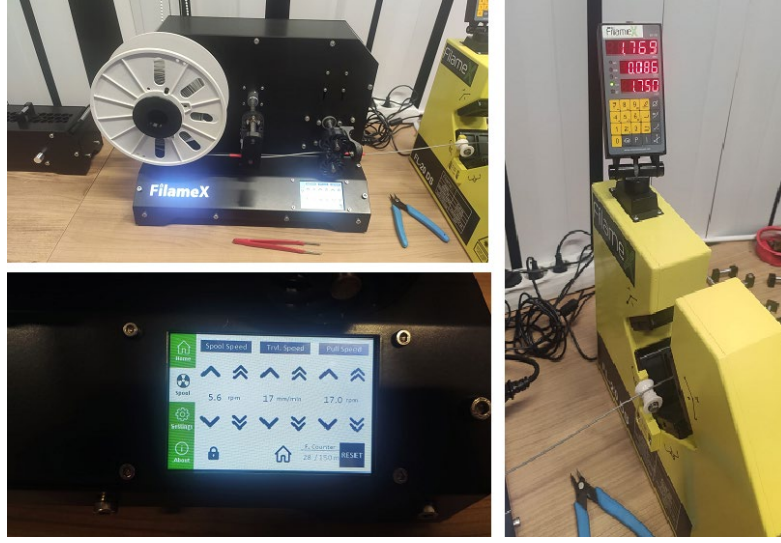
Besleme kısmında 1. ve 2. ısıtma kademeleri bulunmakta olup sıcaklık değerleri kontrol ekranından ayarlanabilmektedir. Ayarlanan sıcaklığa gelince granül beslemesi yapılmaktadır. Makina ilk önce 220-240 °C ısıtıldıktan sonra %6 demir tozu katkılı ABS granüller vida haznesine doldurulur, granül erime sıcaklığına geldiğinde vida motoru çalıştırılır ve granüller şekil 4.11.'de görüldüğü üzere vida üzerinde eriyik durumda şerit halde besleme kısmı nozulundan soğutma kısmına doğru gider.



Şekil 4.12. Filamentin eriyik halde besleme kısmı nozulundan soğutma kısmına geçişi

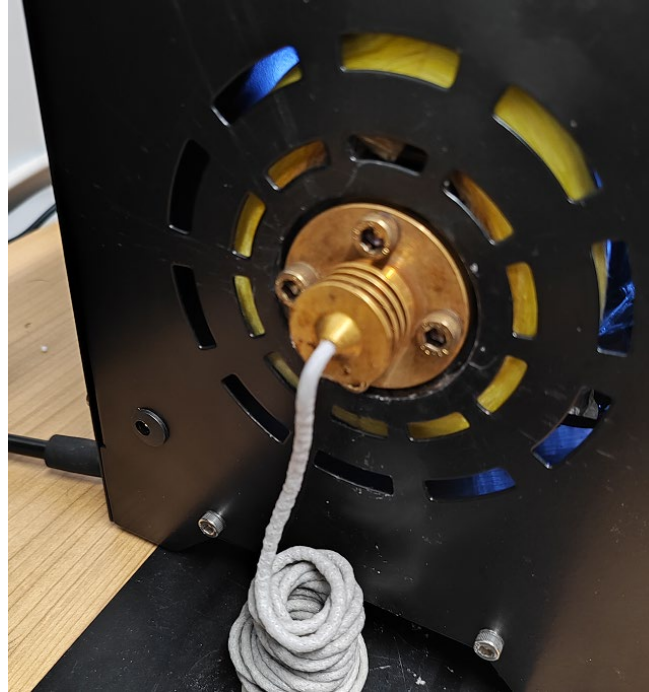
Soğutma kısmında(şekil 4.12) devirleri PWM tekniği ile ayarlanabilen fan motorları bulunmaktadır. Besleme kısmı nozulundan çıkan filamentin durumuna göre fan devir ayarı kullanıcı tarafından yapılmaktadır, filament kıvrılarak çıkıyorsa fazla soğumuş ve fan deviri azaltılır, eğer filament sünek ve yapışkan bir şekilde ilerliyorsa soğutma yetersizdir ve fan deviri arttırılır. Filament bu kısımda soğutulduktan sonra filament çapının ayarlanması ve makaraya sarılmak üzere çekme-sarma kısmına ilerler.

Çekme ve sarma(Spooler) kısmında(şekil 4.13) çekme tekeri, travel sistemi(makaraya düzgün sarılmayı sağlar) ve sarma bölümü bulunmaktadır bu kısma filament ulaştıktan sonra çekme tekeri ve sarma hız değerleri ayarlanarak filament çapı belirlenir(1.85mm üstüne çıkılmaz 1.75mm'nin altına inilmez). Filamentin çapı çekilerek ayarlanmakta olup filamentin uzunluğu kontrol ekranından görülebilmektedir. Filament burada makaraya sarılarak 3B yazıcılarda kullanıma hazır hale gelir.



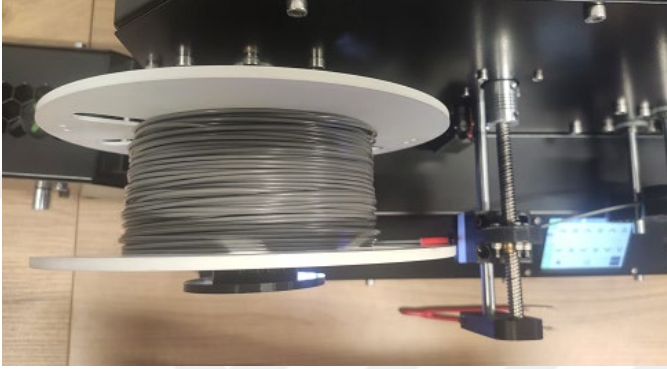
Şekil 4.13. Çekme-Sarma kısmı

İlk aşamada malzemede biraz nem olduğundan dolayı filament şekil 4.14'te görüldüğü gibi besleme kısmından kabarcıklı, prüzlü ve kırılkan yapıda çıkmıştır bu durum filament yapımına uygun değildir. İdeal filament esnek ama kırılkan olmamalıdır.



Şekil 4.14. Filamentin kabarcıklı ve prüzlü çıkışı

Malzemede nem olmasından dolayı bu aşamada ekstrüzyon durdurulmuş ve %6 demir tozu katkılı ABS kurutucuda 24 saat süreyle kurutularak tekrar ekstrüzyon işlemine alınmıştır. 24 saat kurutulduktan sonra altıncı deneme sonunda pürüzsüz ideal şekilde filament elde edilmiştir. Filament eldesinde besleme kısmı sıcaklığı 209-220 °C aralığında, vida devri 15 rpm, çekme devri 17.7 rpm ve makara sarma hızı 9.6 rpm değerlerinde uygun sonuç alınmıştır. İşlem sonunda şekil 4.15'te görüldüğü üzere 1.75mm kalınlıkta %6 demir tozu katkılı ABS'den 250gr filament elde edilmiştir. Karışımı %10 demir tozu olan ABS granüllerinde malzemenin eriyik halde bağlanma olumsuzluklarından dolayı ekstrüzyon işlemine devam edilememiştir.

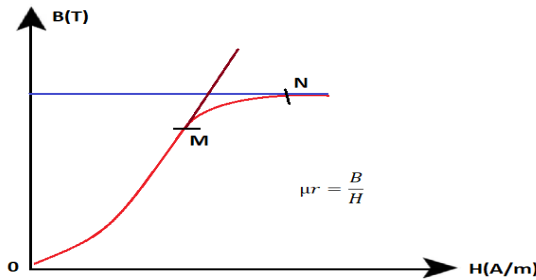


Şekil 4.15. 3B Baskıya hazır olarak elde edilmiş %6 demir tozu katkılı ABS filament

Çalışmanın bir sonraki bölümünde; elde edilen demir tozu katkılı ABS filament ve piyasada çeşitli firmaların ürettiği demir ve çelik tozu katkılı bazı PLA filamentlerin elektrik makinası yapımına uygun olup olmayacağını görebilmek için FDM 3B yazıcı baskı tekniği ile toroid nüve baskıları alınarak elektromanyetik analizleri yapılacaktır.

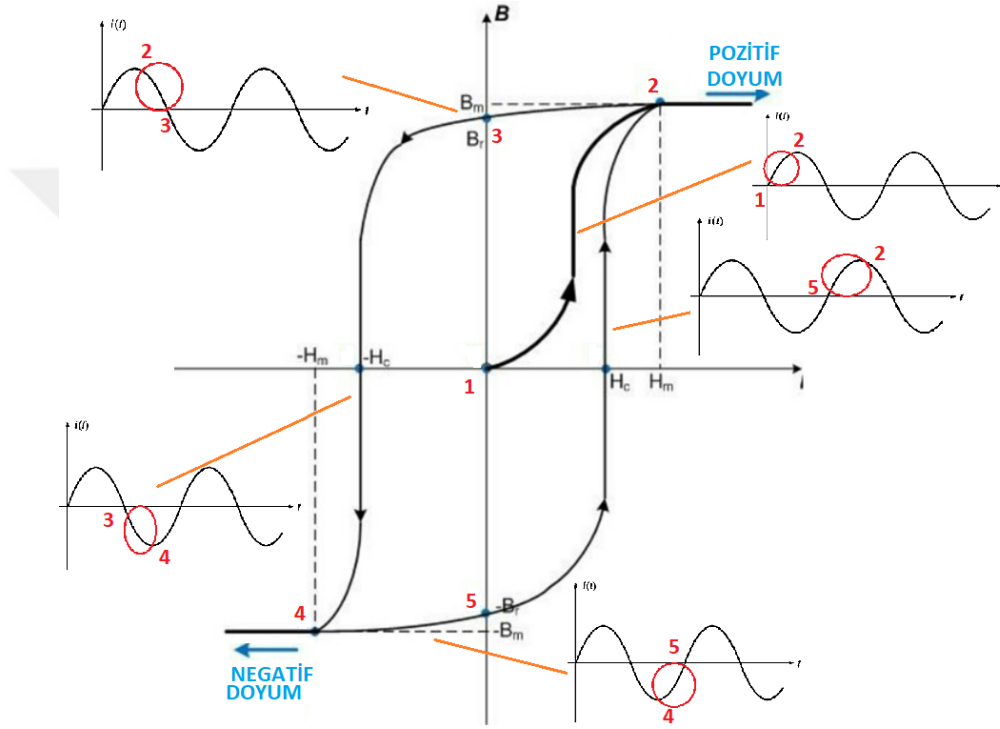
4.3. Malzemelerde Toroid Yöntemi ile B-H Eğrisinin ve Kayıpların Belirlenmesi

Ferromanyetik malzemelerde manyetik geçirgenlik(μ_r) malzemenin cinsine, manyetik alanın değerine ve malzemeye daha önce uygulanan manyetik işlemlere bağlıdır. μ_r ile H arasında matematiksel bir ilişki olmadığı için bu bağıntı $B-H$ eğrisi ile belirtilir. Manyetik alan içinde kalan ferromanyetik malzeme H alan şiddeti ile B manyetik akı yoğunluğu değişimi farklıdır ve bu değişimi gösteren eğriye şekil 4.16.'da görüldüğü gibi "mıknatıslanma eğrisi" kısaca $B-H$ eğrisi denir. Her ferromanyetik malzeme için $B-H$ eğrisi farklı olup, eğrinin eğimi malzemenin manyetik geçirgenliğini verir.



Şekil 4.16. Ferromanyetik malzeme mıknatıslanma eğrisi

Mıknatıslanma eğrisinin başlangıç bölümünde küçük H değerlerinde eğri doğrusal olarak yükselmektedir. M noktasından sonra eğri yatıklaşmakta ve yatıklaşma gittikçe artarak N noktasından sonra yatay olmaktadır, artık burada manyetik alan şiddeti çok fazla arttırılsa bile manyetik akı yoğunluğunun çok az arttığı görülür. Buradaki N noktası ferromanyetik malzemenin doyuma ulaştığı noktadır. Mıknatıslanma eğrisi ile B ve H değerlerinden birinin bilinmesiyle diğeri bulunabilir. Havanın manyetik geçirgenlik değeri 1 olup, ferromanyetik malzemelerde malzemenin cinsi ve alaşımına göre manyetik geçirgenlik değeri 100000 gibi çok yüksek değerler olabilmektedir.



Şekil 4.17. Ferromanyetik malzeme histeresiz eğrisi

Bir bobini alternatif akım kaynağına bağladığımızda, bobinden geçen mıknatıslanma akımının yönü pozitif yönden negatif yöne sürekli değişeceğinden ferromanyetik çekirdeğin manyetik histerezis döngüsü elde edilmiş olur.

Bir çekirdek mıknatıslanmamış durumda B - H manyetizasyon eğrisinde sıfır noktasında olacaktır. Şekil 4.17. incelendiğinde mıknatıslanma akımı pozitif olacak şekilde yükseltirise, manyetik alan kuvveti H , akım(i) ile doğrusal olarak artış gösterir ve manyetik akı yoğunluğu B , pozitif doyuma doğru giderken eğri (1) noktasından (2) noktasına doğru artacaktır. Bobindeki mıknatıslama akımı sıfıra doğru düştüğünde, çekirdek etrafında oluşan manyetik alan da sıfıra düşer, fakat bobinlerin manyetik akısı çekirdek içinde meydana getirdiği artık manyetizasyon(Br) sıfıra ulaşmayacaktır.

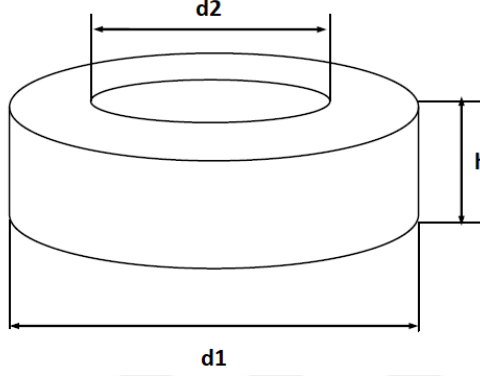
Bu durum (2) noktasından (3) noktasına doğru eğri üzerinde görülmektedir. Akım eksi alternansta (3) noktasındaki akı yoğunluğu akımın tersine akması sonucu sıfıra düşer. Buradaki artık akı yoğunluğu(Br)'nu sıfıra düşüren mıknatıslama kuvvetine Koersif Kuvvet ($-H_c$) diğer bir deyişle zorlayıcı kuvvet adı verilir. Koersif kuvvet manyetik alanı tersine çevirir. Eksi alternansta akımdaki artış çekirdeğin ters yönde manyetize olmasına ve akım arttıkça çekirdeğin ters yönde doyma noktasına ulaşmasına neden olur. Eğri üzerinde (4) noktasına ulaşmasını sağlar. Eksi alternansta mıknatıslama akımı sıfıra doğru düşmeye başlayınca çekirdekte bulunan artık manyetizasyon önceki (3) noktasındaki değere eşit fakat tersi olarak (5) noktasında oluşacaktır. Bobinden akan mıknatıslama akımı tekrar pozitif yöne döndüğünde manyetik akımın eğri üzerinde sıfıra, pozitif yönde koersif kuvvet ($+H_c$) değerine ulaşmasına ve en başta olduğu gibi manyetizasyon akımını pozitif yönde daha fazla artması çekirdeğin (2) noktasında doygunluğa ulaşmasına neden olacaktır. Böylelikle B-H eğrisi, bobinden akan mıknatıslama akımı alternatif akımın periyodu gibi pozitif ve negatif bir değer arasında değişerek Histerezis Döngüsü adı verilen (2)-(3)-(4)-(5)-(2) döngüsünü izler. Bununla birlikte, demir veya silisyum çelik gibi yumuşak ferromanyetik malzemeler küçük değerlerde artık manyetizasyon ile dar bir manyetik histerezis döngülerine sahiptir. Bu durum malzemenin kolayca manyetize ve de-manyetize olmasını sağladığından transformatörler, röleler ve solenoidlerde kullanım için ideal hale getirir. Artık manyetizasyonu yok etmek için koersif kuvvet uygulanması gerektiğinden enerji manyetik malzemede ısı olarak dağılırken oluşan ısı histerezis kaybı olarak adlandırılır, oluşan kayıp miktarı malzemenin koersif kuvvet değerine bağlıdır.

Demire silisyum gibi katkı maddeleri eklenerek dar bir histerezis döngüsüne ve çok küçük koersif kuvvete sahip malzemeler yapılabilmektedir. Yumuşak manyetik materyaller dar histerezis döngüsüne sahip olup kolayca manyetize edilerek tekrar demanyetize edilebilir. Frekansın yüksek olması B-H döngüsünü etkileyerek eğrinin genişlemesine ve çekirdeğin daha geç doyuma(saturasyon) ulaşmasını sağlar ve doyuma ulaşılması için daha yüksek bir manyetik alan şiddeti gereklidir.

Manyetik malzemelerin B-H(histeresiz) eğrisi ve kayıplarının bulunmasında Epstein, toroid ve SST(tek sac test) olarak üç farklı yöntem kullanılmaktadır. SST ile Epstein yöntemleri elektriksel çelik sac manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışmada malzeme sac şeklinde olmadığından yumuşak manyetik kompozitlerin manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan toroid yöntemi kullanılacaktır.

Toroidler, elektrik makinalarına benzer dairesel akı yolları üreten geometrileri nedeniyle makine tasarımcıları tarafından tercih edilmektedir. Toroidler ayrıca tamamen kapalı bir manyetik devre oluşturdıkları ve dolayısıyla manyetik relüktansı azalttığı için de tercih edilmektedir. Toroid numuneleri için gereken hazırlama süresi uzun olduğundan dolayı çelik sac üreticileri tarafından çok fazla tercih edilmez [46].

Toroid yönteminde kullanacağımız malzemeler elektriksel sac olmadığı için 3B baskı ile hazırlanması çok kolaydır. 3B baskı filamentini halinde olan malzemenin 3B baskı ile şekil 4.18.'de görüldüğü gibi belirli d1 dış çapı, d2 boşluk çapı ve h yükseklikte toroid baskısı yapılır.



Şekil 4.18. Toroid Nüve

Toroid çekirdeğin; l_m ortalama uzunluğu eşitlik (3.1), kesit alanı eşitlik (3.2) ve m ağırlığındaki toroidin imal edildiği malzemenin kg/m^3 biriminde yoğunluğu (ρ_v) eşitlik (3.3)'ten bulunur.

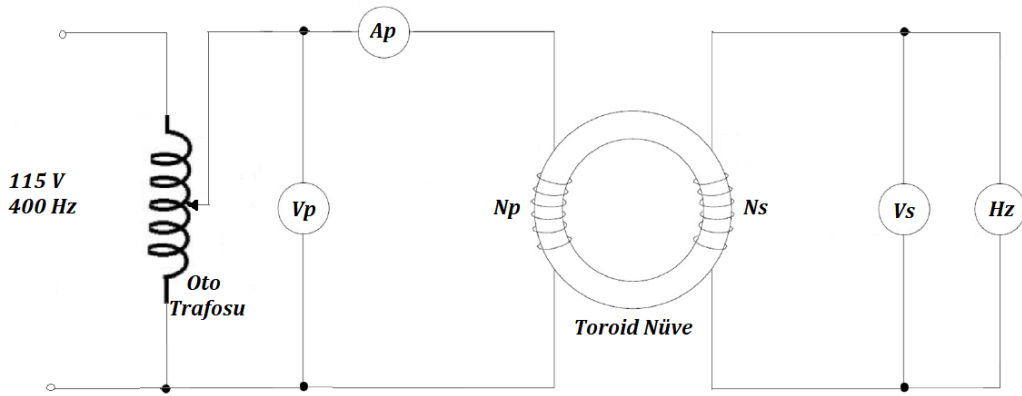
(n_{Fe} Demir doldurma faktörü 0,95 alınabilir.)

$$l_m = \frac{\pi(d1+d2)}{2} \quad (3.1)$$

$$A_m = \frac{d1-d2}{2} \cdot h \cdot n_{Fe} \quad (3.2)$$

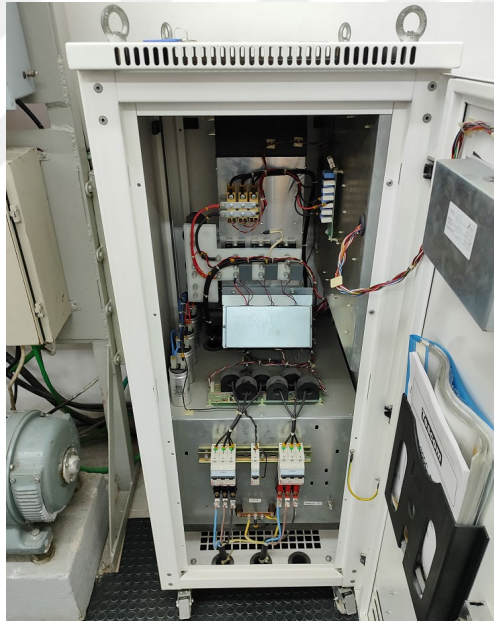
$$\rho_v = \frac{m}{A_m l_m} \quad \text{veya} \quad \rho_v = \pi \cdot h \cdot \left[\left(\frac{d1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d2}{2} \right)^2 \right] \quad (3.3)$$

3B baskısı yapılan toroid nüvenin hassas terazide ağırlık ölçümü yapıp kaydedildikten sonra sarım sayısı 1:1 olan (N_p ve N_s) primer ve sekonder sargıların aynı kesitte bobin sarımı yapılır. B-H arasındaki bağıntının grafiksel değişimini çizmek için sarımı yapılan toroid nüve için şekil 4.19.'da bağlantısı verilen ölçüm devresi düzenlenerek primer sargısından akım geçirilerek sekonder sargısından ölçüm yapılır. Tasarım yüksek frekans için olacağından uygulanan alternatif gerilim şekil 4.20.'de görülen 115V 400Hz statik frekans konvertöründen sağlanmıştır. Sargıya uygulanacak gerilimin ayarlanabilmesi için konvertörden sonra bir ototransformatörü kullanılmıştır.



Şekil 4.19. Ölçüm devresi

Yapılan ölçümlerde Primer gerilimi V_p voltmetresi, i_p Primer akımı A_p ampermetresi, Sekonder gerilimi V_s voltmetresi ve sekonderde bağlı olan frekans metreden frekans ölçülür. Primer tarafından uygulanan gerilim sıfırdan itibaren kademe kademe arttırılır ve her kademe de değerler kaydedilir. Termal takip yapılarak bobinlerin zarar görebileceği akım kademesinde gerilim kesilerek ölçüm sonlandırılır.



Şekil 4.20. 400V-50Hz / 115V-400Hz Statik Frekans Konvertörü

Yumuşak manyetik malzemenin manyetik özellikleri değerlendirilirken manyetik alan şiddeti $H(t)$ doğrudan ölçülen birincil sargı akımı $i_p(t)$ 'den eşitlik (3.4) ile bulunabilir.

$$H(t) = \frac{N_p}{l_m} \cdot i_p(t) \quad (3.4)$$

burada $i_p(t)$ ölçülen birincil sargı akımıdır, N_p sarım sayısıdır ve lm manyetik yol uzunluğunun ortalama değeridir. Sekonder bobinde indüklenen EMK'nın oluşturduğu zamanla değişen manyetik akı eşitlik (3.5) ile elde edilir.

$$B(t) = \frac{1}{N_s \cdot A_m} \int V_s(t) dt \quad (3.5)$$

burada N_s sekonder sarım sayısıdır, A_m ise toroid çekirdeğinin kesit alanıdır[47].
Pratik olarak manyetik akı yoğunluğu $B(t)$ eşitlik (3.6) ile bulunabilir.

$$B(t) = \frac{V_s \cdot 45}{N_s \cdot A_m} \quad (3.6)$$

Kilogram başına nüve kayıp değeri eşitlik (3.7) ile hesaplanır. Burada N_p , i_p primer yani mıknatıslanma sargısı parametreleri, N_s , V_s ise sekonder(B akısı ölçme bobini) sargı parametreleridir. Nüve kayıp gücü mıknatıslanma akımı ve B ölçme bobininde indüklenen gerilim ile hesaplanır. Test örneğinin kütlesi m ile ifade edilir. Kilogram başına nüve kaybı P ile belirtilmiştir[48].

$$P = \frac{1}{m} \frac{N_p}{N_s} \frac{1}{T} \int_0^T V_s i_p dt \quad (3.7)$$

Nüve kayıp değeri pratik olarak eşitlik (3.8) ile bulunabilir.

$$P = \frac{V_s \cdot i_p \cdot \sqrt{3}}{m} \quad (3.8)$$

Her kademede yapılan ölçüm değerleri verilen eşitlikler ile hesaplanarak bir tablo yapılır ve bu tablodaki değerlere göre B-H eğrisi ve demir kayıpları bulunmuş olur.

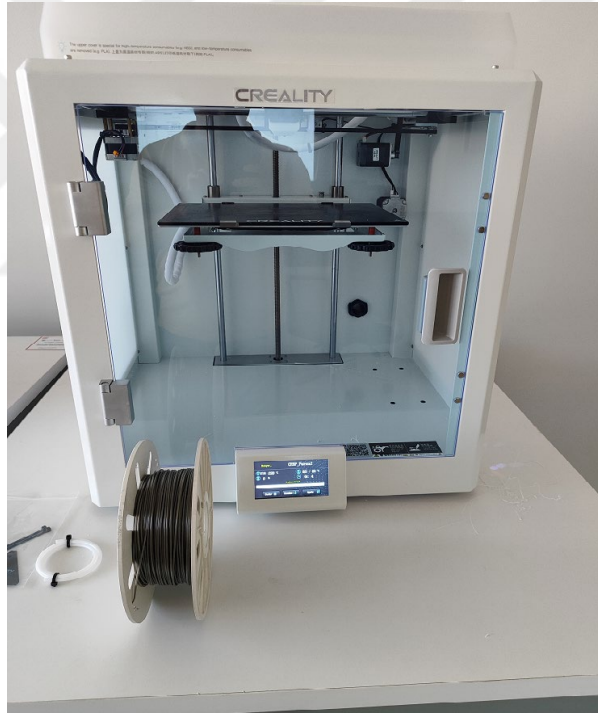
4.4. ABS ve PLA Filamentlerinin Elektromanyetik Özelliklerinin Analizi

Bu aşamada, ekstrüzyon ile ürettiğimiz %6 demir tozu katkılı ABS ve üç firmaya ait piyasada bulunabilen ferromanyetik madde eklemeli PLA malzemelerinin miktarına göre belirli çaplarda toroid nüveleri 3B yazıcıda baskıları alınmış, 1:1 oranda primer/sekonder bobin sarımları yapılmış, 400Hz kaynağa bağlanarak ölçümleri yapılmış ve çıkan değerlere göre hesaplamaları yapılarak $B-H$ eğrisi ve demir kaybı belirlenmiştir. Toroidlerin 3B baskı işlemleri Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği laboratuvarlarında, sarım ve yüksek frekansta ölçüm işlemleri ise Deniz Eğitim Öğretim Komutanlığı bağlısı Derince Eğitim Mrk. Makine Okul Komutanlığı bünyesindeki elektrik laboratuvarında yapılmıştır.

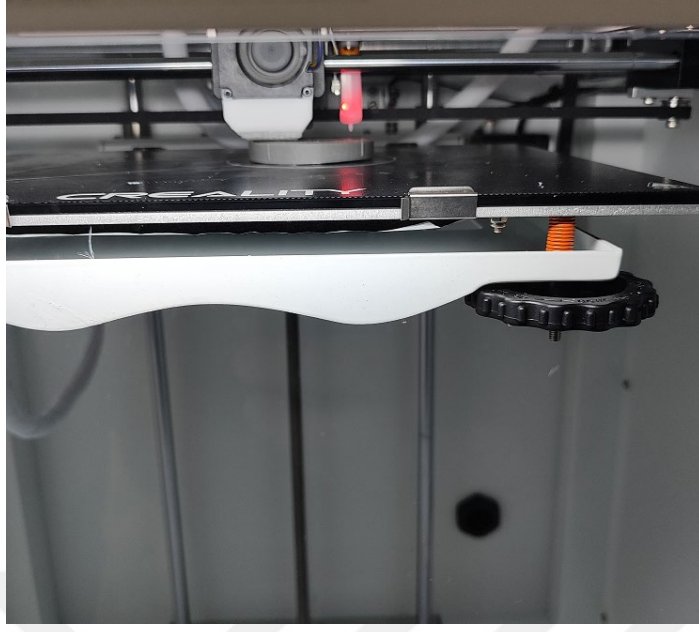
4.4.1. Ekstrüzyon ile Üretilen %6 Demir Tozu Katkılı ABS Filamentinin Analizi

Bölüm 4.2.2’de üretim süreci anlatılan demir tozu katkılı ABS filamentin toroid olarak 3B baskısının alınabilmesi için toroidin belirli ölçülerde 3B tasarım programında çizimi yapılmış ve veri dosyası (.stl) formatında 3B yazıcıya SD kart ile aktarılmıştır. Şekil 4.21’de 3B baskısı cihazı ve ABS filament görülmektedir.

Filament 3B basımında en yüksek manyetik özellik için %100 doluluk oranı seçilmiş, basım için hız 50mm/S, nozul sıcaklığı 230°C ve tabla(baskı yatağı) sıcaklığı 100°C olarak cihaz üzerindeki kontrol ekranından ayarlanmıştır. %100 doluluk oranı ve demir tozu katkılı olması ilk basım anlarında malzemenin bağlanma problemi ve nozul tıkanması gibi sorunlar görülmüştür. Denemeler sonrası baskı süresi yaklaşık 4 saat sürmüştür. Baskı anı ve basılan toroid şekil 4.22. ve 4.23’te görülmekte olup fiziksel ölçüleri tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.21. 3B baskı cihazı ve %6Fe-ABS filament



Şekil 4.22. %6Fe-ABS Toroid 3B basımı



Şekil 4.23. 3B baskısı alınan %6Fe-ABS Toroid

Basımı yapılan toroid yazıcıda radyal grid dolgu yöntemi ile basılarak 1:1 oranında bobin sarılmış ve laboratuvarında test edilmiştir.

Tablo 4.1. %6Fe-ABS Toroid fiziksel özellikleri

ABS-%6Fe Toroid	
$d1$ (mm)	60
$d2$ (mm)	29
h (mm)	8
N_p ve N_s	60
Sargı Bobin Kesiti (mm)	0,60
l_m (cm)	13,980
A_m (cm ²)	1,178
m (gr)	18
özkütle (gr/cm ³)	1,038

Toroid üzerine 1:1 oranında primer ve sekonder 60 sarım yapılmış ve şekil 4.19’da verilen ölçüm devresi kurularak ölçümler alınarak kaydedilmiştir. Uygulanan sarım ve ölçüm devresi bağlantıları şekil 4.24’te verilmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 4.2’de sunulmuştur.



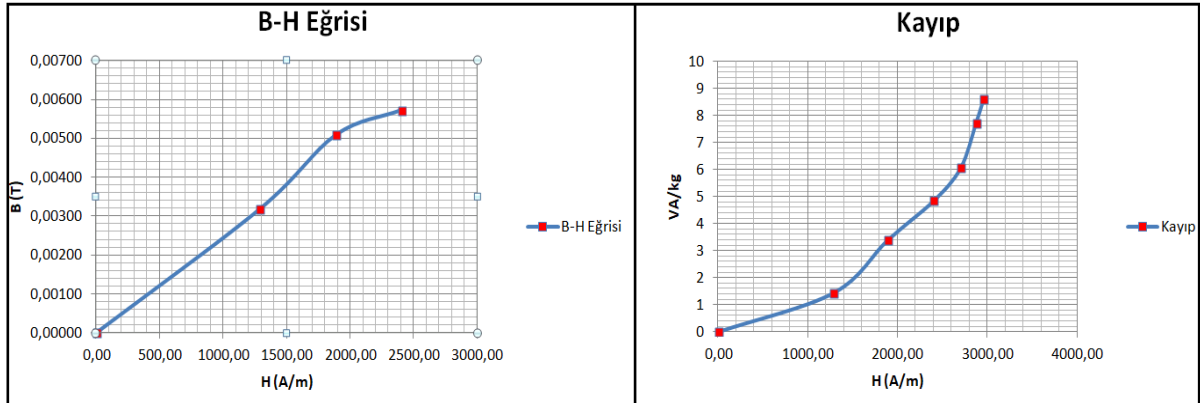
Şekil 4.24. %6Fe-ABS Toroid ölçümleri

Kurulan devrede yüksek frekanslarda gerilim, akım ve frekans ölçebilecek multimetrelerden yararlanılmıştır. Ölçümler elektronik tablolama programına aktarılmış ve bölüm 4.3’te verilen eşitlikler ile hesaplamalar yapılarak sonuçlar Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2. %6Fe-ABS Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar

ÖLÇÜM NO.	ABS-%6Fe Toroid Ölçümleri			Hesaplanan Değerler			
	V_p (V)	i_p (A)	V_s (V)	B (T)	H (A/m)	VA	VA/kg
1	0	0	0	0,00000	0,00	0	0
2	1,1	3,00	0,0050	0,00318	1287,55	0,026	1,442
3	1,65	4,40	0,0080	0,00509	1888,40	0,061	3,383
4	2,1	5,60	0,009	0,00573	2403,42	0,087	4,844
5	2,45	6,30	0,010	0,00637	2703,85	0,109	6,055
6	2,65	6,70	0,012	0,00764	2875,52	0,139	7,727
7	2,80	6,90	0,013	0,00828	2961,35	0,155	8,621

Tablo 4.2’de verilen değerlere göre elektronik tablolaama programında elde edilen mıknatıslanma B-H eğrisi ve demir kaybı grafikleri ortaya çıkarılmış olur. Şekil 4.25’te B-H ve demir kaybı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.25. %6 Fe-ABS Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri

4.4.2. Örnek-1 PLA Filamentin Toroid İmali ve Analizi

Ticari olarak piyasada 500gr’lık makara olarak satılan ve firma beyanına göre %20 demir tozu eklemeli “Örnek-1” PLA filament için toroidin belirli ölçülerde 3B tasarım programında çizimi yapılmış ve veri dosyası (.stl) formatında 3B yazıcıya SD kart ile aktarılmıştır. Şekil 4.26’da 3B baskısı anı ve PLA filament görülmektedir.



Şekil 4.26. Örnek-1 filamentin 3B baskı anı ve PLA filament

Filament 3B basımında en yüksek manyetik özellik için %100 doluluk oranı seçilmiş, basım için üretici tavsiyesi olarak hız 50mm/S, nozul sıcaklığı 215°C ve tabla(baskı yatağı)sıcaklığı 60°C olarak cihaz üzerindeki kontrol ekranından ayarlanmıştır. Baskı boyunca bir problem ile karşılaşılmamış ve yaklaşık 4 saat sürmüştür. Basılan toroid şekil 4.27’de görülmekte olup fiziksel ölçüleri tablo 4.3’te verilmiştir.



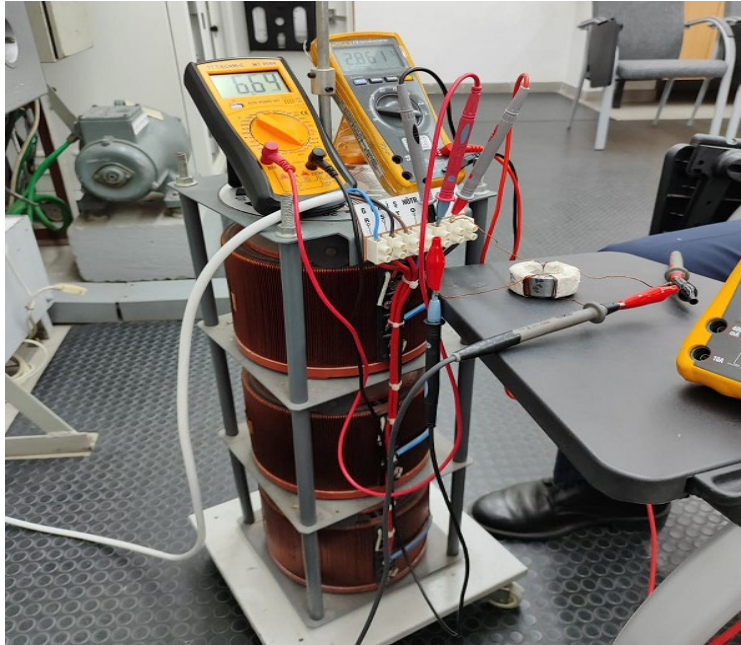
Şekil 4.27. 3B baskısı alınan Örnek-1 Toroid

3B Basımı yapılan toroid yazıcıda radyal grid dolgu yöntemi ile 3B baskısı yapılmış ve 1:1 oranında bobin sarılarak laboratuvarında test edilmiştir.

Tablo 4.3. Örnek-1 Toroid fiziksel özellikleri

Örnek-1 Toroid	
Üretici	Frosch PLA Iron Filament
Ferromanyetik Ekleme	%20 Fe
$d1$ (mm)	44
$d2$ (mm)	29
h (mm)	18
N_p ve N_s	60
Sargı Bobin Kesiti (mm)	0,60
l_m (cm)	11,467
A_m (cm ²)	1,283
m (gr)	21
özkütle (gr/cm ³)	1,356

Toroid üzerine 1:1 oranında primer ve sekonder 60 sarım yapılmış ve şekil 4.19’da verilen ölçüm devresi kurularak ölçümler alınarak kaydedilmiştir. Uygulanan sarım ve ölçüm devresi bağlantıları şekil 4.28’de verilmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 4.4’de sunulmuştur.



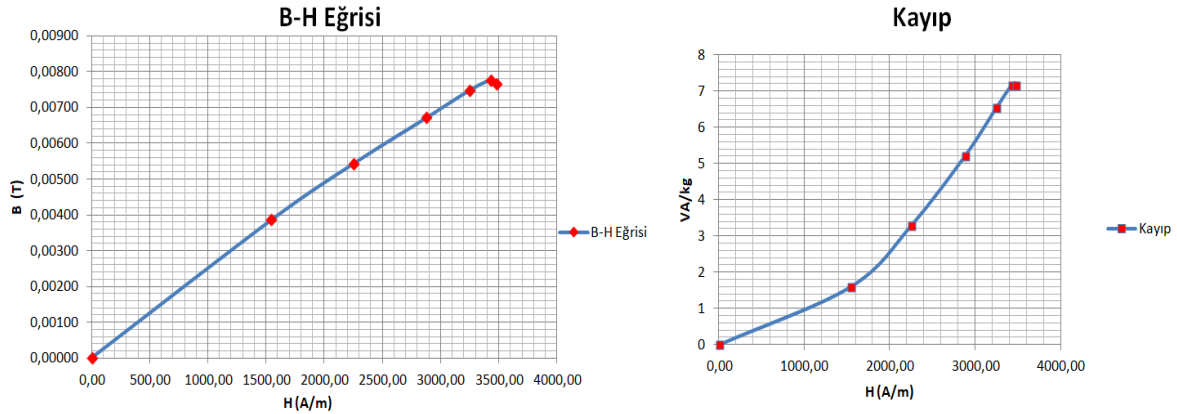
Şekil 4.28. Örnek-1 Toroid ölçümleri

Kurulan devrede yüksek frekanslarda gerilim, akım ve frekans ölçebilecek multimetrelerden yararlanılmıştır. Ölçümler elektronik tablolama programına aktarılmış ve bölüm 4.3'te verilen eşitlikler ile hesaplamalar yapılarak sonuçlar Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Örnek-1 Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar

ÖLÇÜM NO.	Örnek-1 Toroid Ölçümleri			Hesaplanan Değerler			
	V_p (V)	i_p (A)	V_s (V)	B (T)	H (A/m)	VA	VA/kg
1	0	0	0	0,00000	0,00	0	0
2	1,02	2,95	0,0066	0,00386	1543,58	0,034	1,604
3	1,58	4,30	0,0093	0,00544	2249,97	0,069	3,294
4	2,04	5,50	0,0115	0,00673	2877,87	0,109	5,210
5	2,37	6,20	0,0128	0,00749	3244,14	0,137	6,538
6	2,59	6,55	0,0133	0,00778	3427,28	0,151	7,177
7	2,70	6,65	0,0131	0,00766	3479,61	0,151	7,177

Tablo 4.4'de verilen değerlere göre elektronik tablolama programında elde edilen mıknatıslanma B-H eğrisi ve demir kaybı grafikleri ortaya çıkarılmış olur. Şekil 4.29'da B-H ve demir kaybı grafikleri verilmiştir.

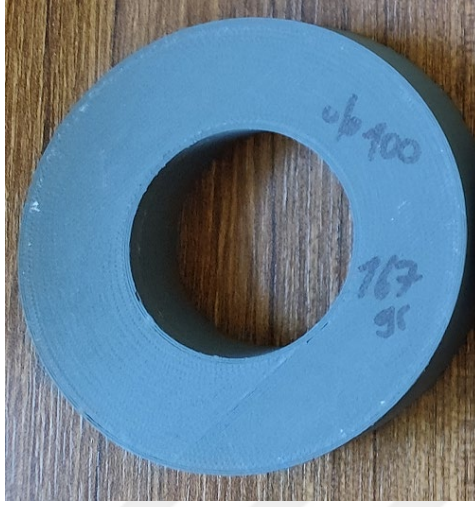


Şekil 4.29. Örnek-1 Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri

4.4.3. Örnek-2 PLA Filamentten Üretilmiş Toroid ve Analizi

Ticari olarak piyasada 750gr ve 1500gr'lık makara olarak satılan ve çelik tozu eklemeli "Örnek-2" PLA filamentin çelik tozu ekleme yüzdesi %30~ 35 olup, bu filamentin Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Müh. Laboratuvarlarında daha önce başka bir çalışma amacıyla %100 doluluk oranında 3B baskısı yapılmış örnek

toroidden yararlanılmıştır. Daha önce 3B basımı yapılmış toroid şekil 4.30’da görülmekte olup fiziksel ölçüleri tablo 4.5.’te verilmiştir.



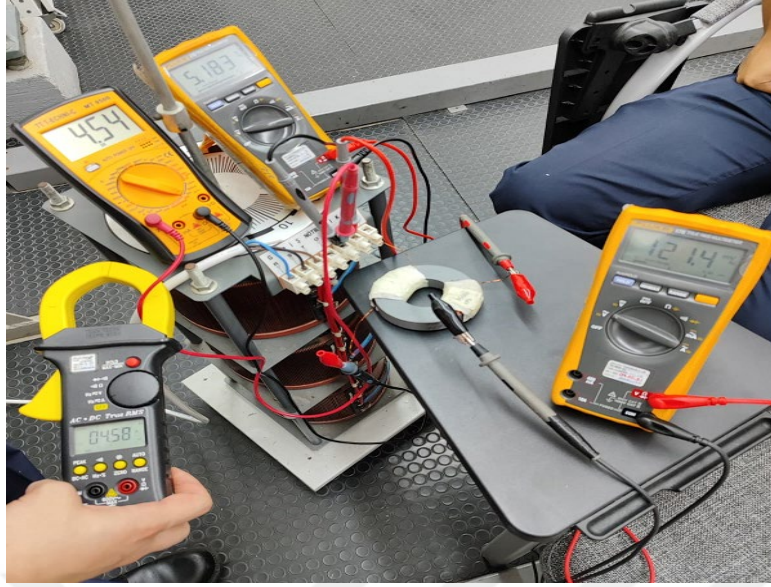
Şekil 4.30. Örnek-2’den imal edilmiş toroid

Örnek-2 toroide 1:1 oranında bobin sarılmış ve laboratuvarında test edilmiştir.

Tablo 4.5. Örnek-2 Toroid fiziksel özellikleri

Örnek-2Toroid	
Üretici	Colorfabb Steelfill Filament
Ferromanyetik Ekleme	%30-35 Çelik Tozu
$d1$ (mm)	79,1
$d2$ (mm)	39,3
h (mm)	15
N_p ve N_s	100
Sargı Bobin Kesiti (mm)	0,60
l_m (cm)	18,598
A_m (cm ²)	2,836
m (gr)	167
özkütle (gr/cm ³)	3,008

Toroid üzerine 1:1 oranında primer ve sekonder 100 sarım yapılmış ve şekil 4.19’da verilen ölçüm devresi kurularak ölçümler alınarak kaydedilmiştir. Uygulanan sarım ve ölçüm devresi bağlantıları şekil 4.31’de verilmiştir.



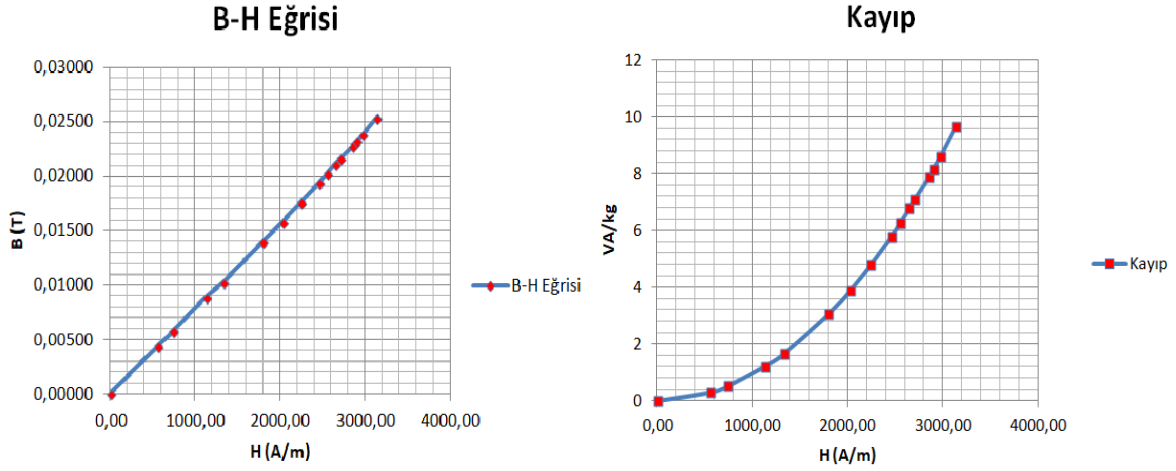
Şekil 4.31. Örnek-2 Toroid ölçümleri

Kurulan devrede yüksek frekanslarda gerilim, akım ve frekans ölçebilecek multimetrelerden yararlanılmıştır. Ölçümler elektronik tablolama programına aktarılmış ve bölüm 4.3'te verilen eşitlikler ile hesaplamalar yapılarak sonuçlar Tablo 4.6'da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Örnek-2 Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar

ÖLÇÜM NO.	Örnek-2 Toroid Ölçümleri			Hesaplanan Değerler			
	V_p (V)	i_p (A)	V_s (V)	B (T)	H (A/m)	VA	VA/kg
1	0	0	0	0,00000	0,00	0,000	0
2	1	1,04	0,0275	0,00436	559,19	0,049	0,296
3	1,4	1,37	0,0360	0,00571	736,63	0,085	0,511
4	2,16	2,10	0,0560	0,00889	1129,14	0,203	1,218
5	2,57	2,48	0,0648	0,01028	1333,46	0,278	1,665
6	3,5	3,34	0,0880	0,01396	1795,87	0,508	3,045
7	4	3,77	0,0995	0,01579	2027,07	0,649	3,886
8	4,56	4,17	0,1108	0,01758	2242,15	0,799	4,786
9	5,05	4,57	0,1220	0,01936	2457,22	0,965	5,776
10	5,51	4,75	0,1275	0,02023	2554,01	1,048	6,274
11	5,8	4,92	0,1330	0,02111	2645,41	1,132	6,779
12	6	5,03	0,1360	0,02158	2704,56	1,183	7,087
13	6,55	5,31	0,1434	0,02276	2855,11	1,317	7,888
14	6,80	5,4	0,1460	0,02317	2903,50	1,364	8,167
15	7,05	5,53	0,1500	0,02380	2973,40	1,435	8,5931
16	7,60	5,84	0,1600	0,02539	3140,08	1,617	9,6797

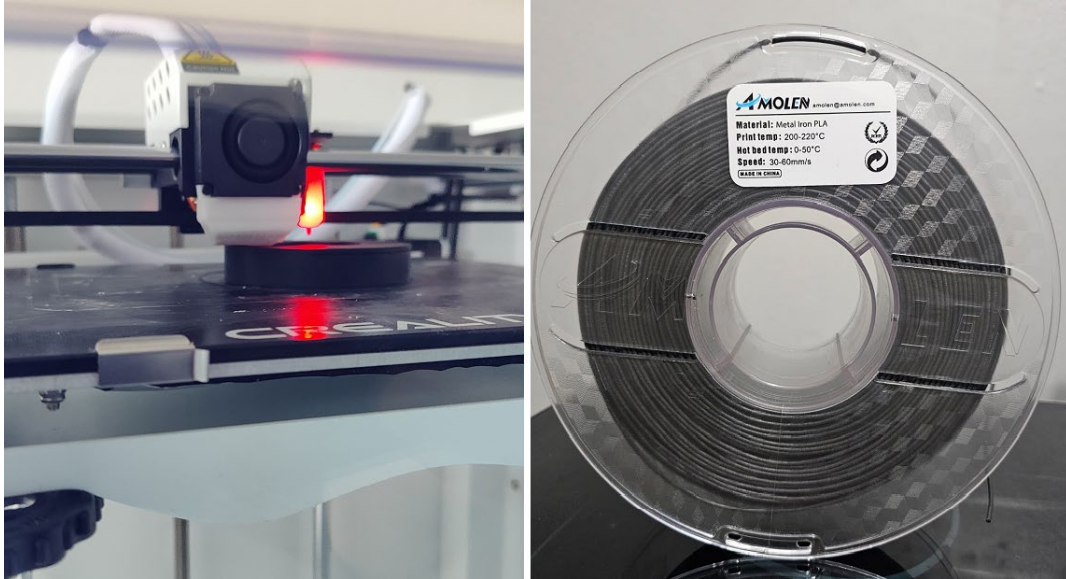
Tablo 4.6’da verilen değerlere göre elektronik tablolaama programında elde edilen mıknatıslanma B-H eğrisi ve demir kaybı grafikleri ortaya çıkarılmış olur. Şekil 4.32.’de B-H ve demir kaybı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.32. Örnek-2 Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri

4.4.4. Örnek-3 PLA Filamentin Toroid İmali ve Analizi

Ticari olarak piyasada 1kg’lık makara olarak satılan ve firma beyanına göre %20 demir tozu eklemeli “Örnek-3” PLA filament için toroidin belirli ölçülerde 3B tasarım programında çizimi yapılmış ve veri dosyası (.stl) formatında 3B yazıcıya SD kart ile aktarılmıştır. Şekil 4.33’te 3B baskısı anı ve PLA filament görülmektedir.



Şekil 4.33. Örnek-3 filamentin 3B baskı anı ve PLA filament

Filament 3B basımında en yüksek manyetik özellik için %100 doluluk oranı seçilmiş, basım için üretici tavsiyesi olarak hız 50mm/S, nozul sıcaklığı 215°C ve tabla(baskı yatağı)sıcaklığı 32°C olarak cihaz üzerindeki kontrol ekranından ayarlanmıştır. Baskı boyunca bir problem ile karşılaşılınmamış ve yaklaşık 4 saat sürmüştür. Basılan toroid şekil 4.34'te görülmekte olup fiziksel ölçüleri tablo 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.34. 3B baskısı alınan Örnek-3 Toroid

3B Basımı yapılan toroid yazıcıda radyal grid dolgu yöntemi ile 3B baskısı yapılmış ve 1:1 oranında bobin sarılarak laboratuvarında test edilmiştir.

Tablo 4.7. Örnek-3 Toroid fiziksel özellikleri

Örnek-3 Toroid	
<i>Üretici</i>	AMOLEN Metal Iron PLA Filament
<i>Ferromanyetik Ekleme</i>	%20 Fe
<i>d1 (mm)</i>	80
<i>d2 (mm)</i>	40
<i>h (mm)</i>	15
<i>N_p ve N_s</i>	100
Sargı Bobin Kesiti (mm)	0,60
<i>l_m (cm)</i>	18,85
<i>A_m (cm²)</i>	2,85
<i>m (gr)</i>	57
<i>özkütle (gr/cm³)</i>	1,007

Toroid üzerine 1:1 oranında primer ve sekonder 60 sarım yapılmış ve şekil 4.19’da verilen ölçüm devresi kurularak ölçümler alınarak kaydedilmiştir. Uygulanan sarım ve ölçüm devresi bağlantıları şekil 4.35’de verilmiştir.



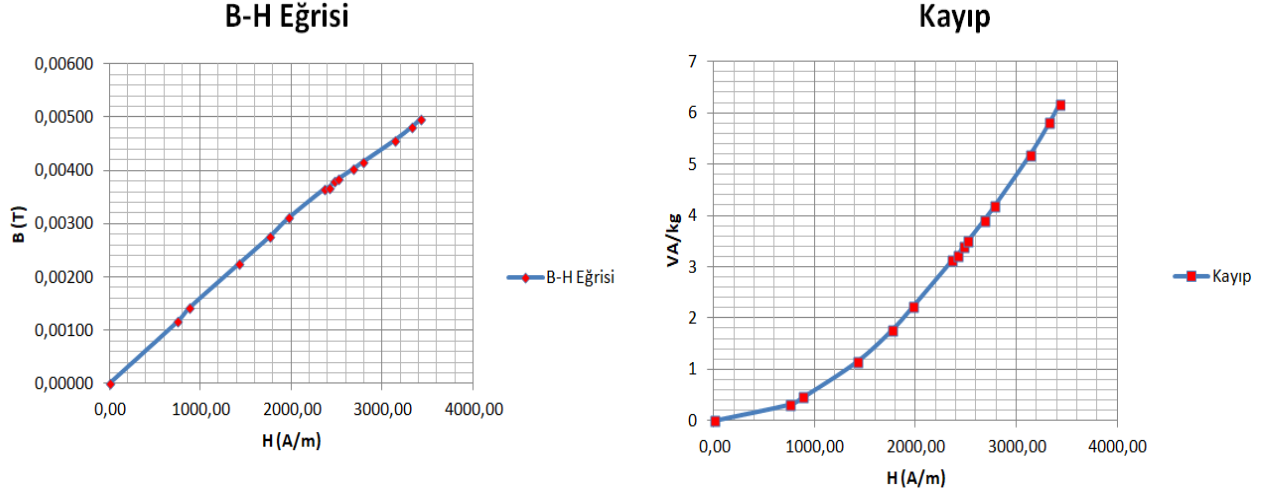
Şekil 4.35. Örnek-3 Toroid ölçümleri

Kurulan devrede yüksek frekanslarda gerilim, akım ve frekans ölçebilecek multimetrelerden yararlanılmıştır. Ölçümler elektronik tablolama programına aktarılmış ve bölüm 4.3’te verilen eşitlikler ile hesaplamalar yapılarak sonuçlar Tablo 4.8’de sunulmuştur.

Tablo 4.8. Örnek-3 Toroid ölçüm değerleri ve hesaplamalar

ÖLÇÜM NO.	Örnek-3 Toroid Ölçümleri			Hesaplanan Değerler			
	V_p (V)	i_p (A)	V_s (V)	B (T)	H (A/m)	VA	VA/kg
1	0	0	0	0,00000	0,00	0,000	0
2	1	1,42	0,0074	0,00117	753,33	0,018	0,319
3	1,23	1,66	0,0090	0,00142	880,66	0,026	0,454
4	1,98	2,68	0,0142	0,00224	1421,78	0,066	1,155
5	2,5	3,33	0,0175	0,00276	1766,62	0,101	1,769
6	2,82	3,72	0,0197	0,00311	1973,52	0,127	2,224
7	3,48	4,45	0,0231	0,00365	2360,80	0,178	3,120
8	3,88	4,55	0,0233	0,00368	2413,85	0,183	3,218
9	4,06	4,66	0,0240	0,00379	2472,21	0,193	3,394
10	4,25	4,74	0,0243	0,00384	2514,65	0,199	3,496
11	4,72	5,05	0,0255	0,00403	2679,11	0,223	3,908
12	5,13	5,25	0,0263	0,00415	2785,21	0,239	4,191
13	5,50	5,91	0,0289	0,00456	3135,35	0,295	5,184
14	6	6,27	0,0305	0,00482	3326,34	0,331	5,804
15	6,70	6,46	0,0315	0,00497	3427,14	0,352	6,1761

Tablo 4.8’de verilen değerlere göre elektronik tablola programında elde edilen mıknatıslanma B-H eğrisi ve demir kaybı grafikleri ortaya çıkarılmış olur. Şekil 4.36’da B-H ve demir kaybı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.36. Örnek-3 Toroid B-H ve demir kaybı grafikleri

4.4.5. Toroid Örneklerinin Değerlendirilmesi

Yapılan ölçüm ve testler sonucunda en iyi ferromanyetik özellikleri çelik tozu eklemeli olmasından dolayı örnek-2 göstermiştir. Örnek-2’yi sırasıyla örnek-3, %6Fe+ABS ve örnek-1 takip etmektedir. İncelenen malzemeler; oluşan manyetik akı yoğunluğunun çok düşük olması ve yumuşak demir veya silikon çelik gibi hızlı manyetisasyon ve de-manyetizasyon özelliklerine sahip olmamaları sebebiyle ASM imali için verimsiz kalmaktadır. 400Hz frekansta ölçümler yapıldığından dolayı B-H grafiklerinde doyuma ulaşma daha yüksek manyetik alan şiddetlerinde olmaktadır.

Burada uygulanan FDM 3B baskı yöntemi ile elektrik makinası imalinde sabit mıknatıs içeren elektrik makinalarında daha iyi sonuçlar alınabileceği değerlendirilmektedir. Manyetik analizi yapılan Toroid örneklerinin 3B baskısı alındıktan sonra, toroidlerin multimetre(Fluke 175) ile direnç ve süreklilik testinde herhangi bir direnç değeri/iletkenlik göstermedikleri; izolasyon test cihazı(Megger) ile yapılan testte ise skalada sonsuz değere yakın çok yüksek direnç değerinde kaldığı görülmüştür. Bu durum girdap akımları kayıplarının elektriksel lamine çeliğe göre çok az olacağını göstermekte ve çalışma frekansı arttıkça bunun oldukça önemli bir avantaj olacağı değerlendirilmektedir. Stator imalinde kullanılacak olan ferromanyetik malzeme eklemeli PLA, hem yalıtkan hem de ferromanyetik bir özellik gösterdiğinden stator sarımı için önemli bir avantaj olarak bobin telleri gerekirse prensband kullanılmadan oluklara sarılabilir.

5. ASM MODELLEMESİ

Bir asenkron motorun tasarımı yapılmadan önce tasarım parametrelerinin belirlenmesi gereklidir. Günümüzde imalatçılar; motor tasarımında tasarım parametreleri, motor boyutları, kutup sayısı ve oluk sayısı belirlendikten sonra bilgisayarda çeşitli analiz programları ile üretim öncesi çalışma değerleri ve simülasyonu değerlendirerek imalat için en uygun çalışma karakteristiğine sahip motoru belirlerler.

Bu bölümde;

- Tasarım parametreleri belirlenecek ve Marmara Üniversitesi lisanslı Ansys® Maxwell Rmxprt programı kullanılarak ASM modellemesi yapılacaktır.
- ASM'un simülasyonu (benzetimi) yapılarak, optimetric özelliği kullanılarak modelde çeşitli parametreler değiştirilerek analiz karşılaştırmaları yapılacaktır.
- Yapılan analiz sonucu en iyi verimin alındığı model, Ansys Maxwell den 3B basımı için farklı dosya uzantısı ve formatta dışarıya aktarılacaktır.
- Marmara Üniversitesi lisanslı Solidworks® programında düzenlemesi ve ek mekanik kısımların tasarımları yapılacaktır.
- Tasarımın 3B yazıcı için uygun formatta (.stl) kopyası alınarak baskı işlemi yapılacaktır.
- Baskısı yapılan ASM stator sarımı, rotora bakır kısa devre çubuk ve halka eklenmesinden sonra mekanik montajı yapılacak ve ayarlı 400Hz güç kaynağına bağlanarak testi yapılacaktır.

Ansys Maxwell elektrik ya da manyetik alan problemlerini çözmek için sonlu elemanlar yöntemini (Finite Element Analysis) kullanan yüksek performanslı bir interaktif yazılım paketidir. Ansys Maxwell programı uzayın sınırlı bir bölgesinde yer alan elektromanyetik alan problemlerini uygun sınır koşullarında ve kullanıcı tarafından belirlenen başlangıç şartlarını da göz önüne alarak Maxwell denklemleri yardımı ile çözer. Programda yer alan çözücünün (solver) seçimine bağlı olarak uygun denklem setleri ve terimler kullanılarak çözüm gerçekleştirilir. Ansys Maxwell'de üç farklı tasarım tipi (design types) bulunmaktadır. Bunlar; Rmxprt, Maxwell 2D ve Maxwell 3D'dir. Rmxprt (Rotation Machinery Expert) elektrik makinalarının tasarımı ve analizinde kullanılmaktadır. Maxwell 2D, XY ya da RZ düzlemlerinde; Maxwell 3D ise üç boyutlu olarak elektromanyetik alan çözümlerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, herhangi bir geometriyi küçük parçalara ayırarak elde edilen ve sonlu eleman olarak adlandırılan bu parçalardan elde edilen çözüm yöntemini ifade etmektedir.[49]

Motor lamine çelik nüvesiz ve 3B bir yazıcı ile üretilecektir. Motor tasarımında çok fazla parametre ve hesaplanması gereken işlem vardır. Bilgisayar desteği almadan bu işlemleri yapmak uzun zaman ve işlem dikkati gerektirmesinin yanında hatalara da zemin hazırlar. Ürün çalışma simülasyonu da yapılamayacağından prototip üretiminin fazla çeşitli ve uzun bir zaman almasına yol açar. Ansys'te bulunan Rmxprt modülü ile motor parametreleri girilerek motorun 2B ve 3B modellenmesi yapılabilir, çalışma değerleri görülebilir ve

böylece motor simüle ve analiz edilebilir. Ansys'te bulunan Optimetrics özelliği ile motor parametrelerinde başlangıç-bitiş parametreleri ve parametre adımları belirlenerek her adım için ayrı modelleme ve tasarım yapılabilmekte ve değişkenler için grafik analizi yapılabilir. Bu özellik ile en uygun olabilecek parametreler bulunmuş ve optimizasyon sağlanmış olur. Uygun görülen tasarım Ansys Maxwell'den farklı programlarda çalışabilmek için dosya uzantısı farklı (dxf, step) olarak dışarı alınabilir.

5.1. Boyut

Bu çalışmada stator, rotor, mil ve yataklama elemanları tek parça şeklinde 3B yazıcı yardımı ile üretilecek olup baskı boyutları 3B baskı makinesinin baskı alanı ile kısıtlı kalmaktadır. 3B baskı makinesinin hatasız çalışma süresi, nozul tıkanma ve malzemenin bağlanma problemleri, ferromanyetik malzeme dolgulu PLA filamentlerin elektrik makinalarının imaline çok uygun olmaması diğer kısıtlılıklar olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanılan yazıcı yüzey alanı 256mm x 256mm olup tedarik imkanlarının kısıtlı olmasından dolayı bölüm 4.4.4'te incelenen örnek-3 PLA kullanılmıştır. Örnek-3 PLA malzemenin grid dolgu yöntemiyle %100 doluluk oranında basılması nedeniyle stator dış çapı(D_o) 125mm ve stator boyu(L) 28mm olarak yaklaşık 11 saatte basılabilmektedir.

5.2. Malzeme

Çalışmada bobin telleri, kısadevre bakır çubukları, rulmanlar hariç diğer parçalardan stator %100 dolulukta örnek-3 demir dolgulu PLA ile basılmış; rotor, mil, ve yataklama elemanları ferromanyetik özellik içermeyen ABS ile basılmıştır. ABS ile basılan elemanların basımında hafiflik ve mekanik dayanım için %45 doluluk oranı tercih edilmiştir. PLA, ABS vb. polimerler ile üretim elektrik makinalarında kullanılan silisli lamine çelik kullanma zorunluluğunu kısmen kaldırarak üretimi ve sürdürülebilirliği kolay, hafif makina üretiminde gelişmeye açık bir alan olacağı değerlendirilmektedir. Ferromanyetik malzeme dolgulu PLA'nın tanecikli yapısı sayesinde eddy akım kayıpları en aza indirgenmiş olur. Elektriksel olarak yalıtkan olması sebebiyle sargıların sarımlarında presbant kullanım zorunluluğunu ortadan kaldırır. ABS'den üretilmiş rotor üzerinde alüminyum enjeksiyon malzemeye zarar vereceğinden dolayı yapılamamaktadır bu sebeple bakır tercih edilmiştir. Elektrik makinalarında alüminyum yerine bakır kullanıldığında daha yüksek verim eldesi sağlanmaktadır.

5.3. ASM Tasarımı

ASM tasarımında stator iç çapı D_i ve stator nüve uzunluğu L makinanın ana boyutları olarak tanımlanmaktadır. Makinanın hava aralığındaki toplam manyetik akı toplam manyetik yükleme olarak adlandırılır. Makinanın hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğu spesifik manyetik yükleme (B_{ort}) olarak bilinir. 400 Hz'lik motorların tasarımında B_{ort} 'nın daha küçük değerleri kullanılır.[30]

Buna göre ASM tasarımında bazı eşitlikler yazılabilir:

$$\text{Toplam Manyetik Yükleme(Wb)}=p\phi \quad (5.1)$$

$$B_{ort} = \frac{p\phi}{\pi D_i L} \quad (T) \quad (5.2)$$

Makinanın nüvesindeki akı yoğunluğu spesifik manyetik yükleme ile doğrudan orantılıdır. Bu sebeple yüksek hızlı AC makinalar için spesifik manyetik yüklemelerin seçiminde laminasyon malzemesinin doyum seviyesinden daha çok nüve kayıplarının sınırlayıcı faktör olması daha çok önem kazanır. Örneğin 400 Hz frekansta çalışan bir makinanın nüve kayıplarının kabul edilebilir seviyede tutulması için 50 Hz frekansta çalışan eşdeğer makinanın yarısı değerinde hatta daha az değerinde tutulması gerekir. Böyle yüksek frekanslı makinalarda çoğu kez standart silikonlu demir laminasyonlara göre daha düşük demir kayıpları olan ve pahalı laminasyon malzemeleri kullanılır. 400 Hz’de özel alaşımlardan veya tanecik yönlendirmeli elektrik çeliklerinden yapılan daha ince laminasyonlar kullanılır[30]. Bu nedenle 400 Hz makinaların maliyeti 50/60 Hz makinalara göre daha yüksektir.

ASM’ların stator amper-iletkenin toplamı toplam elektriksel yükleme olarak adlandırılır. Hava aralığında stator amper iletkenin sayısı spesifik elektriksel yükleme (ac) olarak bilinir (ac amper c-conductor veya iletkenin kısaltmasıdır). Buna göre aşağıdaki eşitlikler yazılabilir[30]:

$$\text{Toplam Elektriksel Yükleme(amper-iletken)}=I_z Z \quad (5.3)$$

$$ac = \frac{I_z Z}{\pi D_i} \quad (\text{amper-iletken/m}) \quad (5.4)$$

Döner elektrik makinalarının tasarımındaki ilk adım $D_i^2 L$ çarpımının elde edilmesidir; bu eşitlik spesifik yüklemelerin uygun değerlerinin seçilmesinde önemli olup makinanın hacmi ile orantılıdır.

Bir AC makinada sanal iç güç(P_{sn}) eşitlik (5.5)’te verilmiştir.

$$P_{sn} = C_0 D_i^2 L n_s \quad (\text{kVA}) \quad (5.5)$$

kVA giriş (P_{sn}), anma çıkış gücü (P_0), verim (η) ve güç faktörü ile eşitlik (5.6)’da verildiği gibi ifade edilir.

$$P_{sn} = \frac{P_0(kW)}{\eta \cdot \cos\phi} \quad (5.6)$$

Eşitlik (5.7)'de verilen C_0 eşitliği ise çıkış katsayısıdır.

$$C_0 = 1,11\pi^2 B_{ort} ac K_w \times 10^{-3} \quad (5.7)$$

Eşitliklerde P_{sn} motorun kVA güç girişi, B_{ort} hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğu (T), ac spesifik elektriksel yükleme (metre başına amper-iletken), D_i ve L sırasıyla hava aralığının(stator iç çapı) çapı ve stator nüve uzunluğu (metre), K_w sargı faktörü ve n_s senkron hızdır (dev/s).

Sargı faktörü (K_w) eşitlik (5.8) ile ifade edilir.

$$K_w = K_d.K_c \quad (5.8)$$

Eşitlikte K_d ve K_c sırasıyla primer sargısının dağılım faktörü ve kısaltma (veya adım) faktörüdür. Tasarımda dağılım faktörü üç fazlı motorlar için 0,955 olarak alınabilir ve adım faktörü bir (1) kabul edilebilir.

Kutup adımı(τ) eşitlik (5.9)'da verilmiştir.

$$\tau = \frac{\pi D_i}{p} \quad (5.9)$$

Büyük kutup adımına ve küçük kutup sayısına sahip bir motor küçük kutup adımlı motora göre daha yüksek güç faktörüne sahip olur. L/τ oranının makinada etkilediği faktörler şöyledir[30],

- L/τ 1,5 - 2,0 arasında ise minimum maliyeti verir.
- L/τ 1,5'e eşit ise iyi verimi verir.
- L/τ 1,0 - 1,5 arasında ise minimum güç faktörünü verir.
- L/τ 1,0'e eşit ise dengeli bir tasarımı verir.

Rotor ve stator arası minimum hava aralığı uzunluğu l_g (mm) eşitlik (5.10)'da verildiği gibi deneysel formülden hesaplanır[30],

$$l_g = 3,06 - \frac{6560}{D+2280} \quad (5.10)$$

ASM'larda stator sargısında indüklenen gerilim eşitlik (5.11)'de verildiği gibi ifade edilir.

$$E_s = 4,44 f \emptyset T_s K_w \quad (5.11)$$

Eşitlikte E_s faz başına stator sargısında indüklenen gerilim (V), f kaynak frekansı (Hz), $\emptyset$ kutup başına akı (Wb), T_s faz başına stator sarım sayısı ve K_w stator sargı faktörüdür. Tasarım yaparken motor faz gerilimi ve frekansı belirlendikten sonra eşitlik (5.11) ile T_s faz başına stator sarım sayısı bulunur.

Kutup başına akı $\emptyset$ eşitlik (5.12)'de verildiği gibi hava aralığı ortalama akı yoğunluğu B_{ort} , kutup adımı (τ) ve stator nüve uzunluğu (L) ile ifade edilebilir,

$$\emptyset = B_{ort} \tau L \quad (5.12)$$

Stator faz akımı eşitlik (5.13)'te verildiği gibi elde edilir,

$$I_s = \frac{P_0 \times 10^3}{3 V_{faz} \cos \emptyset \eta} \quad (5.13)$$

Stator akım yoğunluğu sıcaklık artış sınırlarını aşmadan istenilen verimi elde edilebilecek şekilde seçilmelidir. Standart ASM'lerde stator sargısındaki akım yoğunluğu (δ_s) görev tipine ve kullanılan vantilasyon metoduna bağlı olarak 3 ve 6 A/mm² arasında alınabilir[30].

Stator iletkeninin kesit alanı (a_s) eşitlik (5.14) ile bulunabilir,

$$a_s = \frac{I_s}{\delta_s} \quad (5.14)$$

ASM tasarımında tork hız karakteristiklerindeki gürültü, manyetik kilitlenme ve çakışma durumlarına engel olmak için stator oyuk sayısı ile rotor oyuk sayısı birbirini ile eşit tasarlanmaz. Genellikle rotor oyuk sayısı stator oyuk sayısından % 15-30 daha büyük veya küçük olduğu tasarımlar tercih edilir[30].

400 Hz ASM motorları için kutup sayısına göre stator/rotor oluk sayısı

- 2 kutup 12/16, 18/23
 - 4 kutup 12/10, 12/14, 18/22, 24/15, 24/30, 36/30
 - 6 kutup 12/21, 18/22, 36/30, 36/44
 - 8 kutup 36/44
- kombinasyonları kullanılmaktadır[30].

Toplam rotor amper-sarımı toplam stator amper-sarımının 0,85 ve 0,9 katı arasında alınabilir. Lamine çelik ASM'lerde sincap kafes çubukları ve rotor nüvesi arasında yalıtım kullanılmaz[30]. Bu çalışmada; EMK prensip olarak sincap kafes üzerinde olduğundan rotor içi sincap kafes bakırdan, rotor ABS malzemeden üretilmiştir. Rotor statora göre daha yüksek bir akım yoğunluğuna sahiptir.

İndüksiyon motorunun yüksüz akımı iki bileşenden oluşur: uygulanan gerilim ile 90° faz farklı mıknatıslama akımı (I_m) ve gerilimle aynı fazda kayıp bileşeni (I_p)[30]. 3 fazlı motorlar için faz başına yüksüz kayıp bileşeni ve faz başına yüksüz akım eşitlik (5.15) ve (5.16)'da verilmiştir.

$$I_p = \frac{\text{Toplam Yüksüz Kayıplar}}{3E_s} \quad (5.15)$$

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_p^2} \quad (5.16)$$

5.4. ASM Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi ve Simülasyonu

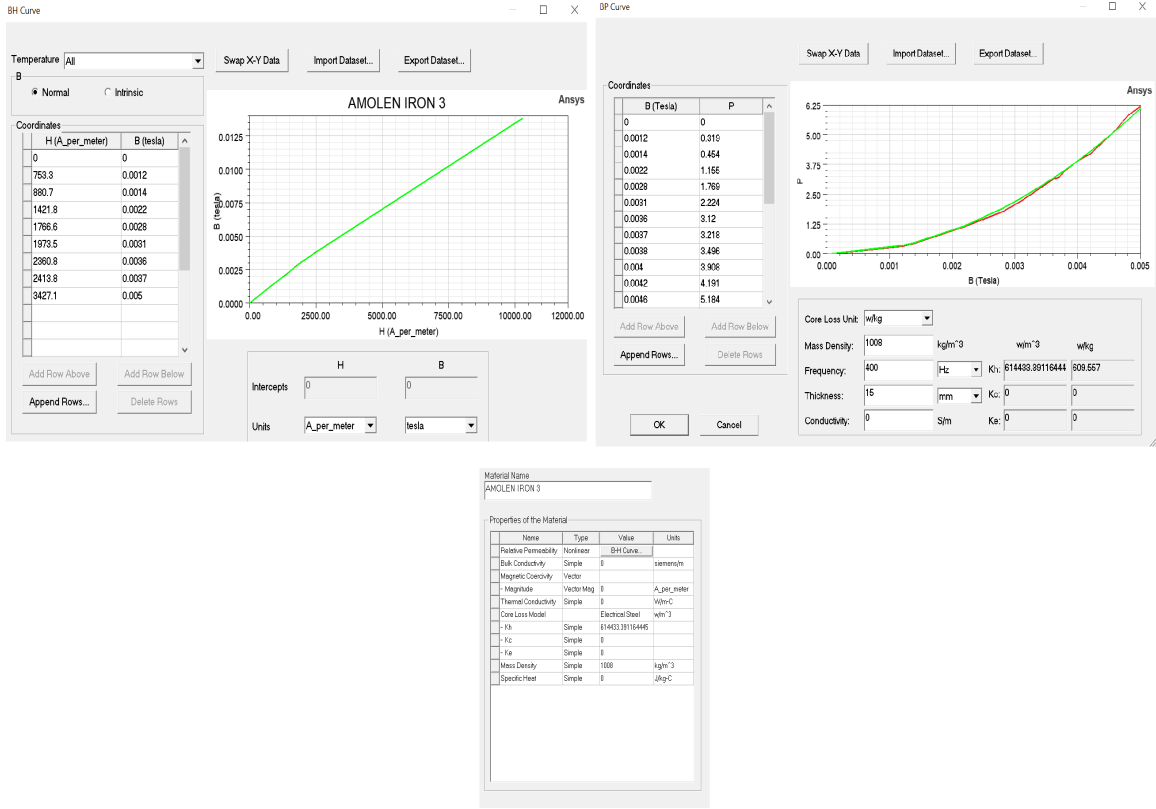
Tasarım parametreleri olarak ASM tasarımında motorun gücü, çalışma gerilimi, frekansı, kutup sayısı, stator/rotor oluk sayısı ve oluk biçimlerinin belirlenmesi gerekir. 3B baskı makinasının baskı alanı sınırlarına göre güç, stator iç çapı D_i ve stator nüve uzunluğu L olabilecek en uygun değerlerde seçilmiştir. 3B baskı kısıtlılıkları ve stator malzemesinin manyetik karakteristiğinin çok müsait olmaması nedeniyle güç 750W olarak öngörülmüştür. Deneysel bir prototip olması sebebiyle ve daha küçük motor hacmi için nominal gerilimi 70V 400Hz olarak tasarlanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre Ansys Maxwell simülasyon programında yapılan simülasyonlarda kullanılan temel motor parametreleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Temel Motor Parametreleri

U (Faz Gerilimi)	70 V
Bağlantı Tipi	Yıldız
P (Çıkış Gücü)	750 W
Frekans	400 Hz
2P (Kutup Sayısı)	6
D_o (Stator Dış Çapı)	125 mm
D_i (Stator İç Çapı)	60 mm
L (Stator Boyu)	28 mm
S_s (Stator Oluk Sayısı)	18
S_r (Rotor Oluk Sayısı)	22
D_r (Rotor Çapı)	59,5 mm
Rotor Mil Çapı (mm)	15 mm
Sargı Bobin Çapı	0,6 mm
Sarım Sayısı (Bir Oluktaki İletken Sayısı)	80

5.4.1. Stator Tasarımı

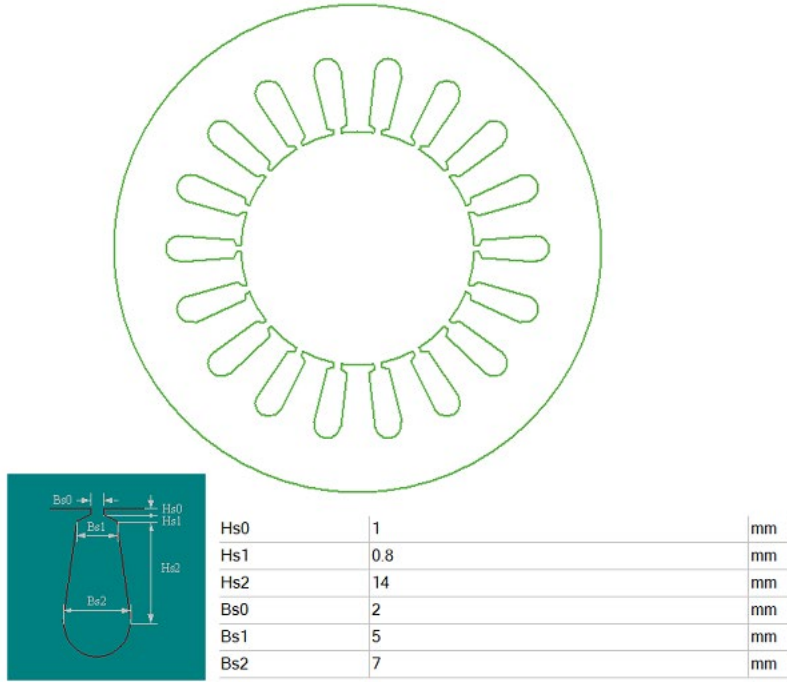
Simülasyonu yapılacak ASM'nin stator nüvesi bölüm 4.4.4'te analizi yapılan örnek-3 demir dolgulu PLA filamentinden yapılacağından dolayı bu malzemenin elde edilen manyetik karakteristiğine ait değerlerin Ansys Maxwell simülasyon programında yeni bir materyal olarak tanıtılması gerekmektedir. Örnek-3 PLA "Amolen iron" materyali olarak tanıtılmış olup, Ansys programında verilen materyal özelliği, B-H eğrisi, BP demir kaybı eğrisi Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Örnek-3 PLA Ansys Materyal verileri

Yeni materyal ekleme işleminden sonra motorun gerekli parametreleri programa girilir ve nüve çelik tipi olarak eklediğimiz örnek-3 (Amolen iron) materyali seçilir.

Simülasyon programında girilen veriler incelendiğinde malzemenin B-H eğrisine göre oluşan manyetik akı yoğunluğu çok düşük olduğu ve yumuşak demir veya silikon çelik gibi yüksek manyetik özelliklere sahip olmadığı görülmüştür bu olumsuzluğun yanında eddy kayıpları açısından fayda sağlayacak elektriksel iletkenliğinin bulunmaması ve hafif olması küçük güçlü ve hafifliğin önemli olduğu makinalar için avantaj olarak değerlendirilmektedir. Stator tasarımında oluk biçimi olarak veriminin yüksek olması ve üretim kolaylığından dolayı yaygın olarak kullanılan damla tipi oluk tercih edilmiştir. Stator oluk sayısı ASM'nin 3 fazlı olması sebebiyle 3'ün katları olacak şekilde 18 olarak belirlenmiş, 400Hz 6 kutuplu ASM'lerde kullanılan 18/22 stator/rotor oyuk kombinasyonu tercih edilmiştir. Çekirdek doluluk faktörü 0,95 alınmıştır. Şekil 5.2'de stator oluk geometrisi verilmiştir. Ansys Maxwell programının optimetrics aracı kullanılarak gerili, iletken çapı, sarım sayısı, stator boyu(L), stator dış çapı(D_o) ve oluk ölçülerinden stator oluk yüksekliği H_{s2} 'nin değişken seçilip; belli adım ölçüsünde her adımın analizi yapılarak en yüksek verimin sağlanacağı motor tasarımı belirlenmiştir.

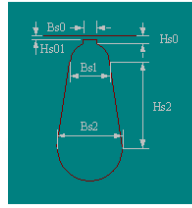
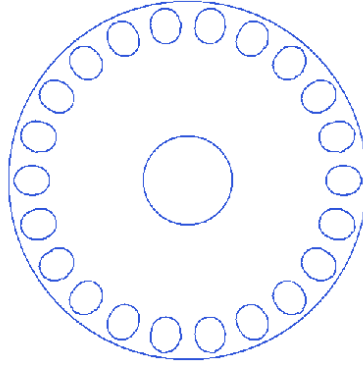


Şekil 5.2. Stator Oluk Geometrisi

Harmonik ve güç katsayısı yönünden daha iyi sonuçlar veren tam kalıp sarım tercih edilmiştir. Ansys analizinde stator sarımında her olukta 80 iletken ve 2 bobin kenarı olacak şekilde tam kalıp sarım tasarlanmıştır. İletken çapı; uygun akım yoğunluğu ve oluk doluluk faktörünün 0,85 olmasına göre 0,6 mm olarak belirlenmiştir. Ansys Maxwell programının optimetrics aracı kullanılarak stator sargısının iletken çapı ve sipir sayısı değişken seçilip; belli adım ölçüsünde her adımın analizi yapılarak en yüksek verimin sağlanacağı motor tasarımı belirlenmiştir.

5.4.2. Rotor ve Mil Tasarımı

Rotor çapı; stator iç çapı 60mm olduğundan hava aralığı düşünülerek 59,5mm olarak tasarlanmıştır. PLA ve ABS malzemenin ısınıp genleşme durumu göz önüne alınarak hava aralığı akı yoğunluğunu ve motor verimini olabilecek en iyi değerlerde tutmak için hava aralığı 0,5mm belirlenmiştir. Rotor ve rotor mili ferromanyetik madde içermeyen ABS malzemesinden üretilmiştir. Rotor mili çapı; motor ebatları ve test ortamı düşünülerek 15mm olarak tasarlanmıştır. Rotor kısa devre çubuklar ve halkalarının bakırdan yapılması uygun görülmüştür. Bakır tercih edilmesinin başka faydaları ise daha iyi bir moment karakteristiği, daha iyi verim değeri, kolay lehimlenebilmesi ve montaj kolaylığıdır. Rotor oluklarına standart kesitteki bakır kısa devre çubuklarının kolay yerleştirilmesi ve montajı için rotor olukları yuvarlak ve kapalı geometride tasarlanmıştır. Rotor olukları için uygun değerler belirlenerek Şekil 5.3.'te rotor oluk geometrisi verilmiştir.



Hs0	1	mm
Hs01	1	mm
Hs2	1	mm
Bs0	1	mm
Bs1	5	mm
Bs2	5	mm

Şekil 5.3. Rotor Oluk Geometrisi

Ansyes Maxwell programının optimetrics aracı kullanılarak rotor oluk ölçülerinden oluk yüksekliği Hs2'nin değişken seçilip; belli adım ölçüsünde her adımın analizi yapılarak en yüksek verimin sağlanacağı motor tasarımı belirlenmiştir.

5.4.3. ASM'un Farklı Çalışma Durumlarındaki Parametrelerin İncelenmesi

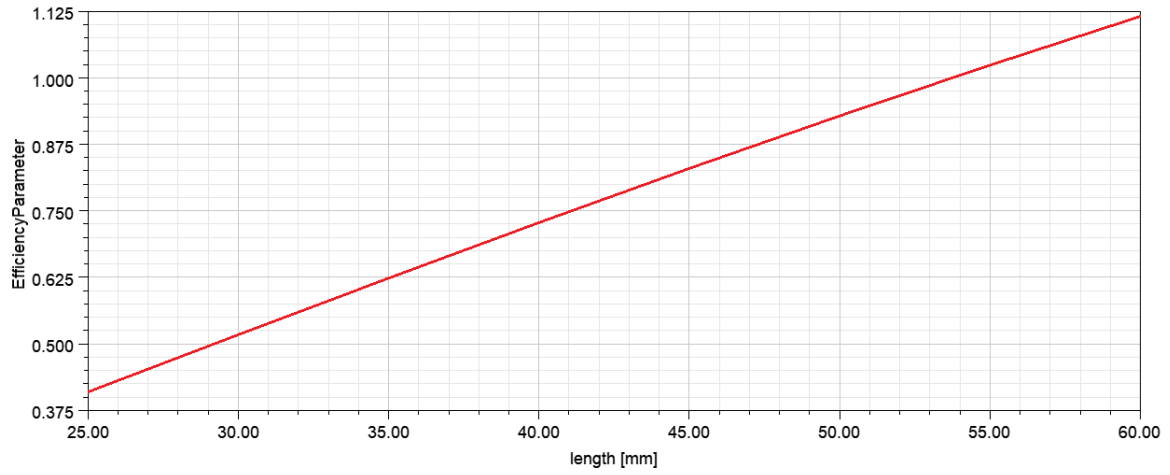
Bu bölümde Ansyes Maxwell programında bulunan optimetrics aracı ile tasarlanan motorun bazı tasarım değerlerini belirli aralık arasında ve belirlenen adımlarda değiştirilerek analizi yapılacaktır. Stator boyu, stator oluk yüksekliği Hs2 ölçüsü, uygulanan gerilim, rotor oluk yüksekliği Hs2 ölçüsü, stator iletken çapı ve sipir sayısının optimetrics analizinin motor verimi, güç, manyetik akı, çekilen akım ve kayıplar üzerindeki etkisi incelenecektir.

5.4.3.1. Stator Uzunluğuna Göre Analiz

Yapılan analizde elde edilen değerler Tablo 5.2'de ve verim grafiği şekil 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.2. Farklı Stator Uzunluğu(L) Değerine Göre Motor Parametreleri

	Stator Analiz Uzunluğu	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Yük Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	% Verim	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	25mm	5,20 A	5,21A	0.0135 T	0.41	0.18	38,71W	114,38W	114,36W	0,46W	113,89W
2	30mm	4,97A	4,98A	0.0136 T	0.51	0.18	40,87W	114,56W	114,58W	0,59W	113,99W
3	35mm	5,45A	5,46A	0.0170 T	0.62	0.22	55,04W	149,05W	149,24W	0,93W	148,31W
4	40mm	5,87A	5,89A	0.0206 T	0.72	0.26	70,16W	157,07W	186,25W	1,35W	184,89W
5	45mm	6,23A	6,25A	0.0241 T	0.83	0.29	85,27W	222,37W	223,33W	1,85W	221,47W
6	50mm	6,50A	6,53A	0.0274 T	0.92	0.32	99,11W	256,24W	257,71W	2,39W	255,32W
7	55mm	6,71A	6,74A	0.0304 T	1.02	0.35	111,40W	286,86W	288,93W	2,95W	285,98W
8	60mm	6,86A	6,89A	0.0333 T	1.11	0.37	122,03W	314,11W	316,85W	3,53W	313,32W



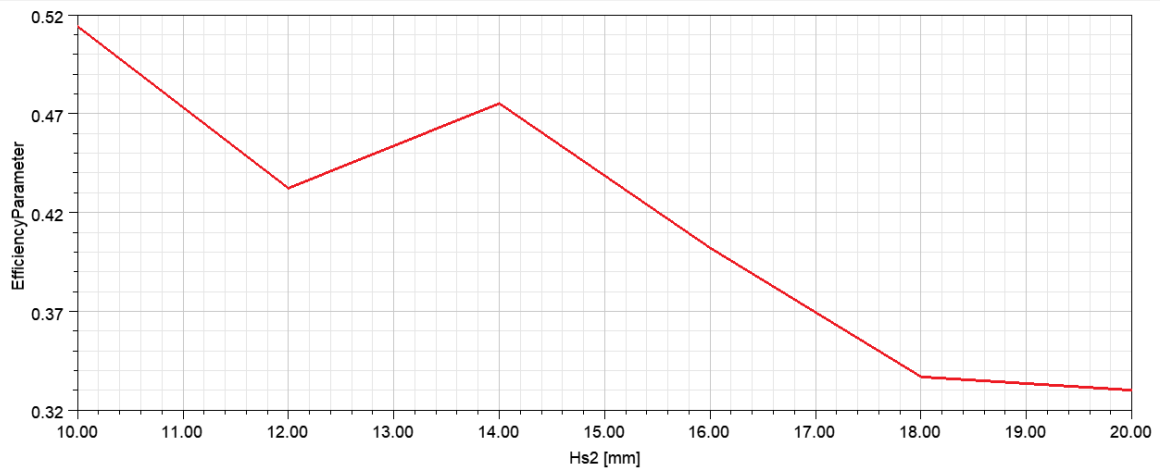
Şekil 5.4. Farklı Stator Uzunluğu(L) Değerine Göre Verimin Değişimi

5.4.3.2. Stator Oluk Uzunluğuna Göre Analiz

Yapılan analizde elde edilen değerler Tablo 5.3'te ve verim grafiği şekil 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Farklı Stator Oluk Uzunluğu(Hs2) Değerine Göre Motor Parametreleri

Analiz	Stator Oluk Hs2	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Yük Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	10mm	5,36A	5,37A	0.0167 T	0.51	0.26	52,45W	173,59W	173,85W	0,894W	172,96W
2	12mm	4,94A	4,95A	0.0139 T	0.43	0.24	41,25W	144,49W	144,60W	0,625W	143,98W
3	14mm	4,76A	4,76A	0.0122 T	0.47	0.17	35,46W	101,20W	101,19W	0,48W	100,71W
4	16mm	4,44A	4,44A	0.0104 T	0.40	0.16	28,64W	86,39W	86,35W	0,347W	86,01W
5	18mm	4,14A	4,15A	0.0088 T	0.33	0.14	23,11W	73,86W	73,81W	0,248W	73,56W
6	20mm	3,97A	3,97A	0.0075 T	0.33	0.11	19,42W	55,34W	55,28W	0,182W	55,09W



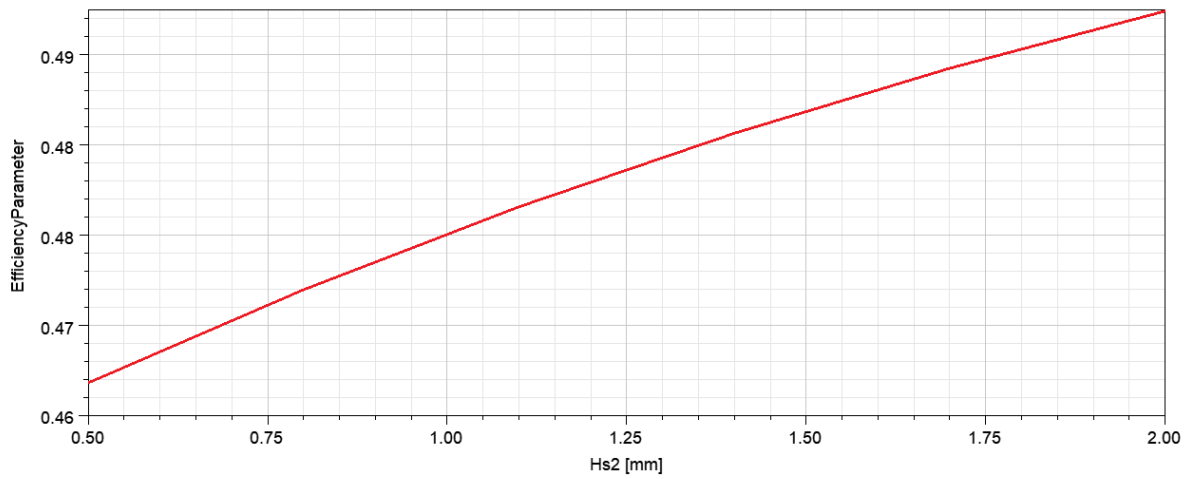
Şekil 5.5. Farklı Stator Oluk Uzunluğu(Hs2) Değerine Göre Verimin Değişimi

5.4.3.3. Rotor Oluk Uzunluğuna Göre Analiz

Yapılan analizde elde edilen değerler Tablo 5.4'te ve verim grafiği şekil 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.4. Farklı Rotor Oluk Uzunluğu(Hs2) Değerine Göre Motor Parametreleri

Analiz	Rotor Oluk Hs2	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	0.5mm	4,7608A	4,7649A	0.01235 T	0.45	0.1762	36,014W	101,75W	101,73W	0,466W	101,27W
2	0.8mm	4,7609A	4,7650A	0.01229 T	0.46	0.1757	35,688W	101,42W	101,41W	0,475W	100,93W
3	1.1mm	4,7609A	4,7651A	0.01223 T	0.47	0.1751	35,358W	101,09W	101,09W	0,483W	100,60W
4	1.4mm	4,7610A	4,7653A	0.01217 T	0.48	0.1745	35,025W	100,76W	100,76W	0,490W	100,27W
5	1.7mm	4,7611A	4,7655A	0.01211 T	0.49	0.1739	34,687W	100,43W	100,43W	0,495W	99,93W
6	2mm	4,7612A	4,7656A	0.01205 T	0.49	0.1733	34,345W	100,09W	100,10W	0,500W	99,60W



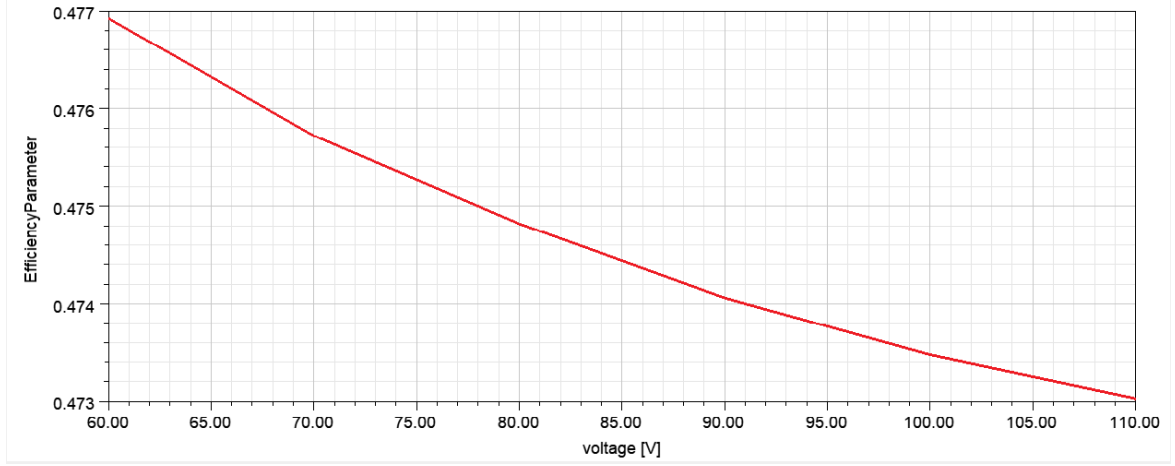
Şekil 5.6. Farklı Rotor Oluk Uzunluğu(Hs2) Değerine Göre Verimin Değişimi

5.4.3.4. Uygulanan Gerilime Göre Analiz

Yapılan analizde elde edilen değerler Tablo 5.5'te ve verim grafiği şekil 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.5. Uygulanan Gerilim Değerine Göre Motor Parametreleri

Analiz	Uygulanan Gerilim	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	60V	4,055A	4,059A	0.0104 T	0.476	0.174	25,84W	73,54W	73,53W	0,350W	73,18W
2	70V	4,760A	4,765A	0.0122 T	0.475	0.175	35,46W	101,20W	101,19W	0,480W	100,71W
3	80V	5,478A	5,483A	0.0141 T	0.474	0.176	46,82W	133,86W	133,87W	0,634W	133,23W
4	90V	6,309A	6,316A	0.0162 T	0.473	0.180	61,95W	177,42W	177,48W	0,840W	176,64W
5	100V	7,167A	7,175A	0.0184 T	0.472	0.184	79,77W	228,77W	228,84W	1,082W	227,76W
6	110V	8A	8,008A	0.0205 T	0.472	0.186	99,23W	284,88W	284,96W	1,346W	283,61W



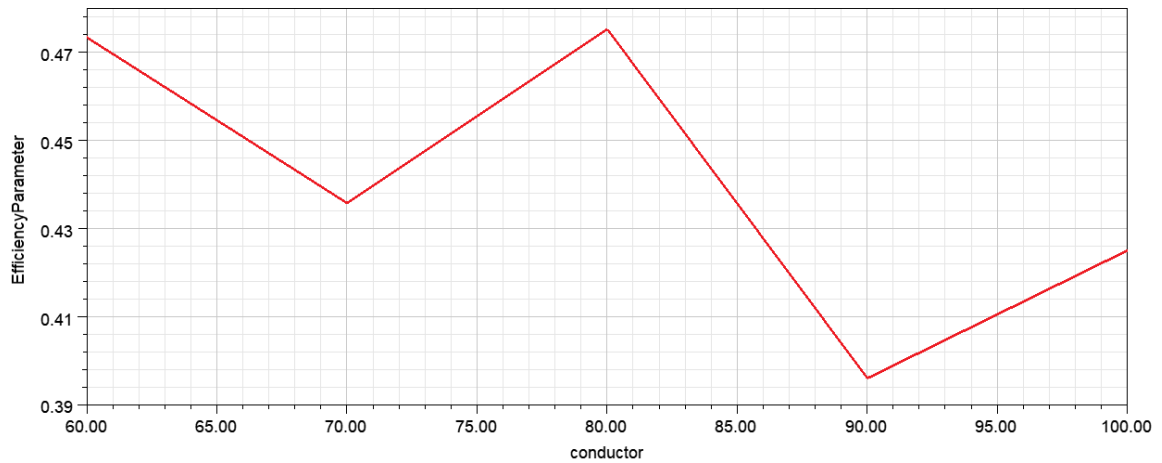
Şekil 5.7. Uygulanan Gerilim Değerine Göre Verimin Değişimi

5.4.3.5. Stator Oluğunda Bulunan İletken Sipir Sayısına Göre Analiz

Yapılan analizde elde edilen değerler Tablo 5.6'da ve verim grafiği şekil 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.6. İletken Sipir Sayısı Değerine Göre Motor Parametreleri

Analiz	Oluk Sipir Sayısı	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	60	8,79A	8,80A	0.0169 T	0.473	0.18	67,66W	193,87W	193,94W	0,918W	193,02W
2	70	6,19A	6,20A	0.0139 T	0.435	0.19	45,89W	142,77W	142,80W	0,622W	142,18W
3	80	4,76A	4,76A	0.0122 T	0.475	0.17	35,46W	101,20W	101,19W	0,480W	100,71W
4	90	3,65A	3,65A	0.0105 T	0.39	0.20	26,48W	90,63W	90,64W	0,359W	90,29W
5	100	2,97A	2,98A	0.0095 T	0.425	0.19	21,82W	69,61W	69,61W	0,295W	69,31W



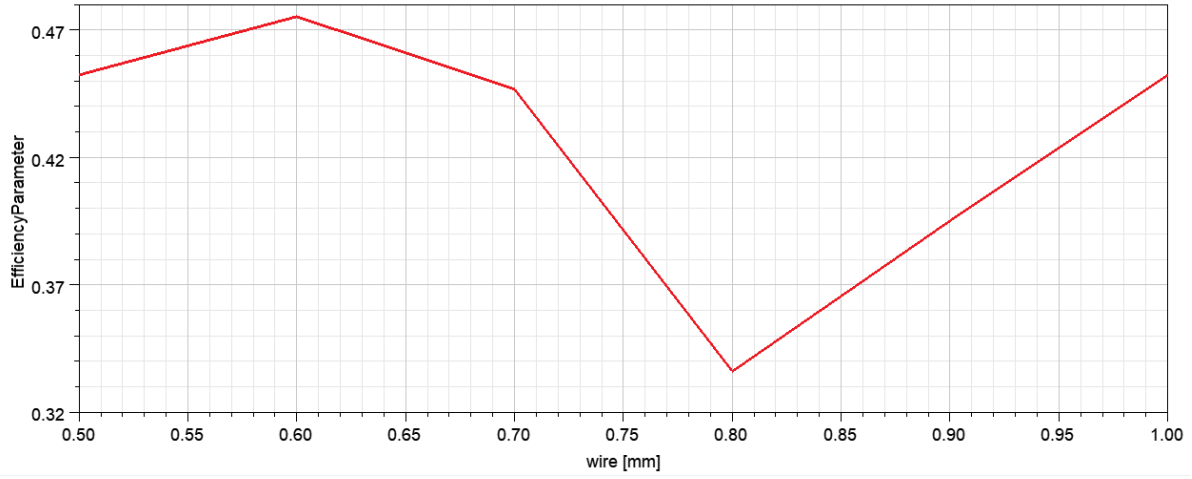
Şekil 5.8. İletken Sipir Sayısı Değerine Göre Verimin Değişimi

5.4.3.6. Stator Oluğunda Bulunan İletken Çapı Değerine Göre Analiz

Yapılan analizde elde edilen değerler Tablo 5.7’de ve verim grafiği şekil 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.7. İletken Çapı Değerine Göre Motor Parametreleri

Analiz	İletken Çapı	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	0.5mm	4,743A	4,747A	0.01221 T	0.45	0.183	35,20W	105,53W	105,53W	0,477W	105,05W
2	0.6mm	4,760A	4,765A	0.01225 T	0.47	0.175	35,46W	101,20W	101,19W	0,48W	100,71W
3	0.7mm	4,734A	4,738A	0.01218 T	0.44	0.185	35,07W	106,45W	106,45W	0,475W	105,97W
4	0.8mm	4,513A	4,517A	0.01161 T	0.33	0.235	31,91W	128,61W	128,66W	0,432W	128,22W
5	0.9mm	4,641A	4,645A	0.01194 T	0.39	0.205	33,72W	115,65W	115,68W	0,457W	115,22W



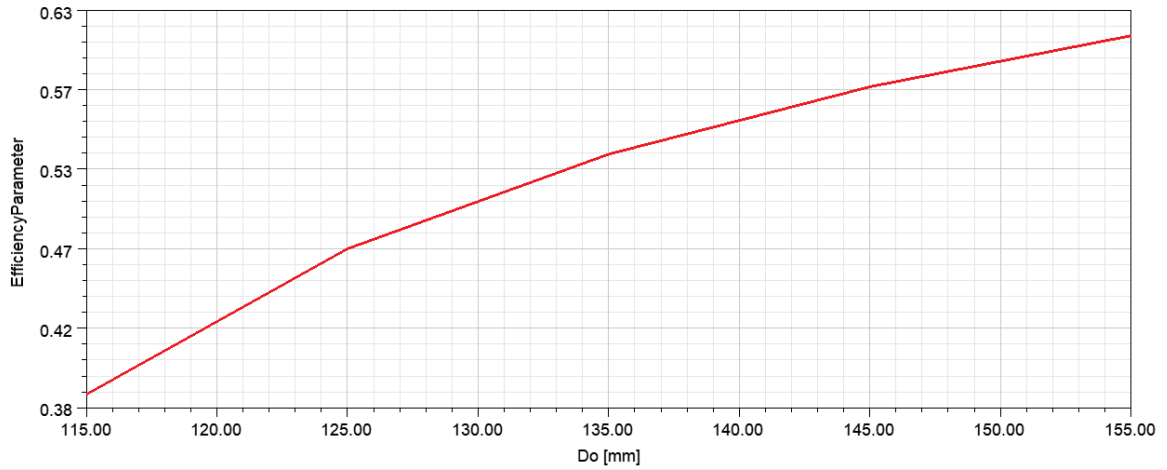
Şekil 5.9. İletken Çapı Değerine Göre Verimin Değişimi

5.4.3.7. Stator Dış Çapına Göre Analiz

Yapılan analizde elde edilen değerler Tablo 5.8’de ve verim grafiği şekil 5.10’da verilmiştir.

Tablo 5.8. Stator Dış Çapı Değerine Göre Motor Parametreleri

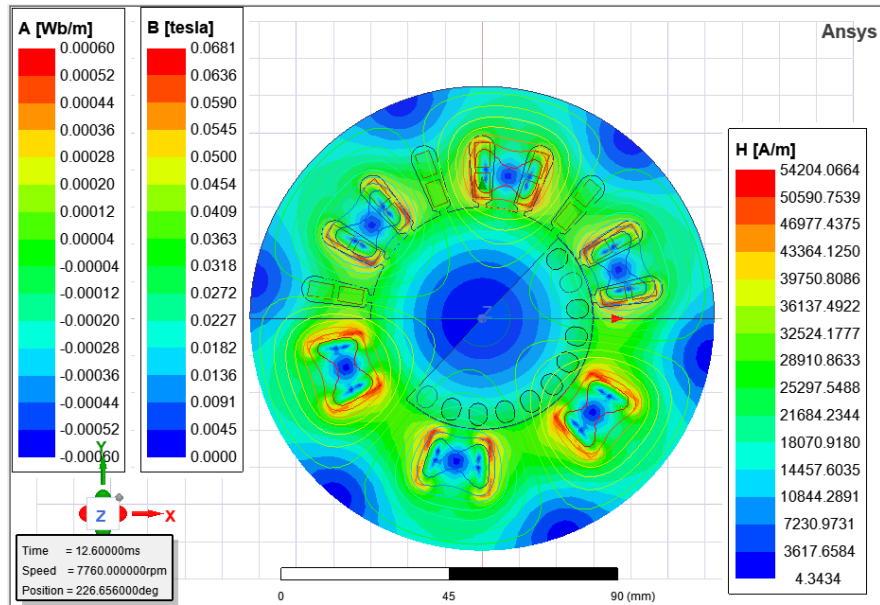
Analiz	Stator Dış Çapı	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	115mm	4,8A	4,81A	0.0109 T	0.38	0.172	33,23W	100,24W	100,19W	0,384W	99,80W
2	125mm	4,76A	4,76A	0.0122 T	0.47	0.175	35,46W	101,20W	101,19W	0,480W	100,71W
3	135mm	4,73A	4,73A	0.0130 T	0.53	0.177	36,80W	101,80W	101,82W	0,544W	101,27W
4	145mm	4,71A	4,72A	0.0135 T	0.57	0.178	37,78W	102,28W	102,32W	0,590W	101,73W
5	155mm	4,7A	4,708A	0.0139 T	0.60	0.180	38,57W	102,71W	102,76W	0,625W	102,14W



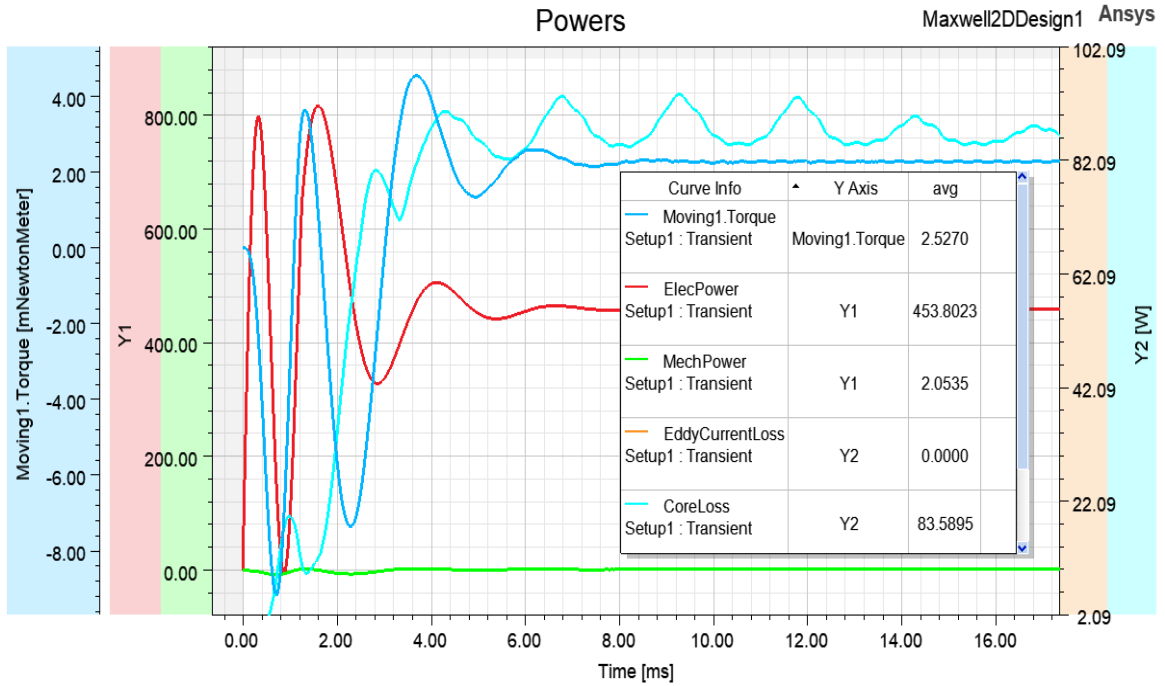
Şekil 5.10. Stator Dış Çapı Değerine Göre Verimin Değişimi

5.4.3.8. Analizlerin Değerlendirilmesi

Yapılan çeşitli analizlerin simülasyondaki sonuçlarına bakıldığında nüvede oluşan manyetik akı yoğunluğu ve alan şiddeti çok düşük olduğundan manyetik özellikleri yetersiz kalmaktadır. Çıkış gücü çok küçük bir değer olup giriş gücü ile arasında çok büyük fark vardır. Bu fark sebebiyle motordan alınan verimin çok düşük ve kaybın çok yüksek olduğu görülmekte olup kaybın büyük çoğunluğu stator iletkenlerinde meydana gelmektedir. Analizde eddy kayıpları nüvenin elektriksel iletkenliğinin olmaması sebebiyle yoktur. 400Hz frekans etkisiyle demir kayıpları histersiz kaybı olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 5.11'de statorda oluşan anlık manyetik akı hatları ve yoğunluk noktaları görülmektedir. Şekil 5.12'de Güç,tork ve demir kayıplarını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 5.11. Statorda Oluşan Anlık Manyetik Akı Hatları ve Yoğunluk Noktaları



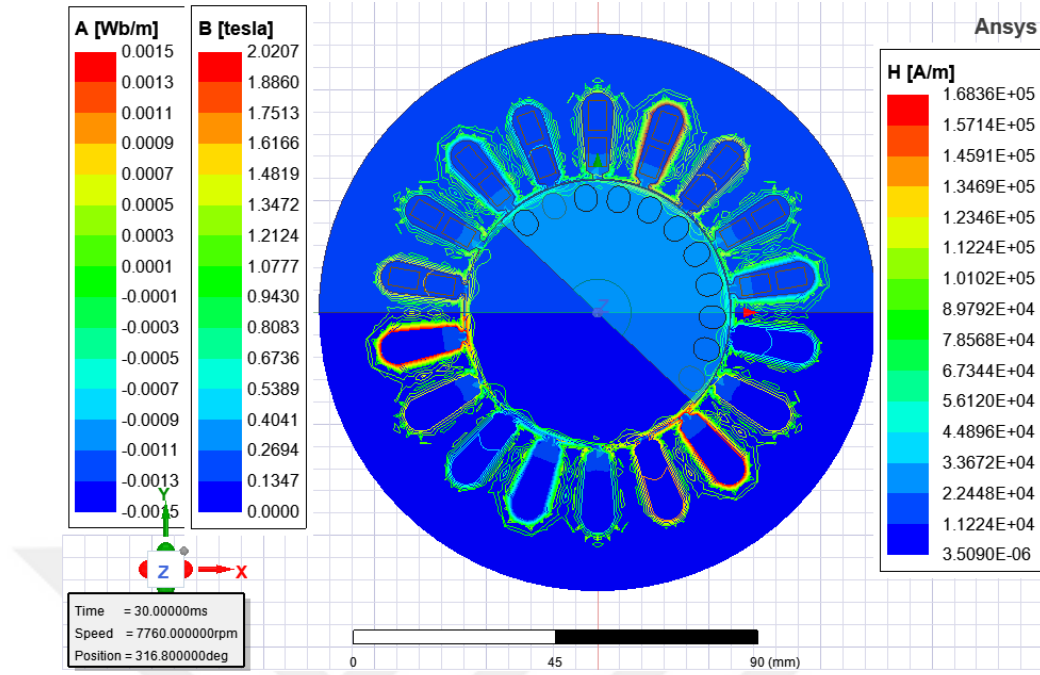
Şekil 5.12. Güç,Tork ve Demir Kayıplarını Gösteren Grafik

5.4.3.9. Örnek-3 Ferromanyetik PLA ile Elektriksel Çeliğin Karşılaştırılması

Bu bölümde Bölüm 5.4.3.'te örnek-3 demir katkılı PLA malzeme(Amolen Iron 3) ile tasarımı ve analizi yapılan ASM tasarımının örnek-3 malzeme yerine endüstride 400Hz ASM'lerde kullanımı olan M270-35A lamine elektriksel çeliği tercih edildiğinde alınacak sonuçlar incelenecektir. Analizde sadece çekirdek malzemesi M270-35A olarak değiştirilmiş olup diğer motor tasarım parametreleri değiştirilmemiştir. Tablo 5.9'da M270-35A çeliğinin sadece stator uzunluğuna göre optimetrics analizi yapılmıştır. Şekil 5.13'te statorda oluşan anlık manyetik akı hatları ve yoğunluk noktaları görülmektedir.

Tablo 5.9. M270-35A Çeliği kullanıldığında elde edilen analiz değerleri

Analiz	Stator Uzunluğu	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Yük Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
1	26mm	0,35A	0,56A	0.148 T	78.62	0.046	1,64W	2,02W	12,18W	9,57W	2,60W
2	28mm	0,33A	0,53A	0.137 T	78.58	0.0463	1,53W	1,87W	11,21W	8,80W	2,40W
3	30mm	0,333A	0,535A	0.138 T	79.23	0.044	1,44W	1,78W	11,38W	9,02W	2,36W



Şekil 5.13. M270-35A çeliği için statorda oluşan anlık manyetik akı hatları ve yoğunluk noktaları

Tablo 5.10. M270-35A Çeliği ve Örnek-3 PLA karşılaştırılması

Çekirdek Materyali	Yüksüz Stator Faz Akımı	Nominal Yük Stator Faz Akımı	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Verim %	Yüksüz Güç Faktörü	Yüksüz Demir Kaybı	Yüksüz Giriş Gücü	Nominal Giriş Gücü	Nominal Çıkış Gücü	Toplam Kayıp
M270-35A Lamine Çelik	0,33A	0,53A	0.137 T	78.58	0.0463	1,53W	1,87W	11,21W	8,80W	2,40W
%20Fe + PLA Amolen Örnek-3	4,760A	4,765A	0.01225 T	0.47	0.175	35,46W	101,20W	101,19W	0,48W	100,71W

Tablo 5.10’da görüldüğü üzere yapılan karşılaştırma sonucu ferromanyetik özellikleri çok daha yüksek olduğu için lamine çelikte verimin yüksek olduğu ve kaybın düşük olduğu görülmüştür. Lamine çelik incelendiğinde boş çalışmada çekilen giriş gücünün büyük kısmı demir kayıplarından oluşmaktadır. Örnek-3 ferromanyetik katkılı PLA malzeme incelendiğinde, malzemeden çok düşük verim alınmasına ve çok daha yüksek akım çekilmesine karşın boş çalışmada demir kayıplarını oluşturan kısmın çekilen giriş gücünün 1/3’ü olduğu görülmekte olup lamine çelikte boş çalışma giriş gücünün neredeyse tamamı demir kayıplarından oluşmaktadır.

Motor analizinde lamine çelik değerlerine daha yakın sonuçlar alınabilmesi için kullanılan örnek-3 PLA malzeme yerine ferromanyetik değerleri geliştirilmiş ve ferromanyetik madde katkısı çok daha yüksek polimer malzemeler kullanılmalıdır.

6. ASM PROTOTİP ÜRETİMİ

Bu bölümde Bölüm 5.4.'te Ansys RMXprt aracı ile modellenmesi ve analizi yapılan ASM'nin prototipinin üretim aşamaları ve karşılaşılan zorluklar işlenecektir. RMXprt ile elde edilen analiz sonuçları, üretilen prototipin ölçümlenebilen sonuçları ile karşılaştırılacaktır. 3B yazıcıda prototip üretimi için Ansys'te modellenen tasarım SolidWorks gibi bir CAD (dizayn- tasarım) programına aktarılması gerekmektedir. SolidWorks programı 3B dizayn, katı model oluşturma ve düzenleme imkanları sunan gelişmiş bir CAD programıdır. Ansys'te modellenen tasarımın SolidWorks'un tanıyabileceği bir formatta aktararak düzenlenmesi ve yardımcı parçalarının üretimi yapılabilmektedir. Ansys programında 3B dizayn seçilerek SolidWorks'ta olması istenmeyen kısımlar çıkarılır(sargılar, rotor kısadevre çubukları) ve uygun formatta aktarılır.

Katı modellemeler 3B yazıcıya gönderilmeden önce dilimlenerek, neredeyse 2B'ye çevrilmiş ve üst üste bindirilmiş katmanlara dönüştürür. Bu şekilde dilimlenmiş her bir katman 3B yazıcıya g-code şeklinde aktarılır ve 3B yazıcıda katmanların yine sırayla oluşturulması ile katı modelleme ortaya çıkmış olur[3].

SolidWorks programında modelin katman şeklinde dilimleme işlemi için (.stl) formatında alınarak 3B yazıcıya aktarılması gerekmektedir. Solidworks düzenlemesi ve yardımcı parçaların(yataklama elemanları, mil) dizaynından sonra model 3B yazıcıya gönderilmeye hazır durumdadır. 3B FDM tekniği ile baskı işlemi sırasında genellikle bazı problemlerle karşılaşılır ve baskı işlemi istenilen noktaya gelemeden durabilmektedir. Bu gibi durumlarda en baştan gerekli önlemler alınarak baskı tekrarına başlanmalıdır. Baskı herhangi bir sebeple durursa baskıya kaldığı yerden devam edilememektedir. 3B baskı alım sırasında karşılaşılabilecek olumsuz durumlar;

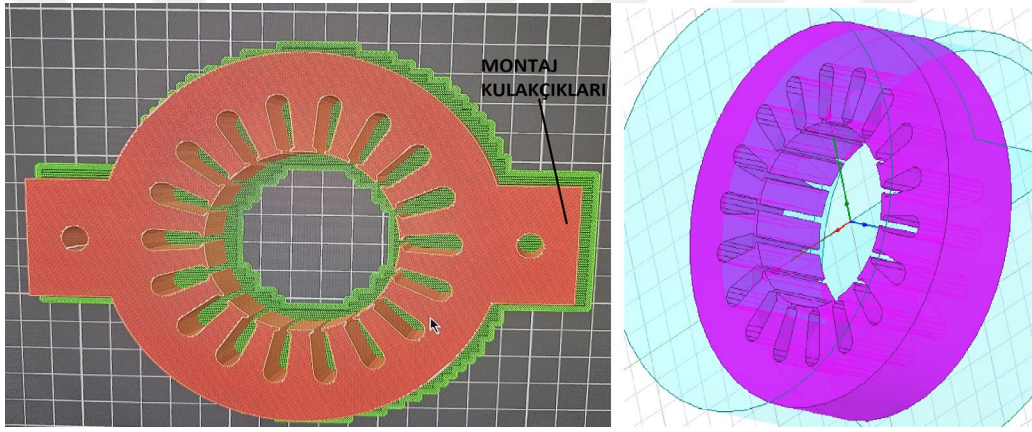
- 3B yazıcı arızası
- Elektrik kesintisi
- Filament nozulunun aşınması ve tıkanması
- Baskının başladığı tablada baskı formunun bozulması
- Filamentin bağlanma problemleri
- Ekstrüzyon ve tabla sıcaklıklarının yanlış ayarlanması
- Programda dilimlemenin(Render) yanlış yapılması

Bu çalışmada bir çok problemler yaşanmış ve bu durum baskı sürecinde baskı boyutlarını ve üretim zamanını olumsuz etkilemiştir. Bu bölümde ASM prototipinin üretim aşamaları ve bu aşamalarda meydana gelen zorluklar ve çözüm yöntemleri üzerinde durulacaktır.

6.1. Statorun Baskı İşlemi

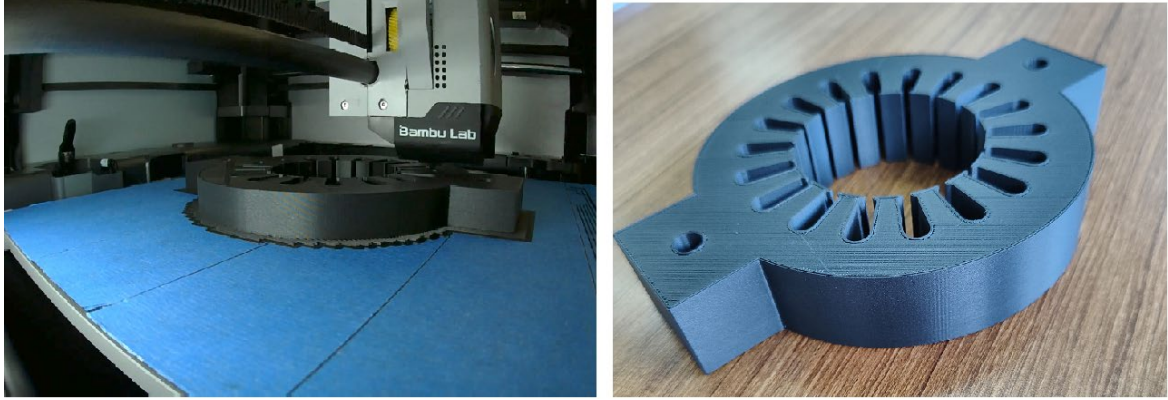
Stator boyu(L) başlangıç tasarımında 60mm olarak tasarlanmış fakat yukarıda bahsedilen 3B baskı sırasında yaşanan zorluklar nedeniyle stator boyu 28mm olarak baskısı

alınabilmektedir. Elde bulunan örnek-3 demir katkılı PLA filament miktarı ile baskının yenilenmesinin mümkün olmaması nedeniyle prototip tasarım 28mm stator boyuna göre düzenlenmiştir. Örnek-3 ile baskı yapılmadan önce ferromanyetik olmayan sıradan PLA filament ile test baskısı yapılarak yazıcı ayarları en uygun duruma getirilmiştir. Üretici firmanın tavsiyesi ile demir tozu katkılı PLA filamentinin aşındırıcı etkisi düşünülerek 3B yazıcıda 0,4mm sertleştirilmiş çelik nozul kullanılmıştır. Stator Ansys 3B analiz kısmında stator nüve kısmı hariç diğer kısımlar çıkarılarak uygun formatta(.sldprt, .step) SolidWorks programına aktarılmış ve statorun rotor ve yataklama elemanları ile montajının yapılabilmesi için statora gijon vidalama kulakçıkları eklenmiştir. SolidWorks programından 3B baskı makinasının tanıyacağı format olan (.stl) uzantısına çevrim yapılarak 3B baskı makinasına basım dosyası aktarılmıştır. Şekil 6.1.'de statorun Ansys tasarımı ve SolidWorks'te montaj kulakçığı eklenmiş hali verilmiştir.



Şekil 6.1. Statorun Ansys Tasarımı ve Solidworks'te Montaj Kulakçığı Eklenmiş Hali

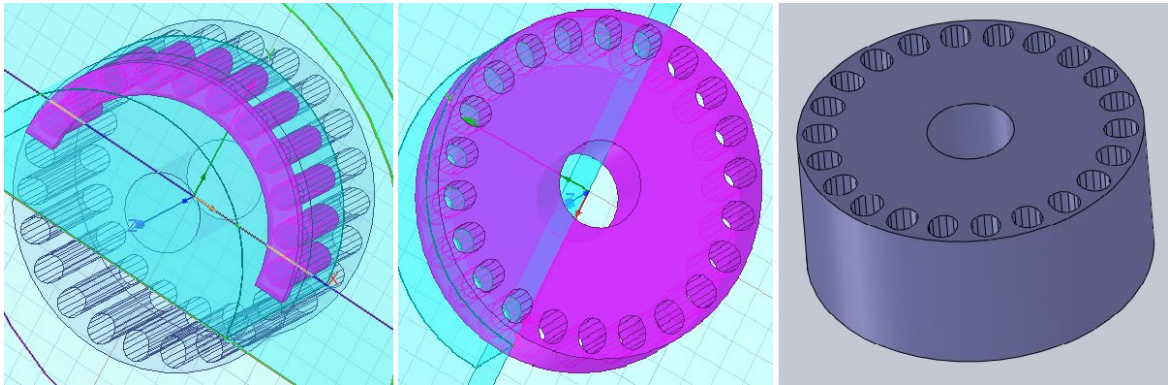
En yüksek ferromanyetik verimin alınabilmesi ve mekanik dayanım için yazıcı grid dolgu ayarına getirilerek %100 doluluk oranında baskı alınmıştır. Yüzey alanı 256mm x 256mm olan yazıcıdan 11 saatte stator dış çapı(D_o) 125mm ve stator boyu(L) 28mm olan baskı alınabilmektedir. Stator ağırlığı 341 gram olarak ölçülmüştür. Baskı sırasında PLA için nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 35°C, baskı hızı 50mm/S olarak ayarlanmıştır. Basım işlemi Bambu Lab. X1 Carbon 3B baskı makinesinde yapılmıştır. Şekil 6.2.'de baskı işlemi ve basım sonrası elde edilen stator verilmiştir.



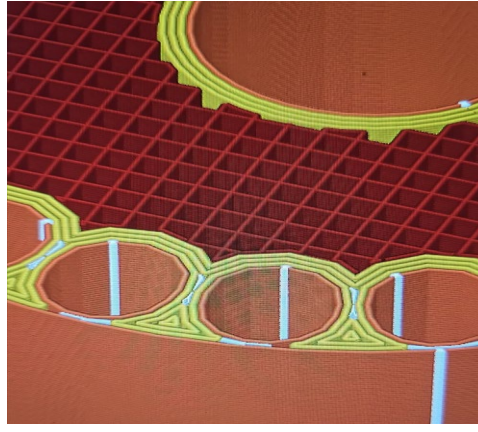
Şekil 6.2. 3B Baskı İşlemi ve Basım Sonrası Elde Edilen Stator

6.2. Rotorun Baskı İşlemi

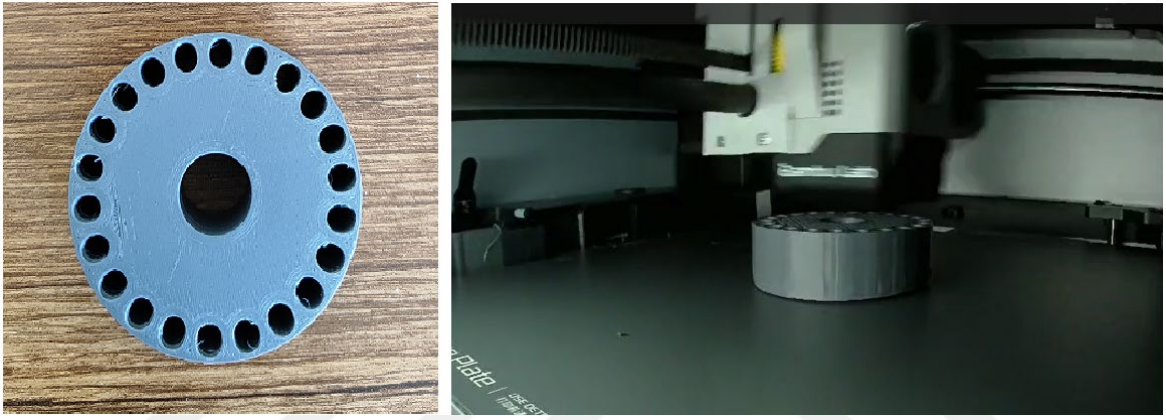
Rotor üzerinde EMK kısıadevre çubuklarında oluştuğundan prototip için rotorun ferromanyetik katkılı olmasına gerek duyulmamıştır. Rotor; PLA'ya göre daha hafif ve termal dayanımı daha yüksek olan ferromanyetik madde içermeyen ABS filamentten(Porima Standart Grey) üretilmiştir. Kısıadevre çubukları ve kısıadevre halkası birbirlerine lehim ile birleştirileceğinden lehim sırasında yüksek ısı oluşacaktır. Bu oluşan ısıya ABS baskının daha dayanıklı olması ABS'nin tercih edilme sebeplerinden bir diğeridir. Rotor oluklarına kısa devre iletken çubuklarının kolay yerleştirilmesi ve montajı için rotor olukları yuvarlak ve kapalı geometride tasarlanmıştır. Rotor mümkün olduğunca hafif ve en iyi mekanik dayanımı vermesi için %45 doluluk oranında ve grid dolgu ayarında basılmıştır. Rotor; Bambu Lab. X1 Carbon 3B baskı makinesinde çapı 59,5mm, rotor mili çapı 15mm olarak baskısı yapılmış olup rotor mili ayrı olarak üretilmiştir. Şekil 6.3.'te rotorun Ansys Tasarımı ve Solidworks görüntüsü, Şekil 6.4.'te grid ayarında baskı şekli verilmiştir. Baskı sırasında ABS için nozul sıcaklığı 240°C, tabla sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Basılan rotor ağırlığı 39 gram olarak ölçülmüştür. Baskı işlemi ve basım sonrası elde edilen rotor Şekil 6.5.'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Rotorun Ansys Tasarımı ve Solidworks Görüntüsü



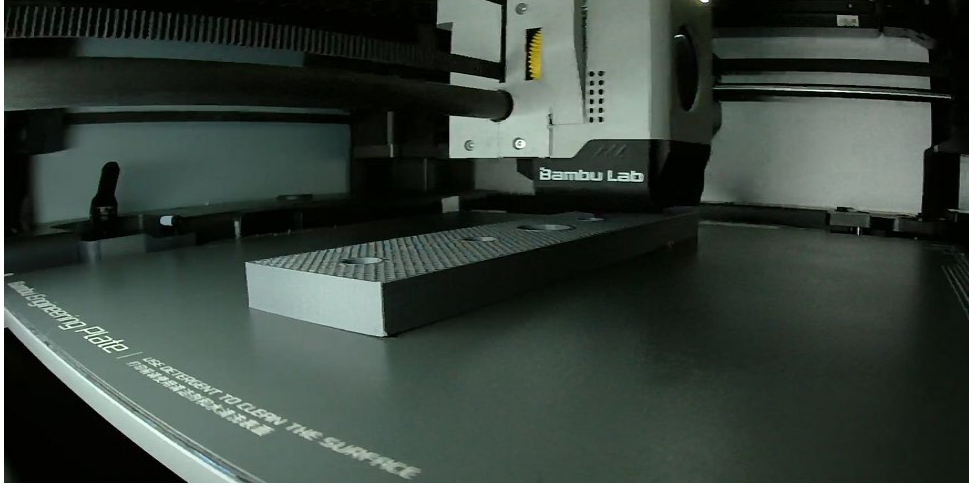
Şekil 6.4. 3B Baskı grid ayarı baskı şekli



Şekil 6.5. 3B Baskı İşlemi ve Basım Sonrası Elde Edilen Rotor

6.3. Mil ve Yataklama Elemanlarının Baskı İşlemi

Üretilen motor prototip olarak üretim kolaylığı sağlaması ve fiziksel çalışma durumlarının izlenebilmesi için açık tip olarak tasarlanmıştır. Yataklama elemanları motor gövdesi görevini görerek rotorun stator içinde dönme hareketini yapabilmesini sağlar. Yataklama elemanları stator, mil ve yataklı rulman ölçülerine göre SolidWorks'te ayrı olarak tasarlanmış olup %45 doluluk oranında ABS(Porima Standart Grey) filament ile basılmıştır. Statorun önüne ve arkasına kulakçıklara gijon ile vidalanarak rotor milinin sabitlenmesi sağlanmıştır. Mil 15mm çapında ve 200mm uzunluğunda SolidWorks'te tasarlanmış olup %45 doluluk oranında ABS(Porima Standart Grey) filament ile basılmıştır. Milin basılan rotor gövdesine sıkı geçme olarak yerleştirme işlemi yapılmıştır. Motora istenirse kapalı tip gövde tasarımı yapıp 3B baskısı yapılabilir. Şekil 6.6.'da yataklama elemanlarının 3B baskı işlemi ve Şekil 6.7.'de baskı sonrası elde edilen yataklama elemanı ve mil görülmektedir.



Şekil 6.6. Yataklama Elemanlarının 3B Baskı İşlemi



Şekil 6.7. 3B Basım Sonrası Elde Edilen Yataklama Elemanları ve Mil

6.4. Stator ve Rotor Bobinaj İşlemleri

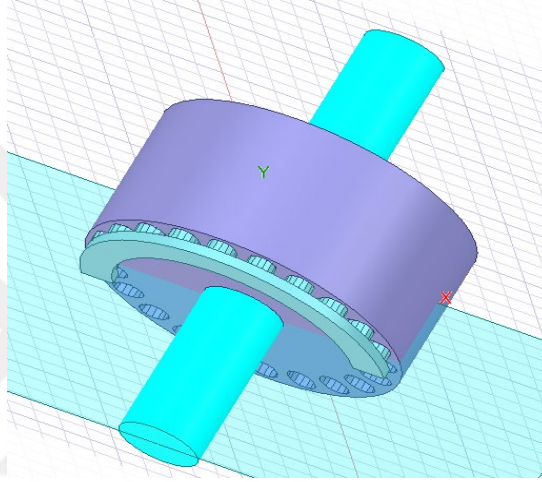
Bu bölümde stator ve rotor bobinaj işlemleri işlenecektir.

6.4.1. Stator Bobinaj İşlemi

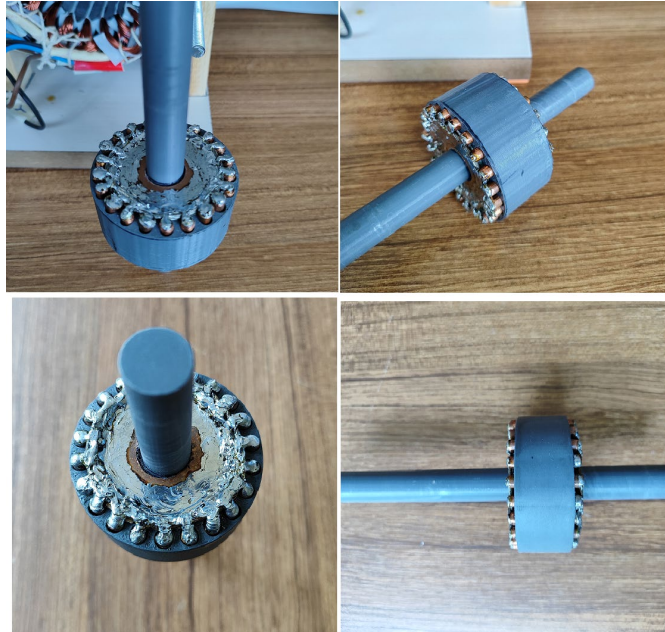
Prototipin Ansys RMXprt ve Maxwell 2D analizi ve modellemesi yapılmış ve sarım iletken çapı ile sarım sayısı hesaplanmıştır. Hava aralığı ortalama akı yoğunluğu (B_{ort}) 0,4T kabul edilerek lamine çelik motorlara göre yapılan hesaplarda stator oyuk başına sarım sayısı 21, akım yoğunluğu 5 A/mm^2 kabul edilerek iletken çapı 1,65mm

6.4.2. Rotor Bobinaj İşlemi

Bölüm 6.2.'de 3B basım işlemi yapılan rotora 5mm çapında yuvarlak kesitli kısa devre bakır çubukları her oluğa yerleştirilmiştir. Bakır çubukların oluklara yerleştirilmesinden sonra rotorun her iki tarafından bakır çubuklar bakır devre plaketi ile kısa devre edilerek kısa devre halkası oluşturulmuş ve lehimleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bakır devre plaketine 5mm çapında delikler açılarak çubukların ön ve arka taraftan bu deliklere lehimlenmesi sağlanmıştır. Rotorun stator içine bakan yüzeyi hafif zımparalanarak daha pürüzsüz ve yuvarlak hale getirilmiştir. Şekil 6.10.'da Ansys programında rotor ve kısa devre çubuk/halkasının modellenmesi, Şekil 6.11.'de rotora yerleştirilerek lehimlenmiş kısa devre çubuk/halkası görüntüleri verilmiştir.



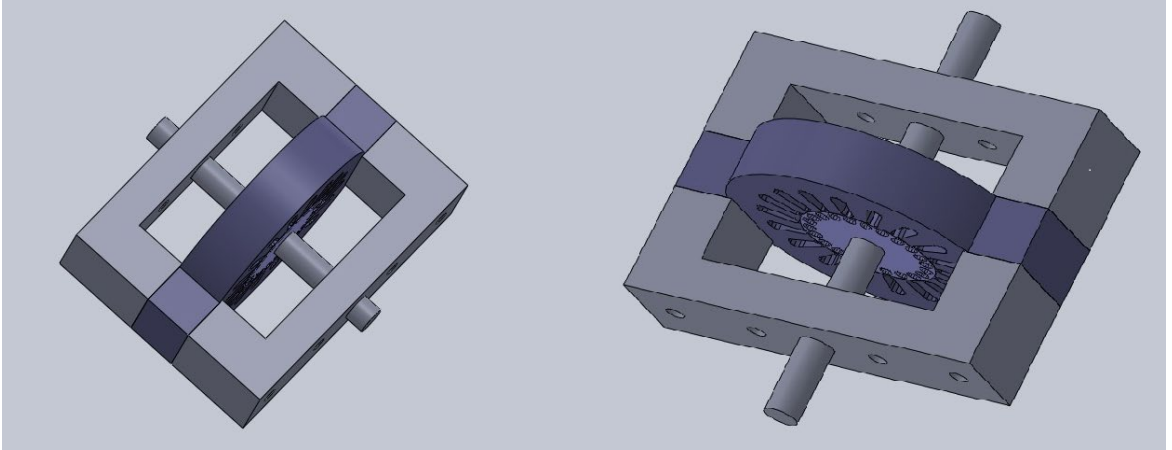
Şekil 6.10. Rotor kısadevre çubuk/halka modellemesi



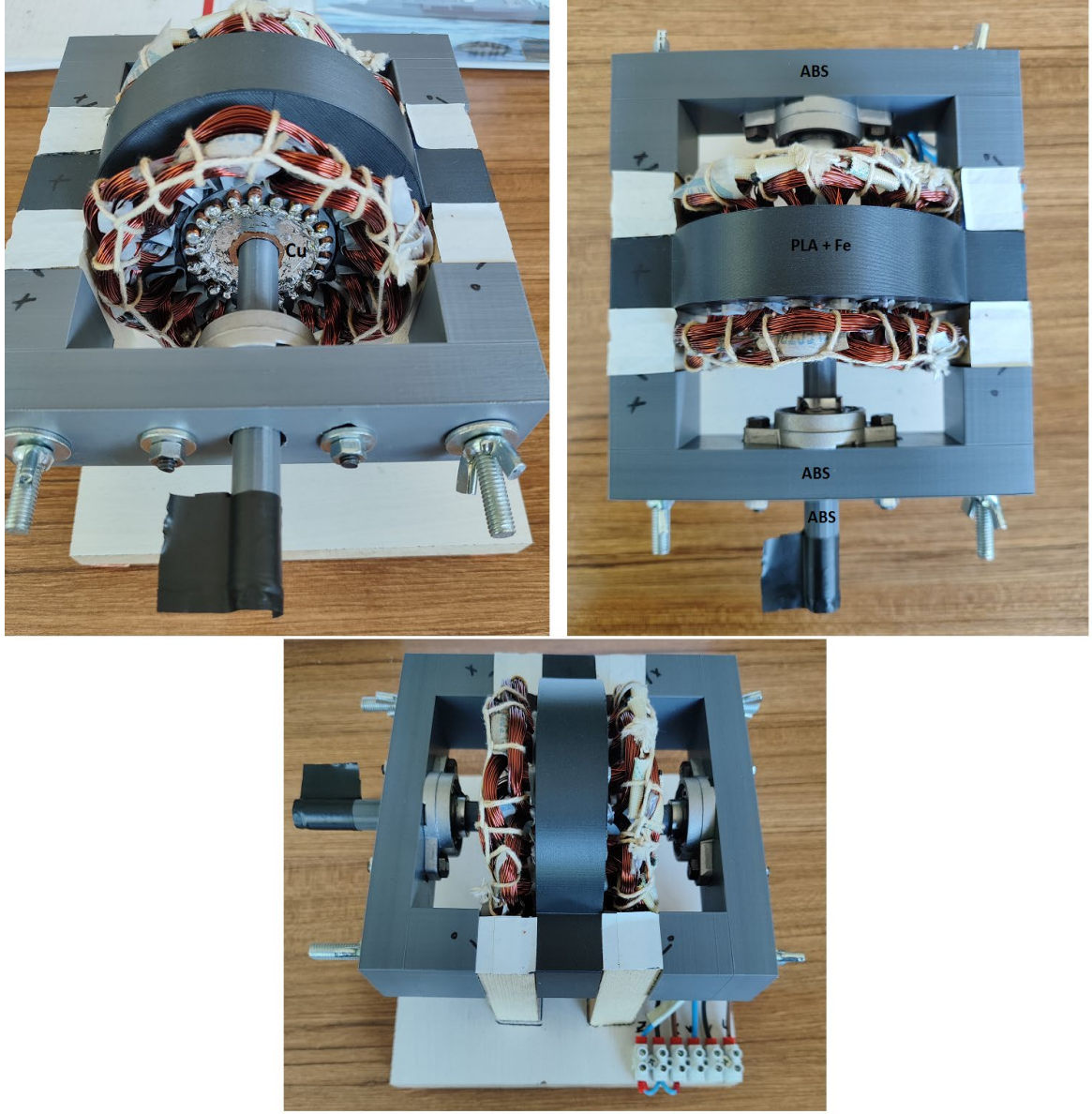
Şekil 6.11. Rotora lehimlenmiş kısa devre çubuklar ve halkalar

6.5. ASM Prototipinin Hazır Hale Getirilmesi

Motor prototipinin tüm parçalarının 3B baskıları alındıktan sonra stator sarımı yapılmış, rotor kısa devre çubukları ve halkaları yerleştirilerek lehimleme işlemi yapılmıştır. Bu işlemlerden sonra motor bileşenlerinin montaj işlemine başlanmıştır. Montaj işlemi sırasında Stator ahşap bir kaideye sabitlenmiştir. Yataklama elemanlarına rotorun eksenel hareketini yapabilmesi ve yataklanabilmesi için mil çapı 15mm ölçüye göre ön-arka yataklı döküm rulman(KFL002) montajı yapılmıştır. Stator kulakçıklarına yataklama elemanları gijonlar ile sabitlenerek rotor stator içinde sabitlenmiştir. Rotorun stator iç yüzeyine sürtünmemesi için rulman gövde civataları ve mil sabitleme allen vidası ile ayar yapılarak rotorun layna(alignment) alınması sağlanmıştır. Stator sargı çıkış uçları sıradan klemense bağlantısı yapılarak uçların çıkışları köprülenerek yıldız bağlantı yapılmıştır. Şekil 6.11.'de SolidWorks'te tüm motor bileşenlerinin tasarıma göre birleştirilmesi ve Şekil 6.12.'de prototip ASM'un farklı yönlerden görünüşü verilmiştir.



Şekil 6.11. Motor Bileşenlerinin Solidworks'te Birleştirilmesi



Şekil 6.12. Prototip ASM'un Farklı Yönlerden Görünüşü

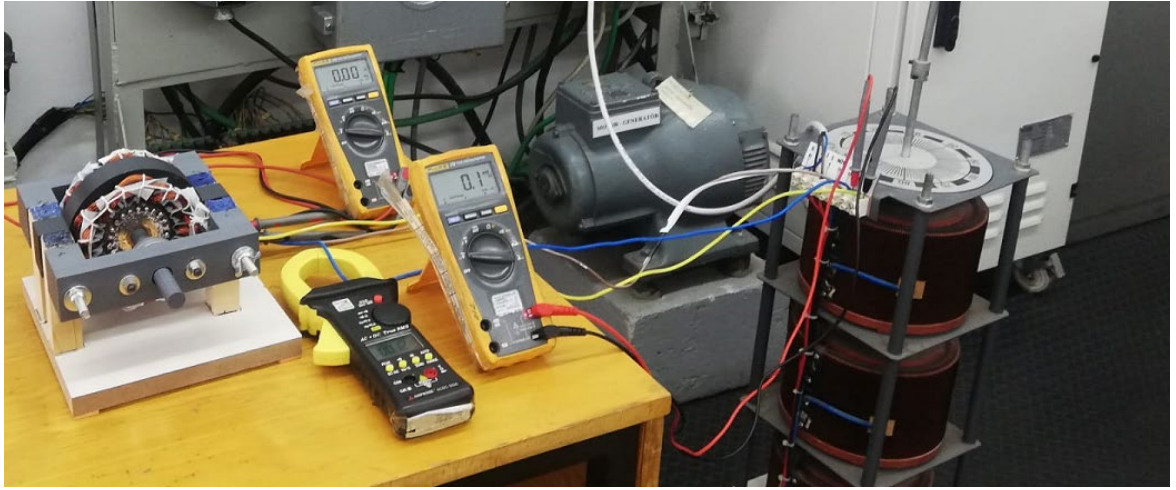
Motorun birleştirme işleminden sonra test işlemine hazır hale gelmiştir.

7. PROTOTİP ASM TEST İŞLEMİ

Prototip işlemi yapıldıktan sonra test işlemine geçilerek motor 400Hz kaynağa bağlanarak boş ve kısa devre değerleri kayıt altına alınmıştır. Kayıt altına alınan değerler üzerinden motorun eşdeğer devresi ve parametreleri çıkarılmıştır.

7.1. Prototip ASM Testi

ASM test ve ölçüm işleminde 2 adet multimetre(Fluke 175 True RMS), 1 adet pens ampermetre(Amprobe ACDC-3000 True RMS), 1 adet 0-115V Ototransformatörü, 1 adet 115V 400Hz Statik Frekans Konvertörü, 1 adet Wattmetre, 1 adet $\cos\phi$ metre kullanılmıştır. Şekil 7.1.'de test düzeneği, Şekil 7.2.'de ölçüm anı görülmektedir.



Şekil 7.1. Test Düzeneği



Şekil 7.2. Ölçüm Anı

Boş ve kısadevre çalışma değerlerinin ölçümünde motor; frekans konvertörüne ototransformatörü üzerinden bağlanmıştır. Boş çalışmada gerilim değeri kademe kademe arttırılmış faz akımı, giriş gücü, $\cos\phi$ değerleri ölçülmüştür. Motorun mil hareketi 42V'tan itibaren başlamış olup devir stroboskop ile ortalama 300d/dk ölçülmüştür. Ölçümlerde 70V'tan sonraki değerlerde motor ısınmaya başlamış ve değerler hızlı bir şekilde ölçülüp kaydedilmiştir. Kısa devre çalışmanın bir diğer adı kilitli rotor deneyidir, burada motor mili kilitlenerek sargılardan nominal yük akımının 1,2 katı değerine gelene kadar gerilim kademeli olarak arttırılır. Prototip ASM'da motor torku verimin çok az olmasından dolayı çok küçük bir değerdedir. Motor mili el ile tutularak kilitli rotor deneyi ölçümleri yapılmıştır. ASM'lerde boş çalışma deneyinde motor akımı nominal akımdan küçük olduğu için bakır kayıpları az olup giriş gücünün büyük kısmı demir kayıplarıdır. Kısa devre çalışmada motora uygulanan gerilim küçük olduğundan gerilimin karesi ile orantılı demir kayıpları ihmal edilir. Kısa devre çalışmada nominal akım çekildiğinden kayıpların büyük kısmı bakır kayıplarıdır. Prototip ASM'de ise verim çok az olduğundan boş çalışma ile kısa devre çalışma değerleri arasında çok küçük fark bulunmaktadır. Ölçümler sonucu elde edilen değerler Tablo 7.1. ve Tablo 7.2.'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Boş çalışma Ölçümleri

BOŞ ÇALIŞMA DEĞERLERİ (400Hz)				
Ölçüm No.	U_{10} (V)	I_{10} (A)	P_0 (W)	$\cos\phi_0$
1	10	1,12	3	0,15
2	20	2,32	13	0,16
3	30	3,4	28	0,16
4	40	4,46	52	0,17
5	42	4,93	61	0,17
6	50	5,65	88	0,18
7	60	6,23	123	0,18
8	70	7,20	165	0,19
9	80	7,66	212	0,19
10	90	8,37	260	0,2
11	100	8,72	317	0,2
12	110	10,1	404	0,21

Tablo 7.2. Kısa Devre(Kilitli Rotor) Çalışma Ölçümleri

KISA DEVRE ÇALIŞMA DEĞERLERİ (400Hz)				
Ölçüm No.	U_{1k} (V)	I_{1k} (A)	P_k (W)	$\cos\phi_k$
1	10	1,15	3	0,15
2	20	2,38	13	0,16
3	30	3,48	29	0,16
4	40	4,55	53	0,17
5	50	5,8	85	0,18
6	60	6,4	120	0,18
7	70	7,6	166	0,19
8	75	7,7	215	0,20
9	80	7,9	223	0,21
10	85	8,2	241	0,22
11	90	8,7	271	0,22

Ölçümler sırasında tasarım gerilimi olan 70V'tan sonra akımın artışından dolayı motorda ısınmalar artmıştır. PLA malzemenin termal dayanımı çok iyi olmadığı için statorunda genleşme ve büzüşmeler meydana gelerek rotor sıkışması meydana gelmiştir. Motor soğuduktan sonra rotor sıkışması ortadan kalmaktadır. Statorun tamamen deformasyona uğramasını engellemek için ölçümler hızlı bir şekilde kaydedilmiş ve sonlandırılmıştır. Sargı dirençleri ölçümünde her faz sargısı soğuk durumda $3,4\Omega$, enerji verildikten sonra sıcak durumda 4Ω olarak ölçülmüştür.

Düşük frekans tepkisini gözlemlemek amacıyla prototip ASM'ye 50Hz 0-115V ayarlı kaynak besleme yapılmış ve Tablo 7.3.'te verilen değerler ölçümlenmiştir. Yapılan 50Hz deneyinde stator çekirdeği; frekansın düşük olmasından dolayı çabuk doyuma giderek ısınmaktadır. 400Hz'de uygulanan aynı gerilim seviyelerine göre 50Hz'de endüktif reaktansında düşmesiyle daha yüksek akımlar çekilmiştir. Motor statoru ve sargıların zarar görmemesi için ölçümler çok hızlı yapılmıştır. Gerilim seviyesi 0-50V arası kademeli arttırılmış ve rotordan bir mekanik tepki alınamamıştır. 50Hz için motor stator çekirdeği ebatları ve sargı sipir-çap değerleri yeterli gelmemektedir. Hızlı bir şekilde çok 120V uygulandığında yüksek manyetik gürültü oluşarak milde çok az bir mekanik hareket görülmüştür.

Tablo 7.3. 50Hz Kaynak Ölçümleri

50Hz ÖLÇÜMLERİ		
Ölçüm No.	U (V)	I (A)
1	4	0,75
2	10	2,37
3	20	3,66
4	30	5,47
5	50	6,05
6	120	16,2

7.2. Prototip ASM Eşdeğer Devresi

ASM'ların çalışma prensibi temelde transformatöre benzemektedir. Makinanın karmaşık yapısında her an değişebilen çalışma koşullarına göre hesap yapmak, primer ve sekonder sargılarda akan akımları, momenti, güç faktörünü, kayıpları ve diğer bazı gerekli büyüklükleri hesaplamak, hem oldukça zaman alıcı hem de hata yapma olasılığı yüksek işlemler içerir. Bu zorlukları önlemek için makinanın bir faz modeline göre model çıkarılıp makinanın çalışma koşullarını verecek şekilde yeniden düzenlenebilir. Bu yapılan işlemde bir fazı temsil eden elektriksel devreye eşdeğer devre denir[13].

Eşdeğer devrenin çıkarılması için Prototip ASM'un boş ve kısa devre çalışma değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Boş çalışmada ölçülen değerler,

$$P_0 = 212W, \quad I_{10} = 7,66A, \quad U_n = U_{10} = 80V$$

Kısa devre çalışmada ölçülen değerler,

$$P_k = 215W, \quad I_n = I_{1k} = 7,7A, \quad U_{1k} = 75V$$

Değerlere bakıldığında daha öncede belirtildiği gibi verimin ve çıkış gücünün çok küçük olmasından dolayı boş ve kısa devre çalışma değerleri arasında çok fazla fark yoktur.

Eşdeğer devre için hesaplamalar yapılırsa; ($R_1 \cong R_2'$, $X_{1\sigma} \cong X_{2\sigma}'$ kabul edilir)

$$R_K = \frac{P_k}{3.I_{1k}^2} \quad (7.1)$$

Eşitlik (7.1)'den kısa devre direnci R_K , $1,20\Omega$ ($R_K = R_1 + R_2' = 2R_1$) ve R_1 ile R_2' $0,6\Omega$ olarak bulunur.

ASM yıldız bağlı olup eşdeğer devre çıkarılırken faz gerilimleri (U_{1kf}), $75/\sqrt{3}$ hesaba katılır.

$$Z_K = \frac{U_{1kf}}{\sqrt{3} \cdot I_{1k}} \quad (7.2)$$

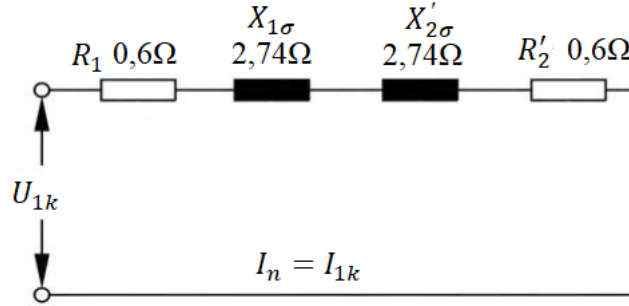
Eşitlik (7.2)'den kısa devre empedansı Z_K , $5,62\Omega$ bulunur.

$X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = 2X_{1\sigma}$ olduğundan,

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (7.3)$$

Eşitlik (7.3)'ten kısa devre reaktansı X_k , $5,49\Omega$ buradan $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$, $2,74\Omega$ bulunur.

Şekil 7.3'te ASM'un $n=0$ ve $S=1$ olduğu rotorun kilitlenmiş durumunda oluşan kısa devre eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 7.3. Kısa devre eşdeğer devresi

Boş çalışma durumunda demir direnci R_{fe} ve mıknatıslanma reaktansı X_m değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. U_{10f} faz gerilimi $80/\sqrt{3}$ olduğundan,

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_{10f}^2}{P_0} \quad (7.4)$$

Eşitlik (7.4)'ten R_{fe} , $30,17\Omega$ bulunur. P_0 , demir kaybı P_{fe} 'ye eşittir.

$$I_{fe} = \sqrt{\frac{P_0}{3 \cdot R_{fe}}} \quad (7.5)$$

Eşitlik (7.5)'ten demir akımı I_{fe} , $1,53A$ bulunur.

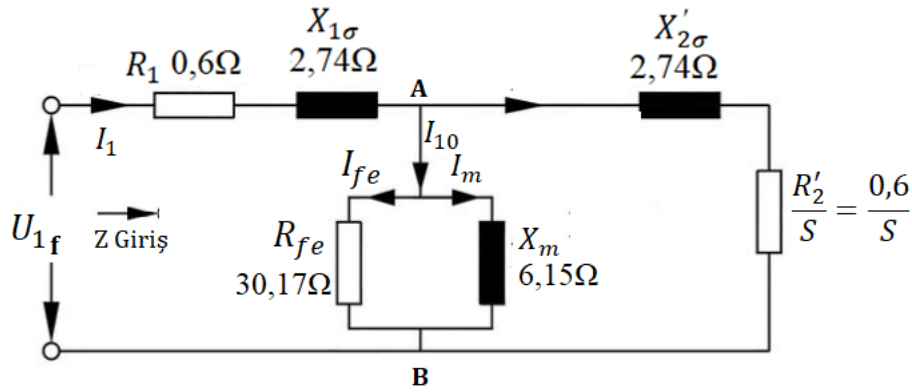
$$I_m = \sqrt{I_{10}^2 - I_{fe}^2} \quad (7.6)$$

Eşitlik (7.6)'dan mıknatıslanma akımı I_m , 7,5A bulunur.

$$X_m = \frac{U_{10f}}{I_m} \quad (7.7)$$

Eşitlik (7.7)'den mıknatıslanma reaktansı X_m , 6,15Ω bulunur.

Şekil 7.4'te ASM'un $n \cong n_s$ ve S kayma değerinde olan "T" eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 7.4 Prototip ASM'un "T" Eşdeğer Devresi

Eş değer devre ile motorun yük durumuna göre oluşacak kayma değerlerinde değişecek parametreler bulunabilir.

Prototip ASM senkron devri n_s , 8000d/dk olup test sırasında n_r , 300d/dk devir elde edilmiştir. Bu değere göre kayma hesaplanıp stator akımı bulunabilir;

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (7.8)$$

Eşitlik (7.8)'den Kayma S, 0,96 olarak yüksek bir kayma değeri bulunmuştur.

$$Z_{AB} = \frac{jX_m \left(\frac{R_2'}{S} + jX_{2\sigma}' \right)}{\frac{R_2'}{S} + j(X_m + X_{2\sigma}')} \quad (7.9)$$

Eşitlik (7.9)'dan şekil 7.4'e göre Z_{AB} empedansı 0,3+ j1,91 olarak bulunmuştur.

$$Z_{giriş} = R_1 + jX_{1\sigma} + Z_{AB} \quad (7.10)$$

Eşitlik (7.10)'dan şekil 7.4'e göre $Z_{giriş}$ empedansı 0,9+j4,65 olarak bulunmuştur.

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{giriş}} \quad (7.11)$$

Eşitlik (7.11)'den stator akımı I_1 , $1,85-9,57j = 9,75 \angle -79^\circ$ A bulunmuştur.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Analizi ve uygulaması yapılan bu çalışmada polimer esaslı demir tozu katkılı PLA ve ABS malzemeleri kullanılarak stator ve rotoru FDM yöntemi ile 3B basılabilen, 750W gücünde olması öngörülen, 6 kutuplu, 400Hz frekansa göre 70V fazlar arası gerilimli bir prototip ASM tasarlanmıştır. Bu tasarım ile endüstride büyük öneme sahip elektrik makinalarının gelişimine yeni bir bakış açısı ve katkı sağlaması hedeflenmiştir. Çalışmada en uygun üretim malzemesini belirlemek için öncelikle statoru oluşturacak ferromanyetik malzeme katkılı ABS filament üretilmeye çalışılmış, üretilen ABS ve çeşitli firmaların ürettiği farklı yüzdelerde ferromanyetik malzeme katkısına sahip PLA'dan Toroid nüvelerin 3B basımı yapılarak manyetik özelliklerinin analizi yapılmıştır. Toroidlerin analizleri yapıldıktan sonra tedarik imkanları dahilinde örnek-3 PLA filamenti üzerinde çalışılarak ANSYS RMxprt modülünde çeşitli parametrelere göre ASM analizi, ASM modellemesi ve testleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarımı yapılan ASM modeli uygun formatta SolidWorks programına aktarılmış, stator ve rotor için yataklama elemanları ve mil ek tasarımı yapılmıştır. Tüm bileşenlerden stator örnek-3 PLA filamentinden; rotor, mil ve yataklama elemanları ABS filamentinden 3B yazıcı ile baskıları yapılmıştır. Baskısı yapılan statorun bobinaj işlemleri yapılmış, rotorun kısadevre çubuklarının ve halkalarının montajı yapıp lehimleme işlemleri tamamlanmıştır. Stator ve rotorun mil ve yataklama elemanları ile montaj ve balans-layn işlemi yapılarak test işlemine geçilmiştir. Prototip ASM 115V 400Hz statik konvertöre ototransformatörü üzerinden bağlanarak gerilimi kademeli bir şekilde arttırılarak yol verilmiş ve her gerilim kademesindeki akım ve güç değerleri kaydedilmiştir. Motor belirli bir gerilim değerinden sonra mil hareketi vermeye başlamış olup daha yüksek gerilim kademelerinde sargıların ısınmaya başladığı görülmüş ve stator sargı ve çekirdeği zarar görmeden test sonlandırılmıştır.

FDM 3B baskı tekniği ile ASM imali literatürde ilk defa yapıldığından dolayı bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Bu çalışmada analizi, tasarımı ve üretimi yapılan ferromanyetik dolgu filament malzemelerin manyetik çekirdek ve elektrik makinaları uygulamaları için üretilmemiş olması, sargı ısıları karşısında genleşmesi ve esnek bir yapıya sahip olması çalışmada istenen verimlilik tam olarak elde edilememiştir. Hesaplama, program analizi ve uygulamada elde edilen verilerde önemli farklılıklar olduğu, kullanılan malzemenin ferromanyetik özelliğinin yeterli olmadığı ve malzeme ferromanyetik özelliklerinin motor veriminde çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada yapılan analizler ve testler sonucunda üretim yönteminin araştırılmaya ve gelişmeye açık olduğu değerlendirilmekte olup eklemeli üretim yönteminin kabul görmesi durumunda;

- Ferromanyetik katkı özellikleri iyileştirilmiş, iyi bir B-H değerlerine sahip, sıcaklık farklılıklarına dayanıklı, elastikiyeti azaltılmış, mekanik dayanımı yüksek ve ferromanyetik izole tanecikli yapısı sayesinde demir kayıpları düşük polimer malzemelerin geliştirilmesinin önünü açabilir.
- Malzemedeki ferromanyetik katkı oranının artırılması için verimli yöntemlerin geliştirilmesini sağlayabilir.
- FDM 3B baskı tekniğine göre SLM ve BJT 3B baskı teknikleri ile daha verimli ve lamine çelikten üretilmiş motorlara yakın sonuçların alınabileceği değerlendirilmektedir.
- FDM tekniği yakın gelecekte; ferromanyetik filament teknolojisinin daha fazla gelişmesiyle prototip makina ve küçük güçlü makinelerin imalinde etkin olabileceği değerlendirilmektedir.
- Malzeme veriminin artmasıyla 3B yazıcılar ile farklı dolgu oranlarında, geleneksel yöntemlerle imali zor farklı geometrilerde en verimli stator ve rotor tasarımları yapılabilir.
- Üretimin 3B yazıcılar ile yapılabilmesi üretimin esnekleşmesine, atık malzemenin azalmasına, çevreye zarar vermeyen tasarımların geliştirilmesine katkı sağlayabilir.
- Bu çalışma manyetik özellikleri daha iyi olan ve tedarik zorluğu nedeniyle temin edilemeyip toroid analizi yapılamamış aşağıda verilen filamentler ile tekrarlanabilir.
 1. “Proto Pasta” firmasına ait manyetik özellikleri verilen tek ticari filament olan(manyetik saturasyon 0,15 T) “Magnetic Iron PLA” ve “Stainless Steel PLA” filamentler
 2. “BASF” firmasına ait “Ultrafuse 316L” ve “Ultrafuse 17-4PH” çelik katkılı PLA filamentler (3B Baskı sonrası sinterleme işlemi gerekmektedir.)

KAYNAKLAR

- [1] Pham, T., Kwon, P., Foster, S. (2021). Additive Manufacturing And Topology Optimization Of Magnetic Materials For Electrical Machines. *Energies* 2021, 14, 283. <https://doi.org/10.3390/en14020283>
- [2] Esen, G.K. (2017). TSE Elektrik Motoru Deney Laboratuvarı Projesi Milli Katkısı ve Hedefleri. *Anahtar Dergisi*. 2017, 29(337) 13-16.
- [3] Aküner, M.C., Aslan, T. (2020). 3 Boyutlu Yazıcı Desteği İle Nüvesiz Tip Alternatör Tasarımı. 8th International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science 23-25 Ekim 2020, Bursa, Türkiye.
- [4] Guo, Y.G., Zhu, J.G. (2004). Study of Permanent Magnet Transverse Flux Motors With Soft Magnetic Composite Core. Australasian Universities power engineering conference (aupec 2004) , 26-29 sept. 2004, Brisbane, Australia.
- [5] Elaskri, A., Ellery, A. (2020). 3D Printed Electric Motors As A Step Towards Self-Replicating Machines. Virtual conference 19–23 october 2020, Carleton University, 1125 Colonel by drive, Canada.
- [6] Lamichhane, T.N., Sethuraman, L., Dalagan, A., Wang, H., Keller, J., Paranthaman, M.P. (2020). Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines. 2020 a review materials Today Physics 15 100255.
- [7] Sarkar, A., Somashekara, M.A., Paranthaman, M., Kramer, M., Haase, C., Nlebedim, I.C., (2020). Functionalizing Magnet Additive Manufacturing With in-situ magnetic Field Source. Critical Materials Institute, Ames laboratory, United States Doe, Ames, ia, 50011, USA, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 37831, USA.
- [8] Naseer, M.U., Kallaste, A., Asad, B., Vaimann, T., Rassölkin, A. (2021). A Review On Additive Manufacturing Possibilities For Electrical Machines. *Energies* 2021, 14, 1940. <https://doi.org/10.3390/en14071940>.
- [9] Güzelbeyoğlu, N. (2005). Elektrik Makinaları I-II Teori-Çözümlü Problemler, 1.Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [10] Akman, O.Ü. (2005). Asenkron Motor Tasarımının Bilgisayar Programı İle Gerçekleştirilmesi, *Makine Tek Dergisi*.

- [11] Çolak, İ. (2008). Asenkron Motorlar, 2.Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [12] Electric Motors
<https://studying-engineer.com/2023/09/15/the-fundamentals-of-electric-motors/>
- [13] Mergen, A.F., Zorlu, S. (2005). Elektrik Makineleri II Asenkron Makineler, 1.Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [14] Saçkan, A.H. (2003). Asenkron Motorlar, 2.Baskı. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [15] Sincap kafesli asenkron motor, <https://riverglennapts.com/tr/three-phase-induction-motor/859-squirrel-cage-induction-motor.html>
- [16] Example of a squirrel cage rotor
<https://www.semanticscholar.org/paper/Efficiency-improvement-of-a-table-fan-motor-Khan-Parasuraman/51f6f42962379f8a559af54485866327d3a92f49>
- [17] ABB İstanbul Ofisi M3LP Asenkron Motor Eğitim Dokümanı (2023). İstanbul.
- [18] Boduroğlu, T. (1994). Elektrik Makinaları Dersleri, Cilt 2, Asenkron Makinaların Hesap ve Konstrüksiyonu, 2.baskı, Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- [19] Ercan, A. A., (2014). Elektrik Motorlarının Verimlilik Standartları, Journal of ETA Maritime Science, Vol:2, No:1, pp. 31-40.
- [20] US Navy Naval Engineering Center, Report Naec-92-170, 60-Hz To 400-Hz Electrical Power Conversion, Advanced Technology Office Support Equipment Engineering Department Naval Air Engineering Center Lakehurst, New Jersey, USA.
- [21] Hupponen, J.(2004) High-Speed Solid-Rotor Induction Machine Electromagnetic Calculation and Design., Thesis for the degree of Doctor of Science, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 197 Diss. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta Finland.
- [22] Sarioğlu, K. (1983). Elektrik Makinalarının Temelleri, Cilt 3 Asenkron Makinalar, 2.Baskı, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [23] 400Hz AC Motors, <https://www.surplussales.com/motors/Motors-400Hz.html>

[24] Chapter 2, Servos, Figure 2-5 Typical Position Servo, 2-8s.

http://www.synchroconverters.com/Synchro_Servo_Loop.pdf

[25] Positional Control System, <https://illustrationprize.com/tr/238-synchro.html>

[26] Zotova, E., Analysis of A High-Speed Squirrel Cage Induction Motor, Doctoral Degree Programme, Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Brno, Czech Republic.

[27] Yılmaz, A., Polat, A., Ergene, L.T., (2018) Yüksek Hızlı Asenkron Motorların Farklı Rotor Yapıları için Analizi, EMO Bilimsel Dergisi, 8(1,13 – 17), 1.

[28] Ateş, H. (1976) Elektrik Makinalarının Hesabı, Yüksek Teknik Öğretmen Okulu Matbaası, Ankara.

[29] Yetgin, A. G., (2004) Üç Fazlı Asenkron Makina Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye, 139.

[30] Gürdal, O., (2001) Elektrik Makinalarının Tasarımı, Atlas Yayın Dağıtım, 1. Baskı, İstanbul.

[31] Yetgin, A.G., (2010) Yarıklı Nüve Tasarımı İle Asenkron Motor Performansının İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 110.

[32] Yetgin A. G., Turan, M., Cevher, B., Tabak, B., Çanakoğlu, A. İ., Asenkron Motor Stator Oluk Geometrisinin Eşdeğer Devre Parametrelerine Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi, https://www.emo.org.tr/ekler/03704cb51f02f80_ek.pdf

[33] Hysteresis Loss and Eddy Current Loss: What's the Difference? (motioncontroltips.com), <https://www.motioncontroltips.com/hysteresis-loss/>.

[34] Jahidin, A. H., Ali, M. M., Mahadi, W. N. L. W. (2011). Magnetic Properties of Grain-oriented and Nonoriented Silicon Iron Core Arrangements, IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), 27-28 June 2011, Shah Alam, Malaysia.

- [35] Ionel, D.M., Popescu M., Dellinger, S.J., Miller, T.J.E., Heideman R.J., McGilp, M.I., (2006). On the Variation With Flux and Frequency of the Core Loss Coefficients in Electrical Machines, IEEE Transactions On Industry Applications, 42, no.3, may/june 2006, 658-667
- [36] Anbarasu, R., Gupta, R. K., Sharma, N. D., Gauthaman, G., Wankhede, A. K., Chavda, P. H., Nataraj, J., Bhattacharjee, B., (1996). Design and Experimental Investigation of High Speed Squirrel Cage Induction Motor, IEEE In Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 08-11 January 1996, New Delhi, India.
- [37] Centner, M., Schafer, U. (2009). Optimized Design of High-Speed Induction Motors in Respect of The Electrical Steel Grade. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(1), 288-295.
- [38] Costa, A. S., Bastos, R. R., Paolinelli, S. C., Nau, S. L., Valle, R. M., Cardoso Filho, B. J. (2014). Characterization of electrical steels for high speed induction motor applications: going beyond the standards. In 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 14-18 September 2014, Pittsburgh, PA, USA.
- [39] Popescu, M., Riviere, N., Volpe, G., Villani, M., Fabri, G., & di Leonardo, L. (2019). A copper rotor induction motor solution for electrical vehicles traction system, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 29 September 2019 - 03 October 2019, Baltimore, MD, USA.
- [40] Gessese, Y., Binder, A., Funieru, B. (2010). Analysis of The Effect of Radial Rotor Surface Grooves on Rotor Losses of High Speed Solid Rotor Induction Motor, IEEE SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 14-16 June 2010, Pisa, Italy.
- [41] Wrobel, R., Mecrow, B. (2019). Additive Manufacturing In Construction Of Electrical Machines—A Review, IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, 22-23 April 2019, Athens, Greece.
- [42] Szabó, L., Fodor, D. (2022). The Key Role of 3d Printing Technologies in The Further Development of Electrical Machines. Machines, 10(5), 330.
- [43] Cross section soft magnetic composite (Dark Field)
<https://www.ifam.fraunhofer.de/en/technologies/soft-magnetic-materials.html>

- [44] Horuz, B. (2024) Kişisel Görüşme. Filamex Teknoloji Ltd.Şti.
- [45] Aydın, M., Güler, B., Çetinkaya, K., (2018). Dikey Ekstrüzyon (Filament) Sistemi Tasarım Ve Prototip İmalatı, International Journal of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 2(1), 1-10.
- [46] Pillay P., (2008) Improved Design of Motors for Increased Efficiency in Residentail and Commercial Buildings, U. S. Department of Energy Building Technologies Program Topical Report, DE-FC26-05NT42323, Clarkson University, Potsdam, New York.
- [47] Selema, A., Beretta, M., Ibrahim, M.N., Verwimp, J., Rombouts, M., Vleugels, J., Kestens, L.A.I., Sergeant, P., (2023). Material Engineering of 3D-Printed Silicon Steel Alloys for the Next Generation of Electrical Machines and Sustainable Electromobility, Elsevier Journal of Magnetism and Magnetic Materials 584 171106, 1-16 .
- [48] Demir, A., Saraç, Z., (2012) Tek Saç Testi (SST) Yöntemi ile Nüve Malzemelerin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi, ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa.
- [49] Çoramık, M. (2018). Örnek Bir Analiz Üzerinden Ansys Maxwell Kullanımında Karşılaşılan Güçlüklere Detaylı Çözüm Önerileri, Uluslararası Necatibey Eğitim ve Sosyal Bilimler Araştırmaları Kongresi (UNESAK-2018), 26-28 Ekim 2018, Balıkesir.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı :

Elk. Müh. Mustafa AYVAZ

EĞİTİM

Derece	Eğitim Birimi	Bölüm
Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi	Elektrik Mühendisliği
Lisans	Marmara Üniversitesi	Elektrik Öğretmenliği
Önlisans	Abant İzzet Baysal Üniv.	Elektrik
Lise	Akhisar Endüstri Meslek Lisesi	Elektrik

