



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



NÜVESİZ TİP ALTERNATÖR TASARIMI ve UYGULAMASI

TARIK ASLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa Caner AKÜNER

İSTANBUL, 2022



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



NÜVESİZ TİP ALTERNATÖR TASARIMI ve UYGULAMASI

TARIK ASLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa Caner AKÜNER

İSTANBUL, 2022

MARMARA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Tarık ASLAN'nın “Nüvesiz Tip Alternatör Tasarımı ve Uygulaması” başlıklı tez çalışması, 2 Şubat 2022 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Mustafa Caner AKÜNER (Danışman)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi İsmail TEMİZ (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Koray ERHAN (Üye)

Gedik Üniversitesi (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı ile Tarık ASLAN'nın Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Mekatronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Adı SOYAD

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen ve meslek hayatımda kendisini örnek aldığım danışman hocam Prof. Dr. M. Caner AKÜNER'e ve ayrıca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi İsmail Temiz, Dr. Öğr. Üyesi Uğur DEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Gazi Akgün'e de teşekkür ederim.

ŞUBAT 2022

Tarık ASLAN



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
KISALTMALAR	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti.....	4
1.2. Tez Amacı ve Orijinal Katkı.....	5
2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON ALTERNATÖRLER.....	7
2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatörlerin Yapısı	7
2.1.1. Rotor	8
2.1.2. Stator	9
2.1.3. Sargılar	10
2.1.4. Sürekli Mıknatıslar	11
2.2. SMSA'ların Çeşitleri ve Sınıflandırılması	13
2.2.1. Radyal akılı SMSA.....	15
2.2.2. Eksenel akılı SMSA.....	19
2.3. SMSA Avantaj ve Dezavantajları	21
3. SMSA MODELLEMESİ	24
3.1. Kısıtlılıklar.....	25
3.1.1. Boyut	25
3.1.2. Malzeme	25
3.2. Tasarım Parametrelerin Belirlenmesi.....	29
3.2.1. Alternatör yapısı	30
3.2.2. Çıkış gücü, faz sayısı, anma gerilimi ve frekansı	30
3.2.3. Oluk/kutup kombinasyonu.....	30
3.2.4. Stator Dış Çapı.....	34
3.2.5. Sürekli Mıknatısların Türü ve Boyutu	34
3.2.6. Rotor Çapı ve Mil Çapı.....	35
3.2.7. Oluk Biçimi	36

3.2.8. Stator Rotor Arasındaki Hava Aralığı.....	36
3.3. SMSA'nın Farklı Çalışma Koşullarındaki Parametrelerin İncelenmesi.....	36
3.4. SMSA'nın Modellenmesi ve Analizi.....	38
4. SMSA PROTOTİP ÜRETİMİ	40
4.1. Rotor Baskısı	42
4.2. Statorun Baskısı.....	43
4.3. Gövde Baskısı.....	44
4.4. Sürekli Mıknatısların Yerleştirilmesi.....	45
4.5. Bobinaj İşlemleri	46
4.6. Prototipin Hazır Hale Getirilmesi	48
5. SMSA UYGULAMA VE TESTİ	51
5.1. Deneysel Testlerin Uygulanması	51
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

NÜVESİZ TİP ALTERNATÖR TASARIMI ve UYGULAMASI

Günümüzde fosil yakıtlara dayalı enerji kullanımı hem çevreye olumsuz zararlar vermekte hem de tükenebilir olduğundan gelecekte enerji krizlerine dair endişe yaratmaktadır. Buna karşın alternatif enerji kaynakları çevre dostu ve yenilenebilir oldukları için daha fazla tercih edilmeli ve yaygınlaştırılmalıdır. Özellikle alternatif enerji üretimi tüketiciler tarafından sağlanırsa fosil yakıt kullanımı büyük ölçüde azalacak ve dünya üzerindeki enerji sorunu büyük ölçüde ortadan kalkacaktır. Tüketicilerin elektrik enerjisi üretimine dahil edilmesi ve bu durumun yaygınlaştırılması için küçük ölçekli alternatörlerin kolay ve düşük maliyetli üretimini sağlayacak bir yöntemin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Aksi takdirde alternatörü meydana getiren stator, rotor ve gövdenin üretimi için çeşitli makine ve karmaşık işlemler gereklidir. Bu da zorlu bir süreçtir ve oldukça maliyetlidir. Bu nedenle 3 boyutlu yazıcı desteği ile çeşitli içerikte Polimer esaslı (PLA) malzeme kullanılarak stator, rotor ve gövde üretimi sağlanabilirse alternatör üretimi kolay ve daha az maliyetli olabilecektir. Bu çalışmada 750W gücünde, standart bir 3 Boyutlu (3B) yazıcı desteği ile çeşitli PLA filamentleri kullanılarak bir sürekli mıknatıslı senkron alternatör (SMSA) modellenmiş, analiz edilmiş, prototip olarak üretilmiş ve çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Bu çalışmanın amacı, yeni bir üretim yöntemini ileri sürmek, bu alandaki gelişmelere öncülük etmek ve elektrik makinelerinin (EA'ların) gelişimine orijinal bir katkı sağlamaktır.

ABSTRACT

CORELESS TYPE ALTERNATOR DESIGN and APPLICATION

Today, the use of energy based on fossil fuels both causes negative damage to the environment and creates concerns about energy crises in the future since it is exhaustible. On the other hand, alternative energy sources should be more preferred and expanded since they are environmentally friendly and renewable. Especially if alternative energy production is provided by consumers, the use of fossil fuels will be greatly reduced and the energy problem on earth will be largely eliminated. In order to involve consumers in the production of electrical energy and to spread this, it is very important to develop a method that will ensure easy and low-cost production of small-scale alternators. Otherwise, various machinery and complex processes are required for the production of the stator, rotor and body that make up the alternator. This is a difficult process and very costly. For this reason, if stator, rotor and body can be produced by using Polymer-based (PLA) material with various content with the support of 3D printer, alternator production will be easy and less costly. In this study, 750W power, a permanent magnet synchronous alternator (SMSA) was modeled, analyzed, produced as a prototype and subjected to various tests, using various PLA filaments with the support of a standard 3D printer. The aim of this study is to propose a new production method, to lead developments in this field and to make an original contribution to the development of electrical machines (EM's).

SEMBOLLER

$2p$	: Çift Kutup Sayısı
A	: Alan [m ²]
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu [Wb/m ² ya da T]
$(BH)_{max}$	: Maksimum manyetik enerji
Br	: Kalıcı mıknatıs artık manyetik akı yoğunluğu
F	: Manyeto Motor Kuvveti [Amper-Sarım]
H	: Manyetik Alan Şiddeti [A/m]
I, i	: Akım [A]
J	: Atalet Momenti
Hz	: Herthz
MW	: Mega Watt
N	: Sarım Sayısı
μr	: Bağlı manyetik geçirgenlik

KISALTMALAR

2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
AA	: Asenkron Alternatörler
ASSA	: Alan Sargılı Senkron Alternatör
DR-SMSA	: Dış Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör
EA	: Elektrik Makineleri
EA-SMSA	: Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör
GYİR-SMSA	: Gömülü Tip İç Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör
İR-SMSA	: İç Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör
IA	: İndüksiyon Alternatörler
NdFeB	: Neodmiyum-Demir-Bor
MMF	: Manyeto Motor Kuvveti
PLA	: Polimer esaslı malzeme (Polilaktik asit)
RA-SMSA	: Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör
SA	: Senkron Alternatör
SM	: Sürekli Mıknatıs
SMSA	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina
YMİR-SMSA	: Yüzey Montajlı İç Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. SMSA Çeşitleri	14
Şekil 2.2. Radyal akıllı iç rotorlu SMSA	15
Şekil 2.3. Yüzey yerleştirmeli iç rotorlu SMSA	16
Şekil 2.4. Gömülü tip iç rotorlu SMSA	17
Şekil 2.5. Radyal akıllı dış rotorlu SMSA	18
Şekil 2.6. EA-SMSA kesiti a: rotor b: stator c: tam model.....	19
Şekil 2.7. a: tek taraflı EA-SMSA b: çift taraflı EA-SMSA.....	19
Şekil 3.1. Grid dolgu yöntemi.....	26
Şekil 3.2. Toroidal nüvelerin baskı modeli	27
Şekil 3.3. Toroidal nüvelerin test aşaması sonuçların bilgisayara aktarılması	27
Şekil 3.4. Günümüzde kullanılan oluk çeşitleri	36
Şekil 3.5. Hava aralığı ve stator dış çapı parametre değişimin verim üzerine etkisi	37
Şekil 3.6. SMSA'nın 2B ve 3B kesit görünümü	39
Şekil 3.7. SMSA'nın verim grafiği	39
Şekil 4.1. a: RMxprt'den elde edilen rotorun 2B modeli b: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 2B modeli c: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 3B modeli	42
Şekil 4.2. Rotor baskısı	43
Şekil 4.3. a: RMxprt'den elde edilen statorun 2B modeli b: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 2B modeli c: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 3B modeli	43
Şekil 4.4. Rotor baskısı	44
Şekil 4.5. Gövde tasarımı a: üstten görünüş b: perspektif görünüş.....	45
Şekil 4.6. Mıknatısların rotora yerleştirilmesi a: aynı kutba bakan mıknatısların yerleştirilmesi b: tüm mıknatısların yerleştirilmesi	45
Şekil 4.7. Sargı kalıbı.....	46
Şekil 4.8. Sargı diyagramı.....	47
Şekil 4.9. Sargıların oluklara yerleştirilmesi a: yerleştirme aşaması b: sargıların sabitletmesi.....	47
Şekil 4.10. SMSA'nın modellenmesi a: parçaların görünüşü b: prototip görünüşü	48
Şekil 4.11. SMSA prototipi a: önden görünüş b: üstten görünüş.....	48
Şekil 4.12. Kasnak tasarım a: kasnağın statoru kavrama şekli b: perspektif görünüşü	49
Şekil 4.13. Kasnağın prototipe yerleştirilmesi	49
Şekil 4.14. Kaplinin 3B modeli a: motor bağlantı yuvası b: SMSA bağlantı yuvası ...	50
Şekil 4.15. SMSA'nın kaplin ile test motoruna bağlantısı.....	50

Şekil 5.1 Deney düzeneği	51
Şekil 5.2 Akım sınırlamak için uygulanan yük.....	51
Şekil 5.3 Osiloskop üzerinde uygulamanın izlenmesi	52
Şekil 5.4 Orijinal gerilim/zaman sinyali	53
Şekil 5.5 10Hz alçak geçiren filtre uygulaması	53
Şekil 5.6 Yüksek devir alternatör çıkış verisi	54
Şekil 5.7 Yüksek devir alternatör frekans spektrumu.....	54



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Sürekli mıknatısların özellikleri ve karşılaştırılması	12
Tablo 3.1. ÇD-PLA bobininin doluluk oranına göre ferromanyetik özellikleri	28
Tablo 3.2. Oluk/kutup oranı – sargı faktörü tablosu [65].	33
Tablo 3.3. Stator dış çapı ve hava aralığına göre verim verileri	37
Tablo 3.4. SMSA Tasarım Parametreleri.....	38



1. GİRİŞ

Nüfus, küreselleşme, teknolojik gelişmeler, üretim, refah seviyesi ve bu gelişmelere bağlı olarak elektrik tüketimin niteliksel artışı fosil yakıtların hızla tüketilmesine ve çevre kirlenmesine neden olmuştur. Bu da birtakım endişeleri beraberinde getirmiş ve yeni enerji kaynak arayışına yönlendirmiştir [1]. Yeni kaynaktan beklenen özellikler, yenilenebilir olması (fosil yakıtlar gibi tükenebilir olmaması), güvenli olması (kurulması ve işletilmesi sırasında çalışan güvenliğine ve sağlığına zarar vermemesi), çevre kirliliği yaratmaması (temiz enerji olması), yeterli enerjiyi sağlaması (yüksek verimli olması) ve kurulum, işletme maliyetinin düşük olmasıdır. Bu durum, uluslararası kuruluşları güvenli, temiz, yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşmaya ve çeşitli düzenlemeler için zemin oluşturmaya yönlendirmiş. Bu da 2007'den itibaren temiz, doğal, çevreye zarar vermeyen enerji üretiminin, özellikle rüzgar enerji santrallerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır [2]. Alternatif enerji üretimindeki bu ivmeye rağmen fosil yakıtlar hala birincil kaynak olmaya devam etse de, son yıllarda enerji kaynakları içindeki payı azalmaktadır. Buna karşın enerji üretilmesinde rüzgar enerjisinin payı ise hızlı bir şekilde artmıştır [3]. Rüzgar santralleri yanında orta/küçük ölçekli enerji üretimi için bir çözüm olan Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatörlerin (SMSA'ların) da yaygınlaşması oldukça önemlidir.

SMSA'lar rüzgar türbinin miline hiç bir aracı olmadan, dişli kutusu gibi aktarma organlarına gerek duymadan, direk olarak bağlanabilir [4]. Bununla birlikte SMSA'ların üstünlükleri şöyle sıralanabilir [5, 6];

- ✓ yüksek verim,
- ✓ rotorda bakır kaybının oluşmaması,
- ✓ bakım kolaylığı,
- ✓ daha fazla güç yoğunluğu,
- ✓ daha yüksek tork,
- ✓ düşük gürültü yapısı,
- ✓ yüksek itme gücü

Özellikle küçük güçteki alternatörler yüksek verim, geniş çalışma aralığına sahiptir [7].

Bu üstünlüklerine bir de daha kompakt bir yapı, daha fazla hafiflik, üretim ve kurulum kolaylığı ile uygun maliyet eklenerek kullanıma sunulursa, enerji tüketicilerini enerji üreticilerine dönüştürebilir ve geniş bir kitle tarafından kullanılması ile enerji üretimine büyük oranda katkı sağlayabilir. Bunun için bu çalışmada son kullanıcıya yönelik kendinden kalkışlı, doğrudan sürüş yeteneğine sahip, birçok ana parçası (stator, rotor, mil ve gövdesi) 3B yazıcı desteği ile kolayca üretilebilecek daha hafif, kompakt, bakım ve kurulumu kolay nüvesiz tip bir SMSA tasarlanmıştır. 3B yazıcıların üretim maliyetleri çok düşük fakat işçilik marifetleri çok yüksektir. Bu anlamı ile bu çalışmanın küçük ölçekli SMSA'ların yaygınlaşmasına katkı sağlayacağı ve literatüre yeni bir üretim modeli sunacağı öngörülmektedir.

Rüzgar hızının değişken olduğu kısımlarda sabit gerilim ve frekans sağlamak için kapalı çevrim kontrol ve tam statik güç dönüşümü de gerekli olabilir [8]. Fakat bu tezin amacı bu güç elektronik devresinin öncesini, yani rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren alternatörün nüvesiz üretiminin sağlanmasıdır. Bu nedenle bu çalışmada, statik güç dönüşümüne yoğunlaşılmanın, sadece alternatör tasarımı ve uygulaması ile ilgili bilimsel katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında öncelikle geniş ve detaylı bir literatür taraması yapılmış ve önemli çalışmalar süzgeçten geçirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda görülmüştür ki; Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler (SMSM'ler) önerildiği yıllardan bu yana popülerliğini kaybetmemiştir. Literatürde Radyal Akıllı SMSM (RA-SMSM) üzerine daha fazla çalışma olmasına rağmen Nüvesiz alternatör çalışmaları daha çok Eksenel akıllı SMSA (EA-SMSA) üzerinde yapılmıştır. Nüvesiz tip uygulamalar EA-SMSA'lar için daha uygun olsa da bu tür alternatörlerin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar, rotor üretim sürecinin zorluğu, akustik gürültü ve vuruş momentinden kaynaklı titreşimdir [9]. Bu çalışmada ortaya konulan üretim hem RA-SMSA, hem de EA-SMSA'lara uygulanabilir. Her iki uygulama içinde karmaşık üretim süreci gerektirmez, torna, freze vb makineleri kullanılmasına gerek yoktur. Elektrik Makinaları (EM) üzerine çalışan bir araştırmacı, tasarımcı ya da üretici bu zorlu süreçlere girmeden alternatörünü tasarlayıp üretebilir. Bilindiği gibi alternatör EM'lerin bir koludur. Bu durumda bu yöntemle elektrik motor üretimi de aynı şekilde gerçekleştirilebilir.

Günümüzde, üretim araçlarının çeşitlenmesi, örneğin 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşması ve üretim çeşitliliğinin artması diğer yandan sürekli mıknatıs malzeme teknolojisinin gelişmesi ve maliyetlerinin düşmesi alternatör üretimi için bir fırsat yaratmıştır. Fakat bu durumun getirdiği bazı kısıtlamalar mevcuttur, yazıcı üretim boyutunun sınırlı olması, filamentlerin ferromanyetik özelliklerinin gelişmeye açık olması çalışmaya belirli kısıtlamalar getirmiştir.

Tasarım sürecinde ANSYS® Maxwell geliştirme platformunun Rmxprt modülünden faydalanılmıştır. Kısıtlamalar göz önüne alınarak tasarım parametreleri belirlendikten sonra Rmxprt hazır paketleri kullanılarak alternatör modellenmesi gerçekleştirilmiş, yine Ansys Maxwell ile tasarlanan alternatörün performans ve verimi analiz edilmiştir. Ardından hesaplama çıktıların fiziksel doğrulamasının gerçekleştirilebilmesi için prototip üretim ve test edilebilirliği adımına geçilmiştir.

Kısaca, bu çalışmada, literatür çalışması (1), hipotez ve sınırlılıklara uygun olarak tasarım parametrelerin belirlenmesi, belirlenen parametreler doğrultusunda alternatörün modellenmesi ve analizi, üç boyutlu tasarımı (2), tasarımın basılması ve prototipin oluşturulması (3), uygulama ve doğrulama (4) ve elde edilen bulguların değerlendirilmesi (5) olmak üzere beş temel başlık altında incelenmiş ve sınıflandırılmıştır.

Tez çalışması ile literatüre yenilikçi bir teknik getirilmiş ve yeni tip nüvesiz alternatör modeli oluşturulmuş ve çelik dolgulu filament kullanılarak prototip üretimi yapılmıştır. Üretimi tamamlanan nüvesiz tip alternatör prototipinin performans, verim ve çalışma karakteristiğinin belirlenmesi için yapılan testlerde Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında mevcut olan motor test düzeneğinden faydalanılmıştır. Ayrıca bu çalışma, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FEN-C-YLP-130219-0033 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Elektrik makinelerinin ilk örneklerinin aksel akılı elektrik makineleri olduğu görülür. 1831'de M.Faraday'ın ilk çalışmalarını 1833'de W.Ritchie'nin ve bir yıl sonra B. Jacobi'nin girişimleri izlemiştir. Buna rağmen ilk patent başvurusu, 1837'de T.Davenport tarafından radyal akılı makineler için yapılmış ve başvurudan sonra radyal akılı makineler tüm dünyada hızla yaygınlaşarak, geleneksel makine tipi olarak kabul görmüştür [10].

Prototiplenen ilk sürekli mıknatıslı elektrikli makinelerde ise çelik mıknatıs kullanılmış ve bu yöntemle uyarma alanı elde edilmiştir. Siemens firması, 1866 tarihinde kendi kendine uyarılan doğru akım alternatörleri tasarlaması ile büyük güçte elektrik makinelerin üretiminin yolunu açmış fakat bu yöntem büyük güçlü elektrik alternatörleri için yaygınlaşmamış daha çok küçük güçlü sürekli mıknatıslı elektrikli makinelerin üretimi ile sınırlı kalmıştır. Ancak tarih 1940'lara geldiğinde ALNiCo'nun keşfi ile sürekli mıknatıslı elektrik makineleri üzerine çalışmalar yeniden hız kazanmıştır [11].

Tarihte 'Senkron Relüktans Motorlar' üzerine yoğunlaşan ilk bilim insanı ise Jaroslaw Kostko olmuştur. Çok parçalı ve bariyerli rotor üzerine 1923 yılında ilk çalışmasını yayınlamış fakat çalışmaları teoride kalmıştır [12,13].

Şebeke kalkışlı radyal akılı ilk senkron makineyi ise 1955 yılında F.W. Merrill tarafından tasarlanmıştır. 4 kutuplu olup yapısında sürekli mıknatıs kullanılan bu ilk şebeke kalkışlı senkron elektrik makinesi, o günün koşullarında sürekli mıknatıs teknolojisi hala istenilen seviyede olmadığından, Ferrit ve Alcino mıknatıslar kullanılıyordu, seri üretime geçememiştir [14].

1984 yılına gelindiğinde ise farklı elementlerden oluşan iki sürekli mıknatısın, Ferrit Sürekli Mıknatısı ile Samaryum Kobalt Sürekli Mıknatısı, elektrik makinesi üzerindeki performans ve verimi karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bu inceleme sonucunda, mıknatısların boyut değerlerinin, enerji miktarlarının ve hacim büyüklüğünün elektrik makinesi üzerinde etkili olduğu görülmüştür [15].

1996 yılında Grauers, kendiliğinden kalkışlı rüzgar türbin alternatörlerin tasarımı üzerine odaklanmış ve özellikle boyutları büyük olmayan alternatörlerin performansının iyileştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir [16].

2000 yılında ise Rizk ve Nagrial 5 KW gücünde, NdFeB Sürekli Mıknatıslı, 8 kutuplu, 450 ile 900 devir/dakika aralığında çalışan bir alternatör tasarlamışlardır [17].

2002 yılında ise Libert F. tarafından kendinden kalkışlı sabit mıknatıslı senkron motor ile aynı özellikteki asenkron motorun arasındaki güç faktörü karşılaştırılmış ve kendinden kalkışlı sabit mıknatıslı senkron motorun güç faktörünün daha yüksek olduğu görülmüştür [18].

Literatürde son on yıldır yapılan çalışmalara bakıldığında kendiliğinden kalkışlı rüzgâr türbin alternatörlerin tasarımı üzerine yoğunlaşıldığı, boyutları büyük olmayan alternatörlerin performansının iyileştirilmesi üzerine çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir.

Günümüzde sürekli mıknatıslı makineler performans olarak üst seviye sonuçlar vermekle birlikte sargılı makinelere göre maliyet olarak hala yüksektir. Mıknatıs üretimi kabiliyeti ve miktarı artıkça ve maliyetleri düştükçe daha da yaygınlaşacağı, geleneksel sargılı makinelerin önüne geçileceği öngörülmektedir.

1.2. Tez Amacı ve Orijinal Katkı

Literatürde incelendiğinde görülmüştür ki yapılan çalışmalar daha çok senkron makinelerin optimizasyonu ve enerji verimliliği üzerine olmuştur. Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcı destekli, kompakt, üretimi kolay, nüvesiz bir alternatör uygulaması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda varmak istenen sonuçlar;

- ✓ Üretimi kolay alternatör oluşturmak,
- ✓ Yeni tasarımlar için alternatör üretim maliyetlerini düşürmek,
- ✓ Rüzgar güllerinin yaygınlaşmasını sağlamak,
- ✓ Yüksek verimli alternatör üretmek,

- ✓ Alternatörlerin ağırlığı azaltmak,
- ✓ Çelik dolgulu filament kullanarak üretimi kolay ve Fuko (Eddy) kayıplarını en aza indirmek
- ✓ Dişli, kayış, kasnak gibi hız ayar mekanizmaları, kısacası dişli kutusundan kaynaklı kayıpların ortadan kaldırmak,
- ✓ Alternatörleri uyartım gereksinimi ortadan kaldırmak, elektriksel verimi yükseltmek,
- ✓ Alternatörlerde bakım ihtiyacını azaltmak,
- ✓ Sabit mıknatıs uyartımdan dolayı toplam elektriksel kayıpların azaltmak,
- ✓ Atalet momentleri küçülterek değişik rüzgar hızlarında (düşük devirlerde bile) alternatörün çalışmasını sağlamak.

Varmak istenilen sonuçlar ile birlikte tezin amacına ulaşması için izlenecek yollar ise;

- ✓ Malzemesi çelik dolgulu filament olan statorlu 750 Watt gücünde, iç rotorlu yüzeye yerleştirilen sürekli mıknatıslı alternatör tasarlamak;
- ✓ Tasarlanan alternatörün prototipini üretmek;
- ✓ Prototipini deney ortamında çalıştırarak, tasarım kriterleri ile deney sonuçlarını doğrulamak,

Böylece tez, literatüre, yeni bir üretim yöntemi ile farklı bir alternatör tasarımı sağlamayı hedeflemektedir.

2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON ALTERNATÖRLER

2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatörlerin Yapısı

Türkçe karşılığı eş zaman olan senkron kelimesi, elektrikli makinelerin çalışma prensibini belirtmek için kullanılan bir terimdir. Bir elektrik makinesinin en önemli iki parçası stator ve rotordur. Dairesel bir görünüme sahip olan stator ve rotor içi içe yer alır. Genelde iç kısımda rotor (endüktör), dönen kısımdır ve rotoru saran stator (endüvi) sabit kısımdır. Bu makinelerin çalışması, başlangıç durumunda, stator veya rotorun en az birinde güçlü bir manyetik akının var olma prensibine bağlıdır. Eğer bu elektrikli makine motor ise güçlü manyetik akının oluşturulduğu parça statordur. Statorun her bir sargısına farklı zamanlarda gönderilen akım sonucu oluşan manyetik akı, hayali bir dönme yapıyormuş gibi düşünülebilir. Rotorda da manyetik alan vardır veya oluşturulur. Statorda sargılarla oluşan güçlü ve hayali dönme hareketiyle yenilenen manyetik alan, rotoru çekme ve itme kuvveti ile hareket ettirir. Ve böylece rotor statoru takip eder ve sonuç olarak fiziksel bir dönme hareketi gerçekleştirilir. Bu durumda elektrik enerjisi hareket enerjisine dönüştürülmüş olur. Statorun hayali devir sayısı ile rotorun gerçek devir sayısı eşit ise bu elektrik motoruna senkron elektrik motoru denir. Eğer bu makine motor değil alternatör ise bu sefer güçlü manyetik alan rotorda yer alır veya oluşturulur. Bu oluşturulan manyetik parça rüzgar gücü veya herhangi bir hareket enerjisi ile devir yapılması sağlanır ve stator rotorun bu devir hareketi ile oluşan manyetik alan değişiminden dolayı endüklenir ve bu endüklenme rotorun statordaki sargıları farklı açılarla kesmesi süresince devam eder. Fakat burada motordan farklı olarak önde giden rotor, endüklenme sonucu hayali bir dönme hareketi yapıp takip eden ise statordur [19]. Ve yine bu takip eş zamanlı ise bu da senkron alternatör olmuş olur. Bu nedenle senkron motor ile senkron alternatör arasında yapı olarak farklılık yoktur. Birbiri yerine kullanılabilir. Elektrik enerjisinden hareket enerjisi elde ediliyorsa motor, hareket enerjisinden elektrik enerjisi elde ediliyorsa alternatör olur [20].

Senkron bir makinenin türü ne olursa olsun ister motor ister alternatör, stator sargılı bir yapıdan oluşur ve bu sargıda elektrik enerjisi yer alır. Fakat rotor türüne göre değişir. Eğer rotordaki manyetik güç, doğru akım beslemeli alan ya da uyartım sargılarıyla oluşturulursa Alan Sargılı Senkron Alternatör (ASSA), eğer manyetik alanı oluşturmak

için uyartım sargısı yerine mıknatıs kullanılarak oluşturulursa bu durumda da Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör (SMSA) adını alır [21].

Bir SMSA'nın genel görünüşü rotorun iç kısımda olması şeklinde olsa da statorun iç kısımda olduğu ya da bulunduğu yerden bağımsız olarak, dönen parça olduğu da olur. Fakat her durumda statordan alternatif akım üretileceği için üzerinde sargı bulundurulur. Rotorda ise kutuplar yer alır. Alternatörlerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı yoktur, yalnızca elektromanyetik endüksiyon prensibi geçerli olup, hareket enerjisi elektromanyetik endüksiyon üzerinden elektrik enerjisine çevrilir [22].

Senkron makine (SM), SMSM ve ASSM'yi kapsasa da sektörde senkron makine denildiğinde; stator sargılarında alternatif akım, rotor sargılarında doğru akım bulunduran ve stator ile rotor arasında eş zamanlı dönme hareketi yapan ASSA'lar anlaşılır.

Bunun dışında rotor ve statorun eş zamanlı hareket etmediği ve kaymaların olduğu asenkron ve indüksiyon makineler vardır.

Senkron alternatörlerin (SA'ların) statorları asenkron alternatörlerin statorları ile yapı olarak aynıdır [23]. Alternatörleri birbirinden ayıran asıl kısım rotorlarıdır. Eğer rotor alternatif akım beslemeli ise asenkron, doğru akım beslemeli ya da sürekli mıknatıslı ise senkron olur [24].

SMSA oluşturan kısımlar ise, alternatörün merkezden gövdesine doğru; mil, milin sürdüğü ve sürekli mıknatıslara yataklık eden rotor, rotorun manyetik akısı ile endüklenen sargılar ve sargıları bir arada tutan ve sargılar için nüve görevi de gören stator yer almaktadır [25]. Burada en önemli olan nokta rotor, sürekli mıknatıslar, sargılar ve stator yapısıdır.

2.1.1. Rotor

SMSA'larda rotorlar sürekli mıknatıslara yataklık eder. Sürekli mıknatıslar gömülerek ya da yüzeyine montaj edilerek rotora entegre edilir. Rotorun gövdesinin ortasında mil için bir açıklık vardır. Bu açıklık sayesinde mil rotora sabitlenir ve milin dönmesiyle

rotor döner. Böylece rotor üzerinde mıknatıslardan kaynaklı manyetik alanlar statordaki sargıları belli açılarla keser ve sargılar üzerinde gerilim indüklenir [24]. Bu indüklenen gerilim elektrik enerjisi olarak kullanılır ya da depolanır.

SMSA'da rotorlar iki türdür. Mıknatısların rotor ile entegre edilme şekline göre isimlendirilir. Bu aynı zamanda rotor yapısını belirleyen bir durumdur. Eğer mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırılmışsa yüzey yerleştirmeli rotor, mıknatıslar rotor içine gömülmüşse gömülü tip rotor olarak adlandırılır. Rotor yüzeyine mıknatıslar yerleştirilecekse yay veya ince şerit şeklinde sıkıca yapıştırılarak sabitlenir. Gömülü sistemlerde rotorda mıknatıs yuvaları oluşacak şekilde tasarlanıp üretilmesi gerekir. Ardından mıknatısların yuvalara yerleştirilerek gömülmesi sağlanır [26]. Bu kısım SMSA'ların Çeşitleri ve Sınıflandırılması'nın da daha detaylı incelenecektir.

SMSA'larda, üzerinde sargılar bulunmadığından, rotorun nüveli yapıda üretilmesine gerek yoktur. Ayrıca mıknatısların manyetik olarak kısa devre olmaması isteniyorsa rotor için manyetik olmayan bir malzeme kullanılması gerekir [27, 28]. Bu durum rotorun daha hafif olması da sağlar.

2.1.2. Stator

SMSA'da üzerinde sargılar yer alan ve genelde hareket etmeyen kısmı statordur. Stator, sargıları bir arada tutmakla birlikte sargıların gerilimle indüklenmesi için çekirdek görevi de görür. Bu nedenle ferromanyetik özelliği olan bir malzemeden imal edilmelidir. Bilindiği üzere ferromanyetik özelliği olan malzemeler, sürekli mıknatısının manyetik alanına maruz kaldığında, maruz kaldığı sürekli mıknatısının manyetik alan çizgileri ile aynı yönde mıknatıslanma özelliği kazanır. Bunlar; Demir, Kobalt, Nikel, Çelik, Alnico gibi maddelerdir. Ve bu malzemeler içinde en çok tercih edilen demirdir. Fakat stator nüvesine dönüştürülen demir, bütün bir kütleden meydana gelmez. Çünkü manyetik alan sargılarda gerilim indüklediği gibi demirden oluşan nüve içinde rotora dik yüzey alanı ile orantılı büyük ve etkili girdap akımları meydana getirir. Bu girdap akımlarına eddy akımları denir ve eğer cılızlaştırılmasa ısı meydana getirerek enerji kaybına neden olur. Bu nedenle bu kayıpları azaltmak için silisli sac kullanılır. Silisli saclar olabildiğince ince ve girdap akımlarının oluşmaması için yüzeyleri yalıtkan

şekilde üretmelidir. Böylece stator diyeceğimiz gövde, bu silisli sacların üst üste paketlenmesi ile elde edilir. Böylece girdap akımları dar bir alana hapsedilir, girdap akımlarından kaynaklı ısı ve diğer kayıplar büyük ölçüde zayıflatılmış olur [29]. Bu zayıflatma silisli sacların kalınlığının karesi ile doğru orantılıdır [30]

Aynı zamanda statoru meydana getiren nüveler, manyetik doyumun artması ve yine girdap akımlarının azalması için içlerinde yaklaşık olarak %3 silisyum bulundurur [31]. Bundan dolayı nüveyi oluşturan lamineler, silisli sac olarak anılır.

Statoru meydana getiren silisli demir saclar oluk geometrisine uygun tasarlanmalı ve kesilmelidir. Oluk tasarımı oldukça önemli olup; sayısı ve şekli SMSA'nın verimi ve manyetik relüktans değişimi üzerine etkilidir. Aynı zamanda oluk geometrisi sargıların yerleştirilmesine ve sargıların kaplayacağı hacme uygun olmalıdır. Bu nedenle stator oluşturulmadan önce, sargı tipi, sargı şekli ile oluk sayısı ve oluk şeklinin hesaplanması ve modellenmesi gerekir. Böylece oluk geometrisine uygun kesilen silisli demir saclar perçinlenir veya paketlenir ve böylece üzerine sargıların yerleştirileceği stator meydana getirilir. Eğer rotorda da sargı kullanılacaksa, rotorda da nüve ihtiyacı olur ve bu nüve yine içinde silisyum bulunan demir veya soğuk çekilmiş çelik saclardan yapılabilir [30].

Bu yöntem dışında, ikinci bir yöntem ise dolgu yöntemidir. Statorun, silisli saclardan değil de ferromanyetik özelliği olan ve aynı zamanda girdap akımlarına neden olmayan bir malzeme ile doldurulması ile meydana gelir. Örneğin içinde demir tozu bulunan reçine ya da Polimer esaslı (PLA) malzemeden üretilmiş statorlar bu yönteme örnek verilebilir. Bu yöntem geleneksel yöntemin dışındadır ve deneysel aşamadadır. Bu çalışmada da literatürde ilk defa içinde çelik tozu bulunan Polimer esaslı (PLA) malzeme kullanılarak stator elde edilecektir.

2.1.3. Sargılar

Stator sargı telleri dış yüzeyi yalıtkan edilmiş bakır iletkenlerdir. Bu iletken bakır teller farklı yöntemlerle sarılarak stator sargısı meydana getirilir. Stator sargısında bakır tellerin izole edilmesinden dolayı akım tel boyunca yol alır. Sarım sayısı anma gerilimine, tel çapı ise çekilen akıma, dolayısıyla alternatörün anma ya da çıkış gücüne göre belirlenir [32].

Böylece faz sayısına, kutup/oluk kombinasyonuna ve sargıların oluklara yerleştirme şekline göre SMSA için gerekli sarım sayısı hesaplanır ve bobinajları gerçekleştirilerek oluklara yerleştirilir. Bu yerleştirmenin, stator sargılarında sinüzoidal bir gelirim indüklemesi için dağıtılmış şekilde yapılması gerekir [33]. Yerleştirmeden sonra SMSA’larda aynı fazı oluşturacak sargılar birbirleri ile seri bağlanır. Bu durumda her bir faz için birbiri ile seri bağlı sargıların yer aldığı bir sargı grubu oluşturulur [34]. Fazlar arası 120 derecelik faz açısı oluşması için sargıların dağıtımını buna göre yapılmalı, fazlar birbirini takip edecek şekilde sıra ile yerleştirilmelidir [35].

2.1.4. Sürekli Mıknatıslar

Sürekli mıknatıslar SMSA’lara ismini veren ana malzemedir. SMSA’ların verimlerini doğrudan ve ciddi oranda etkiler. Kimyasal formüllerine ve yapılarına göre genelde metalik ve seramik şeklinde iki türe ayrılır. Bu iki tür mıknatıs da 1930’a kadar zayıf uyartım göstermeleri nedeniyle EM’lerinde pek tercih edilmemiştir. Fakat 1930’da Alnico mıknatısların keşfi ile ilk gerçek uygulama girişimleri gerçekleştirilmiştir. 1950’de Baryum Ferrit’in keşfi ile bu çalışmaların sayısı daha da artmıştır. Ve ardından 1966’da Samaryum Kobalt (SaCo) türü mıknatısın keşfi ve 1970’lerde K.J. Strnat tarafından EM’larda kullanıma uygun hale getirilmesi ile bu alanda yapılan çalışmalara tekrar ivme kazandırmıştır [21]. 1983’te Neodim-Demir-Bor (NeFeB) türü mıknatısların keşfi ve alternatörlerde kullanılması ile günümüze kadar gelen birçok çalışmaya neden olmuştur [36].

SMSA’da kullanılacak sürekli mıknatısların büyük bir B-H (Manyetik alan şiddetine göre manyetik akı yoğunluğunun değişimi) eğrisine sahip olması istenir. Bunun yanı sıra darbelere, fiziksel zorlamalara ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olması da oldukça önemlidir [8].

Günümüzde en çok kullanılan mıknatıs türleri, AlNiCo, Sert Ferrit, Sm₂Co₁₇ ve NdFeB’dır. Bu mıknatısların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajı vardır. Çalışma yerlerine ve maliyet unsuruna göre hangisi ile çalışılacağına karar verilir. Bu mıknatıslara ait özellikler Tablo 2.1.’de karşılaştırılmıştır [25].

Tablo 2.1. Sürekli mıknatısların özellikleri ve karşılaştırılması

<i>Özellik (Birim)</i>	<i>AlNiCo5(-7)</i>	<i>Ferrit</i>	<i>Sm2Co17</i>	<i>NdFeB</i>
<i>Br (T)</i>	1.35	0.405	1.06	1.12
<i>$\mu_0 H_c$ (T)</i>	0.074	0.37	0.94	1.06
<i>(BH)_{max} (MGOe)</i>	7.5	3.84	26.0	30.0
<i>μ_r (H/m)</i>	1.9	1.1	1.03	1.1
<i>Özgül Ağırlık (kg/m³)</i>	7.31	4.8	8.2	7.4
<i>Öz Direnç ($\mu\Omega cm$)</i>	47	>104	86	150
<i>Isıl Genleşme (10⁻⁶/°C)</i>	11.3	13	9	3.4
<i>Isı Katsayısı (%/°C)</i>	-0.02	-0.02	-0.025	-0.1
<i>Manyetik Doyum (H) (kOe)</i>	3.5	14.0	>40	>30
<i>Metallurjik Değişme Sıcaklığı (°C)</i>	550	1080	350	200
<i>Curie Sıcaklığı (°C)</i>	890	450	800	310
<i>Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)</i>	830	450	720	140
<i>Özet</i>	En yüksek mekanik dayanım ve çalışma sıcaklığı	En düşük maliyet ve özgün ağırlık	Küçük sıcaklık katsayısı	En yüksek verim

Tablo 2.1.'de görüldüğü gibi her bir mıknatısın malzeme yapısına ait birtakım üstünlükleri vardır. Fakat teknolojik gelişimi ile birlikte SM'lerde kullanım sıklığı veya yaygınlığı artan mıknatıs, Nd₂Fe₁₄B şeklinde formüle edilmiş Neodyum (NdFeB) mıknatıs ile samaryum kobalt (Sm₂Co₁₇) mıknatıslardır [37]. Samaryum kobalt mıknatıslar yüksek sıcaklıklarda dahi manyetik özelliğini kaybetmez ve kararlı çalışmaya devam ederler. Neodyum mıknatıslar ise yüksek olmayan sıcaklıklarda en yüksek enerji çarpanına (BH)_{max} sahiptir [38]. Buna karşın korozyona, darbelere ve ısıya (düşük Cuire sıcaklığına sahiptir) çok fazla dayanıklı değildir. Yine de küçük ölçekli alternatörlerde daha çok neodyum tipi mıknatıs tercih edilir. Darbelere ve korozyona karşı sağlamlığını arttırmak için yüzeyi epoxy, reçine gibi manyetik olmayan madde ile kaplanabilir. [21]. Bu durum hava aralığının artmasına neden olur.

Bu iki mıknatıs dışında ferrit tipi mıknatıslarda çok düşük maliyete sahip ve üretimi kolay olduğu için yine yaygın olarak kullanılır. Sert ve kırılgan olmalarına rağmen korozyona karşı yüksek dirençlidir. Girdap akımlarını izin vermez ve mıknatıs türleri içinde en hafif olanıdır. Bu kadar üstünlüklerine rağmen en olumsuz yanı enerji üretim kapasitesinin diğer mıknatıs türlerine göre oldukça yetersiz kalmasıdır [39].

Bunun dışında Cunife, Vicalloy, Pt-Co, Fe-Cr-Co ve Mn-Al-C türü mıknatıslar da vardır fakat bazılarının manyetik özellikleri zayıf olduğu, bazılarının üretiminin zor olması ve bazıları da yüksek maliyetlerinden dolayı nadiren kullanılmaktadır. Mıknatıs pazarının %99'unu Tabla 2.1'de yer alan mıknatıslar oluşturmaktadır [21].

Malzeme yapısı farklı olsa da genel anlamı ile sürekli mıknatıs kullanımının SA'lara getirdiği avantajlar oldukça fazladır. Bunlar [40, 41];

- ✓ Rotorda uyarım (mıknatıslama) akımına gerek kalmaması,
- ✓ Rotorda bakır kaybının oluşmaması,
- ✓ Tasarım esnekliği,
- ✓ Bakım kolaylığı,
- ✓ Aynı boyutta daha yüksek verim (Ağırlık ve atalet momentinin azalması, yüksek güç/boyut oranı),
- ✓ Çok kutuplu alternatör üretim imkanı

olarak sıralanabilir. Mıknatısların SA'lara getirdiği en büyük dezavantaj ise maliyetlerinin yüksek olmasıdır ve rotorun kontrol edilmesi istenildiği durumlarda rotor kontrolünü zorlaştırmasıdır.

2.2. SMSA'ların Çeşitleri ve Sınıflandırılması

Alternatörler elektrik makinelerinin bir kolu olmasına rağmen besleme gerilimine ihtiyaç duymadıkları için doğru akım ve alternatif akım olarak sınıflandırılmaz. Genel olarak sınıflandırılması yapısına göre olur. Bu durumda başlıca

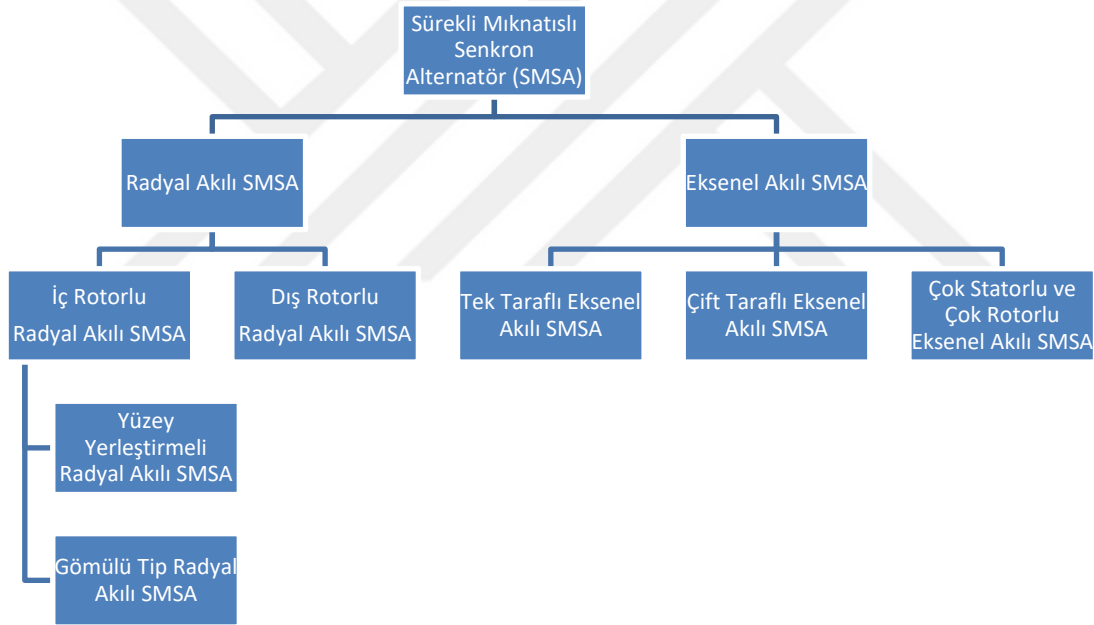
1. Asenkron Alternatörler (AA)

2. Senkron Alternatörler (SA)

3. İndüksiyon Alternatörler (IA) şeklinde yer alır.

Senkron alternatörler de alan sargılı senkron alternatörler ve sürekli mıknatıslı senkron alternatörler olarak ikiye ayrılabilir. Asenkron, indüksiyon ve Alan Sargılı Senkron alternatörler ayrı bir çalışma konusu olup bu tez içinde değinilmemiştir. Bu çalışmada yalnızca SMSA ilgili detaylı çalışma yapılmıştır.

SMSA'lar da stator ve rotorlarının alternatörü gövdesi içindeki geometrik yerleşime ve oluşturdukları manyetik akı dağılımına göre Radyal Akılı (RA) ve Eksenel Akılı (EA) olmak üzere yine ikiye ayrılır [42].



Şekil 2.1. SMSA Çeşitleri

Radyal akılı SMSA'lar iç rotorlu ve dış rotorlu diye ayrılırken, EK-SMSA'lar da tek taraflı, çift taraflı ve çok statorlu ve çok rotorlu olarak sınıflandırılabilir.

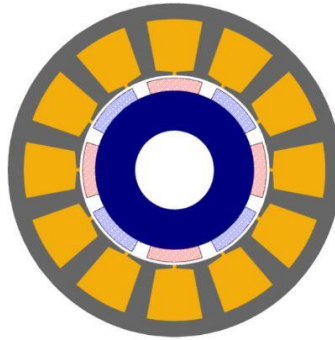
2.2.1. Radyal akılı SMSA

Radyal akılı SMSA rotor ve statorun iç içe geçmesiyle oluşturulur. Rotor ve statorun iç ya da dış kısımda olma zorunluluğu yoktur. Bu nedenle, rotorun bulunduğu kısma bağlı olarak; iç rotorlu veya dış rotorlu olarak adlandırılır. Radyal ismi, oluşan manyetik akının yarı çapsal oluşmasından kaynaklanır. Bu alternatörlerde manyetik akı devir yönüne dik şekilde olduğundan sonlandırma sargıları ortadan kalkar ve bakır kullanımı için daha avantajlıdır [24].

Aynı hacimdeki bir İR-SMSA ile DR-SMSA karşılaştırıldığında, DR-SMSA'lar daha az bakır ve manyetik nüve malzeme ihtiyacı duyduklarından daha hafiftirler. Ayrıca DR-SMSA'larda daha fazla mıknatıs kullanılabilir ve bu nedenle daha fazla kutuplu yapılabilir ve merkez kaç kuvvetten etkilenmeyeceği için yüksek hızlarda çalıştırılabilir. Fakat stator çapı daraltıldığı için aynı hacimdeki İR-SMSA'lara göre daha düşük çıkış gücü, daha az moment oluştururlar [6, 43].

2.2.1.1. İç rotorlu SMSA

Şekil 2.3.'de görüldüğü şekli ile sürekli mıknatıslı rotor stator ile çevirmişse buna iç rotorlu SMSA denir.



Şekil 2.2. Radyal akılı iç rotorlu SMSA

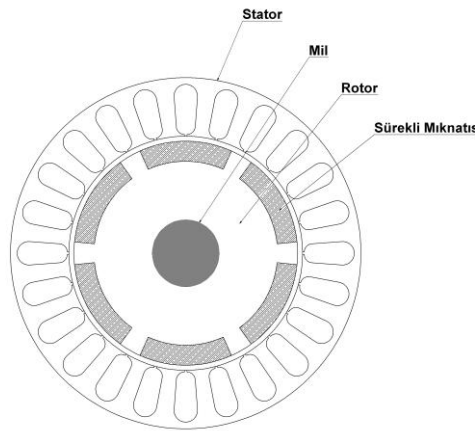
İÇ-SMSA'ların önemli avantajı ise moment/atalet oranının yüksek olmasıdır. Bu moment düşük rüzgar güçlerinde bile enerji üretimini sağlar. İÇ-SMSA'da moment artışı, alternatör uzunluğu ile doğrusal, alternatör çapı ile kareseldir. Aynı büyüklükte rotora sahip bir ASSA ile kıyaslanırsa özgül gücü ve güç yoğunluğu daha fazladır [24].

İÇ-SMSA'ların mıknatısların rotora entegre edilme şekline göre ikiye ayrılır. Eğer mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırılmışsa, Yüzey Yerleştirmeli İç Rotorlu SMSA (YYİR-SMSA), eğer gömülmüşse Gömülü Tip İç Rotorlu SMSA (GTİR-SMSA) denilir. YYİR-SMSA ile GTİR-SMSA karşılaştırıldığında, YYİR-SMSA daha yüksek tork ve daha kalın mıknatıslara sahiptir, GTİR-SMSA'ya göre titreşim ve gürültü oranı daha azdır [44].

Yüzey Yerleştirmeli İç Rotorlu SMSA

Sürekli mıknatısların rotorun dış yüzeyine hava aralığı dikkate alınacak şekilde kuvvetli yapıştırıcılarla sabitlenmesidir. Montaj kolaylığından dolayı çok yaygın kullanılır. Sürekli mıknatıslar genellikle önce bir kutup sonra diğer kutup olacak şekilde, örneğin N kutbu ile başlanırsa, N S N S sıralaması ile yerleştirilir ve rotorda manyetik simetrik durum meydana getirilir.

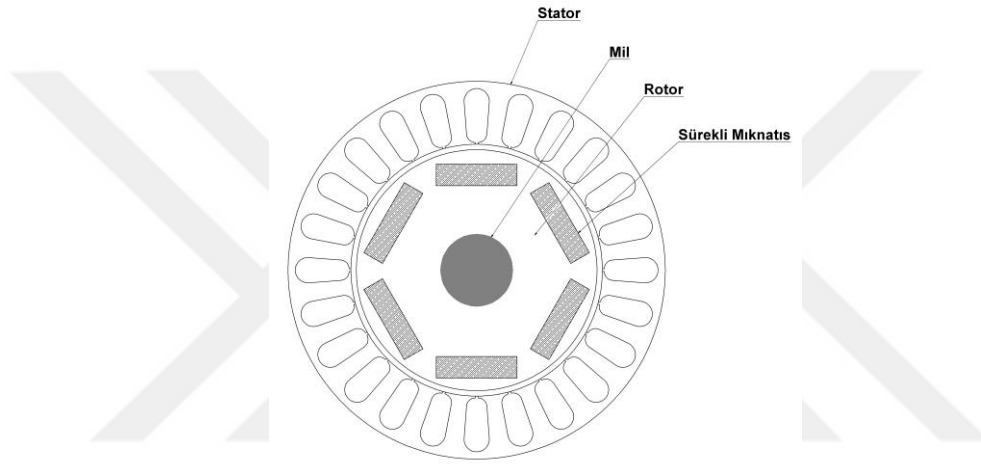
Bu tür SMSA'larda iki önemli problem vardır. Birincisi rotora yerleştirilen mıknatısların arasındaki hava ile birlikte oluşan geniş hava aralığı, bu kutup akısının maruz kaldığı endüvi reaksiyonunun (rotorda var olan manyetik akının toplam manyetik akı dağılımına etkisinin) zayıf kalmasına neden olur [21], ikincisi ise yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetin etkisi ile sürekli mıknatısların gövdeden kopma riskidir. Bu riski ortadan kaldırmak için mıknatıs çevresi manyetik özelliği olmayan bir malzeme ile doldurulabilir, bu durumda yine hava aralığı artmasına ve veriminin düşmesine neden olur [45].



Şekil 2.3. Yüzey yerleştirmeli iç rotorlu SMSA

Gömülü Tip İç Rotorlu SMSA

Sürekli mıknatıs rotor içine yerleştirilirse yeni bir tip ortaya çıkan, buna Gömülü Tip İç Rotorlu SMSA (GTİR-SMSA) denir. Mıknatısların rotor içine gömülmesinden dolayı rotor oyuklu şekilde tasarlanır ve bu durum üretim zorluğu getirir ve maliyeti artırır. Fakat mıknatısların rotor içine gömülmesi ile YYİC-SMSA'lara göre sürekli mıknatısların rotordan ayrılmaları daha zordur ve merkezkaç kuvvetine karşı çok daha dirençli olurlar. Bu en önemli avantajıdır. Özellikle yüksek hızlı sistemlerde bu yöntem tercih edilir. [46].



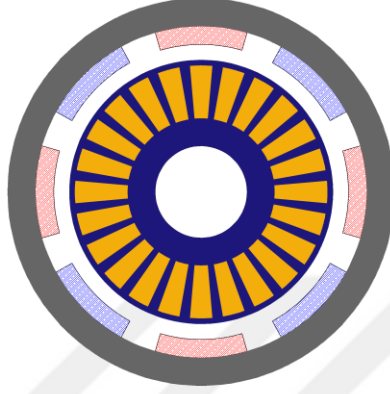
Şekil 2.4. Gömülü tip iç rotorlu SMSA

Gömülü tip rotor kullanımı daha çok sürekli mıknatıslı elektrik motorlarda olmaktadır. Bunun nedeni rotorda statorun manyetik akısı ile oluşan moment büyüklüğünü sadece mıknatıslarla değil relüktans ile de sağlanmasıdır. Böylece relüktans momenti oluşturulur ve daha yüksek verim elde edilir. Relüktans momenti rotor yapısının manyetik ve manyetik olmayan malzemeler kullanılarak özel bir tasarımla gerçekleştirilebilir. [45].

Rotorda kullanılan mıknatısların boyutları ve yerleştirme şekilleri verimi etkilediğinden [47], GTİR-SMSA'larda kullanılan mıknatıslar farklı geometrik şekillerde kullanılabilir. Bunlar; çubuk, tekil ve çoklu bariyer, parçalı, V ve W şeklinde olabilir [42].

2.2.1.2. Dış rotorlu SMSA

Dış rotorlu SMSA'lar Şekil 2.4.'de kesiti gösterildiği gibi statorun alternatörün merkezine yerleştirilmesi ile oluşur.

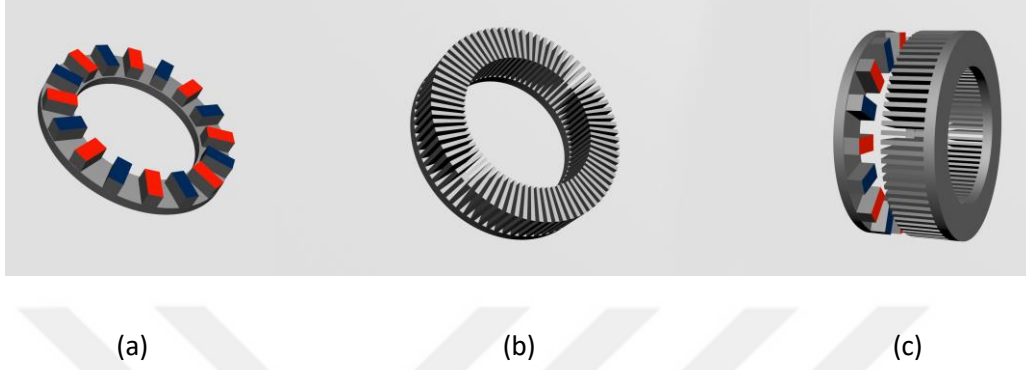


Şekil 2.5. Radyal akılı dış rotorlu SMSA

Dış rotorlu SMSA'larda sürekli mıknatıs rotorun iç yüzeyine yapıştırıldığından merkezkaç kuvvetten etkilenmez. Aksine merkezkaç kuvvet sürekli mıknatısın rotordan ayrılmaması için baskı uygular. Bu nedenle dış rotorlu SMSA da sürekli mıknatıs rotor içine pek gömülmez. Bu tür SMSA'ların en büyük avantajı mıknatıs yerleştirme alanların oldukça geniş olmasıdır. Aynı büyüklükteki iç rotorlu SMSA'lara göre daha fazla mıknatıs alanı vardır. Bu nedenle çok kutuplu tasarımlar için üstünlük sağlar. Ayrıca mıknatıslardan kaynaklı toplam manyetik alan üstünlüğü de oluşturur. Buna karşın sargıların içeri alınması aynı büyüklükteki bir İR-SMSA'ya göre çıkış gücünü düşürür. YYİR-SMSA göre üretim ve montajı daha zor ve maliyetli, GTİR-SMSA'ye göre ise üretim ve montajı daha kolay ve ekonomiktir. [48].

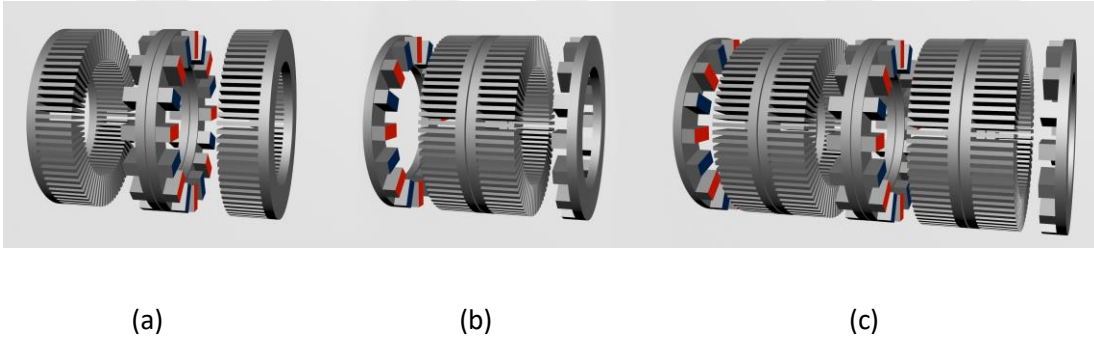
2.2.2. Eksenel akılı SMSA

ESMSA'larda hava aralığı ve hava aralığındaki manyetik akı dönme eksenini ile aynı düzlemde olduğundan eksenel olarak ifade edilir [49]. EA-SMSA'ye ait rotor, stator ve tam model görünüşü Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. EA-SMSA kesiti a: rotor b: stator c: tam model

Eksenel akılı SMSA'lar Şekil 2.7.'de kesitleri gösterildiği gibi 3'e ayrılır. Bunlar, tek taraflı eksenel akılı SMSA, çift taraflı eksenel akılı SMSA ve çok stator ve çok rotorlu eksenel akılı SMSA'dır.



Şekil 2.7. a: tek taraflı EA-SMSA b: çift taraflı EA-SMSA
c : çok stator ve çok rotorlu EA-SMSA

EA-SMSA'ların Şekil 2.6. ve Şekil 2.7'de kesitleri incelendiğinde görüleceği gibi stator ve rotor çapları eşittir ve bunların her birine birer disk denilebilir. Bu diskler aynı eksen üzerinde birbirlerine paralel olacak şekilde üst üste gelmesiyle oluşur. Bir stator ve rotordan oluşacağı gibi çok sayıda stator ve rotordan da oluşabilir. Stator ve rotorun yerleştirmenin tek kuralı, iki stator ya da iki rotorun yan yana gelmemesi kuralıdır. Başlangıcın stator olduğunu düşünürsek, stator, rotor, stator, rotor şeklinde dizilim sağlanır.

Eksenel akılı bir SMSA'nın en önemli üstünlüğü kısa eksenel uzunluğu sayesinde yüksek güç/kütle oranıdır. Eksenel akılı SMSA'da disk sayısı artırarak alternatör gücü modüller bir yapıya kavuşur ve ayarlanabilir. Ayrıca radyal akılı SMSA olduğu gibi hava aralığı kalıcı değildir, farklı çalışma ve ortam şartlarında diskler arasındaki mesafe düzenlenerek hava aralığı değiştirilebilir. Yapısı gereği yüksek güç yoğunluğu için kullanılacak nüve miktarı daha azdır. Eksenel akılı bir SMSA'nın disk çapları büyütülerek kutup sayısı arttırılabilir ve düşük hızlar için de kullanılabilir [50].

Eksenel akılı bir SMSA'nın en büyük dezavantajı ise mekanik zorlamalara neden olacak eksenel kuvvetleri meydana getirmesidir. Bu kuvvete, rotor ve stator arasında eksenel yönde çekim kuvveti de denilebilir ve bu kuvvet alternatörlerde istenmeyen bir yük oluşturur. Radyal akılı SMSA'larda ise yapısı gereği hava aralığının bulunduğu yüzey boyunca çekim kuvvetleri birbirini söndürür. Bu nedenle radyal akılı SMSA'larda bu yük oluşmaz [24].

2.2.2.1. Tek taraflı EASMSA

Eksenel Akılı SMSA'lar içinde en temel ve basit yapıda olan alternatördür. Şekil 2.7. a'da gösterildiği gibi iki adet diskten oluşur; bu disklerden biri rotor, diğeri ise statordur. Rotor ve statorun geometrik boyutları benzerdir. [51].

Üretilmesi ve uygulaması kolay olduğu için çoğu çalışmada tercih edilir. Buna karşın en önemli zayıflığı stator ve rotor arasında dengesiz bir eksenel kuvvetin oluşmasıdır. Bu da tek taraflı EA-SMSA'ların daha karmaşık ve dayanıklı rulman kullanılması gerekliliğini doğurur [50].

2.2.2.2. Çift taraflı EASMSA

Aynı eksen üzerinde genelde iki rotor diski bulunduran ve içinde bir adet stator diski bulunduran sürekli mıknatıslı senkron makinelerdir. İç taraftaki stator diski iki yüzeyinde yer alan rotora uygun şekilde tasarlanır. Bu nedenle stator sargıları paralel/seri sarılabilir, stator üzerinde oluk açıklığı olabilir ya da olmayabilir ve stator ferromanyetik malzemedir veya ferromanyetik özelliği olmayan bir malzemedir

üretilebilir. Bu nedenle nüveli veya nüvesiz tasarımları vardır. Yüksek hızlı jeneratör uygulamaları için uygundur [50].

Çift taraflı eksenel akılı SMSA'nın, tek taraflı eksenel akılı SMSA'ya göre moment ve güçleri daha yüksektir fakat üretimi daha zor, malzeme kullanımı ve maliyeti daha fazladır [52].

2.2.2.3. Çok statorlu ve çok rotorlu EASMSA

Eksenel Akılı SMSA'da stator ve rotor sayıları iki ve daha fazla sayıda ise çok statorlu ve çok rotorlu olarak sınıflandırılır. Böylece elde edilen güç ve moment miktarı daha fazla olmuş olur. En önemli dezavantajı ise karmaşık ve bir takım mekanik sorunlara neden olacak bir yapıya sahip olmasıdır [50].

Bu alternatörlerde birden çok rotor ve stator kullanılması, bu alternatörlerin çapı kendisiyle aynı olan radyal akılı bir SMSA'ya göre daha fazla manyetik akı üretme avantajı da sağlar [53].

2.3. SMSA Avantaj ve Dezavantajları

Elektrik makinaları tasarlanırken, minimum malzeme ve hacim kullanılarak maksimum güç elde edilmek istenmektedir. SMSA'ların diğer alternatörlere göre en önemli üstünlüğü de budur; yüksek güç ve tork yoğunluğuna sahip olmasıdır [54]. Aynı zamanda bir diğer üstünlüğü ise kalkış için dışardan zorlayıcı bir uyarıma ihtiyaç duymamasıdır. Mıknatıslar doğası gereği sürekli var olan bir manyetik alanı üzerinde bulundurur ve bu nedenle sürekli mıknatıs olarak adlandırılır. Manyetik alanın yönünü belirleyen kutuplarıdır. Bu nedenle sürekli mıknatıslar rotora rastgele dizilmez ve genellikle zıt kutuplar birbirini takip edecek şekilde dizilir. Böylece rotor devir hareketine başlaması ile farklı yöndeki manyetik alanlar statordaki sargıları sırayla keser ve statordaki sargılarda gerilim indüklenmesine neden olur. Bu nedenle SMSA'ların rotorlarında sargı, kollektör ve fırça bulunmaz ve uyarım için ekstra bir enerji ihtiyaç duymazlar. Harici bir enerji verilmediği için de uyarım kayıpları oluşmaz ve uyarım kaybı olmadığından güç katsayısı yüksektir.

Bunun yanı sıra sargı ve kollektör bulundurmadiğından daha kompakt bir yapıya sahiptir, bilezik ve fırçalar için harici bir yer bulundurmasına gerek yoktur. Dolayısıyla güç/hacim oranı yüksektir. Diğer bir ifade ile aynı boyuttaki diğer alternatörlere kıyasla çıkış gücü daha fazladır. Ayrıca ASSA'lara göre hafif olmasından dolayı atalet momenti de daha düşük ve dinamik performansı da daha yüksektir [8, Yüzer]. Bu aynı zamanda düşük eksen uzunluğu da getirir. Bu makine boyutların küçülmesine ve daha kompakt makine ve cihazların üretilmesine de neden olur [55]

Uyartım sargıları kullanılmadığı için rotorun silisli saclardan oluşması da gerekmez, kullanılması mıknatısların manyetik olarak kısa devre olmasına neden olur, buna rağmen kullanılması durumunda mıknatıslar arasına manyetik olmayan bariyer kullanılır (hava gibi), manyetik malzeme yerine plastik, reçine, ahşap ve benzeri manyetik olmayan malzemelerin kullanılmasına imkan sağlar, çeşitli tasarım ve üretim üstünlükleri getirir. [56].

Rotorda sargılar yer almadığından çalışma sıcaklığı düşüktür, bu nedenle alternatör daha az enerji ile soğutulur. Soğutmak için daha az enerji kullanılacağından, bu durum da verimini yükseltir. [46].

Rüzgar hızının düşük olduğu durumlarda alternatörün devir sayısı da düşük olacaktır. Bu problemin geleneksel çözümü; standart endüksiyon alternatörlerine akupte edilen dişli kutusudur. Fakat dişli kutularının oldukça fazla dezavantajı vardır; bunların başında maliyet, bakım, karmaşık sistemlerin oluşturulması ve alternatör veriminde kayıp gelir. Oysa SMSA'lar doğrudan tahrikli sistemler olduğundan, üstünlüklerinden biri de SMSA'ların geniş bir çalışma aralığına sahip olmasıdır. Diğer bir ifade ile düşük devirlerde dahi çalışabilir. Ayrıca dişli kutusuna sahip olmadıkları için maliyetleri daha düşük, ağırlıkları daha az ve verimleri daha yüksektir [8, Yüzer]. Bunun yanı sıra düşük gürültüye ve titreşime sahiptir ve yüksek tork elde edilebilir [57]

Buna rağmen zayıf yönleri şunlardır; YYİR-SMSA'lerde merkezkaç kuvvetinden dolayı özellikle yüksek hızlarda mıknatısların yataklarından kopma riski söz konusudur. Yüksek enerjili sürekli mıknatıslar darbelere ve sıcaklığa karşı daha hassas olduklarından daha dikkatli kullanılması gerekir. Yüksek enerjili sürekli mıknatısların

maliyetleri yüksek olduğundan diğer alternatörlere göre maliyetlidir, büyük güçlü alternatörlerde bu maliyet farkı iyice artar. Ayrıca mıknatıslar doğası gereği belirli koşullarda veya belli bir süre sonra özelliğini de kaybedebilir [46].

SMSA'ların belirgin olumsuzluklarından biri de yapısı gereği vuruğu momentine sahip olmasıdır. Vuruğu momenti stator gövdesi ile sürekli mıknatıslar arasındaki etkileşimden kaynaklı oluşur. Vuruğu momenti harmonik oluşumuna ve alternatörün mekanik olarak zorlanması neden olur. Bu nedenle balast ayarı oldukça hassas ve önemlidir [58].

Bir diğer olumsuz tarafı kontrolünün zor olmasıdır. Değişken rüzgar hızları karşısında rotor hızını kontrol etmek mümkün değildir, bu nedenle şebekeye doğrudan verilmez [24]. Verilmesi için kapalı çevrim kontrol ve tam statik güç dönüşümü gereklidir.

Kendinden kalkışlı uygulamalarda özellikle çok yüksek güçlü alternatörlerin farklı rüzgar hızlarında elektrik enerjisi üretebilmesi için kutup sayısının fazla olması gerekir. Bu da rotorda mıknatısların yüzeye montajı için daha fazla alan ihtiyacı doğurur ve mıknatıs maliyetlerinin çok yüksek olmasını ve alternatörün boyutlarının büyümesini sağlayabilir. Bu nedenle MW seviyesinde güç üreten alternatörler için SMSA pek tercih edilmez. [58]. Oysa rüzgar enerjisinden elektrik enerjisinin üretilmesinde en büyük payı MW seviyesinde güç üreten alternatörler oluşturur. Bu nedenle SMSA'ların kullanım alanları büyük santraller hariç her türlü enerji üretim alanları olarak belirtilebilir. SMSM'lerin kullanımı daha çok elektrikli araçlar, robotik uygulamalar, gemiler ve uçaklardır [59].

3. SMSA MODELLEMESİ

Bir alternatör tasarlanmadan önce tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Bu bölümde kısıtlılıklar, literatürdeki diğer çalışmalar ve hesaplamalar yapılarak tasarım parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Tasarım parametreleri belirlendikten sonra Ansys RMXprt kullanılarak tasarım modelinin oluşturulması ve analiz edilmesi de bu bölüm içinde gerçekleştirilecektir.

Alternatörün başlangıç kabulleri; nüvesiz tip olması ve 3B bir yazıcı ile üretilmesidir. Bu nedenle bu bölümde tasarım parametreleri tek tek ele alınarak incelenecek ve diğer parametreler bu inceleme sonucunda belirlenecektir.

Alternatör yapısı, tasarım parametreleri, kutup/oluk sayısı ve alternatörün boyutları belirlendikten sonra alternatör tasarımı bilgisayar ortamında çeşitli mühendislik ve tasarım programları kullanılarak gerçekleştirilebilir. RMXprt ise bu programlar arasında en yaygın kullanılan programlardan biridir. Uzun ve karmaşık matematiksel problemleri hızlı çözüme tasarımcıya yardımcı olur. Bir alternatörün tasarımı 500'ün üstünde parametre kullanılarak sağlanabilir [60]. Bilgisayar desteği olmadan bu kadar fazla parametre ile tasarım yapmak uzun bir süreci alır, hata oluşmaya meyillidir ve yorucudur. RMXprt modülü bilgisayarın donanımına bağlı olarak bu süreci kısa sürede ve kolayca gerçekleştirir. Ansys RMXprt'de bulunan araçlar aracılığı ile parametreler programa aktarılır ve böylece sistem 2B veya 3B olarak modellenir ve analiz edilmeye hazır hale getirilir. İstenirse bazı parametreler değişken olarak Ansys Optimetrics aracı ile tanımlanabilir. Bu da başlangıç ve bitiş sınırı ve adım aralığı belli bir sistemin her bir adım için tekrar tasarlanması ve modellenmesi anlamına gelir. Her bir değişken için tasarım çıktıları aynı grafik üzerinden analiz edilebilir. Böylece, hem en faydalı parametre veya parametreler belirlenmiş olur hem de sistemin performans optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Ve bütün bu işlemlerle birlikte sistemin simülasyonu da (benzetimi de) yapılabilir. Ayrıca Ansys Maxwell'e dışarıdan dosya uzantıları farklı (dwg, sldprt vb) olan çizim çalışmaları ekleneceği gibi [61], yine Ansys Maxwell'de yapılan çalışmalar dosya uzantısı farklı formatlarda dışarıya aktarılabilir.

3.1. Kısıtlılıklar

Günümüzde 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşması ile üretim araçlarının çeşitlenmesine neden olmuştur. Bununla birlikte yeni ham malzemeler ortaya çıkmıştır. Çelik dolgulu PLA filamenti buna bir örnektir. Çelikte var olan ferromanyetik özellik bu filamentinde ferromanyetik malzeme olarak kullanılabilmesi için bir imkan oluşturmaktadır. Üretim araçlarındaki bu gelişmenin yanı sıra sürekli mıknatıs malzeme teknolojisinde de gelişmeler olmuştur ve sürekli mıknatısların üretim maliyetinin düşmesi, yaygınlaşması ve çeşitli boyutlarda üretilmesi elektrik makinelerinin üretiminde yeni yöntem arayışına neden olmuş ve yeni fırsatlar oluşturmıştır. Fakat bu durumun getirdiği bazı kısıtlamalar da mevcuttur, 3B yazıcıdan kaynaklı üretim boyutunun sınırlı olması, çelik dolgulu PLA filamentinin alternatörlerin statorunda kullanılmaya uygun üretilmemiş olması, örneğin içinde %3 silisyum bulundurmaması, bu nedenle ferromanyetik özelliklerinin zayıf olması ve gelişmeye açık olması başta gelir ve çalışmaya boyut ve zayıf malzeme kullanımı gibi kısıtlamalar getirir.

3.1.1. Boyut

Bu çalışmada, stator, rotor ve gövde üretimi tek parça halinde üç boyutlu yazıcı yardımı ile üretileceğinden, bu durum alternatörün boyutunu 3B yazıcının hatasız çalışma süresi ve baskı yüzey alanı kısıtlamaktadır. Yaygın olarak kullanılan 3B yazıcıların baskı yüzey alanları 214 cm x 214 cm olduğundan bu çalışmada da statorun çap uzunluğu en fazla 214 cm olarak sınırlandırılmıştır. Stator ve rotorun genişliği için yapılan çalışmada, rotor genişliği 3B yazıcıda 200 mm genişliğe kadar basılsa da stator baskısı %100 doluluk oranı ile çelik dolgulu bir PLA basıldığından en fazla 40mm genişliğe kadar çıkabilmiştir. Bundan daha uzun basımların hepsi hata vermiştir. Bu da 3B yazıcının 36 saat durmaksızın çalışması ile elde edilmiştir.

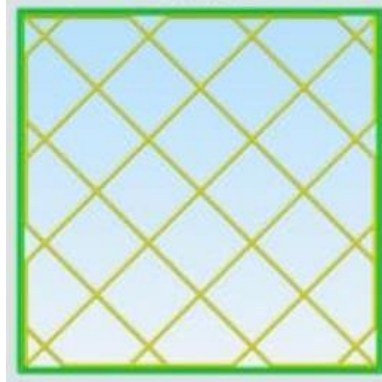
3.1.2. Malzeme

Çalışmada bobin telleri, mıknatıs ve vidalar hariç diğer bütün parçalar; stator, rotor, mil ve gövde, PLA ile basılması hedeflenmiştir. Rotor, mil ve gövde için ferromanyetik özellik içermeyen PLA kullanılırken, stator ise çelik dolgulu PLA kullanarak, statorun

ferromanyetik özelliği kazanması sağlanmıştır. Üretimin PLA ile olması, elektrik makinelerinde sıklıkla kullanılan ve silisli sac plakaların perçinleştirilmesi ile oluşturulan nüve ihtiyacını ortadan kaldırır. Böylece nüvesiz yeni bir alternatör tasarım ve üretimi gerçekleşmiş olur. Bunun yanı sıra, çelik taneciklerinin PLA içindeki küçük tanecik boyutları nedeniyle eddy akım kayıpları da minimum seviyeye indirgenir [45].

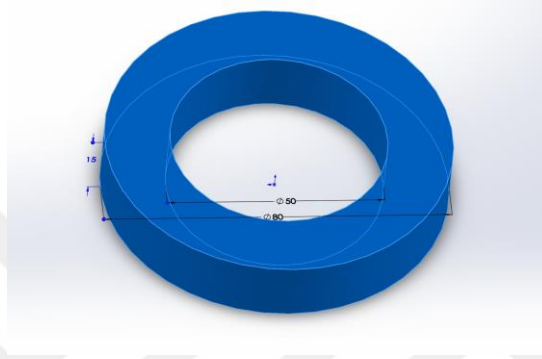
Stator yapımında kullanılacak olan çelik dolgulu PLA, hem yalıtkan hem de ferromanyetik bir özellik göstermektedir. Bu özellik, bir stator için oldukça önemli bir avantajdır; bobin telleri istenirse prensband kullanılmadan oluklara sarılabilir.

3B yazıcı desteği ile çeşitli doluluk oranları ile stator elde edilebilir. Bu doluluk oranlarından hangisinin ferromanyetik özelliğinin daha işlevsel olduğunu tespit etmek ve modellemede kullanılacak Ansys Rmxprt modülüne seçilen doluluk oranındaki çelik dolgulu PLA malzeme değerlerini girmek için Şekil 3.1’de görülen 80x40x15 mm boyutlarında radyal ferromanyetik toroidal nüveler grid dolgu yöntemi ile basılarak 1/1 oranında bobin sarılmış ve laboratuvarında test edilmiş ve sonuçlar Tablo 3.1’de sunulmuştur.



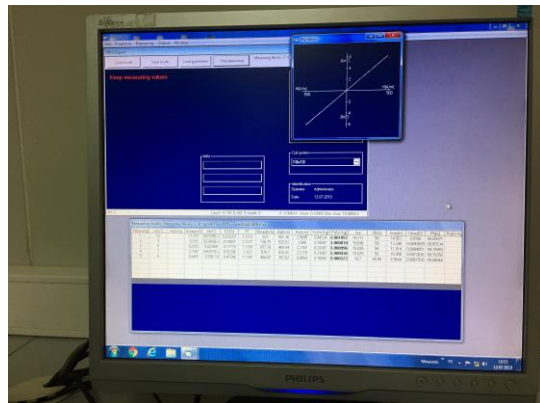
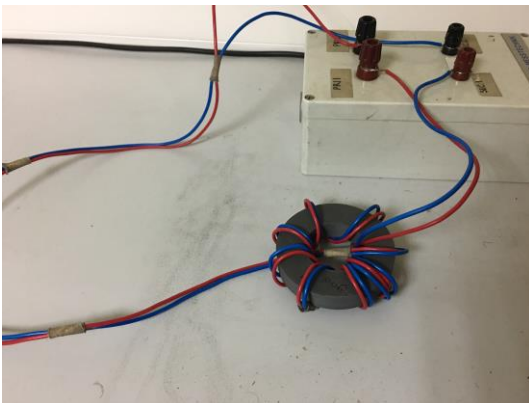
Şekil 3.1. Grid dolgu yöntemi

Teste kullanılan farklı doluluk oranındaki her bir toroidal nüveler 50 Hz frekansında ve aynı koşullar (sıcaklık, nem vs..) altında Şekil 3.2.b’de fotoğraflandığı şekilde test edilmiştir.



Şekil 3.2. Toroidal nüvelerin baskı modeli

Sonuçlar incelendiğinde çelik dolgulu bobin üretiminde kullanılan doluluk oranının ferromanyetik özelliği etkilediği görülmüştür. Örneğin %20 doluluk oranının %10 ve %50’den daha iyi sonuçlar verdiği, %80 doluluk oranının ise en olumsuz sonucu verdiği görülmektedir. En yüksek manyetik alan ise %100 ile elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Toroidal nüvelerin test aşaması sonuçların bilgisayara aktarılması

Tablo 3.1. ÇD-PLA bobininin doluluk oranına göre ferromanyetik özellikleri

%10 Doluluk														Ağırlık : 58,5 g / Öz ağırlık : 1,0345	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT		
1	2	2,0083	312,36	1,83E-05	0,09587	-5,3E-06	1,0423	1,4271	220,9	-0,10121	5,6629	0,002116	2,4002		
2	4	4,0148	622,76	0,001401	0,38363	-1,2E+10	2,2953	2,8532	442,48	-0,35663	11,29	0,004156	4,7974		
%20 Doluluk														Ağırlık : 72,3 g / Öz ağırlık : 1,2785	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT		
1	2	1,9833	173,84	4E-05	0,042438	-1,6E+23	0,55646	1,4038	122,77	-0,1528	3,1516	0,002118	2,2009		
2	4	3,9221	343,62	0,00018	0,17096	28001390	0,6702	2,817	245,92	0,166866	6,2296	0,004219	4,3526		
3	6	5,9721	523,82	0,001919	0,3893	-1,4E-33	2,4661	4,2567	371,62	-0,61308	9,4966	0,006337	6,6299		
4	8	7,9899	697,25	0,003769	0,69864	-1,6E+18	3,9595	5,7064	497,5	-0,33044	12,641	0,00836	8,8646		
%50 Doluluk														Ağırlık : 110,2 g / Öz ağırlık : 1,9488	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT		
1	2	1,9646	284,12	6,08E-05	0,045949	0,003862	1,0597	1,404	202,68	0,203342	5,151	0,002135	2,3199		
2	4	4,0027	578,38	0,000477	0,18969	-2,4E+14	1,293	2,8541	411,96	-0,22949	10,486	0,004193	4,7292		
%80 Doluluk														Ağırlık : 143,7 g / Öz ağırlık : 2,541	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT		
1	2	1,9803	313,4	8,9E-05	0,038764	1,93E-13	0,63211	1,4076	222,59	-0,28046	5,6818	0,002086	0,002086		
2	4	3,9735	631,45	0,000277	0,1575	6,05E+10	1,2709	2,8353	448,47	-0,23007	11,448	0,004131	0,004131		
%100 Doluluk														Ağırlık : 167,7 g / Öz ağırlık : 2,9656	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT		
1	2	2,004	162,69	0,000113	0,017522	3041,6	1,0838	1,4273	115,64	0,942479	2,9494	0,002099	2,2083		
2	4	3,9778	322,93	0,000119	0,068425	5145170	0,4221	2,8211	228,72	-0,06037	5,8546	0,004121	4,3832		
3	6	6,0309	489,23	6,87E-05	0,15789	1,12E+31	0,22101	4,2893	347,05	-0,30385	8,8694	0,006276	6,645		
4	8	7,9903	646,46	0,000868	0,27651	-1,9E+27	2,0901	5,6794	459,15	-0,1124	11,72	0,008186	8,8024		
5	10	10,039	813,78	0,000653	0,43972	7,2E-17	1,2531	7,1582	579,28	-0,07346	14,753	0,010404	11,06		

3.2. Tasarım Parametrelerin Belirlenmesi

2008 yılında Pyrhonen ve arkadaşları bir alternatör tasarımındaki en önemli (temel) parametreleri belirlemiştir [62]. Bu parametreler başlangıç noktası kabul edilip literatür biraz daha kapsamlı incelendiğinde SMSA için aşağıdaki parametrelerin performansı ve verimi için oldukça önemli olduğu görülür. Bunlar;

- Tipi (Asenkron, senkron vs..)
- Yapısı (Akı yönü, rotor ve mıknatıs yerleşimi)
- Çıkış gücü, faz sayısı ve anma frekansı
- Oluk/kutup kombinasyonu
- Stator dış çapı ve stator uzunluğu
- Sürekli mıknatısların türü ve boyutu
- Oluk biçimi
- Hava aralığı
- Rotor çapı
- Bakır tel kalınlığı ve sarım sayısı

olarak sıralanabilir.

3.2.1. Alternatör yapısı

Bölüm 2’de SMSA yapısı ve sınıflandırılması incelendiğinde iç rotor kullanımının moment/atalet oranının yüksek olmasını sağlayacağı görülmüştür. Bu da alternatörün düşük rüzgar güçlerinde de enerji üretmesi anlamına gelir. Diğer taraftan alternatörün iç rotorlu olması montaj kolaylığı yaratır. Ayrıca kanat bağlantılarının alternatöre kolay montaj olmasına da sağlar. Son olarak da iç rotorlu bir alternatör konfigürasyonunda stator ve dolayısıyla stator üzerindeki sargılar da dışarıda olacağı için, başka bir soğutma sistemine gerek kalmadan rüzgardan yararlanılarak soğutma gerçekleştirilebilir. Ayrıca akı yönünün ekstenel olmasının getirmiş olduğu dezavantajlarda oluşmamış olur. Bu nedenle bu çalışmada radyal akılı iç rotorlu bir SMSA tasarlanması öngörülmüştür.

3.2.2. Çıkış gücü, faz sayısı, anma gerilimi ve frekansı

Bir alternatörün gücü genellikle boyutu ile orantılıdır. Maksimum 214 mm uzunluğunda bir çap üzerinde karar vermek gerekirse, alternatör beklenen gücü için 750 W oldukça uygun olduğu görülür.

Doğrultucu maliyeti ve kontrol kolaylığından dolayı, özel amaçlı tasarım değilse daha çok SMSA’lar 3 faz olarak tasarlanmaktadır [24]. Alternatör voltaj çıkışının şebeke gerilimiyle senkron olması için fazlar arası gerilim 380V olarak belirlenmiştir. Böylece alternatörün anma frekansı da 50 Hz şebeke frekansı olarak alınabilir.

3.2.3. Oluk/kutup kombinasyonu

Bir SMSA’nın düşük rüzgar hızlarında da çalışabilmesi için kutup sayısının fazla olması gerekir. Kutup sayısı azaldıkça şebeke frekansında enerji elde etmek için devir sayısını artırmak gerekmektedir ki bu durumda ancak rüzgar hızının yüksek olduğu bölgelere SMSA’yı kurmak avantajlıdır. Bu çalışmadaki SMSA genel kullanım için tasarlandığından düşük rüzgar hızlarına da cevap vermelidir. SMSA’da elde edilen elektrik enerjisinin şebeke frekansına yakın olması kutup sayısına ve rotor devrine bağlıdır [63]. Kutup sayısını belirlerken rotorun dış genişliğinin en küçük değeri hesaplanması gerekmektedir [37]. Bu durumda rotorun dış genişliğinin en küçük

değeri de alınarak alternatör yeniden tasarlandığında alternatörün kutup sayının 40 olması gerektiği ortaya çıkar.

Oluk sayısı ise faz sayısı veya katları şeklinde belirlenir ve çift bir sayı olması istenir. Böylece sargılar asimetrik konumlanmaz ve bundan dolayı dengesiz manyetik kuvvetler oluşmaz. Bu çalışmada 3 faz kullanılacağından oluk sayısı 3'ün katları şeklinde olmalıdır [45].

Oluk sayısının faz sayısının kaç katı olacağı oluk/kutup kombinasyonuna bakılarak belirlenebilir. Bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri Tablo 3.2'de yer almaktadır. Çalışmada gösterilen N_{ssp} kutup ve faz başına düşen oluk sayısı ifade eder. Formülü

$$N_{ssp} = \frac{N_s}{2pm} \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada (p) kutup, (m) faz ve (N_s) oluk sayısıdır.

N_{ssp} değerinin 0,5 ve daha küçük bir değerse elektrik makinesinin sargı faktörünün (K_w) yüksek seviyede olduğu ve oluk/kutup kombinasyonu için uygun olduğu anlamına gelir. Tablo 3.2. incelendiğinde kutup/oluk kombinasyonun bu kritere göre oluşturulduğu görülür. Ayrıca Tablo 3.2.'de bilgi verilmesi amacı ile her kombinasyonun K_w değeri de verilmiştir. Böylece bu tablo bize doğru kombinasyon belirleme fırsatı verir.

Tabloda 40 kutup için birçok oluk/kutup kombinasyonunun olduğu fakat içlerinde en yüksek sargı faktörü 36 oluk ile sağlandığı görülmektedir. Sargı faktörünün yüksek olmasına rağmen, yine de oluk sayısının fazla ya da az olmasının avantaj ve dezavantajları da bakmak gerekir.

Kutup ve faz başına düşen oluk sayısının fazla olması, düşük kaçak reaktans ve daha yüksek aşırı yük kapasitesinin oluşmasına neden olur [64]. Bu önemli bir avantajdır ve sargılarda daha iyi sinüzoidal MMF dalgası elde edilmesini sağlar [58].

Dezavantajı ise stator boyutu değişmeyecekse oluk boyutlarının küçülmesi, işçilik, daha fazla bobinaj işlemlerin ortaya çıkması olarak sıralanabilir. Eğer stator boyutu büyütülerek oluk sayısı artırılabaksa, bu durumda nüve malzeme miktarının artışı, buna bağlı olarak demir kaybı artışı, statorla birlikte rotor boyutunun da büyümesi ve daha fazla mıknatıs kullanılması gibi önemli dezavantajları yanında getirir.

Bu çalışmada 3B yazıcı kullanılacağından oluk boyutlarından kaynaklı fazladan bir işçilik veya zorluk oluşmaz. Oluk sayısının artmasının getireceği tek dezavantaj daha fazla sargı sarılması ve oluklara yerleştirilmesi olacaktır. Fakat buna karşın oluk sayısının fazla olmasının getirdiği avantajlar daha fazla olduğundan ve 36/40 oluk/kutup kombinasyonunun diğer kombinasyonlara göre daha yüksek sargı faktörü meydana getirmesinden dolayı bu kombinasyonun kullanılması tercih edilmiştir.

Tablo 3.2. Oluk/kutup oranı – sargı faktörü tablosu [65].

Nssp, Kw																				
Ns\2p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	0,5 0,866		0,25 0,866				0,125 0,866		0,1 0,866				0,07 0,866		0,062 0,866				0,05 0,866	
9		0,5 0,866	0,375 0,945	0,3 0,945	0,25 0,866						0,125 0,866	0,115 0,945	0,107 0,945	0,1 0,866						0,07 0,866
12			0,5 0,866	0,4 0,966		0,285 0,966	0,25 0,866								0,125 0,866	0,117 0,933		0,105 0,933	0,1 0,866	
15				0,5 0,866		0,357 0,951	0,31 0,951		0,25 0,866									0,125 0,866		
18					0,5 0,866	0,42 0,902	0,375 0,945		0,3 0,945	0,27 0,902	0,25 0,866									
21						0,5 0,866	0,437 0,870		0,35 0,953	0,318 0,953		0,269 0,89	0,25 0,866							
24	Nssp ≥ 1						0,5 0,866		0,4 0,966	0,36 0,958		0,307 0,95	0,285 0,966		0,25 0,866					0,19 0,943
27									0,5 0,866	0,45 0,877	0,36 0,958	0,375 0,945	0,346 0,954	0,321 0,954	0,3 0,945	0,281 0,915	0,264 0,877	0,25 0,866		
30									0,5 0,866	0,45 0,874		0,384 0,936	0,357 0,951		0,312 0,951	0,294 0,936		0,263 0,874	0,25 0,866	
33												0,5 0,866		0,423 0,903	0,392 0,928		0,343 0,954	0,323 0,954		0,289 0,928
36											0,5 0,866	0,46 0,867	0,428 0,902	0,4 0,966	0,375 0,945	0,35 0,953		0,315 0,953	0,3 0,945	0,285 0,966

		Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar		Nssp ≤ 0,866
--	--	---------------------------------------	--	--------------

3.2.4. Stator Dış Çapı

Oluk/kutup kombinasyonu belirlenirken kutup sayısının fazla olması için rotorun en küçük dış çapı Ansys Maxwell’de çeşitli modellemeler yapılarak, 40 kutup için 152 mm olarak hesaplanmıştı. Kutup sayısının yüksek olmasının nedeni ise tasarlanan alternatörün çalışma aralığını geniş tutmak ve düşük rüzgar hızlarında da alternatörün çalışmasını sağlamaktır.

Stator dış çapı ise rotor, mıknatıs kalınlığı, oluk büyüklüğü hesaplandıktan sonra varılan çap ile 3B yazıcının basabileceği çap arasında kalan farkın Ansys Maxwell’in Optimetrics aracı kullanılarak milimetre büyüklüğünde adımlara bölünüp, her adımın modellenip en yüksek alternatör verimini sağlayacak parametrenin çıkarılması ile hesaplanabilir. Bu nedenle bu aşamada stator dış çapı değişken parametre olarak tanımlanmıştır. Bu durumda Ansys Maxwell aracılığı ile verilen aralıklardaki çaplar teker teker uygulanarak alternatör verimin için en yararlı çapın bulunmasını sağlayacaktır.

3.2.5. Sürekli Mıknatısların Türü ve Boyutu

Doğrudan sürürlü alternatörlerde düşük hızlarda da yüksek moment verebilecek bir mıknatısa ihtiyaç vardır. Bu nedenle, mıknatıs türleri incelendiğinde manyetik akı yoğunluğu olabildiğince yüksek olan mıknatıslar öncelikle ele alınmıştır. Günümüzde manyetik akı yoğunluğu en yüksek olan mıknatıs nadir toprak elementi (NdFeB) sürekli mıknatısıdır [24]. Ayrıca 2. Bölüm’de ‘Mıknatıs Türleri’ ve 1.Bölüm’de literatür özeti incelendiğinde de görülecek ki; bu tür çalışmalar için en fazla kullanılan mıknatıslar da NdFeB türü sürekli mıknatıslarıdır. Bu çalışmada da NdFeB türü mıknatıs kullanılması verimlilik açısından üstünlük sağlayacaktır.

Mıknatısların yerleşimi yüzey yerleştirilmeli ya da gömülü tip olabilir. Bu çalışmada mıknatısların yüzey yerleştirilmeli olarak kullanılması öngörülmüştür. Bunun birinci nedeni gömülü tip 40 kutuplu bir alternatör tasarımında rotor çapının genişlemesi ile birlikte toplam alternatör çapının 3B yazıcı baskı oluşturma alanının dışına çıkması,

ikinci neden ise mıknatısların rotora gömülmesi durumunda rotor da farklı işlemler yapmak gerektiğinden, mıknatıslar arasına bariyerler koymak ve relüktans yapısı oluşturmak gibi, bu tasarım şeklinin 3B yazıcı üretim şekline uygun olmamasıdır.

Bilindiği üzere mıknatısların yüzeye yerleştirilmesinin en büyük dezavantajı merkez kaç kuvvetle savrulmasıdır. Bu kuvvetten mıknatısların daha az etkilenmesi için rotorda mıknatıs yatakları yapılması öngörülmüş ve rotorun çapı bu öngörüye uygun olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda bu yuvalar mıknatıslar arasında bariyer görevi de görecek ve özellikle mıknatısların rotora yapıştırma işlemini oldukça kolay hale getirecektir.

Mıknatıslar için yapılacak olan yuvaların et kalınlığının yaklaşık 2 mm olması hesaplanmıştır. Bu durumda mıknatıs kalınlığı basit bir matematik hesabı ile bulunabilir. Rotor dış çapı 152 mm olduğuna göre $2\pi r$ 'den çevre uzunluğu yaklaşık olarak 478 mm olarak bulunur. Yuva et kalınlığı için 39x2 mm'den 78 mm ayırmak gerekir. Bu durumda 40 adet mıknatıs için 400 mm alan kalmış olur ki bu da her bir mıknatıs genişliğinin 10 mm olacağı anlamına gelir. Burada yaklaşık olarak hesaplamalar verilmiş olsa da tasarımda mikrometre düzeyinde düzeltmeler yapılmıştır.

Stator ve rotorun uzunluğu ile mıknatısın uzunluğu aynı olacağı için 40 mm olarak belirlenmiştir.

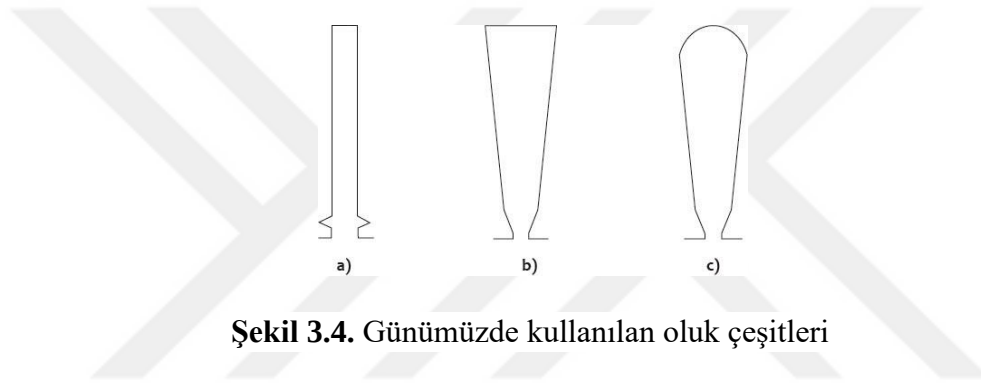
Türkmenoğlu 2016 yılındaki çalışması ile SMSA'lerde mıknatıs et kalınlığının büyük seçilmesinin çıkış gücü ve performansı olumlu yönden etkilediğini göstermiştir [66]. Başka bir ifade ile mıknatısın çapı, kalınlığı artıkça gücü de artar. Bu nedenle 40mm uzunluğunda 10mm genişliğinde mıknatıslar incelendiğinde 4mm ve 5mm et kalınlığına sahip iki farklı mıknatıs büyüklüğünün tasarımda kullanılabileceği görülmüştür. 5 mm daha kalın olduğundan tercih edilmiştir.

3.2.6. Rotor Çapı ve Mil Çapı

Rotor çapı 152 mm olarak tasarımın ilk aşamasında hesaplanmış ve ona göre diğer hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Mil çapı ise test ortamı göz önüne alınarak, 25 mm olarak tanımlanmıştır.

3.2.7. Oluk Biçimi

Tasarımda yer alacak oluk şekli oldukça önemli olup alternatörün manyetik, elektriksel ve fiziksel karakteristiğini oluşturan temel öğelerden biridir ve alternatörün verimini oldukça etkiler. Bu nedenle literatürde oluk şekli üzerine birçok çalışma yer almaktadır ve oluk şekillerinin kendilerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Günümüzde Şekil 1'de yer aldığı gibi ağzı açık oluklar yaygındır. Oluk ağzının açıklığı daraldıkça alternatörün verimi yükselir [67]. Üretimde kolaylık sağlamasından dolayı yaygın olarak Şekil 1.c ile gösterilen damla oluk kullanılır. Bu oluk geometrisinin harmonik kayıpları daha düşük, verimi ise diğer oluklara göre daha yüksektir [68].



Şekil 3.4. Günümüzde kullanılan oluk çeşitleri

3.2.8. Stator Rotor Arasındaki Hava Aralığı

Hava aralığı akı yoğunluğunu oluşturur ve sargıların en yüksek verimle kullanılmasını sağlar, büyüklüğü buna göre belirlenmelidir [47]. Bu nedenle stator dış çapı gibi hava aralığı da değişken parametre olarak tanımlanıp 1 mm başlayıp 4 mm kadar adım aralığı 1 mm olacak şekilde modellenecektir. Bu modelleme stator dış çapı parametresinin her adım aralığı için yeniden tekrarlanacaktır. Ansys Maxwell'de istenilen kadar değişken parametrenin birlikte analiz edilmesi tasarımcıya önemli bir üstünlük sağlar.

3.3. SMSA'nın Farklı Çalışma Koşullarındaki Parametrelerin İncelenmesi

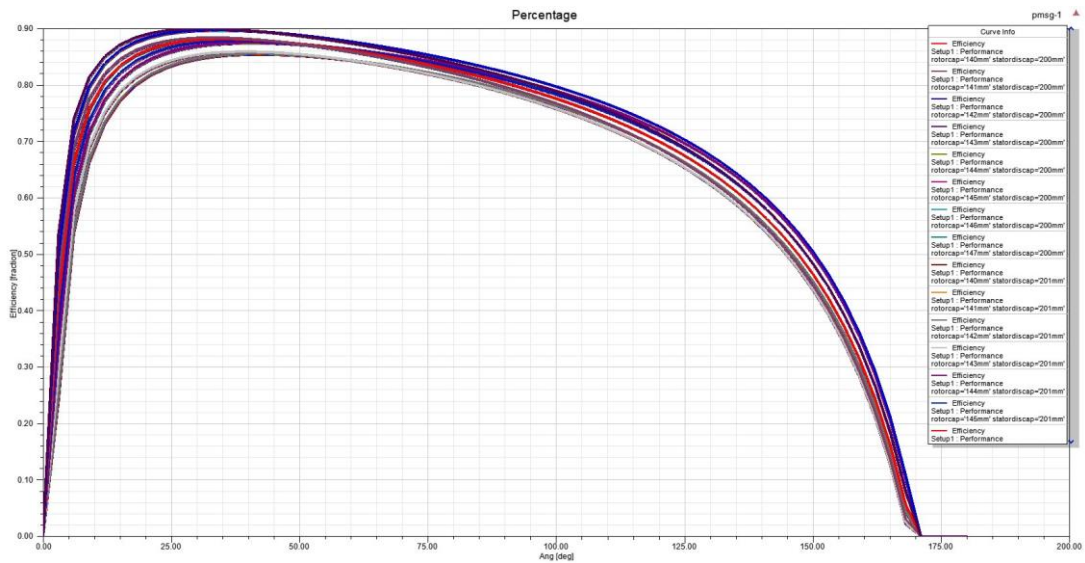
Hava aralığı ve statorun dış çapı parametrelerindeki değişimin verim üzerine etkisi Ansys Maxwell paket programında bulunan Ansys Optimetrics aracı ile, hava aralığı 1 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm ve stator dış çapı 205 mm'den başlayarak 210 mm'de kapsayacak şekilde 1 mm aralıklarla değişken olarak tanımlanmış, böylece

karşılaştırılmalı incelemek ve analiz etmek üzere 24 farklı tasarım ya da model elde edilmiş, bu sayede bütün çıktılar aynı grafik üzerinde incelenebilmiştir. Bu analiz sonucunda elde edilen veri grafiği Şekil 3.3’de ve verim çıktıları ise Tablo 3.3’de yer almaktadır. SMSA’nın en yüksek verime, hava aralığı 1mm, statorun dış çapı 210 mm iken ulaştığı görülmektedir.

Tablo 3.3. Stator dış çapı ve hava aralığına göre verim verileri

Stator Dış Çapı	Hava Aralığı			
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
205 mm	90.0741	89.2998	88.7834	88.4559
206 mm	90.0123	90.134	89.9978	88.2638
207 mm	90.0065	89.9683	89.825	88.0712
208 mm	90.2071	89.8033	89.6528	89.4284
209 mm	90.4922	90.4791	89.3094	89.0613
210 mm	90.6496	90.6396	89.4811	89.2448

Hava aralığı ve dış rotor çapına bağlı elde edilen tasarımların verim çıktıları detaylı incelendiğinde hava aralığı değişiminin stator dış çapı değişimine göre daha etkili olduğu, Şekil 3.5’de görünen verim grafikleri hava aralığına göre gruplaştıkları görülmüştür.



Şekil 3.5. Hava aralığı ve stator dış çapı parametre değişimin verim üzerine etkisi

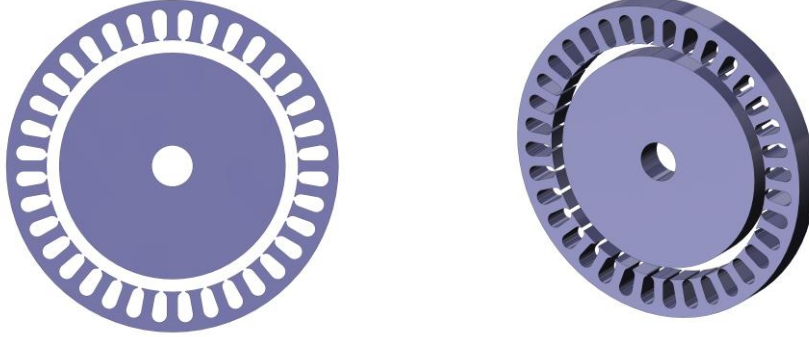
3.4. SMSA'nın Modellenmesi ve Analizi

Farklı çalışma koşullardaki parametrelerin incelemesi sonucunda elde edilen analiz ile birlikte Tablo 3.4.'de tasarım parametreleri verilmiştir.

Şekil 3.8.'de SMSA'nın 2B ve 3B görünümü yer almaktadır.

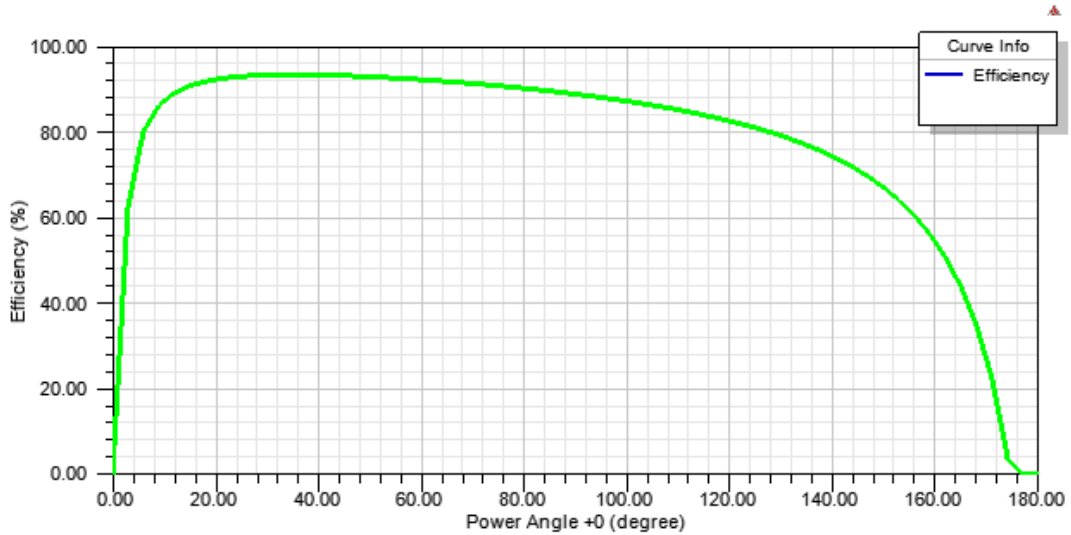
Tablo 3.4. SMSA Tasarım Parametreleri

Genel Makine Parametreleri	
Makine Tipi	Radyal Akılı SMSA
Kutup Sayısı	40
Slot sayısı	36
Rotor pozisyonu	İç Rotorlu
Gerilim	380 V
Güç	0,75 kW
Stator Parametreleri	
Malzeme	Çelik Dolgulu PLA
Doluluk Oranı	%100
Dış Çap	210 mm
İç Çap	159 mm
Uzunluk	40 mm
Oluk Şekli	Damlacık
Olut Hs0	0.5 mm
Olut Hs2	8,0635 mm
Olut Bs0	2.5 mm
Olut Bs1	6.46087
Olut Bs2	7.8718 mm
Rotor Parametreleri	
Malzeme	PLA
Hava aralığı	1 mm
Dış Çap (mıknatıslar dahil)	157 mm
İç (mil) çapı	26 mm
Uzunluk	40 mm
Mıknatıs Tipi	NdFeB (N35)
Mıknatıs Ölçüleri	40x5x10 mm



Şekil 3.6. SMSA'nın 2B ve 3B kesit

Modelin verim grafiği Şekil 3.7.'de yer almaktadır. Verim grafiği incelendiğinde SMSA'nın verim oranının %90.65 olduğu ve uygulanabilir olduğu görülmektedir. Fakat sadece manyetik özelliği, ÇD-PLA'ları SMSM'ler için kullanılabilir yapmaya yetmeyebilir. Uygulama ile birlikte ÇD-PLA'nın ne kadar etkili olduğu görülecektir. Bu çalışma literatürde ilk defa deneyimlendiği için pratikte elde edilen sonuçlar farklı da olabilir. Bundan sonraki aşama prototip üretimi ve teoride elde edilen bu sonucun uygulamadaki doğruluğunun test edilmesi olacaktır.



Şekil 3.7. SMSA'nın verim grafiği

4. SMSA PROTOTİP ÜRETİMİ

Bir önceki bölümde RMXprt modülü ile modellenen SMSA'nın elde edilen sonuçların deneysel doğruluğunu sağlamak için bu bölümde SMSA'nın prototipinin üretilmesi ve karşılaşılan zorluklar işlenecektir. RMXprt ile elde edilen tasarımın prototiplenebilir olması için üzerinde birkaç değişiklik yapmak gerekir. Bu amaçla oluşturulan tasarımın SolidWorks programına aktarılması, çalışma koşullarını bozmayacak şekilde düzenlemeler yapılması (örneğin modelleme kısmında da geçen mıknatıs yuvalarının oluşturulması) ve sonuç olarak 3B yazıcı desteği ile prototip üretime hazır hale getirilmesi gerekmektedir.

SolidWorks, 3B katı modellemeleri oluşturma, değiştirme ile modelleme üzerinde analiz ve optimizasyon desteği sağlayan gelişmiş bir CAD (grafik-tasarım) programıdır. 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. Solidworks, prototip üretimde kolaylık sağlayacak birtakım işlemleri gerçekleştirmesinin yanı sıra modelin dilimleme için gerekli olan baskı (.stl uzantılı) formatına dönüştürülmesini de sağlar. Bu nedenle eğer Ansys Maxwell ile modelleme yapılmışsa 3B bir yazıcıda basmak için SolidWorks gibi bir program kullanmak gereklidir. Fakat Ansys Maxwell'deki modelleme direk olarak SolidWorks'a aktarılmaz. Ansys Maxwell ile yapılan modellemenin format değişimi yapılarak SolidWorks'un tanıyabileceği bir uzantıya dönüştürülmeli ve o şekilde aktarım sağlanmalıdır.

Aktarma sonrası SolidWorks çalışma penceresinde görünen tasarım karmaşık, eksik ve kalabalık olabilir. Ansys Maxwell tarafından oluşturulan bütün parçalar aktarılacağından öncelikle gereksiz parçaların (örneğin sargıların) temizlenmesi ve tasarımın simetrililiğinden dolayı tasarımın tümü değil de en küçük eş parçalara bölünerek sadece bir parçası aktarılabilir, eksikliğin tamamlanması gerekir.

Bütün bu işlemler yapıldıktan ve dilimlendikten sonra model 3B yazıcıya gönderilebilir. Fakat 3B yazıcıda baskı almak meşakkatli, hassas ve uzun süren bir işlemdir. İşlem sırasında çoğunlukla birtakım problemlerle karşılaşılır ve baskı tamamlamadan sonlanır.

Bu durumda problem giderilmeli, gerekli önlemler alınmalı ve tekrar baştan baskıya başlanmalıdır. Bir problem oluştuysa baskı kaldığı yerden devam etmez. Baskı alınırken oluşacak problemler şunlardır;

- ✓ elektrik kesintisi,
- ✓ mesafe ve/veya sıcaklık sensörlerin arızalanması,
- ✓ yazıcının dinlenmeden uzun süre çalışmasından dolayı motor sürücülerin fazla ısınması,
- ✓ filamentin bitmesi veya nozzle ucunun tıkanması, bundan dolayı yazıcının dolgu yapmadan çalışmaya devam etmesi ve çalışmanın tamamlanmaması,
- ✓ render (dilimleme) programının dilimlemeyi yanlış yapması, başında veya bir süre sonra baskının bozulması,
- ✓ kalibrasyon yapılmadığı veya bozulduğu için baskının tam anlamı ile baskı yüzeyinden (tablasından) başlamaması, baskı devam ederken baskı parçasının tabladan çıkması veya kayması,
- ✓ mekanik sıkıntılar; motorların, filamenti iten dişlilerin, soğutucu fanların vb bazı parçaların bozulması, arızalanması veya işlevini görememesi.

Bunların dışında nadiren de olsa bilinmedik ve beklenmedik bir nedenden dolayı baskı gerçekleşmeyebilir. Bu çalışmada da yukarı yazılan bütün problemler yaşanmış ve bu durum baskı sürecinin hedeflenenden daha uzun bir zamanda gerçekleşmesine neden olmuştur.

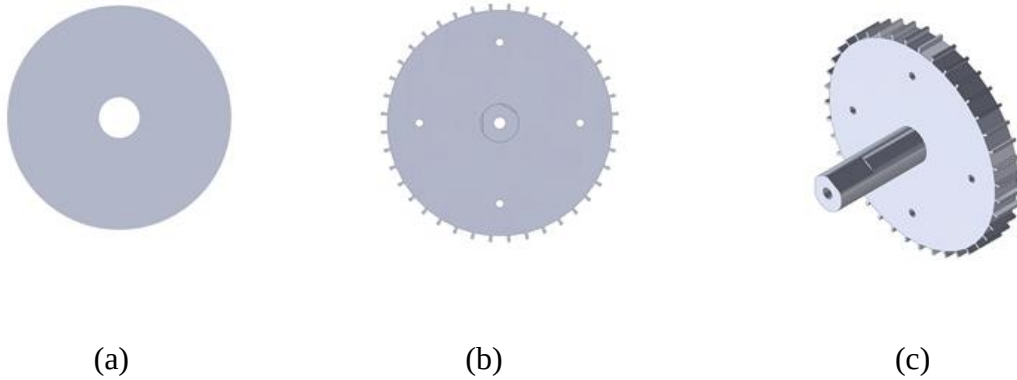
Baskı dışındaki salt malzemeleri temini yine bu aşamada yapılmıştır. Özellikle mıknatıslar çok güçlü olduklarından kontrol etmesi oldukça zor olmuştur. Beklenmedik durumlarda mıknatısların birbirini çekmesinden dolayı birkaç adet mıknatıs zarar görmüş, kullanılamaz hala gelmiştir.

Kısacası bu bölümde prototip üretim aşamaları ve her bir aşamada karşılaşılan zorluklar ve çözüm yöntemleri işlenecektir.

4.1. Rotor Baskısı

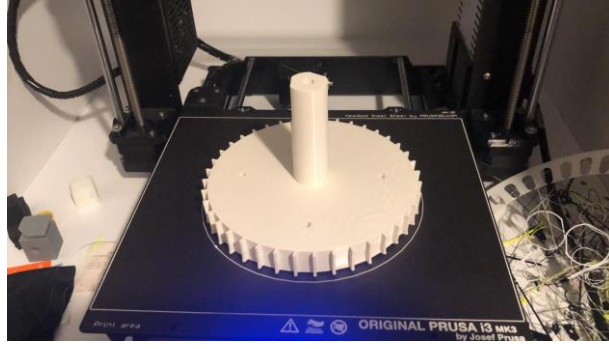
RMxpirt ile tasarlanan rotor Şekil 4.1. a’da görüldüğü gibi mil ve mıknatıs yatakları olmayan, tam dairesel tek bir parçadan oluşmaktadır. Bölüm 3 SMSA Modellemesi, Rotor Çapı ve Mil Çapı başlığında rotor üzerinde mıknatıs yatakları oluşturulmasının tasarımıda üstünlük sağlayacağına değinilmişti. Yatakların oluşturulması Şekil 4.1. (b) ve (c)’de görüldüğü şekilde gerçekleşmiştir.

Ayrıca 3B yazıcıda mil basıp rotor mil yatağından geçirmektense rotorun gövdeye rahat bağlanabilmesi için rotorun iki yüzeyini de içerecek şekilde mil eklenmiştir. Böylece mil ve gövde daha tasarım aşamasında bir bütün haline getirilerek mukavemeti artırılmış ve prototipin üretim kolaylığı sağlanmıştır. Tasarım bu şekli ile 3B yazıcıda basılamayacağı için oluşturulan model Şekil 4.2. (c)’de görüldüğü gibi rotor uzunluğu 20mm ve çapları birbirine paralel ve tamamen simetrik iki parçaya ayrılmıştır.



Şekil 4.1. a: RMxpirt’den elde edilen rotorun 2B modeli b: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 2B modeli c: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 3B modeli

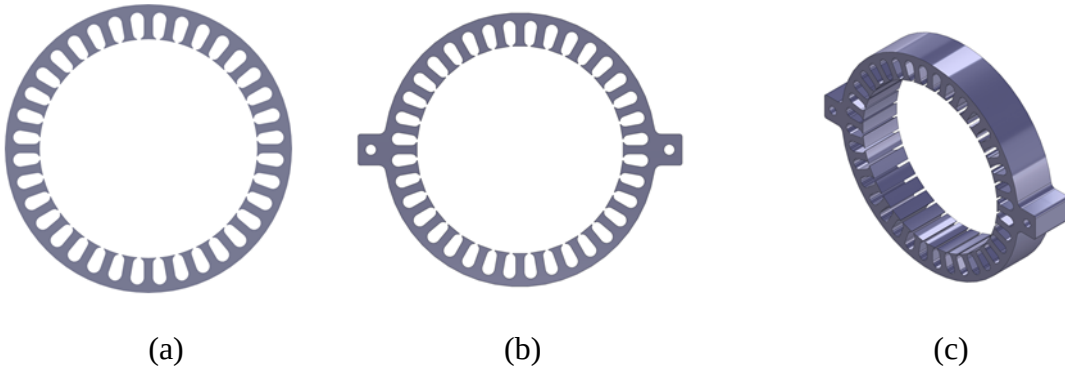
Tasarım düzenlemesinden sonra iki adet eş baskı Şekil 4.2’de görüldüğü gibi alınmıştır. Bu iki adet baskı ortadan 4 adet vida ile birbirine monte edilerek rotor haline dönüştürülecektir. Böylece mıknatıs yuvaları bulunan rotorun mili de üzerinde bütün bir parça olarak yer almış olacaktır.



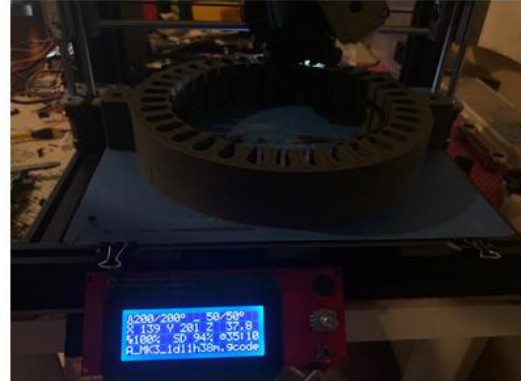
Şekil 4.2. Rotor baskısı

4.2. Statorun Baskısı

Stator EM'in sabit parçası olup gövdeye bağlama yada geçirme yöntemi ile sabitlenebilir. Bu çalışmada statorun gövdeye bağlanması için, stator yapısını bozmadan iki adet vida yuvası tasarlanmıştır. Şekil 4.3.'de statorda yapılan düzenlemeler görülmektedir. Bu düzenlemelerin ardından stator önce ÇD PLA ile birkaç test baskısı yapılmış, böylelikle baskı kalitesinin en iyi olacağı şekilde 3B yazıcı hazır hale getirilmiştir. Daha sonra Şekil 4.3. b'de 2 boyutlu kesiti ve c'de 3 boyutlu kesiti görünen baskı alınmıştır. Baskı süresi yaklaşık 36 saat sürmüştür. Son baskı alınmadan önce 4 kere baskı yarıda kalmıştır. Baskı ancak başlamadan önce süper sertleştirilmiş çelik nozzle takılarak ve ayrıca ekstra soğutucu eklenerek baskı tamamlanabilmiştir.



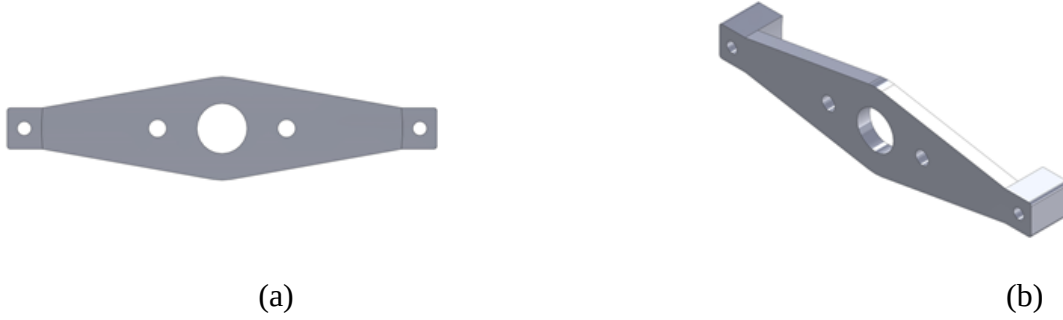
Şekil 4.3. a: RMXprt'den elde edilen statorun 2B modeli b: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 2B modeli c: SolidWorks ile yapılan düzenlemenin 3B modeli



Şekil 4.4. Rotor baskısı

4.3. Gövde Baskısı

Gövde, stator ve rotoru bir arada tutan ve rotorun stator içinde dönme hareketini kararlı (eksantrik bir çalışma oluşturmada) sağlayan SMSA'nın ana parçalarından biridir. Bu çalışmada da gövde tasarımı bu tanıma ve önceliğe göre ele alınmış, ayrıca alternatörün zorlanmadan test edilebilir olması da dikkate alınmıştır. Testte kullanılacak motor milinin zeminden yüksekliği, alternatör ile motor arasında olması gereken mesafe alternatör gövde tasarımı kullanılmak üzere ölçülmüştür. Gövde tasarımındaki bir diğer dikkate alınan nokta ise soğutmadır. Elektrik makinelerinde genellikle zorlayıcı soğutma kullanılmaz, ısı gövdeden yararlanılarak dış ortama aktarılır [64]. Bu çalışmada dış ortam koşullarından yararlanarak kendinden soğutmayı sağlayacak bir alternatör soğutması da hedeflenmiştir. Şekil 4.3.'de 2B ve 3B modellenmesi görülmektedir. Bu tasarımda SMSA istenilen yüksekliğe ayaklarının hareketi ile getirilebilecek ve dışarıdan ayrıca zorlanmış soğutma sistemine ihtiyaç duymayacaktır. Bu çalışma kapalı ve deney ortamına uygundur. Fakat dış ortamda çalışmasına uygun değildir. SMSA'nın dış ortamda kullanılması için yeni bir gövde tasarımı geliştirilebilir.



Şekil 4.5. Gövde tasarımı a: üstten görünüş b: perspektif görünüş

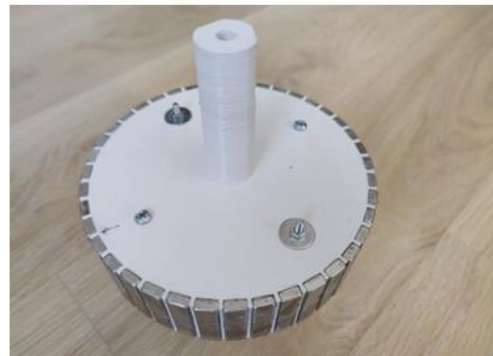
4.4. Sürekli Mıknatısların Yerleştirilmesi

İki parçadan oluşan rotor 6 mm cıvata ile 4 farklı noktalardan sabitlenmiştir. Böylece rotor ve mil montajı tamamlanmıştır.

Mıknatısların yerleştirilmesi ise oldukça dikkat gerektiren bir işlemdir. Çekim kuvvetleri çok yüksek olduğundan en ufak dikkatsizlikte mıknatıslar birbirlerine yüksek bir momentle yapışmakta ve zarar görebilmektedir. Bu nedenle Şekil 4.4. a’da görüleceği gibi önce kutupları aynı yöne bakan mıknatıslar birer boşluk bırakılarak rotora sabitlenmiştir. Ardından sabitlenen mıknatıslarla zıt kutuplu mıknatıslar yerleştirilmiştir. Böylece N S N S şeklinde dizilim sağlanmıştır. Mıknatıslar, PLA rotor yüzeyine yapıştırma tekniği ile sabitlenmiştir. Böylece Şekil 4.4. b’de gösterildiği gibi rotor kullanıma hazır hale getirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.6. Mıknatısların rotora yerleştirilmesi a: aynı kutba bakan mıknatısların yerleştirilmesi b: tüm mıknatısların yerleştirilmesi

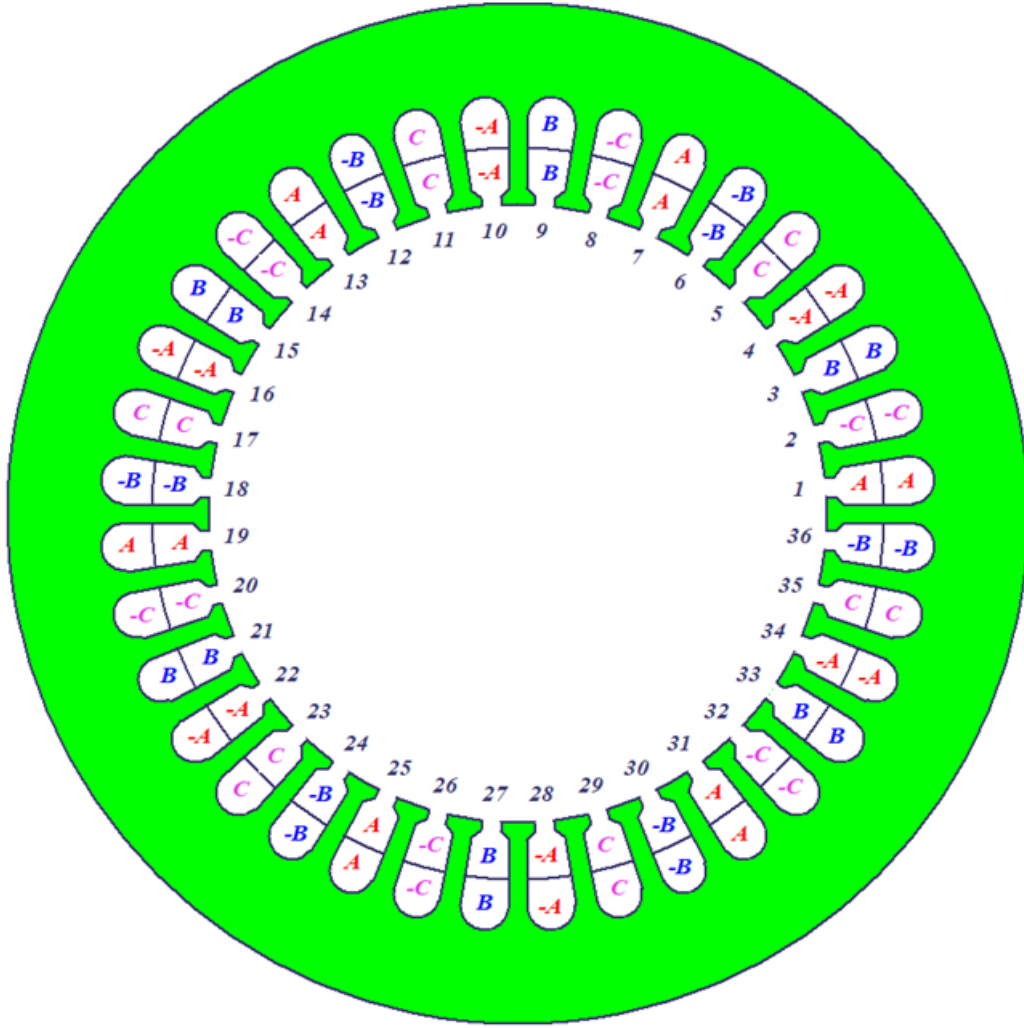
4.5. Bobinaj İşlemleri

Tüm parametreler belirlenip tanımlandıktan sonra Ansys Maxwell'in analiz aracı çalıştırılarak SMSA'nın modellemesi gerçekleştirilmiş ve statorda kullanılacak her bir sargının tel kalınlığı ve sarım sayısı hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda sargılarda kullanılacak bakır telin kalınlığı 0,46 mm ve sargıyı oluşturacak tur sayısının ise tek kat olmak üzere 76 olduğu görülmüştür. Fakat 0,46 mm bakır tel tedarik edilemediğinden uygulamada bu değere en yakın olup tedarik edilebilen 0,50 mm kalınlığında bakır tel kullanılmıştır. Sargılar statora dağıtım yöntemi kullanılarak yerleştirileceğinden, Şekil 4.8'de sargı diyagramı gösterilmiştir, sargıların tam yerleşebileceği şekilde, oluklar arası mesafe ölçülerek, sargı kalıbı çıkarılmış, tasarlanmış ve 3B boyutlu yazıcı desteği ile basılmıştır. Basılmış olan kalıbın görüntüsü Şekil 4.7'de yer almaktadır.



Şekil 4.7. Sargı kalıbı

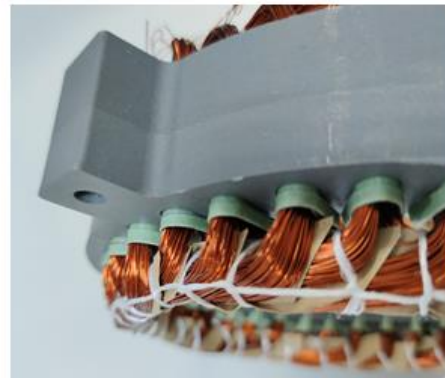
Sargılar Şekil 4.8.'de sargı diyagramında gösterildiği gibi dağıtılmış olarak stator oluklarına yerleştirilmiştir. Şekil 4.9. a'da sargıların oluklara yerleştirme aşaması, b'de ise sargıların yerleşimi tamamlandıktan sonra bir plastik ip yardımı ile dışa bükülerek sabitlenmesi gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Sargı diyagramı



(a)

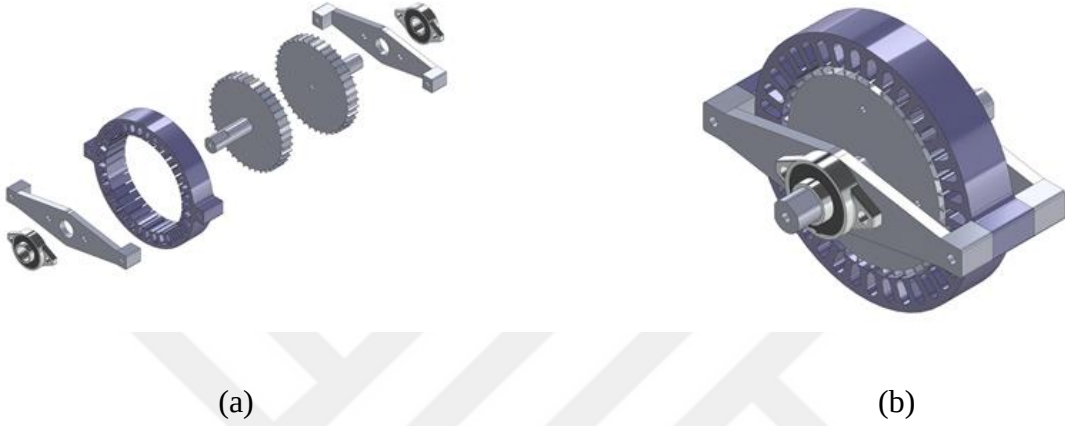


(b)

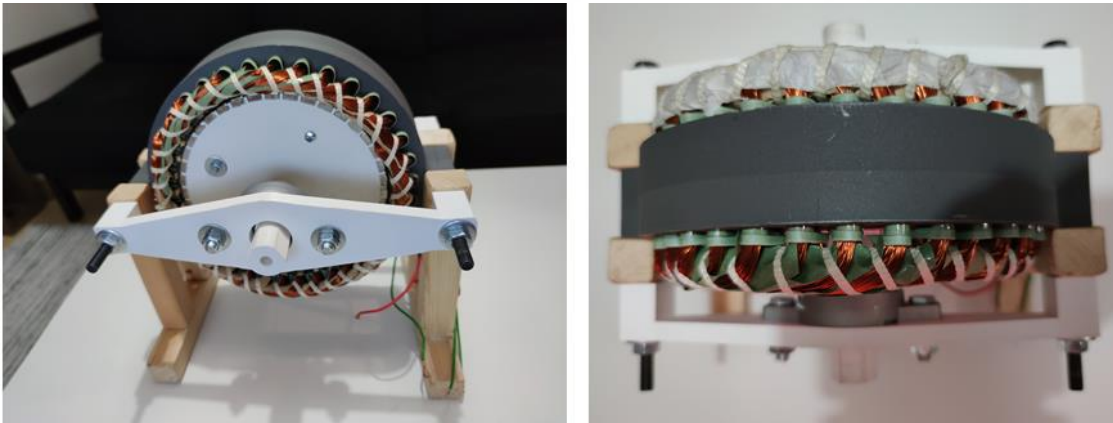
Şekil 4.9. Sargıların oluklara yerleştirilmesi a: yerleştirme aşaması b: sargıların sabitlenmesi

4.6. Prototipin Hazır Hale Getirilmesi

Çalışmada önce baskılar alınmış ardından montaj yapılmadan önce mıknatıslar rotora, oluşturulan sarımlar ise statora yerleştirilmiştir. Ardından Şekil 4.6.a (a) ve (b)'de gösterildiği gibi parçalar tasarıma uygun bir şekilde bir araya getirilmiş ve Şekil 4.6.b (a) ve (b)'de gösterilen şekilde prototip üretim gerçekleştirilmiştir.



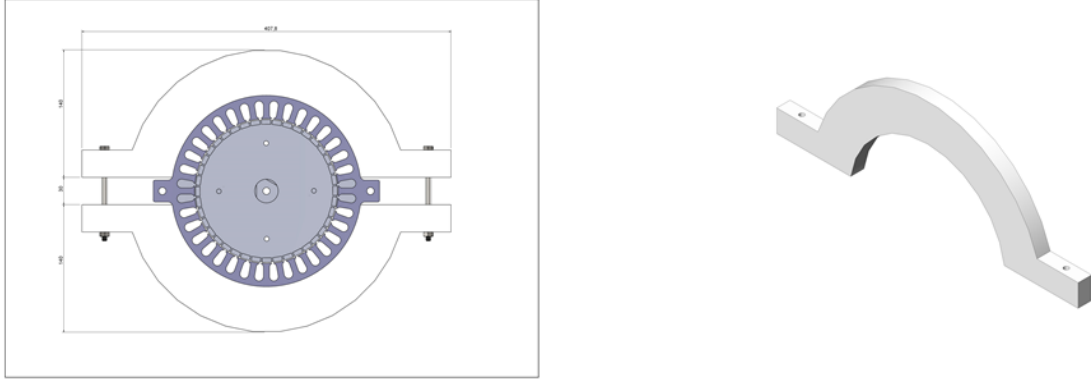
Şekil 4.10. SMSA'nın modellenmesi a: parçaların görünüşü b: prototip görünüşü



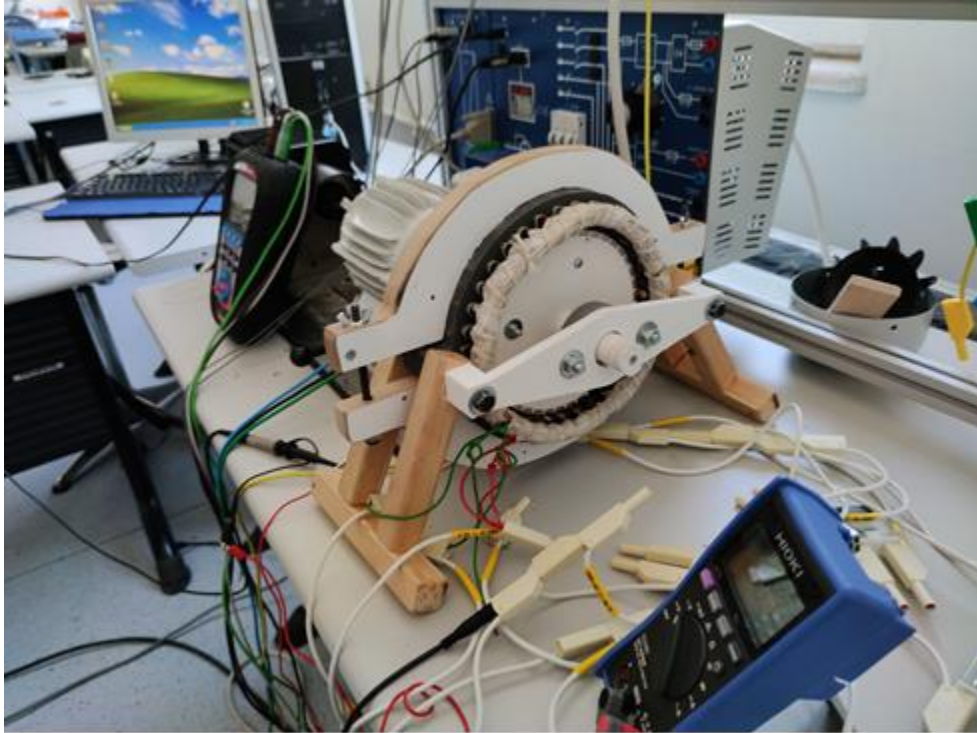
Şekil 4.11. SMSA prototipi a: önden görünüş b: üstten görünüş

Çalıştırmadan önce göz ve elle yapılan testte görülmüştür ki ÇD PLA elastik bir yapıya sahip olduğu için, yüksek güçlü mıknatısların çekim kuvvetine dayanamamakta ve rotor ne kadar balans ayarı yapılarak yerleştirilse de mıknatıslar statoru en zayıf noktasından kendine çekip yapıştırmakta ve rotorun serbest dönmesini engellemektedir. Bu durumu

önlemek için Şekil 4.6.b’de gösterilen kasnak tasarlanmasına mecburi kılmış ve böylece stator Şekil 4.6.c’de gösterildiği şekilde bir kasnak içine alınmıştır.



Şekil 4.12. Kasnak tasarım a: kasnağın statoru kavrama şekli b: perspektif görünüşü



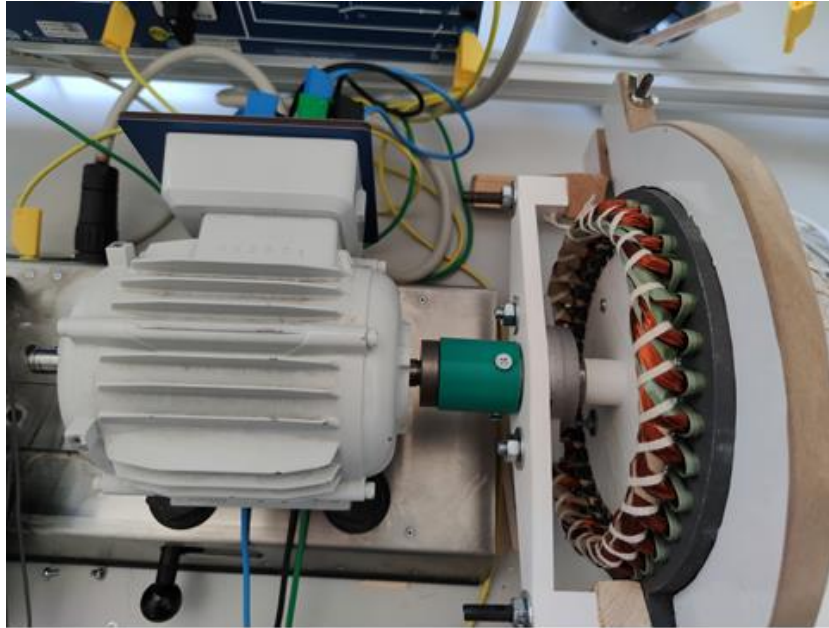
Şekil 4.13. Kasnağın prototipe yerleştirmesi

Kasnağın yerleştirilmesi ile rotorun balans ayarı yapılabilmiştir. Fakat statorun elastik yapısının SMSA’da olumsuz anlamda etkileyeceği öngörülmektedir.

Prototipi tamamlanan SMSA’nın test edilebilmesi için sadece kaplin bağlantısı kalmıştır. Motor ve mil girişine uygun ölçümler alınarak Şekil 4.14’de gösterilen kaplin tasarlanmış ve yine 3B yazıcı desteği ile üretilmiştir. Kaplin Şekil 4.15’de gösterildiği şekilde SMSA ile testi yapılacak motor arasına monte edilmiştir. Teste hazır olduğu boşta birkaç kez çalıştırılarak kontrol edilmiştir. Sonuç olarak SMSA hazır, test edilebilir duruma getirilmiştir.



Şekil 4.14. Kaplinin 3B modeli a: motor bağlantı yuvası b: SMSA bağlantı yuvası



Şekil 4.15. SMSA’nın kaplin ile test motoruna bağlantısı

5. SMSA UYGULAMA VE TESTİ

5.1. Deneysel Testlerin Uygulanması

Alternatör prototipi oluşturulduktan sonra uygulama aşamasına geçilerek test edilmiştir. Bu amaçla devir kontrolü yapılabilmesi için 1 adet sürücülü 1kW gücünde motor, osiloskop, taşınabilir üç fazlı güç ve harmonik analizörü ve multimetre kullanılmıştır. Şekil 5.1’de deney düzeneği görülmektedir.



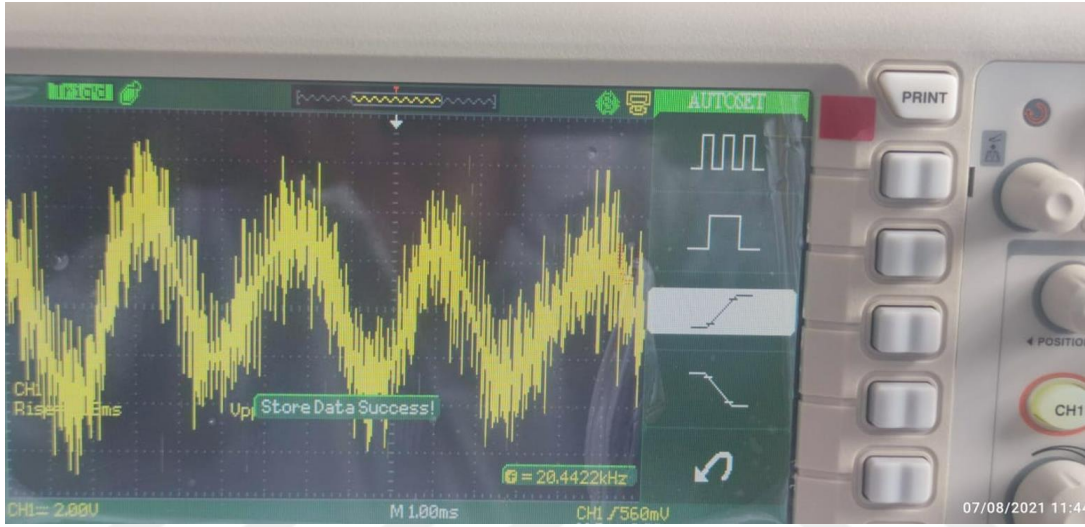
Şekil 5.1 Deney düzeneği

Deneyde Şekil 5.2’de görünen 2Ω 2W yük direnci alternatörün çıkış akımını sınırlandırılmak ve akım sinyalini daha büyük elde edebilmek için alternatör çıkışına uygulanmıştır.

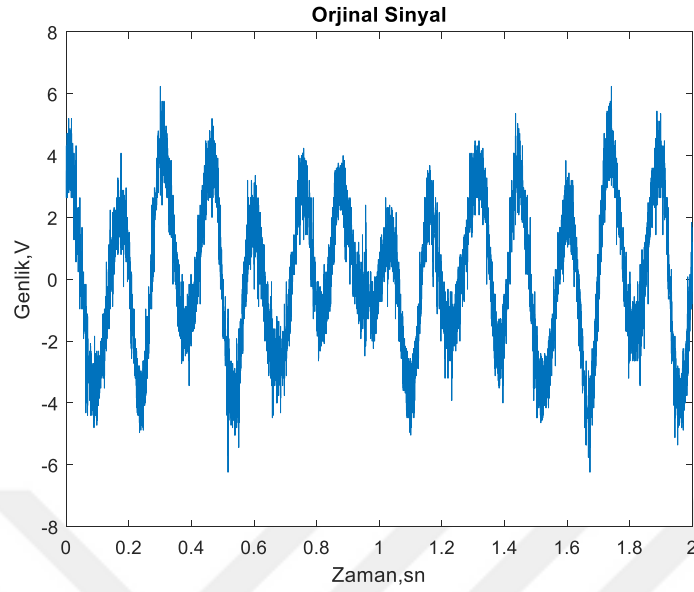


Şekil 5.2 Akım sınırlamak için uygulanan yük

Bu işlemlerle birlikte alternatörün test edilmeye hazır hale getirilmiş ve ardından düşük devirle alternatör devreye alınmıştır. Uygulama osiloskop üzerinden gerilim zaman boyutu ile izlendiğinde Şekil 5.3’de görünen sinyal elde edilmiştir. Osiloskop ve analizör üzerinde kaydedilen sinyal verileri orijinalliğini koruyarak benzetim ile Matlab üzerinden yeniden oluşturulduğunda Şekil 5.4’de işlenebilir bir grafik haline dönüştürülmüştür.

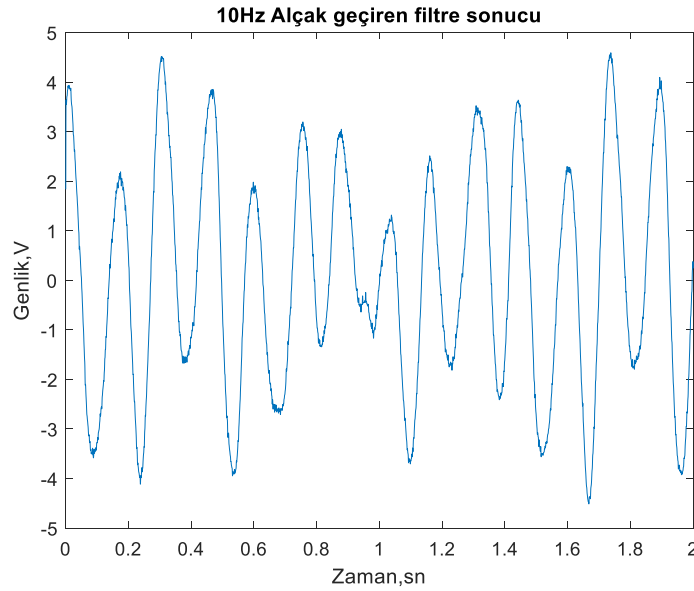


Şekil 5.3 Osiloskop üzerinde uygulamanın izlenmesi



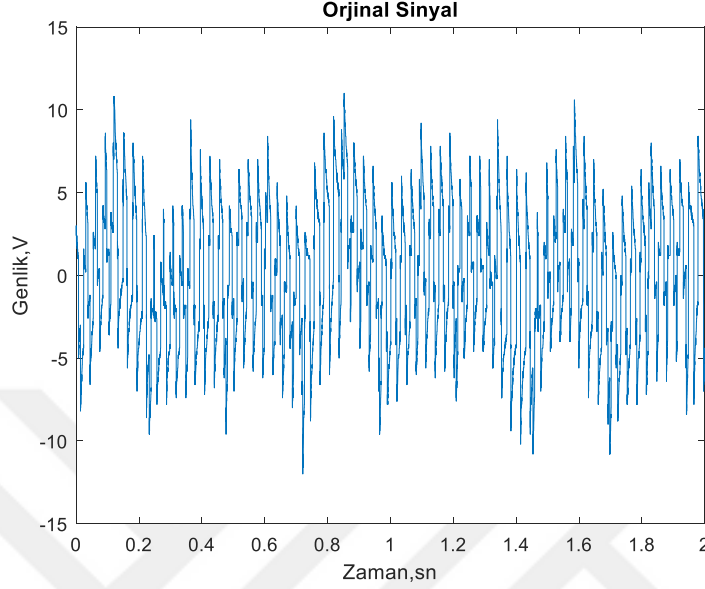
Şekil 5.4 Orjinal gerilim/zaman sinyali

Elde edilen sinyale Matlab üzerinden 10 Hz alçak geçiren filtre uygulandığında elde edilen çıkış Şekil 5.5’de görülmektedir.



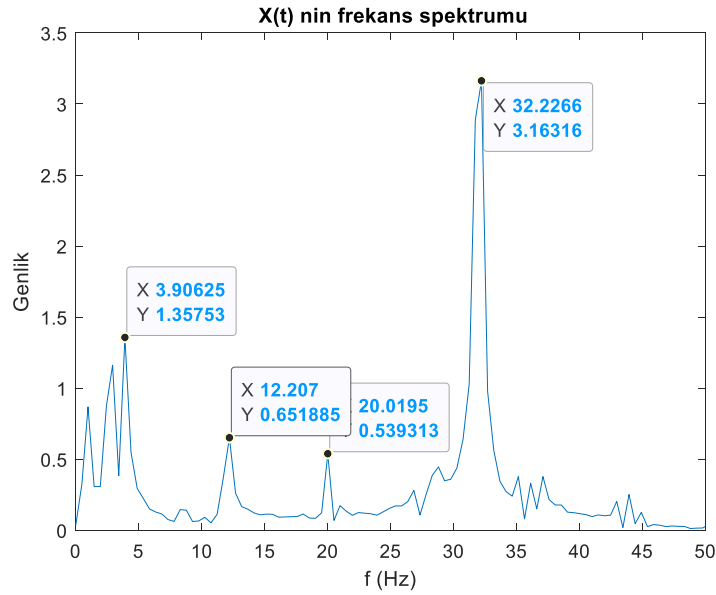
Şekil 5.5 10Hz alçak geçiren filtre uygulaması

Uygulamadaki devir sayısını arttırdığımızda çıkış sinyalinin devir sayısı da artmıştır. Yüksek devirde alternatör çıkış gerilimi Şekil 5.6’da görülmektedir. Yüksek devirde çıkış sinyalinin gerilim tepe değeri 10V’da ulaşmıştır.



Şekil 5.6 Yüksek devir alternatör çıkış verisi

Sinyalin Matlab kullanılarak spektrumuna ayırdığımızda Şekil 5.7’de görüleceği gibi sinyalin ana bandını yaklaşık 30Hz oluşturmaktadır.



Şekil 5.7 Yüksek devir alternatör frekans spektrumu

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 750 W çıkış gücünde, 40 kutuplu, 36 oluklu, rotoru, statoru, mili, gövdesi ve bağlantı aparatı (kaplin) farklı içerikte Polimer esaslı (PLA) malzeme kullanılarak, 214 x 214 cm baskı alanına sahip standart bir 3B yazıcı ile basılabilen nüvesiz tip (laminasyon ve silisli saclardan oluşmayan) bir alternatör tasarlanmıştır. Böylece yeni bir üretim yöntemi kullanarak, elektrik makinelerinin gelişimine orijinal bir katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Bu amaçla öncelikle statorun gövdesini oluşturacak çelik dolgulu PLA ile farklı doluluk oranlarında 5 adet ferromanyetik toroidal nüveler oluşturulmuş ve manyetik özelliği deneysel yöntem kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlara göre stator gövdesi basılacağından %100 doluluk oranının en iyi sonucu vereceği görülmüştür.

Tasarlanan alternatörün modellenmesi, çelik dolgulu PLA malzemesi ve kullanılan Neodyum (NeFeB) sürekli mıknatısının manyetik özellikleri tanıtılarak ANSYS firmasının Maxwell programının RMXprt modülü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve analiz edilmiştir.

Tasarlanan alternatör Solid Works programına aktarılmış, rotor ve stator da montaj için düzenlemeler yapılmış, rotora mil ve sürekli mıknatıs yuvaları eklenmiş, statora gövde ile bağlantısı yapılması için vida yuvası konulmuştur. Ayrıca Solid Works ile gövde tasarlanmıştır. Tasarımın son hali dilimlenerek bir 3B yazıcı ile basılıp, stator sargıların bobinajları yapılarak alternatörün prototipi oluşturulmuştur.

Oluşturulan prototipin elastik bir yapıya sahip olduğu ve stator ile rotor arasındaki manyetik çekimden dolayı rotorun stator içinde serbest dönme hareketi yapacak şekilde yerleştirilemediği görülmüştür. Statordaki elastik yapıyı önlemek için statorun etrafı bir kasnak ile çevrilmiş ve ancak rotor balast ayarı yapılabilmektedir. Böylece prototip uygulama aşamasına geçilerek test edilmeye hazır hale getirilmiştir.

Alternatör girişine devri ayarlanabilir sürücülü 1kW gücünde motor, çıkışına akım sınırlandırmak için 2Ω 2W yük direnci bağlanarak test edilmiştir. Ölçüm için osiloskop, taşınabilir üç fazlı güç ve harmonik analizörü ve multimetre kullanılmıştır.

Ferromanyetik PLA'nın mekanik dayanımları başlangıçta bilinmediğinden uygulama çalışmasına düşük devir ile başlanmıştır. Bununla birlikte uygulaması gerçekleştirilen alternatörün rotor kısmında kullanılan mıknatısların meydana getirdikleri çekme kuvvetleri statorda mekanik deformasyona neden olmuş, rotor ile stator arasındaki hava aralığı değiştiğinden harmonik oluşmasına ve sinüs formatında bozulmalara neden olmuştur.

Bu çalışma literatürde ilk olduğundan uygulama aşamasında birtakım zorluklarla karşılaşmıştır. Özellikle çelik dolgulu PLA'nın ferromanyetik uygulamalar için üretilmemiş olması ve içindeki polimer malzemenin statora kontrol edilmesi çok zor bir esneklik kazandırmasından dolayı uygulama için beklenen verimlilik elde edilememiştir. Teoride elde edilen verilerle uygulamada elde edilen veriler birbirinden oldukça uzak olduğu, uygulamada kullanılan malzemenin ferromanyetik özelliğinin tek başına yeterli olmadığı, malzeme yapısının da alternatör verimi üzerinde oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Kısacası yapılan testlerin sonucunda görülmüştür ki bu üretim yönteminin işlevselliği araştırılmaya hala açıktır. Ayrıca bu yöntemin kabul görmesi halinde;

- Çelik dolgulu PLA malzeme üzerinde yapılan çalışmalar ile manyetizasyonu daha yüksek (ferromanyetik duyarlılığı daha fazla olan) malzeme üretimi sağlanabilir. Ayrıca 3B yazıcıdan elastik özelliği olmayan çıktılar (parçalar) elde edilebilir. Böylece bu çalışmada karşılaşılan en büyük zorluğun üstesinden gelinerek yeniden uygulama çalışması yapılabilir.
- Statorun 3B yazıcıda değişik dolgu yöntemleri ve oranları ile en verimli şekli bulunabilir.
- Stator ve rotor üretimin 3B yazıcı ile sağlanması, üretimi esnekleştireceğinden bu duruma uygun yeni stator ve rotor tasarımları geliştirilebilir.

Teşekkür:

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FEN-C-YLP-130219-0033 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Islam, M. S. Tanbinul Hoque, S. M. Hazari, M. R. Hasan, M. M. & Uddin, M. (2021). Design and Simulation of a Dual Rotor Wind Turbine based PMSG System. 2021 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), DHAKA, Bangladesh, pp. 17-20, DOI: 10.1109/ICREST51555.2021.9331134.
- [2] Eroğlu, İ., Çoban, M. N., & Kangal, N. (2018). The Evaluation of Tr83 Region in the Context of Clean Energy. *Balkan Journal of Social Sciences / Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(13), 83–105.
- [3] Abo-Khalil, A. G., Eltamaly, A. M., Praveen, R.P., P., Alghamdi, A. S., & Tlili, I. (2020). A Sensorless Wind Speed and Rotor Position Control of PMSG in Wind Power Generation Systems. *Sustainability*, 12(20), 8481. DOI: 10.3390/su12208481.
- [4] Ocak, C. (2019). Doğrudan Tahrikli Asansör Sistemlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Mıknatıs Geometrisinin Motor Performansı Ve Maliyeti Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 7 (4) , 825-834 . DOI: 10.21923/jesd.515050.
- [5] Mellah, H., Hemsas, K.E. (2013). Comparative Performances Analysis of Different Rotor Types for PMSG Used in Wind Turbine Application. *International Journal of Advances in Power Systems*, 1.
- [6] Mamur, H., Sahin, C., Karaçor, M., & Bhuiyan, M.R. (2020). Design and fabrication of an outer rotor permanent magnet synchronous generator with fractional winding for micro-wind turbines. *Iet Electric Power Applications*, 14, 2273-2282.

[7] Abdulelah, A. M., Ouahid, B. & Youcef, S. (2021). Control of a Stand-Alone Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator. 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), pp. 546-550, DOI: 10.1109/SSD52085.2021.9429307.

[8] Yüzer, E.Ö. (2011) Düşük Düşülü Mikro Hidro Elektrik Santralleri İçin Sabit Mıknatıslı Bir Senkron Generatör Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye,

[9] Ayçiçek, E., Bekiroğlu, N., & Şenol, İ., (2012). Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Açık Oluk Yapısı Kullanarak Minimum Vuruntu Momenti İçin Rotor Yapısının Optimizasyonu. YTÜ SİGMA Dergisi (Mühendislik ve Fen Bilimleri) , vol.30, no.4, 392-401.

[10] Miller T.J.E., (1989) Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives, Clarendon Press, Oxford,

[11] Yaman, K. (1999) Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Analizi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye,

[12] Kostko J.K., (1923). Polyphase reaction synchronous motors. Journal Amer. Inst. Elect. Engrs, 42, 1162-1168.

[13] Ersöz, M., Öner Y., Bingöl O. (2016). Akı bariyerli TLA tipi senkron relüktans motor tasarımı ve optimizasyonu. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(4), 941 - 950.

[14] Ugale, R. T., Chaudhari, B. N., Pramanik, A. (2014). Overview of research evolution in the field of line start permanent magnet synchronous motors. IET Electric Power Applications, 8(4), 141–154.

- [15] Richter, E., Neumann, T.W. (1984). Line Start Permanent Magnet Motors With Different Materials. IEEE Transactions On Magnetics, VOL. MAG-20, NO. 5, 1762-1764.
- [16] Grauers, A. (1996) Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines. Master Thesis Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [17] Rizk, J., & Nagrial, M. (2000) Design of permanent-magnet generators for wind turbines. In Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435) (Vol. 1, Sayfa 208–212). Int. Acad. Publishers.
- [18] Libert, F., Soulard, J., & Engstrom, J. (2002) Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor. Proc. ICEM 2002, Brugge, Belgium,
- [19] Kaynaklı, M. (2010) Pençe Tipi Alternatör İle Sabit Mıknatıslı Alternatör Performanslarının Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye,
- [20] Bayram, M., H. (2017) Senkron Generatörler İçin Yüksek Dinamik Tepkili Statik Bir Uyarım Sisteminin Gerçekleştirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye,
- [21] Özçira, S. (2007) Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,
- [22] Nergiz, E. (2018) Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Modellenmesi ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye,

- [23] Abdulhakeem, H., H. (2019) Design of Modular Multi-level Converter and Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Wind Energy Conversion System. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, Türkiye,
- [24] Kütük, O. (2011) Rüzgâr Türbinleri İçin Doğrudan Sürüşlü Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,
- [25] Mutluer, M. (2013) Yapay Zekâ Tekniklerini Kullanarak Yüksek Verimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye,
- [26] Dursun, Ç. (2021) Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor İçin Vektör Kontrollü Sürücünün Empedans Kaynaklı Üç Seviyeli Evirici İle Tasarımı Ve Kapalı Çevrim Benzetimi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,
- [27] Sheng, Z., Wang, D. (2020) Design and analysis of a kind of rotor ironless high torque density machine using Alnico magnet. IET Electric Power Applications 14(8), DOI:10.1049/iet-epa.2019.0774.
- [28] Ocak, O. (2012) 1.3 Kw Gücünde Dahili Mıknatıslı Bir Senkron Motorun Analizi, Tasarımı ve Gerçeklenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye,
- [29] Yıldırım, B.A. (2008) Silisli Sacların Otomotiv Sektöründe Kullanımı ve Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,

[30] Özdiğer, B. (2020) Tanecik - Yönelimli Manyetik Malzemenin Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Performansına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye,

[31] Beckley, P., & Sujan, G. (2014). Steels, Silicon Iron-Based: Magnetic Properties.

[32] Çamur, S., Duru, H. T. , Arifoğlu, B., Beşer, E., & Kazdaloğlu, A., (2003). Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Makinanın Küçük Güç Transferine Uygun Sargı Tekniğı ve Kontrol Düzeneginin Tasarımı ve Uygulanması . Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu (YEKSEM 2003) (pp.219-224), Turkey,

[33] Öksüztepe, E., Kürüm, H. (2009). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Dalgalanmalarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Oluşturulan Akı Modelinin Kullanılmasıyla Azaltılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi , 25 (1) , 120-133.

[34] Uğur, M., Keysan, O. (2018). Tümlşik Modüler Motor Sürücü Sistemi Tasarımı . Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 75-83.

[35] Yetgin, A., İmre, M. (2018). Experimental And Analytical Investigation On Stator Winding Turn Influence In Squirrel Cage Induction Motor Performance: Energy Efficiency. Anadolu University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering , 19 (2) , 267-277 . DOI: 10.18038/aubtda.325989.

[36] Kurt, Ü. (2006) Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar İçin Yeni Tasarım Modeli Geliştirme. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Türkiye,

[37] Zöhra, B. (2019) Şebeke Kalkışlı Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı Ve Prototip Üretimi. Doktora Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye,

[38] Cui J., Kramer M., Zhou L., Liu F, Gabay A., Hadjipanayis G., Balasubramanian B. ve Sellmyer D. (2018). Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. *Acta Materialia*, 158, 118–137. DOI: 10.1016/J.ACTAMAT.2018.07.049.

[39] Özdemir, M. S., Ocak, C. & Dalcalı, A. (2021). Permanent Magnet Wind Generators: Neodymium vs. Ferrite Magnets, 2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), pp. 1-6, DOI: 10.1109/HORA52670.2021.9461291.

[40] Duru, H., Demiröz, R. (2005). Asansör Makinalarında Mıknatıs Uyarmalı Senkron Motor ve Doğrudan Tahrik Sisteminin Kullanımı, 1. EVK Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye,

[41] Fidan, Ş. (2018) Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin Aşırı Öğrenme Makine Tabanlı Kontrolü. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye,

[42] Özmen, T. (2021) Yüzey Yerleşimli Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörde Karşılaştırmalı Başarım Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Türkiye,

[43] Tarımer, İ., Ocak, C. (2009). Performance comparision of internal and external rotor structured wind generators mounted from same permanent magnets on same geometry, *Electronic Ir Elektrotechnika*, ISSN: 1392 –1215, p.p. 65–70, No. 4(92).

[44] Samraj, D. B., Perumal, M.P. (2019). Analogy Of The Losses İn Surface And Interior Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine Generators. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 8 (12), 2507-2515.

- [45] Arslan, S. (2014) Yüksek Hızlı Kalıcı Mıknatıslı Generatör Tasarımı ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye,
- [46] Çelikdemir, S. (2014) Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Santrali. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye,
- [47] Öner, Y. (2013) Rüzgar Türbinleri İçin; Düşük Hızlı, Sürekli Mıknatıslı, Yumuşak Manyetik Kompozit Malzemeli, Senkron Generatör Tasarımı. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,
- [48] Öner, Y. (2009) Sürekli Mıknatıslı Dc Motor İle Tahrik Edilen Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Çıkış Geriliminin Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,
- [49] Sezenoğlu, C. (2009) Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motorun Benzetimi ve Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye,
- [50] Gör, H. (2014) Eksenel Akılı Jeneratörlerin Tasarımı ve Uygulaması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye,
- [51] Çolak, Y. (2019) Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Açık Oluklu Senkron (Easmaos) Alternatörlerde Mıknatıs Gruplama Tekniğinin Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli, Türkiye,
- [52] Çetin, E., Daldaban, F. (2017). Eksenel Akılı Motorlarda Oluk Açıklıklarındaki Hatanın Moment Üzerine Etkisi. El-Cezeri Journal of Science and Engineering , 4 (3) , 374-381 . DOI: 10.31202/ecjse.310221.
- [53] Çetin, E. (2018) Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımı, Manyetik Analizi Ve Prototip Üretimi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye,

[54] Çetin, O., Dalcı, A., & Temurtaş, F. (2020). Estimation of Permanent Magnet Synchronous Generator Performance with Artificial Neural Network Models.

[55] Yeşilbag, E., Ertuğrul, Y. & Ergene, L. (2021). Eksenel akıllı PM BLDC motor tasarım metodolojisi ve radyal akıllı PM BLDC motorla karşılaştırma. Türk Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi , 25 (4), 3455–3467.

[56] Altıntaş, G., Atalay, A., Kocabaş, D., Gülbahçe, M. (2016). Manyetik Yataklı Güneş Motoru Tasarımı ve Aydınlik Düzeyi – Hız Karakteristiğinin Belirlenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4 (3), 0-0.

[57] Siddiqi, M.R., Yazdan, T., Im, J-H., Humza, M. & Hur, J. (2021). Design and Analysis of a Dual Airgap Radial Flux Permanent Magnet Vernier Machine with Yokeless Rotor. ENERGIES. 2021;14(8):2311. DOI: 10.3390/en14082311.

[58] Altıntaş, H.B. (2018) Rüzgâr Türbinleri İçin Karşılaştırmalı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye,

[59] Huang, R., Liu, C., Song, Z. & Zhao, H. (2021) Design and Analysis of a Novel Axial-Radial Flux Permanent Magnet Machine with Halbach-Array Permanent Magnets. ENERGIES. 2021;14(12):3639. doi:10.3390/en14123639.

[60] Hendershot, J.R., Miller, T.J.E. (1994) Design of brushless permanent magnet Motors. Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford,

[61] Hüner, E., Toylan, H., Dindar, T., Bektaş, Y. (2018). Kırsal Bölgeler İçin Düşük Maliyetli Sabit Mıknatıslı Senkron Alternatör Tasarımı ve Analizi. Mesleki Bilimler Dergisi (MBD), 7 (2), 9-15.

[62] Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2008). Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6.

[63] Geyik, A.K. (2018) ıkık Kutuplu Senkron Generatörün Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli, Türkiye,

[64] Kütük, O. (2020) Elektrik Motoru Tasarımı. Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışları, Tübitak, <https://www.youtube.com/watch?v=4TMf5StC738> (18.03.2020).

[65] Tan, G. (2014) Elektrikli Bisikletler İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı ve Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,

[66] Türkmenoğlu, V., Arslan, S., Yusufoglu, A., Fenercioğlu, A., Atasorkun, M. (2016). Neodyum Mıknatıslı Senkron Generatörlerde Tasarım Parametre Değişikliklerinin Generatör Verimine Etkisi. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 5(2), 0-0.

[67] Ataman, V. (2017) Kalıcı Mıknatıslı Eksenel Akıllı Girdap Akımı Freninin Tasarım Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,

[68] Serteller, N.F., Mergen, A.F. (2000) Sincap kafesli indüksiyon makinalarında değişik rotor oluk dizaynının oluk harmonikleri üzerine etkisi. Eleco`2000 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Ve Fuarı, Sayfa 96–98 İstanbul, Türkiye,

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tarık ASLAN
Doğum Yeri - Tarihi :
Yabancı Dili : İngilizce
E-Posta :
Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite/Lise	Mezuniyet Yılı
Lise	Fen Bilimleri	Ümraniye Süper Lisesi	1999
Lisans	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017-2021	Okan Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2021-Halen	Karadeniz Teknik Üniversitesi	Öğretim Görevlisi