

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN AKI
ANAHTARLAMALI MOTOR TASARIMI**

**Hazırlayan
Sümeyye ÇARKIT**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2020
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN AKI
ANAHTARLAMALI MOTOR TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Sümeyye ÇARKIT**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU**

**Ağustos 2020
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Sümeyye ÇARKIT

İmza

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Elektrikli Araç Tahrik Sistemleri İçin Akı Anahtarlmalı Motor Tasarımı” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Sümeyye ÇARKIT

İmza

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

İmza

Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

İmza

KABUL VE ONAY

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU danışmanlığında **Sümeyye ÇARKIT** tarafından hazırlanan “**Elektrikli Araç Tahrik Sistemleri İçin Akı Anahtarlama Motor Tasarımı**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

..... / /

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Burak TEKGÜN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / /

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca farklı bakıő açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Beni eğitip geleceğe emin adımlarla yürümemde destek olan, mesleki bilgimize katkı sağlayan Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim elemanlarına minnettar olduğumu ifade etmek isterim.

Çalıőmalarım süresince beni destekleyen ve bugünlere gelmemde emeği olan annem ve babama, desteğini esirgemeyen eőime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sümeyye ÇARKIT

Ağustos 2020, KAYSERİ

ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN AKI ANAHTARLAMALI MOTOR TASARIMI

Sümeyye ÇARKIT

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2020
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

ÖZET

Ulaşım gereksiniminin hayatımızdaki öneminden dolayı araçlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. İhtiyaç duyulan bu ulaşım araçlarının tahrik sistemlerine göre; içten yanmalı, elektrikli ve hibrit olarak üç ana başlıkta sınıflandırılması mümkündür. Literatürdeki ilk elektrikli araçların sahip olduğu düşük menzil ve düşük performans gibi özelliklerinden dolayı; kullanıcıların günümüzdeki tercihleri yaygın olarak içten yanmalı araç yönünde olmaktadır. Fakat içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılan petrol rezervlerinin gün geçtikçe azalması ve içten yanmalı motorların çalışmasıyla açığa çıkan zararlı gazların atmosfere zarar vermesinden dolayı elektrikli araçlara olan ilgi ve elektrikli araçlar üzerinde yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Elektrikli araçların performans ve kat edebileceği mesafeyi belirleyen en önemli bileşenleri; güç birimi olan bataryalar ve tahrik sistemlerinde kullanılan elektrik motorlarıdır.

Bu çalışmada, elektrikli araç tahrik sistemleri için akı anahtarlamalı motor tasarımı üzerine bilgisayar ortamında test ve analiz uygulamaları yapılmıştır. Bilgisayar destekli iki ve üç boyutlu tasarım programları vasıtasıyla oluşturulan akı anahtarlamalı motor tasarımı üzerinde çalışma yapılmış ve sonlu elemanlar analiz yöntemiyle analizler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, elektrik motorları, akı anahtarlamalı motor

FLUX SWITCHING MOTOR DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLE PROPULSION SYSTEMS

Sümeyye ÇARKIT

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, August 2020
Supervisor: Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU

ABSTRACT

The need for vehicles is increasing due to the importance of transportation in our lives. It is possible to classify these transportation vehicles in three main categories according to the propulsion systems: internal combustion, electric and hybrid. Due to the features such as low range and low performance of the first electric vehicles in the literature, the current preferences of the users are commonly towards the internal combustion vehicle. However, interest in electric vehicles and studies on electric vehicles are increasing day by day due to the decreasing of oil reserves used as fuel in internal combustion engines and harmful gases released by the operation of such engines are damaging the atmosphere. The most important components are that affect the performance of electric vehicles and determine the range they can travel are, electrochemical batteries used as power units and electric motors used in drive systems.

In this study, computer testing and analysis were performed on flux switching motor design for electric vehicle drive systems. A study was carried out on the flux switching motor design created using computer aided 2D and 3D design programs. Analyzes were carried out with the help of finite element analysis method.

Keywords: Electric vehicles, electric motors, flux switching motor

İÇİNDEKİLER

ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN AKI ANAHTARLAMALI MOTOR TASARIMI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SİMGELER	x
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1
Tezin Amacı	2

1. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	4
1.1.Elektrikli Araçlar ile İlgili Literatür Taraması.....	4
1.2.Elektrikli Araç Çeşitleri	11

2. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI	15
2.1.Elektrik Motorlarının Tarihçesi	15
2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları	18
2.2.1 Doğru Akım (DA) Motorları.....	19
2.2.2. Alternatif Akım (AA) Motorları	23
2.2.2.1 İndüksiyon Motorlar (İM).....	23
2.2.2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM).....	25
2.2.2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM).....	28

3. BÖLÜM

AKI ANAHTARLAMALI MOTORLAR	30
3.1. Akı Anahtarlama Motorlarının Özellikleri ve Literatür Taraması	30
3.2. Akı Anahtarlama Motorlarının Çeşitleri.....	34
3.2.1. Alan Sargılı AAM (ASAAM).....	35
3.2.2. Sürekli Mıknatıslı AAM (SMAAM).....	37
3.2.3. Hibrit Uyarımlı Akı Anahtarlama Motoru (HUAAM)	39

4. BÖLÜM

AKI ANAHTARLAMALI MOTOR TASARIMI	42
---	-----------

5. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER.....	58
KAYNAKÇA	60
EKLER.....	66
EK 1.....	66
EK 2.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	68

KISALTMALAR

Sembol	Anlamı
CO ₂	Karbondioksit
DA	Doğru akım
AA	Alternatif akım
DAM	Doğru akım motoru
İM	İndüksiyon motor
SMSM	Sürekli mıknatıslı senkron motor
ARM	Anahtarlamaalı relüktans motor
AAM	Akı anahtarlamaalı motor
İYM	İçten yanmalı motor
EA	Elektrikli araç
HEA	Hibrit elektrikli araç
NaS	Sodyum sülfür
GM	General Motors
GE	General Electric
NiFe	Nikel demir
NiCd	Nikel kadmiyum
SM	Sürekli mıknatıs
ASAAM	Alan sargılı akı anahtarlamaalı motor
SMAAM	Sürekli mıknatıslı akı anahtarlamaalı motor
HUAAM	Hibrit uyartımlı akı anahtarlamaalı motor
EMK	Elektromotor kuvveti
NdFeB	Neodyum demir boron
SmCo	Nadir toprak mıknatısı
SEA	Sonlu elemanlar analiz
AS	Alan sargıları

SİMGELER

Sembol	Anlamı
kW	Kilowatt
km	Kilometre
sa	Saat
Nm	Newton metre
n	Devir sayısı
f	Frekans
p	Kutup çifti
N _s	Stator kutup sayısı
N _r	Rotor kutup sayısı
l _a	Eksen uzunluğu
D _{sd}	Stator dış çapı
D _{si}	Stator iç çapı
D _{rd}	Rotor dış çapı
D _{ri}	Rotor iç çapı
τ _{max}	Maksimum tork
τ _{min}	Minimum tork
τ _{ort}	Ortalama tork
e	İndüklenen gerilim
w _r	Mekanik açısal hız
ψ _a	Akı bağıntısı
θ	Pozisyon
a	Çentik ölçüsünün ortadan kenara olan mesafesi
b	Çentik ölçüsünün ortadan uca olan mesafesi
L	Çentik ölçüsünün dik yüksekliği
ms	Milisaniye
der	Derece

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan motor çeşitleri	16
Tablo 4.1. Zulu'nun çalışmalarında yer alan motor tasarımının karakteristikleri.....	43



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 1882 yılında Berlin’de Siemens tarafından üretilen “Elektromote”	5
Şekil 1.2. 1886 yılında üretilen ilk İYM ile çalışan otomobil “Motorwagen”	6
Şekil 1.3. “Electrobats” isimli elektrikli araç.....	6
Şekil 1.4. 1901 yılında New York’ta kullanılan elektrikli taksi	7
Şekil 1.5. Londra Elektrikli Taksi şirketi tarafından kullanıma alınan elektrikli taksi	7
Şekil 1.6. “Comuta” isimli elektrikli araç.	10
Şekil 1.7. Tamamen elektrikle çalışan araçların yapısı.....	11
Şekil 1.8. Seri hibrit elektrikli araçların yapısı.	12
Şekil 1.9. Paralel hibrit elektrikli araçların yapısı.....	13
Şekil 1.10. Seri-paralel hibrit elektrikli araçların yapısı.	13
Şekil 1.11. Kompleks hibrit elektrikli araçların yapısı.	14
Şekil 2.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması	19
Şekil 2.2. DA motorun çalışma prensibi	20
Şekil 2.3. Alan sargılarının uyarılmalarına göre DA motor türleri a) Serbest uyarımalı b) Paralel uyarımalı c) Seri uyarımalı d) Birleşik uyarımalı	21
Şekil 2.4. Sincap kafesli bir rotorun sargısı	24
Şekil 2.5. Rotor yüzeyinde SMSM ve rotora gömülü SMSM yapısı.....	26
Şekil 3.1. Akı anahtarlamalı motor çeşitleri	35
Şekil 3.2. Alan sargılı akı anahtarlamalı motorun (ASAAM) yapısı.	36
Şekil 3.3. ASAAM'nin çalışma prensibi	37
Şekil 3.4. SMAAM'nin yapısı	38
Şekil 3.5. SMAAM'nin çalışma prensibi	38
Şekil 3.6. HUAAM'nin yapısı	39
Şekil 3.7. HUAAM'nin çalışma prensibi (sadece SM'lar çalışıyor).....	40
Şekil 3.8. HUAAM'nin çalışma prensibi (sadece AS'ler çalışıyor)	40
Şekil 3.9: HUAAM'nin çalışma prensibi (hem SM'lar hemde AS'ler çalışıyor).....	41
Şekil 4.1. Akı anahtarlamalı motorların tasarımı a) Zulu vd.’nin yapmış olduğu tasarım b) Tezde önerilen sürekli mıknatısların gömülü olduğu tasarım c) Tezde önerilen hem sürekli mıknatısların gömülü olduğu hem de çentik uygulamasının yer aldığı tasarım .	44

Şekil 4.2. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın 100 Tur ve 0A, 6A ve 12A akım değeri için statik tork grafiği	45
Şekil 4.3. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın sargılarına uygulanan akım grafiği....	45
Şekil 4.4. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın akı bağıntı grafiği	46
Şekil 4.5. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımda indüklenen gerilim	46
Şekil 4.6. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın tork grafiği.....	47
Şekil 4.7. Gömülü sürekli mıknatıslı motorun 100 Tur ve 0A, 6A ve 12A akım değeri için statik tork grafiği	48
Şekil 4.8. Gömülü sürekli mıknatıslı motorun tork grafiği.....	49
Şekil 4.9. Stator yapısına çentik uygulaması	49
Şekil 4.10. Rotor kısmına çentik uygulaması	51
Şekil 4.11. $b=1.25$ mm, $L=2.2$ mm iken a'nın tork ve dalgalanma grafiği.....	51
Şekil 4.12. $a=2$ mm, $L=2.2$ mm iken b'nin tork ve dalgalanma grafiği.....	52
Şekil 4.13. $a=2$ mm, $b=1.5$ mm iken L'nin tork ve dalgalanma grafiği.....	52
Şekil 4.14. Çentik ve gömülü sürekli mıknatıslı motorun 100 Tur ve 0A, 6A ve 12A akım değeri için statik tork grafiği	53
Şekil 4.15. Çentik ve gömülü sürekli mıknatıslı motorun tork grafiği	53
Şekil 4.16. Zulu'nun çalışması ve tezde önerilen çalışmanın tork kıyaslaması.....	54
Şekil 4.17. Zulu vd.'nin yapmış olduğu motor tasarıma ait akı çizgileri.....	55
Şekil 4.18. Tezde önerilen gömülü SM uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgileri	55
Şekil 4.19. Tezde önerilen gömülü SM ve çentik uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgileri.....	56
Şekil 4.20 Tezde önerilen gömülü SM ve çentik uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgilerinin detay gösterimi.....	56

GİRİŞ

Günlük hayatta ulaşımda kullanılan araçları; içten yanmalı motorlu araçlar, elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçlar olmak üzere üç ana gruba ayırmak mümkündür. 1920 yılında Kanada, Polonya, İsveç, Ukrayna ve ABD gibi birçok ülkede bulunan petrol rezervlerinin etkisiyle, içten yanmalı motorlu araçların kullanımı günümüze kadar oldukça geniş bir alana yayılmış ve bu araçlar uzun yıllar kullanılmıştır. Ancak, küresel ısınma ve olumsuz çevre değişimlerinin insan hayatını etkilemesinden dolayı; içten yanmalı motorların atmosfere saldıkları karbondioksit (CO₂) gibi zararlı gazların önlenmesi için çalışmalar başlatılmıştır. İçten yanmalı motorların çevre kirliliğine neden olan CO₂ üretmeleri ve yakıt olarak kullandıkları petrol rezervlerinin hızlı bir şekilde tüketilerek gün geçtikçe azalması elektrikli araçların öneminin artmasında etkili olmuştur. Elektrikli araçlarda yakıt olarak kullanılan elektriğin farklı kaynaklardan üretilebilmesinin yanı sıra çevre dostu olmaları nedeniyle elektrikli araçlar, kullanıcılar tarafından oldukça tercih edilmektedir. 1800'lü yıllarda ilk örnekleri ortaya çıkan elektrikli araçların sahip olduğu; düşük menzil ve düşük güç kapasiteli batarya birimi dezavantajlarına günümüz teknolojik gelişmeleriyle çözümler sunularak, elektrikli araçların cazip bir hal alması sağlanmaktadır. Günlük hayatta kullanılan bir diğer araç türü olan hibrit elektrikli araçlarda; içten yanmalı motor ve elektrikli motorların avantajları birleştirilmeye çalışılmaktadır. Hibrit elektrikli araçlar; elektrik motorunun gücünün yetmediği durumlarda içten yanmalı motorun devreye girmesi veya içten yanmalı motorun fazla güç harcayarak daha düşük verimlerle çalıştığı durumlarda elektrikli motorun düşük hızlarda devreye girerek aracı tek motor ile çalışmaya devam ettirebilmesi sayesinde yakıt ve enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

Elektrikli araçlar ve hibrit araçlarda kullanılan bataryalar ve güç yönetim sistemlerinin yanı sıra, elektrik motorları da aracın gidebileceği menzil mesafesi ve araç performansı

üzerinde etkili olmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan motorların kalkış anındaki düşük devirlerde yüksek tork, hareket anındaki yüksek devirlerde yüksek güç değerlerine sahip olması, araç performansı açısından önem arz etmektedir [1]. Elektrikli araçlarda kullanılarak araçların özelliklerini belirleyen motorlar şu şekilde sıralanabilmektedir:

- Doğru akım motorları (DAM),
- İndüksiyon motorlar (İM),
- Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM),
- Anahtarlama relüktans motorlar (ARM),
- Akı anahtarlama motorlar (AAM).

Hali hazırda, ilgili tez çalışmasının ana konusunu; elektrikli araçlarda kullanılan akı anahtarlama motorlar oluşturmaktadır. Akı anahtarlama motorun, sürekli mıknatıslı senkron motor ve anahtarlama relüktans motorun bir kombinasyonu olarak tanımlanması mümkündür [2]. Akı anahtarlama motorun içyapısında yer alan statorda çeşitli yapılar karşımıza çıkmaktadır. Bu yapıların statorunda armatür sargılarıyla birlikte;

- Sürekli mıknatıslar,
- Alan sargıları,
- Hem alan sargıları hem de sürekli mıknatıslar yer almaktadır.

Motorun rotoru ise; sürekli mıknatıs veya sargı bulundurmaması nedeniyle basit bir yapıya sahiptir. Akı anahtarlama motorlar; boyut ve ağırlık avantajı, güç yoğunluğu, nispeten yüksek verimliliği, motor hız kontrolü ve aşırı yük koruması gibi özelliklerinden dolayı elektrikli araçlarda ve bu alandaki çalışmalarda tercih edilmektedir [3].

Tezin Amacı

Teknolojik çalışmaların gelişmesiyle elektrikli araçlara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Elektrikli araçların performansını artırmak ve gidebileceği menzile mesafesini artırmak üzere yeni bir motor türü olan akı anahtarlama motor tasarımının yapılması ve tasarlanan motorun iyileştirilmesi üzerine çalışmaların yapılması, tezin amacını oluşturmaktadır. Akı anahtarlama motor tasarım aşamasında, 2012 yılında Ackim Zulu'nun üzerinde çalıştığı motor tasarımından yararlanarak çalışmalar

gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen karşılaştırmalarla tasarlanan motorun performansı üzerinden çıkarımlar yapılmıştır.



1. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

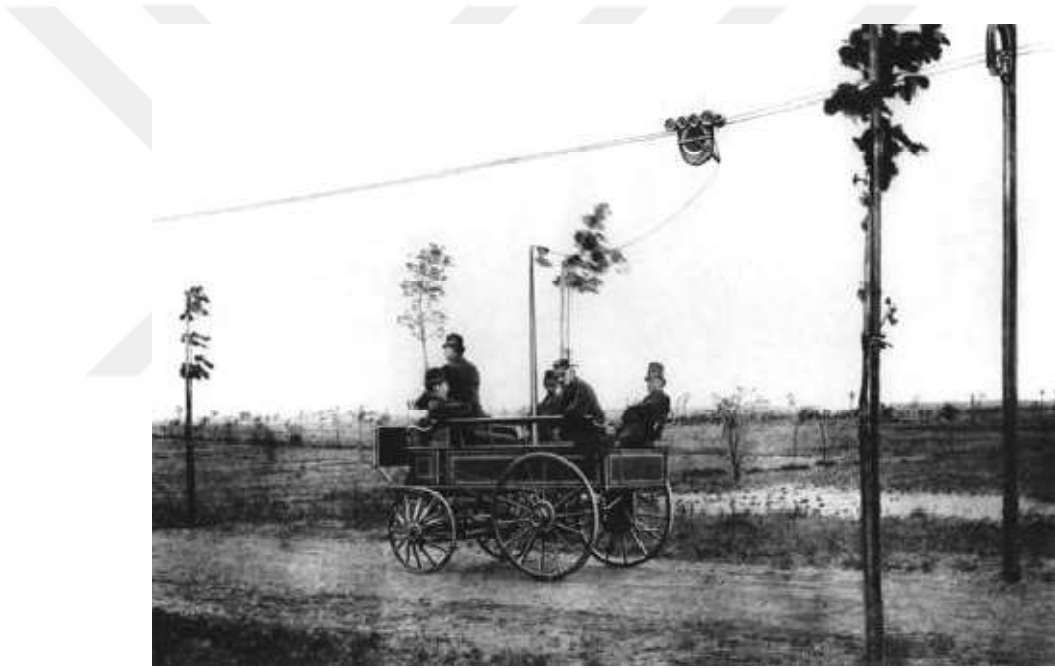
1.1. Elektrikli Araçlar ile İlgili Literatür Taraması

Birçok alanda olduğu gibi, elektrikli araçların (EA'ların) tarihi gelişimi içerisinde öne çıkan ilk önemli unsurun 1799 yılında Volta'nın bataryayı geliştirmesi olduğu görülmektedir. Volta'nın yaptığı çalışmanın akabinde, Hollanda'da 1835 yılında Straitingh tarafından ilk elektrikli araç prototipi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. 1834 ve 1836 yılları arasında Thomas Davenport tarafından; üç tekerlekli, şarj edilemeyen bataryaya sahip bir elektrikli aracın geliştirildiği ve uygulamasının ABD'de gerçekleştirildiği raporlanmıştır [4]. 1838 yılında Robert Davidson, şarj edilemeyen bataryayla tahrik edilen ve 6.4 km/sa hıza ulaşabilen elektrikli lokomotifini geliştirmiştir. 1859 yılına gelindiğinde ise; elektrikli araçlar için çok önemli bir bileşen olan şarj edilebilir bataryalar ortaya çıkmaya başlamıştır. O yıllarda, tüm zamanların en başarılı batarya sistemi olarak kabul edilen şarj edilebilen kurşun asit batarya sisteminin temelleri Fransız bilim insanı Gaston Planté tarafından atılmıştır [5].

Gustave Trouve, 1881 yılında ilk elektrikli binek araç olarak kabul edilen üç tekerlekli prototip ürünü Paris'te sergilemiştir. Aynı yıl, ilk elektrikli tekneyi yaparak Sen nehrinde kullanıma sunmuştur [6]. 1882'de Siemens, Şekil 1.1'de verilmekte olan "Elektromote" adındaki dünyanın ilk elektrikli trolleybüsünü Berlin'de üretmiştir [4]. Bu tarihten itibaren, elektrikli araçlar içerisinde yer alan elektrikli trolleybüsün kullanımı giderek yayılmaya başlamıştır. 550 volt (V) doğru akım (DA) ile beslenen bu trolleybüs, iki adet 2.2 kW'lık motora sahip olup iletim hattı üzerinde ortalama 12 km/sa hızında ilerleyebilmektedir. İngiltere'de 1882 yılında William Ayrton ve John Perry, elektrik

tahrikli üç tekerlekli aracın uygulamasını yapmışlardır. Kurşun asit bataryaya sahip bu araç, kullanıldığı arazi şartlarına göre 16-20 km arasında değişen bir menzile ve azami hızı 14 km/sa değerine ulaşabilmektedir [7].

1886 yılında Karl Benz, Şekil 1.2’de verilmekte olan içten yanmalı motor (İYM) ile çalışan ilk otomobil “Motorwagen”i üretilip satışa sunmuştur [8]. Motorwagen, üç tekerlekli olup motoru arkada ve yolcu oturağının alt kısmında yer almaktadır. İYM’ye sahip olan bu araç 0.55 kW’lık güç ile maksimum 16 km/sa hıza çıkabilmektedir.



Şekil 1.1. 1882 yılında Berlin’de Siemens tarafından üretilen “Elektromote” [4]

19. yüzyılın son dönemlerine doğru Amerika, İngiltere ve Fransa’da birçok şirket elektrikli araç üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerden en önemlisi Morris ve Salomon’un sahibi olduğu Electric Carriage and Wagon Company adlı şirkettir. Morris ve Salomon 1895 yılında iki oturma koltuğu olan Şekil 1.3’teki “Electrobats” isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir [9].



Şekil 1.2. 1886 yılında üretilen ilk İYM ile çalışan otomobil “Motorwagen” [8]

1901’de “New York Taxi” firması da Şekil 1.4’te verilen elektrikli araçları taksi olarak kullanmaya başlamıştır [4]. Amerika’da bu gelişmeler devam ederken, 1897 yılında İngiltere’de Londra Elektrikli Taksi Şirketi (London Electrical Cab Company) tarafından Şekil 1.5’teki taksilerden on beş tanesi kullanıma alınmıştır [10].



Şekil 1.3. “Electrobats” isimli elektrikli araç [9]



Şekil 1.4. 1901 yılında New York'ta kullanılan elektrikli taksi [4]



Şekil 1.5. Londra Elektrikli Taksi şirketi tarafından kullanıma alınan elektrikli taksi [10]

1900-1912 yılları arasında, elektrikli araçlarda popülerliği artan araştırma ve geliştirme konularından birisi; araçların menzilin ve performansını artırma düşüncesidir. 1916 yılında, EA'lar ile İYM'ye sahip araçların avantajlarından yararlanabilmek için Woods marka hibrit elektrikli araçlar (HEA) tasarlanarak performans artırma çalışması yapılmıştır [11].

EA'lar alanında gelişmeler olurken, İYM ile çalışan araçlar alanında da gelişmeler hız kazanmıştır. 1920 yılında Kanada, Polonya, İsveç, Ukrayna ve ABD'de bulunan petrol yataklarıyla; petrol miktarı bollaşarak fiyatı ucuzlamış, kara yollarının gelişimiyle uzun mesafe seyahatler uygun hale gelmiştir. İYM'ye sahip araçların kullanımını artıran bu gelişmelerin yanında Ford'un seri üretim sürecine geçmesi, o yıllarda EA'ların kullanımının azalmasında en önemli etkenlerden biri haline gelmiştir. Petrol fiyatlarının aşağı çekilmesi, yakıt ile çalışan araçların üretim ve kullanım maliyetlerini de aşağı indirmiştir. İYM alanına yönelen teknolojik çalışmaların etkisiyle, petrolü yakıt olarak kullanan araçların menzil mesafeleri artırılmıştır. Batarya ile çalışan EA'ların menzil mesafesi ise bu artışa uyum sağlayamayarak, İYM'ye sahip araçlara olan ilginin gölgesinde kalmışlardır. İlginin değişmesinin nedenleri araştırıldığında; ticarileşebilir bir ürünün rekabet edebilmesi için maliyetinin azaltılarak teknolojik seviyesinin artırılmasının önemi ve gereği ortaya çıkmıştır [12]. Elektrikli araçlar alanında ortaya çıkan yaklaşık 50 yıllık bir duraksama ve azalan ilgi, EA'ların 1960'lı yıllarda tekrar popülerlik kazanmasıyla son bulmuştur. EA alanında yaşanan bu canlanmanın sebepleri arasında; 1960'lı yıllarda Ford Araştırma Laboratuvarı'nda geliştirilen sodyum sülfür (NaS) bataryalar yer almaktadır. EA'ların tahrik sistemlerinin işleyişi için gereken güç ve enerjinin sağlanması için NaS bataryalar geliştirilmiştir. Doğu Asya, Avrupa ve Amerika'daki birçok şirkette NaS bataryaların ticari prototipleri kullanılmaktaydı. Kullanım tercihlerinde, NaS bataryaların enerji depolama kapasitelerinin kurşun asit bataryaların yaklaşık olarak dört katı olması etkili olmuştur. İçten yanmalı, elektrikli ve hibrit elektrikli araç teknolojileri alanında ortaya çıkan gelişmelerle birlikte İYM'li araçları EA'ya dönüştüren bazı önemli otomotiv şirketleri ortaya çıkmıştır. Aynı dönemde, EA'lar alanında farklı ve yeni tasarımlar yapmak için birçok firma girişimde bulunmuştur. Örnek olarak; 1966 yılında Ford Motor'un aşağıda sıralanmakta olan gereklilikleri sağlayabilmek için tasarım çalışmalarına başlamıştır.

- Düşük kirlilik oranı,
- Kolay çalışma,
- İlk satın alma maliyetinin düşük olması,
- Kullanım maliyetinin düşük olması,
- Az yer kaplayacak hacimsel tasarıma sahip olması.

1966 yılında İYM ile çalışan Corvair'ı temel alarak çalışma yapan General Motors (GM) şirketi, "Electrovair II" isimli elektrikli aracı üzerinde deneyler yapmıştır. Ford'un yapmış olduğu çalışmaları yakından takip eden GM firması, İYM ile çalışan "Corvair" isimli araçla aynı performansı verebilen, bir alternatif akım (AA) motoru olan indüksiyon motorunu (İM) kullanmıştır [13]. 1967 yılında ilk prototip yapılmış ve Şekil 1.6'da görülmekte olan bu araca "Comuta" adı verilmiştir [7]. Comuta'da, ön tekerlerin tahrik işlemini sağlayan iki adet doğru akım motoru (DAM) yer almaktadır. İlgili EA'da DAM'nin titreşimini kontrol eden bir sistem geliştirilmiştir. Comuta'ya güç aktarımı toplam ağırlığı 170 kg olan 4 adet kurşun asit bataryadan sağlanmaktadır. Azami hızı 64 km/sa olan araç, 40 km/sa hız ile 64 km menzile ulaşabilmektedir [14].

General Electric (GE) şirketi 1968 yılında "Delta" aracının uygulamasını ortaya çıkarmıştır. Azami hızı 89 km/sa'ya ulaşabilen aracın menzil mesafesi 64 km'dir. Delta elektrikli aracında nikel demir (NiFe) bataryalar kullanılmıştır. GE ile aynı yıl Ford firması elektrikli araçlarında, özellikle havacılık alanında sıklıkla tercih edilen nikel kadmiyum (NiCd) bataryaları kullanarak "E-Car" aracının prototipini tamamlamıştır.

1960'lı yıllarda EA'lar alanında artan ilgi, 1970'li yılların ortalarına doğru patlak veren petrol krizinden dolayı hızlı bir şekilde ivme kazanmıştır. Yaşanan petrol ve enerji krizinden dolayı Japonya, Amerika, Almanya, İngiltere ve İtalya gibi birçok ülkede EA'lar alanındaki araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çalışmalarına tekrar yoğunlaşmaya başlanmıştır. 1970'li yıllar ise EA'ların Avrupa kıtasında geliştirilerek kullanıldığı dönemdir. 1973'te Electricite de France firması, konvansiyonel yakıt kullanan 80 tane aracı elektrik motoru ile hareket edebilir hale çevirmiştir. Aynı yıllarda, sanayinin ve makine teknolojisinin hızla gelişerek değişiklik gösterdiği Almanya'da Volkswagen ve Daimler-Benz firmaları EA'lar üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. İtalya'da 1975 yılında, otomotiv firması Fiat tarafından "X1/23B" adıyla prototip bir ürün hazırlanmış ve bu ürün üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gücünü kurşun asit bataryalardan alarak DA motoru sayesinde hareket ederek azami 64 km/sa hıza ve 48 km menzil mesafesine ulaşabilen Fiat'ın X1/23B aracı 2 yolcu taşıma kapasitesi sahiptir.



Şekil 1.6. “Comuta” isimli elektrikli araç [7].

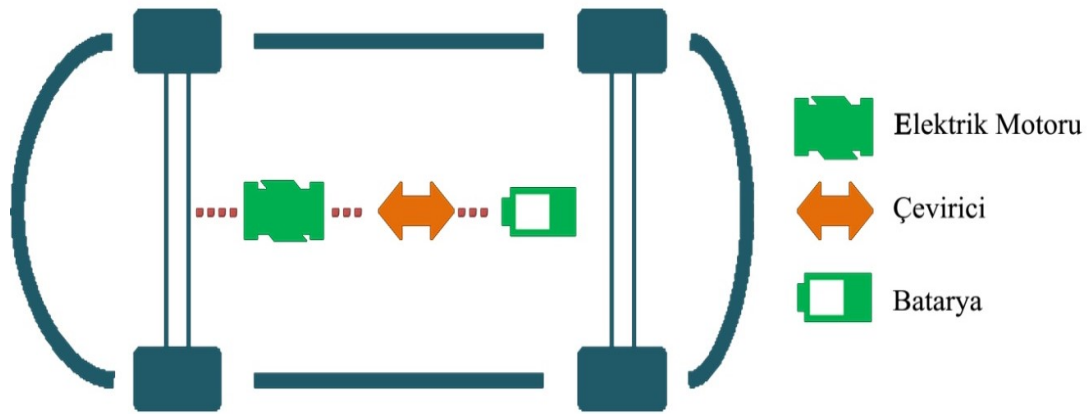
Kurşun asit bataryalar ile güç verilen EA’ların ilk örneklerinde, tahrik sistemi olarak DA motorları kullanılmıştır. Gelişen ve değişen teknolojinin etkisiyle, 1980’li yıllardan itibaren EA’larının tahrik sistemlerinde, alternatif akım (AA) motorlarının kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

Amerika, İngiltere ve Fransa gibi ülkelerde ortaya çıkan petrol ve enerji krizinin etkisiyle çevre dostu teknolojilerin gelişimi hız kazanmıştır. EA’ların çevreye duyarlı avantajlı özelliklerinden dolayı 1980’li yıllarda birçok ülke, EA’lar alanında yapılan çalışmalara ilgi göstererek özel maddi destekler vermeye başlamıştır [15]. Bu desteklerin örneği olarak; ABD Enerji Bakanlığı’nın desteğiyle ortak çalışmalar yapan GE ve Ford firmaları “ETX-1” aracının geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmışlardır. 200 V’luk kurşun asit bataryalar ile enerji sağlanan bu araçta tahrik sisteminde ise; indüksiyon motorları kullanılmıştır. Ford ve GE ortak çalışmalarını devam ettirerek ETX-1 aracının tahrik sistemini 1988 yılında geliştirmişlerdir. Aracın tahrik sistemine güç sağlayabilmek amacıyla kurşun asit batarya yerine NaS bataryaları tercih etmişlerdir. İlerleyen süreçte, Ford Araştırma Laboratuvarları’nda geliştirilen tahrik sistemi parçalarından esinlenerek “ETX-2” ismiyle prototip bir ürün geliştirilmiştir.

NaS bataryalara sahip olan ETX-2 aracı 96 km/sa hıza ve 160 km yol gidebilme performansına sahiptir. 1988 yılında Fransa’da, birçoğu Citroen C15 veya Peugeot 205 model ürünlerinin dönüştürülmüş hali olan 500 civarında EA deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Aynı yıllarda “GES City Stromer” isimindeki EA’nın dönüşümü gerçekleştirilerek Avrupa Güvenlik Standartları’nı karşılayabilir seviyeye çıkartılmıştır [16].

1.2.Elektrikli Araç Çeşitleri

Elektrikli araçların; tamamen elektrikle çalışan araçlar ve hibrit elektrikli araçlar (HEA) olmak üzere iki ana kısımda incelenebilmesi mümkündür. Tamamen elektrikle çalışan araçlarda, araç tahriki elektrikli motorlarla sağlanmaktadır. Şekil 1.7’de görüldüğü üzere; bataryalardan gelen güç, çeviriciler tarafından istenilen forma dönüştürülerek elektrik motoruna aktarılmaktadır [17].



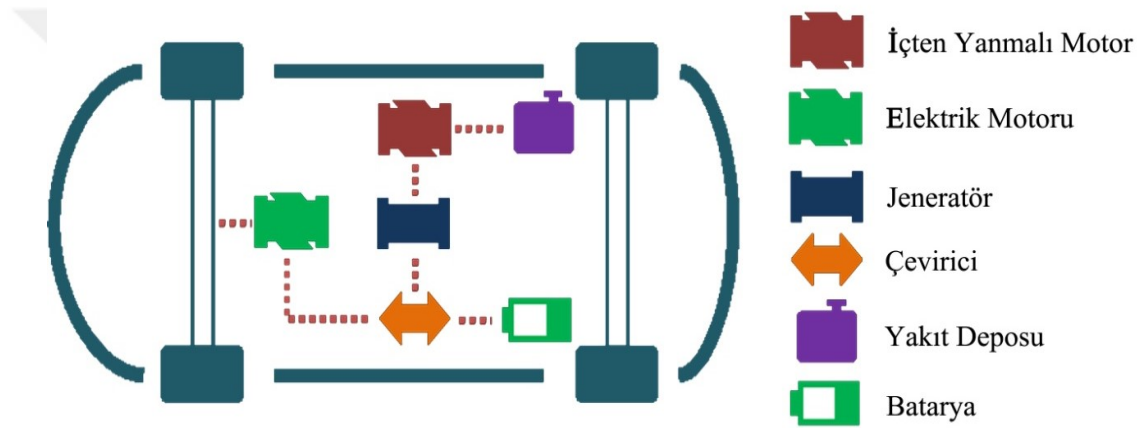
Şekil 1.7. Tamamen elektrikle çalışan araçların yapısı [17]

Tamamen elektrikli araçlardaki menzil dezavantajının ortadan kaldırılması amacıyla hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru kullanılan hibrit elektrikli araçlar ortaya çıkmıştır. HEA’lar da kendi içerisinde;

- Seri HEA,
- Paralel HEA,

- Seri-paralel HEA
- Kompleks HEA,

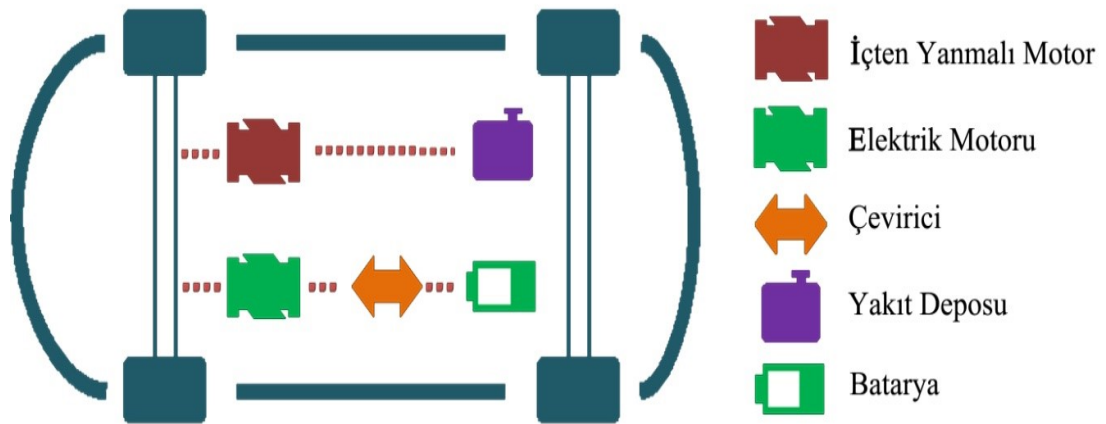
olmak üzere dört ayrı sınıfa ayrılmaktadır. Şekil 1.8'de verilmekte olan seri hibrit elektrikli araçların tahriki elektrik motoru ile sağlanmaktadır [17]. Seri HEA'ların bileşenleri içerisinde yer alan içten yanmalı motor ise yakıt harcıyarak jeneratörü çalıştırmaktadır. Jeneratörde üretilen elektrik enerjisi, çevirici üzerinden elektrik motoruna ve/veya bataryalara aktarılmaktadır.



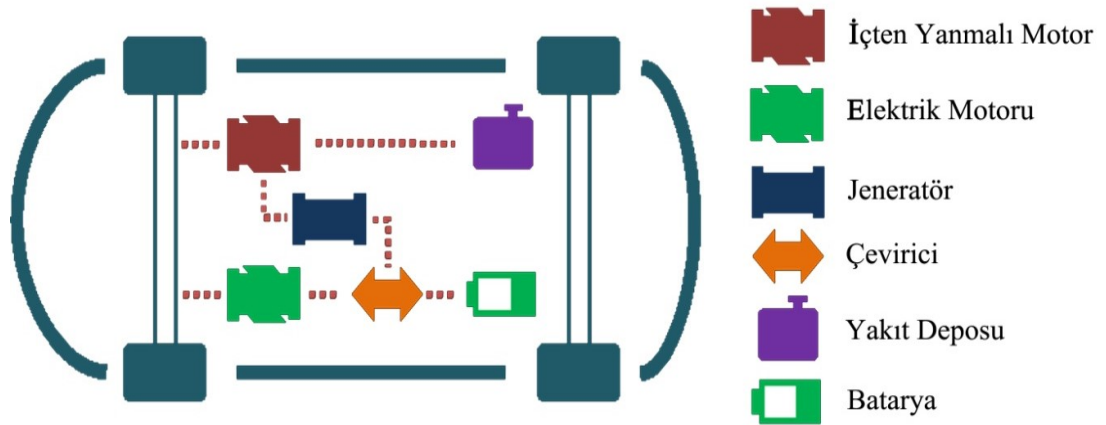
Şekil 1.8. Seri hibrit elektrikli araçların yapısı [17].

Şekil 1.9'da görülmekte olan paralel HEA'nın tahriki hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motor ile ayrı ayrı sağlanabilmektedir [17].

Seri HEA ile paralel HEA'nın özelliklerinin birleştirilmesiyle ortaya çıkan diğer bir araç türü ise; Şekil 1.10'da verilmekte olan seri-paralel HEA'lardır. Seri-paralel HEA'larda, araç tahriki hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motor ile ayrı ayrı sağlanabilmektedir. Ayrıca, jeneratör yardımıyla üretilen elektrik enerjisi çevirici üzerinden bataryayı şarj etmektedir veya elektrik motoruna enerji sağlamaktadır. Seri-paralel HEA, hem seri HEA hem de paralel HEA avantajlarına sahip olmasına rağmen; nispeten daha karmaşık ve maliyeti daha yüksektir.

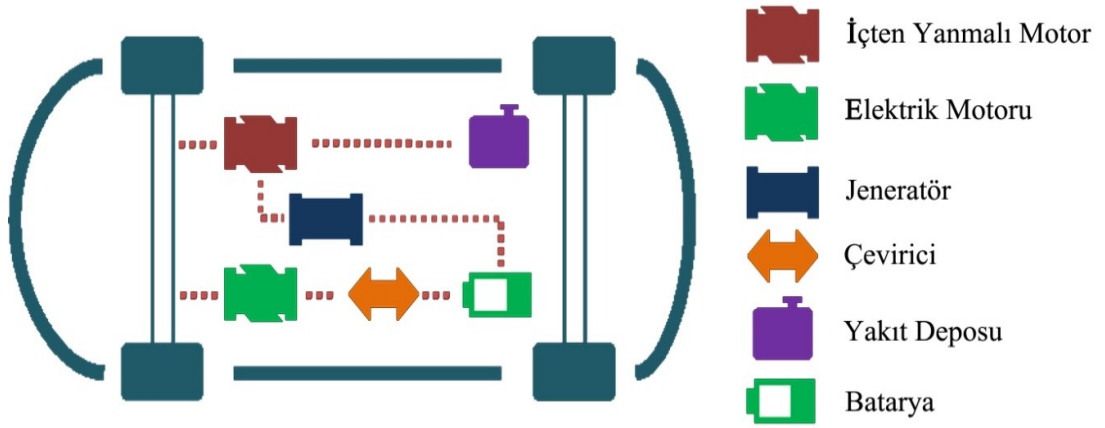


Şekil 1.9. Paralel hibrit elektrikli araçların yapısı [17]



Şekil 1.10. Seri-paralel hibrit elektrikli araçların yapısı [17].

Hibrit elektrikli araç türlerinden sonuncusu ise Şekil 1.11’de verilmekte olan kompleks HEA’lardır [17]. Adından da anlaşılacağı üzere; bu sistem yapı olarak seri-paralel HEA’lara benzemesine rağmen temel farklılığı; her iki motorun aracı tahrik etme işleminde birlikte kullanılabilmesi ve içten yanmalı motorun jeneratör yardımıyla bataryayı şarj etmesidir.



Şekil 1.11. Kompleks hibrit elektrikli araçların yapısı [17].

2. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

2.1. Elektrik Motorlarının Tarihçesi

Faraday, 1822’de yaptığı çalışmalar sonucunda; içinden akım geçirilen bir iletken maddenin manyetik alan tarafından manyetik kuvvet ile itildiğini görmüştür. Faraday’ın elde ettiği bu çıkarım, elektrik makinelerinin temel ilkelerini oluştururken Faraday’ın çalışmalarından esinlenen Barlov, 1824 yılında mekanik enerjiyi elde etmek için elektrik enerjisinin kullanan bir makine tasarlamıştır. Tarihteki ilk elektrikli makine olarak bilinen, Barlov’un tasarladığı bu makine “Barlov Tekerleği” olarak isimlendirilmektedir [18]. Faraday, 1831 yılında elektromanyetik indüksiyonun manyetizma ve elektrik akımıyla yakın ilişkisinin prensiplerini ortaya koymuştur. Bu sayede, EA’ların gerekli bileşenlerinden olan jeneratörlerin ve elektrik motorlarının temeli atılmıştır [6].

Dawidson 1838 yılında İskoçya’da, elektrikli lokomotifi hareket ettirmek için anahtarlamalı relüktans motorlarını (ARM) ilk kez kullanmıştır [19]. 1840’lı yıllarda ARM’nin temel çalışma prensipleri ve özel karakteristikleri üzerinde Wheatsone ve Davidson tarafından çalışmalar yapılsa da, motorun verimli şekilde çalıştırılıp kontrol edilebilmesinde karşılaşılan sorunlar nedeniyle 1960’lı yıllara kadar ARM alanında kayda değer çalışmalar az sayıdadır. ARM alanında kaydedilen dönüm noktası 1969 yılında Ofsenani ve Nasar’ın yaptığı çalışmalar olarak görülebilmektedir.

1800’lü yılların ortalarına gelindiğinde ise; kontrol sistemlerinin yeteri kadar gelişmemesinden dolayı ortaya çıkartılan ilk EA’larda DA motorları yardımıyla tahrik

işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak, EA'larda kullanılmaya potansiyeli olan elektrik motorlarının ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar sürdürülmüştür [7].

1950'li yılların ilk zamanlarında sürekli mıknatıslı (SM) jeneratörler üzerinde çalışmalar yapılmakta iken 1955 yılında bilim insanı F. W. Merrill tarafından 4 kutuplu sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) ilk örnekleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır [20].

Literatür incelendiğinde, yıllara ve modellere göre otomotiv firmalarının EA'larda kullandıkları motor türleri Tablo 2.1'de sıralanmaktadır.

Tablo 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan motor çeşitleri

Elektrikli Araç	Yıl	Elektrikli Motor Türleri
Mazda Bongo	1966	DA Motor [25]
Fiat Panda Elettra	1990	DA Motor [25]
Toyota RAV 4	1994	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor [26]
Nissan Altra	1997	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor [26]
Ford Focus	1998	İndüksiyon Motor [26].
Ford Think City	1999	İndüksiyon Motor [4]
Honda EV Plus	1999	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor [26]
Fiat Doblo	2000	İndüksiyon Motor [1]
Toyota Prius	2000	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor [27]
Nissan Leaf	2010	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor [26]
Tesla Model S	2012	İndüksiyon Motor [26]
Tesla Model X	2016	İndüksiyon Motor
Tesla Model 3	2017	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor[24]

Ürün olarak kullanılan motor türlerinin elde edilmesi ve geliştirilmesi için literatürde yer alan birçok farklı çalışma mevcuttur. Mevcut çalışmalar; EA'lara uygulanan motor türlerinin birbiriyle kıyaslanması, simülasyon ve test çalışmaları, farklı kontrol yöntemlerinin araştırılarak yeni metotların geliştirilmesi olarak sıralanabilmektedir.

Gwoździewicz ve Antal 2010 yılında yaptıkları incelemede, SMSM ve İM'nin farklı kriterlere göre özelliklerini araştırmışlardır. Elde ettikleri veriler ışığında; genel olarak İM'nin SMSM'ye göre verimliliğinin ve performansının daha düşük seviyelerde olduğunu görmüşlerdir [28].

2013 yılında Goss vd.'nin yapmış oldukları çalışmada, Toyota firmasının ürettiği 2004 Prius model EA'larda kullanılan 50kW gücündeki SMSM ile aynı performansa sahip kendi tasarımları olan İM'nin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını incelemişlerdir. Enerji sarfiyatı ve performans kriterleri dikkate alınarak yaptıkları inceleme neticesinde; SMSM'nin genel olarak İM'lere göre daha verimli olduğunu görmüşlerdir [29].

Yıldırım vd., 2014 yılında yaptıkları çalışmada EA'larda kullanılan farklı türdeki motor çeşitlerinin ve bu motorlarda kullanılan sürücülerin güvenilirlik, güç değerleri, verimlilik ve maliyet gibi farklı karakteristik özelliklerine göre birbirleriyle kıyaslamalarını yapmışlardır. Elde ettikleri bulgular neticesinde şu sonuçlara ulaşmışlardır: Güç yoğunluğu ve verimlilik açısından en elverişli motor SMSM, kontrol sağlanabilme ve ekonomiklik açısından en elverişli motor İM'dir. En elverişli iki motor olan İM ve SMSM'yi de birbiriyle kıyaslamak için 1500-6000 devir/dk aralığındaki tork, bakır ve demir gibi malzeme kayıpları, verimliliği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İncelenme sonucunda;1500 devir/dk seviyelerinde SMSM'nin ASM'ye göre daha fazla tork üretebilmesine rağmen, 6000 devir/dk seviyelerinde SMSM'nin ASM'ye göre daha az tork ürettiği bulgusuna ulaşmışlardır [30].

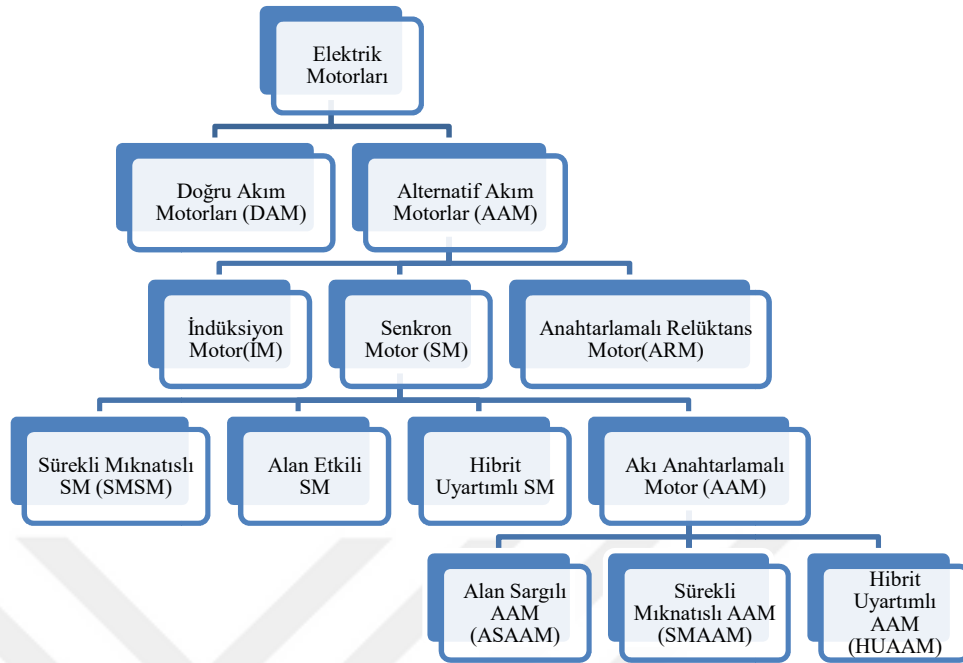
Guan vd., 2014 yılında yaptıkları çalışmada; tasarladıkları İM ile aynı stator yapısına sahip olan Toyota firmasının 2010 Prius elektrikli araç modelinde kullanılmakta olan SMSM'yi performans ve ekonomik maliyet kriterlerine göre birbirleriyle kıyaslamışlardır. Kıyaslamaları neticesinde; genel olarak İM'lerin verimliliklerinin

SMSM'lere oranla daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Öte yandan, yüksek devirlerde SMSM'lerin ürettiği oldukları tork seviyesinin ve verimliliğinin İM'lere göre daha az olduğu kanısına varmışlardır. Öte yandan, İM'lerin üretim maliyetlerinin SMSM'lerin maliyetlerine kıyasla daha az olduğunu görmüşlerdir [31].

Büyük değirmenci vd.'lerinin 2014 yılında yaptıkları çalışmada [32], benzer karakteristik özellikler sahip ARM, SMSM ve İM'yi verimlilik ve hızlarına göre kıyaslayarak hızla bağlantılı verimlilik grafiğini çıkarmışlardır. Başlangıç aşamasındaki düşük hızlarda SMSM İM'ye göre daha verimli kabul edilirken, yüksek hızlarda ise İM'nin SMSM'ye göre daha verimli hale geldiği tespit etmişlerdir. Ayrıca, yapılan simülasyon ve test çalışmaları sonucunda SMSM'nin İM'ye göre daha az enerji harcadığı sonucuna ulaşmışlardır. İM ve SMSM'nin verimliliklerini karşılaştırmak için; bu motorlara sahip EA'ları farklı yollarda test sürüşüne tabi tutmuşlar ve genel olarak; SMSM'un İM'ye göre daha verimli olduğunu, Ancak, EA'ların yüksek hızlarda gidebilmesine uygun olan yollardaki sürüşlerde İM'nin SMSM'ye göre daha verimli olduğu saptanmıştır. Diğer taraftan ise; motor dayanımına göre belirlenen en yüksek hız seviyelerinde ise İM'nin verimliliğinin ARM'den daha az olduğu sonucuna varmışlardır [1].

2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makineleri elektrik motoru olarak tanımlanmaktadır. Elektrik motorlarının ortaya çıktığı zamanlarda EA'larda DA motorları kullanılırken sonraki süreçlerde geliştirilerek araç performansına olumlu yönde katkı sağlayacak olan AA motorları olan indüksiyon motorlarının kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Elektrik motorlarını ise; Şekil 2.1'deki gibi alt başlıklar halinde sınıflandırılabilir [33]. İlerleyen yıllarda, farklı gereksinimleri sağlayabilmek için EA'larda kullanılan farklı türde elektrik motorları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Tez çalışmasının birinci bölümünde verilmekte olan; EA'larda kullanılan elektrik motorları bu bölümde açıklanmaktadır. Tez konusunu oluşturan akı anahtarlamalı motor çeşidi bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir.



Şekil 2.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması [33]

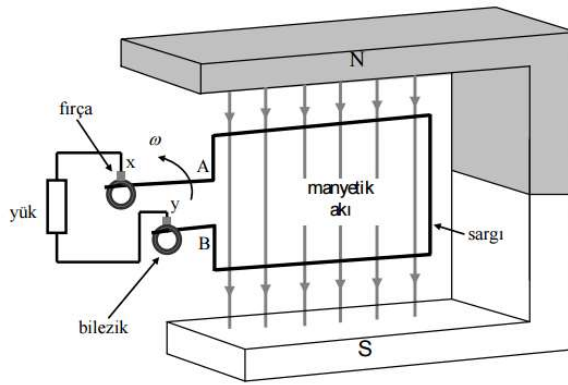
2.2.1 Doğru Akım (DA) Motorları

Tahrik sistem bileşenleri olan bataryalardan gelen enerji doğrudan motorlar tarafından kullanılabilme olanağı bulunan doğru akım (DA) motorları EA'ların ilk örneklerinde sıklıkla kullanılmıştır. Motor ve güç elektroniği teknolojileri üzerinde yapılan Ar-Ge çalışmaları neticesinde; güç elektroniğinde kullanılan dönüştürücüler, malzeme teknolojisi, motor türleri ve kontrol yöntemleri alanında ilerlemeler ortaya çıkmıştır. Teknolojinin değişimiyle AA motor sürücülerinin verimliliği, verimli rejeneratif frenleme, güç yoğunluğu, güvenilirlik, sağlamlık ve olabildiğince az bakıma gereksinim duymaları ön plana çıkartılarak DA motor sürücülerine göre avantajlı hale getirilmiştir [35]. Bu değişim sonrasında AA motorları olan SMSM, ARM ve İM'ye yönelim gerçekleşmiştir.

DA motorların rotor bölümünde şekilsel olarak paketlenmiş sac levhalar üzerinde sargılar yer almaktadır. Sargılara enerji uygulanması işlemi fırçalar ve kolektörler aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Yüksek hızlarda dönen motorun rotor kısmında bulunan kolektör ve fırçalarda oluşan sürtünme işlemi nedeniyle fırçalarda yıpranmalar ve fırça kayıpları oluşmaktadır. Bu etkiler, DA motorlarının makine bakımıyla ilişkili

olan işletme maliyetini artırmaktadır. DA motorlarının dezavantajlı durumları ön plana çıkmasına rağmen; ayarlanabilir hız ve hız regülasyonu, başlatma ve durdurma durumlarında en avantajlı motorlar arasında yer almaktadır. DA motorlarının diğer bir bileşeni olan statorunun görevi, üzerindeki sürekli mıknatıs ve alan sargısı sayesinde manyetik alan oluşturmaktır [36].

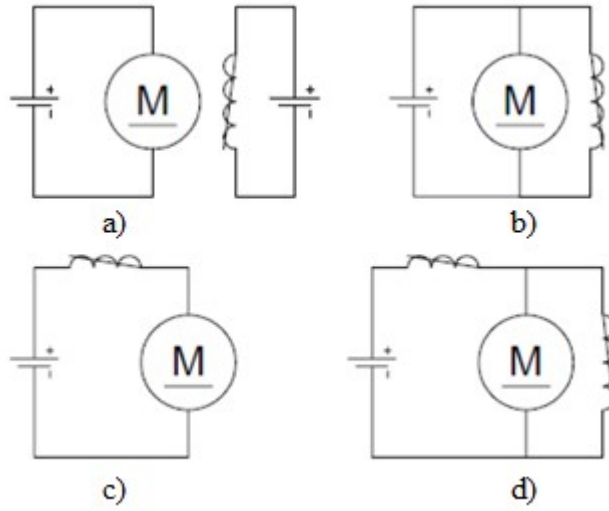
Şekil 2.2’de görülen DA motorun statorunda bulunan sürekli mıknatıslar manyetik alan oluştururlar aynı zamanda rotorunda bulunan fırça ve kolektör yardımıyla sargılara akım uygulanmaktadır [1]. Manyetik alana maruz bırakılan sargılardan geçen akımla kuvvet oluşmakta ve sargılarda oluşan bu kuvvetin etkisiyle rotor dönmeye başlamaktadır.



Şekil 2.2. DA motorun çalışma prensibi [1]

Alan sargılarının uyarılmalarına göre DA motorları Şekil 2.3’te görüldüğü üzere

- Serbest uyarımalı DA motoru,
- Seri uyarımalı DA motoru,
- Paralel uyarımalı DA motoru,
- Birleşik uyarımalı DA motoru olarak dört sınıfa ayrılabilir [7].



Şekil 2.3. Alan sargılarının uyarılmalarına göre DA motor türleri a) Serbest uyarımalı
b) Paralel uyarımalı c) Seri uyarımalı d) Birleşik uyarımalı [7]

Şekil 2.3'teki devre şemalarından anlaşıldığı gibi; serbest uyarımalı DA motorlarda alan sargıları ve armatür sargıları elektriksel olarak birbirinden farklı olan iki güç kaynağından beslenmektedir. DA motorlarının diğer bir türü olan seri uyarımalı motorlarda alan sargılarıyla armatür sargıları birbirlerine seri şekilde bağlanmaktadır. Seri uyarımalı DA motorlarında alan sargılarından geçen akım ile armatür sargısından geçen akım aynıdır. EA uygulamalarında seri uyarımalı motorların tercih edilmesinde momentin armatür akımının karesi ile doğru orantılı olmasının etkisi olmaktadır. Seri uyarımalı DA motorlarının söz konusu avantajlarının yanında bazı istenmeyen etkileri de bulunmaktadır. Motorun yüksüz olarak çalıştırılması anında armatür akımı yükselmektedir. Akımın yüksek olması, motorun yüksek devirlere çıkarak hızlanmasına ve doğal olarak mekanik bileşenlerin hasar görmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı, seri uyarımalı DA motorları sürekli olarak yüke bağlı bir şekilde çalıştırmak gerekmektedir. Öte yandan, paralel uyarımalı DA motorlarında armatür sargılarıyla alan sargıları birbirlerine paralel olarak bağlanmaktadır. Paralel uyarımalı motorlarda aynı güç kaynağından elde edilen gerilim değeri armatür sargılarına ve alan sargılarına uygulanmaktadır. Armatür akımıyla doğru orantılı olarak motorda üretilen moment, seri uyarımalı DA motorlarına kıyasla daha azdır. Seri ve paralel DA motorlarının

kombinasyonel olarak birleştirilmesi suretiyle elde edilen bir diğer motor çeşidi birleşik uyarmalı DA motorlarıdır. Hızın kontrol edilmesinde alternatif yöntem olarak; alan sargılarından geçen akım büyüklüğünün azaltılması veya armatür sargılarına uygulanan gerilim değerinin artırılması yer almaktadır [7].

Doğru akım motorlarına uygulanan gerilimin yönünün değiştirilmesiyle DA motorlar ters yönde çalışabilmektedir. Bu motorlarda, alan sargılarından veya armatür sargılarından birine uygulanan gerilimin yönü değiştirilerek kontrol sağlanabilmektedir. Seri, paralel ve birleşik uyarmalı DA motorlarının devre şemalarında bir adet gerilim sağlayıcı kaynak yer almaktadır. DA motorları,

- Kolay kontrol edilebilme,
- Hem kararlı durumlarda hem de geçici durumlarda iyi bir performans gösterebilme,
- Moment ve akı kontrolünün bağımsız olarak sağlanabilmesi,
- Hız kontrolünün iyi bir şekilde yapılabilmesi,
- Düşük hızlarda yüksek seviyelerde momentlerin elde edilebilmesi imkanı,
- Yerleşmiş üretim teknolojisine sahip olması

gibi mevcutta bulunan avantajlarından dolayı genellikle hızın ayarlanabilir olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır [20].

DA motorları; sahip oldukları avantajlara rağmen bazı dezavantajlara da sahiptir. Ekonomik maliyet yüklerinin yanında DA motorlarının dezavantajları şu şekilde sıralanabilmektedir [7]:

- Yüksek bakım maliyeti,
- Bakıma ihtiyaç duyan fırça aşınmaları ve komütatör değişimleri,
- Düşük nominal hız,
- Komütatör nedeniyle oluşan yüksek elektromanyetik girişim,
- Düşük özgül güç oranı,
- Aşırı yük kapasitesinin zayıf olması,
- Düşük verimlilik.

DA motorlarının avantaj ve dezavantajları göz önüne alındığında, bazı önemli dezavantajların ön plan çıkmasıyla çalışmaların yönünün indüksiyon motora doğru çevrilmesine neden olmuştur.

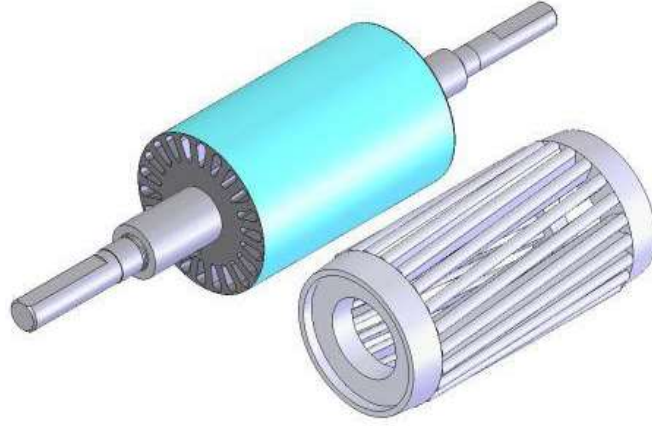
2.2.2. Alternatif Akım (AA) Motorları

2.2.2.1 İndüksiyon Motorlar (İM)

Diğer elektrik motorlarında olduğu gibi İM’lerde de stator ve rotor kısımları bulunmaktadır. İnce sac levhaların preslenmesiyle oluşturulan statorun oluklarında sarılı halde sargılar konumlanmaktadır. İM’lerde;

- Kısa devre (sincap kafesli) rotor,
- Bilezikli (sargılı) rotor olmak üzere başlıca iki çeşit rotor vardır.

İM’lerde kullanılan sincap kafesli rotorların üretilmesi aşamasında; silisyumlu demir malzemelerden oluşan sac levhalar pres makinelerinde kesilerek paketlenmektedir. Sonrasında rotor kanalları içerisine kısa devre kafes sargıları oluşturacak şekilde erimiş alüminyum pres dökümüyle yerleştirilmektedir. Şekil 2.4’te verilmekte olan örnek bir sincap kafesli rotorun sargı yapısına bakıldığında görülmektedir ki; rotoru oluşturan çubuklar rotor eksenine paralel bir şekilde yerleştirilmemektedir. Bazı kullanım alanları için üretilmekte olan büyük boyutlu motorlarda, rotor oluklarına alüminyum yerine bakır çubuklar yerleştirilebilmektedir. Rotor tasarımında farklı malzemelerin kullanılmasıyla farklı tipte oluk yapıları oluşturulabilmektedir. Alternatif bir malzemenin kullanılması motor çeşitliliğini artırsa da; alüminyum pres dökümüyle oluşturulan sincap kafes sargıları eksiz olduğu için kullanımda tercih edilmektedir [21]. Motor tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan bir tanesi stator ve rotordaki oluk sayılarıdır. Stator oluk sayısının rotor oluk sayısına eşit olduğu durumlarda motor kalkınmamaktadır. Bundan dolayı, rotor ve statordaki oluk sayılarının eşit olmamasına dikkat edilmektedir.



Şekil 2.4. Sincap kafesli bir rotorun sargısı [21]

İM'lerde kullanılan diğer bir rotor çeşidi olan bilezikli rotorlarda sargılar paketlenmektedir. Rotor silindir şekline getirildikten sonra oluklara üç fazlı AA sargılar yerleştirilmektedir. Oluklara yerleştirilen üçgen veya yıldız bağlı sargılara 120° faz farkıyla AA uygulanmaktadır [21]. Oluklara yerleştirilen sargılardan elde edilen üç uç yalıtılarak motor milindeki üç adet bileziğe yerleştirilmektedir [7]. Bu süreç sonucunda bilezikli rotor yapısı elde edilmektedir.

İM'nin yüksüz çalışma durumunda, rotorun devir sayısı manyetik alanın senkron devir sayısına eşitlenmeye çalışmaktadır. Eğer devir sayıları eşitlenirse; statorun döner alanı rotor çubuklarını kesmeyeceği için rotordaki hareketin momentini oluşturacak olan indüksiyon akımı oluşmaz ve sonuçta, rotorun hareketinin sağlayan kutup başları oluşmaz ve rotor dönemez. Bundan dolayı, “kayma” olarak isimlendirilen motorun momentini belirlemede etkili bir kavram ortaya çıkar. Rotorun devir sayısı ile döner alanın devir sayısı arasındaki fark “rotor kayması” olarak tanımlanmaktadır. Kayma olayı, bazı çalışmalarda; motorun rotor devrinin senkron devirden geri kalması olarak da ifade edilmektedir [7]. Kayma ifadesinin matematiksel ifadesi Denk. (2.1)'deki gibi ifade edilmektedir. Burada, n_r ve n_s sırasıyla rotorun ve statorun devir sayısını gösterirken s değeri kaymayı ifade etmektedir [22].

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.1)$$

Diğer motorlarda olduğu gibi İM'lerin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Asenkron motorun avantajları arasında;

- Sağlam motor yapısı,
- Ekonomik maliyetinin az olması,
- İşletme ve bakımının kolay olması
- Hızlarının neredeyse sabit olması,
- Motorun nominal yüklü ve yüksüz durumu arasında çok az değişimin olması,
- Direkt olarak AA kaynağa bağlanabilmeleri yer almaktadır [20].

Asenkron motorun dezavantajları ise;

- Hız kontrolünün kolay olmaması,
- Bazı başlangıç durumlarında akımın tam yükteki akım değerinin 5 katına çıkabilmesi,
- Yükün az olduğu durumlarda güç faktörünün düşük olması,
- Kalkış momentinin düşük olması olarak sıralanabilmektedir [20].

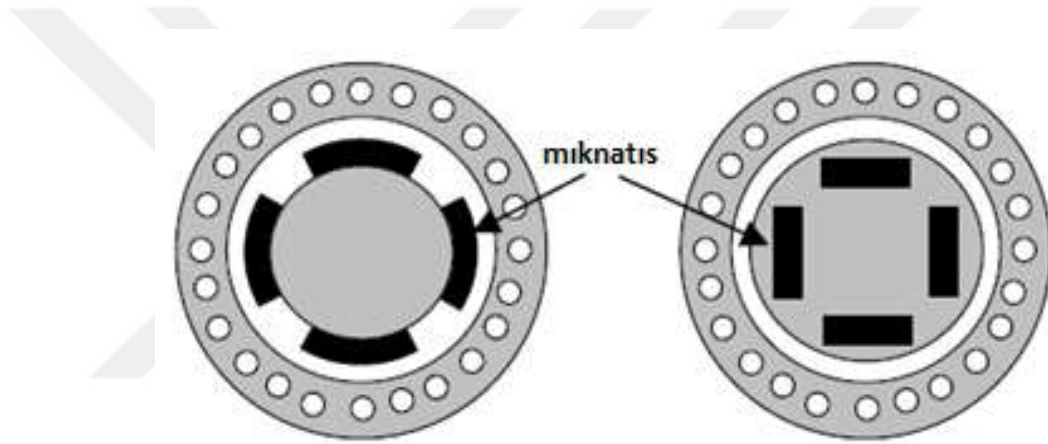
2.2.2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM)

Statorunda İM motoruna benzer üç fazlı sargılar bulunduran senkron motorlar, rotor kısmında yer alan DA uyarım sargılarıyla akı üretmektedir. SMSM'lerde akı üretmek için sargı yerine sürekli mıknatıslar kullanılmaktadır [7]. İM ve SMSM'nin birbirinden farkı; hava aralığı ve motorun rotor kısmındaki sabit mıknatıs yapısıdır. SMSM'lerde verimi etkilemeyecek şekilde tasarlanan hava aralığı İM'lere göre daha geniştir. Hava aralığının genişletilmesi motorda kullanılacak olan mıknatıs miktarını artırdığı için ekonomik yük oluşturmaktadır. Küçük boyutlu tasarlanan motorlarda söz konusu bu maliyet artışı göz ardı edilebilmektedir. Çünkü hacmin küçülmesinden dolayı mıknatıslardan kaynaklı verim ve maliyet karşılaştırılması yapıldığında, verimin daha önde olduğu görülmektedir. İM'lerden farklı olarak SMSM'lerde, rotorun mıknatıslanma akımı daimi mıknatısların etkisiyle elde edildiği için stator ve rotor kayıplarının miktarı azalmaktadır. Ek olarak, SMSM'lerde normal senkron motorlarda uyarım akımının etkisiyle oluşan kayıplar oluşmamaktadır. Kayıpların az olmasından dolayı SMSM'lerin verimi İM'lere göre daha iyi durumdadır. Stator akımının bileşeni olan mıknatıslanma akımının ortadan kalkması elektrik motorunun "power factor"

olarak isimlendirilen güç katsayısının değerini yükseltmektedir. SMSM'ler mıknatısların yerleştirilme durumuna göre Şekil 2.5'te görüldüğü üzere iki farklı grupta incelenebilmektedir. Bunlar;

- Rotor yüzeyinde sürekli mıknatıslı senkron motor,
- Rotora gömülü sürekli mıknatıslı senkron motordur.

Rotor yüzeyinde SMSM'lerde mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirilirken, rotora gömülü SMSM'lerde mıknatıslar rotor ekseninin iç kısmına gömülü halde bulunmaktadır.



Şekil 2.5. Rotor yüzeyinde SMSM ve rotora gömülü SMSM yapısı

SMSM'lerde sağlamlık ve yaygın kullanım alanına bakıldığında, rotora gömülü SMSM türleri ön plana çıkmaktadır. Rotora gömülü SMSM'lerin tasarımı zor olmasına rağmen yüksek hız gerektiren çalışma alanlarında daha sağlıklı bir şekilde hizmet edebilmektedir. Rotora gömülü SMSM'ler diğer mıknatıslara kıyasla daha yüksek oranda verimlilikte çalışabilmektedir. Yüksek hızlı çalışma koşullarında, rotor kısmında yer alan mıknatısların rotordan ayrılma olasılığı olduğundan; rotor yüzeyinde SMSM'lerin tasarım ve üretimi daha kolay olmasıyla birlikte düşük hız gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. SMSM'ler sabit hız gerektiren çalışma alanları için yüksek maliyet gerektirmektedir. Rotora gömülü SMSM'lere kalkış anında yol vermek için maliyet artırıcı etkiye sahip invertör gibi güç elektroniği üniteleri gerekmektedir.

Emsallerine göre aynı güçte tasarlanmak istenen bir elektrik makinesinde sürekli mıknatıs yapıları kullanıldığında daha küçük boyutlara sahip, daha verimli bir ürün elde edilmektedir. SMSM'lerde kullanılan sürekli mıknatıslar sürekli manyetik alan ve akı üretmektedir. Bundan dolayı, klasik tip senkron motorların aksine rotor akımının değiştirilmek istendiği anlarda kontrol edilmeleri zorlaşmaktadır [20]. Genel olarak SMSM'lerin avantajları;

- Temel geometrik yapıya sahip olması,
- Verimlerinin yüksek olması,
- Hacim avantajına sahip olması,
- Diğer motorlarla karşılaştırıldığında hacim başına daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olması,
- Hız kontrolünün İM'lere göre daha kolay sağlanması,
- Kullanım ömürlerinin uzun olması,
- Bakım gerektiren fırça sisteminin olmaması olarak sıralanabilmektedir [20].

SMSM'lerin avantajları yanında sahip oldukları dezavantajlı karakteristik özellikleri de bulunmaktadır. Bunlar;

- Rotor alanının stator manyetik alanıyla senkronizasyona ihtiyaç duyması,
- Senkronizasyon ihtiyacından dolayı rotor pozisyonun bilinmesi ihtiyacı,
- Düzgün çalışabilmesi için kontrol ve maliyet yükü artıran hassas pozisyon bilgisi ihtiyacı,
- Motorun ana bileşenlerinden olan rotor mıknatıslarının, ürün maliyetinin artırması,
- Maliyet ve kontrol gerektiren harici güç elektroniği ünitelerine gereksinim duymaları gibi sıralanabilmektedir.

Denk.(2.2)'deki senkron devir sayısı ifadesinde görüldüğü gibi, SMSM'lerde devir sayısı tıpkı İM'lere benzer şekilde kutup sayısı ve frekansa bağlıdır.

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (2.2)$$

Bu ifadede; SMSM'nin devir sayısı n , motorun çalıştığı frekansı f , motordaki kutup çifti sayısı da p ile ifade edilmektedir.

2.2.2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM)

Önceki zamanlarda kullanılmaya başlayan ARM'ler, aşağıdaki iki temel karakteristiğe sahiptir:

- a) Fazlarda yer alan sargılar motorun dönmesinin sağlayacak şekilde sürekli olarak anahtarlanmaktadır. Sürekli anahtarlama işlemine gerek duyulması; anahtarlama görevinin üstlenen elektrik motorlarının devre bileşenlerinin önemini vurgulamaktadır.
- b) Hem rotor da hem de stator da bulunan çıkıntılı kutup yapısından dolayı, motorun hareketi esnasında relüktansı sürekli olarak değişiklik göstermektedir [7].

Diğer motor türlerinden farklı olarak ARM'lerin stator ve rotor yapılarında çıkıntılar bulunmaktadır. Senkron bir motor çeşidi olan ARM'lerin rotor yapıları sadece sac levhalardan oluşmaktadır. Yani, ARM'lerin rotorlarında sargı veya mıknatıs bulunmamaktadır. Bundan dolayı ARM'ler, stator ve rotorları belirgin kutup yapısına sahip olan tek elektrik motor çeşididir. ARM'lerin statorlarındaki sık sargılar ince kesitli iletkenlerden oluşması ve basit yapıları nedeniyle DA motorların sarımlarına benzerlik göstermektedir. Rotordaki ve statordaki kutup sayıları baz alınarak yapılan sınıflandırmada, stator kutup sayısının rotor kutup sayısından büyük olduğu tasarımlar genellikle yüksek hız istenen çalışmalarda tercih edilmektedir. Stator ve rotor kutup sayılarının yaklaşık eşit olduğu tasarımlar genellikle, yüksek momentin arzu edildiği sistemlerde kullanılmaktadır [23].

Stator ve rotor kutup sayılarının yanında kutup genişlikleri de motorların karakteristik özelliklerinin oluşmasında etkili olmaktadır. Negatif moment üretiminin olumsuz etkilerinden kurtulmak için elektrik motorunun içyapısındaki bileşenlerden rotor kutuplarının yapısı stator kutuplarının yapısına göre daha geniş tasarlanmaktadır. Ayrıca, her fazın üretebildiği momentin pozitif ve negatif alanlarını ayırt edebilmek için rotor kutuplarının genişlik miktarı daha büyüktür. Değişiklik göstermekle birlikte genel olarak ARM'lerde, rotor kutupları stator kutuplarından geniş yapıdadır. Kutup yapılarının geniş olmaması, stator sargılarındaki herhangi bir uca etki eden faz uyarıldığında içerde oluşacak olan manyetik alandan daha fazla yararlanabilmektedir [23].

ARM'ler, asenkron ve senkron motorların yapılarından farklı olmakla birlikte, bu motorların tasarımından faydalanılarak oluşturulmaktadır. ARM'ler doğru bir konum bilgisi ve sürücü elektronik devre bileşenlerinin oluşturduğu detaylı motor kontrol altyapısına gereksinim duymasına rağmen basit yapıdadırlar [7].

İçyapılarının sade olmasından dolayı ARM'ler, uygun kullanım koşullarında düşük maliyette güvenilir sonuçlar sunabilmektedir. Literatürdeki yapılan araştırmalar incelendiğinde ARM'lerin; DA motorlarının, SMSM'lerinin ve sincap kafesli İM'lerin kullanıldığı bazı sürücülerin yerini alacağı ön görülmektedir. ARM'lerin sahip olduğu avantajlar;

- Rotor sargılarının olmamasının tasarım süresi ve üretim maliyetine olumlu etkisi,
- Rotor yapılarında maliyet artırıcı etkiye sahip mıknatısların olmamasının kısa sürede tasarım avantajı sunması,
- Rotorun sargı ve fırça bileşenlerinin bulunmamasından dolayı yüksek hız istenen işletim koşullarında çalıştırılabilme imkanı sunması,
- Basit yapılı stator sargılarına sahip olması,
- Statora uygulanan fazların elektriksel olarak birbirinden bağımsız çalışması,
- Bir fazda meydana gelen arızanın giderilebilmesi için geçen sürede, motorun sağlam olan iki faz ile çalışmasını sürdürebilmesi,
- İki faz üzerinde çalışabilmesine imkan verebilen yüksek hata toleransına sahip olması olarak sıralanabilmektedir [23].

ARM'lerin sahip olduğu avantajlı karakteristik özelliklerinin yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. ARM'lerin dezavantajlı özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [18]:

- Düşük hızlarda gerçekleştirilen çalışmalarda elektrik motorunun momentinde büyük genliğe sahip salınımların meydana gelmesi,
- Büyük genlikli salınımlardan dolayı akustik gürültü bileşenine sahip olarak üretilebilmesi,
- Rotorda, konum bilgisinin doğru olarak algılanmasını sağlayan maliyet artırıcı elektronik sürücü devrelerine ihtiyaç duymasındır.

3. BÖLÜM

AKI ANAHTARLAMALI MOTORLAR

3.1. Akı Anahtarlamalı Motorların Özellikleri ve Literatür Taraması

Akı anahtarlamalı motorlar (AAM), EA'larda kullanılan sürekli mıknatıslı elektrik motorlarına alternatif olarak görülen fırçasız yapıda üretilen yeni bir motor çeşididir. Karmaşık yapıda olmayan AAM'ler, hacimsel olarak büyük motorların kullanıldığı alanlarda maliyet avantajına sahiptir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ARM ve SMSM'nin kombinasyonu olarak görülebilen AAM'lerin özellikleri;

- Motor yapısının sağlam olması,
- Üretim aşamasında basit motor yapısına sahip olması,
- Motor yapısından dolayı üretim aşamasında kolaylık sağlaması,
- İç yapısında yer alan rotor kısmında sürekli mıknatısların bulunmaması,
- Rotor sargıların olmaması,
- Rotor yapısından dolayı üretim, işletme ve bakım maliyetlerinin az olması,
- Motor yapısında yer alan hava aralığında yüksek akı yoğunluğunun oluşabilmesi,
- Yüksek akı yoğunluğundan dolayı yüksek tork ve güç üretimine olanak sağlaması,
- Ağırlık başına denk gelen güç miktarının (güç/ağırlık oranı) fazla olması,
- Birlikte kullanıldığı motor sürücüsünün etkisiyle akustik gürültü seviyelerinin düşük olması,
- Daha az titreşim oluşturması olarak sıralanabilmektedir.

AAM'ler ile önceki kısımda detaylandırılan ARM'ler karşılaştırıldığında;

- AAM'nin güç yoğunluğunun yüksek olması,
- Kontrolünün kolay olması,
- Daha düşük maliyette güvenilir sürüş olanağına sahip olması,
- ARM'lere göre nispeten daha verimli olması,
- ARM'lere benzer şekilde motor yapısının dayanıklı ve kompleks olmaması gibi özelliklere sahiptir.

AAM'ler ilk olarak 1950'li yılların ortalarında ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu motor türlerindeki çıkıntılı haldeki kutuplar, rotorun hareketini izleyerek akı bağıntısının kaydırılması işlemi olarak isimlendirilen “akı anahtarlama” olayını oluşturmaktadır.

Hoang, 1997 yılında yaptığı çalışmalarda; stator kutuplarına sürekli mıknatıslar yerleştirilerek yeni bir motor türü olan sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motor (SMAAM) yapısını oluşturmuştur [24].

AAM'nin diğer elektrik motorları ile karşılaştırılmasıyla birlikte bu motor türünün geliştirilmesi konusunda da yapılan birçok tasarımsal ve deneysel uygulamalarla karşılaşılmaktadır.

Pollock vd. 2003 yılında yaptıkları çalışmada; aynı büyüklükteki AAM ile üniversal motorun performansını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmaları sonucunda; maksimum güç çıkışına daha düşük hızlarda AAM'lerin ulaştığını öte yandan, üniversal motorda pik verimi daha yüksek olurken AAM'lerin maksimum güç çıkışlarında daha yüksek verim sağladıklarını görmüşlerdir [34]. Aynı yıl diğer bir çalışmada[37]; AAM ve ARM'nin karşılaştırması sonucunda, AAM'deki alan sargılarının sürekli uyarılmasıyla motordaki manyetik enerjinin korunduğunu dolayısıyla, AAM'de meydana gelen gürültünün azaldığını görmüşlerdir.

Pollock vd. 2003 yılında yaptığı diğer bir çalışmada; aksenel fan kullanarak AAM ile İM'yi karşılaştırmışlardır. Benzer shaft, yatak, stator gövdesi ve uç kapaklarına sahip AAM ile İM'nin karşılaştırılması sonucunda ise; AAM'lerin % 8.5 oranda daha verimli olduğu ve İM'ye karşı verimin yüksek olmasında değişken hızlardaki kontrol

edilebilirlik etkisinin faydası olmuştur. Yapılan karşılaştırmada sarım konfigürasyonu, farklı sincap kafes ve relüktans tip rotorlar da dikkate alınmıştır [34].

2005 yılında Zhu vd. [38], AAM'lerin elektromanyetik performansını tahmin etmek için akı sızıntısı ve manyetik doygunluğu dikkate almışlardır. Çalışmayı yapabilmek için doğrusal olmayan uyarlanabilir manyetik devre modeli tasarlamışlardır. İki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analiz yöntemi yardımıyla zıt EMK dalga formu, öngörülen hava boşluğu alan dağılımı, elektromanyetik tork ve sargı indüktansları üzerinde çalışmışlardır [33].

Amara vd.'nin 2005 yılında yaptıkları çalışmada; bir uçak yağı havalandırma uygulaması için farklı AAM'lerin elektromanyetik tasarımları karşılaştırmışlardır. Söz konusu çalışmada ferrit mıknatıslı ve nadir toprak mıknatıslı (SmCo) iki farklı konfigürasyona ait uygulama sunmuşlardır. Daha düşük çalışma sıcaklıklarından dolayı neodyum demir boron (NdFeB) mıknatısları dikkate alınmamıştır [39].

Bangura, 2006 yılında yaptığı çalışmada; AAM'leri diğer motor türleri ile karşılaştırmıştır. Yaptıkları kıyaslama sonucunda; AAM'lerin İM ve üniversal motorlara göre daha az maliyetli, daha düşük akustik gürültüye sahip, daha hızlı reaksiyon gösterebilen sürüş özelliklerini sergilediklerini görmüşlerdir. Ayrıca, başlangıç aşamasındaki boyutsal tasarımlarda kolaylıkla hesaplama yapılabilmesi için alternatif ve pratik bir yol göstermişlerdir. Sonlu eleman analiz yöntemi ile belirli aralıklardaki parametrelerin tahmin edilebileceği gösterilmiştir [3].

2009 yılında Hua vd.'nin yaptığı araştırmada; hava aralığı alanının kolaylıkla kontrol edilebildiği ve hibrit araçlarda kullanılma potansiyeli olan yeni tür hibrit uyarımlı bir akı anahtarlamalı motoru (HUAAM) önermişlerdir. Çalışma prensibi, cogging torku, motor topolojisi, motor tasarımı, farklı uyarımlara maruz bırakılan zıt EMK dalga formları, faz akı bağıntısı dahil statik özellikleri sonlu elemanlar analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. HUAAM'nin alan düzenleme kabiliyetini ve diğer üstünlüklerini yorumlamışlardır [40].

Tang vd. 2012 yılında yaptıkları önermede; sürekli mıknatıslı akı anahtarlamalı motorların (SMAAM) sürekli mıknatıslarını DA alan sargıları ile değiştirmişlerdir. Zayıflayan elektromanyetik alanın etkisini saf dışı bırakabilmek için DA uyarma ile alan sargılı akı anahtarlamalı motoru (ASAAM) topolojisini sunmuşlardır [34].

Sulaiman vd.'nin 2013 yılında yaptıkları çalışmada [41], ASAAM'nin alan uyartım sargısına DA uygulayarak tasarım çalışmasını yapmış ve akı bağıntısını analiz etmiştir. Çalışmada, ASAAM'nin tasarımına ait çizimler, kullanılan malzemeler ve parçalar, koşullar ve özelliklerin dahil olduğu tasarım prosedürü açıklanmıştır. Tasarım prosedürüyle birlikte elektrik makinesinin çalışma prensini açıklayarak, her bir armatür bobininin faz pozisyonunu doğrulamak için bobin düzenleme testleri incelenmiştir. Son olarak, DA alan uyartım sargısı ve armatür sargıları arasındaki akı etkileşimi, alan uyartım sargısının akı yetenekleri, indüklenen gerilim ve başlangıç torkları mevcut farklı koşullarda analiz edilmiştir [33].

Hua vd. [42] 2014 yılında beş fazlı iki adet HUAAM'nin farklı stator şekilleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalışmanın başlangıcında zıt elektromotor kuvveti, elektromanyetik tork, faz akısı, cogging tork ve indüktans gibi özellikleri içeren elektromanyetik performanslar verilmiştir. İki boyutlu sonlu eleman analiz yöntemi yardımıyla, farklı alan akımları altındaki elektromanyetik tork özelliklerine göre akıdaki güçlendirici ve zayıflatıcı yetenekler incelenmiştir. Elde ettikleri veriler sonucunda U-çekirdek topolojisinin beş fazlı HUAAM için iyi bir tercih olduğunu göstermişlerdir.

Tang vd.'nin 2015 yılında ASAAM'ler üzerinde devam ettirdikleri çalışmada; motorun ön tasarımı için manyetik eşdeğer devre bazlı otomatik tasarım aracı kullanmışlardır. Kullanılan tasarım aracılığının doğruluğu sonlu elemanlar analiz (SEA) yöntemiyle desteklenmiştir [34].

2015 yılında Zhang vd. tarafından yapılan çalışmalarda [43], alan sargılarının birinden geçen akımın yönünü tersine çevirerek temel HUAAM'ye dayalı akı düzenleme yeteneğini geliştirmek için bir topoloji önermişlerdir. İncelenen topoloji temel motor yapısı ile benzerlik göstermektedir. Farklılığın kaynağı; bazı alan sargılarında farklı akım yönleri ve dolayısıyla farklı alan sargılarının uyumu olarak görülmektedir. SEA

yöntemiyle yapılan karşılaştırmada, HUAAM'daki yüklü ve yüksüz armatür tork kapasitesinin temel motor yapısından daha iyi olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. Sırasıyla E-çekirdek ve C-çekirdek stator laminasyonlarına sahip iki adet altı fazlı HUAAM'nin tasarımını önermişlerdir. Stator kutuplarının arasına atılmış demir köprülerin performansa olan etkilerini incelemişlerdir. C-çekirdeğinde, alternatif dış sargılı armatür sarımlarını armatür fazları arasındaki fiziksel ve manyetik izolasyonları elde etmek için kullanmışlardır. E-çekirdeğe ve C-çekirdeğe sahip motor tasarımlarının kapsamlı olarak karşılaştırmalarını yapmışlardır. Sonlu eleman analizi kullanılarak yapılan çalışmada iki adet HUAAM prototipi üzerinde deneysel ölçümler de yapmışlardır [44].

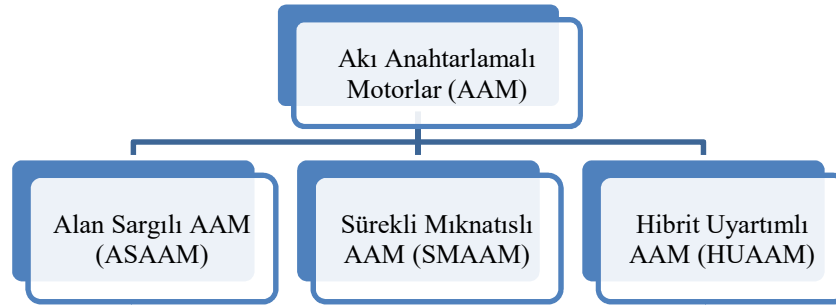
Pollock vd., 2017 yılında patente konu olan bir çalıma yapmışlardır. Motorun statorundaki kutup yuvalarında asimetrik şekilde tasarımın yanında rotor tasarımında da oluklu bir yapı kullanmışlardır. Rotor oluşu, normal tork üreten akı yolları üzerinde minimum etkiye sahip olan bir rotor dışında düşük geçirgenlikli bir yol oluşturmak için kullanılmıştır. Üç fazlı AAM'de daha yüksek tork ve daha düşük tork dalgalanması sağlanmıştır. Patente konu olan buluş, her iki yönde çalışabilen düşük maliyetli tek fazlı motorlar ve geliştirilmiş performansa sahip üç fazlı AAM'leri konu edinmiştir [45].

Görüldüğü üzere; literatürde AAM'ler hakkında birçok farklı çalışmaya rastlanabilmektedir. Günümüzde farklı motor tasarımları üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu tez çalışmasında ise AAM'yi anlayabilmek için literatürde bulunan çeşitli motorların farklı özellikleri ve etkinlikleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Karşılaştırma yapılırken ilgili elektrik motorlarının tasarım konuları, performans özellikleri, optimizasyon yöntemleri ve uygulamaları gibi özellikler dikkate alınmıştır.

3.2. Akı Anahtarlamalı Motorların Çeşitleri

2000'li yılların başlarından itibaren AAM'ler uygulama alanlarına göre değerlendirilerek fırçasız makineler olarak ilgi çekmiştir. AAM'lerde mıknatıslar tarafından üretilenler de dahil olmak üzere tüm uyarma sistemleri statorun üzerinde yer almaktadır. Bu yerleşim planı mıknatısların montajında, motorun soğutulmasında daha fazla avantaj sağlamaktadır [46]. Literatürde yapılan çalışmalardan tasarımsal ve deneysel çalışmalar incelendiğinde AAM'ler Şekil 3.1'deki gibi üç farklı gruba

ayrılabilir. Hibrit uyarımlı AAM’lerde hem alan sargısı hem de sürekli mıknatıs yapıları yer almaktadır [33].



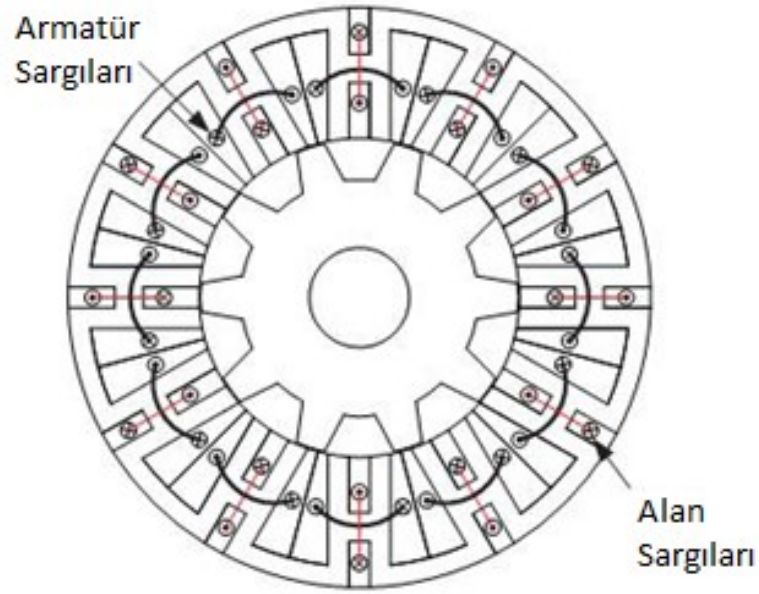
Şekil 3.1. Akı anahtarlamalı motor çeşitleri [33]

3.2.1. Alan Sargılı AAM (ASAAM)

Stator hem DA alan sargısını hem de armatür sargılarını içermektedir. Armatür sargıları genellikle üç fazlı sinüzoidal gerilim veya üç faz akım tarafından beslenmektedir. Armatür sargılarının beslenme şekline bağlı olarak, ASAAM’lerin titreşimleri ve akustik gürültüleri ARM'lere kıyasla az oluşmaktadır [47]. Sürekli mıknatıslı (SM) AAM’lerle karşılaştırıldığında; SMAAM’ler ve HUAAM’ler daha yüksek tork yoğunluğuna ve verimliliğe sahiptir. Buna rağmen, bu iki tür AAM’lerin aşağıda sıralanmakta olan sürekli mıknatıs kaynaklı bazı dezavantajları bulunmaktadır:

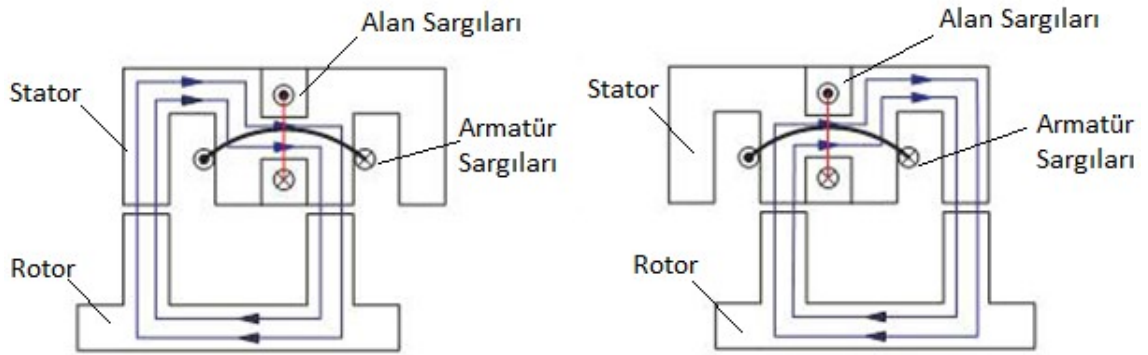
- Sürekli mıknatıslar, motor maliyetini artırmaktadır.
- SM’ler için geri dönüşümsüz manyetik giderme, yüksek sıcaklıkta hala mümkündür.
- SM’ler tarafından stator birçok bölüme ayrılmaktadır.
- Statorlar için mekanik dayanım nispeten zayıftır.

Araştırmacılar tarafından; hem alan hem de armatür sargılarının stator üzerine yerleştirildiği SM içermeyen ASAAM makineleri önerilmektedir. ASAAM’nin maliyetleri büyük ölçüde azaltılmakta ve SM’lerle ilgili yukarıda bahsedilen durumların olumsuz etkileri giderilebilmektedir.



Şekil 3.2. Alan sargılı akı anahtarlamalı motorun (ASAAM) yapısı [33].

Yapısı Şekil 3.2'de gösterilmekte olan ASAAM'ler hem armatür sarımlarının hem de alan sarımlarından dolayı geleneksel tip SMAAM'ye benzerlik göstermektedir [33]. ASAAM armatür sargıları, SMAAM'lerinkine benzer bir şekilde sarılmaktadır. DA uygulanan alan sargıları; sabit mıknatıslar gibi çalışarak radyal yönde yerleştirilmektedir. Alan sargıları nedeniyle oluşan DA uyarma alanlarının SMAAM'deki sabit mıknatıslar gibi zıt yönlerdedir. ASAAM'lerin çalışma prensibi tipik SMAAM'lere benzerlik göstermektedir. Şekil 3.3'te görülmekte olan rotorundaki çıkıntılı kutuplar sürekli hareket ettiğinden, armatür sargılarındaki alan akısı periyodik olarak değişiklik göstermektedir [33]. Alan sargısının oluşturduğu akı ve armatür sargılarının akısı arasındaki birleştirme reaksiyonunun bir sonucu olarak, bir elektromanyetik tork üretilerek rotorun dönmesi sağlanmaktadır. ASAAM makinelerinde hava boşluğu alanı kontrol edilebilir DA akımları tarafından üretildiği için, SMAAM'lerden farklı olarak kolayca zayıflatılabilir veya güçlendirilebilmektedir. Bu nedenle, ASAAM makineleri yüksek tork yoğunluğu ve geniş hız düzenleme aralığının gereklilikleri ile maliyetler arasında iyi bir uzlaştırıcı seçenek olarak düşünülebilmektedir.



Şekil 3.3. ASAAM'nin çalışma prensibi [33].

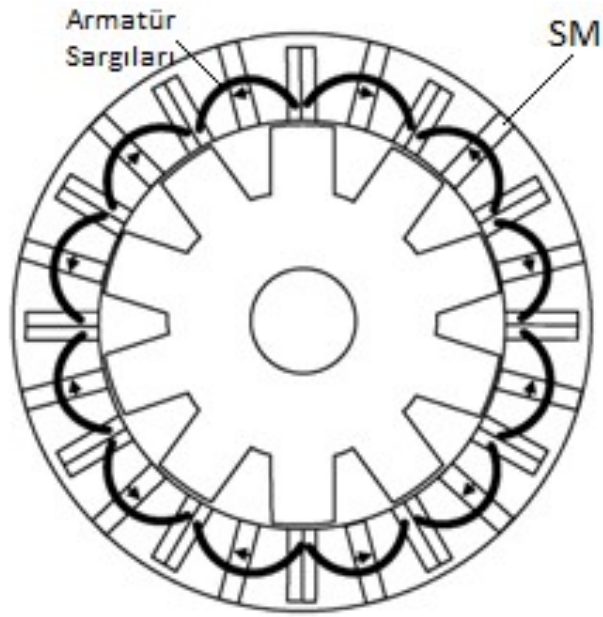
3.2.2. Sürekli Mıknatıslı AAM (SMAAM)

Alan sargılı AAM'nin statorundaki alan sargılarının yerine sürekli mıknatıslar yerleştirilerek oluşturulmuş bir AAM çeşididir. Şekil 3.4'te verilmekte olan SMAAM'nin yapısı ARM'nin yapısına benzerlik gösterse de, SMAAM'nin akustik gürültüsü farklı bir akı kontrol yöntemi yardımıyla ARM'den daha düşük seviyelerde tutulabilmektedir [24]. Sinüzoidal zıt EMK ve daha yüksek tork yoğunluğuna sahip olan SMAAM, fırçasız AA motor sürücülerini rekabet edebilmektedir. SMAAM'lere olan ilginin artmasında; yüksek güç yoğunluğu, mekanik sağlamlık ve tork kapasitesi gibi avantajları yer almaktadır [48].

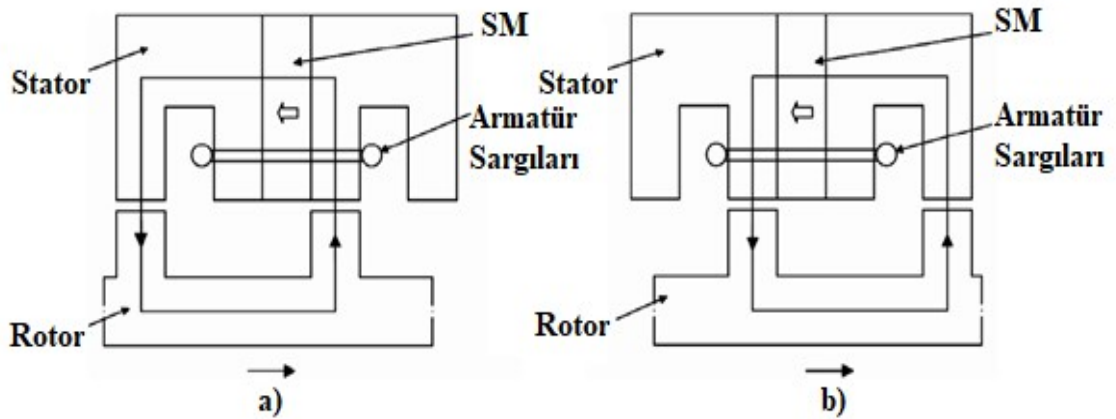
ASAAM ile benzer prensipteki SMAAM'lerin çalışma prensibi Şekil 3.5'te görüldüğü gibi açıklanabilmektedir [49]. Şekil 3.5(a)'daki rotor kutbu, üzerinde armatür sargısı ve sürekli mıknatıs bulunan stator kutbuyla hizalanmaktadır. Sürekli mıknatıs akısı rotor kutbundan ve stator kutbuna doğru gitmektedir. Rotor kutbu, Şekil 3.5(b)'deki aynı sargıya ait diğer stator kutbuyla hizalanmak için ileri doğru hareket ettiğinde, sürekli mıknatıs akısı stator kutbundan rotor kutbuna gitmektedir. Böylece "akı anahtarlama" işlemi gerçekleşmektedir.

Sargılara SM akı bağlantısına uygun olarak alternatif akımlar uygulandığında, motor tork üretmektedir. SMAAM'deki armatür reaksiyon akısı mıknatıslardan geçmediği için, mıknatısların geri dönüşümsüz de-manyetizasyon dayanım kapasitesi yüksektir. Kapasitenin yüksek olması, SMAAM'yi akı zayıflatma işlemi için uygun hale

getirmektedir. Tasarısal olarak motor yapısında değişiklikler yapılabilme imkanı olduğundan; akı odaklama veya ferritler gibi düşük maliyetli mıknatıslar kullanılabilir [50].



Şekil 3.4. SMAAM'nin yapısı



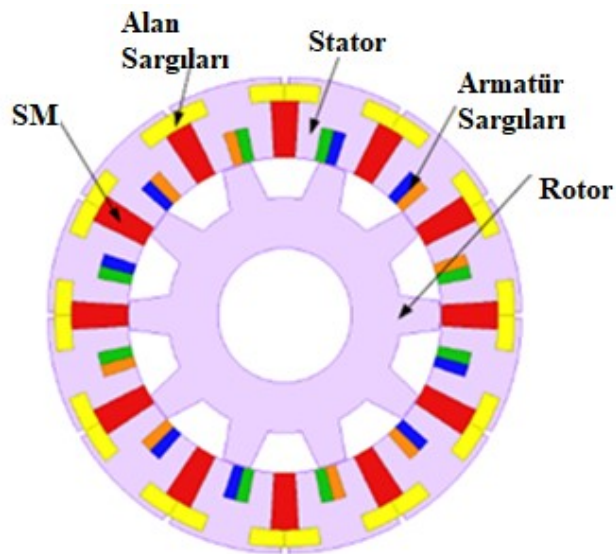
Şekil 3.5. SMAAM'nin çalışma prensibi [49]

3.2.3. Hibrit Uyarımlı Akı Anahtarlama Motoru (HUAAM)

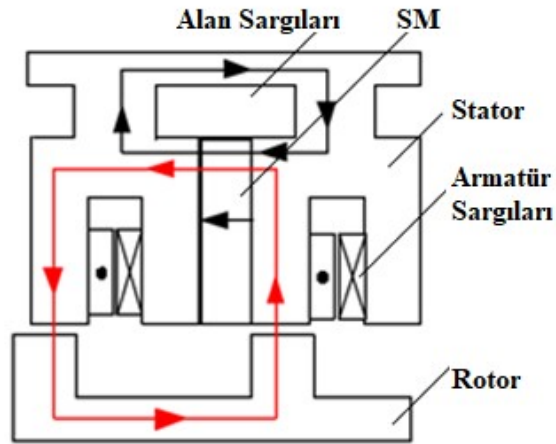
Sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motor (SMAAM), doğal olarak sinüzoidal SM akı bağıntısı, zıt EMK dalga biçimleri ve yüksek tork kapasitesi sergileyen geleneksel rotorda SM topolojisi yerine statorda mıknatıslara ve armatür sargılara sahip nispeten yeni bir tür fırçasız motor türüdür. Ancak, hava boşluğu alanı sadece statordaki mıknatıslar tarafından üretildiğinden, akı bağıntısının düzenlenmesi zordur [40]. Bu nedenle, bir hibrit uyarı yöntemi, yani Şekil 3.6'da olduğu gibi SMAAM'ye bir dizi alan sargısının eklenmesiyle kullanılabilir [51].

HUAAM'nin yapısı geleneksel AAM'den biraz farklı olmasına rağmen, temel çalışma prensipleri olan "Akı Anahtarlama Prensibi" benzerlik göstermektedir. Bu akıya dayalı akı anahtarlama prensibi, relüktans motorun prensibine benzer olan minimum relüktans yolundan geçmektedir.

Sürekli Mıknatıs (SM) tek başına çalıştığında akı yolu Şekil 3.7'de gösterildiği gibi olmaktadır [51]. Statorun geçirgenliği havadan çok daha büyük olduğu için, akı çizgilerinin çoğu akı yolundan akar ve bu da sürekli mıknatısın daha az kullanılmasına neden olmaktadır. Hava boşluğundan sadece birkaç akı yolu geçmektedir. Hava boşluğu akı yoğunluğunu artırmak için; daha ince bir akı yolu kurmak uygun olabilmektedir.

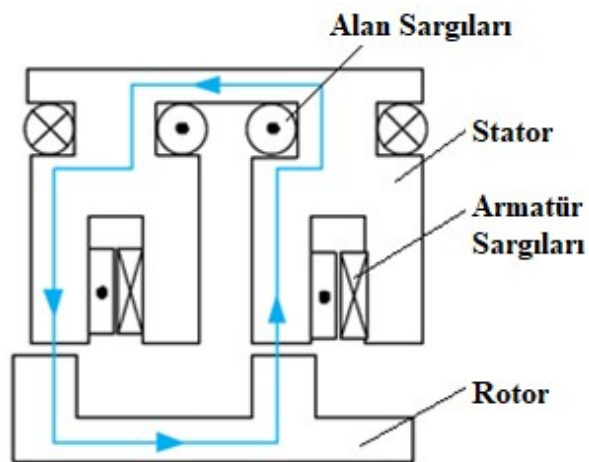


Şekil 3.6. HUAAM'nin yapısı [51]



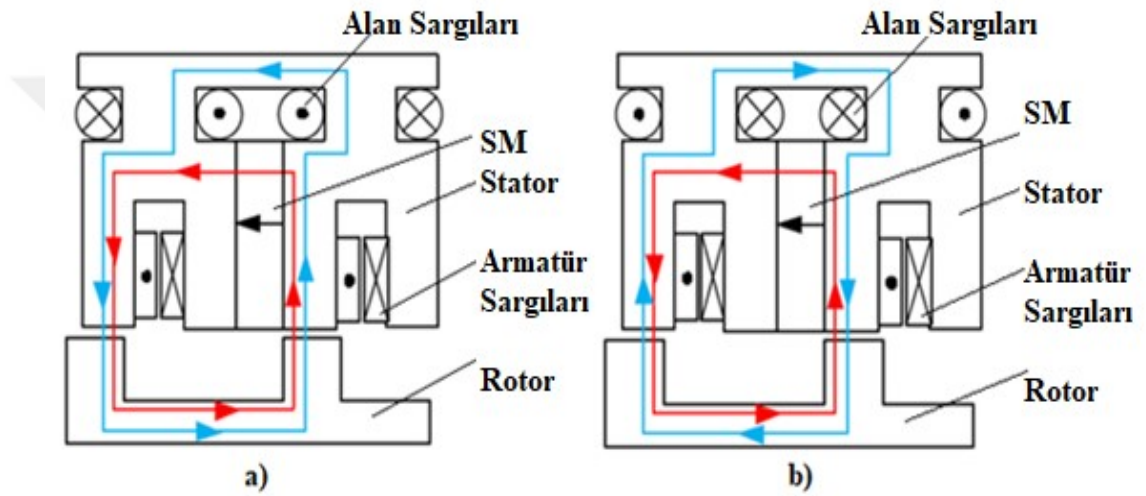
Şekil 3.7. HUAAM'nin çalışma prensibi (sadece SM'lar çalışıyor) [51]

Alan sargıları (AS) tek başına çalıştığında, akı yolu Şekil 3.8'deki gibi oluşmaktadır [51]. SM'nin geçirgenliği statorun çok daha küçük olduğundan akı hatlarının çoğu hava boşluğundan akmaktadır. Akı yolu, uyarma akımının yönünü ve genliğini kontrol ederek değiştirebilmektedir. Hava boşluğu akı yoğunluğunu artırmak için; daha kalın bir akı yolu tasarlamak uygun görülebilmektedir.



Şekil 3.8. HUAAM'nin çalışma prensibi (sadece AS'ler çalışıyor) [51]

Sürekli mıknatıslar (SM) ve alan sargıları (AS) birlikte aynı yönde çalıştığında, akı yolu Şekil 3.9(a)'da gösterildiği gibi meydana gelmektedir. Hava boşluğu akı yoğunluğu artırılması daha büyük bir başlangıç torku üretimini sağlayabilmektedir. Diğer tarafta, SM ve AS ters yönde çalıştığında, Şekil 3.9(b)'de gösterilen hava boşluğu akı yoğunluğu zayıflamaktadır. Bu durumda, akı kullanılarak geniş bir hız aralığı elde edilebilmektedir [51].



Şekil 3.9. HUAAM'nin çalışma prensibi (hem SM'lar hemde AS'ler çalışıyor) [51]

4. BÖLÜM

AKI ANAHTARLAMALI MOTOR TASARIMI

Bu tez çalışmasında; Zulu vd.'nin [46], 2012 yılında yapmış oldukları çalışma referans alınarak motor tasarımı yapılmıştır. Zulu'nun yapmış olduğu çalışmanın esas odak noktası; motor içerisindeki sürekli mıknatısın yeri ve şekli üzerine olmuştur. Zulu'nun çalışmasında; mıknatısların yerleri stator kutup başlarında konumlandırılmış ve stator kutup sayısı 12, rotor kutup sayısı 8 olarak belirlenmiştir. Zulu'nun çalışmalarına konu olan motorun sahip olduğu ana özellikler ve karakteristikler Tablo 4.1'de verilmiştir [46]. Ayrıca, Ek 1'de stator yapısına ait teknik resim ve Ek 2'de rotor yapısına ait teknik resim yer almaktadır.

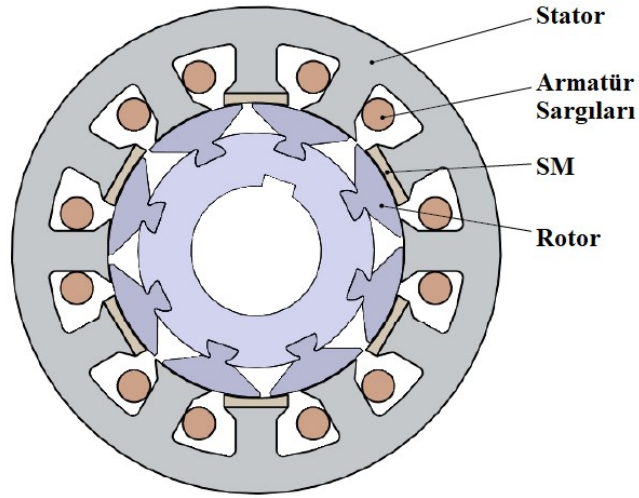
Öncelikle, yapılan revizyonlar ile orijinal çalışmanın mukayesesinin kolaylıkla yapılabilmesi için Tablo 4.1'deki teknik özellikleri verilen ve Zulu tarafından yapılan çalışmanın aynısı Şekil 4.1(a)'daki gibi bilgisayar destekli tasarım programı ile çizimi yapılmaya çalışılmıştır. Bu tasarımın 2-Boyutlu SEA yöntemiyle magnetostatik analizi yapılarak Şekil 4.2'deki gibi statik tork grafiği elde edilmiştir. 2-Boyutlu SEA yöntemiyle transient analizi sonucunda Şekil 4.3'te verilmekte olan grafikteki gibi armatür sargılarına uygulanan akım sonucunda Şekil 4.4'teki gibi akı bağıntısı ve Şekil 4.5'teki gibi gerilim indüklenmesi grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.6'da yer alan tork grafiğinde ortalama tork değeri 44.5 Nm ve tork dalgalanma değeri ise % 27.8 olarak görülmektedir. Söz konusu tork dalgalanma değeri Denk. (3.1)'deki matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır.

$$\% \text{ Dalgalanma} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{ort}} \quad (3.1)$$

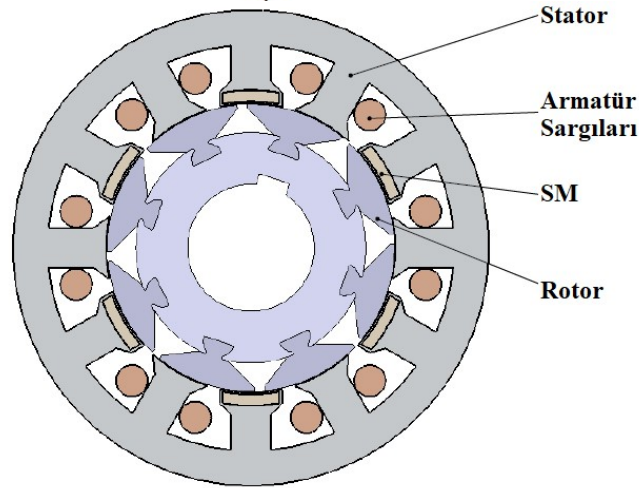
Burada τ_{max} , τ_{min} ve τ_{ort} sırasıyla maksimum, minimum ve ortalama tork değerlerini ifade etmektedir.

Tablo 4.1. Zulu'nun çalışmalarında yer alan motor tasarımının karakteristikleri [46]

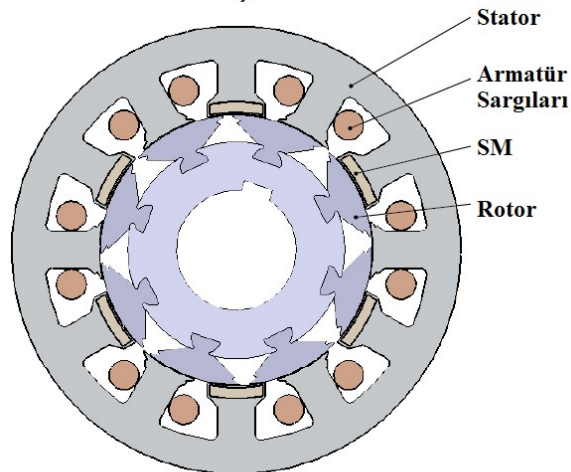
Eksen uzunluğu (l_a)	150 mm
Stator dış çapı (D_{sd})	150 mm
Stator iç çapı (D_{si})	91.2 mm
Statorun et kalınlığı	11 mm
Stator kutup genişliği	12.5 mm
Stator kutup açısı	25°
Stator kutup açıklığının açısı	5°
Stator kutup sayısı (N_s)	12
Hava aralığı uzunluğu	0.35 mm
Armatür sargılarının sarım sayısı	100 tur
İletken tel çapı	1.25 mm
İletkenlerin toplam alanı	491 mm ²
Rotor dış çapı (D_{rd})	90.5 mm
Rotorun iç çapı (D_{ri})	60 mm
Rotor kutup sayısı (N_r)	8
Rotor kutup açısı	41°
Rotor kutup açıklığının açısı	4°
Mıknatısın yüzey alanı	62.92 mm ²



a)

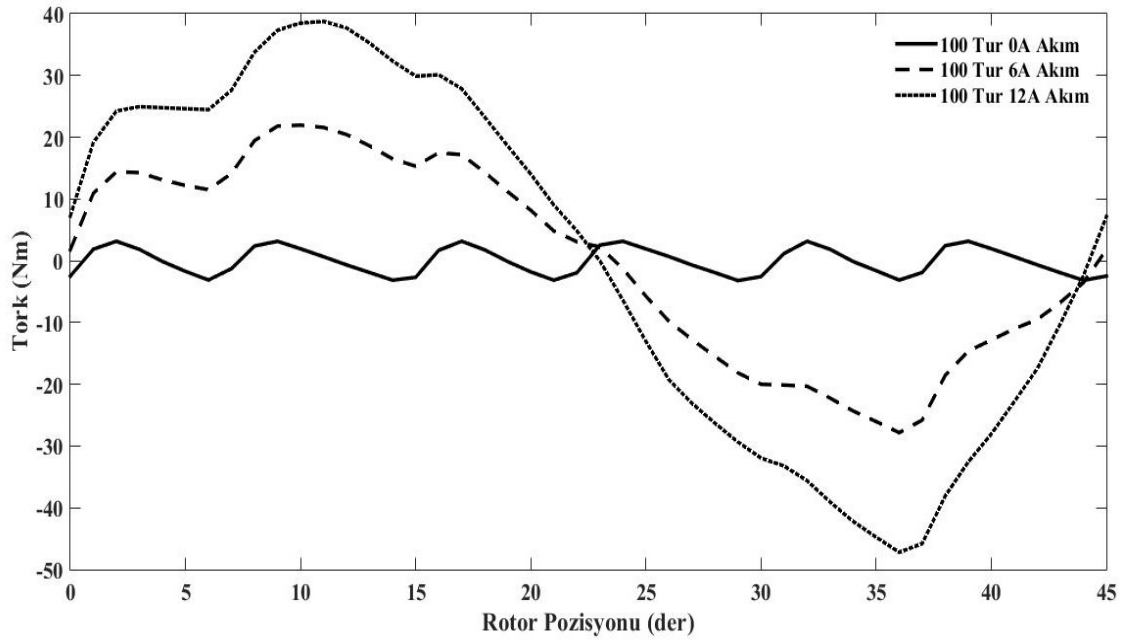


b)

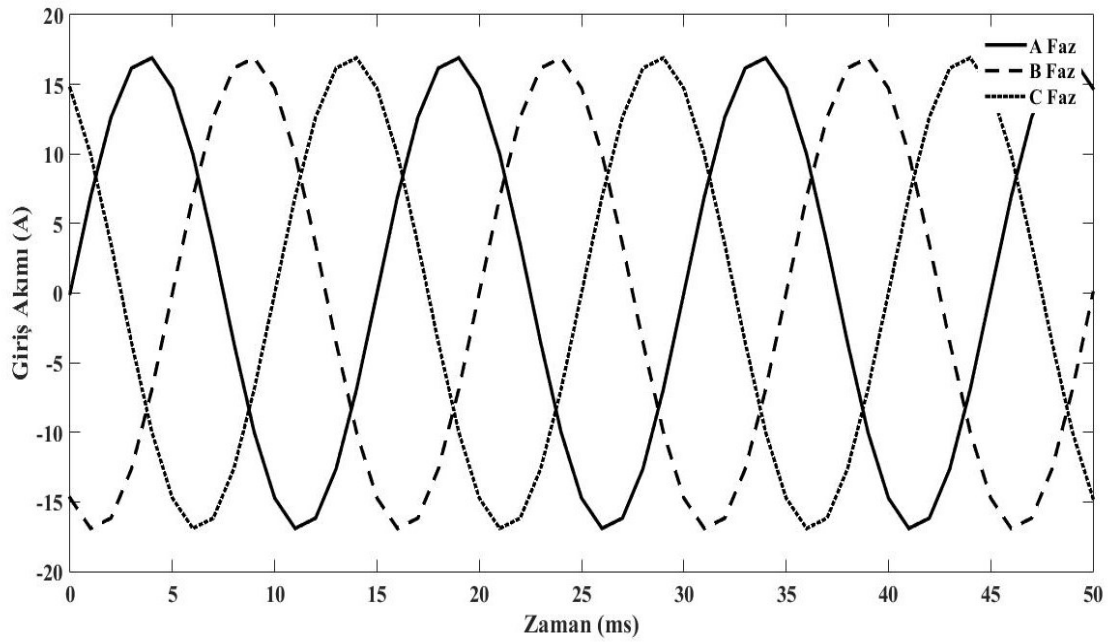


c)

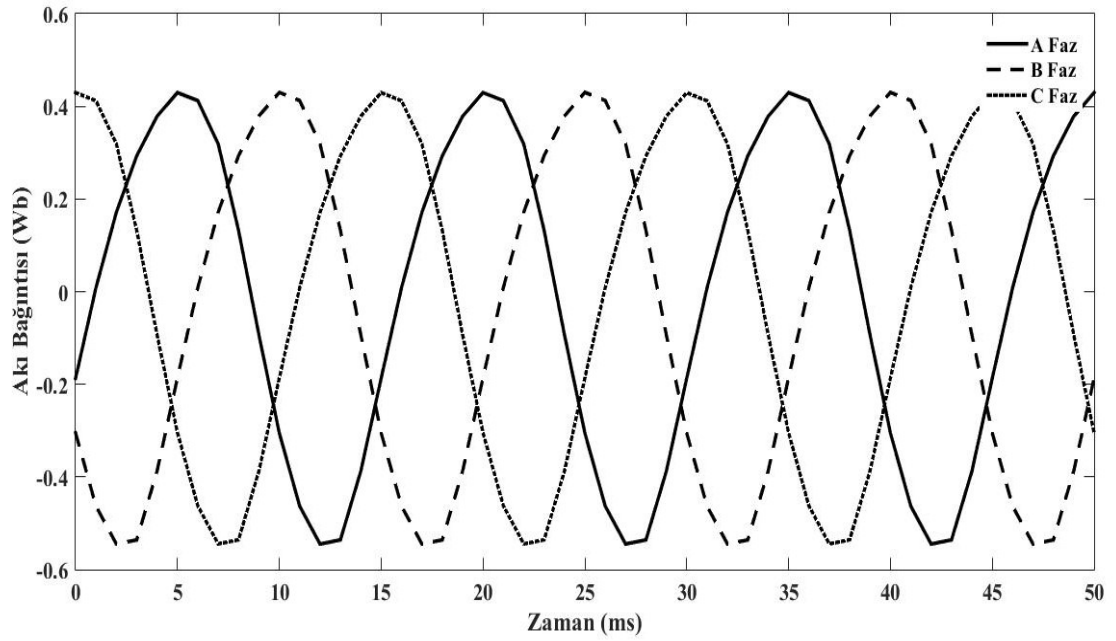
Şekil 4.1. Akı anahtarlama motorlarının tasarımı a) Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarım b) Tezde önerilen sürekli mıknatısların gömülü olduğu tasarım c) Tezde önerilen hem sürekli mıknatısların gömülü olduğu hem de çentik uygulamasının yer aldığı tasarım



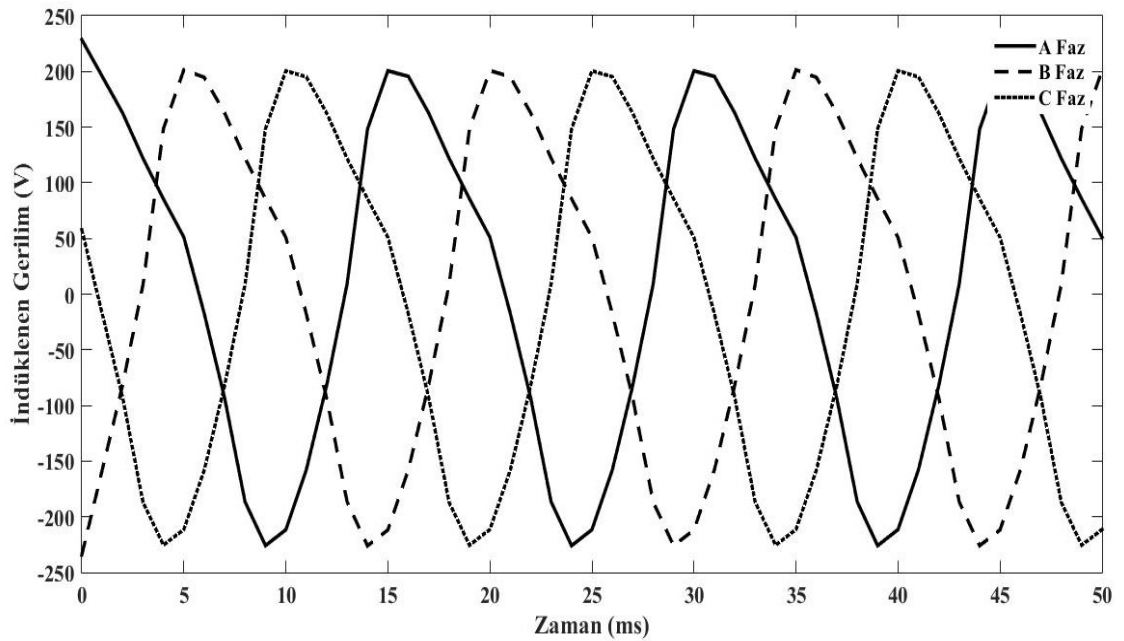
Şekil 4.2. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın 100 Tur ve 0A, 6A ve 12A akım değeri için statik tork grafiği



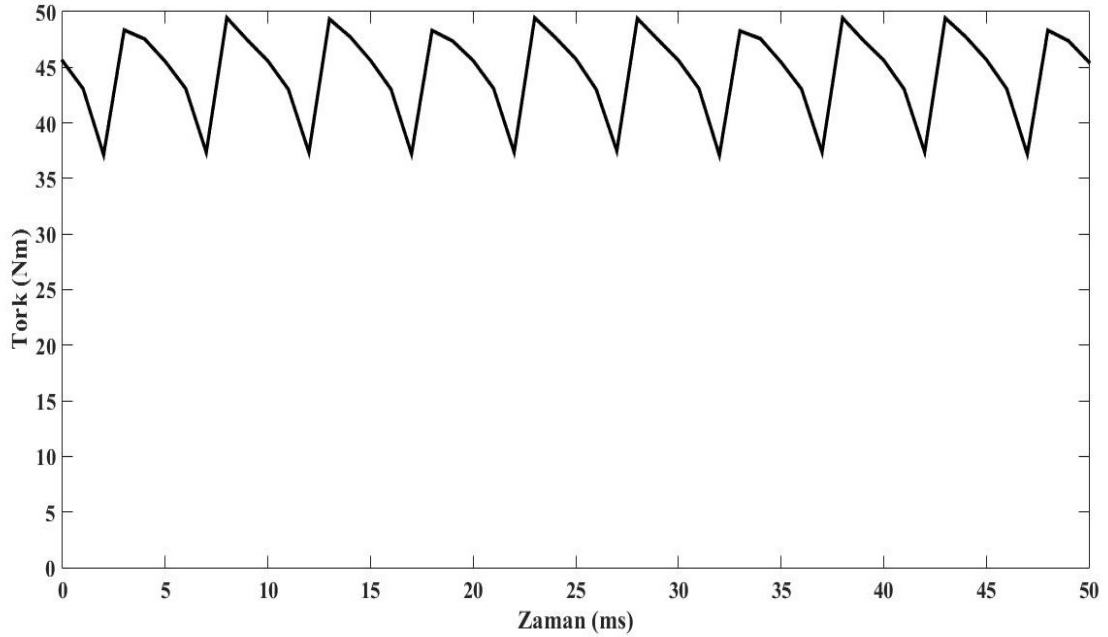
Şekil 4.3. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın sargılarına uygulanan akım grafiği



Şekil 4.4. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın akı bağlantı grafiği



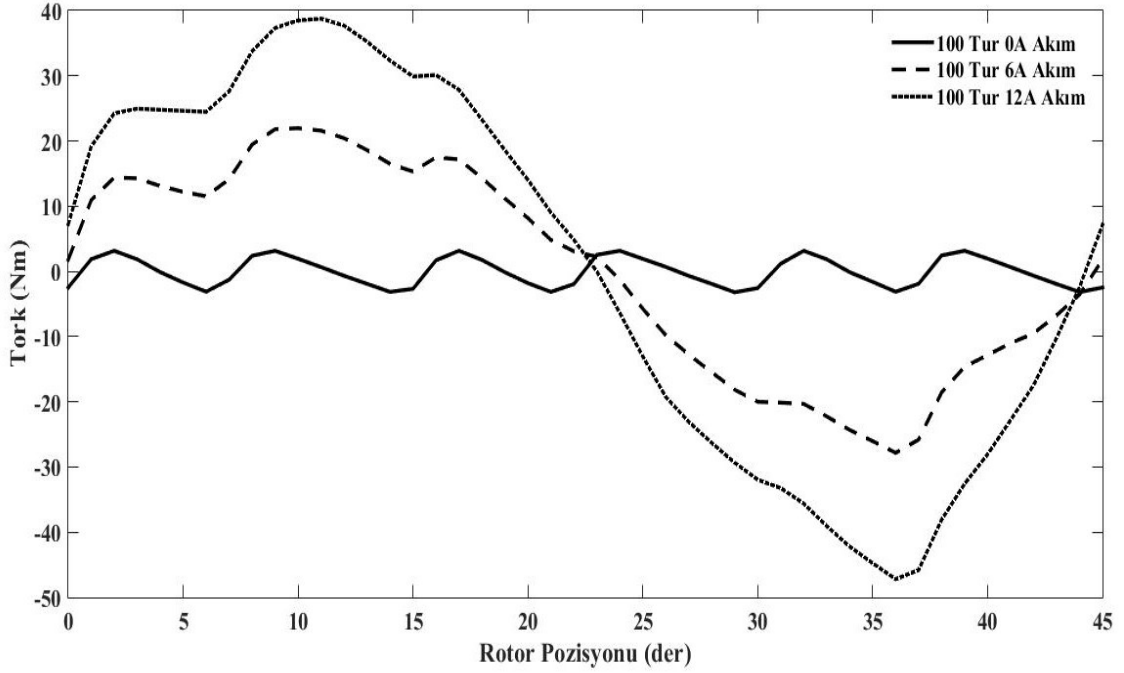
Şekil 4.5. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımda indüklenen gerilim



Şekil 4.6. Zulu vd.'nin yapmış olduğu tasarımın tork grafiği

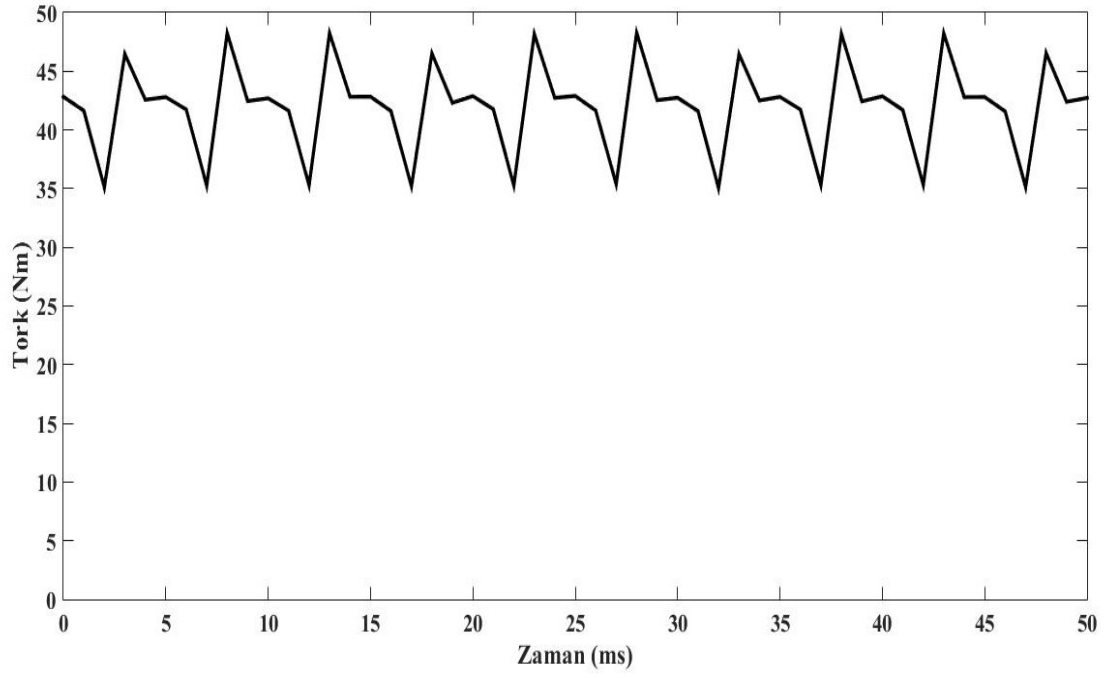
Bu tez çalışması içerisindeki diğer bir çalışma ise; üç fazlı sürekli mıknatıslı akı anahtarlamalı motor tasarımının yapılmasıdır. Yapılan bu tasarımda da Zulu'nun tasarımındaki ölçüler kullanılmıştır. Kutup sayısı (N_s) 12, rotor kutup sayısı (N_r) 8 olarak seçilmiştir. Bu çalışmada; Zulu'nun tasarımındaki sürekli mıknatıslar stator içerisine gömülü olacak şekilde değiştirilerek yeni çalışma yapılmıştır ve yakın tork değerleri elde etmek hedeflenerek daha kolay montaj planlanmıştır. Şekil 4.1(b)'deki gibi sürekli mıknatısları statorun içine gömülü yaparken Zulu'nun çalışmasındaki gibi 62.92 mm^2 yüzey alanına sahip mıknatıs yerleştirmeye dikkat edilmiştir. Şekil 4.1(b)'de verilmekte olan tasarıma ait 2-Boyutlu SEA yöntemiyle yapılan magnetostatik analizinden elde edilen statik tork grafiği Şekil 4.7'deki gibi elde edilmiştir. 2-Boyutlu SEA yöntemiyle yapılan transient analizinden elde edilen tork grafiği ise Şekil 4.8'de verilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere ortalama tork değeri 42 Nm ve tork dalgalanma değeri ise % 31.5 olarak görülmüştür. Zulu'nun tasarımına kıyasla Şekil 4.1(b)'deki statora gömülü sürekli mıknatıs uygulamasında dalgalanma değerinde yaklaşık %13 oranında bir kötüleşme ve tork değerinde yaklaşık % 5.6 düşüş görülmüştür.

Tasarım üzerinde yapılan revizyondan dolayı tork grafiğinde tolere edilebilir farklılıklar oluşmuştur. Fakat gömülü sürekli mıknatıs tasarımı montaj kolaylığı sağlayacağı için tork değerindeki düşüş kabul edilebilir seviyededir.

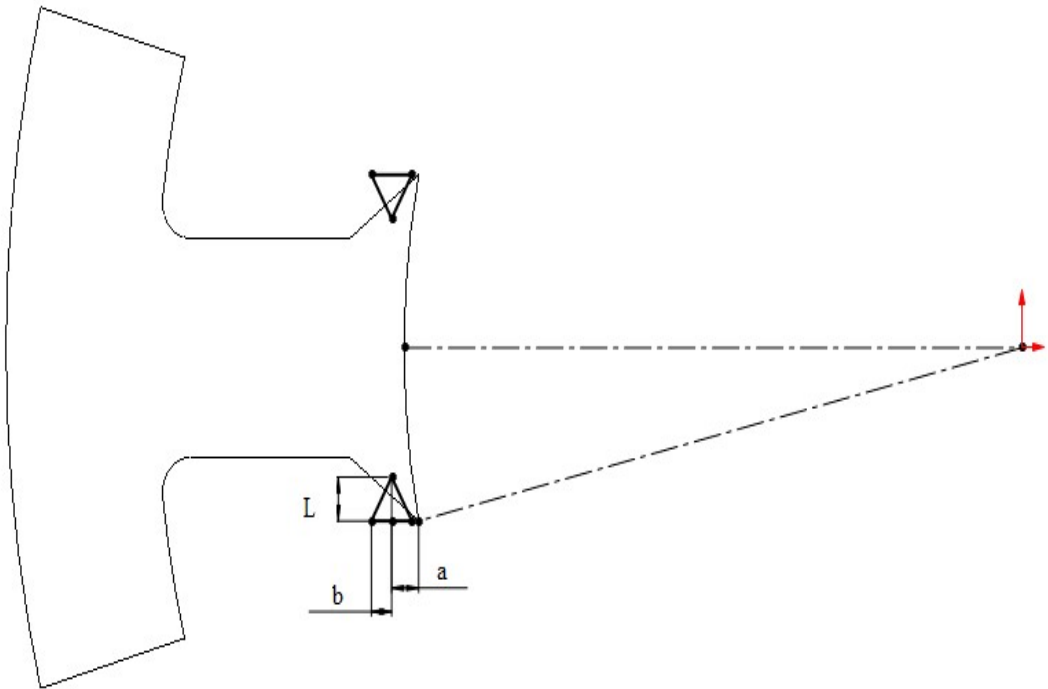


Şekil 4.7. Gömülü sürekli mıknatıslı motorun 100 Tur ve 0A, 6A ve 12A akım değeri için statik tork grafiği

Tork değerlerinde büyük değişiklikler elde edilemediği için rotor kutbuna ve stator kutbuna Zhao vd'nin, 2014 yılında yaptıkları çalışmadaki gibi çentik uygulaması yapılarak [51], matematiksel eşitliği Denk. (3.1)'de verilen tork dalgalanması değerinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Zhao vd. üzerinde çalıştıkları motorun rotor kutup şekli üzerinde değişiklikler yaparak, bu değişikliklerin tork performansına etkilerini incelemiştir. Bu şekil değişikliklerinden birisi olan rotor kutbuna çentik uygulaması referans alınarak; tez içerisindeki tasarıma Şekil 4.9'daki gibi stator kutup başına ve Şekil 4.10'daki gibi rotor kutup başına çentik çalışması yapılmıştır. Bu uygulama sonucunda Şekil 4.1(c)'deki gibi motor tasarımı yapılmıştır.



Şekil 4.8. Gömülü sürekli mıknatıslı motorun tork grafiği



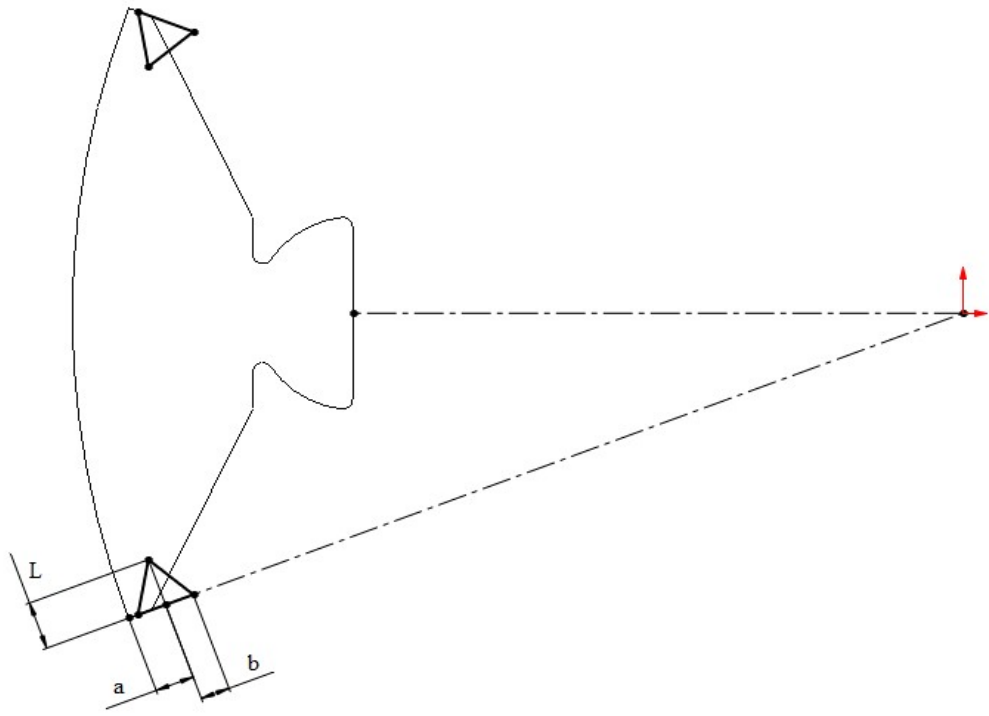
Şekil 4.9. Stator yapısına çentik uygulaması

Stator kutup başına ve rotor kutup başına çentik uygulamasında a , b ve L değişkenlerinin farklı değerleri için sonuçlar elde edilmiştir. a değeri için 0 mm ile 6 mm, b değeri için 0.2 mm ile 2 mm arasında ve L değeri için 0.1 mm ile 5.5 mm arasındaki değerlerde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda; tasarımsal uygunluk göz önüne alınarak tork ve dalgalanma değerlerinde kayda değer değişiklikler elde edilebilmesi için; a 'nın değer aralığı 0 mm ile 3 mm, b 'nin değer aralığı 0.5 mm ile 2 mm arasında ve L 'nin değeri 1.5 mm ile 3 mm arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Bu değer aralıklarında elde edilen sonuçlarla optimum a , b ve L değerleri için aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.11'de optimum a değeri bulunmaya çalışılmıştır. b ve L değerleri için referans aralıktan ortalama olarak $b=1.25$ mm, $L=2.2$ mm değerleri sabit tutularak tork ve dalgalanma değerlerinin grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.11'deki grafikteki tork değeri fazla değişmediği için dalgalanma değeri dikkate alınarak a 'nın en optimum değeri olarak 2 mm seçilmiştir.

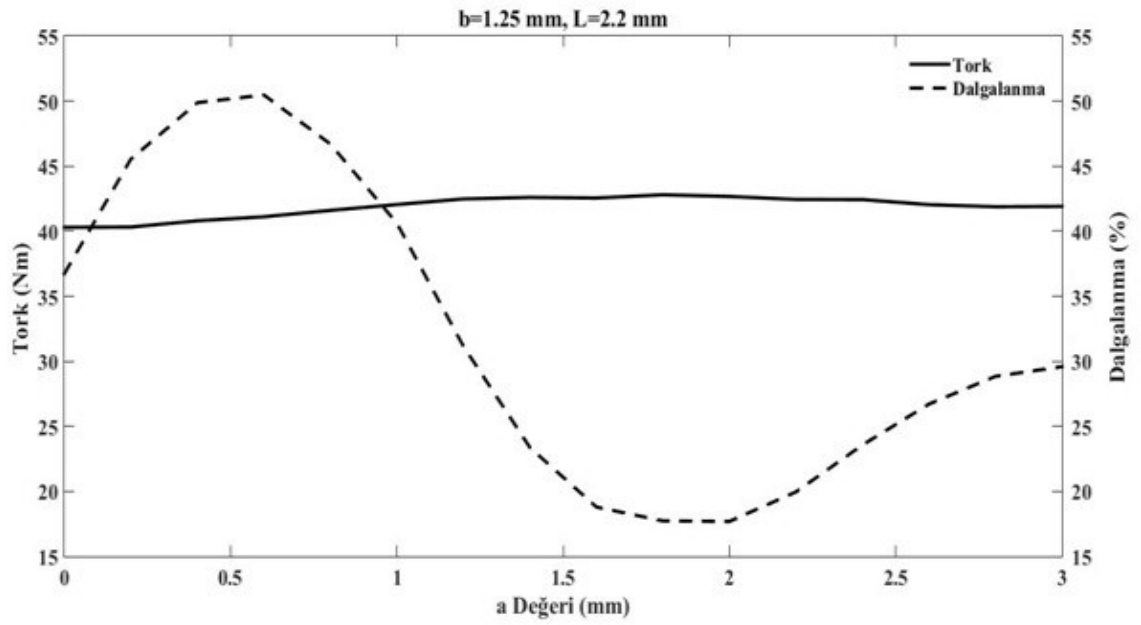
$a=2$ mm, $L=2.2$ mm için b 'nin en optimum değeri bulunmuştur. Şekil 4.12'deki grafikte, tork değeri fazla değişmediği için dalgalanma değeri dikkate alınarak b 'nin en optimum değeri olarak 1.5 mm seçilmiştir.

Şekil 4.11'den ve Şekil 4.12'den elde edilen $a=2$ mm ve $b=1.5$ mm değerleri sabit tutularak L 'nin en optimum değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.13'teki grafikte tork değeri fazla değişmediği için dalgalanma değeri dikkate alınarak L değeri 2.5 mm olarak seçilmiştir.

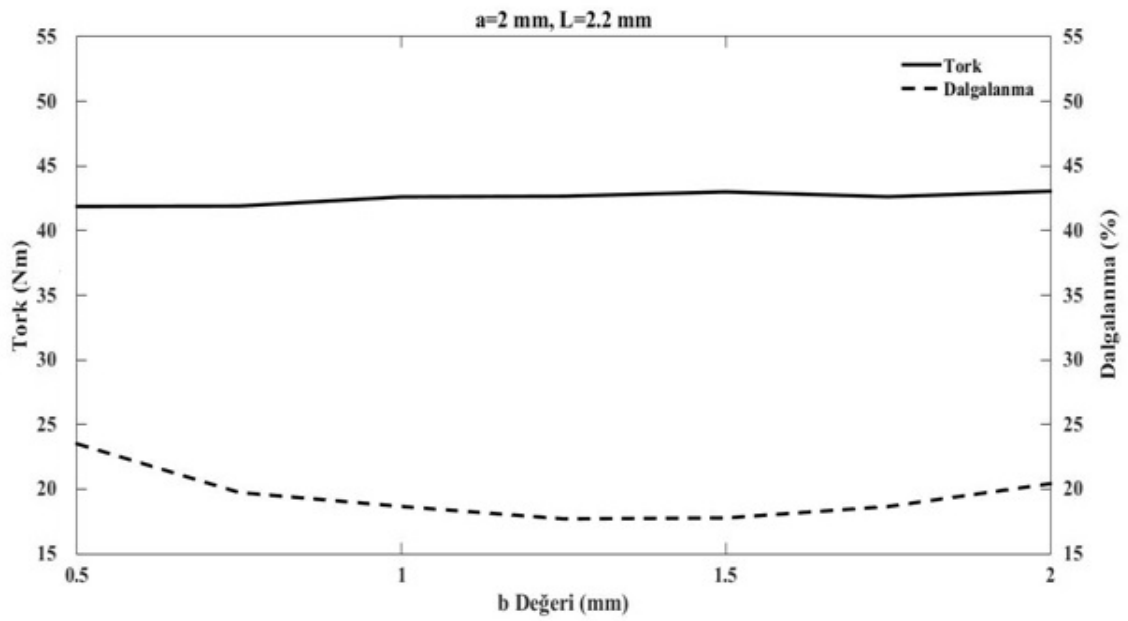
a , b ve L değerlerinin grafiklerinden elde edilen $a=2$ mm, $b=1.5$ mm ve $L=2.5$ mm ölçülerinde, statorun da sürekli mıknatis bulunmayan kutup başlarında çentikli ve rotorunda bütün kutup başlarında çentikli olarak tasarlanan motorun bilgisayar destekli tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın SEA yöntemiyle magnetostatik ve transient analizleri yapılmıştır. SEA yöntemiyle yapılan magnetostatik analizi sonucunda Şekil 4.14'teki statik tork grafiği elde edilmiştir.



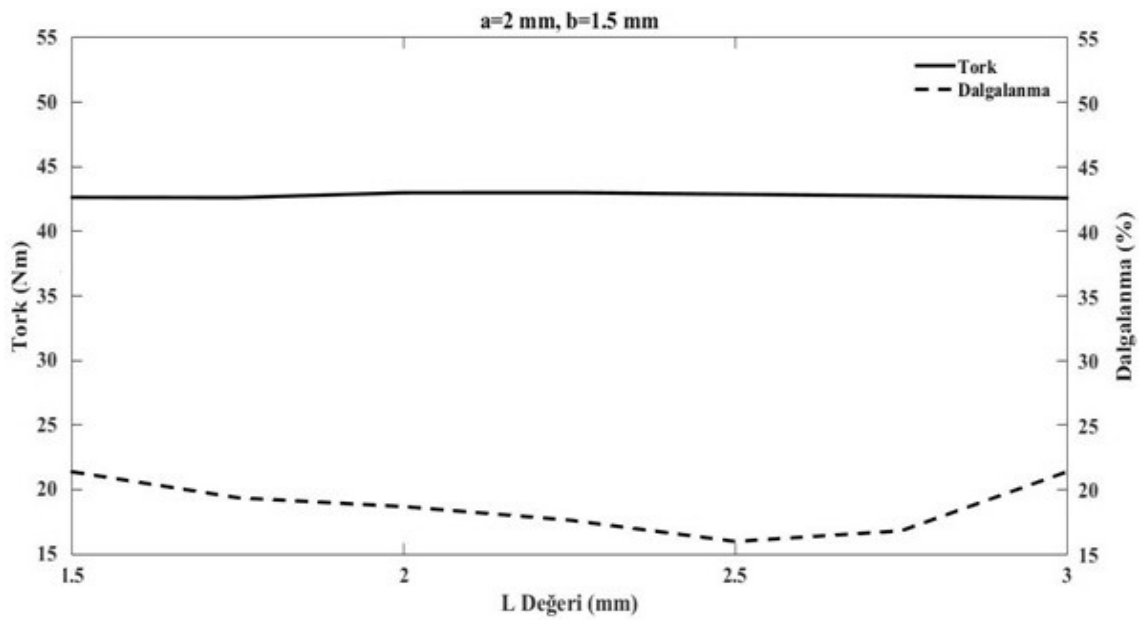
Şekil 4.10. Rotor kısmına çentik uygulaması



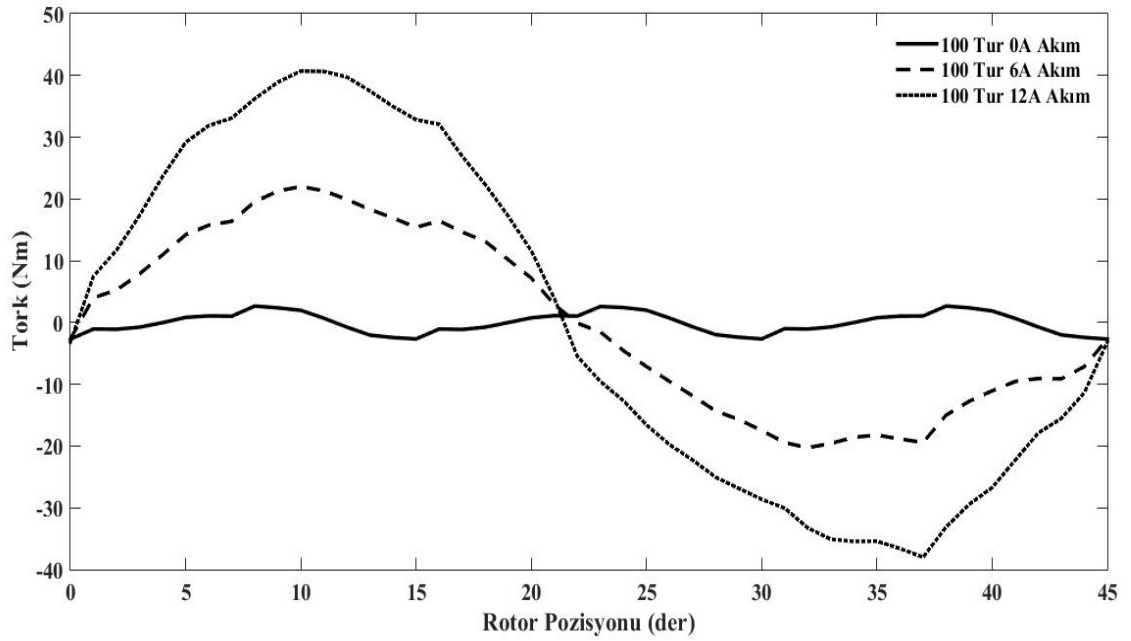
Şekil 4.11. $b=1.25 \text{ mm}, L=2.2 \text{ mm}$ iken a 'nın tork ve dalgalanma grafiği



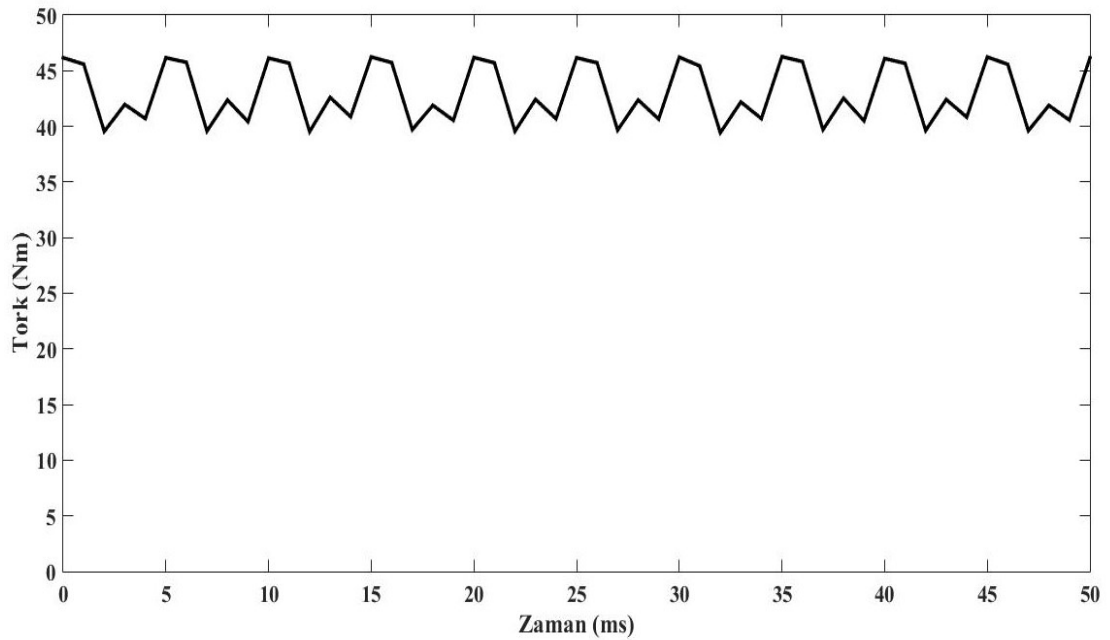
Şekil 4.12. $a=2 \text{ mm}, L=2.2 \text{ mm}$ iken b 'nin tork ve dalgalanma grafiği



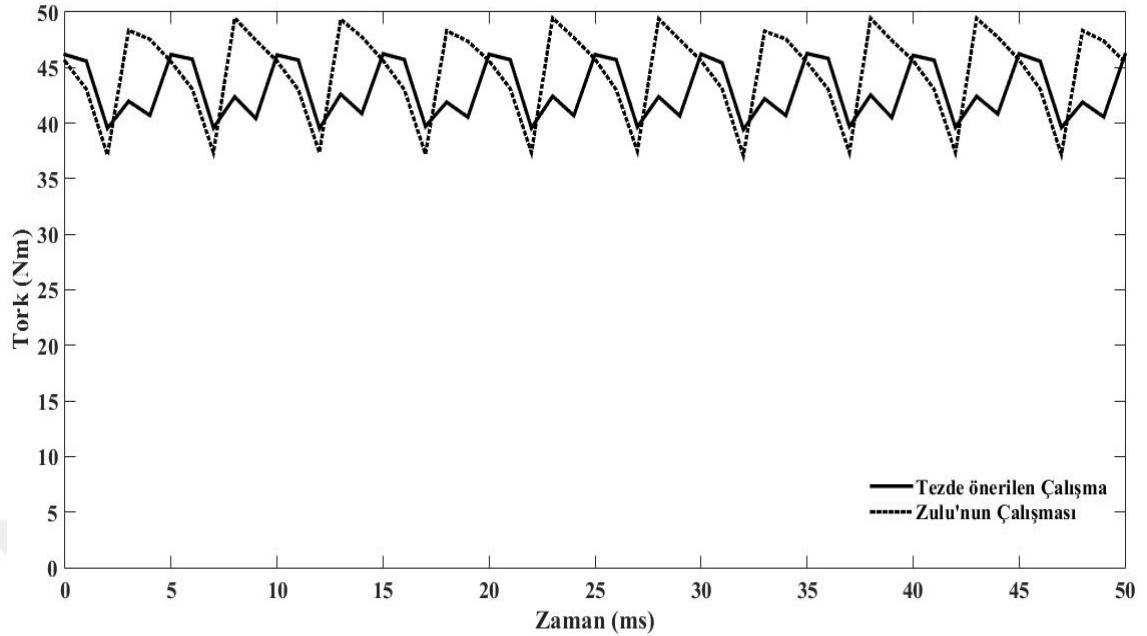
Şekil 4.13. $a=2 \text{ mm}, b=1.5 \text{ mm}$ iken L 'nin tork ve dalgalanma grafiği



Şekil 4.14. Çentik ve gömülü sürekli mıknatıslı motorun 100 Tur ve 0A, 6A ve 12A akım değeri için statik tork grafiği



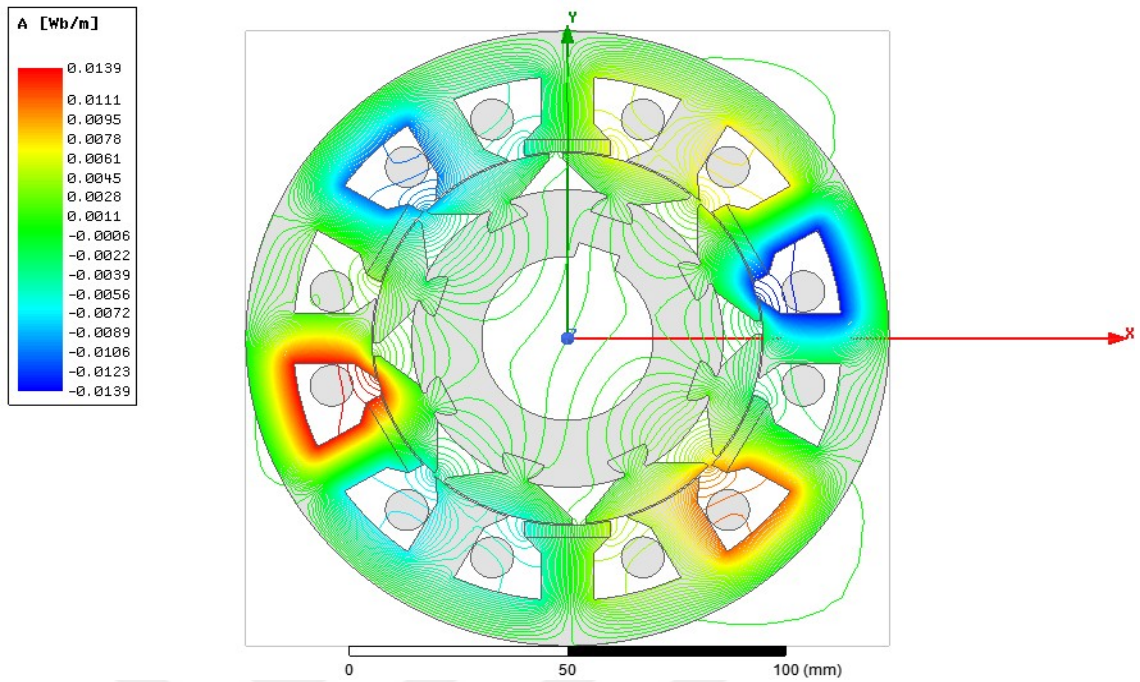
Şekil 4.15. Çentik ve gömülü sürekli mıknatıslı motorun tork grafiği



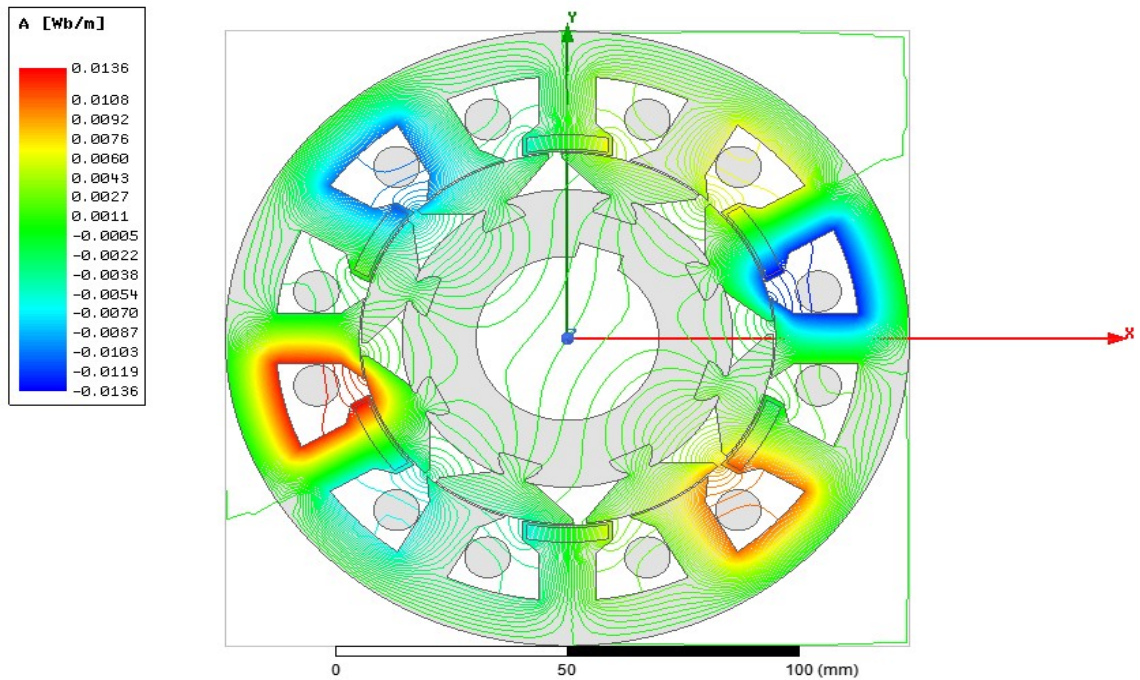
Şekil 4.16. Zulu'nun çalışması ve tezde önerilen çalışmanın tork kıyaslaması

SEA yöntemiyle yapılan transient analizinin sonucunda ise, Şekil 4.15'teki tork grafiğinden tork değerinin 42.6 Nm ve tork dalgalanma değerinin % 15.98 olduğu görülmektedir.

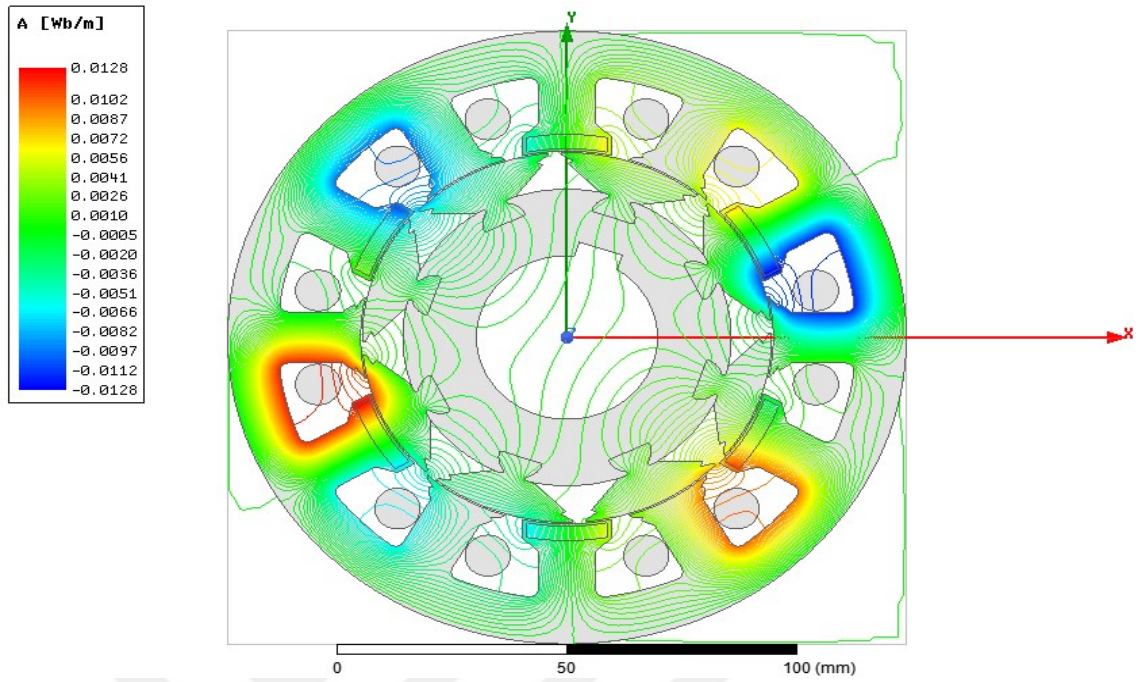
Referans alınan motor ile tez çalışmasında yapılan motorun tork kıyaslaması ise; Şekil 4.16'daki gibidir. Yeni tasarladığımız motorun tork değerinde 44.5 Nm değerinden 42.6 Nm değerine yaklaşık % 3 düşüş gözlenmektedir. Tork dalgalanma değerinde ise; % 27.8 seviyelerinden %15.98 seviyelerine düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 4.1(c)'deki statora gömülü sürekli mıknatıs uygulamasına ilave olarak çentik uygulandığında Zulu'nun tasarımına kıyasla tork dalgalanmasında yaklaşık % 57.5 oranında iyileşme görülmüştür. Dalgalanma değerindeki iyileşme göz önüne alındığında tork değerindeki düşüş ihmal edilebilir seviyededir.



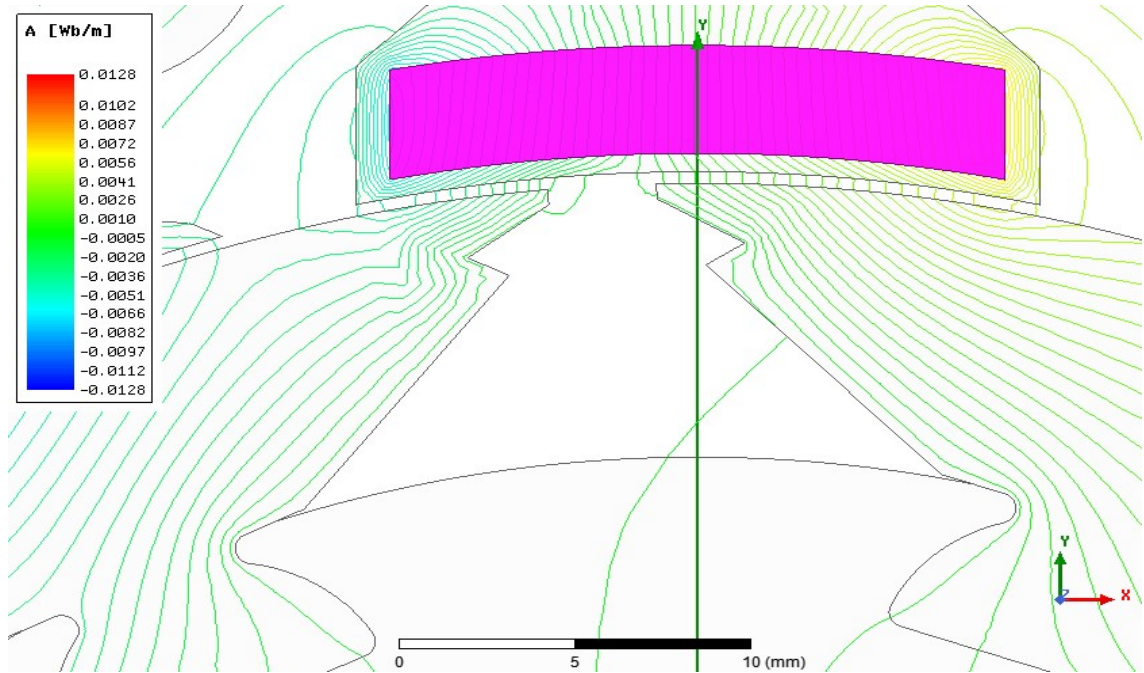
Şekil 4.17. Zulu vd.'nin yapmış olduğu motor tasarıma ait akı çizgileri



Şekil 4.18. Tezde önerilen gömülü SM uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgileri



Şekil 4.19. Tezde önerilen gömülü SM ve çentik uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgileri



Şekil 4.20 Tezde önerilen gömülü SM ve çentik uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgilerinin detay gösterimi

Motor tasarımdaki akı çizgilerinin daha rahat hareket edebilmesi için Zulu'nun yapmış olduğu referans çalışma Şekil 4.17'de, tezde önerilen gömülü SM uygulamaları sonucunda elde edilen analiz görseli Şekil 4.18'de, tezde önerilen gömülü SM ve çentik uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgi dağılımı Şekil 4.19'da verilmektedir. Ayrıca Şekil 4.20'de tezde önerilen gömülü SM ve çentik uygulamaları sonucunda elde edilen akı çizgilerinin detay gösterimi verilmektedir. Çentik uygulamasıyla akı çizgilerinin akım eğrileri daha yumuşak hareket sağlayarak tork dalgalanma değerlerinde iyileşme sağladığı öne sürülebilmektedir. Bundan dolayı çentik tasarımındaki genişletme, daraltma, iç bükey ve dış bükey gibi tasarımsal özellikler önem arz etmektedir. Tez çalışmasında farklı çentik tasarımlarının analizleri yapılarak elde edilen veriler doğrultusunda; stator ve rotor kutup başlarına uygulanan çentik tasarımları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki gibi yapılmıştır.

5. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

EA teknolojileri içerisinde yer alan gelişmeler incelendiğinde görülmektedir ki; günümüzde kullanılan içten yanmalı motora sahip araçların sebep olduğu gürültü ve çevre kirliliği dezavantajlarının etkisiyle, elektrikli araçların üzerinde yapılan çalışmalar popülerliğini artırarak daha çok ilgi toplamış ve çalışmalar için önemli bir konuyu oluşturmuştur. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motor çeşitleri zamana ve ihtiyaçlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Elektrikli araç motor çeşitlerinin kendilerine has özelliklerinden dolayı birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Önemli olan nokta; hangi özelliğin öne çıkartılması isteniyorsa ona uygun bir motor çeşidinin tercih edilmesidir. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarında yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik istendiğinden dolayı bu alanda yapılmakta olan birçok araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çalışmaları devam etmektedir.

Bu çalışmada ise akı anahtarlama motor tasarımı yapılmaya çalışılmıştır. Akı anahtarlama motor tasarımında 2012 yılında Zulu'nun yaptığı motor çalışması referans alınarak, motor üzerinde çeşitli revizyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve düşük güçlü tahrik sistemlerinde kullanıma uygun motor tasarımı yapılmıştır.

Yapılan yeni motor tasarımında sürekli mıknatıslar statora gömülü olarak tasarlanmıştır. Gömülü SM'lere ek olarak rotor ve stator kutup başlarına çentikli yapı uygulanmıştır. Bütün bu revizyonlar yapılırken gömülü sürekli mıknatıslarla kolay montaj sağlamak hedeflenmiştir. Sadece gömülü sürekli mıknatıslar tasarıma dahil edilerek elde edilen tork değerinde Zulu'nun tasarımına göre ciddi düşüşler olmadığı için sürekli mıknatısların stator içine gömülü olarak tasarımı daha sağlıklı bir çalışma kabiliyeti ve

montaj kolaylığı sağlanmaktadır. Gömülü SM ve çentik uygulaması yapıldığında Zulu'nun çalışmasına göre tork dalgalanmasında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Motorun stator ve rotor kutup başlarına uygulanan çentik yapısıyla akı çizgilerinin yumuşak ve rahat geçişinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda; uygun çentik yapısının torkta oluşan dalgalanmaları yumuşatarak dalgalanma değerini düşürdüğü ileri sürülebilmektedir. En optimum çentik yapısı için $a=2$ mm, $b=1.5$ mm ve $L=2.5$ mm değerleri bulunmuştur ve bütün bu yapıların birleştirilmesi sonucunda tork değerinde az bir düşüş olmasına rağmen dalgalanma değerinde % 57.5'lar civarında ciddi bir iyileşme sağlanmıştır.

İleride yapılacak çalışmalarda; tasarımı yapılan bu motorun prototipi yapılarak elde edilen simülasyon sonuçlarının deneysel olarak gerçekleştirilmesine çalışılacaktır. Elektrikli araç endüstrisinde kullanımı artırmak için yüksek güçlü tahrik sistemleri için de tasarım yapılması mümkündür. Ayrıca tork dalgalanmalarını azaltmak için farklı geometrik yapılara sahip çentik uygulamaları gerçekleştirilerek gerek simülasyon sonuçları gerek deneysel sonuçlar elde edilerek değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

1. Başer E., 2016. Elektrikli Araçlarda Yol Koşullarına Uygun Motor Seçimi Algoritması Geliştirme. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Düzce, 77 s.
2. Fei, W., Z., Shen, J., X., 2006. Novel permanent magnet switching flux motors, *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*.
3. Bangura, J., F., 2006. Design of high-power density and relatively high-efficiency flux-switching motor, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, **21(2)**: 416-425
4. Kerem, A., 2014. Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri, **Dergi Park**, 5(1): 1-13.
5. Bas Akümülatör, Kurşun Asit Akünün Tarihi, (Web sayfası: <https://www.basaku.com.tr/kursun-asit-aku-tarihi/>), (Erişim tarihi: Temmuz 2020)
6. Kartal, M., R., 2018. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Farklı Batarya ve Elektrik Motorlarının Sürüş Çevrimlerine Göre Performans Analizi Elektrikli Araçlarda Kullanılan Farklı Batarya ve Elektrik Motorlarının Sürüş Çevrimlerine Göre Performans Analizi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 150 s.
7. Koç, C., 2012. Hibrid Araçlarda Değişik Parametrelere Göre Elektrik Motoru Seçimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 91 s.
8. Wikipedia, 2020, Benz Patent Motorwagen, (Web sayfası: https://en.wikipedia.org/wiki/Benz_Patent-Motorwagen), (Erişim Tarihi: Temmuz 2020)
9. Electric Vehicles News, Electrobat, (Web sayfası: <https://www.electricvehiclesnews.com/Footer/History/Companies/Electrobat.html>), (Erişim tarihi: Temmuz 2020)

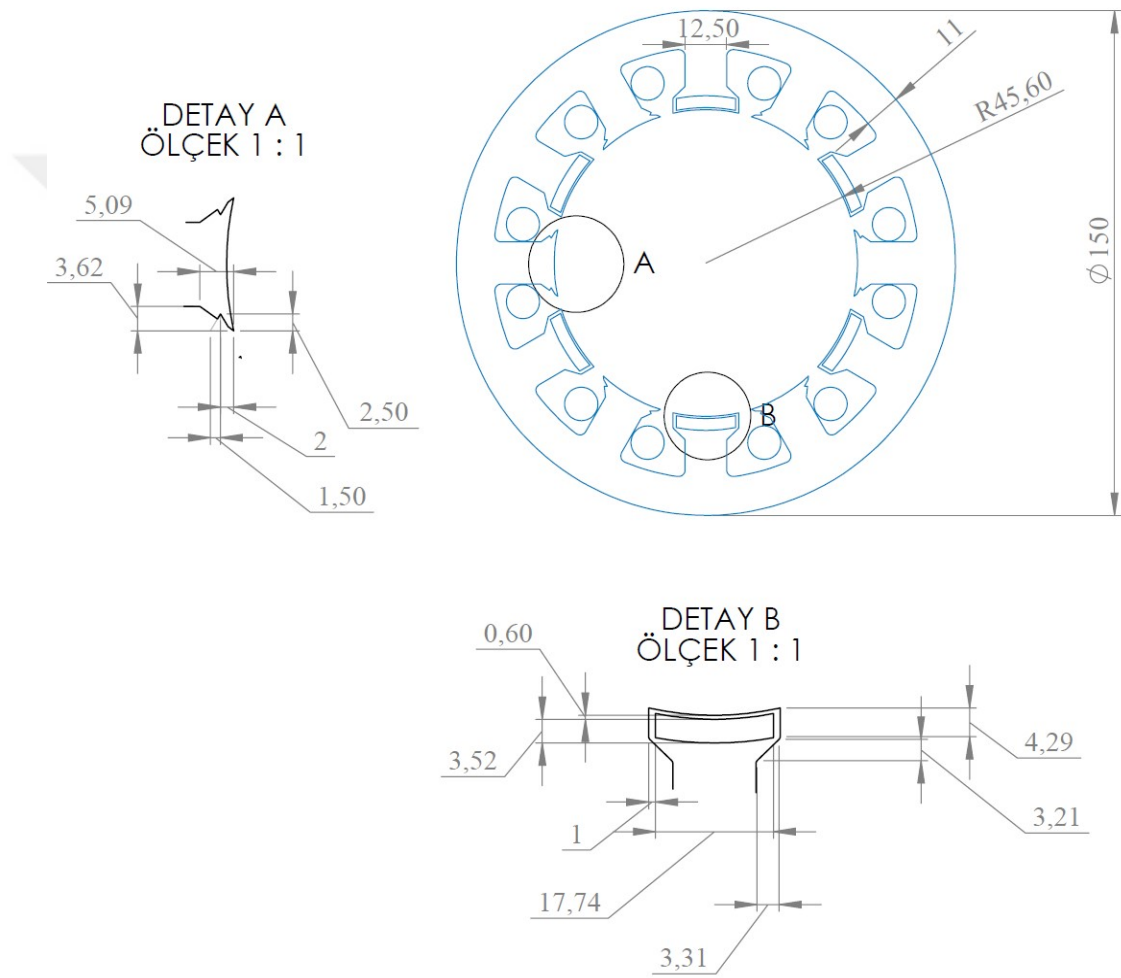
10. Jodson Concept, Londra Taksi: Tarih, Markalar, (Web sayfası: <https://tr.judsonconcept.com/4226045-london-taxi-history-brands>), (Erişim tarihi: Temmuz 2020)
11. Gökden, F., B., 2013. Elektrikli Araçlar için İki Fazlı Yalıtımsız Faz Kaydırmalı Çift Yönlü DA-DA Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 95 s.
12. Tuncay, N., Üstün, Ö., 2014. Sayı Elektrikli araç teknolojisi önündeki fırsatlar ve tehditler. **Arge Dergisi**, 2(5): 12-14.
13. My Car Quest, 1966 GM Electrovair II Electric Car, 2013, (Web sayfası: <https://mycarquest.com/2013/04/1966-gm-electrovair-ii-electric-car-gm-could-have-been-the-world-leader-in-electric-car-technology.html>), (Erişim tarihi: Temmuz 2020)
14. Ustabaş, A., 2014. Mikro ve makro etkileri yönünden elektrikli otomobiller (Türkiye ekonomisi örneği). **Marmara Üniversitesi İ.İ.B. Dergisi**, 36(1), 269-291.
15. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2018, Elektrikli Araçlar, (Web sayfası: <https://www.dunyaenerji.org.tr/elektrikli-araclar/>), (Erişim tarihi: Temmuz 2020)
16. Tuna, M., 2008. Hibrit Elektrikli Araçlarda (HEA) Kullanılan Konvertörlerin Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama (GSSA) Yöntemi ile Modellenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 135 s.
17. Çarkıt, S., Üstkoyuncu, N., 2019. Elektrikli araçlar ve elektrikli araçlarda kullanılan elektrikli tahrik sistemleri, ss. 30-31. *Trakya Üniversiteler Birliği IV. Lisansüstü Öğrenci Kongresi*, Kırklareli.
18. Eroğul, O., 2018. Anahtarlamalı Relüktans Motor Tabanlı Medikal Santrifüj Sistemi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 64 s.
19. Durak, B., Yeksan, A., Y., Ergene, L.,T., 2014. Anahtarlamalı relüktans motorlarda sürücü devrelerinin karşılaştırılması *Elektrik Elektronik Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 282-287.

20. Kül, S., 2015. Doğrudan Yol Vermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Tasarım Optimizasyonu. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 88 s.
21. Kartal, M., Y., 2018. 3 Faz Asenkron Motor Verimlilik Ve Yenileme Karlılık Analizi. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Muğla, 107 s.
22. Kaygısız, F., 2008. Asenkron Motorların Matlab'da Tasarımı ve Analizi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, 81 s.
23. Üstkoyuncu, N., 2010. Anahtarlama Doğrusal Hareketli Relüktans Motor Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 119 s.
24. Wang, T., 2018. Finite-Control-Set Model Predictive Control Of Axially Laminated Flux Switching Permanent Magnet Machine With Extended Voltage Space Vectors. University of Technology, PhD. Thesis, Sydney, 235 pp.
25. Nanda, G., Kar, N., C., 2006. A survey and comparison of characteristics of motor drives used in electric vehicles. **IEEE CCECE/CCGEI**, 811-814.
26. Santiago, J., Bernhoff, H., Ekegård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., Leijon, M., 2012. electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: a review. **IEEE Transactions On Vehicular Technology**, **61**(2): 475-484.
27. Hashernnia, N., Asaei, B., 2008. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*, 1-5.
28. Gwoździewicz, M., Antal, L., 2010. Investigation of line start permanent magnet synchronous motor and induction motor properties. **Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej**, 13-20.
29. Goss, J., Popescu, M., Staton, D., 2013. A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application. *Electric Machines & Drives Conference*, 220-225.

30. Yıldırım, M., Polat, M., Kürüm, H., 2014. A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, 218-223.
31. Guan, Y., Zhu, Z., Q., Afinowi, I., A., A., Mipo, J., C., Farah, P., 2014. Comparison between induction machine and interior permanent magnet machine for electric vehicle application. **Electrical Machines and System**, 144-150.
32. Buyukdegirmenci, V., T., Bazzi, A., M., Krein, P., T., 2014 Evaluation of induction and permanent-magnet synchronous machines using drive-cycle energy and loss minimization in traction applications. *Industry Applications*, **IEEE Transactions on Industry Applications**, **50**(1): 395-403.
33. Kumar, A., Srivastava, A., 2016. Performance investigation of various flux-switching machines for hybrid electric vehicles: a review. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, **5**(12): 9246-9256.
34. Hemamalini, B., 2016. Design and Analysis of Flux Switching Motor. Anna University, PhD Thesis, Hindistan, 125 pp.
35. Chan, C., C., 1993. An overview of electric vehicle technology. **IEEE**, **81**(9): 1202-1213.
36. Ekineker, A., 2011. Fırçalı Doğru Akım Motorların Dizaynında Manyetik Sıvıların Etkisinin Analizi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 152 s.
37. Pollock, C & Brackley, M 2003, Comparison of the acoustic noise of a flux-switching and a switched reluctance drive. **IEEE Transactions on Industry Applications**, **39**(3): 826-834.
38. Zhu, Z., Q., Pang, Y., Howe, D., Iwasaki, S., Deodhar, R., Pride, A., 2005. Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent-magnet machines by nonlinear adaptive lumped parameter magnetic circuit model. **IEEE Transactions on Magnetics**, **41**(11): 4277-4287.

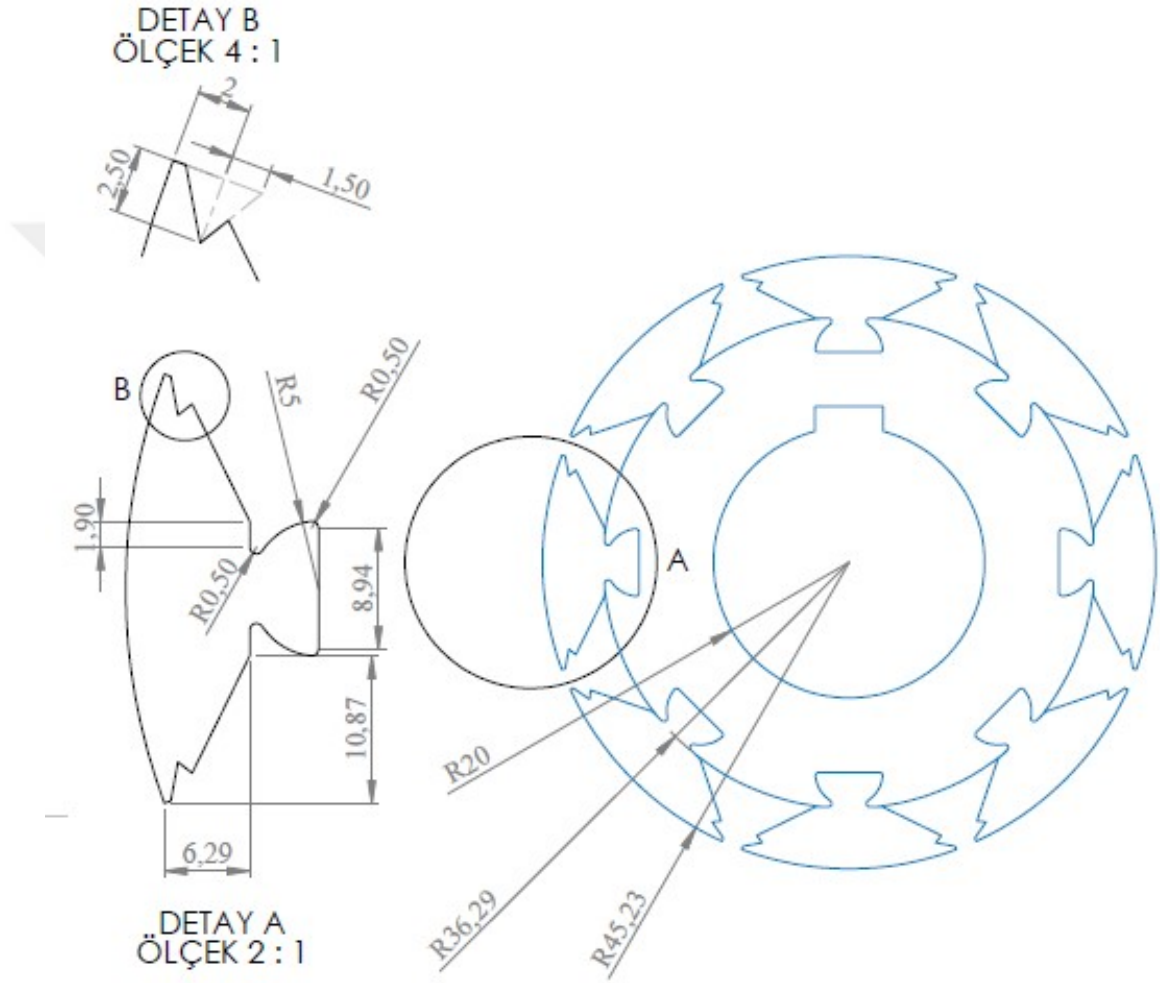
39. Amara, Y., Hoang, E., Gabsi, M., Le 'crivai, M., Allano, S., 2005. Design and comparison of different flux-switch synchronous machines for an aircraft oil breather application. **European Transactions on Electrical Power**, 497–511.
40. Hua, W., Cheng, M., Zhang, G., 2009. A novel hybrid excitation flux-switching motor for hybrid vehicles. **IEEE Transactions on Magnetics**, **45**(10): 4728-4731.
41. Sulaiman, E., Teridi, M., F., M., Husin, Z., A., Ahmad, M., Z., Kosaka, T., 2013. Performance comparison of 24s-10p and 24s-14p field excitation flux switching machine with single dc-coil polarity. *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference*.
42. Hua, W., Xiaomei, Yin, Zhang, G., Cheng, M., 2014. Analysis of two novel five-phase hybrid-excitation flux-switching machines for electric vehicles. **IEEE Transactions on Magnetics**, **50**(11): 4728-4731.
43. Zhang, G., Hua, W., Cheng, M., Liao, J., 2015. Design and comparison of two six phase hybrid-excited flux-switching machines for EV/HEV applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, **63**(1): 481-493.
44. Zhang, G., Hua, W., Cheng, M., Liao, J., Wang, K., Zhang, J., 2015. Investigation of an improved hybrid-excitation flux-switching brushless machine for HEV/EV applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, **51**(5): 3791 – 3799.
45. Pollock, C., Pollock, H., “Improvements for Flux Switching Machines” Assignee, Technelec Ltd. US patent 9 577 479, February 21, 2017
46. Zulu, A., Mecrow, B., C., Armstrong, M., 2012. Permanent-magnet flux-switching synchronous motor employing a segmental rotor. **IEEE Transactions on Industry Applications**, **48**(6): 2259-2267.
47. Riba, J., R., López-Torres, C., Romeral, L., Garcia, A., 2016. Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: a technology review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 367-379.
48. Somesan, L., Padurariu, E., Viorel, I., A., Szabo, L., 2012. Design of a permanent magnet flux-switching machine. *9th International Conference Elektro*, 256-259.

49. Zhang, J., Cheng, M., Chen, Z., 2008. Optimal design of stator interior permanent magnet machine with minimized cogging torque for wind power application. **Energy Conversion and Management**, 49(2008): 2100–2105.
50. Hua, W., Zhu, Z., Q., Cheng, M., Pang, Y., Howe, D., 2005. Comparison of flux-switching and doubly-salient permanent magnet brushless machines. **International Conference on Electrical Machines and Systems**, 165 - 170.
51. Zhao, J., Yan, Y., Li, B., Liu, X., Chen, Z., 2014. Influence of different rotor teeth shapes on the performance of flux switching permanent magnet machines used for electric vehicles. **Energies**,7: 8056-8075.

EKLER**EK 1.****Stator Yapısının Teknik Resmi**

EK 2.

Rotor Yapısının Teknik Resmi



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Sümeyye ÇARKIT
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 06.01.1994 - Kayseri
Medeni Durum: Evli
e-mail: sbyrm.93@gmail.com
Yazışma Adresi: Karakaş Mah. 839. Sok. Kırklareli/Merkez

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh.	Devam ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh.	2017, Şubat
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Müh.	2017, Haziran
Lise	Cemal Bozkurt Anadolu Lisesi, Kayseri	2012

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2017-Halen	Baykar İnşaat Mimarlık Mühendislik Gıda ve İhtiyaç Maddeleri	Devam ediyor
2017-2018	Mestaş Metal San. Ve Tic. A.Ş.	1

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Çarkıt, S., Üstkoyuncu, N., (2019) Elektrikli araçlar ve elektrikli araçlarda kullanılan elektrikselsel tahrik sistemleri, *Trakya Üniversiteler Birliği IV. Lisansüstü Öğrenci Kongresi*, ss 30-31