

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Hasan ÇAMCI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Onur Özdal MENGİ

Ortak Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN

**Aralık 2022
GİRESUN**

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan ÇAMCI

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez 21/12/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Doç. Dr.
Emre ÖZKOP
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.
Hakan ADATEPE
Üye**

**Doç. Dr.
Onur Özdal MENGİ
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Serdal ARSLAN
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Kenan YANMAZ
Üye**

**Prof. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hasan ÇAMCI

21/12/2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans hayatıma başladığım günden bu yana her türlü desteğiyle yanımda olan çok değerli danışmanım Doç. Dr. Onur Özdal MENGİ'ye saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam esnasında her türlü desteğiyle yanımda olan elinden gelen yardımı biran olsun esirgemeyen ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN'a ayrıca teşekkür eder ve minnetlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman yanımda manevi destekçim olan biricik eşim Betül ÇAMCI'ya, babalarına ders çalışması için müsaade eden canım oğlum Yusuf Eymen ÇAMCI ve canım kızım Zeynep Sena ÇAMCI'ya sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunar ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde büyük emekleri olan anneme, babama ve tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	X
ÖZET.....	XI
SUMMARY.....	XII
 BÖLÜM 1. GİRİŞ	 1
1.1. Literatür Taraması	2
 BÖLÜM 2. SENKRON RELÜKTANS MOTOR (SYNRM)	 14
2.1. Genel Bilgiler.....	14
2.2. Senkron Relüktans Motor Çalışma Prensipleri.....	17
2.3. Senkron Relüktans Motor Eşdeğer Devre ve Matematiksel Modeli	18
2.4. Senkron Relüktans Motor Rotor Tasarımları.....	20
2.5. TLA ve ALA Rotor Yapılarının Karşılaştırılması	23
2.6. Senkron Relüktans Motor ve İndüksiyon Motorların Karşılaştırılması	24
2.7. Senkron Relüktans Motor Rotor Tasarım Parametreleri	27
2.8. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması	31
2.8.1. Ana Boyutlar	31
2.8.2. Stator Geometrisi	32
2.8.3. Rotor Geometrisi.....	35
 BÖLÜM 3. SENKRON RELÜKTANS MOTOR ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU	 40
3.1. Ansys Maxwell ile Nümerik Analiz.....	40

3.2. Optimizasyon	42
3.3. SynRM Boyutlandırma Verileri.....	43
3.4. Tepki Yüzey Metodolojisi (TYM).....	47
3.5. Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA).....	48
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI	51
4.1. Tepki Yüzey Metodolojisi ile Nümerik Analiz	53
4.2. Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) Metodolojisi ile Nümerik Analiz	62
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	67
 KAYNAKLAR.....	69
EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

v	: Stator gerilimi (V)
i_s	: Stator akımı (A)
R_s	: Sargı direnci (Ω)
L_{sl}	: Toplam sargı kaçak indüktansı (H)
e_m	: Hava boşluğu elektromotor gerilimi (stator sargısının iç gerilimi) (V)
i_{cs}	: Stator demir akımı (A)
R_{cm-s}	: Stator demir direnci (Ω)
ω	: Açısal hız (rad/s)
λ_m	: Hava boşluğu bağlantı akısı
i_m	: Mıknatıslanma akımı (A)
R_{cm-r}	: Rotor demir direnci (Ω)
L_m	: Mıknatıslanma indüktansı (H)
δ	: Yük açısı (d ve q-eksen akıları arasındaki açı) ($^\circ$)
φ_i	: Mıknatıslanma gerilimi ile mıknatıslanma akımı arasındaki açı (zıt EMK vektörü ile akım vektörü arasındaki açı) ($^\circ$)
φ	: Stator gerilimi ile akımı arasındaki açı ($^\circ$)
θ	: Akım açısı (d ve q-eksen mıknatıslanma akımları arasındaki açı) ($^\circ$)
β	: Moment açısı (akı ve akım vektörleri arasındaki açı) ($^\circ$)
P_{out}	: Çıkış gücü (W)
η	: Verim
P_{in}	: Giriş gücü (W)
m	: Faz sayısı
$\cos(\varphi)$	: Güç faktörü
ω_e	: Mekanik hız (rad/s)
l_{eff}	: Makinenin etkin uzunluğu

$\hat{B}_g$	: Maksimum manyetik akı yoğunluğu
k_{w1}	: Sargı faktörü
α_i	: Akı yoğunluğunun aritmetik ortalamasını elde etmek için kullanılan katsayı
D_{is}	: İç stator çapı
τ_p	: Yuva aralığı
X	: Form faktörü
p	: Kutup sayısı
b_t	: Dişlerin genişliği
b_s	: Yuvaların genişliği
S_o	: Yuva açıklığı
h_s	: Yuvanın yüksekliği
h_y	: Boyunduruk yüksekliği
h_{t2}	: Diş ucunun yüksekliği
z_q	: Her yuvadaki iletken sayısı
a	: Paralel yolların sayısı
N_{f_new}	: Faz başına serideki dönüş sayısı
τ_s	: Yuva aralığı
Q_s	: Stator oluk sayısı
$\hat{B}_t$	: Maksimum manyetik akı yoğunluğu
k_{sf}	: İstifleme faktörü
Φ_g	: Hava boşluğundaki manyetik akı
J	: Akım yoğunluğu (A/m^2)
k_u	: Sargı faktörü
h_t	: Dişlerin yüksekliği
D_{os}	: Dış stator çapı
D_{ir}	: İç rotor çapı
D_{or}	: Dış rotor çapı
R_s	: Faz direnci
P_{fe}	: Demir kayıpları
R_{ro}	: Rotor çapı

L_{stk}	: Paket uzunluğu
q	: Faz başına kutup başına yuva sayısı
g	: Hava boşluğu uzunluğu
μ_0	: Havanın bağıl geçirgenliği
γ	: En boy oranı
T	: Tork (Nm)
L_d	: d ekseni İndüktansı (H)
L_q	: q ekseni İndüktansı (H)
i_d	: d ekseni akımı (A)
i_q	: q ekseni akımı (A)
ξ	: Çıkıntı oranı
P_{loss}	: Bakır kayıpları (W)
T_{rip}	: Dalgalanma oranı
T_{max}	: Kalıcı hal durumundaki maksimum tork (Nm)
T_{min}	: Kalıcı hal durumundaki minimum tork (Nm)
T_{avg}	: Kalıcı hal durumundaki ortalama tork (Nm)
AC	: Alternatif Gerilim
ALA	: Eksenel Laminasyonlu Anizotropi
ASM	: Asenkron Motor
DC	: Doğru Gerilim
EMK	: Elektromotor Kuvvet
FTC	: Hata Tolerans Kontrolü
GA	: Genetik Algoritma
IM	: İndüksiyon Motor
MMK	: Manyetomotor Kuvvet
MODE	: Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim
MOGA	: Çok Amaçlı Genetik Algoritma
MOSA	: Çok Amaçlı Benzetilmiş Tavlama
PF	: Güç Faktörü
SynRM	: Senkron Relüktans Motor
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
TLA	: Enine Laminasyonlu Anizotropi

TYM : Tepki Yüzey Metodolojisi



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. (a) Kostko rotoru, (b) Birkaç dişi çıkarılmış asenkron motor rotoru, (c) İzole parçalı rotor, (d)Eksenel laminasyonlu rotor, (e) Sabit mıknatıssız rotor ve (f) Sabit mıknatıslı rotor.....	4
Şekil 2.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.2. TLA tipi SynRM'un kesiti.	16
Şekil 2.3. Manyetik alan ve relüktans tork üretim mekanizması içinde bulunan anizotropik geometriye sahip (a) nesnesi ve izotropik geometriye sahip (b) nesnesi	17
Şekil 2.4. SynRM'nin demir kayıplarını içeren eşdeğer devre modeli.....	18
Şekil 2.5. SynRM'nin demir kayıplarını içeren vektör diyagramı	20
Şekil 2.6. SynRM'nin rotor tasarımları a) Geleneksel yapılı çıkık kutuplu rotor, b) ALA tip rotor, c) TLA tip rotor.....	21
Şekil 2.7. SynRM rotor konfigürasyonları (a) Geleneksel çıkık kutuplu tasarım (b) Segmental tasarım (c) Çift bariyerli tasarım (d) Eksenel laminasyonlu (ALA) rotor yapısı (e) Enine laminasyonlu (TLA) rotor yapısı (f) Enine laminasyonlu (TLA) mıknatıs destekli SynRM rotor yapısı	22
Şekil 2.8. SynRM'nin TLA ve ALA rotor yapıları a) TLA rotor yapısı b) ALA rotor yapısı.	24
Şekil 2.9. Rotor geometrilerinin karşılaştırılması a) SynRM b) IM.	25
Şekil 2.10. SynRM'nin çeyreği üzerinden rotor ve stator bölgelerinin tanımlamaları.....	28
Şekil 2.11. Bariyer sayısının değişimine göre rotor değişimi.....	29
Şekil 2.12. Bariyer şekli değişimine göre bazı rotor yapıları; a) Yuvarlak, b) Köşeli-yuvarlak, c) Köşeli, d) Köşeli ve kesik uçlu.	30
Şekil 2.13. Stator oluk boyutlandırma büyüklükleri.....	32

Şekil 3.1. Ansys Maxwell ile sayısal çözümün elde edilmesine yönelik akış diyagramı.....	41
Şekil 3.2. Optimizasyon tekniklerinin sınıflandırılması	42
Şekil 3.3. Optimizasyon çalışması akış diyagramı.	43
Şekil 3.4. SynRM rotor ve stator büyüklükleri.....	44
Şekil 3.5. Tepki Yüzey Metodolojisi (TYM) akış diyagramı.....	48
Şekil 3.6. Çok Amaçlı Genetik Algoritmanın (MOGA) blok şeması.....	50
Şekil 4.1. Giriş değişkeni B0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması. ..	54
Şekil 4.2. Giriş değişkeni H ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması. ..	55
Şekil 4.3. Giriş değişkeni R0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması. ..	56
Şekil 4.4. Giriş değişkeni Rb ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması. ..	57
Şekil 4.5. Giriş değişkeni R ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması. ..	58
Şekil 4.6. Giriş değişkeni W ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması. ..	59
Şekil 4.7. Giriş değişkeni Y0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması. ..	60

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Senkron Relüktans Motorun avantaj ve dezavantajları.....	15
Tablo 2.2. SynRM ve IM'un karşılaştırılması	25
Tablo 3.1. Motora ait temel büyüklükler.	44
Tablo 3.2. Referans motorun rotoru için büyüklükler.....	45
Tablo 3.3 Farklı rotor model görünüşleri	45
Tablo 3.4. Farklı rotor modelleri için motor çıktıları.	46
Tablo 4.1. Rotor tasarımı için büyüklükler.....	51
Tablo 4.2. Rotor tasarımı giriş değişkenleri ve sınırları.	52
Tablo 4.3. MOGA ve Tepki Yüzey Metodolojisi için tanımlanan amaç fonksiyonları.....	53
Tablo 4.4. Amaç fonksiyonlarına göre rotor boyutlandırması için optimum değerler.....	61
Tablo 4.5. Amaç fonksiyonlarına göre tanımlanan çıkış parametreleri.	61
Tablo 4.6. Tablo 4.4'teki verilerin RMXprt'teki çözüm sonuçları.	62
Tablo 4.7. MOGA'da amaç fonksiyonlarına göre elde edilen en uygun rotor boyutlandırma büyüklükleri.....	63
Tablo 4.8. MOGA'da amaç fonksiyonlarına göre elde edilen en uygun rotor verileri.	64
Tablo 4.9. A.F.1 ile referans motorun karşılaştırılması (4 bariyer).....	65
Tablo 4.10. A.F.1 ile referans motorun karşılaştırılması (5 bariyer).....	65
Tablo 4.11. Tablo 4.6'daki verilerin RMXprt'teki çözüm sonuçları.....	65

SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Son yıllarda üretilen endüstriyel ürünlerin büyük bir çoğunluğu enerji verim sınıflarına göre üretilmekte ve bu şekilde sınıflandırılmaktadır. Elektrik enerjisi tüketim miktarlarını incelediğimizde, elektrik motorlarının tüketim olarak endüstriyel, ticari ve konut alanlarında en yüksek tüketime sahip elektrikli aletler arasında bulunduğu görülmektedir. Kullanılan elektrik motorlarına bakıldığında ise en fazla kullanılan motor çeşidinin asenkron motorlar olduğu görülmektedir. Ancak son yıllarda verim ve güvenilirlikleri açısından asenkron motorlara oranla senkron relüktans motorlar daha dikkat çekicidir. Bu motorların verimlerinde yapılacak olan küçük bir iyileştirmenin dahi yıllık enerji tüketiminde büyük kazançlar sağlayacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada, 4 KW gücünde, 1500 rpm devir sayısına sahip senkron relüktans motor boyutlandırma verileri dikkate alınarak ve sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir. Rotor boyutlandırma parametreleri giriş değişkenleri, çıkış büyüklükleri ise çıkış gücü, verim, tork, tork dalgalanması, çıkıntı oranı olarak tanımlanmıştır. Elde edilen hesaplamalar doğrultusunda motor performansı artışı için tanımlanan amaç fonksiyonları; Tepki Yüzey Metodolojisi yöntemi ve Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonlarına göre bulgular karşılaştırılmıştır. Ayrıca her iki optimizasyon yöntemi ile en uygun geometri elde edilmiştir. Ele alınan amaç fonksiyonları ve optimizasyon yöntemleri diğer elektrik motoru çalışmaları için kullanılabilir ve motor performansının artışı açısından da incelenebilir.

Anahtar kelimeler: Senkron Relüktans Motor, SynRM, Çok Amaçlı Genetik Algoritma, Ansys Maxwell, Optimizasyon

SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR DESIGN AND OPTIMIZATION

SUMMARY

The majority of industrial products produced in recent years are produced according to energy efficiency classes and classified in this way. When we examine the electrical energy consumption amounts, it is seen that electric motors are among the electrical appliances with the highest consumption in industrial, commercial and residential areas. When we look at the electric motors used, it is seen that the most used motor type is asynchronous motors. However, in recent years, synchronous reluctance motors have attracted more attention than induction motors in terms of efficiency and reliability. It is predicted that even a small improvement in the efficiency of these motors will provide great gains in annual energy consumption.

In this study, the synchronous reluctance motor with 4 kW power and 1500 rpm speed was analyzed by using finite element software, taking the sizing data into account. Rotor sizing parameters are defined as input variables and output sizes as output power, efficiency, torque, torque ripple, and protrusion ratio. The purpose functions defined for engine performance increase in line with the calculations obtained; Optimization studies were carried out using the Response Surface Methodology method and the Multi-Objective Genetic Algorithm method. The findings were compared according to objective functions. In addition, the most suitable geometry was obtained with both optimization methods. The objective functions and optimization methods discussed can be used for other electric motor studies and examined in terms of increasing motor performance.

Keywords: Synchronous Reluctance Motor, SynRM, Multi-Objective Genetic Algorithm, Ansys Maxwell, Optimization

BÖLÜM 1. GİRİŞ

21. yüzyılda teknolojinin ve sanayileşmenin hızlı bir şekilde gelişmesi aynı zamanda dünya genelinde yaşanan çeşitli hadiseler (savaşlar, salgın hastalıklar vb.) insanların enerjiye olan ihtiyacını çok fazla artırmıştır. Bu hızlı gelişim ve yaşanan olaylar enerji kaynaklarının kısıtlı olmasından dolayı beraberinde enerji problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ülkeler bu problemi çözmek için yenilenebilir enerji gibi çeşitli enerji üretme yöntemlerini kullanmakla birlikte son zamanlarda elimizde bulunan enerjinin daha verimli kullanılması konusu gündeme gelmiştir. Mevcut enerji kaynaklarının daha etkili şekilde kullanılması düşüncesiyle birlikte enerji verimliliği kavramı hayatımıza girmiş bulunmaktadır.

Son yıllarda neredeyse üretilen bütün endüstriyel ürünler enerji verim sınıflarına göre üretilmekte ve bu şekilde sınıflandırılmaktadır. Elektrik enerjisi tüketim miktarlarını incelediğimizde, elektrik motorlarının tüketim olarak endüstriyel, ticari ve konut alanlarında çok büyük tüketime sahip elektrikli aletler arasında bulunduğu gözlenmektedir. Kullanılan elektrik motorlarına bakıldığında ise asenkron motorlar oldukça büyük paya sahiptir. Yapılan araştırmalar neticesinde bu motorların verimlerinde yapılacak olan küçük bir iyileştirmenin dahi yıllık enerji tüketiminde büyük kazançların elde edilmesinin mümkün olduğu görülmektedir [1].

Yıllardır kullanılan asenkron motorlar, sağlam mekanik yapısı, düşük maliyeti ve az bakım gerektirmesi gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat rotorda bulunan sargılar, bakır ya da alüminyum çubuklar asenkron motorlarda birçok dezavantaja yol açmaktadır. Rotor çubuklarındaki akım nedeniyle sıcak çalışması; rotor kayıplarını arttırmakta ve bu rotor kayıpları IM'deki tüm kayıpların yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Bu kayıplar ayrıca motor veriminin düşmesine de neden olacaktır. Bu kayıpların bir sonucu olarak, rotor sıcaklığının yükselmesiyle birlikte

rulmanlarda arızalar görülebilir. IM'lerde en yaygın görülen arızalardan biridir. Ayrıca IM'lerde rotor çubuklarında mekanik arızalarda görülebilir, bu da motorun güvenilirliğini azaltmaktadır [2].

Senkron relüktans motorların rotorunda sargı ya da çubuklar bulunmadığından rotorlarında ısınma olmaz ve daha düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Ayrıca bu rotor kayıplarının daha az olacağı ve verimlerinin yüksek olacağı anlamına gelmektedir. SynRM'ler IM ile aynı stator yapısına sahip olmalarından dolayı aynı üretim bandında üretilmeleri mümkündür buda maliyeti düşüren etkilerden birisidir. Senkron relüktans motorların olumsuzlukları olmakla birlikte rotor tasarımı, manyetik çelik türü, stator sarım konfigürasyonlarında veya hata tolerans kontrolünde (FTC) yapılacak olan iyileştirmelerle birlikte daha verimli bir yapının oluşturulması mümkündür [3].

Bu sebeplerden dolayı asenkron makinelerle göre verimleri daha yüksek olan ve son yıllarda giderek popülerliği artan senkron relüktans motorlar ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar asenkron motorlara alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Senkron relüktans motorlar, asenkron motorlar ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar ile benzer stator yapısını kullanması, asenkron motorlar gibi rotorunda iletken bulundurmamasından rotor bakır kayıplarının olmaması ve üzerinde maliyeti yüksek olan mıknatıslara ihtiyaç duymadan yüksek verimlere çıkabilmesinden dolayı asenkron motorlara en iyi alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.1. Literatür Taraması

Relüktans kavramı literatürde 1800'li yıllarda ortaya çıkmasına rağmen [4] günümüzde senkron relüktans motorlar (SynRM) ile ilgili birçok çalışmanın başlangıç noktasını oluşturacak olan ilk çalışma 1923 yılında J.K. Kostko tarafından ele alınan çalışma olmuştur. Çok bariyerli ve parçalı rotor geometrisinin temellerinin oluşturulduğu bu çalışmada Kostko, moment üretiminin akı bariyerlerinin düzgün tasarlanması sayesinde artırılabilceği önermesinde bulunmuştur fakat bu çalışmasını pratikte gerçekleştirememiştir [5]. Bu çalışmadan sonra, rotor tasarımının karmaşık, güç faktörünün asenkron motorlara göre düşük olması ve başlatma sorunu yaşanması

gibi nedenlerle senkron relüktans motorlar ile ilgili uzun yıllar çalışma yapılmamıştır [3,6]. Alan sargılarının olmadığı ve çıkıntılı bir kutup rotoruna sahip Kostko tasarımı Şekil 1.1(a)'da görülmektedir.

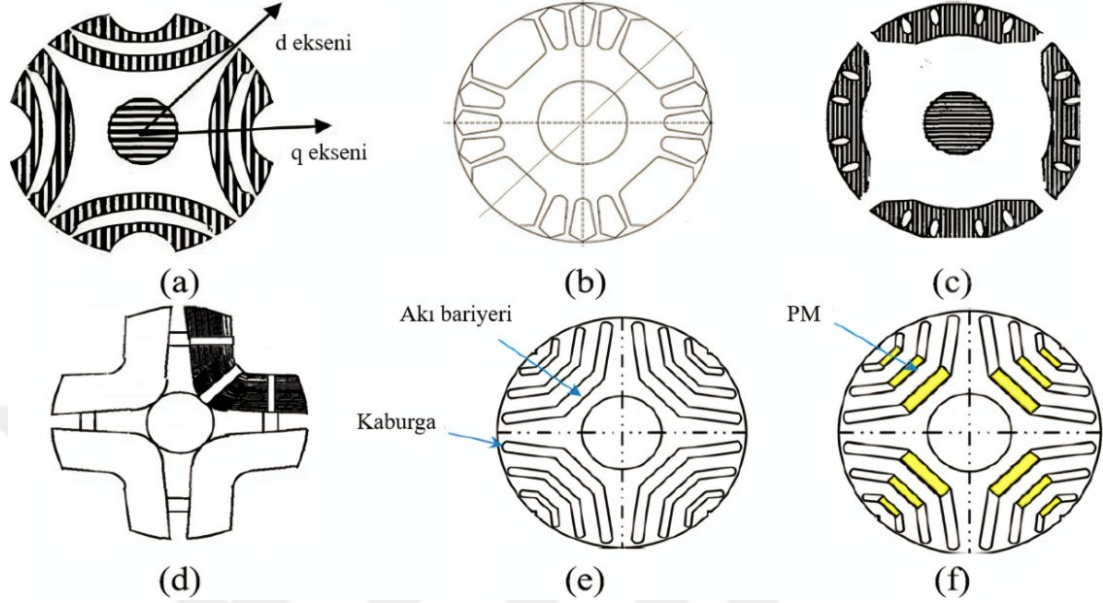
Şekil 1.1(b)'de görülen SynRM'un rotoruna ilişkin ikinci geometri 1930 yılında geliştirilmiştir. IM'ların rotorundan birkaç dişin çıkarılmasıyla elde edilen rotor tasarımında çıkıntı oranının az olmasından dolayı bu SynRM'lerin güç faktörü ve verimleri daha düşüktür. 1960 yılında geliştirilen parçalı rotor yapısına sahip SynRM Şekil 1.1(c)'de görülmektedir [7]. Rotor kafesi yerine yumuşak yol verme sisteminin kullanıldığı bu SynRM, çıkıntı oranı olarak önceki tasarımların yaklaşık beş katı kadar olmasına rağmen güç faktörü ve verimlilik hala düşüktü aynı zamanda üretim maliyeti de sorun teşkil etmeye devam ediyordu [3].

Değişken frekanslı sürücülerin kullanıldığı sonraki yıllarda SynRM'lerin doğru analiz edilmesiyle daha iyi motor tasarımlarının yapımına başlanmıştır. 1960 ve 1980 yılları arasında Eksenel Laminasyonlu Anizotropi (ALA) ve Enine Laminasyonlu Anizotropi (TLA) yapısı üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir [8-10].

1971 yılında çelik laminasyon levhalar kullanılarak Şekil 1.1(d)'de, "u" veya "v" şeklindeki eksenel laminasyonlu rotor geliştirilmiştir [8]. Eksenel laminasyonlu rotora sahip SynRM'deki çıkıntı oranının büyük olması bu motorları diğer makinelerin alternatifi haline getirmiş olsa bile üretim maliyetleri yüksek ve tasarımları oldukça karışıktı. Daha sonra bu sebeplerden dolayı Şekil 1.1(e)'de gösterilen birkaç akı bariyerinden oluşan enine laminasyonlu rotor geliştirilmiştir [11,12].

Enine laminasyonlu rotora sahip olan SynRM'lerde kaçak akının eksenel laminasyonlu rotora sahip SynRM'lerden daha yüksek olmasından dolayı Enine laminasyonlu rotorların çıkıntı oranları daha düşüktür. Akı bariyerlerine sahip rotorların üretimi IM'lar kadar basit olduğundan akı bariyerli rotora sahip SynRM'nin seri üretimi önceki SynRM'lere göre daha kolaydır aynı zamanda akı bariyerleri için uygun bir geometri kullanmak suretiyle motor performansının optimize edilmesi mümkündür. Ayrıca, bu SynRM'nin performansı rotor akı bariyerlerine Şekil 1.1(f)'de

sarı ile gösterildiği gibi ucuz kalıcı ferrit mıknatıslar yerleştirilerek daha da geliştirilebilir [13].



Şekil 1.1. (a) Kostko rotor, (b) Birkaç dişi çıkarılmış asenkron motor rotor, (c) İzole parçalı rotor, (d) Eksenel laminasyonlu rotor, (e) Sabit mıknatıssız rotor ve (f) Sabit mıknatıslı rotor [3].

Yine SynRM'nin performansını geliştirmek üzere, akı bariyerlerine ilişkin optimal geometrilerin bulunmasına yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır. Palmier ve ark., Wang ve ark. akı bariyerlerinin ve stator oluklarının sayısının SynRM'nin optimal tasarımındaki etkisini incelemiştir. Tork dalgalanmasının en yüksek iki akı bariyeri ile elde edildiği kanıtlanmıştır [14,15].

Sanada ve ark., SynRM performansının daha da geliştirilmesi için asimetrik bir akı bariyeri (rotor olukları arasındaki açıklığın eşit olmadığı) tasarımı önermiştir. Önerilen tasarımıdaki tork dalgalanması, simetrik tasarıma kıyasla yaklaşık %80 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, ortalama tork değerinde değişme olmamıştır [16].

Bacco ve Bianchi, ortalama torku düşürmeden tork dalgalanmasını minimize ederek akı bariyerinin konumunun belirlenebileceği analitik bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde tork dalgalanmasına en çok sebep olan MMK harmonikleri dikkate alınmış diğer harmonikler dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak daha basit olan bu analitik

modelde rotor akı bariyerleri için gereken geometrinin belirlenebileceği kapalı bir denklem türetilmektedir [17].

Babetto ve ark., SynRM'lerin yüksek hızlardaki performansının optimizasyonunda kırıışlerin kalınlığı, akı bariyerlerinin konumları ve uçları gibi rotor geometrilerini incelemişlerdir. Çıkış gücünün, 37.500 rpm'ye kadar arttığı ve sonrasında azaldığını kanıtlamışlardır [18].

Boglietti ve ark. IM ile enine laminasyonlu senkron relüktans motorların tork davranışını karşılaştırmışlardır. Çalışmada motor boyutuna ve asenkron motorun rotor kayıplarına bağılı olarak, senkron relüktans motorun kendine karşılık gelen IM'dan %10 ile %25 daha fazla tork verdiğini göstermiştir [19].

Vagati ve ark. SynRM'ler ile ilgili temel problemleri incelemiş, farklı rotor yapıları arasında en uygun rotor yapısını tespit ederek genel durumda maksimum tork tasarımı gösterilmiştir [20].

Cupertino ve ark. SynRM'lerin tasarımını sonlu elemanlar yöntemi ve çok amaçlı optimizasyon algoritmaları (MOGA) aracılığıyla ele alarak rotor geometrisinin tasarımı üzerine odaklanmışlardır. Üç katmanlı rotor yapısının belirli sayıda stator yuvası için en iyi eşleşme olduğu belirtilmiştir [21].

Cupertino ve ark. SynRM'leri tasarlamak ve otomatik olarak tasarlanan SynRM'den, PM destekli veya IPM makinesi elde etmek için otomatik bir tasarım prosedürü tanıtmaktadır. Prosedür, Sonlu Elemanlar Analizi ve çok amaçlı genetik algoritmaya (MOGA) dayanmaktadır. Her bir potansiyel çözümü tanımlamak ve optimizasyon sürecini hızlandırmak amacıyla kullanılan parametre sayısını en aza indirmek için basit bir rotor geometrisi seçilmiştir. Deneysel sonuçlar, basit geometriye rağmen, otomatik olarak tasarlanan makinenin daha karmaşık tasarımlardan biriyle karşılaştırılabilir bir torka sahip olduğunu ve daha düşük bir tork dalgalanması sağladığını göstermektedir [22].

Salah ve ark. üç farklı SynRM için elektromanyetik performansın tasarımı, analizi ve karşılaştırılmasını ele almışlardır. Öncelikle rotor akı bariyer sayılarının tork performansı üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Sonuçlar, üç ve dört akı bariyerine sahip 24 oluk/4 kutuplu makinelerin neredeyse aynı torka sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, üç akı bariyerinin en düşük tork dalgalanmasına sahip olduğu belirtilmiştir. Akı bariyer sayılarının arttırılmasının, 12 oluk/4 kutuplu makine için ortalama torkta gözle görülür bir artışa yol açtığı ortaya konmuştur. Buna ek olarak, en iyi tork dalgalanmasının, üç akı bariyerinde olduğu gözlenmiştir [23].

Pellegrino ve ark. MOGA ve SEY'e dayanan Senkron Relüktans Motorlarının otomatik tasarımını ele almışlardır. Bu çalışmada etkili, sınırlı bir girdi değişken kümesi tarafından tanımlanan üç tür bariyer şekli dikkate alınmaktadır. Geometrilere hangisinin en iyi tork çıkışını verebileceğini ve ayrıca hangisinin çıktı performansı ile hesaplama süresi arasındaki en iyi uzlaşmayı gösterdiğini belirlemek için üç çözüm araştırılmaktadır. Makalede sunulan analiz, otomatik olarak tasarlanan Senkron Relüktans motorlarının iyi bir performans verebileceğini, makul bir sürede tasarlanabileceğini ve tüm tasarım serbestlik derecelerinin motor performansı açısından yararlı olmadığını göstermektedir [24].

Cupertino ve ark. optimizasyon algoritmaları yardımıyla, yüksek hızlı uygulamalar için SynRM'lerin elektromanyetik ve yapısal ortak tasarımını ele almışlardır. Bu çalışmanın amacı, iki yönlüdür. İlk olarak, çelik özelliklerinin yüksek hızlı SynRM'lerin performansını nasıl etkilediğini nicel olarak belirlemek için üç ticari elektriksel çelik sınıfı karşılaştırılmıştır. Ele alınan çelik sınıfları, iki kobalt-demir alaşımı ve yüksek dereceli yönlendirilmemiş silikon çeliktir. İkincisi, maksimum güç yoğunluğunu hedefleyen orijinal bir tasarım yöntemi önerilmektedir. Analiz sonuçları, ele alınan makine çıkış gücü için 70 krpm'ye kadar devir hızı ile büyüdüğünü göstermektedir. Bu hız sınırının üzerinde, performans yapısal sınırlamalar nedeniyle düşmektedir. Önerilen tasarım prosedürü, açık kaynak kodlu yazılım kullanılarak uygulanmaktadır [25].

Tahi ve ark. büyük rotorlu ve çok akı bariyerli senkron relüktans makinelerinin tasarımının optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada makinelerin torkunu ve güç faktörünü aynı anda iyileştirmeyi amaçlayan optimizasyon prosedürü, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) alan çözümleri ile birleştirilmiş döngüsel koordinat yöntemi kullanılmıştır. Optimize edilen rotor geometrilerinin boyutları ve akım açısının etkisini sağlayan bu iki makine tipine ilişkin optimizasyon sonuçları tartışılmaktadır [26].

Palmieri ve ark. stator oluklarının ve akı bariyer sayılarının farklı kombinasyonlarını dikkate alarak SynRM'lerin performanslarının karşılaştırmalı bir çalışmasını sunmuşlardır. Torku en üst düzeye çıkarmak ve tork dalgalanmasını en aza indirmek için çok amaçlı optimizasyon algoritması ve sonlu elemanlar analizi ile on sekiz SynRM örneği tasarlamışlardır. Karşılaştırma için; ortalama tork, tork dalgalanması ve demir kayıplarını temel almışlardır. Sunulan analizle, literatürde önerilen kriterler kullanılarak en iyi oluk/bariyer kombinasyonlarından bazılarının tahmin edilebilmesine rağmen, alışılmadık kombinasyonların makine performanslarını iyileştirebileceğine yönelik kanıtlar ortaya koymuşlardır [27].

Bao ve ark. yüksek hızlı SynRM rotoru için demir kaburgaları (nervürleri) olmayan yeni bir yapı sunmuşlardır. Motor torkunu arttırmak amacıyla üç adet dört kutuplu SynRM tasarlanmış ve farklı kaburga konfigürasyonları için karşılaştırılmıştır. Önerilen motorun, demir kaburgalı geleneksel SynRM'ye göre gelişmiş tork, güç faktörü ve verimlilik gösterdiği ortaya konmuştur. Kaburgasız rotor geometrisinin kapsamlı bir hassasiyet analizi, ardından çalışma hızı aralığının üzerindeki sağlamlığını güvence altına almak için hem mekanik analiz hem de deneysel aşırı hız testi yapılmıştır. Bu yeni rotorun üretim prosedürü tanıtılmıştır. Son olarak, önerilen çözümün tork, güç faktörü ve verimliliğindeki artışı gösteren her iki SynRM prototipi üzerindeki deneysel sonuçlar sunulmuştur [28].

Cupertino ve ark. SynRM'lerin otomatik tasarımını sonlu elemanlar analizi ve çok amaçlı optimizasyon algoritması (MOGA) ile ele almışlardır. Araştırmada, senkron relüktans motorların tasarımının kilit yönü olan rotor geometrisinin tasarımına odaklanılmıştır. Çalışmada, birkaç popüler MOGA'nın performansını ve ayarlarının

nihai tasarımın kalitesi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Optimizasyon sürecinin hesaplama yükünü en aza indirmek için bir prosedür tanıtılmış ve ilk kez beş katmanlı bir rotora uygulanmıştır. Tasarım prosedürünün uygulanabilirliğini göstermek için bir rotor prototipi oluşturulmuştur [29].

Ferrari ve Pellegrino SynRM tasarımında modelin genelliğini azaltmadan hassasiyeti artırmak amacıyla analitik modelin hatalarını düzeltmek için birkaç statik SEY model benzetimi kullanılarak tasarım denklemlerine dayanan kapsamlı bir tasarım prosedürü incelemişler ve iyileştirilmeler yapmışlardır. İyileştirmeler ile hesaplama süresini arttırmadan ve analitik modelin genelliğini koruyarak model doğruluğunun artırılması amaçlanmıştır. Orijinal modele yapılan ilk iyileştirme, demir doygunluğu etkisi ile ilgilidir. Ekstra hesaplama çabası olmadan performans tahmini hassasiyetini arttıran, basitleştirilmiş eşdeğer bir devreye dayanan basit bir denklem eklenmiştir. İkinci iyileştirme, SEY ile analitik modelin geliştirilmesidir. Bu strateji, modelin genelliğini koruyarak ve sınırlı bir hesaplama süresi artışı ile tahmin hatalarının giderilmesini sağlamaktadır. Tüm iyileştirmeler, SEY analizleri kullanılarak karşılaştırmalı değerlendirme ile doğrulanmıştır [30].

Muteba ve ark. eksenel yönde sinüzoidal rotor laminasyon şekline sahip bir SynRM önermişlerdir. Önerilen motorun tasarım yaklaşımı açıklanmış ve yüksek ortalama torku korurken tork dalgalanmasını azaltma hedefine ulaşılmıştır. Akı bariyerlerinin geometrik miktarlarını optimize etmeden, 30° elektrik akım uzay vektör açısı ile %12,58 tork dalgalanma faktörü elde edilmiştir. Önerilen model, stator oluşuna bağlı olarak baskın 12. tork harmonik düzeninin 30° ve 45° elektrik akım vektör açısında yarıdan fazla azaltılmasının sonucu olarak bazı tork harmonikleri ortadan kaldırılmıştır. Önerilen modelin, akı bariyer geometrisinin tasarım optimizasyonu ile birleştirilmesiyle %10'dan daha düşük tork dalgalanma faktörü elde edilebilmiştir [31].

Yammine ve ark. akım harmoniklerinin senkron relüktans makinelerin ortalama torku ve tork dalgalanması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İndüktans ve akım harmoniklerini entegre eden senkron relüktans makinesinin elektromanyetik modeli geliştirilmiştir. SynRM'nin incelenen TLA tasarımı için indüktans harmoniğinin temel

bileşene kıyasla ihmal edilebilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sonuçlar SynRM'nin ortalama torkunu gözle görülür bir şekilde etkilemeden, tork dalgalanmasının %4'ün altına düşürülebileceği gösterilmiştir [32].

Wang ve ark. tork dalgalanmasını azaltmak için SynRM'ler için asimetrik akı bariyeri optimizasyon tasarımı sunmuşlardır. Çalışmada asimetrik akı bariyerli bir veya ikiden fazla eksenel lamine rotor kullanarak senkron relüktans makinelerinin ortalama torkunu azaltmadan, tork dalgalanmasını azaltmak amaçlanmıştır. Bunun için, rotorda üst üste binen sargılara ve asimetrik akı bariyerine sahip, 24 oluklu, dört kutuplu senkron relüktans makinesi, önce ortalama torku en üst düzeye çıkarmak için SEY ile tanımlanmış ve tasarlanmıştır. Tork dalgalanmasını en aza indirmek için kutup açıklık açısı ve akı bariyer açısı da dahil olmak üzere asimetrik akı bariyerinin boyutları optimize edilmiş ve ortalama tork üzerindeki etkisi de SEY analizi ile incelenmiştir. Akım açısının ortalama tork ve tork dalgalanması üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Senkron relüktans makinelerde asimetrik akı bariyeri kullanarak ortalama tork azalmadan tork dalgalanması önemli ölçüde azaltılabilir sonucuna varılmıştır [33].

Lange ark. SynRM'de tork dalgalanmasını azaltmak için rotordaki bariyerlerin uygun açılarda yerleştirilmesi yöntemini önermişlerdir. Uygun açı ve bariyer sayısı sonlu elemanlar yöntemiyle bulunmuştur. 4 bariyerli rotor tasarımında 24-36 oluklu stator karşılaştırmasını yapmışlar ve en az tork dalgalanması 36 oluklu stator tasarımında meydana gelmiştir [34].

Azizi ve Vahedi stator geometrisi parametrelerinin SynRM'nin karakteristiği üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Stator tasarım değişkeninin SynRM'nin karakteristiği üzerindeki önem düzeyi hem Taguchi yöntemi hem de parametrik analiz kullanılarak belirlenmiştir. Bir SynRM'nin 2 boyutlu Sonlu Eleman Modeli, bir duyarlılık analizi gerçekleştirmek ve deneyin bir Taguchi tasarımını oluşturmak için kullanılmıştır. SEY simülasyon sonuçları, önerilen Taguchi yöntemi kullanılarak, SynRM'nin performansının ilk tasarıma kıyasla önemli ölçüde geliştirilebileceğini doğrulamıştır [35].

Epemu ve ark. hat başlatmalı, üç fazlı konsantre çift sargılı senkron relüktans motorun (cDWSynRM) geleneksel konsantre sargılı senkron relüktans motor (cSynRM) ile karşılaştırmalı olarak geçici ve dinamik performans analizi sunmuşlardır. Her iki motorun performans özellikleri MATLAB/Simulink kullanılarak izlenmiştir ve önerilen kapasitif yardımcı hat başlatmalı cDWSynRM'nin cSynRM ile karşılaştırıldığında gelişmiş performans özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir [36].

Ban ve Stipetic altı kutuplu bir SynRM için metamodel tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı kullanarak en iyi değişkeni ve seçilen gereksinimleri belirlemeye çalışmışlardır. Bunun için farklı karmaşıklıklara sahip yedi rotor topolojisi üretmişlerdir. Aynı zamanda dikkate alınan tüm değişkenlerin en iyi özelliklerini birleştiren yeni bir değiştirilmiş Zhukovsky değişken derinlik topolojisi geliştirilmiştir. Tüm değişkenlere aynı optimizasyon stratejisi uygulanmış ve nihai sonuçlar, bariyer tipinin makinenin nihai performansını önemli ölçüde etkilediği kanıtlanmıştır. En iyi sonuçların, değiştirilmiş Zhukovsky değişken derinlik topolojisi ile elde edildiği görülmüştür. En iyi topolojiyi belirlemek için farklı sayıda bariyer tipi (3, 4 ve 5) kullanan ek bir çalışma yapılmış ve en iyi sonuçlar dört bariyer tipiyle elde edilmiştir [37].

Credo ve ark. SynRM'ların statorunda ve enine lamine rotorunda uygulanan elektriksel çelik çekirdeğin genel manyetik özellikleri üzerindeki imalat streslerinin etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca, üretimde bozulmaya uğramış elektriksel çelik çekirdeğin iki farklı Senkron Relüktans Motorun elektromanyetik performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. İki çözüm (radyal oluklu rotor ve çok iç kaburgalı rotor) üzerindeki imalat etkilerinin bir karşılaştırması yapılmış ve tartışılmıştır. Sonuçlara bakıldığında SynRM'da, imalat etkilerinin uygulanan yüke bağlı olarak makinenin performansını etkileyebileceğini göstermiştir. SynRM'un üretim etkileriyle olası performans iyileştirmesinin esas olarak q eksen endüktansının güçlü bir şekilde azalmasından kaynaklandığı gözlenmiştir [38].

Yamamoto ve ark. SynRM'un rotorunda asimetrik bir akı bariyer yapısı kullanarak ortalama torku düşürmeden tork dalgalanmasını en aza indirmeye çalışmışlardır. Çeşitli akı bariyer konfigürasyonlarının tork performansı üzerindeki etkilerini incelemişler ve tork dalgalanmasını azaltmak için iki farklı akı bariyer yapısı asimetrik rotor yapısında laminasyon ile birleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, akı bariyer açısının harmonik bileşenlerin, özellikle 18. ve 36. harmonik bileşenlerinin tork dalgalanmasını, genliğini ve fazını etkilediği görülmüştür. İki akı bariyer tasarımına sahip asimetrik bir rotor yapısı önerilmiş, her model için 18. ve 36. harmonik bileşenleri iptal eden iki farklı akı bariyeri yapısının birleştirilmesiyle tork dalgalanması büyük ölçüde azaltılmıştır [39].

Mohanarajah ve ark. SynRM'un rotor tasarımını analitik ve SEY kullanarak yeniden ele almışlardır. Çalışmada, geliştirilmiş güç faktörü ve mükemmel doygunluk ve tork dalgalanma etkileri ile yüksek verimli SynRM'ye odaklanmışlardır. Rotor, optimum akı bariyeri şekilleri ile tasarlanmış ve daha sonra SynRM'nin performans parametrelerini iyileştirmek için akı bariyeri boyutlarına, akı bariyerlerinin sayısına ve akı bariyerlerinin optimum yerleşimine odaklanılmıştır. Çalışmanın sonunda, makinenin güç faktörünün (PF), tork yoğunluğunu ve çıkıntı oranını etkilemeden q eksenli yalıtım oranını en aza indirerek optimize edilebileceği bulunmuştur. Araştırmada ayrıca bariyer uç dolgusunun (barrier end fillet) PF ve tork üzerinde büyük bir etkisi olduğu da görülmüştür. Ayrıca simülasyon, PF'nin akım ve akım açısına da bağlı olduğunu göstermektedir. Son olarak, doygunluk çalışması, radyal ve teğetsel kırıların makine performansı üzerindeki etkisini göstermiştir. Daha küçük bir kiriş boyutunun daha iyi performans sağladığı belirtilmiştir. Daha küçük kirişin daha hızlı doymasına rağmen, rotor yapısına mekanik kısıtlamalar getirdiği bu nedenle, daha küçük makineler için optimum kiriş boyutu önerilmiştir. Sonuçlar, makine parametrelerinin anma akımına kadar ve bu akımda önemli doyma etkisine sahip olmadığını göstermektedir. Ancak tork hariç diğer tüm parametrelerin aşırı doygunluktan etkilendiği görülmüştür. Bu çalışma aynı zamanda rotor boyut optimizasyonunun uygun kontrol yöntemiyle birlikte SynRM'nin performansını iyileştirebileceğini bulmuştur [40].

Özçelik ve ark. üç farklı güç kademesinde (2,2 kW, 4 kW ve 5,5 kW) referans indüksiyon motorlarına alternatif olabilecek senkron relüktans motorların tasarımını ve karşılaştırmasını yapmışlardır. Başlangıçta referans indüksiyon motorları için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Motorların statorları aynı tutulmuş ve rotorlar indüksiyon motorlarının çıkış gücü gereksinimlerini karşılamak için yeniden tasarlanmıştır. Senkron relüktans motorlarına verimlilik, güç yoğunluğu ve üretim dikkate alınarak detaylı tasarım, analiz ve optimizasyon işlemleri uygulanmıştır [41].

Boztaş ve ark. Ultra-Premium verimliliğe sahip IE5 sınıfında bir SynRM optimal tasarımını sunmuşlardır. Motor, SEY için MAGNET yazılımı ve optimizasyon için MATLAB kullanılarak tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Kararlı durum çalışmasında maksimum tork ve minimum tork dalgalanması elde etmek için çok amaçlı bir optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Stator oluğu dış genişliği, rotor ağ kalınlığı ve rotor akı bariyerleri optimize edilmiş ve optimizasyon sırasında diğer parametreler sabit tutulmuştur. Optimize edilen motor, verimlilik için MotorSolve programında PWM analiz yöntemi kullanılarak da analiz edilmiştir. IEC TS 60034-30-2:2016 raporuna göre, tasarlanan motor IE5 verimlilik sınıfında belirlenmiştir [42].

Solak ve Öner asenkron motorla aynı stator yapısına sahip yeni bir SynRM tasarlamışlardır. Tasarlanan yeni rotorla kayıpların azaltılması verimin ise artırılması hedeflenmiştir. Rotor laminasyonu üzerinde yapılan analizler sonucunda 4 bariyerli yapının daha verimli olduğuna karar verilmiştir. IEC standartlarına göre IE1 verim sınıfında bulunan asenkron motorun yeniden tasarlanan SynRM ile IE4 verim sınıfına yükseldiği gözlenmiştir [43]. Benzer bir çalışmada; Ersöz ve ark. 15 KW'lık TLA rotor tipine sahip SynRM ile IM karşılaştırmasını yaparak verim değerinde %3'lük bir yükselme ve moment dalgalanmasında yaklaşık %8'lik iyileştirme sağlamışlardır [4].

Özdil ve Uzun 22 kW Enine Lamine Anizotropik (TLA) tip SynRM'nin performansına akımın faz açısı, akı bariyer sayıları, bu bariyerlerin başlangıç çapı, radyal ve teğetsel kırımların etkilerini SEY ile incelemişlerdir. Bu SynRM için en uygun rotor geometrisini elde ettikten sonra, nihai tasarımı aynı boyuta, aynı güce ve hemen hemen aynı çıkış torkuna sahip bir IM ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda 22 kW

Asenkron Motorun, SynRM'lerin esas dezavantajı olan tork ve tork dalgalanması açısından SynRM'den daha iyi olmasına rağmen, yeni SynRM'un verimlilikte %5,76'lık bir iyileşme sağladığını belirtmişlerdir [44].

Akar ve Gerçekcioğlu SEY ile manyetik ve mekanik tasarımı optimize edilmiş aynı zamanda deneysel olarak doğrulanmış Eksenel Akılı SynRM' un farklı yüklerdeki termal davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonunda en yüksek sıcaklığın sargı sonlarında olduğu görülmüştür [45].

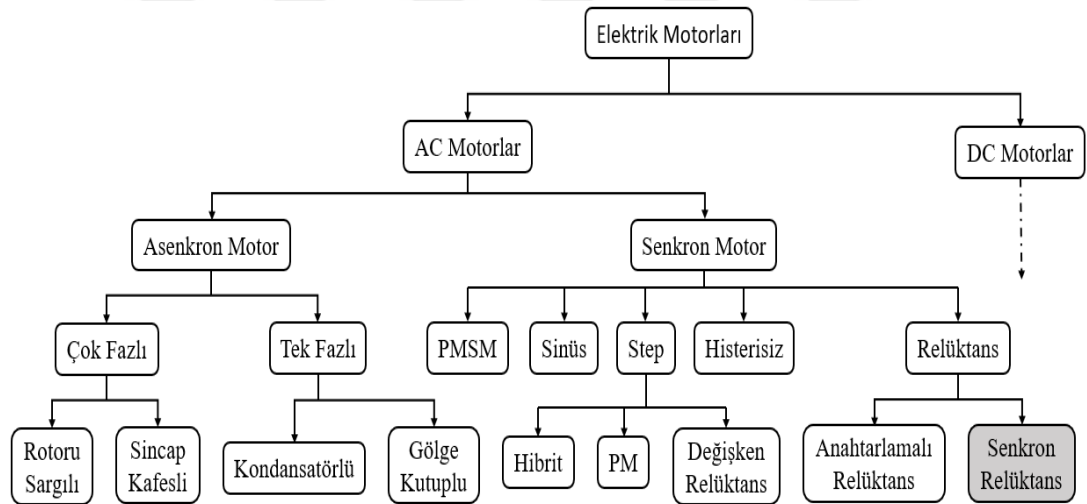
Credo ve ark. elektrikli bir aracın hızlanma süresine ve maksimum hızına göre bir elektrik motorunun gereksinimlerini tanımlamak için yüksek hızlı bir araç ve şehir içi bir araç için Senkron Relüktans Motor teknolojisi yaklaşımıyla yenilikçi bir motor tasarımı önermişlerdir. Bunun için bir prototip gerçekleştirilmiş ve tamamen test edilmiştir. SynRM' un elektrikli şehir otomobili için iyi bir seçenek olduğu, yüksek performanslı araç düşünüldüğünde ise maksimum güç açısından makinenin aşırı boyutlandırılması gerektiği görülmüştür. Bununla birlikte, makine gücünün aşırı boyutlandırılmasını kabul ederek, karmaşık tasarım prosedürleri ve birkaç optimizasyon adımı gerekli olsa bile, yüksek performanslı elektrikli araçların getirdiği gereksinimleri karşılamak hala mümkün olmaktadır [46].

Boztaş ve ark. fotovoltaik panellerin ürettiği düşük gerilimli yüksek verimli bir SynRM tasarlamışlardır. Tasarlanan motorun verimi yaklaşık olarak %85 olarak hesaplanmıştır [10]. Farklı bir çalışmada; Aydoğmuş güneş panellerinin ürettiği düşük gerilim ile su altında çalışabilen pompa motoru olarak kullanılacak olan yüksek verimli bir SynRM yapısı tasarlamıştır [47].

BÖLÜM 2. SENKRON RELÜKTANS MOTOR (SynRM)

2.1. Genel Bilgiler

Elektrik motorları genel itibariyle Şekil 2.1’de gösterildiği gibi AC ve DC motorlar olmak üzere iki grupta incelenmektedir. SynRM, elektromekanik enerji dönüşümü üretmek için relüktans prensibini kullanan bir rotora sahip Senkron Motor ailesinden AC bir makinedir. SynRM, geleneksel çıkıntılı kutuplu senkron motora benzer, ancak asenkron makinaya benzer bir statora sahiptir ve rotor üzerinde bir uyarma sargısı yoktur [36].



Şekil 2.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması [48-50].

Elektrik motorları, tüm sektörlerde ve geniş bir uygulama yelpazesinde kullanıldıkları için açık ara en önemli elektrik yükü türüdür. Gelişmiş ülkelerde tüketilen elektriğin yarısından fazlasını elektrik motorları kullanır; tipik olarak motorlar, endüstriyel sektördeki elektriğin %60 ile %80'ini ve üçüncül sektördeki elektriğin yaklaşık %35'ini tüketir. En büyük kısmı geleneksel senkron ve asenkron motorlar tarafından

tüketilmekte ancak aynı zamanda sektörde yeni motor tipleri ortaya çıkmaktadır. Hem sürücü performansı hem de verimliliği iyileştirilebilen sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) ve senkron relüktans motorlar bunlara örnek verilebilir [51].

SynRM'nin bakır veya alüminyum çubuk ve mıknatıs içermeyen rotor tasarımı, rotorunun soğuk çalışmasını sağlar. Bunun sonucunda, SynRM'ler özellikle düşük hızlardaki yüklenebilirliği yüksektir. Bu motorun yüklenebilirliği, nominal torkun 2,5 katı kadardır. Bu kalkış torkuna soğuk çalışma sayesinde kısa bir sürede erişilebilir. Tork yoğunluğunu artırmak için, yıldız-üçgen sarım şekli, nominal koşullarda geleneksel yıldız sarım şekline göre %5,2 daha yüksek tork yoğunluğu sağlayabilmektedir. Geçmişte, SynRM'ler konusunda sadece tork yoğunluğuna dikkat edilirken, son zamanlarda bu motorlar endüstri için oldukça verimli bir seçim olarak kabul edilmektedir. Rotorda çubuk olmaması nedeniyle, demir kaybı neredeyse ortadan kalkmakta, bu da motorun oldukça verimli çalışmasını sağlamaktadır. Öte yandan, SynRM'nin bazı ciddi dezavantajları da vardır. Bu teknolojiye güç faktörü oldukça düşüktür [2]. Senkron relüktans motorun avantaj ve dezavantajları Tablo 2.1' de verilmektedir.

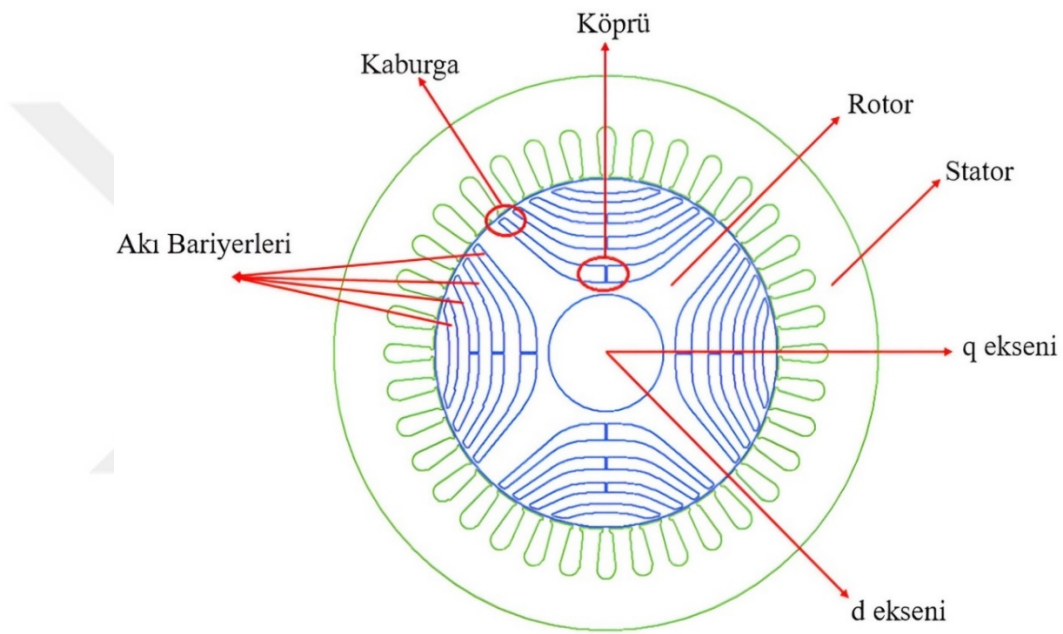
Tablo 2.1. Senkron Relüktans Motorun avantaj ve dezavantajları [19,36,50-53].

Avantajları	Dezavantajları
+ Yapısının basit ve imalatının kolay olması.	- Sürücü sistemine gereksinim duyması.
+ Dayanıklı yapısından dolayı yüksek hızlı uygulamalar için kullanılabilir olması.	- Moment dalgalanmasının yüksek olması.
+ Çıkık kutuplu yapısının sağlam olması nedeniyle yüksek hızlı uygulamalarda kullanım için uygun olması.	- Düşük hız aralığı olması.
+ Soğuk rotorlu makinelerdir, rotorlarında ısınma problemi olmaması sebebiyle mekanik bakım sürelerinin uzun olması.	- Çıkış gücünün düşük olması.
+ Üretilen elektriksel momentin rotor sıcaklığından bağımsız olması.	- Güç faktörünün düşük olması.
+ Rotorunda mıknatıs olmadığından demagnetizasyon problemi olmaması.	
+ Mıknatıslı makinalara göre daha ucuz olması.	
+ Rotorunda sargı, bakır yada alüminyum çubuk bulunmaması sebebiyle rotor kayıplarının çok düşük olması.	
+ Rotor kayıplarının az olmasından dolayı yüksek verimli olması.	

Tablo 2.1. Devamı

+	Yüksek tork yoğunluğuna sahip olması.
+	Düşük ataletle sahip olması.
+	Enkodersiz hız kontrolünün kolay olması.
+	Yüksek ısılı uygulamalar için sürekli mıknatıslı motorlara göre daha avantajlı olması.

Şekil 2.2’de SynRM stator ve rotor kesiti verilmiştir. Verilen stator yapısı, rotor yapısı, akı bariyerleri, d ve q eksenleri, kaburga ve köprü yapıları görülmektedir.

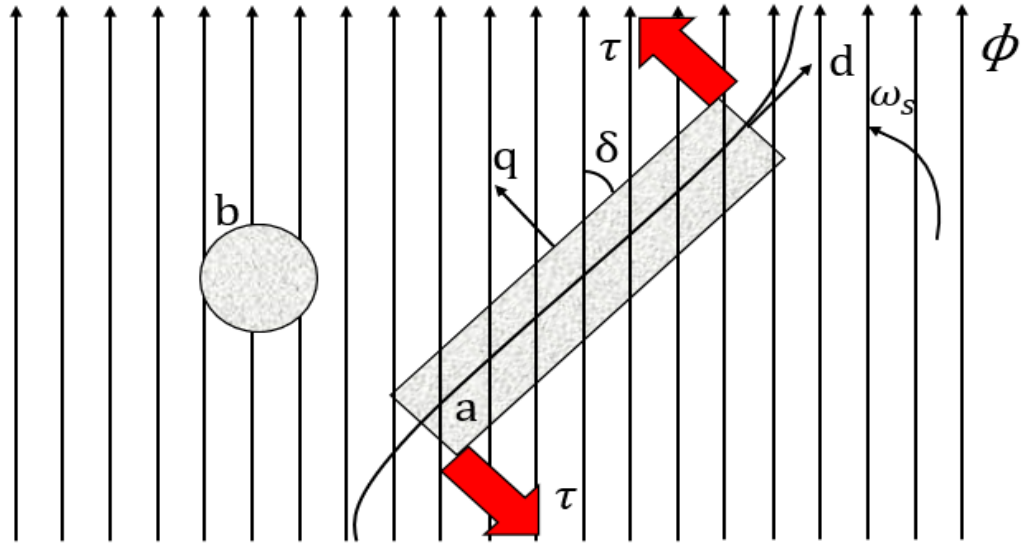


Şekil 2.2. TLA tipi SynRM'un kesiti.

Şekil 2.2’de görülen köprü ve kaburga yapıları hem mıknatıs destekli SynRM hem de SynRM’un rotor tasarımındaki önemli parametrelerdendir. Kaburga yapısı akı bariyerlerini rotora bağlayan ve akı bariyerlerinin uç kısmında bulunan yapıdır. Bu yapının olmaması ideal durumdur fakat mekanik açıdan böyle bir durumun mümkün olmadığı bilinmektedir [20,50]. Çıkış momenti üzerinde kaburga kalınlıkları direk bir etkiye sahiptir bu sebeple rotorun çalışma hızına dayanabilecek kalınlıkta ve manyetik akının geçemeyeceği kadar ince olmalıdır. Tasarımda dikkat edilmesi gereken durumlardan biride köprü yapısıdır. Köprü yapısı rotorun devir sayısına bağlı oluşan merkezkaç kuvvetlerinden dolayı akı bariyerlerinin yapısının bozulmasını önlemektedir [50].

2.2. Senkron Relüktans Motor Çalışma Prensibi

Adından da anlaşılacağı gibi, SynRM relüktans torkunu, manyetik direnç olarak da adlandırılan manyetik relüktansın değiştirilmesiyle üretmektedir. Manyetik akı en düşük seviyedeki manyetik dirence akar. Bu nedenle, stator tarafından üretilen akı, rotordaki en düşük manyetik direncin olduğu yere doğru akar. Rotor, akı ile aynı yöndeysse, relüktans torku rotoru minimum manyetik direnç yönünde döndürür. Bu durumda, çıkıntı oranı (L_d/L_q) manyeto motor kuvvete (MMK) neden olur ve relüktans torku rotoru döndürür [2]. Senkron relüktans motor moment üretmek için relüktans kavramını ve İndüksiyon Motorlarda olduğu gibi döner sinüzoidal MMK kavramını kullanır. Relüktans kavramı Şekil 2.3'te gösterildiği gibi açıklanabilir [54].



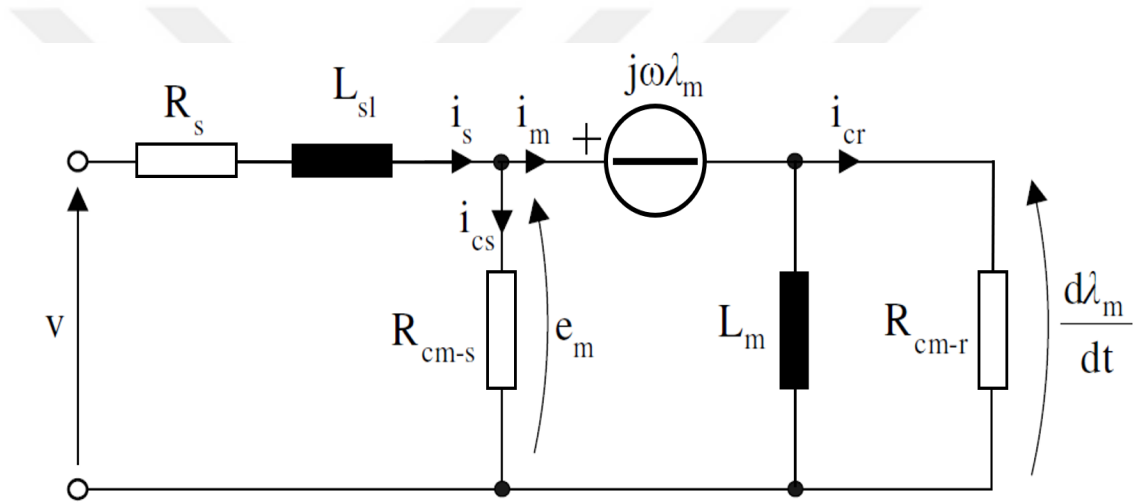
Şekil 2.3. Manyetik alan ve relüktans tork üretim mekanizması içinde bulunan anizotropik geometriye sahip (a) nesnesi ve izotropik geometriye sahip (b) nesnesi [49,50,55-57].

Şekilde verilen (a) cismi d -ekseninde ve q -ekseninde farklı relüktansa sahip manyetik malzemeyi, (b) cismi ise her yönde aynı relüktansa sahip manyetik malzemeyi göstermektedir. d -ekseni ile manyetik alan (ϕ) arasında eğer bir açı (δ) farkı varsa (a)'ya uygulanan manyetik alan tork üretir. (a) cismi, d eksenini ile alan hizalı değilse, manyetik alanda bozulmaya sebep olacaktır. Temel manyetik alandaki bozulmanın yönü, q -ekseni boyunca uzanır [49].

SynRM stator oluklarına dağıtılmış olan sargılardan geçen stator akımıyla manyetik alan üretir. Bu durumda rotordan hiçbir şekilde akım geçmemektedir. Rotor herhangi bir manyetik alan üretmediğinden dolayı statorun oluşturmuş olduğu manyetik alan ile kendisini hizalamaya çalışır ve hizalandıktan sonra senkron hızda dönmeye başlar [54].

2.3. Senkron Relüktans Motor Eşdeğer Devre ve Matematiksel Modeli

Şekil 2.4'te SynRM'nin demir kayıplarını içeren eşdeğer devre modeli ve Şekil 2.5'te ise demir kayıplarını içeren vektör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. SynRM'nin demir kayıplarını içeren eşdeğer devre modeli [49,50,54,57].

Şekil 2.4 dikkate alınarak SynRM'nin vektör denklemleri Denklem (2.1)-(2.4) yazılabilir.

$$v = e_m + R_s i_s + j\omega L_{sl} i_s \quad (2.1)$$

$$e_m = \frac{d\lambda_m}{dt} + j\omega\lambda_m \quad (2.2)$$

$$v = v_d + j \cdot v_q \quad (2.3)$$

$$i_s = i_{sd} + j \cdot i_{sq} = i_m + i_{cs} \quad (2.4)$$

Burada;

v : Stator gerilimi,

i_s : Stator akımı,

R_s : Sargı direnci,

L_{sl} : Toplam sargı kaçak indüktansı,

e_m : Stator sargısının EMK değeri,

i_{cs} : Stator demir akımı,

R_{cm-s} : Stator demir direnci,

ω : Referans elektriksel açısal hız,

λ_m : Hava boşluğu bağlantı akısı,

i_m : Mıknatıslanma akımı,

R_{cm-r} : Rotor demir direnci,

L_m : Mıknatıslanma endüktansı, ifade etmektedir.

Kararlı durumda $\left(\frac{d\lambda_m}{dt} \cong 0\right)$ 'dır. Burada tüm demir kayıpları stator tarafına transfer edilmiş ve (R_{cm-r}) ihmal edilmiştir [58-60].

SynRM'nin demir kayıplarını içeren vektör diyagramı Şekil 6'da verilmiştir.

Burada;

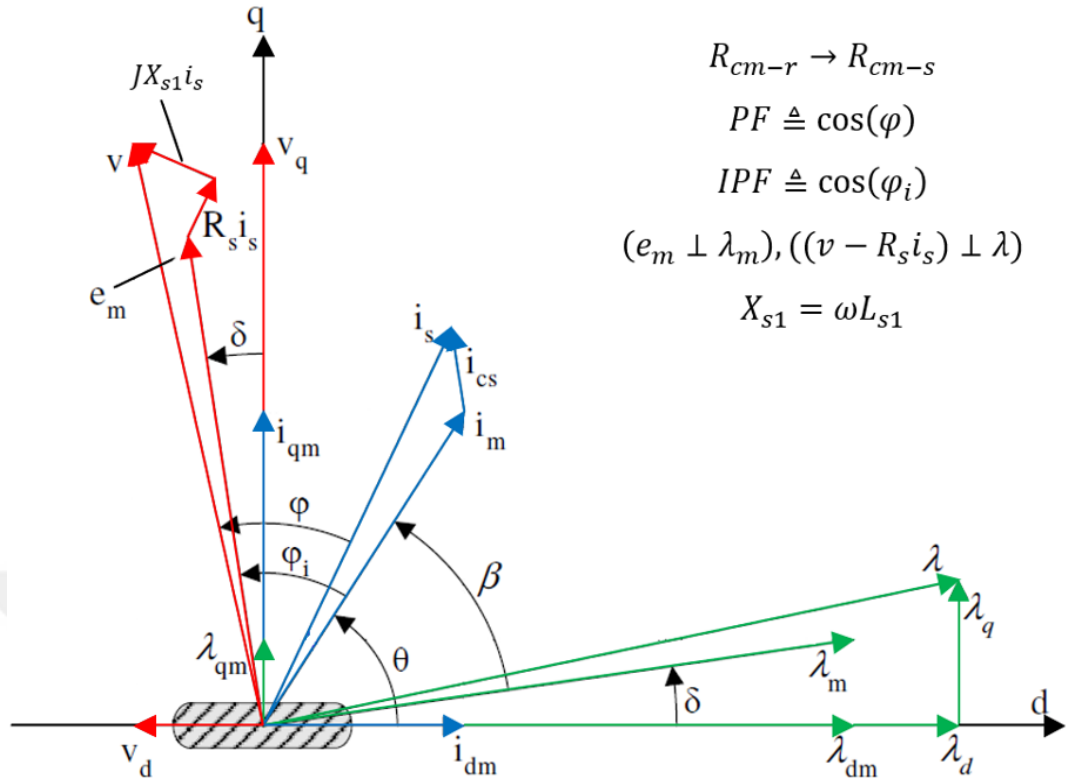
δ : d ve q -eksen akıları arasındaki açı (Yük açısı),

φ_i : Mıknatıslanma akımı ile mıknatıslanma gerilimi arasındaki açı (zıt EMK vektörü ile akım vektörü arasındaki açı),

φ : Stator akımı ile gerilimi arasındaki açı,

θ : d ve q -eksen mıknatıslanma akımları arasındaki açı (Akım açısı),

β : Akı ve akım vektörleri arasındaki açı (Moment açısı), ifade etmektedir.



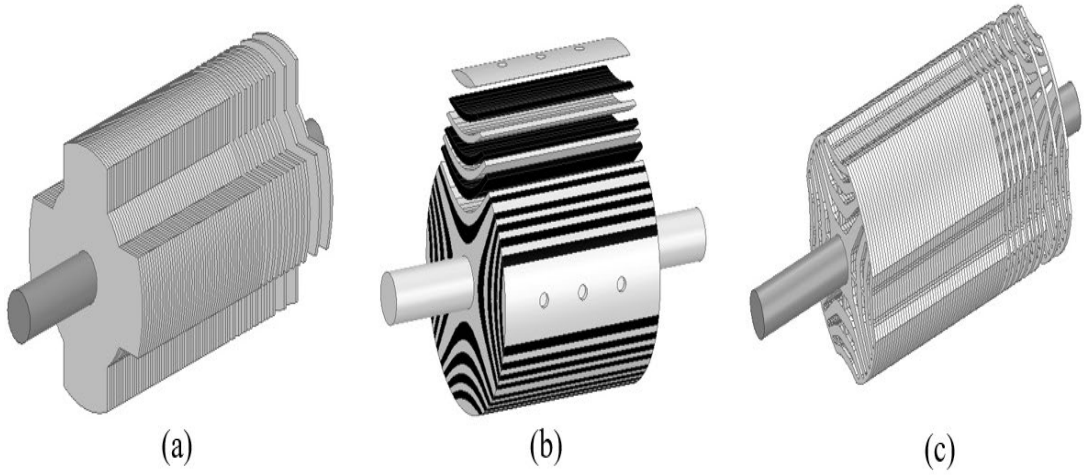
Şekil 2.5. SynRM'nin demir kayıplarını içeren vektör diyagramı [49,50,54,57].

2.4. Senkron Relüktans Motor Rotor Tasarımları

Prensipite senkron relüktans motor rotorunda bir uyarma sargısı olmayan geleneksel çıkıntılı kutuplu senkron motora benzer. Bu makinede rotor sadece, hava bariyerleri ve çelik dilimli katmanlardan yapılmıştır. Rotor geometrisinin anizotropik yapısına bağlı olarak SynRM'un rotoru üç farklı kategoriye ayrılabilir:

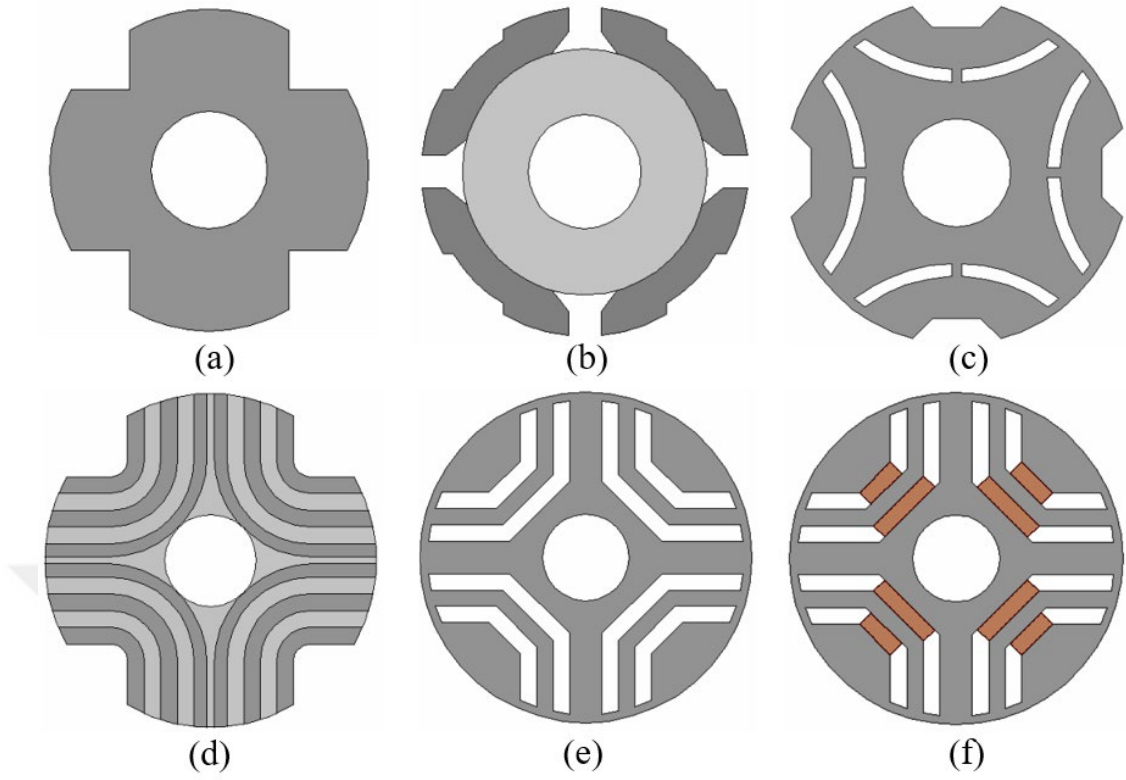
- Geleneksel çıkık kutuplu rotor
- Eksenel laminasyonlu anizotropik rotor (ALA)
- Enine laminasyonlu anizotropik rotor (TLA)

Şekil 2.6'da SynRM'un farklı anizotropik rotor yapıları görülmektedir.



Şekil 2.6. SynRM'nin rotor tasarımları a) Geleneksel yapılı çıkık kutuplu rotor, b) ALA tip rotor, c) TLA tip rotor [53].

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere SynRM'nin üç temel tipi bulunmaktadır. İlk rotor tipi Şekil 2.6a'da görüldüğü gibi rotorun enine bazı kısımlarının kesilmesiyle geleneksel çıkık kutuplu rotordur. SynRM'nin ikinci rotor tipi Eksenel laminasyonlu anizotropik (ALA) rotor tipidir. Rotor, kutupları oluşturmak için montajdan sonra metal sacların şekillendirilmesiyle oluşur. Şekil 2.6b'de görüldüğü gibi laminasyonların yalıtımı uygun izolasyon malzemeleri yapılarak kutup boyunca merkeze doğru mile tutturulur. Rotorun bütünlüğü rotor iç parçalarının mil üzerine sabit bir şekilde monte edilmesiyle sağlanır. Fakat bu yapının üretim zorlukları vardır. Bu rotor yapısında çıkıntı oranı demir bölümlerin sayısının artırılmasıyla sağlanır. Fakat yüksek rotor demir kayıplarının hava boşluğu yakınlarında yoğunlaşmasından dolayı istenilen yüksek verimlilik elde edilemez [61,62]. Diğer bir rotor tipi ise Enine laminasyonlu anizotropik (TLA) rotor tipidir. Şekil 2.6c'de görüldüğü gibi geleneksel IM'lerin rotor yapısına benzemektedir. Üretimi laminasyon presi yardımıyla yapılabilir. Bu sebeple Enine laminasyonlu anizotropik (TLA) rotor yapısının üretimi oldukça kolaydır [49].



Şekil 2.7. SynRM rotor konfigürasyonları (a) Geleneksel çıkık kutuplu tasarım (b) Segmental tasarım (c) Çift bariyerli tasarım (d) Eksenel laminasyonlu (ALA) rotor yapısı (e) Enine laminasyonlu (TLA) rotor yapısı (f) Enine laminasyonlu (TLA) mıknatıs destekli SynRM rotor yapısı [49,57].

Şekil 2.7a’da rotor tasarımının başlangıç noktası olan geleneksel çıkık kutuplu rotor tasarımı verilmiştir. Yapılarının basit, sağlam olması ve ayrıca üretim maliyetlerinin oldukça düşük olmasına rağmen çıkıntı oranlarının düşük olması sebebiyle performanslarının da düşük olması nedeniyle neredeyse hiç kullanılmamışlardır. Şekil 2.7b’de bölümlere ayrılmış (segmental) bir yapının kullanıldığı ve makinenin rotor kafesine ihtiyaç duymayan bölümlere ayrılmış tasarım rotor tipi görülmektedir. Çift bariyerli rotor tipi Şekil 2.7c’de gösterilmiştir. Her bir kutup için iki bariyer kullanılmıştır ve bu bariyerler kalkış için kullanılan kafes ile beraber yerleştirilmiştir. Çift bariyerli rotor tasarımının segmental rotor tasarımından avantajlı olması akı bariyerlerinin tasarımı sayesinde daha yüksek çıkıntı oranı ve daha yüksek performans sağlamaktadır [49,57].

Şekil 2.7d’de verilen Eksenel Laminasyonlu (ALA) rotor tipi tanecikleri yönlendirilmiş çelik laminasyonlar ile yapılır ve SynRM’nin prensibini oluşturur.

Burada rotor "u" veya "v" şeklinde eğilmiş olan eksenel lamineli silisli saclardan oluşur ve sonrasında rotor radyal yönde üst üste birleştirilir. Bir milin üzerine dört tane birleştirilmiş yığın kullanıldığında; kutup çıkıntılarından (d -ekseni) oluklar yönünde indüktans yükselir ve bu oluklar yönünde bir akı yolu oluşturulur. 4 kutuplu Enine Laminasyonlu (TLA) her bir kutup için iki akı bariyerine sahip rotor yapısı Şekil 2.7e’de gösterilmiştir. Rotor laminasyonlarının iç kısımlarında ve hava boşluklarında konumlandırılan ince köprüler sayesinde yüksek hızlı ve/veya büyük rotor yarıçaplı rotorların mekanik dayanımları garanti edilmektedir. Bu rotor yapısı ucuz ve basit bir şekilde elde edilmesine rağmen ALA rotor yapısı ile karşılaştırıldığında daha fazla kaçak akıya sahip olduğu görülür. TLA rotor tipi seri üretim için daha uygun olmasına karşılık üretilen moment ve güç faktörü ALA rotor yapılı SynRM’lere göre daha düşüktür fakat doğru tasarım sayesinde TLA yapılı rotor optimize edilebilir. SynRM’nin ALA ve TLA tipi roturunun akı bariyerlerinin içerisine mıknatıs yerleştirilebilir. Böylece Mıknatıs Destekli SynRM oluşur. Şekil 2.7f’de TLA rotor tipli Mıknatıs Destekli SynRM yapısı gösterilmiştir. Rotoraya yerleştirilen mıknatısların polaritesi önemlidir. Nominal yükte SynRM’nin q -ekseni akısına zıt olarak seçilir. Ancak d ve q -eksenleri aynı seçildiği takdirde gömülü daimi mıknatıslı motor halini alır [49,57].

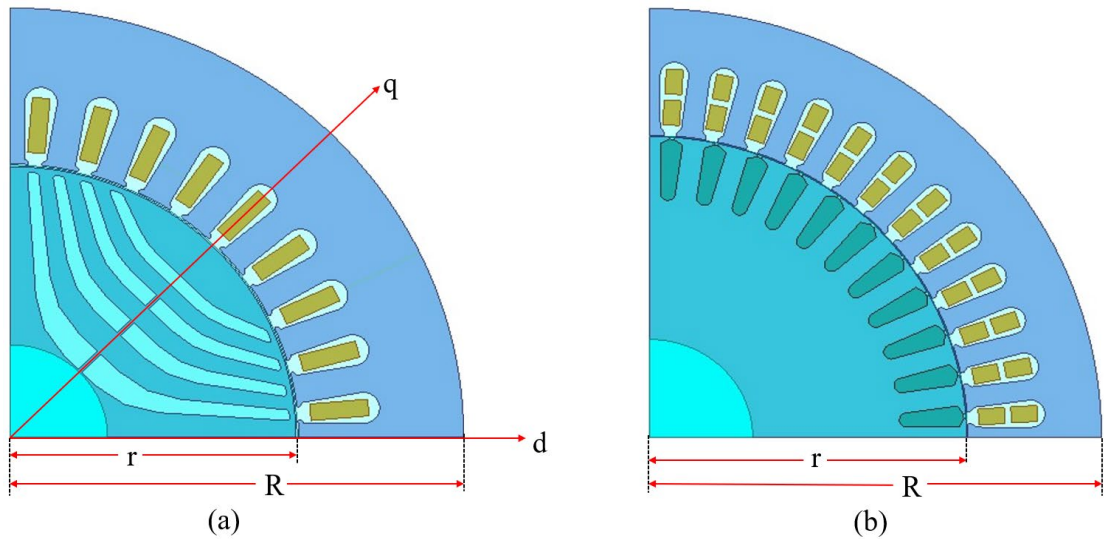
2.5. TLA ve ALA Rotor Yapılarının Karşılaştırılması

Şekil 2.8a’da verilen Enine Laminasyonlu (TLA) rotor standart yassı laminasyonların akı bariyerlerinin delinerek akı yollarının elde edildiği rotor tipidir. Bu rotor tipinde köprü yapıları q eksenli relüktans değerini azaltmaktadır bu durum çıkıntı oranının (L_d/L_q) ALA tipi rotordan daha düşük olmasına sebep olmaktadır. Akı bariyerleri, q eksenli akısını azaltırken çıkıntı oranının artmasını sağlar. TLA rotor tipi sincap kafesli indüksiyon motorun üretildiği üretim bandında üretilebildiğinden dolayı üretimi kolay ve üretim maliyeti düşüktür. Bu rotor tipiyle ulaşılması mümkün olan en büyük çıkıntı oranlarına ulaşmak mümkün olmayabilir. Üretiminin kolay olmasından dolayı TLA tipi rotor ALA tipi rotora göre IM’a daha iyi bir seçenektir. Aynı zamanda TLA tipi rotorun üretim maliyeti düşük olduğu gibi rotoru bükülerek tork dalgalanmasını azaltmakta mümkündür.

Tablo 2.2. SynRM ve IM'un karşılaştırılması [2].

Motor Tipi	Avantajları	Dezavantajları
IM	+ Düşük malzeme maliyeti ve üretim süreci + Hat başlatma özelliği	- Düşük güç faktörü - Rulman hatası
SynRM	+ Soğuk rotorlu çalışması sayesinde güvenilir ve yüksek verimli + Yüksek dinamiklik + Yüksek yüklenebilirlik + Çok yüksek hız kapasitesi	- Yüksek tork dalgalanması - Düşük güç faktörü

İndüksiyon motorların endüstride en çok kullanılan motor türü olmasındaki sebepler düşük maliyet, sağlam olması, güç elektroniği devreleri olmadan şebekeye doğrudan bağlanarak çalışabilmesidir. Hız ayarlamasına ihtiyaç duyulan uygulamalarda verim, tork/hacim ve kontrol basitliği önemli olmaktadır [19]. Bu gibi durumlarda İndüksiyon motorlara alternatif olarak farklı motor tipleri kullanılabilir. TLA tipi rotor yapısına sahip SynRM ile IM üretim maliyeti açısından karşılaştırıldığında SynRM'un rotorunda kafes yapısı ve döküm işlemi olmadığından dolayı maliyeti IM'a göre düşük olabilir. Eğer stator büyüklükleri aynı seçilirse SynRM aynı üretim bandında üretilebilir. Aynı zamanda IM'larda olduğu gibi TLA rotor tipine sahip SynRM'un rotoru açıldırılarak moment salınımı azaltılabilir. Şekil 2.9'da SynRM ve IM arasındaki motor parametrelerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Rotor geometrilerinin karşılaştırılması a) SynRM b) IM.

İndüksiyon motorlarda statorun oluşturduğu dönen MMK'ya göre rotorda bulunan alüminyum veya bakırdan yapılmış kısa devre kafesinde bir akım indükler. Rotorda indüklenen akım, aralarında küçük bir kaymanın olduğu dönen bir hava boşluğu MMK'sı oluşturur. Stator akımının etkisiyle statorda oluşan MMK ve rotorda indüklenen akımla hava boşluğunda oluşan MMK'nın etkileşimiyle rotorda moment meydana gelir. İndüksiyon motorlarda kaymadan dolayı başlangıçta bir moment meydana gelir. Aynı zamanda kaymanın değişmesiyle farklı mil momentleri üretilebilir. Rotorda indüklenen akım, motorda ekstra kayıplara sebep olmaktadır, böylece motor sıcaklığının yükselmesine neden olur. Mil ve rotor ısınır. Ayrıca rotor direnci artacağından dolayı kayma değeri artar. Böylece motorun verimliliği düşmüş olur.

SynRM moment üretimi IM'den farklıdır. SynRM moment üretiminde IM'lerde olduğu gibi stator tarafından üretilen dönen sinüzoidal MMK ve relüktans kavramını kullanır. Sinüzoidal olarak değişen stator akımı; hava boşluğu akısını meydana getirir. Rotorun içine uygun manyetik bir malzemenin eklenmesiyle d -ekseninde yüksek bir manyetik geçirgenlik elde edilebilir. Bu anizotropik yapıdaki rotor; stator MMK'sı ile etkileşime girer ve moment oluşur.

1923 yılında ilk kez J. K. Kostko tarafından SynRM incelenmiştir [5]. Zayıf anizotropik yapılarından dolayı geleneksel çıkık kutuplu motorların tork yoğunlukları düşüktür. J. K. Kostko, rotora izolasyon tabakaları ekleyerek tasarladığı motorun Asenkron Motor ile her bir amper başına aynı momente sahip olduğunu görmüştür. Senkron Relüktans Motorların dezavantajlarından biri şebekeye doğrudan bağlandıklarında başlangıç momentlerinin olmamasıdır. Ancak değişken hızlı sürücülerle birlikte SynRM'lerin kapalı çevrim kontrolü altında kontrol edilmeleri ve çalıştırılmaları kolaylaşmıştır.

Her iki motorun performanslarını karşılaştırmak stator yapısı ve hava aralığı yarıçapını sabit tutarak daha kolay olmaktadır [64]. İki motor arasında bazı deneysel değerler kullanılarak analizler yapılmıştır. SynRM'nin rotorunda kafes bulunmaması nedeniyle rotorda bakır kayıpları yoktur, her iki motor için benzer sıcaklık artışı veya benzer güç

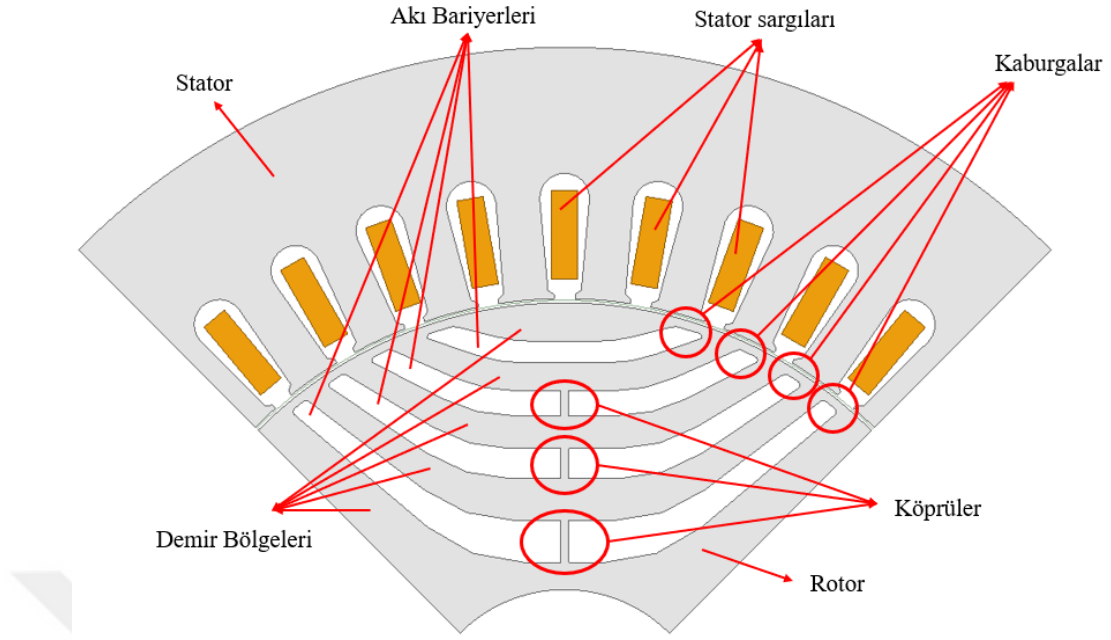
tüketimi için nominal akım artırılabilir. Bu sebeple SynRM'ler IM'lere göre %20-40 oranında daha yüksek tork üretebilir. Böylece SynRM, IM'lere göre daha fazla verime sahiptir. IM'lerde momenti arttırmak için bakır kafes kullanılır. SynRM'lerde ise moment artırımı için stator yapısının değiştirilmesi elzemdir [65].

SynRM, IM ile karşılaştırıldığında nominal yükün 3 katına ulaşabilen daha yüksek yük kapasitesine sahiptir. Motorun anizotropik rotor yapısı ve yüksek çıkıntı oranı ile algılayıcısız kontrol teknikleri kullanılabilir [66]. q -ekseni indüktansının büyük olması ve çapraz-eşleşme etkisinin birleşiminden dolayı SynRM'nin güç faktörü IM'nin güç faktöründen %5-10 daha düşüktür. Büyük q -eksen indüktansı, rotordaki farklı alan dağılımlarına bağlıdır. İnverterin boyutu, motorun d ve q -ekseni akı oranına (λ_q/λ_d) bağlıdır. Bu oran rotora daimi mıknatıslar eklenerek ayarlanabilir [54,66,67]. Bu oran arttıkça inverterin boyutu da artar.

2.7. Senkron Relüktans Motor Rotor Tasarım Parametreleri

SynRM'lerin performansının iyileştirilmesi amacıyla yapılan bilimsel araştırmalar incelendiğinde, bu araştırmaların sırasıyla; optimal rotor tasarımı, manyetik çelik türü, sarım konfigürasyonları ve hata tolerans kontrolü (FTC) stratejileri üzerine olduğu görülmektedir [3]. Senkron relüktans motorların tork yoğunluğu ve verimliliği rotor geometrisinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, optimum performansı (tork yoğunluğu, verimlilik ve güç faktörü) elde etmek için SynRM rotor geometrisinin optimal tasarımı şiddetle tavsiye edilir.

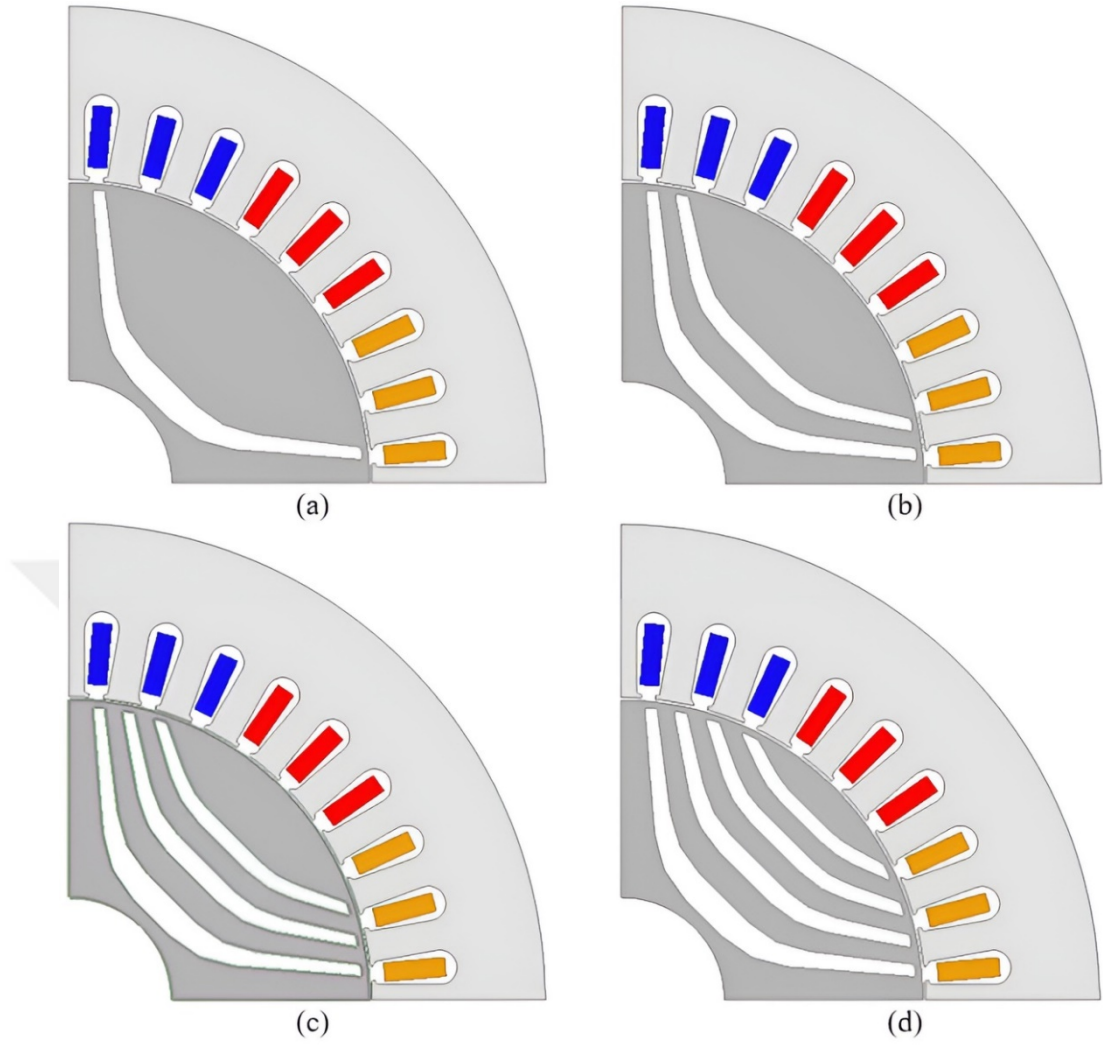
SynRM temel tasarım düşüncesi rotorda bulunan bariyerlerin tasarımlarına dayanmaktadır. SynRM'ye ilişkin rotor tasarım parametreleri; kutup sayısı, bariyer sayısı, bariyer şekilleri, kaburga kalınlığı ve köprü kalınlığı olarak özetlenebilir [1]. Şekil 2.10'da SynRM'nin bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 2.10. SynRM'nin çeyreği üzerinden rotor ve stator bölgelerinin tanımlamaları.

SynRM'ların kutup sayısı, 360° 'lik rotor yayı boyunca görülen akı bariyeri bloklarının sayısına eşit olarak stator yerine rotor tarafından belirlenir. Literatür incelemelerinde iki, dört ve altı kutuplu motor yapılarının görüldüğü, bu yapılardan ise 4 kutuplu yapının sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmiştir.

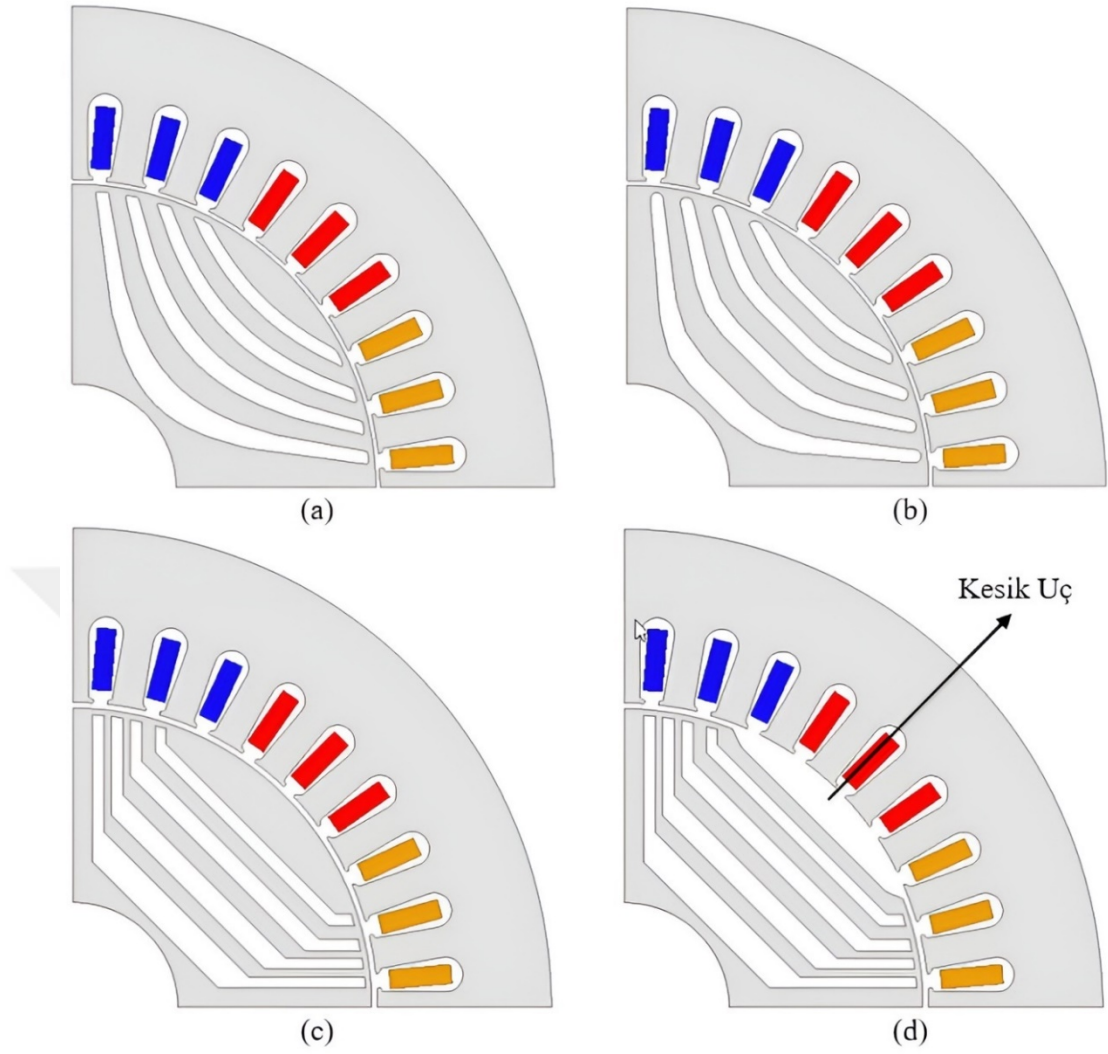
Senkron relüktans motorların tork üretim prensibi rotor çıkıntı oranına bağlı olmasından dolayı akı bariyerlerin sayısı dolayısıyla hava/demir oranı motorun en elzem tasarım parametrelerinden biridir. Rotorda bulunan akı bariyerlerinin sayısının motorun çıkış torkuna doğrudan etkisi vardır. Aynı zamanda akı bariyerlerinin yeri tork dalgalanmasını da etkilemektedir. SynRM'ya ait bir, iki, üç ve dört bariyerli rotor yapıları Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Bariyer sayısının değişimine göre rotor değişimi.

Rotor tasarımıda önemli olan parametrelerden biride kaburga kalınlığıdır ve bu değer çıkış torku üzerinde doğrudan etkilidir. Düşük kaburga kalınlığı rotor çeliği bölgesinin doyuma gitmesine yardımcı olması nedeniyle çıkış torku üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Fakat üretim süreçleri ve kolaylığı düşünüldüğünde kaburga kalınlığı uygun değer alınmalıdır. Aynı zamanda motorun devir sayısı da dikkate alındığında kaburga kalınlığının mekanik gerilmelere karşı dayanacak yapıda olması gerekmektedir.

Senkron relüktans motorların çıkış büyüklükleri üzerinde akı bariyerlerinin sayısı kadar etkili olan diğer bir tasarım parametresi tasarlanan bariyer şekilleridir. Bariyer şekillerinin özellikle tork dalgalanması üzerinde etkisi bulunmaktadır. SynRM'ye ait rotor bariyer şekilleri Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Bariyer şekli değişimine göre bazı rotor yapıları; a) Yuvarlak, b) Köşeli-yuvarlak, c) Köşeli, d) Köşeli ve kesik uçlu.

Senkron relüktans motorlarda rotor çeliğinin bölgelerini birbirine bağlama görevini köprüler yapmaktadır. Köprüler, motorun devir sayısına bağlı olarak oluşan rotordaki merkezkaç kuvvetleri sonucunda rotorda bulunan akı bariyerlerinin formunun bozulmasını ya da kopmasını önlemek için tasarımda dikkat edilmesi gereken parametrelerden biridir.

2.8. SynRM'nin Elektriksel Parametrelerinin Hesaplanması

2.8.1. Ana Boyutlar

Motor geometrisinin hesaplanmasında ilk adım, motorun ana boyutlarının belirlenmesidir. Bu parametreler, rotorun dış ve iç çapı, statorun dış ve iç çapı ve yığın uzunluğudur. Yığın uzunluğu Denklem 2.5'teki gibi verilir.

$$L_{stk} = l_{eff} - 2g \quad (2.5)$$

burada l_{eff} etkin uzunluk, g hava aralığı uzunluğudur.

Bundan sonra form faktörü X Denklem 2.6 ve hava aralığı uzunluğu g Denklem 2.7'deki şekilde bulunur.

$$X \approx \frac{\pi}{4\sqrt{p/2}} \quad (2.6)$$

$$g = \frac{0.18 + 0.006P_{out}^{0.4}}{1000} \quad (2.7)$$

burada p kutup sayısıdır ve P_{out} watt cinsinden verilir.

P_{out} ve η kullanılarak gerekli giriş gücü Denklem 2.8'deki şekilde hesaplanabilir.

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (2.8)$$

burada P_{out} çıkış gücü, η verim ve P_{in} gerekli giriş gücüdür. Denklem 2.8'de hesaplanan giriş gücü kullanılarak, faz akımı şu şekilde verilmektedir.

$$I_s = \frac{P_{in}}{mV_s \cos(\varphi)} \quad (2.9)$$

olmak üzere, m ve V_s , sırasıyla birer girdi olan faz sayısı ve rms faz gerilimidir ve $\cos(\varphi)$ ise tahmini güç faktörüdür.

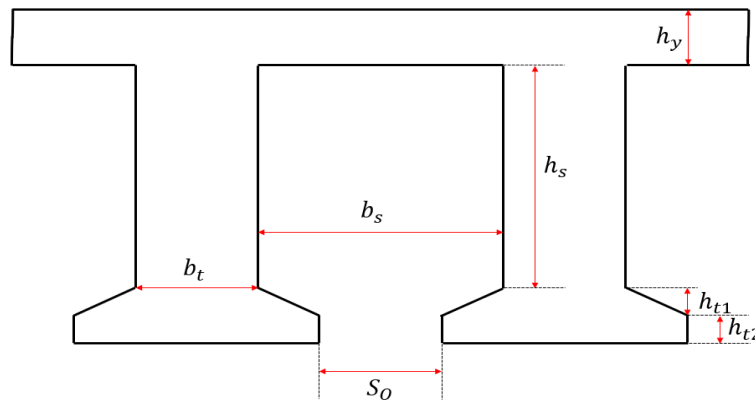
Tasarımın elektriksel kısmını sonlandırmak için, faz başına dönüş sayısı Denklem (2.10)'a göre hesaplanabilir.

$$N_s = \frac{\sqrt{2}E}{\omega_e k_{w1} l_{eff} \tau_p \frac{D_{is}}{2} \alpha_i \hat{B}_g} \quad (2.10)$$

burada E , faz rms geriliminin 0,97'sine göre tahmin edilen zıt emk'dır. ω_e , temel noktanın elektriksel rad/s cinsinden mekanik hızıdır $\hat{B}_g$, tahmini bir değer olan hava boşluğundaki tepe akı yoğunluğudur k_{w1} , sarım dağılımı ile sabitlenen temel bileşenin sarım faktörüdür α_i , akı yoğunluğunun aritmetik ortalamasını elde etmek için kullanılan katsayıdır D_{is} iç stator çapıdır ve τ_p yuva aralığıdır. Sinüzoidal akı yoğunluğu göz önüne alındığında, α_i değeri $0,64 (2/\pi)$ 'dir.

2.8.2. Stator Geometrisi

Yuvanın, dişlerin ve boyunduruğun boyutu belirlendiğinde stator geometrisi tamamlanır. Dişlerin (b_t) ve yuvaların (b_s) genişliği sabit veya radyal olabilir. Ancak bu parçaların boyutlarını belirlemek için bazı sadeleştirmeler yapılabilir. Şekil 2.13, en kısıtlayıcı olan daha küçük boyutu kullanan dişlerin ve yuvaların geometrisini göstermektedir.



Şekil 2.13. Stator oluk boyutlandırma büyüklükleri [68].

Yuva açıklığı (S_o), iletkenlerin çapından daha büyük olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Yuvanın yüksekliği (h_s) ve boyunduruk yüksekliği (h_y) Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Son olarak, makineye bağlı olarak 1 mm'de sabitlenebilmesine rağmen, tasarımın bu aşamasında diş ucunun (h_{t2}) yüksekliği önemli değildir. Aynı şekilde ön tasarımda (h_{t1}) önemli değildir ve makineye bağlı olarak 0,5 mm'de sabitlenebilir.

Faz başına seri sarım sayısı hesaplandığında, her yuvadaki iletken sayısı (z_q) aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$z_q = \frac{2mN_f}{Q_s} \quad (2.11)$$

olmak üzere, m faz sayısıdır ve a paralel yolların sayısıdır.

z_q 'nin bir tamsayı olması gerektiğine dikkat edilmelidir, bu nedenle her yuvadaki son iletken sayısını elde etmek için elde edilen sonucun yuvarlak olması gerekir. Ardından, faz başına serideki dönüş sayısı şu şekilde güncellenmelidir.

$$N_{f_new} = \frac{z_q Q_s}{2m} \quad (2.12)$$

Bu noktada, hava boşluğu içindeki tahmini akı yoğunluğu değişir, dolayısıyla şu şekilde hesaplanır.

$$\hat{B}_{g_new} = \frac{\sqrt{2}E}{\omega_e k_{w1} l_{eff} \tau_p \frac{D_{is}}{2} \alpha_i N_{f_new}} \quad (2.13)$$

Dişleri aşırı büyütme için manyetik akı yoğunluğu maksimum değerinde sabit kabul edilir.

$$\Phi_t = \hat{B}_{g_new} l_{eff} \tau_s \frac{D_{is}}{2} \quad (2.14)$$

burada τ_s , aşağıdaki şekilde verilen yuva aralığıdır.

$$\tau_s = \frac{2\pi}{Q_s} \quad (2.15)$$

Q_s stator oluk sayısıdır.

Doğru diş boyutunu elde etmek için izin verilen maksimum manyetik akı yoğunluğu 1,5 ile 1,8 T arasında alınabilir. Bu nedenle:

$$b_t = \frac{\Phi_t}{k_{sf}\hat{B}_t} L_{stk} \quad (2.16)$$

burada $\hat{B}_t$ izin verilen maksimum manyetik akı yoğunluğudur ve k_{sf} istifleme faktörüdür.

Daha sonra hava boşluğundaki manyetik akı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Phi_g = \frac{2}{\pi} \hat{B}_{g_new} l_{eff} \tau_p \frac{D_{is}}{2} \quad (2.17)$$

τ_p , aşağıdaki şekilde hesaplanan kutup aralığıdır:

$$\tau_p = \frac{2\pi}{2p} \quad (2.18)$$

O halde boyunduruğun genişliği:

$$h_y = \frac{\Phi_g}{2k_{sf}\hat{B}_y} L_{stk} \quad (2.19)$$

burada $\hat{B}_y$, manyetik çelik laminasyonların $B - H$ eğrisinin diz noktasına karşılık gelen, 1,4 ile 1,6 T arasında sabitlenen boyunduruaktaki izin verilen maksimum manyetik akı yoğunluğudur.

Şekil 2.13'e göre, dişlerin genişliği bilindiğinde, yuvanın genişliği şu şekilde belirlenebilir.

$$b_s = \tau_s \frac{D_{is}}{2} - b_t \quad (2.20)$$

Ardından, yuvanın yüksekliği şu şekilde belirlenir.

$$S_{slot} = b_s h_s = \frac{z_q I_f}{j k_u} \rightarrow h_s = \frac{z_q I_f}{j k_u b_s} \quad (2.21)$$

burada J akım yoğunluğudur [A/m^2] ve soğutma sistemi ile değişir ve k_u 0,40'ta sabitlenebilen sargı faktörüdür.

Dişlerin yüksekliği şu şekilde verilir.

$$h_t = h_s + h_{t1} + h_{t2} \quad (2.22)$$

Daha sonra dış stator çapı şu şekilde elde edilir.

$$D_{os} = D_{is} + 2h_t + 2h_y \quad (2.23)$$

2.8.3. Rotor Geometrisi

Rotorun doğru tasarımıyla iyi bir çıkıntı oranı geliştirilebilir. Aşağıdaki şekilde verilen uygun sayıda akı bariyeri seçmeyle işe başlanır.

$$k = \frac{Q_s}{2p} \pm 2 \quad (2.24)$$

Bir yandan, iç rotor çapı (D_{ir}), dış rotor çapı bilindiği için rotordaki toplam alanı belirler.

$$D_{or} = D_{is} - 2g \quad (2.25)$$

Daha sonra iç rotor çapı şu şekilde tanımlanır.

$$D_{ir} = D_{or} - 2h_r \quad (2.26)$$

Son olarak, tork ve çıkış gücü hesaplanabilir.

$$T = \frac{m}{2} \frac{p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2.27)$$

$$P_{out} = \omega_e T \quad (2.28)$$

Daha sonra bakır ve demir kayıplarından oluşan kayıplar şu şekilde verilir.

$$P_{cu} = m R_s I_s^2 \quad (2.29)$$

$$P_{fe} = k_h f \hat{B}^2 + k_c (f \hat{B})^2 + k_e (f \hat{B})^{1.5} \quad (2.30)$$

R_s stator geometrisinin hesaplanması sırasında elde edilen geometri ile hesaplanan faz direnci, m faz sayısı ve I_s rms değeri olarak stator akımıdır. P_{fe} demir kayıpları [69,70] ise histerezis ve girdap akımı bileşenlerinden oluşmaktadır. Kayıp katsayıları (k_h, k_e, k_c); üreticinin veri sayfalarından elde edilen malzemeye özgü kayıplar kullanılarak elde edilir. Demir kayıpları kütle birimi başınadır, bu nedenle nihai değer farklı parçaların kütlesi ile çarpılmalıdır. Hesaplanan parçalar boyunduruk, dişler ve rotor olabilir, çünkü bu üç parça farklı manyetik doygunluğa sahiptir. Ardından, verim şu şekilde verilir [68].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu} + P_{fe}} \quad (2.31)$$

3 fazlı makineler için, mıknatıslama endüktansı L_m , eşitlik 2.32'de gösterildiği gibi hesaplanır, burada R_{ro} rotor çapıdır, L_{stk} yığın uzunluğudur, q faz başına kutup başına yuva sayısıdır, g hava boşluğu uzunluğudur, μ_0 havanın bağıl geçirgenliğidir. K_{w1}

sargı faktörüdür. R_{ro} ve L_{stk} parametreleri, makinenin boyutunu belirlediği için ilgili değişkenlerdir.

$$L_m = 6\mu_0 R_{ro} L_{stk} \frac{(qK_{w1}n_s)^2}{g} \quad (2.32)$$

Analitik yaklaşıma dayalı olarak, makinelerin manyetik davranışı, değişen R_{ro} ve eksenel ölçekleme, L_{stk} değiştirilerek radyal ölçeklemenin fonksiyonu olarak incelenebilir. R_{ro} ve L_{stk} 'yi ilişkilendirmek için, en boy oranı γ şu şekilde sunulabilir.

$$\gamma = \frac{L_{stk}}{2R_{ro}} \quad (2.33)$$

SynRM'lerin performans parametreleri arasında tork, tork dalgalanması, güç faktörü, çıkış gücü, kayıplar ve verim değerleri verilebilir. Makine tasarımı yapılırken tüm bu parametrelerin optimum değerlerini bulmak zor olduğundan dolayı tasarımda bazı parametrelere öncelik verilmektedir. Burada tasarımcının amacı yüksek tork, yüksek verim, düşük tork dalgalanması, düşük kayıp gibi parametreler olabilir.

Ölçeklendirilmiş her motorun elektromanyetik performansı, iyi bilinen bir d-q referans çerçevesi tork denklemi kullanılarak relüktans makineleri için genelleştirilmiş boyutlandırma yaklaşımının türetildiği gibi değerlendirilebilir. Bir d-q referans çerçevesi içindeki bir relüktans motorunda, d eksenini en az relüktansın yoludur ve q eksenini daha büyük relüktansın yoludur [71]. SynRM'da performans parametrelerini etkileyen değerlerden ikisi L_d , L_q endüktansları ve çıkıntı oranıdır. Bu iki değer SynRM için önemli performans parametrelerinden biri olan moment değerini de doğrudan etkilediği Denklem 2.34 ve Denklem 2.35'de [50] açıkça gösterilmektedir.

$$T = \frac{3p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2.34)$$

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (2.35)$$

Burada T tork (Nm), p kutup sayısı, L_d d ekseni endüktansı (H), L_q q ekseni endüktansı (H), i_d ve i_q sırasıyla d ve q ekseni akımlarını (A) ifade etmektedir.

Tork ifadesini Denklem 2.35’de [50] verilen çıkıntı oranı (ξ) cinsinden yazdığımızda Denklem 2.36 elde edilmiş olur.

$$T = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_d \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) i_d i_q \quad (2.36)$$

Aynı zamanda tork ifadesi Denklem 2.37’de [50] olduğu gibi d ve q ekseni arasındaki akımın faz açısı cinsinden de ifade edilebilir.

$$T = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (L_d - L_q) I_s^2 \sin(2\theta) \quad (2.37)$$

Burada I_s stator akımını (A), θ akım açısını ($^\circ$) simgelemektedir.

Tork ifadesinden sonra motorun düşük hızda döndüğünü varsayarsak ve demir kayıpları ihmal edilerek verim ifadesi Denklem 2.38’de [50] verilmiştir.

$$\eta = \left(1 + \frac{P_{loss}}{P_{out}}\right)^{-1} \quad (2.38)$$

Denklem 2.39’da [50] görüldüğü üzere demir kayıpları ihmal edildiğinden dolayı P_{loss} ifadesi bakır kayıplarına eşit olmaktadır.

$$P_{loss} = P_{Cu} = 3R_s I_s^2 \quad (2.39)$$

SynRM’nin verimi tüm motorlarda olduğu gibi Denklem 2.40 ile de tanımlanabilir.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (2.40)$$

Denklem 2.40’da verilen P_{out} çıkış gücü (W) Denklem 2.41, P_{in} giriş gücü (W) ise Denklem 2.42’deki [44] gibi ifade edilmektedir.

$$P_{out} = \omega_e T \quad (2.41)$$

$$P_{in} = 3V_s I_s \cos(\varphi) \quad (2.42)$$

$$PF = \cos(\varphi) \quad (2.43)$$

Burada ω_e açısal hız (rad/sn) cinsinden rotor hızı, V_s faz gerilimi (V), I_s faz akımı (A), PF güç faktörü, (φ) faz gerilimi ile faz akımı arasındaki faz açısını ($^\circ$) ifade etmektedir.

Son olarak SynRM’lerde performansı etkileyen ve azaltılması istenen tork dalgalanması ifadesi temel olarak Denklem 2.44’te [44] olduğu gibi ifade edilebilir.

$$T_{rip}(\%) = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \quad (2.44)$$

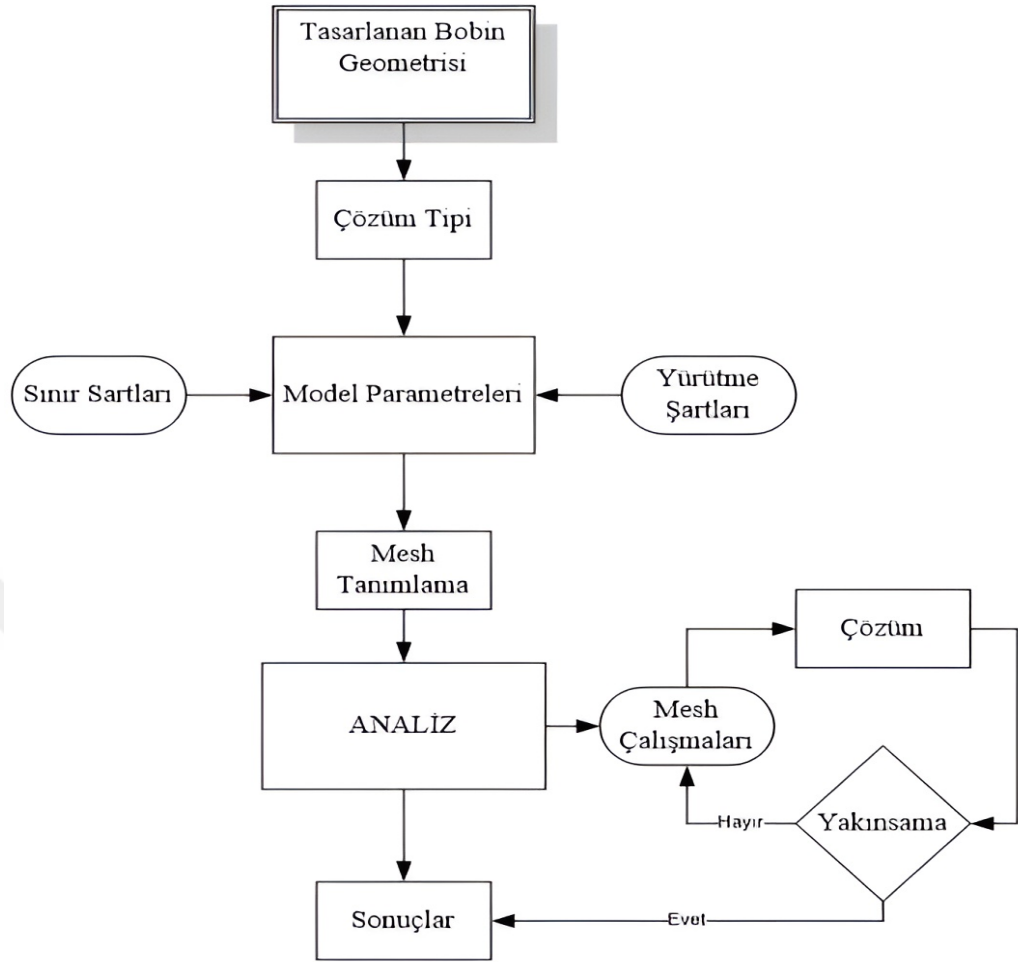
Burada T_{rip} dalgalanma oranı, T_{max} (Nm) olarak kalıcı hal durumundaki maksimum tork değeri, T_{min} (Nm) olarak kalıcı hal durumundaki minimum tork değeri, T_{avg} (Nm) olarak kalıcı hal durumundaki ortalama tork değeri olarak verilmiştir.

BÖLÜM 3. SENKRON RELÜKTANS MOTOR ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

3.1. Ansys Maxwell ile Nümerik Analiz

Çalışmanın tasarım aşaması; geometrik büyüklükler sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılım içerisinde çizilerek nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra mevcut modelin optimizasyonu; yine yazılım içerisinde yer alan optimizasyon yöntemi seçilerek yapılmıştır. Elde edilen analizler ile verim, güç yoğunluğu ve maliyet gibi büyüklüklerin ne kadar etkilendiğinin cevabı araştırılacaktır. Bu amaçla tasarım kısmı için hayati öneme sahip nümerik yöntemin kullanımının verilmesi elzemdir.

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık multifizik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Senkron relüktans motorun temel boyutlandırma parametreleri dikkate alınarak analitik hesaplamalar gerçekleştirilecektir. Ansys Rmxprt motor boyutlandırma eşitlikleri üzerinden analitik analiz gerçekleştirmektedir. Bu çözücü modülü ile motor dinamik büyüklüklerine ait veriler ve grafikler elde edilebilmektedir. Performans sonuçları SEY kullanılmadan elde edildiğinden dolayı hata oranı yüksektir. Bu sebeple diğer çalışmalarda olduğu gibi SEY ile çözüm gerçekleştiren Ansys Maxwell 2D geçici hal modülü kullanılmıştır. Rmxprt modülünde analitik analizi gerçekleştirilen model doğrudan Maxwell modülüne aktarılarak çözüm gerçekleştirilebilmektedir. Maxwell çözücü modülü Şekil 3.1’de verilen akış diyagramını kullanarak analizleri tamamlamaktadır.

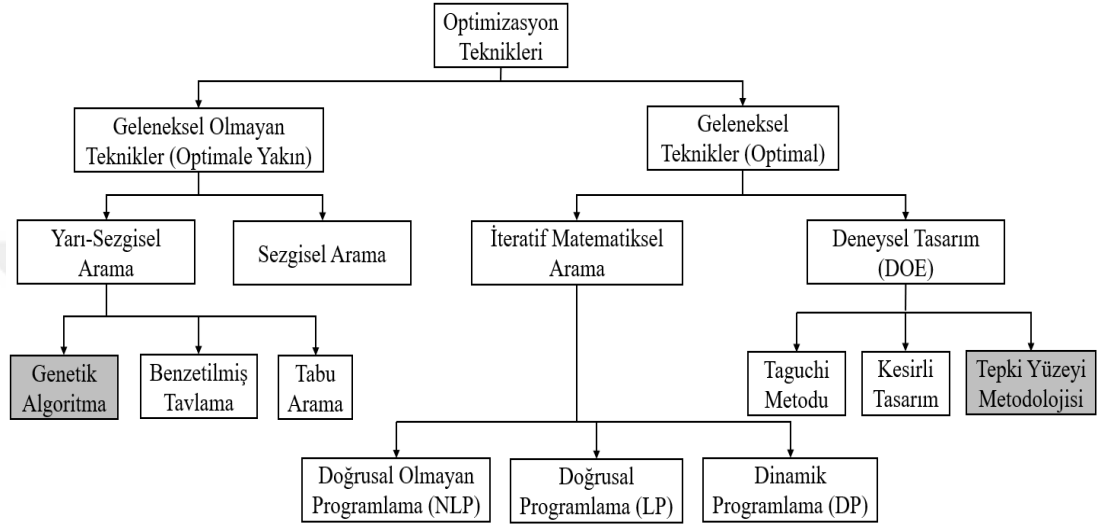


Şekil 3.1. Ansys Maxwell ile sayısal çözümün elde edilmesine yönelik akış diyagramı [72].

Rmxprt modülünden Maxwell modülüne geçişte makine geometrisi seçilen boyut üzerinden motor geometrisi oluşturulur. Model bölünüp oluk/kutup dikkate alınarak simetrik hale getirilebiliyorsa model bölünür. Model parametreleri; sınır şartları, harici devre verileri, direnç-indüktans parametreleri tanımlanır. Böylece tasarlanan motor analize hazır hale gelir. Çözüm sonuçlarının doğruluğu açısından mesh (ağ) tanımlama önemlidir. Özellikle yazılım Rmxprt'ten Maxwell'e geçiş sürecinde çözüm için çözüm sonucunu etkileyen hassas bölgelere mesh tanımlamaları yazılım tarafından atanır. Analiz akış diyagramına göre mesh tanımlanması tamamlanan ve analize hazır hale gelen motor modelinde analiz başlatıldığında iletkenlerdeki iletim akımının benzetimi yapılır. Alan çözümü başlar ve çözüm için mesh ağı oluşur. Çözüm sürecinde ağlar otomatik olarak iyileştirilerek hata değeri azalır. Çözücü tamamladığı çözümü bir bilgisayarda kayıtlı dosyaya yazarak hata analizini uygular. Akım yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu, tork v.b. gibi çıktılar elde edilir [73].

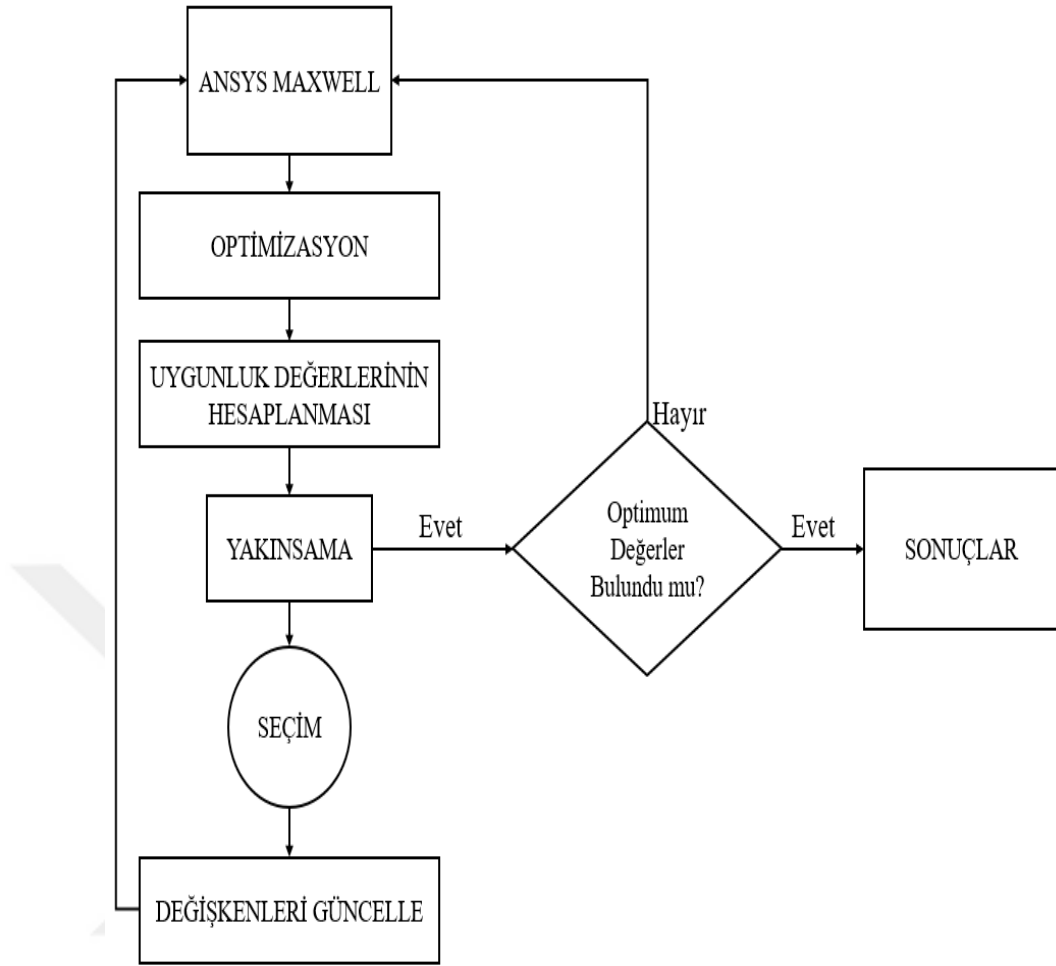
3.2. Optimizasyon

Mühendislik alanında yapılan çalışmaların birçoğunda optimizasyon tekniklerinden herhangi biri veya birkaçı birlikte kullanılarak yapılan çalışmalarda en uygun tasarım hedeflenmektedir. Şekil 3.2’de mevcut optimizasyon teknikleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Optimizasyon tekniklerinin sınıflandırılması [49].

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi sonlu elemanlar yöntemi ile tasarımı gerçekleştirilen motor, belirlenen amaç fonksiyonları ile seçilen optimizasyon yöntemine göre TYM veya MOGA kullanılarak çözüm gerçekleştirilir.



Şekil 3.3. Optimizasyon çalışması akış diyagramı.

Kullanılacak yazılım içeriğinde Tepki Yüzey Metodolojisi ve Optimizasyon modülü mevcuttur. Belirlenen optimum boyutlandırma sonuçları referans makine ile karşılaştırılarak geometride ne kadarlık bir azalma ve verimde ne kadarlık artış sağlandığı bulunacaktır. Böylece prototip için motor geometrisi belirlenmiş olacaktır [73].

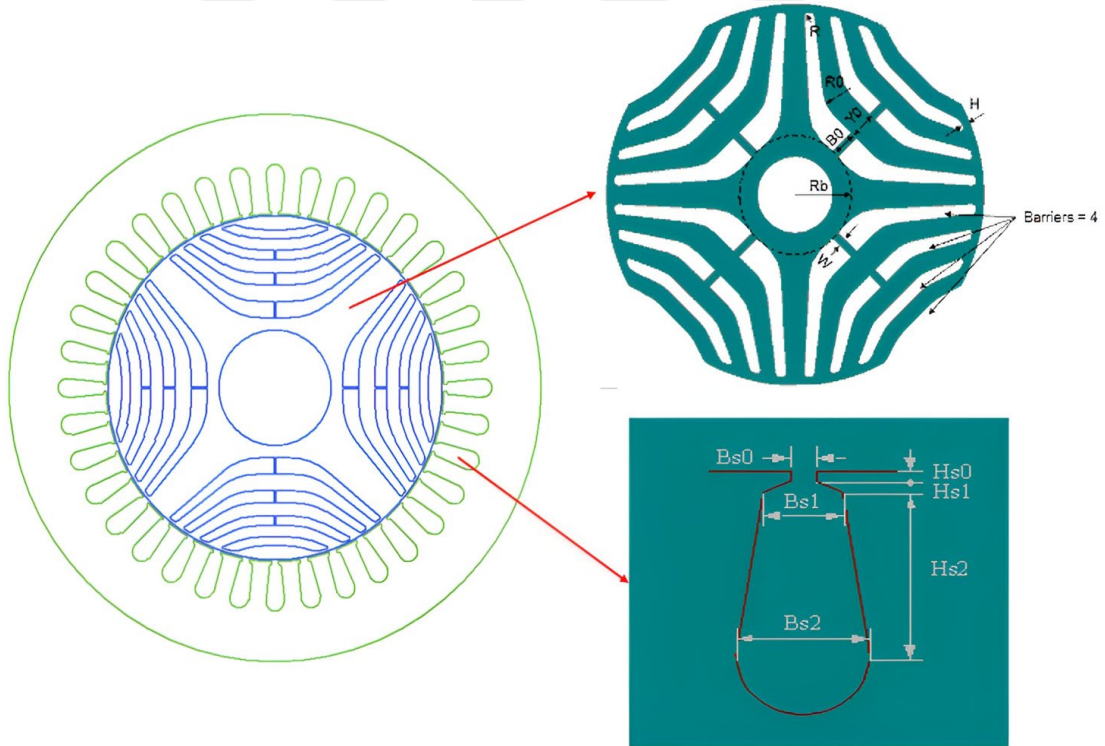
3.3. SynRM Boyutlandırma Verileri

Referans motor olarak hali hazırda ticari ürün olarak üretilmekte olan 3 faz, 50 Hz, 4 KW gücünde 1500 rpm devir sayısına sahip senkron relüktans motor ele alınmıştır. Stator ölçüleri, stator ve rotor için kullanılan materyaller ve hava aralığı ele alınan modeller için sabit tutulmuştur. Ayrıca paket boyu sabit tutularak sadece rotor

büyükliklerinin optimizasyonu ele alınmıştır. Şekil 3.4’de motorun tasarımsal büyüklikleri ve Tablo 3.1-3.2’de motor verileri verilmiştir.

Tablo 3.1. Motora ait temel büyüklikler.

Boyutlandırma Büyüklikleri	Değeri	Birimi
Motor Gücü	4	KW
Motor Gerilimi	380	V
Bağlantı Grubu	Yıldız	-
Anma Devir Sayısı	1500	d/d
Çalışma Frekansı	50	Hz
Stator Oluk Sayısı	36	-
Kutup Sayısı	4	-
Stator Dış Çap	165	mm
Rotor Dış Çap	104	mm
Paket Boyu	135	mm



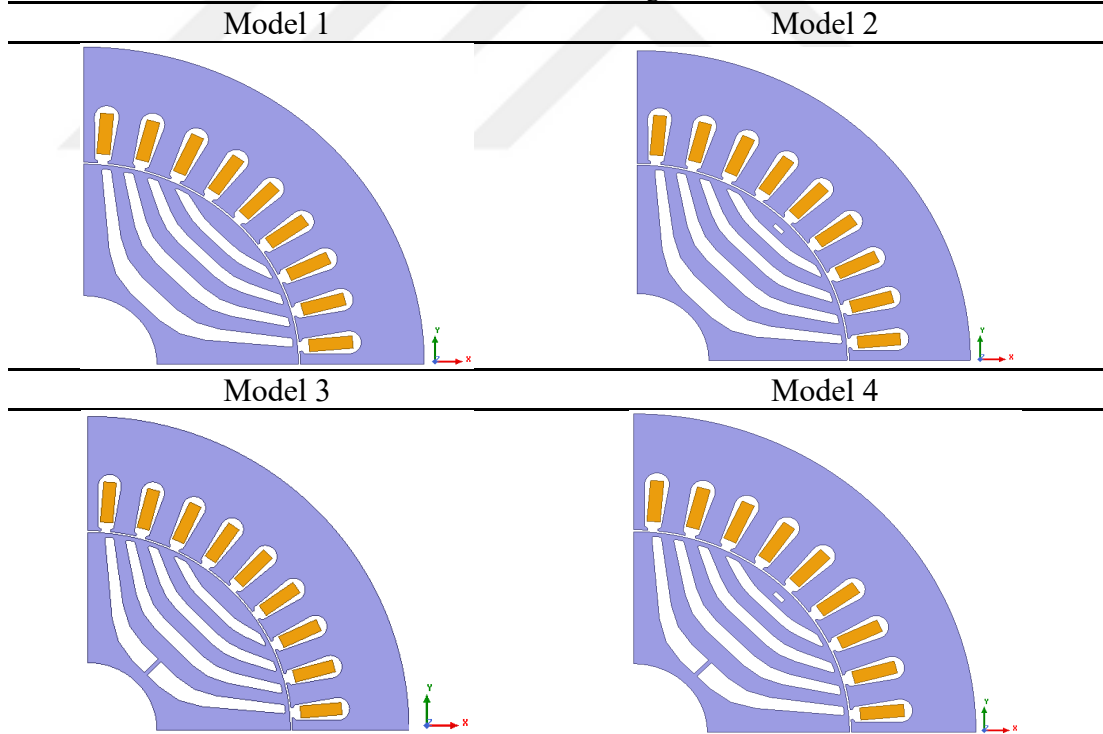
Şekil 3.4. SynRM rotor ve stator büyüklikleri.

Tablo 3.2. Referans motorun rotoru için büyüklükler.

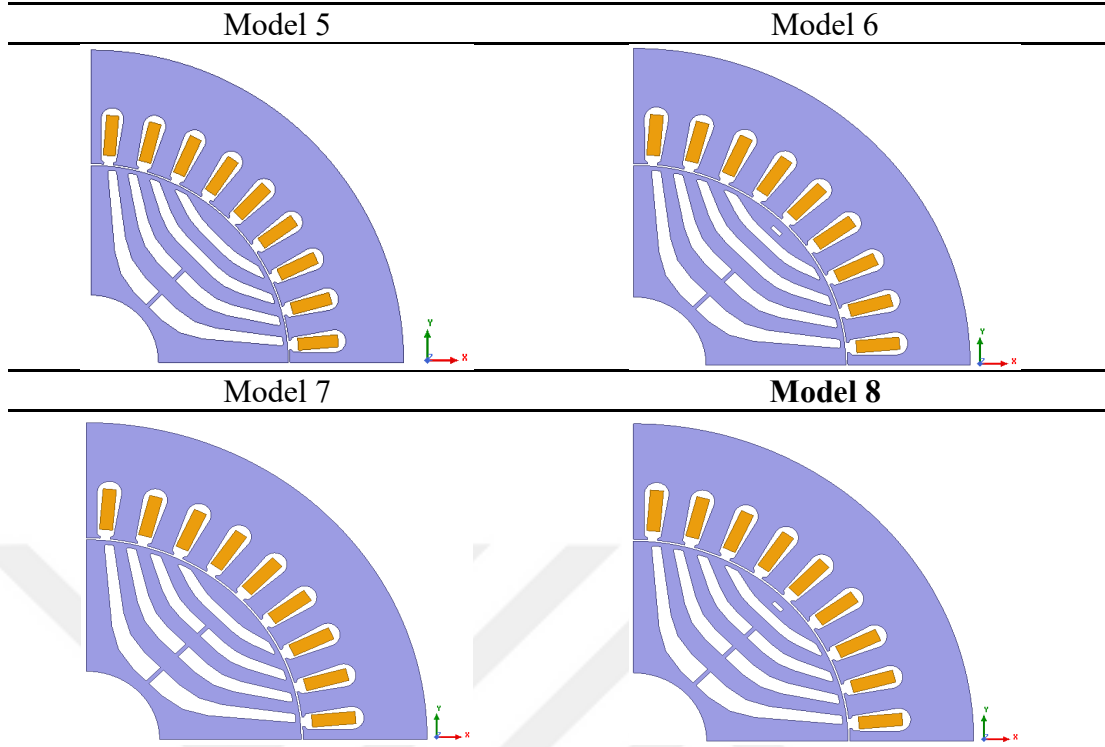
Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi	Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi
Bariyer Sayısı	4	-	Bariyer köprü yüksekliği (B0)	5	mm
Bariyer uç köprü kalınlığı (H)	1	mm	Akı bariyeri demir genişliği (Y0)	5	mm
Bariyer köprü genişliği (W)	1	mm	Akı bariyeri köşe demir yarıçapı (R0)	18	mm
Bariyer uç yarıçapı (R)	0,5	mm	Akı bariyeri başlama yarı çapı (Rb)	21	mm

Tablo 3.1’de verilen veriler ve Tablo 3.2’de verilen rotor boyutlandırma verileri Tablo 3.3’de verilen farklı rotorlar için Ansys Maxwell analizi gerçekleştirilmiştir. Burada referans motorda rotorun üst kısmında yer alan dikdörtgen şekilli boşluğun farklı rotor modelleri için motor performansındaki etkisi incelenmiştir.

Tablo 3.3 Farklı rotor model görünümleri



Tablo 3.3. Devamı



Tablo 3.4. Farklı rotor modelleri için motor çıktıları.

Model	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması (Nm)	Faz Akımı (A)	Ld İndüktansı (mH)	Lq İndüktansı (mH)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)
Model 1	39,11	7,84	13,84	144,81	20,40	7,09
Model 2	39,14	7,82	13,89	144,70	20,40	7,09
Model 3	37,59	6,65	13,41	143,99	21,29	6,76
Model 4	37,60	6,62	13,42	143,91	21,29	6,75
Model 5	36,07	7,04	12,96	143,85	22,18	6,48
Model 6	36,08	7,02	12,97	143,78	22,17	6,48
Model 7	34,69	7,60	12,56	143,41	23,03	6,22
Model 8	34,75	7,58	12,60	143,36	23,04	6,22

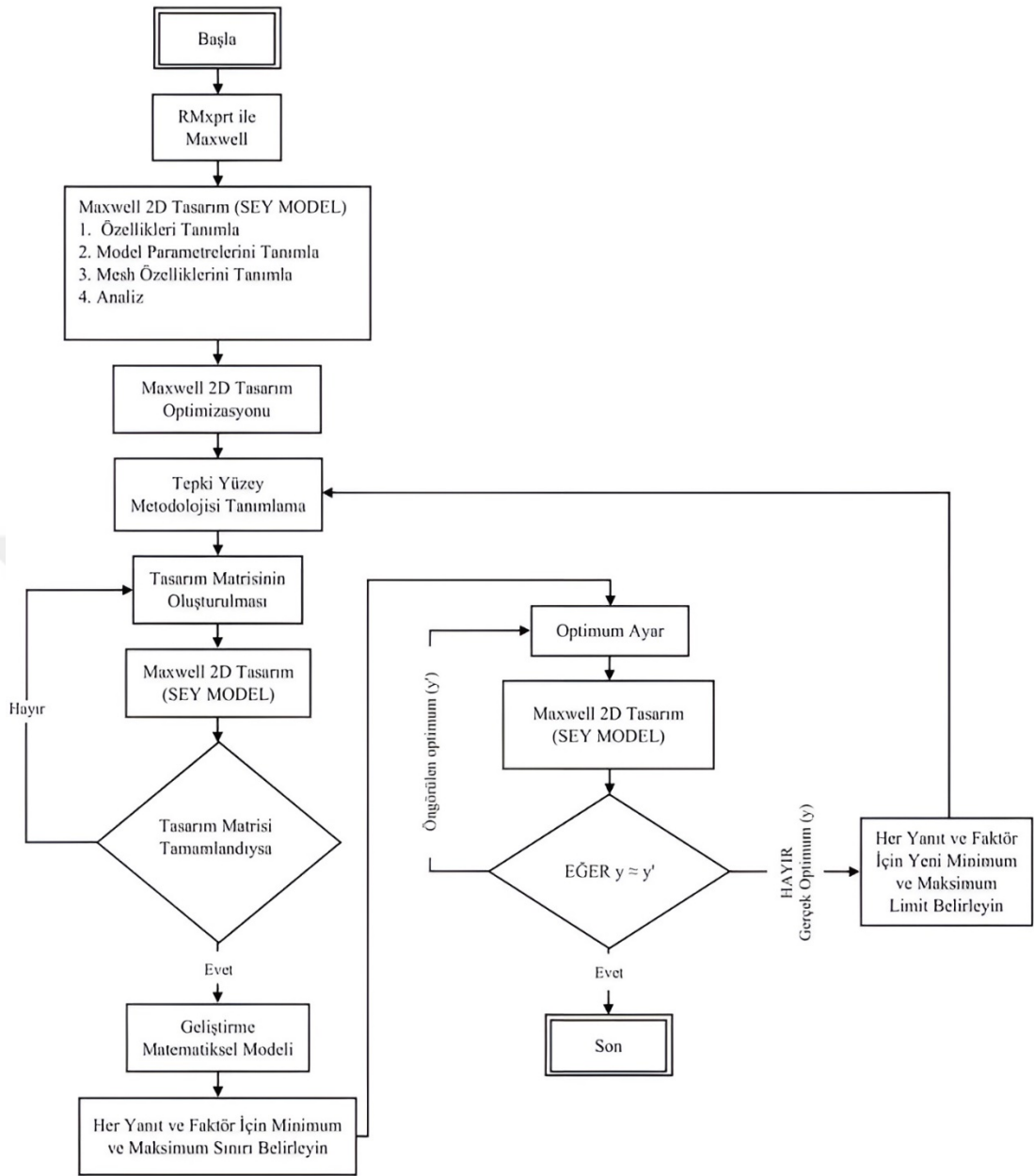
Referans motorda (**Model 8**) rotorun üst kısmında yer alan dikdörtgen şekilli boşluğun değişimi Model 1-Model 2, Model 3-Model 4, Model 5-Model 6, Model 7-Model 8 ikilileri karşılaştırılarak incelenebilir. Tablo 3.4'te görüldüğü üzere dikdörtgen şekilli boşluğun motor performansında herhangi büyük değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. Bu açıdan referans model olarak Model 7 Ansys Maxwell modelinde optimizasyon modeli olarak seçilmiştir.

3.4. Tepki Yüzey Metodolojisi (TYM)

Tepki yüzeyi metodolojisi (TYM), ilgilenilen bir cevabın çeşitli değişkenlerden etkilendiği problemleri analiz etmek için sıklıkla kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir. Süreci etkileyen parametrelere bağımlı giriş değişkenleri, cevaplara ise bağımlı çıkış değişkenleri denir [74] ve bu yöntemin amacı cevabı optimize etmektir.

Tepki yüzeyi, yüzey yerleşimini esas alan bir yöntemdir. Bu nedenle, bir TYM çalışmasının ana hedefleri, yerel maksimum, yerel minimum ve sırt çizgilerini içeren yanıt yüzeyinin topografyasını anlamak ve en uygun yanıtın olduğu bölgeyi bulmaktır. TYM, yeni bilimsel çalışma ve ürünlerin tasarlanması, formüle edilmesi, geliştirilmesi ve analiz edilmesinde önemlidir. Ayrıca mevcut çalışmaların ve ürünlerin iyileştirilmesinde etkilidir [75]. TYM, girdi ve çıktı değişkenleri arasında uygun bir yaklaşıklık ilişkisini araştırır ve faktör alanının bir bölgesi için optimal çalışma koşullarını tanımlar [76].

Deneylerin tasarımı (DoE), TYM'nin en önemli yönüdür. DoE, cevabın iyi incelenmesi gereken en uygun noktaların seçimini amaçlar. Sürecin matematiksel modeli çoğunlukla deney tasarımı ile ilgilidir. Bu nedenle, deney tasarımının seçimi, tepki yüzey yapısının doğruluğunu belirlemede büyük bir etkiye sahiptir. TYM'nin bazı avantajları bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin belirlenmesi, ele alınan sistemin matematiksel olarak analiz edilmesi, çok fazla deneme sayısı yerine deneme sayısını azaltarak zamandan ve maliyetten tasarruf sağlanması olarak sıralanabilir [77]. Şekil 3.5'de TYM akış şeması verilmiştir.



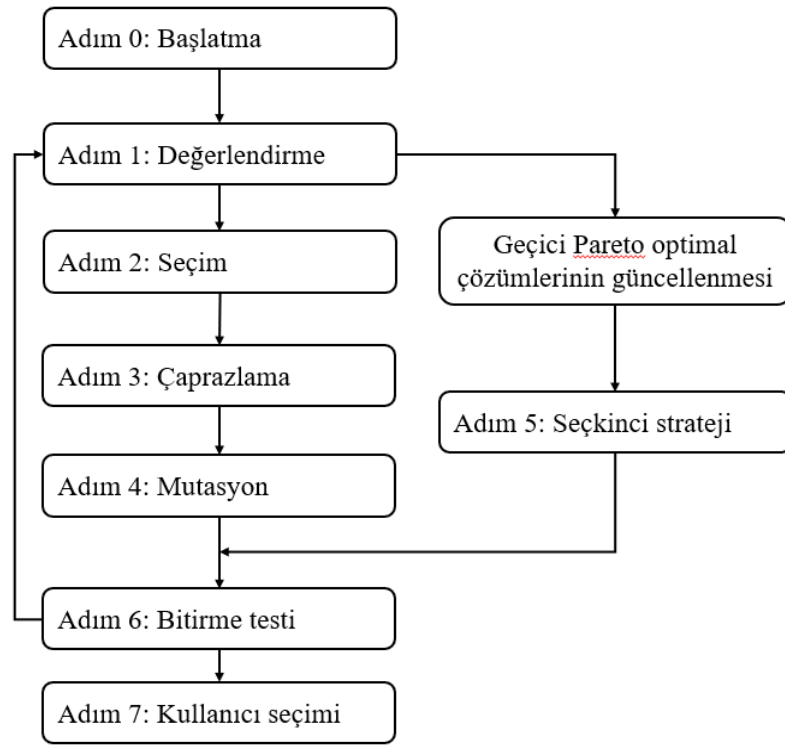
Şekil 3.5. Tepki Yüzey Metodolojisi (TYM) akış diyagramı [78].

3.5. Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA)

Bir elektrik motorunun tasarımı, çok amaçlı bir problemdir, yani birbiriyle çelişen birçok hedef arasında en uygun uzlaşma arayışıdır. Çok amaçlı optimizasyon algoritmaları, Pareto baskınlık kriterine göre bir dizi olası çözüm arar. Pareto cephesi elde edildiğinde, tasarımcı, her bir hedefin diğerlerinin iyileştirilmesiyle nasıl cezalandırıldığına dair net bir görüşle, öndekiler arasından tercih edilen uzlaşma

çözümünü seçebilir. Bu nedenle, insan kararı otomatik çözümden sonra gelir, daha önce değil, normalde tek amaçlı optimizasyonda olan budur. Makul bir sürede çok sayıda yinelemeye izin vermek için işlevsel değerlendirmenin, yani her bir geçici çözüm için tüm hedef fonksiyonların değerlendirilmesi anlamına gelmesi çok önemlidir. Hesaplama süresi, güncel olarak, SEY tabanlı optimizasyonun gerçek darboğazıdır. Teoride, çok amaçlı optimizasyon problemlerini nispeten yüksek sayıda çelişen hedeflerle çözmek mümkün olsa bile, optimizasyon karmaşıklığının artmasıyla ortaya çıkan iki problem vardır. İlk olarak, Pareto cephesinin doğru bir tahmini, yeterli sayıda Pareto-optimal çözüme ihtiyaç duyar ve bu sayı, nesnel vektörlerin boyutu ile katlanarak büyür. Sonuç olarak, analiz edilecek olası çözümlerin sayısı ve hesaplama süresi artar. İkinci sorun, sonuçların yorumlanmasıyla ilgilidir. İki hedefli bir Pareto cephesi problemi için bir düzleme doğru basit bir eğri iken, hedefler üçten fazla olduğunda cephenin geometrik bir temsili yoktur ve tasarım hedefleri arasında en iyi uzlaşmayı gerçekleştiren çözümün seçimi imkânsız hale gelir. Otomatik tasarım prosedürünün benimsenmesinin avantajı, sonuçların doğru bir şekilde yorumlanması için bir makine uzmanının müdahalesini gerektirmesi durumunda kısmen ortadan kalkar [79].

Genetik Algoritmalar esas olarak tek amaçlı optimizasyon problemlerine uygulanmıştır. Ancak birçok gerçek dünya probleminin birden çok amaç fonksiyonu vardır. Bu amaç fonksiyonları, tek amaçlı bir genetik algoritma tarafından ele alınabilmesi için bir skaler uygunluk fonksiyonunda birleştirilmelidir. Burada çok amaçlı optimizasyon problemlerinin amacı, genellikle birbiriyle çelişen çok amaçlı işlevler arasında olası tüm dengeleri bulmaktır. Karar verici ile yinelemeli etkileşim olmaksızın çok amaçlı bir optimizasyon problemi için tek bir çözüm seçmek zor olduğundan, genel bir yaklaşım karar vericiye Pareto optimal çözümler kümesini göstermektir. Daha sonra tercihe bağlı olarak Pareto optimal çözümlerden biri seçilebilir. Genetik algoritmalar ile tüm Pareto optimal çözümlerini bulmak için, her nesilde bireylerin çeşitliliği korunmalıdır [80]. Şekil 3.6'da çok amaçlı genetik algoritmanın (MOGA) blok şeması verilmiştir.



Şekil 3.6. Çok Amaçlı Genetik Algoritmanın (MOGA) blok şeması [80].

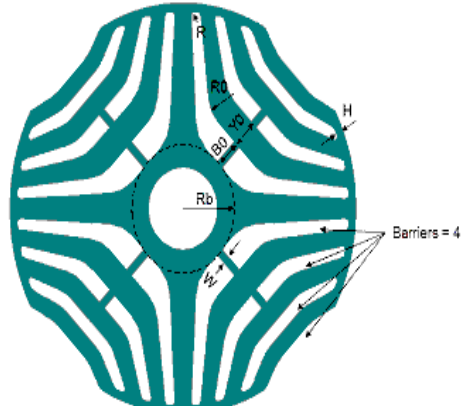
Tasarımı analitik modellere dayandıranlar da dahil olmak üzere, literatürdeki çoğu yazar SynRM'lerin tasarımında sonlu elemanlar yönteminin (SEY) kullanımını belirtmektedir [81,82]. Sonlu elemanlar yöntemi ve çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının birlikte kullanıldığı etkin bir optimizasyon için; rotor geometrisinin tanımının olabildiğince basitleştirilmesi, aday çözümlerin SEY değerlendirme süresini en aza indirmesi, zaman ve doğruluk arasında bir denge sağlamak için MOGA'yı ve ayarlarını doğru şekilde seçmek gerekmektedir. Cupertino ve ark. SynRM'lerin rotor geometrisinin otomatik tasarımı için SEY ve MOGA kullanmışlardır. Özellikle popüler olan üç MOGA'nın performansı, nihai tasarımın kalitesi ve hesaplama süresi açısından analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada çok amaçlı genetik algoritma (MOGA), çok amaçlı diferansiyel evrim (MODE) ve çok amaçlı benzetilmiş tavlama (MOSA) SynRM'nin rotorunun optimizasyonuna uygulanmıştır [21].

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tablo 3.3'te verilen Model 7 Ansys Rmxprt ve Maxwell modelleme ara yüzünde otomatik modellenebildiği için Model 7 şekli referans alınarak optimizasyon işlemi yapılmıştır. Ayrıca Tablo 3.2'de verilen Rb uzunluğunun bariyer sayıları değişimi ile uygun olması için 18-19 mm aralığında değişecek şekilde güncellenmiştir. Tablo 4.1'de verilen veriler doğrultusunda sayısal çözümleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.2'de verilenler ve tanımlanan beş amaç fonksiyonu bariyer sayısı dikkate alınarak optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda en uygun büyüklükler elde edilmiştir. Daha sonra referans motorun stator büyüklükleri aynı kalmak şartıyla hesaplanan optimum boyutlandırma sonuçları referans makine ile karşılaştırılarak geometrideki değişim, tork, tork dalgalanması, verimde ne kadarlık değişim oluşturduğu incelenmiştir. Tablo 3.3'de yer alan modellerin oluşturulmasında kullanılan rotor büyüklüklerinin (Bariyer sayısı, H, W, R, B0, Rb, Y0, R0) ölçüleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Rotor tasarımı için büyüklükler.

Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi	Rotor
Bariyer Sayısı	4	-	
Bariyer uç köprü kalınlığı (H)	1	mm	
Bariyer köprü genişliği (W)	1	mm	
Bariyer uç yarıçapı (R)	0,5	mm	
Bariyer köprü yüksekliği (B0)	5	mm	
Akı bariyeri başlama yarı çapı (Rb)	18	mm	
Akı bariyeri demir genişliği (Y0)	5	mm	
Akı bariyeri köşe demir yarıçapı(R0)	18	mm	

Rotora ait Bariyer sayısı, H, W, R, B0, Rb, Y0, R0 değişkenler minimum ve maksimum aralıkları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Rotor tasarımı giriş değişkenleri ve sınırları.

Rotor Boyutlandırma Büyüklikleri	Değeri	Birimi	Minimum Değeri	Maksimum Değer
Bariyer Sayısı	4	-	1	5
H	1	mm	0,5	2
W	1	mm	0	2
R	0,5	mm	0	2
Rb	18	mm	18	19
B0	5	mm	2,5	5
Y0	5	mm	2,5	5
R0	18	mm	0	36

Aşağıda verilen amaç fonksiyonları doğrultusunda optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak MOGA ve Tepki Yüzey Metodolojisi seçilmiştir. MOGA için maksimum iterasyon sayısı 500 olarak sınırlandırılmıştır. Tepki Yüzey Metodolojisi için tasarım giriş değişkenlerine göre yazılım tarafından Ek 1’de verilen 161 tasarım noktası oluşturulmuştur. Bariyer sayısı tam sayı olarak yazılımda üretilebilir değer içerisinde tanımlanmıştır. Diğer giriş değişkenleri belirlenen aralıkta değişmektedir.

Seçilen optimizasyon yöntemi için A.F.1’de her bir optimize edilecek büyüklük için maksimum ve minimum operatör seçilememektedir. Bu nedenle sınır değerleri girilmiştir. Çalışmada yer alan amaç fonksiyonlarına benzer tanımlamalar, farklı motor ve jeneratörler için önerilmiştir. Örneğin hat başlatmalı sürekli mıknatıslı motor için maliyet ve ağırlık içeren optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir [83], yine benzer bir yaklaşım tüp tipi doğrusal jeneratör için tepki yüzeyi metodolojisi ve MOGA ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir [84]. Burada ele alınan amaç fonksiyonları referanslarda belirtilen maliyet ve ağırlık yerine tork dalgalanması olarak ele alınmıştır.

Tablo 4.3. MOGA ve Tepki Yüzey Metodolojisi için tanımlanan amaç fonksiyonları.

Amaç Fonksiyonu	Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Operatör	Değeri	Ağırlık	Birimi
	<i>Tork</i>	$\geq$	34	1	Nm
Amaç fonksiyonu 1 (A.F.1)	<i>Tork Dalgalanması</i>	=	0	1	Nm
	<i>Verim</i>	=	1	1	-
Amaç fonksiyonu 2 (A.F.2)	$\frac{Tork * Verim}{Tork Dalgalanması}$	Maksimize		-	
Amaç fonksiyonu 3 (A.F.3)	<i>Tork * Verim</i>	Maksimize		-	
Amaç fonksiyonu 4 (A.F.4)	$\frac{Verim}{Tork Dalgalanması}$	Maksimize		-	
Amaç fonksiyonu 5 (A.F.5)	<i>Verim</i>	Maksimize		-	

A.F.1: Ulaşılmaması hedeflenen tork, tork dalgalanması ve verim değeri tanımlanmıştır. Her üç senkron relüktans motor için tasarimsal açıdan eşit ağırlık ile tanımlanmıştır.

A.F.2: A.F.1 için verilen üç büyüklük tek bir formülle ifade edilerek genel performans artımı amaçlanmıştır. Üç büyüklük için negatif tam sayılı ifade olmadığından dolayı ifadeyi maksimum yapacak en uygun boyutlandırma verisi aranmıştır.

A.F.3: Tork ve verimi yükseltecek boyutlandırma büyüklüğünün bulunması hedeflenmiştir.

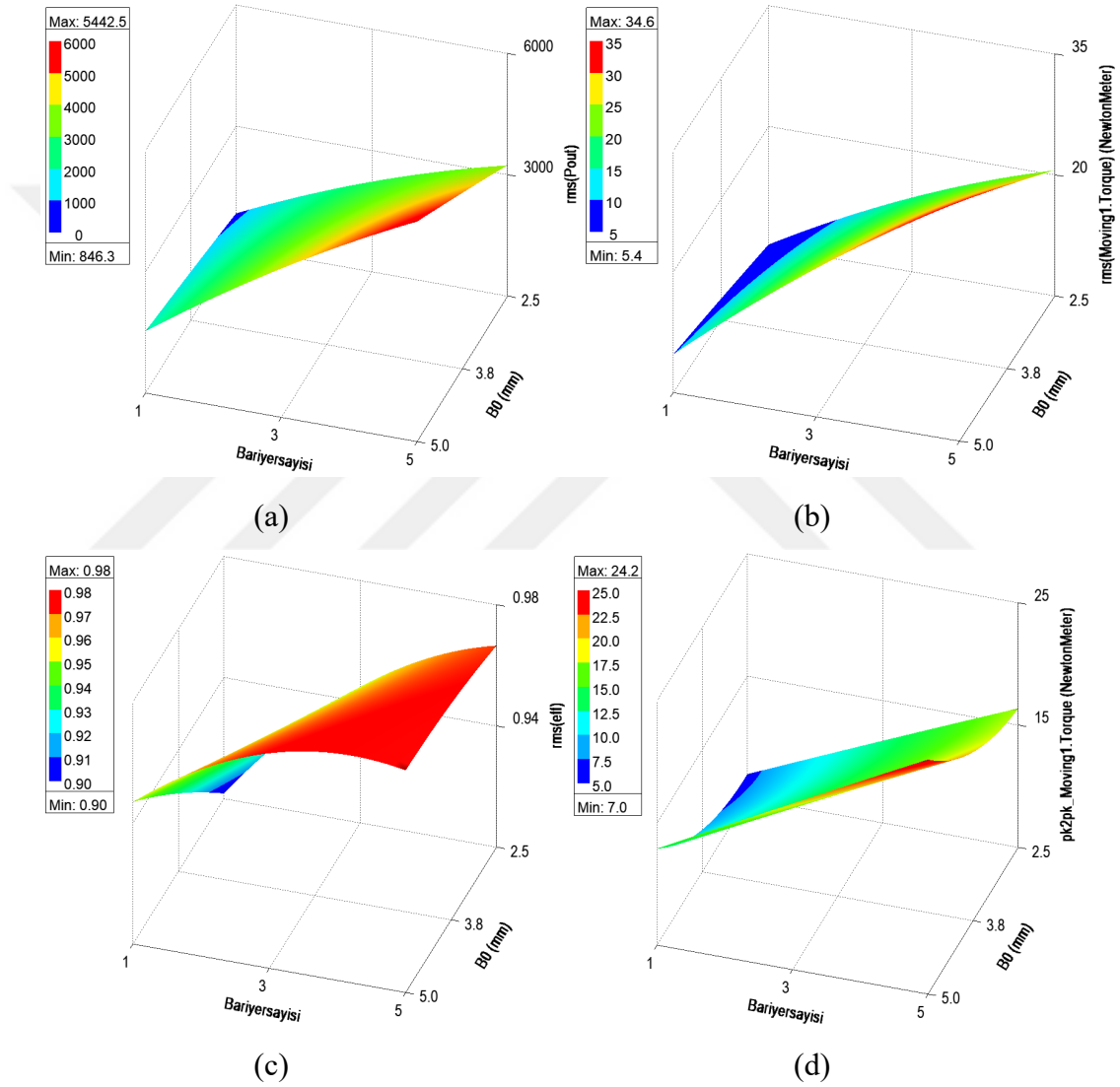
A.F.4: Motor verimini artması beklenirken aynı zamanda tork dalgalanmasını küçülten boyutlandırma büyüklüğünün bulunması hedeflenmiştir.

A.F.5: Sadece verimi yükseltecek boyutlandırma büyüklüğünün bulunması hedeflenmiştir.

3.6. Tepki Yüzey Metodolojisi ile Nümerik Analiz

Ansys Maxwell'de optimizasyon aracı altında DoE (Design of Experiment) (Deney Tasarımı) tercih edilerek Tepki Yüzey Metodu ile Tablo 4.3'de verilen amaç

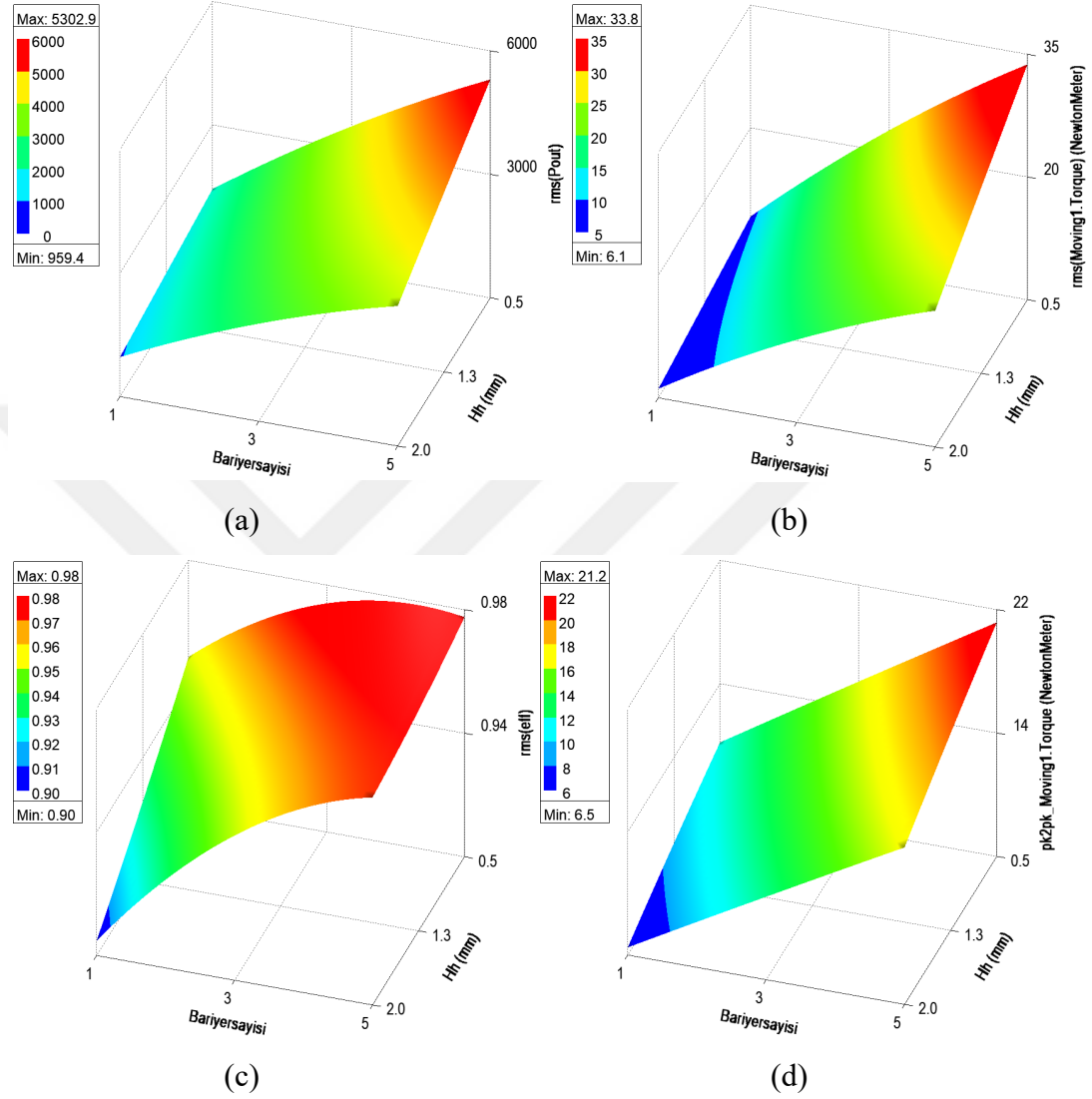
fonksiyonları sırasıyla sınanmıştır. Bu yöntemde giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki ilişki grafik olarak alınabilmektedir. Özellikle bu değişimler hangi rotor büyüklüklerinin çıkış değişkenleri üzerinde etkisinin yüksek olduğunu belirlemeyi sağlamaktadır. İleride gerçekleştirilecek optimizasyon uygulamaları için değişkenlerin sınırlarını belirlemeye yardımcı olacaktır. Ele alınan bu grafikler bariyer sayısının değişimi dikkate alınarak Şekil 4.1-4.7 olarak verilmiştir:



Şekil 4.1. Giriş değişkeni B0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması.

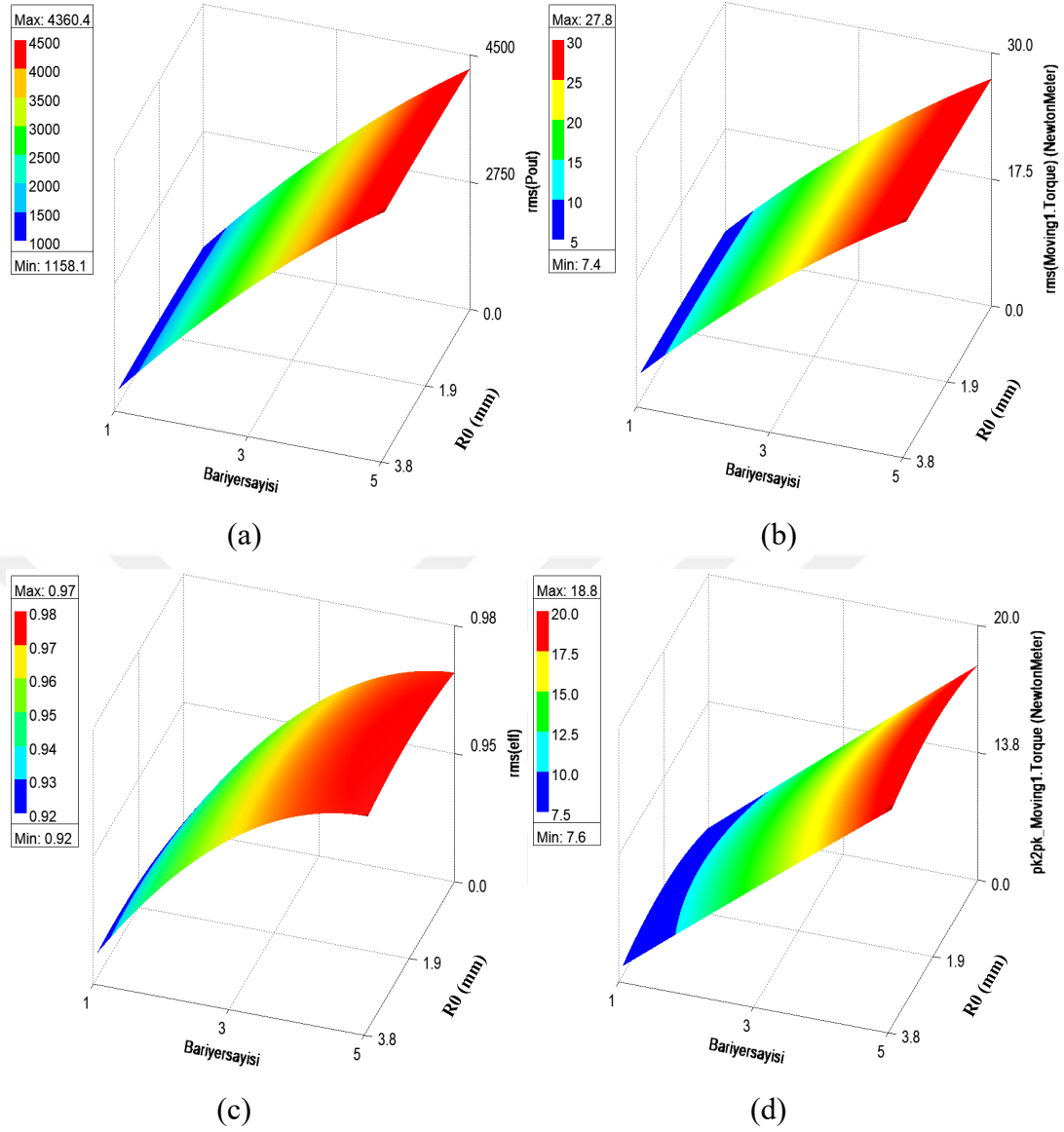
Burada bariyer sayısının artışı çıkış gücü, tork, verim ve tork dalgalanmasını arttırmaktadır. Bo değişimi özellikle tork dalgalanması üzerinde etkisi az olmasına karşın düşük bariyer sayısında verim, çıkış gücü ve tork üzerinde etkilidir. Bo'ın düşük

değerliliklerinde tork dalgalanması azalmaktadır. Bariyer köprü yüksekliği; 3, 4 ve 5 bariyer durumunda motor verimini çok az etkiyle etkilemektedir.



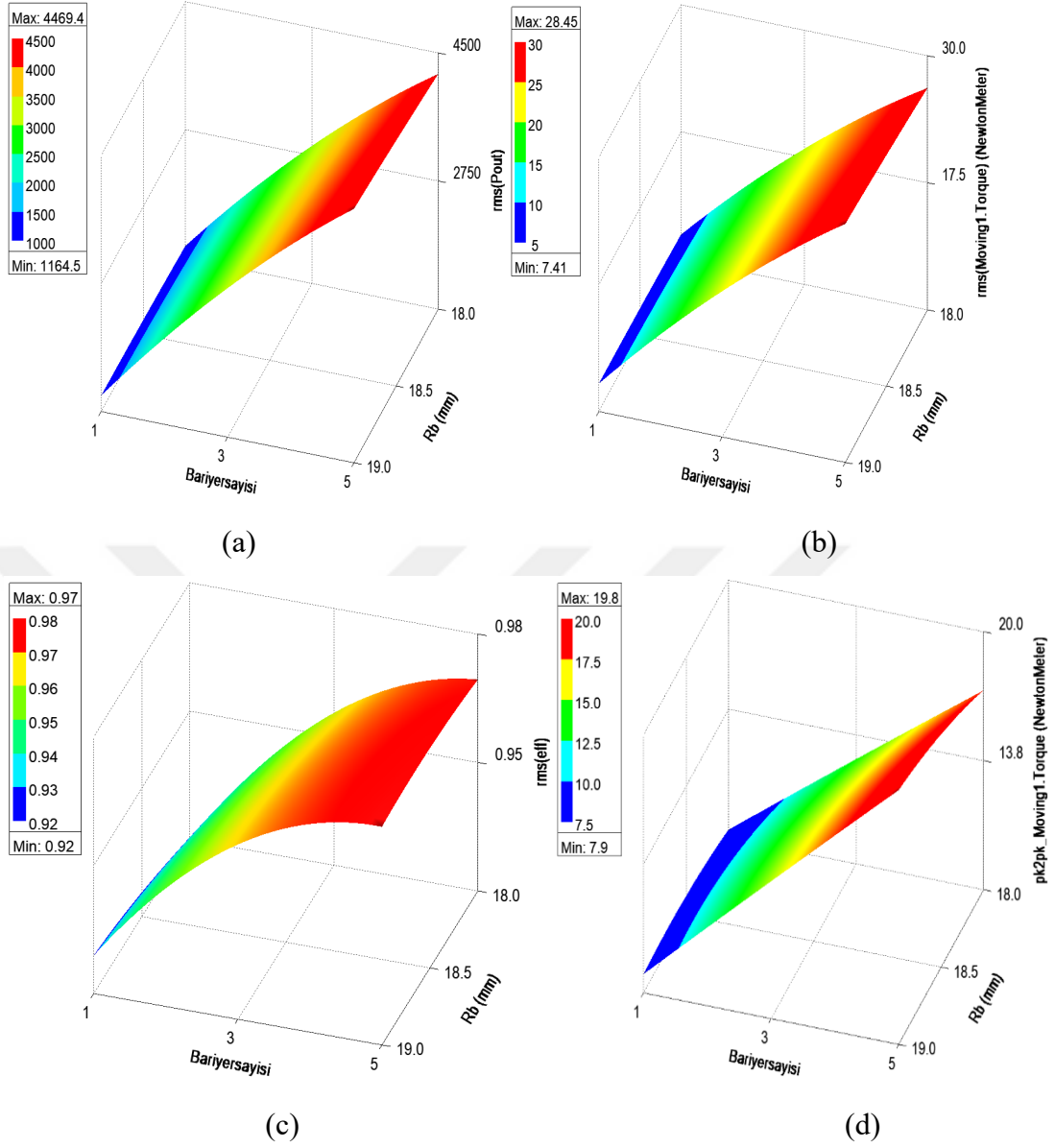
Şekil 4.2. Giriş değişkeni H ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması.

Burada bariyer sayısının artışı ve bariyer uç köprü kalınlığının azalması çıkış gücü, tork, verim ve tork dalgalanmasını arttırmaktadır. H değişimi özellikle tork dalgalanması üzerinde etkisi az olmasına karşın düşük bariyer sayısında verim, çıkış gücü ve tork üzerinde etkilidir.



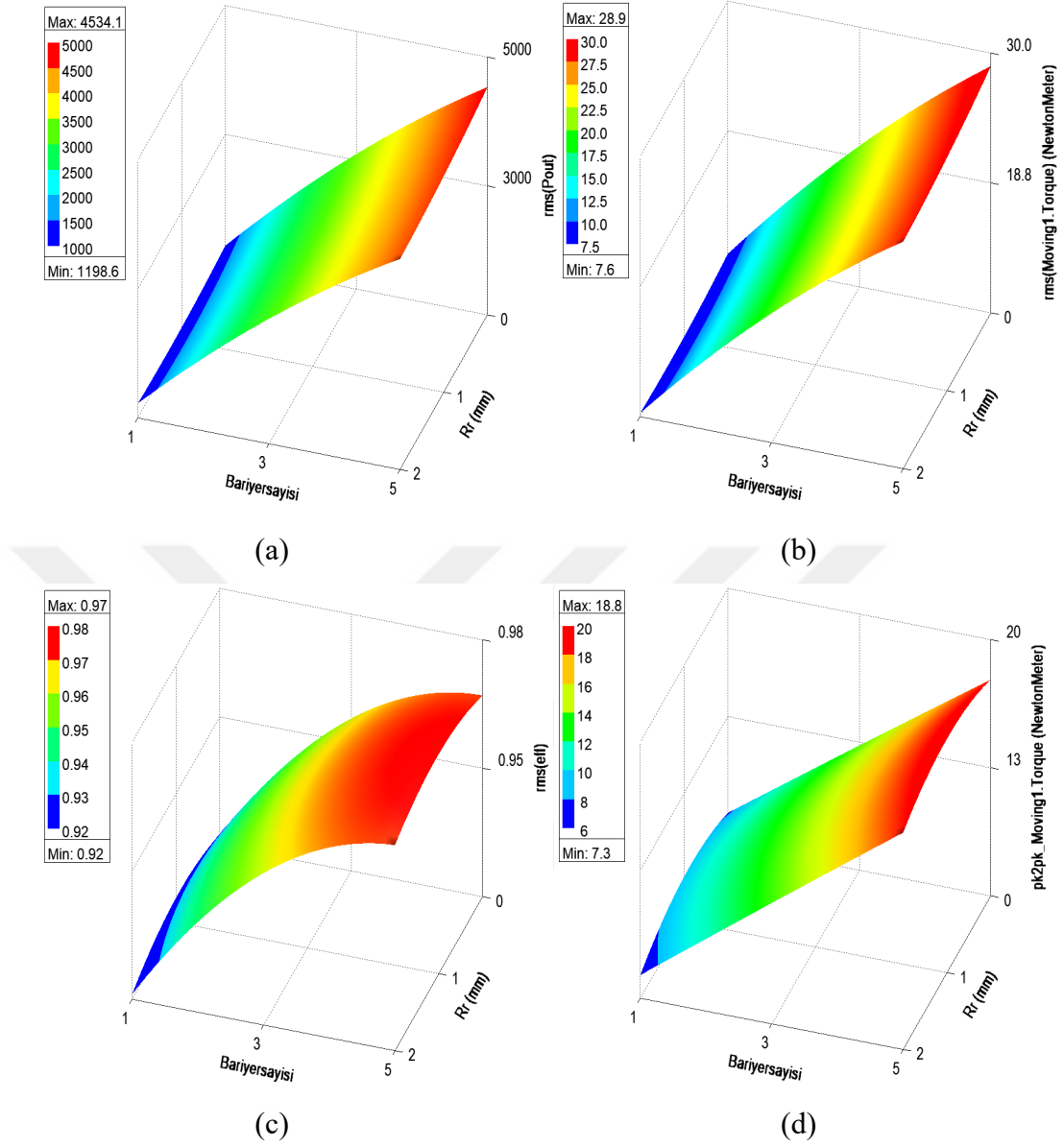
Şekil 4.3. Giriş değişkeni R_0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması.

Burada akı bariyeri köşe demir yarıçapı değişimi çıkış gücü ve torku etkilememektedir. Verim ve tork dalgalanmasını çok az etkilemektedir. Bariyer sayısının artışı çıkış gücü, tork ve tork dalgalanmasını yaklaşık doğrusal olarak arttırmaktadır.



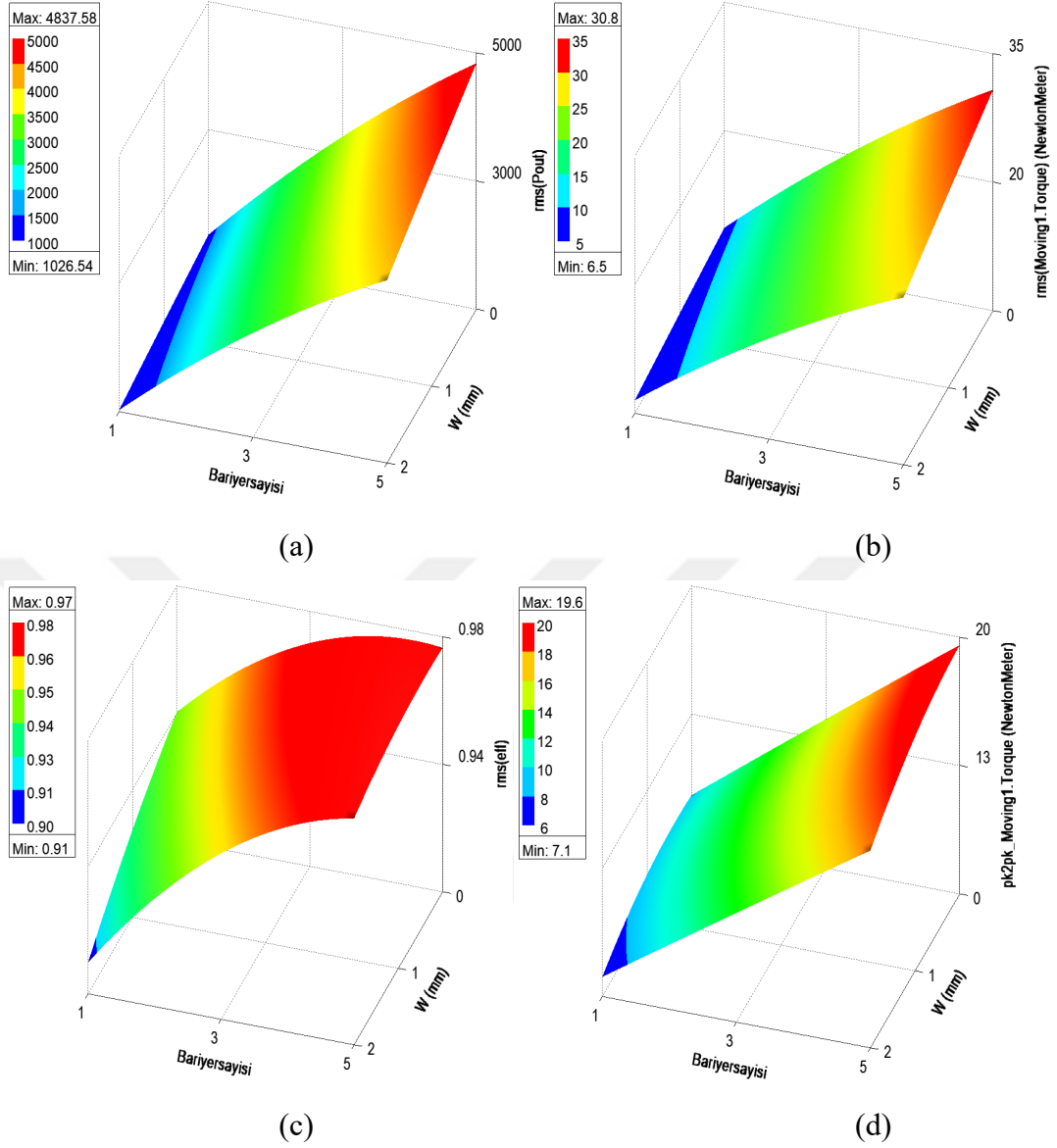
Şekil 4.4. Giriş değişkeni R_b ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması.

Burada akı bariyeri başlama yarı çapı değişimi verim ve tork dalgalanmasını çok az etkilemesine karşın çıkış gücü ve torku etkilememektedir. Bariyer sayısının artışı çıkış gücü, tork ve tork dalgalanmasını yaklaşık doğrusal olarak arttırmaktadır.



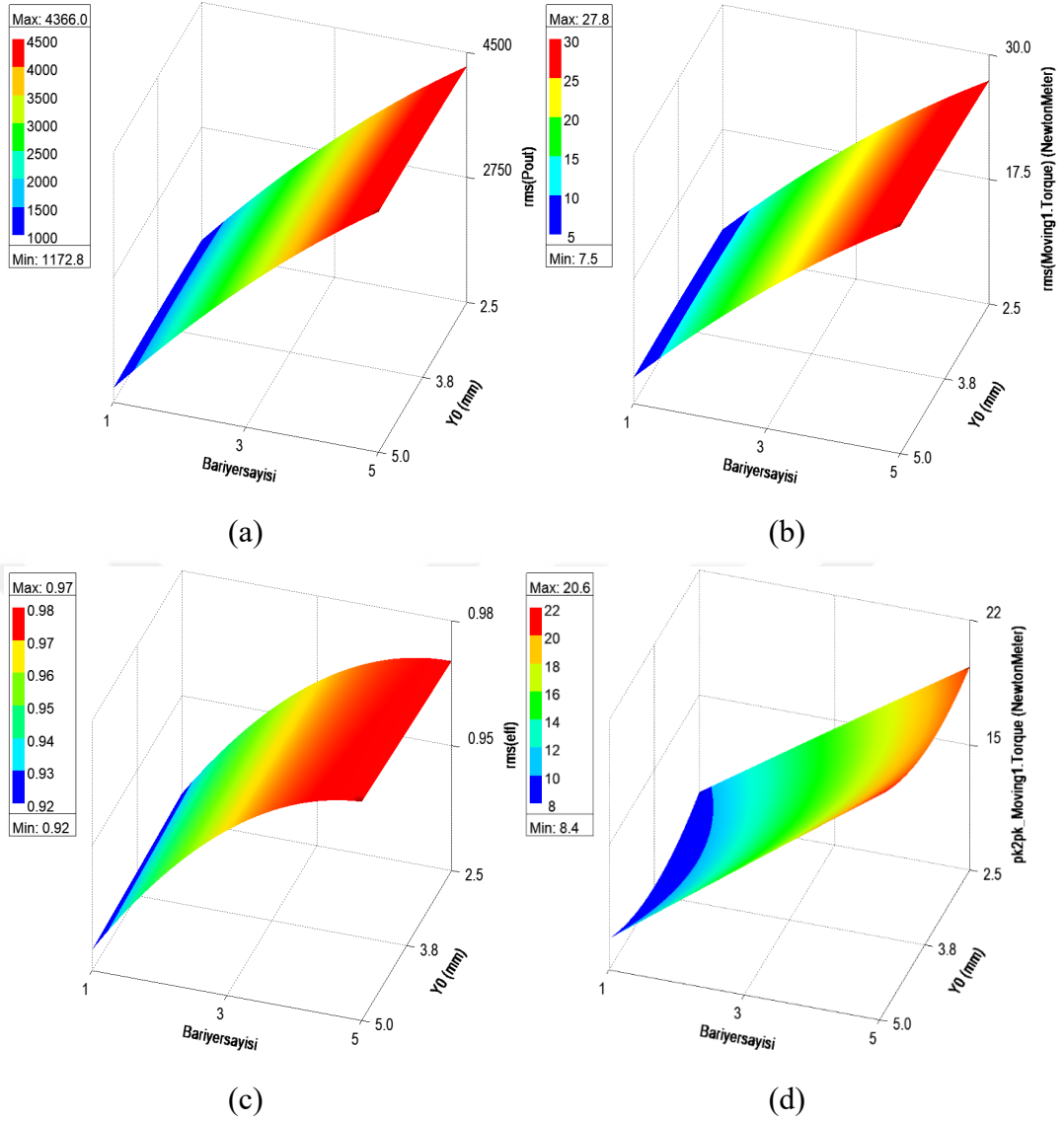
Şekil 4.5. Giriş değişkeni R ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması.

Burada bariyer sayısının artışı çıkış gücü, tork ve tork dalgalanmasını arttırmaktadır. Bariyer uç yarıçapı çıkış gücü, torku, verim ve tork dalgalanmasını çok az etkilemektedir.



Şekil 4.6. Giriş değişkeni W ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması.

Burada çıkış gücü, tork, verim ve tork dalgalanmasını oldukça etkilemektedir. Özellikle W uzunluğunun azalması motor performansını arttırmaktadır. Motor performansı artarken aynı zamanda tork dalgalanmasının artması nedeniyle bariyer köprü genişliğinin uygun seçilmesi elzemdir. Bu açıdan bariyer köprü genişliği değişimi rotor parametreleri içerisinde en önemli parametre olduğu söylenebilir. Diğer parametre değişimleri gibi bariyer sayısının artışı; çıkış gücü, tork, verim ve tork dalgalanmasını arttırmaktadır.



Şekil 4.7. Giriş değişkeni Y0 ile Bariyer sayısının değişimine göre çıkış değişkeni ile ilişkisi; a) Güç değişimi, b)Tork, c)Verim, d)Tork dalgalanması.

Burada akı bariyeri demir genişliği değişimi; tork, çıkış gücü ve verimdeki değişim bariyer sayısına göre gerçekleşmektedir. Bariyer sayısının artışı çıkış gücü, tork ve tork dalgalanmasını arttırmaktadır. Ayrıca tork dalgalanmasındaki değişim dikkate alındığında Y0'ın düşük ve yüksek değerlerindeki tork dalgalanması sebebiyle uygun değerde alınması gerekmektedir.

Rotor giriş değişkenlerine göre tork ve çıkış gücü değişimi benzer değişim sergilemesine karşın verim ve tork dalgalanması değişimi farklıdır. Bariyer sayısı arttıkça tork dalgalanması artmasına karşın motor performansı da artmaktadır.

Rotor değişkenlerini ve motor performansını içeren optimizasyon çalışmaları için bariyer sayısı en az üç alınmalıdır. Daha düşük bariyer sayılarında motor performansı oldukça küçülmektedir. Bu sebeple MOGA için 3, 4 ve 5 bariyer sayılarında optimizasyon yapılmıştır.

Tablo 4.3'te yeralan amaç fonksiyonları üzerinden optimizasyon gerçekleştirildiğinde rotor boyutlandırması için elde edilen en uygun değerler Tablo 4.4'te ve performans verileri ise Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Amaç fonksiyonlarına göre rotor boyutlandırması için optimum değerler.

	Bariyer Sayısı	H	W	R	Rb	B0	Y0	R0
AMAÇ FONSIYONU 1	5	2 mm	0	0	18 mm	5 mm	2,5 mm	0
AMAÇ FONSIYONU 2	5	2 mm	0	0	18 mm	2,5 mm	5 mm	0
AMAÇ FONSIYONU 3	5	0,5 mm	0	0	18 mm	5 mm	5 mm	36 mm
AMAÇ FONSIYONU 4	5	0,5 mm	0	2 mm	19 mm	5 mm	5 mm	36 mm
AMAÇ FONSIYONU 5	5	0,5 mm	0	2 mm	18 mm	5 mm	5 mm	0

Tablo 4.5. Amaç fonksiyonlarına göre tanımlanan çıkış parametreleri.

	Çıkış Gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)	İterasyon Numarası
AMAÇ FONSIYONU 1	5045	0,96	32,12	19,06	17,68	5,88	48
AMAÇ FONSIYONU 2	3041	0,95	19,36	12,68	11,37	4,20	46
AMAÇ FONSIYONU 3	7431	0,97	47,31	26,24	22,86	10,18	56
AMAÇ FONSIYONU 4	6974	0,977	44,4	31,36	21,71	9,8	152
AMAÇ FONSIYONU 5	7014	0,98	44,65	25,85	21,18	9,74	104
REFERANS MOTOR- 3 Bariyer	4708,68	0,955	29,976	5,49	11,44	5,38	-
REFERANS MOTOR- 4 Bariyer	5457,2916	0,9619	34,74	7,32	12,64	6,25	-
REFERANS MOTOR- 5 Bariyer	5873,14	0,972	37,389	8,99	12,73	6,702	-

Tablo 4.4'teki veriler dikkate alınarak her bir amaç fonksiyonu için, motor gövdesi, kapak, rulman ve tüm işçilik ihmal edilerek sadece stator sacı, rotor sacı, rotor mili ve stator bakır miktarları dikkate alınarak maliyet hesaplaması yapılmıştır. Hesaplamalarda stator ve rotor çelik malzeme fiyatı 1000 \$/ton [85] stator bakır malzeme fiyatı 8395 \$/ton [86] rotor mili malzeme fiyatı 33,52 TL/kg [87] ve günlük dolar kuru 18,77 TL/\$ [88] olarak alınmıştır. Rmxprt'te yapılan hesaplamalar sonucunda yaklaşık maliyet TL cinsinden ve hesaplanan malzeme ağırlıkları kg cinsinden Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Tablo 4.4'teki verilerin Rmxprt'teki çözüm sonuçları.

	Çıkış Gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Faz Akımı (A)	Stator Bakır Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Stator Çelik Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Rotor Çelik Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Rotor Mili Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Gövde ve İşçilik Hariç Yaklaşık Maliyet (TL)
AMAÇ FONSIYONU 1	3999,4	0,87	25,46	9,89	2,015	11,9551	4,04	1,951	683,12
AMAÇ FONSIYONU 2	4002,06	0,85	25,47	10,82	2,015	11,9551	5,74	1,951	715,03
AMAÇ FONSIYONU 3	4008,48	0,90	25,51	8,58	2,015	11,9551	4,48	1,951	691,38
AMAÇ FONSIYONU 4	4000,77	0,90	25,46	8,48	2,015	11,9551	4,53	1,951	692,32
AMAÇ FONSIYONU 5	4006,9	0,90	25,50	8,58	2,015	11,9551	4,40	1,951	689,88
REFERANS MOTOR- 4 Bariyer	4009,3	0,89	25,52	9,14	2,015	11,9551	4,78	1,951	697,01

3.7. Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) Metodolojisi ile Nümerik Analiz

Tablo 4.3'te verilen amaç fonksiyonlarına göre Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'de sırasıyla optimizasyon sonuçları verilmiştir. Burada bariyer sayısının ve rotor boyutlandırma büyüklüklerinin değişimi Tablo 4.8'de görüldüğü üzere motor performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.

Tablo 4.7. MOGA’da amaç fonksiyonlarına göre elde edilen en uygun rotor boyutlandırma büyüklükleri.

	Bariyer Sayısı	B0 (mm)	H (mm)	R0 (mm)	Rb (mm)	R (mm)	W (mm)	Y0 (mm)
Amaç Fonksiyonu 1	3	4,513	0,5739	31,56	18,1	0,5386	0,07065	2,987
	4	4,319	0,613	12,56	18,2	0,711	0,327	3,933
	5	4,15	1,302	18,86	18,28	0,1491	0,03317	2,992
Amaç Fonksiyonu 2	3	2,688	1,821	33,89	18,27	0,0488	0,5027	3,679
	4	2,521	1,344	10,06	18	1,32	0,2361	2,51
	5	3,068	1,534	7,534	18,36	0,4241	1,786	4,266
Amaç Fonksiyonu 3	3	4,839	0,5882	10,13	18,58	0,04814	0,03183	4,164
	4	4,966	0,5412	34,08	18,93	0,05477	0,03232	4,747
	5	4,913	0,5338	21,31	18,74	0,5548	0,03469	3,373
Amaç Fonksiyonu 4	3	2,895	1,928	8,631	18,13	0,3405	0,5736	3,452
	4	2,509	1,785	0,413	18	0,00572	0,9521	2,515
	5	2,812	1,833	25,17	18,84	0,6245	1,866	4,268
Amaç Fonksiyonu 5	3	4,895	0,5173	33,62	18,68	1,652	0,1664	4,524
	4	4,211	0,524	34,1	18,37	0,9546	0,08756	2,874
	5	4,979	0,5427	20,2	18,38	1,689	0,126	3,578

Tablo 4.8’de verilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde; motor performansını artırmaya yönelik tanımlanan fonksiyonlar içerisinde en iyi sonuçlar A.F.1 ile elde edilmiştir. Diğer optimizasyon sonuçları incelendiğinde ele alınan amaç fonksiyonuna göre çıkış performansı değişmiştir. Örneğin; A.F. 2 ve A.F. 4 düşük tork dalgalanması sunmasına karşın çıkış gücü ve tork büyüklüğü açısından uygun değildir. Özellikle performansın yüksek olmasına karşın tork dalgalanmasının yüksekliği nedeniyle A.F. 3 ve A.F. 5 sonuçları uygun değildir. A.F.1’de 4 ve 5 bariyerli sonuçlar çıkış gücü, tork, verim ve özellikle düşük tork dalgalanması açısından en uygun sonuç olduğu söylenebilir. Buradaki 4 ve 5 bariyerli tasarımlar için mekanik ve sıcaklık analizleri gerçekleştirildikten sonra imal edilerek testleri gerçekleştirilebilir.

Tablo 4.8. MOGA’da amaç fonksiyonlarına göre elde edilen en uygun rotor verileri.

Tanımlamalar	Bariyer Sayısı	Çıkış Gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması	Tork/Tork Dalgalanması Oranı	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (L_d/L_q)	İterasyon Numarası
A.F.1	3	4491,4580	0,9612	27,8283	7,7590	3,586583	10,7812	4,8106	456
	4	5474,2546	0,9624	34,0128	4,9986	6,804465	12,3316	6,2181	415
	5	5635,6102	0,9594	34,8051	5,1703	6,731737	12,8445	6,0104	390
A.F.2	3	2239,5512	0,9226	13,6391	1,2253	11,13123	7,1850	2,7936	423
	4	2851,7826	0,9347	17,3379	1,7932	9,668693	8,0090	3,3715	444
	5	3383,9965	0,9444	20,0271	2,3715	8,444908	8,5995	3,8452	413
A.F.3	3	5103,1384	0,9693	31,7673	18,2952	1,736373	11,7749	5,4868	447
	4	6864,1267	0,9659	42,9709	19,8276	2,167226	15,1702	7,9063	462
	5	7709,4621	0,9774	48,3838	23,6928	2,042131	16,8787	8,7402	435
A.F.4	3	2183,6832	0,9204	13,1738	1,1568	11,38814	7,1042	2,7339	431
	4	2421,7312	0,9224	14,4847	1,3179	10,99074	7,4155	2,9061	423
	5	2814,7021	0,9335	16,2469	1,8288	8,883913	7,7330	3,2531	439
A.F.5	3	5141,2492	0,9757	31,9277	15,9860	1,997229	11,6096	5,7166	439
	4	5506,2068	0,9778	34,2493	11,0018	3,113063	12,3943	5,9276	449
	5	7449,7885	0,9828	46,6130	23,8347	1,955678	16,0849	8,5289	464
REFERANS MOTOR	3	4708,68	0,955	29,976	5,49	5,460109	11,44	5,38	-
	4	5457,2916	0,9619	34,74	7,32	4,745902	12,64	6,25	-
	5	5873,14	0,972	37,389	8,99	4,158954	12,73	6,702	-

Tablo 4.9. A.F.1 ile referans motorun karşılaştırılması (4 bariyer).

	Çıkış Gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)
Referans motor	5457,2916	0,9619	34,74	7,32	12,64	6,25
A.F.1	5474,2546	0,9624	34,0128	4,9986	12,3316	6,2181
Performans değişimi (%)	+0,31	+0,05	-2,09	-31,71	-2,44	-0,51

Tablo 4.10. A.F.1 ile referans motorun karşılaştırılması (5 bariyer).

	Çıkış Gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)
Referans motor	5873,14	0,972	37,389	8,99	12,73	6,702
A.F.1	5635,6102	0,9594	34,8051	5,1703	12,8445	6,0104
Performans değişimi (%)	-4,04	-1,30	-6,91	-42,49	+0,90	-10,32

Tablo 4.8'deki veriler dikkate alınarak her bir amaç fonksiyonu için, motor gövdesi, kapak, rulman ve tüm işçilik ihmal edilerek sadece stator sacı, rotor sacı, rotor mili ve stator bakır miktarları dikkate alınarak maliyet hesaplaması yapılmıştır. Hesaplamalarda stator ve rotor çelik malzeme fiyatı 1000 \$/ton [85] stator bakır malzeme fiyatı 8395 \$/ton [86] rotor mili malzeme fiyatı 33,52 TL/kg [87] ve günlük dolar kuru 18,77 TL/\$ [88] olarak alınmıştır. RMxprt ile yapılan analiz sonucunda bulunan değerler ve malzemelerin birim maliyeti üzerinden yaklaşık maliyet hesaplanmıştır (Tablo 4.11).

Tablo 4.11. Tablo 4.6'daki verilerin RMxprt'teki çözüm sonuçları.

Bariyer Sayısı	Çıkış Gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Faz Akımı (A)	Stator Bakır Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Stator Çelik Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Rotor Çelik Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Rotor Mili Yaklaşık Ağırlığı (kg)	Gövde ve İşçilik Hariç Yaklaşık Maliyet (TL)
3	3999,86	0,89	25,46	9,04	2,015	11,9551	5,17	1,951	704,33
AF1	3999,38	0,90	25,46	8,83	2,015	11,9551	4,87	1,951	698,70
5	4009,05	0,89	25,52	9,34	2,015	11,9551	4,54	1,951	692,51

Tablo 4.11. Devamı.

AF2	3	3999,7	0,85	25,46	11,18	2,015	11,9551	6,08	1,951	721,41
	4	3998,89	0,87	25,45	9,93	2,015	11,9551	5,75	1,951	715,22
	5	3999,14	0,86	25,45	10,55	2,015	11,9551	5,38	1,951	708,28
AF3	3	3999,62	0,90	25,46	8,89	2,015	11,9551	5,05	1,951	702,08
	4	3999,56	0,90	25,46	8,57	2,015	11,9551	4,69	1,951	695,32
	5	4002,69	0,90	25,48	8,50	2,015	11,9551	4,16	1,951	685,38
AF4	3	4000,02	0,85	25,46	11,11	2,015	11,9551	5,95	1,951	718,97
	4	4002,67	0,86	25,48	10,53	2,015	11,9551	5,79	1,951	715,97
	5	3999,55	0,84	25,46	11,29	2,015	11,9551	5,56	1,951	711,65
AF5	3	3999,47	0,90	25,46	8,77	2,015	11,9551	5,10	1,951	703,02
	4	3999,62	0,90	25,46	8,74	2,015	11,9551	4,85	1,951	698,33
	5	4003,28	0,90	25,48	8,55	2,015	11,9551	4,17	1,951	685,56
REFERANS MOTOR	4	4009,3	0,89	25,52	9,14	2,015	11,9551	4,78	1,951	697,01

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüzde elektrik makinalarında meydana gelen enerji kaybını azaltmaya yönelik çalışmalar artmıştır. Kullanım alanı düşünüldüğünde bu çalışmaların başında asenkron motor yer almaktadır. Özellikle enerji kaybı ve performans açısından uygun aday senkron relüktans motorlar olarak değerlendirilmektedir. Ticari olarak yer alacak her motor gibi bu motorlar da performans kriterleri dikkate alınarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmektedir. SynRM'nin performansını düşürmeden tork dalgalanmasının azaltılması elzemdir. Bu durumu ele alan literatürde verilen çalışmalarda yaygın olarak optimizasyon yöntemleri karşılaştırmaları gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında SEY ile analiz ve en uygun rotor boyutlandırma parametrelerinin tespiti için tepki yüzey metodolojisi ve çok amaçlı genetik algoritma yöntemi tercih edilmiştir. Öncelikle tepki yüzey metodolojisi kullanılarak rotor değişkenleri ile motor performansı arasındaki ilişki incelenmiştir. Rotor parametrelerinin motor performansında etkili olduğu ancak düşük bariyer sayılarının MOGA'ya dahil edilmemesine karar verilmiştir. Tepki yüzey metodolojisi ve MOGA ile bir veya iki amaç fonksiyonu üzerinden en uygun şekle sokma gerçekleştirilmektedir. Ancak diğer çalışmalardan farklı olarak farklı amaç fonksiyonlarının SynRM'nin rotor bariyer sayısının değişimine bağlı olarak en uygun rotor geometrisinin elde edilmesine odaklanılmıştır. Referans motorun temel boyutlandırma ölçüleri hali hazırda imalatı yapılan motordan alınmıştır. Bu motorun stator verileri sabit tutularak motor performans parametrelerini içeren amaç fonksiyonları çok amaçlı genetik algoritma yöntemi ile farklı rotor bariyer sayıları için sınanmıştır. En uygun rotor verileri için elde edilen performans sonuçları referans motor ile karşılaştırılmıştır. Birinci olarak verilen amaç fonksiyonu ile en iyi boyutlandırma verileri elde edilmiştir.

MOGA yöntemi kullanılarak motor performansının arttırılmasına ilişkin amaç fonksiyonları tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonlarının çıkış büyüklükleri ve referans motorun çıkış büyüklükleri incelenmiştir. Tork, verim ve tork dalgalanması parametreleri başlı başına hedef olarak optimizasyon sürecine dahil edilmemelidir. Bu büyüklükleri içeren amaç fonksiyonları ile motor performansı arttırılabilir. Çalışmada motor performansı artarken aynı zamanda tork dalgalanmasının artması uygun motor tasarımından uzaklaştırır. Amaç fonksiyonlarının farklı bariyer sayılarındaki optimizasyon sonuçları incelendiğinde bariyer sayısının artışı motor performansını arttırdığını göstermiştir. Amaç fonksiyonu 1 ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde, referans motorun performans sonuçlarından daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca diğer amaç fonksiyonları elektrik motoru çalışmaları için ele alınan amaç fonksiyonları ile kullanılabilir ve motor performansının artırımı açısından incelenebilir. Literatürde yer alan farklı amaç fonksiyonları çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) yöntemi kullanılarak analizler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Özçelik, N. G., IE4 Verim Sınıfı Senkron Relüktans Motor Tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [2] Heidari, H., Rassölkin, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Andriushchenko, E., Belahcen, A., & Lukichev, D. V., A review of synchronous reluctance motor-drive advancements. *Sustainability*, 13(2), 729, 2021.
- [3] Tawfiq, K. B., Ibrahim, M. N., El-Kholy, E. E., & Sergeant, P., Performance Improvement of Synchronous Reluctance Machines—A Review Research. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(10), 2021.
- [4] Ersöz, M., Öner, Y., & Bingöl, O., Akı bariyerli TLA tipi senkron relüktans motor tasarımı ve optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 941-950, 2016.
- [5] Kostko, J. K., Polyphase reaction synchronous motors. *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, 42(11), 1162-1168, 1923.
- [6] Vagati, A., The synchronous reluctance solution: a new alternative in AC drives. In *Proceedings of IECON'94-20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 1, 1-13, IEEE, 1994.
- [7] Lawrenson, P. J., & Gupta, S. K., Developments in the performance and theory of segmental-rotor reluctance motors. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 114(5), 645-653, IET Digital Library, 1967.
- [8] Cruickshank, A. J. O., Anderson, A. F., & Menzies, R. W., Theory and performance of reluctance motors with axially laminated anisotropic rotors. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 118(7), 887-894, IET Digital Library, 1971.
- [9] Douglas, J. F., Pull-in criterion for reluctance motors. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 79(3), 139-142, 1960.
- [10] Boztaş, G., Aydoğmuş, Ö., & Güldemir, H., Fotovoltaik Panel ile Beslenebilen SynRM Tasarımı ve Kontrolü. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(1), 87-94, 2020.

- [11] Miller, T. J. E., Hutton, A., Cossar, C., & Staton, D. A., Design of a synchronous reluctance motor drive. *IEEE Transactions on industry applications*, 27(4), 741-749, 1991.
- [12] Bianchi, N., Mahmoud, H., & Bolognani, S., Fast synthesis of permanent magnet assisted synchronous reluctance motors. *IET Electric Power Applications*, 10(5), 312-318, 2016.
- [13] Guglielmi, P., Boazzo, B., Armando, E., Pellegrino, G., & Vagati, A., Permanent-magnet minimization in PM-assisted synchronous reluctance motors for wide speed range. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(1), 31-41, 2012.
- [14] Palmieri, M., Perta, M., Cupertino, F., & Pellegrino, G., Effect of the numbers of slots and barriers on the optimal design of synchronous reluctance machines. In 2014 international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 260-267, IEEE, 2014.
- [15] Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S., & Xu, J., Torque ripple reduction of synchronous reluctance machines: using asymmetric flux-barrier. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 34(1), 18-31, 2015.
- [16] Sanada, M., Hiramoto, K., Morimoto, S., & Takeda, Y., Torque ripple improvement for synchronous reluctance motor using an asymmetric flux barrier arrangement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(4), 1076-1082, 2004.
- [17] Bacco, G., & Bianchi, N., Design criteria of flux-barriers in synchronous reluctance machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2490-2498, 2018.
- [18] Babetto, C., Bacco, G., & Bianchi, N., Synchronous reluctance machine optimization for high-speed applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(3), 1266-1273, 2018.
- [19] Boglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., & Vagati, A., Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance. In *Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, 1, 474-479, IEEE, 2005.
- [20] Vagati, A., Franceschini, G., Marongiu, I., & Trogia, G. P., Design criteria of high performance synchronous reluctance motors. In *Conference record of the 1992 IEEE industry applications society annual meeting*, 66-73, IEEE, 1992.
- [21] Cupertino, F., Pellegrino, G., & Gerada, C., Design of synchronous reluctance motors with multiobjective optimization algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(6), 3617-3627, 2014.

- [22] Cupertino, F., Pellegrino, G. M., Armando, E., & Gerada, C., A SyR and IPM machine design methodology assisted by optimization algorithms. In 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 3686-3691, IEEE, 2012.
- [23] Salah, A., Elnour, M. M., & Elnail, K. E. I., Investigation of influence the slot/pole combinations on the torque performance for synchronous reluctance machine with distributed and concentrated windings. In Journal of Physics: Conference Series, 1601(2), 022040, IOP Publishing, 2020.
- [24] Gianmario, P., Francesco, C., & Chris, G., Automatic design of synchronous reluctance motor focusing on barrier shape optimization [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 51(2), 1465-1474, 2015.
- [25] Cupertino, F., Palmieri, M., & Pellegrino, G., Design of high-speed synchronous reluctance machines. In 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 4828-4834, IEEE, 2015.
- [26] Tahi, S., Ibtouen, R., & Bounekhla, M., Design optimization of two synchronous reluctance machine structures with maximized torque and power factor. Progress In Electromagnetics Research B, 35, 369-387, 2011.
- [27] Palmieri, M., Perta, M., Cupertino, F., & Pellegrino, G., Effect of the numbers of slots and barriers on the optimal design of synchronous reluctance machines. In 2014 international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 260-267, IEEE, 2014.
- [28] Bao, Y., Degano, M., Wang, S., Chuan, L., Zhang, H., Xu, Z., & Gerada, C., A novel concept of ribless synchronous reluctance motor for enhanced torque capability. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(4), 2553-2563, 2019.
- [29] Cupertino, F., Pellegrino, G., & Gerada, C., Design of synchronous reluctance motors with multiobjective optimization algorithms. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(6), 3617-3627, 2014.
- [30] Ferrari, S., & Pellegrino, G., FEA-augmented design equations for synchronous reluctance machines. In 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 5395-5402, IEEE, 2018.
- [31] Muteba, M., Twala, B., & Nicolae, D. V., Torque ripple minimization in synchronous reluctance motor using a sinusoidal rotor lamination shape. In 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 606-611, IEEE, 2016.
- [32] Yammine, S., Hénaux, C., Fadel, M., & Messine, F., Torque Ripple Reduction in a SynRM at a Constant Average Torque by Means of Current Harmonics Injection. Progress In Electromagnetics Research C, 80, 167-180, 2018.

- [33] Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S., & Xu, J., Torque ripple reduction of synchronous reluctance machines: using asymmetric flux-barrier. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 34(1), 18-31, 2015.
- [34] Lange, T., Kerdsup, B., Weiss, C., & De Doncker, R. W., Torque ripple reduction in reluctance synchronous machines using an asymmetric rotor structure. 2014(628), 2014.
- [35] Azizi, H., & Vahedi, A., Sensitivity analysis and optimum design for the stator of synchronous reluctance machines using the coupled finite element and Taguchi methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23(1), 38-51, 2015.
- [36] Epemu, A., Onyishi, D., & Simon, O. B. E. Performance Analysis of Line-Start Concentrated Dual-winding Synchronous Reluctance Machine with Capacitive Assistance. *Gazi University Journal of Science*, 35(3), 917-934, 2022.
- [37] Ban, B., & Stipetic, S., Systematic Metamodel-based Optimization Study of Synchronous Reluctance Machine Rotor Barrier Topologies. *Machines*, 10(8), 712, 2022.
- [38] Credo, A., Petrov, I., Pyrhönen, J., & Villani, M., Impact of manufacturing stresses on multiple-rib Synchronous Reluctance Motor performance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1-10, 2022.
- [39] Yamamoto, Y., Morimoto, S., Sanada, M., & Inoue, Y., Torque ripple reduction using asymmetric flux barriers in synchronous reluctance motor. In 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia), 3197-3202, IEEE, 2018.
- [40] Mohanarajah, T., Rizk, J., Nagrial, M., & Hellany, A., Finite element analysis and design methodology for high-efficiency synchronous reluctance motors. *Electric Power Components and Systems*, 46(13), 1478-1493, 2018.
- [41] Özçelik, N. G., Doğru, U. E., İmeryüz, M., & Ergene, L. T., Synchronous reluctance motor vs. Induction motor at low-power industrial applications: Design and comparison. *Energies*, 12(11), 2190, 2019.
- [42] Boztaş, G., Aydoğmuş, O., & Caner, M., Optimal design of ultra-premium efficiency synchronous reluctance motor. In 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 161-165, IEEE, 2019.
- [43] Solak, B., & Öner, Y., Design and Optimization of Transmitter Laminated Synchronous Reluctance Motor. In 2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 212-220, IEEE, 2020.

- [44] Özdil, A., & Uzun, Y., Design and analysis of a rotor for a 22 kW transversally laminated anisotropic synchronous reluctance motor. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 27(6), 17-24, 2021.
- [45] Akar, M., & Gerçekcioğlu, H. S., Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motorun Termal Analizi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 11(1), 118-127, 2022.
- [46] Credo, A., Villani, M., Fabri, G., & Popescu, M., Adoption of the Synchronous Reluctance Motor in Electric Vehicles: a Focus on the Flux Weakening Capability. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022.
- [47] Aydoğmuş, Ö., Solar Pompa Sistemleri için Senkron Relüktans Motor Tasarımı. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1), 53-57, 2017.
- [48] Aydoğmuş, Ö., Matris Çevirici ile Beslenen Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Sürücü Tasarımı ve Algılayıcısız Hız Denetimi. *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2011.
- [49] Boztaş, G., Düşük Gerilim ile Beslenen Senkron Relüktans Motor ve Sürücü Tasarımı. *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2019.
- [50] Solak, B., Senkron Relüktans Motorda Moment Dalgalanmasının Azaltılması. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2021.
- [51] Haataja, J., A comparative performance study of four-pole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives. *Lappeenranta University of Technology, Doctoral dissertation*, 2003.
- [52] Ersöz, M., Akı Bariyerli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Uygulaması. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2015.
- [53] Taghavi, S., Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications. *Concordia University, Doctoral dissertation*, 2015.
- [54] Moghaddam, R. R., Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design. *KTH Electrical Engineering, Master Thesis*, 2007.
- [55] Moghaddam, R. R., Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications. *KTH Royal Institute of Technology, Doctoral dissertation*, 2011.
- [56] Tap A., Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2017.
- [57] Murthy, H. P. S., Synchronous Reluctance Motors and PM Assisted Synchronous Reluctance Motors: Rotor Configuration, Design Aspects, Performance Comparison. *Politecnico Di Milano, Master Thesis*, 2021.

- [58] Fernandez-Bernal, F., Garcia-Cerrada, A., & Faure, R., Efficient control of reluctance synchronous machines. In IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 98CH36200), 2, 923-928, IEEE, 1998.
- [59] Xu, L., Xu, X., Lipo, T. A., & Novotny, D. W., Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss. IEEE transactions on industry applications, 27(5), 977-985, 1991.
- [60] Kamper, M. J., Van der Merwe, F. S., & Williamson, S., Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 11(3), 547-555, 1996.
- [61] Marongiu, I., & Vagati, A., Improved modelling of a distributed anisotropy synchronous reluctance machine. In Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 238-243, IEEE, 1991.
- [62] Di Nardo, M., Design of high speed synchronous reluctance machine. University of Nottingham, Doctoral dissertation, 2017.
- [63] Cai, S., Shen, J., Hao, H., & Jin, M., Design methods of transversally laminated synchronous reluctance machines. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 1(2), 164-173, 2017.
- [64] Lipo, T. A., Synchronous reluctance machines-a viable alternative for ac drives?. Electric Machines and Power Systems, 19(6), 659-671, 1991.
- [65] Vagati, A., Fratta, A., Franceschini, G., & Rosso, P., AC motors for high-performance drives: a design-based comparison. IEEE Transactions on Industry Applications, 32(5), 1211-1219, 1996.
- [66] Boglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., & Vagati, A., Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance. In Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005, 1, 474-479, IEEE, 2005.
- [67] Fratta, A., Vagati, A., & Villata, F., On the evolution of AC machines for spindle drive applications. IEEE Transactions on industry applications, 28(5), 1081-1086, 1992.
- [68] López-Torres, C., Garcia-Espinosa, A., & Riba, J. R., Reliable design of PMaSynRM. In New Trends in Electrical Vehicle Powertrains, IntechOpen, 2018.
- [69] S. Arslan, S. Akkaya Oy, and M. Tören, 'Amorphous Nüveli Dalgıç Motorun Ve Üç Fazlı Amorflı Nüveli Transformatörün Demir Kayıplarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi. [Online]. Available: www.inescongress.com, 2016.

- [70] Balci, S., & Akkaya, M., Reduction of the Core Size and Power Losses by Using Soft Magnetic Material for a Single-Phase Induction Motor. *Measurement*, 111421, 2022.
- [71] Murataliyev, M., Degano, M., Di Nardo, M., Prystupa, D., Wang, S., Buticchi, G., ... & Galea, M., A homothetic scaling criteria for synchronous reluctance machines design. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(1), 547-559, 2020.
- [72] Arslan, S., Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 403-415, 2016.
- [73] Arslan, S., Tüp Biçimli Doğrusal Jeneratör Tasarımı ve Uygulaması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2017.
- [74] Aydar, A. Y., Utilization of response surface methodology in optimization of extraction of plant materials. *Statistical approaches with emphasis on design of experiments applied to chemical processes*, 157-169, 2018.
- [75] Bradley, N., The response surface methodology. Indiana University South Bend, Doctoral dissertation, 2007.
- [76] Farooq, Z., Rehman, S. U., & Abid, M., Application of response surface methodology to optimize composite flour for the production and enhanced storability of leavened flat bread (Naan). *Journal of food processing and preservation*, 37(5), 939-945, 2013.
- [77] Boyacı, İ. H., A new approach for determination of enzyme kinetic constants using response surface methodology. *Biochemical Engineering Journal*, 25(1), 55-62, 2005.
- [78] Arslan, S., Erol, K. U. R. T., Akizu, O., & Lopez-Guede, J. M., Design optimization study of a torus type axial flux machine. *Journal of Energy Systems*, 2(2), 43-56, 2018.
- [79] Cupertino, F., Pellegrino, G. M., Armando, E., & Gerada, C., A SyR and IPM machine design methodology assisted by optimization algorithms. In 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 3686-3691, IEEE, 2012.
- [80] Murata, T., & Ishibuchi, H., MOGA: multi-objective genetic algorithms. In IEEE international conference on evolutionary computation, 1, 289-294, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995.
- [81] Lovelace, E. C., Jahns, T. M., & Lang, J. H., A saturating lumped-parameter model for an interior PM synchronous machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(3), 645-650, 2002.

[82] Sizov, G. Y., Ionel, D. M., & Demerdash, N. A., Multi-objective optimization of PM AC machines using computationally efficient-FEA and differential evolution. In 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 1528-1533, IEEE, 2011.

[83] Topaloğlu, I., Mamur, H., Korkmaz, F., & Cakir, M. F., Design and optimization of surface mounted line start permanent magnet synchronous motor using electromagnetic design tool. In 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 87-90, IEEE, 2014.

[84] Arslan, S., Gürdal, O., & Akkaya Oy, S., Design and optimization of tubular linear permanent-magnet generator with performance improvement using response surface methodology and multi-objective genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 27(6), 3053-3065, 2020.

[85] <http://www.arenametal.com.tr>, Erişim Tarihi: 03.01.2023.

[86] <https://www.erikogluemaye.com.tr>, Erişim Tarihi: 03.01.2023.

[87] <https://www.takimmetal.com>, Erişim Tarihi: 03.01.2023.

[88] <https://www.tcmb.gov.tr>, Erişim Tarihi: 03.01.2023.

EKLER

Tepki Yüzeyi Metodolojisi Uygulama Tasarımları Tablosu

*	B0	Bariyer Sayısı	Hh	R0	Rb	Rr	W	Y0
1	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
2	2,5mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
3	3,125mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
4	5mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
5	4,375mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
6	3,75mm	1	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
7	3,75mm	2	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
8	3,75mm	5	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
9	3,75mm	4	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
10	3,75mm	3	0,5mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
11	3,75mm	3	0,875mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
12	3,75mm	3	2mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
13	3,75mm	3	1,625mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
14	3,75mm	3	1,25mm	0mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
15	3,75mm	3	1,25mm	9mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
16	3,75mm	3	1,25mm	36mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
17	3,75mm	3	1,25mm	27mm	18,5mm	1mm	1mm	3,75mm
18	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18mm	1mm	1mm	3,75mm
19	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,25mm	1mm	1mm	3,75mm
20	3,75mm	3	1,25mm	18mm	19mm	1mm	1mm	3,75mm
21	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,75mm	1mm	1mm	3,75mm
22	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	0mm	1mm	3,75mm
23	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	0,5mm	1mm	3,75mm
24	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	2mm	1mm	3,75mm
25	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1,5mm	1mm	3,75mm
26	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	0mm	3,75mm
27	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	0,5mm	3,75mm
28	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	2mm	3,75mm
29	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1,5mm	3,75mm
30	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	2,5mm
31	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	3,125mm
32	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	5mm
33	3,75mm	3	1,25mm	18mm	18,5mm	1mm	1mm	4,375mm
34	2,5mm	1	0,5mm	0mm	18mm	0mm	0mm	5mm
35	3,125mm	2	0,875mm	9mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm
36	5mm	1	0,5mm	0mm	18mm	0mm	0mm	2,5mm

Tablo Devamı

37	4,375mm	2	0,875mm	9mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
38	2,5mm	5	0,5mm	0mm	18mm	0mm	2mm	5mm
39	3,125mm	4	0,875mm	9mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
40	5mm	5	0,5mm	0mm	18mm	0mm	2mm	2,5mm
41	4,375mm	4	0,875mm	9mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
42	2,5mm	1	2mm	0mm	18mm	0mm	2mm	5mm
43	3,125mm	2	1,625mm	9mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
44	5mm	1	2mm	0mm	18mm	0mm	2mm	2,5mm
45	4,375mm	2	1,625mm	9mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
46	2,5mm	5	2mm	0mm	18mm	0mm	0mm	5mm
47	3,125mm	4	1,625mm	9mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm
48	5mm	5	2mm	0mm	18mm	0mm	0mm	2,5mm
49	4,375mm	4	1,625mm	9mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
50	2,5mm	1	0,5mm	36mm	18mm	0mm	2mm	2,5mm
51	3,125mm	2	0,875mm	27mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
52	5mm	1	0,5mm	36mm	18mm	0mm	2mm	5mm
53	4,375mm	2	0,875mm	27mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
54	2,5mm	5	0,5mm	36mm	18mm	0mm	0mm	2,5mm
55	3,125mm	4	0,875mm	27mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
56	5mm	5	0,5mm	36mm	18mm	0mm	0mm	5mm
57	4,375mm	4	0,875mm	27mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm
58	2,5mm	1	2mm	36mm	18mm	0mm	0mm	2,5mm
59	3,125mm	2	1,625mm	27mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
60	5mm	1	2mm	36mm	18mm	0mm	0mm	5mm
61	4,375mm	2	1,625mm	27mm	18,25mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm
62	2,5mm	5	2mm	36mm	18mm	0mm	2mm	2,5mm
63	3,125mm	4	1,625mm	27mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
64	5mm	5	2mm	36mm	18mm	0mm	2mm	5mm
65	4,375mm	4	1,625mm	27mm	18,25mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
66	2,5mm	1	0,5mm	0mm	19mm	0mm	2mm	2,5mm
67	3,125mm	2	0,875mm	9mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
68	5mm	1	0,5mm	0mm	19mm	0mm	2mm	5mm
69	4,375mm	2	0,875mm	9mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
70	2,5mm	5	0,5mm	0mm	19mm	0mm	0mm	2,5mm
71	3,125mm	4	0,875mm	9mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
72	5mm	5	0,5mm	0mm	19mm	0mm	0mm	5mm
73	4,375mm	4	0,875mm	9mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm
74	2,5mm	1	2mm	0mm	19mm	0mm	0mm	2,5mm
75	3,125mm	2	1,625mm	9mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
76	5mm	1	2mm	0mm	19mm	0mm	0mm	5mm
77	4,375mm	2	1,625mm	9mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm
78	2,5mm	5	2mm	0mm	19mm	0mm	2mm	2,5mm
79	3,125mm	4	1,625mm	9mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
80	5mm	5	2mm	0mm	19mm	0mm	2mm	5mm
81	4,375mm	4	1,625mm	9mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
82	2,5mm	1	0,5mm	36mm	19mm	0mm	0mm	5mm
83	3,125mm	2	0,875mm	27mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm

Tablo Devamı

84	5mm	1	0,5mm	36mm	19mm	0mm	0mm	2,5mm
85	4,375mm	2	0,875mm	27mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
86	2,5mm	5	0,5mm	36mm	19mm	0mm	2mm	5mm
87	3,125mm	4	0,875mm	27mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
88	5mm	5	0,5mm	36mm	19mm	0mm	2mm	2,5mm
89	4,375mm	4	0,875mm	27mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
90	2,5mm	1	2mm	36mm	19mm	0mm	2mm	5mm
91	3,125mm	2	1,625mm	27mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	4,375mm
92	5mm	1	2mm	36mm	19mm	0mm	2mm	2,5mm
93	4,375mm	2	1,625mm	27mm	18,75mm	0,5mm	1,5mm	3,125mm
94	2,5mm	5	2mm	36mm	19mm	0mm	0mm	5mm
95	3,125mm	4	1,625mm	27mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	4,375mm
96	5mm	5	2mm	36mm	19mm	0mm	0mm	2,5mm
97	4,375mm	4	1,625mm	27mm	18,75mm	0,5mm	0,5mm	3,125mm
98	2,5mm	1	0,5mm	0mm	18mm	2mm	2mm	2,5mm
99	3,125mm	2	0,875mm	9mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
100	5mm	1	0,5mm	0mm	18mm	2mm	2mm	5mm
101	4,375mm	2	0,875mm	9mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm
102	2,5mm	5	0,5mm	0mm	18mm	2mm	0mm	2,5mm
103	3,125mm	4	0,875mm	9mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
104	5mm	5	0,5mm	0mm	18mm	2mm	0mm	5mm
105	4,375mm	4	0,875mm	9mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
106	2,5mm	1	2mm	0mm	18mm	2mm	0mm	2,5mm
107	3,125mm	2	1,625mm	9mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
108	5mm	1	2mm	0mm	18mm	2mm	0mm	5mm
109	4,375mm	2	1,625mm	9mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
110	2,5mm	5	2mm	0mm	18mm	2mm	2mm	2,5mm
111	3,125mm	4	1,625mm	9mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
112	5mm	5	2mm	0mm	18mm	2mm	2mm	5mm
113	4,375mm	4	1,625mm	9mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm
114	2,5mm	1	0,5mm	36mm	18mm	2mm	0mm	5mm
115	3,125mm	2	0,875mm	27mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
116	5mm	1	0,5mm	36mm	18mm	2mm	0mm	2,5mm
117	4,375mm	2	0,875mm	27mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
118	2,5mm	5	0,5mm	36mm	18mm	2mm	2mm	5mm
119	3,125mm	4	0,875mm	27mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm
120	5mm	5	0,5mm	36mm	18mm	2mm	2mm	2,5mm
121	4,375mm	4	0,875mm	27mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
122	2,5mm	1	2mm	36mm	18mm	2mm	2mm	5mm
123	3,125mm	2	1,625mm	27mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm
124	5mm	1	2mm	36mm	18mm	2mm	2mm	2,5mm
125	4,375mm	2	1,625mm	27mm	18,25mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
126	2,5mm	5	2mm	36mm	18mm	2mm	0mm	5mm
127	3,125mm	4	1,625mm	27mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
128	5mm	5	2mm	36mm	18mm	2mm	0mm	2,5mm
129	4,375mm	4	1,625mm	27mm	18,25mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
130	2,5mm	1	0,5mm	0mm	19mm	2mm	0mm	5mm

Tablo Devamı

131	3,125mm	2	0,875mm	9mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
132	5mm	1	0,5mm	0mm	19mm	2mm	0mm	2,5mm
133	4,375mm	2	0,875mm	9mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
134	2,5mm	5	0,5mm	0mm	19mm	2mm	2mm	5mm
135	3,125mm	4	0,875mm	9mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm
136	5mm	5	0,5mm	0mm	19mm	2mm	2mm	2,5mm
137	4,375mm	4	0,875mm	9mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
138	2,5mm	1	2mm	0mm	19mm	2mm	2mm	5mm
139	3,125mm	2	1,625mm	9mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm
140	5mm	1	2mm	0mm	19mm	2mm	2mm	2,5mm
141	4,375mm	2	1,625mm	9mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
142	2,5mm	5	2mm	0mm	19mm	2mm	0mm	5mm
143	3,125mm	4	1,625mm	9mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
144	5mm	5	2mm	0mm	19mm	2mm	0mm	2,5mm
145	4,375mm	4	1,625mm	9mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
146	2,5mm	1	0,5mm	36mm	19mm	2mm	2mm	2,5mm
147	3,125mm	2	0,875mm	27mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
148	5mm	1	0,5mm	36mm	19mm	2mm	2mm	5mm
149	4,375mm	2	0,875mm	27mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm
150	2,5mm	5	0,5mm	36mm	19mm	2mm	0mm	2,5mm
151	3,125mm	4	0,875mm	27mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
152	5mm	5	0,5mm	36mm	19mm	2mm	0mm	5mm
153	4,375mm	4	0,875mm	27mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
154	2,5mm	1	2mm	36mm	19mm	2mm	0mm	2,5mm
155	3,125mm	2	1,625mm	27mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	3,125mm
156	5mm	1	2mm	36mm	19mm	2mm	0mm	5mm
157	4,375mm	2	1,625mm	27mm	18,75mm	1,5mm	0,5mm	4,375mm
158	2,5mm	5	2mm	36mm	19mm	2mm	2mm	2,5mm
159	3,125mm	4	1,625mm	27mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	3,125mm
160	5mm	5	2mm	36mm	19mm	2mm	2mm	5mm
161	4,375mm	4	1,625mm	27mm	18,75mm	1,5mm	1,5mm	4,375mm

ÖZGEÇMİŞ

Hasan ÇAMCI İlk, orta ve lise eğitimini Giresun’ da tamamladı. 2001 yılında Piraziz İsmail Yücel Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Marmara Üniversitesi Elektrik Öğretmenliği Bölümü’nü 2009 yılında bitirdi. 2019 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Giresun Üniversitesi’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen Giresun Üniversitesi Tirebolu Mehmet Bayrak MYO Elektrik ve Enerji Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

- Çamcı, H., Mengi, O. Ö., & Arslan, S., Çok Amaçlı Genetik Algoritma Yöntemi Kullanılarak Enine Laminasyonlu Senkron Relüktans Motor Optimizasyonu. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 841-852, 2022.

