



ŞEBEKE KALKIŞLI RADYAL AKILI SABİT MIKNATISLI SENKRON

MOTOR TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

BERKAN ZÖHRA

DOKTORA TEZİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Doç. Dr. Mehmet AKAR

Haziran - 2019

Her hakkı saklıdır

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ŞEBEKE KALKIŞLI RADYAL AKILI SABİT MIKNATISLI SENKRON
MOTOR TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

BERKAN ZÖHRA

TOKAT
Haziran - 2019

Her hakkı saklıdır



Bu tez çalışması;

**Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
2017/90 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Berkan ZÖHRA tarafından hazırlanan “**Şebeke Kalkışlı Radyal Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Prototip Üretimi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12 HAZİRAN 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Mehmet AKAR
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Üye
Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Metin ÖZGÜVEN
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Üye
Doç. Dr. Ünal KURT
Amasya Üniversitesi
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet EKİCİ
Amasya Üniversitesi

m. Akar
A. Fenercioğlu
M. Özgüven
U. Kurt
M. Ekici

ONAY

Prof. Dr. Cetin ÇEKİCİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
21.06.2019



TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdđiđi yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Berkan ZÖHRA

12 Haziran 2019

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ŞEBEKE KALKIŞLI RADYAL AKILI SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

BERKAN ZÖHRA

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. MEHMET AKAR)

Tamamlanmış bulunan bu tez çalışması ile IEC-60034-30-2:2014 standardında IE4 süper premium verimlilik sınıfı Şebeke Kalkışlı Radyal Akılı Senkron Motorun tasarımı yapılmıştır. Tasarım sürecinde hali hazırda endüstriyel pazara sunulan IE2 yüksek verimlilik sınıfı bir asenkron motorun sadece rotoru sabit mıknatıs eklenerek yeniden modellenmiştir. Modelleme sürecinde iki farklı olup tipinin ve yüzey yerleştirmeli sabit mıknatısların kullanıldığı yeni bir rotor topolojisi önerilmiştir. Analitik yöntemler kullanılarak önerilen topolojide bir motorun tasarımı yapılmıştır. Elde edilen tasarımın Genetik Algoritma kullanılarak geometrik optimizasyonu yapılmıştır. Sabit mıknatıs içeren motorlarda önemli bir problem olan tork dalgalanmalarının azaltılması amacı ile tasarımda kaykılı stator yapısı kullanılmıştır. Motor performansının belirlenmesinde doğruluğu akademik olarak kabul görmüş, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan bir analiz yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen verilerin doğrulanması amacı ile önerilen topolojide rotor yapısına sahip nihai motor tasarımının prototip üretimi yapılmıştır.

Sonuç olarak tamamlanmış bulunan tez çalışması ile aynı güçteki muadil asenkron motor gövde yapısında, şebekeye doğrudan bağlanarak daha yüksek verim ve güç faktörü ile çalışabilen, pompa ve fan gibi uygulamalarda mevcut asenkron motorların yerini alabilecek yeni bir Şebeke Kalkış Radyal Akılı Senkron Motor tasarlanarak üretilmiştir. Ayrıca mevcut IE2 motorun gövde yapısında değişiklik yapılmaması neticesinde elde edilen yenilikçi rotor tasarımının aynı güçteki düşük verimli standart asenkron motorların daha verimli hale getirilmesi amacı ile de kullanılması olanaklı hale gelmiştir.

2019, 196 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Şebeke Kalkışlı, Sabit Mıknatıs, Senkron Motor, Asenkron Motor

ABSTRACT

DOCTORATE THESIS

LINE START RADIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING BERKAN ZÖHRA

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. MEHMET AKAR)

In this thesis, the design of IE4 Super Premium Efficiency class Line Start Radial Flux Synchronous Motor has been designed according to IEC-60034-30-2:2014 standard. In the design process, the IE2 High Efficiency class asynchronous motor, which is already offered to the industrial market, has been remodeled by adding a permanent magnet to the rotor. In the modeling process, a new rotor topology with two different slot types and surface permanent magnets is proposed. Analytical methods were used to design a motor in the proposed topology. Geometric optimization has been done by using Genetic Algorithm in the obtained design. In order to reduce torque ripples, which is an important problem in motors with permanent magnets, a skewing stator structure is used in the design. In the determination of the motor performance, a validated, finite element analysis software was used. In order to verify the obtained data, the prototype production of the final motor design with rotor structure has been made in the proposed topology.

As a result, a new Radial Flux Synchronous Motor has been designed and designed to replace asynchronous motors available in pumps and fans such as pump and fan, which can work with higher efficiency and power factor by connecting directly to line and with the same asynchronous motor body structure in the same power as the completed thesis study. In addition, it has become possible to use the innovative rotor design obtained as a result of not changing the body structure of the existing IE2 motor to make the low power standard asynchronous motors with the same power more efficient.

2019, 196 PAGES

KEYWORDS: Line Start, Permanent Magnet, Synchronous Motor, Asynchronous Motor

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca, her türlü konuda yardımlarını esirgemeyen, değerli eleştirileriyle çalışmama yön veren ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağım kıymetli, saygıdeğer hocam Doç. Dr. Mehmet AKAR'a teşekkürü borç bilir, saygılarımı sunarım. Tez çalışmam boyunca değerli önerileri ile çalışmama yön veren Tez İzleme Komite üyesi hocalarım sayın Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Metin ÖZGÜVEN ile Tez Değerlendirme Jürisi hocalarım sayın Doç. Dr. Ünal KURT ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet EKİCİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Akademik hayata adım atmama vesile olan ve tecrübeleri ile mesleki hayatıma yön veren Yüksek Lisans tez danışmanım saygıdeğer Prof. Dr. Hakan Yavuz hocama sonsuz teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli meslektaşlarım Öğr. Gör. Ali AKTAŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EKER'e teşekkürü borç bilirim. Çalışma süresince tüm zorlukları benimle birlikte göğüsleyen ve bana destek olan değerli eşim Öğr. Gör. Esra OK ZÖHRA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

BERKAN ZÖHRA

12 Haziran 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	63
3.1. ŞK-RASM Tasarım Süreci.....	63
3.1.1. Tasarım kriterleri	65
3.1.2. Tasarım algoritması.....	80
3.1.3. Makine ana boyutlarının belirlenmesi	82
3.1.4. Stator tasarımı.....	85
3.1.5. Rotor tasarımı	91
3.1.6. SM tasarımı	95
3.1.7. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY).....	101
3.2. Mevcut ŞK-RASM Tasarımlarının İncelenmesi.....	107
3.3. Önerilen ŞK-RASM Topolojisi.....	109
3.3.1. Önerilen topoloji ile ilgili teknik detaylar.....	109
3.3.2. SEY yazılımı ile tasarımın performans değerlendirmesi	113
3.4. Optimizasyon Çalışmaları.....	117
3.4.1. Önerilen modelin genetik algoritma ile optimizasyonu.....	119
3.4.2. Vuruntu torkunun azaltılması	120
3.5. Prototip Üretimi.....	124
3.6. Üretimi Yapılan Motorun Performans Testleri.....	130
3.6.1. Test donanımı	130
3.6.2. Testler öncesi hazırlık.....	132

3.6.3. Testlerin yapılması.....	133
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	136
4.1. Mevcut ŞK-RASM Tasarımlarının İncelenmesi.....	136
4.1.1. Tasarımların performans değerlendirmesi	137
4.2. Önerilen Topolojide ŞK-RASM'nin Analitik Tasarımı.....	140
4.2.1. Tasarım detayları.....	140
4.2.2. Performans değerlendirmesi.....	142
4.3. Genetik Algoritma ile Optimizasyon Çalışması.....	145
4.4. Kayıklı Stator ile Tork Dalgalanmaların Azaltılması	148
4.5. Optimize Edilen Tasarımın Performans Karakteristiği	151
4.6. Deneysel Sonuçların İncelenmesi	156
4.6.1. Boşta çalıştırma	156
4.6.2. Sabit yük deneyleri.....	156
4.6.3. Ters EMK ve tutma torkunun belirlenmesi	162
4.6.4. Ani yükleme ve yükten alma testleri	164
5. SONUÇ.....	167
6. KAYNAKLAR	173
7. EKLER.....	191
7.1. EK-1: M330-50A Karakteristik Özellikleri.....	191
7.2. Ek-2: Stator sarım şaması.....	193
7.3. Patent başvurusu	194
8. ÖZGEÇMİŞ.....	195

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
J	Akım yoğunluğu
J_{halka}	Akım yoğunluğu (kısa devre kafesi)
J_r	Akım yoğunluğu (rotor)
h_6	Alt sargı boşluğu (stator)
J_r	Alüminyum rotor çubukları akım yoğunluğu
I_A	Anma akımı
T_{anma}	Anma torku
T_{asyn}	Asenkron tork
J_m	Atalet momenti
ϵ_r	Bağıl elektriksel geçirgenlik
T_b	Bileşke tork
ϵ_0	Boşluğun elektriksel geçirgenlik
P_ζ	Çekirdek kayıpları
P_n	Çıkış gücü, Mil gücü
I_{md}	Eksen akımı RMS değeri (-d eksen)
I_{qm}	Eksen akımı RMS değeri (-q eksen)
D	Elektrik akı yoğunluğu
E	Elektrik alan şiddeti
ϑ	Elektriksel geçirgenlik katsayısı
ρ	Elektrik yükü yoğunluğu
V	Elektriksel skaler potansiyeli
Q	Elektriksel yük
v	Elektriksel yük hızı
γ	EMK ile terminal gerilimi arasındaki açı
BH_{max}	En yüksek enerji çarpanı
C_0	Esson sabiti
θ_i	Faz açısı

I_{ph1}	Faz akımı
V_{ph1}	Faz gerilimi
m	Faz sayısı
p_c	Girdap akımı kayıpları
k_c	Girdap akımı kayıpları katsayısı
$\cos \varphi$	Güç faktörü
T_i	Harmoniklerin mutlak değeri
δ	Hava aralığı
B_δ	Hava aralığı akı yoğunluğu
ϕ_δ	Hava aralığı akısı
S_{GAP}	Hava aralığı gücü
Vol_δ	Hava aralığı hacmi
A_δ	Hava aralığı kesit alanı
H_δ	Hava aralığı manyetik alan şiddeti
\mathcal{R}_δ	Hava aralığı relüktansı
E_θ	Hava aralığında depolanan ko-enerji
P_S	Havalandırma kayıpları
μ_r	Havanın bağıl manyetik geçirgenliği
μ_0	Havanın manyetik geçirgenliği
p_h	Histerisiz kayıpları
k_h	Histerisiz kayıpları katsayısı
p_e	Hesaplanamayan ek motor kayıpları
k_e	Hesaplanamayan ek motor kayıpları katsayısı
d_{Co}	İletken kesiti
T_c	Kafes torku, Kalkış torku
B_r	Kalıcı manyetikliği
I_K	Kalkış akımı
$K_{kayk\i}$	Kayk\i faktörü
k	Karesel yük katsayısı
κ	Kayk\i açısı
$I_{hal\ka}$	Kısa devre halkası akımı

a_r	Kısa devre halkası genişliği
S_{chalka}	Kısa devre halkası kesit alanı
b_r	Kısa devre halkası yüksekliği
H_C	Koersif Kuvvet
l'	Kullanılabilir paket boyu
τ_p	Kutup adımı
p	Kutup sayısı
C_k	Kutup sayısı ile oluk sayısının en küçük katı
α_i	Kutuptaki ortalama akı yoğunluğunu
d	Laminasyon sacı (laminasyon plakası) kalınlığını
dF	Lorentz kuvveti
B	Manyetik akı yoğunluğu
H	Manyetik alan şiddeti
X_{md}	Manyetiklenme reaktansı (-d eksen)
X_{mq}	Manyetiklenme reaktansı (-q eksen)
P_M	Mekanik güç
W	Mekanik konum
K_E	MMK sabiti
B_{s0}	Oluk açıklığı (rotor - üst oluk)
τ_r	Oluk adımı (rotor)
τ_{us}	Oluk adımı (stator)
b_{1r}	Oluk ağız açıklığı (rotor)
b_1	Oluk ağız genişliği (stator)
h_{1r}	Oluk ağız yüksekliği (rotor)
h_1	Oluk ağız yüksekliği (stator)
S_{cr}	Oluk Alanı (rotor)
S_{us}	Oluk alanı (stator)
b_5	Oluk alt genişliği (stator)
B_{s1}	Oluk çapı (rotor - üst oluk)
H_s	Oluk derinliği (rotor - üst oluk)
b_{tr}	Oluk dış genişliği (rotor)

b_{ds}	Oluk dış genişliği (Stator)
b_{4r}	Oluk genişliği (rotor)
Q_r	Oluk sayısı (rotor)
Q_s	Oluk sayısı (stator)
b_4	Oluk üst genişliği (stator)
h_2	Oluk üst pahı yüksekliği (stator)
h_5	Oluk yuvarlağı hariç toplam sargı yüksekliği (stator)
h_r	Oluk yüksekliği (rotor)
N_{tutma}	Oluktaki tutma torku periyodu
z_{Qs}	Oluktaki iletken sayısı
k_{Fe}	Paket boşluk oranı
λ	Paket oranı
λ	Paket oranı
l	Paket uzunluğu, Laminasyon Uzunluğu
a_p	Paralel iletken sayısı (stator)
T_r	Relüktans torku
I_r	Rotor akımı
I_{2d}	Rotor akımı (-d ekseni)
I_{2q}	Rotor akımı (-q ekseni)
B_{yr}	Rotor boyunduruk akı yoğunluğu
D_r	Rotor çapı
X	Rotor çapının paket boyuna oranı
X_{2q}	Rotor -d ekseni kaçak reaktansı
B_{dr}	Rotor dışında meydana gelen akı yoğunluğu
n_r	Rotor hızı, Asenkron Hız (d/d)
w_r	Rotor hızı, Asenkron Hız (rad/s)
D_{ri}	Rotor iç çapı, Mil çapı
X_{2q}	Rotor -q ekseni kaçak reaktansı
σ	Rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvet
h_{mag}	Sabit mıknatıs açıklığı (analitik hesaplamalar)
M_w	Sabit mıknatıs açıklığı (optimizasyon çalışmaları)

ϕ_{pm}	Sabit mıknatıs akısı
H_{mag}	Sabit mıknatıs alan yoğunluğu
A_{mag}	Sabit mıknatıs alanı
V_{mag}	Sabit mıknatıs hacmi
t_{mag}	Sabit mıknatıs kalınlığı (analitik hesaplamalar)
M_t	Sabit mıknatıs kalınlığı (optimizasyon çalışmaları)
T_{sm}	Sabit mıknatıs torku, Frenleme torku
b_{5c}	Sargı boşluğu hariç oluk alt genişliği (stator)
b_{4c}	Sargı boşluğu hariç oluk üst genişliği (stator)
h'	Sargı katmanları arasındaki boşluk (stator)
a	Sargıdaki paralel yol sayısı
n_1	Senkron hızı (d/d)
T_{syn}	Senkron tork
a	Serideki paralel iletken sayısı
B_{mag}	SM akı şiddeti
B_{mag}	SM akı yoğunluğu
B_{max}	SM için manyetik doyum sınırı
P_{rr}	Solid kayıplar
P_f	Sürtünme kayıpları
K_{Fe}	Stacking faktörü
w_s	Stator açısal hızı, Senkron hız
I_s	Stator akımı
I_d	Stator akımı (-d eksenine)
I_q	Stator akımı (-q eksenine)
B_{ys}	Stator boyunduruk akı yoğunluğu
X_d	Stator -d eksenine kaçak reaktansı
D_{so}	Stator dış çapı
B_{ds}	Stator dışında meydana gelen akı yoğunluğu
D_{si}	Stator iç çapı
X_q	Stator -q eksenine kaçak reaktansı
θ_k	Stator referans eksenine göre rotor konumu

J_s	Stator sargılarda meydana gelen akım yoğunluğu
k_{Cu}	Stator sargıları için alan faktörü
k_{ds1}	Stator sargısı dağılma faktörü
S_{cs}	Stator sargısı iletken yolu kesiti
k_{ps1}	Stator sargısı kirişleme faktörü
τ	Stator sargısı kutup adımı
k_{w1}	Stator sarım faktörü
q_s	Statorun bir kutbundaki oluk sayısı
N_s	Statorun bir sarım serisindeki spir sayısı
f	Şebeke frekansı
E_m	Terminal akımı
T_e	Toplam elektromanyetik tork
$P_{toplaml}$	Toplam kayıp
h_4	Toplam sargı yüksekliği (stator)
T_{mean}	Tork (ortalama)
T_{RMS}	Tork (RMS)
T_{tutma}	Tutma torku
I_{fm}	Uyartım akımı
E_0	Uyartım gerilimi
P_{rs}	Üç fazlı sargı kayıpları
h_3	Üst sargı boşluğu (stator)
A	Vektör potansiyeli
η	Verim
T_R	Vuruntu torku, Sarsıntı torku
T_L	Yük torku
t	Zaman

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif Akım
ASM	Asenkron Motor
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
SVM	Destekçi Vektör Makinesi
DA	Doğru Akım
EA	Eksenel Akılı
EASM	Eksenel Akılı Senkron Motor
FDAM	Fırçasız DA motor
GA	Genetik Algoritma
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
PSO	Parçacık Sürü Algoritması
RA	Radyal Akılı
RASM	Radyal Akılı Senkron Motor
SM	Sabit Mıknatıs
SMSM	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
ŞK	Şebeke Kalkışlı
ŞK-EASM	Şebeke Kalkışlı Eksenel Akılı Senkron Motor
ŞK-RASM	Şebeke Kalkışlı Radyal Akılı Senkron Motor
NEMA	Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Türkiye’de yıllara göre enerji tüketimi.....	1
Şekil 1.2. Türkiye’de sektörler bazında enerji tüketimi (Akgün, 2018).....	2
Şekil 1.3. Radyal ve aksenal motor yapısı (Goto ve ark., 2013)	4
Şekil 2.1. Merrill tarafından önerilen ilk ŞK-RASM.....	7
Şekil 2.2. Honsinger (1963) tarafından patenti alınan relüktans motor rotoru	8
Şekil 2.3. 1970 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Yates, 1970), (b) ve (c) (Siemens AG, 1970).....	9
Şekil 2.4. Binns ve Holmes tarafından 1971 yılında önerilen rotor topolojisi	11
Şekil 2.5.(Binns ve ark. - Steen tarafından önerilen rotor topolojileri (a) (Binns ve ark, 1978) (b) (Steen, 1979)	13
Şekil 2.6. (Binns ve Jabbar, 1981) ile önerilen rotor topolojisi	14
Şekil 2.7. 1984 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Binns ve Wong, 1984), (b) (Yamashita ve ark., 1984).....	15
Şekil 2.8. (Ishizaki ve Yamamoto, 1986) ile önerilen rotor topolojisi	17
Şekil 2.9. (Gleghorn ve Wagner, 1990) ile önerilen rotor topolojisi	18
Şekil 2.10. Kliman ve ark (a) ve Dong ve ark. (b) tarafından 1995 yılında önerilen rotor topolojileri (Dong ve ark, 1995; Kliman ve ark, 1995)	20
Şekil 2.11. (Saban ve ark, 2000) ile önerilen yüzey yerleştirmeli SM’ye sahip kaykılı rotor topolojisi	22
Şekil 2.12. Gömülü SM kullanılarak tasarlanmış 2002 ve 2003 yıllarında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Cho ve ark., 2002), (b) (Chu ve Chen, 2003)	23
Şekil 2.13. (Kurihara ve Rahman, 2004) ile önerilen rotor topolojisi	24
Şekil 2.14. 2006 yılında Shin ve Son tarafından önerilen topolojileri. (a) (Shin, 2006), (b-e) (Son, 2006).....	28
Şekil 2.15. 2007 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri (a) (Bingyi ve ark., 2007), (b) (Jung ve ark., 2007).	29
Şekil 2.16. 2008 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Xiaochen ve ark, 2008), (b) (Nam ve Eum, 2008)	30
Şekil 2.17. 2009 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Stoia ve ark., 2009), (b) (Zawilak ve Zawilak, 2009), (c) (Fang ve Hong, 2009).	33
Şekil 2.18. (Lin ve Mi, 2010) ile önerilen rotor topolojisi.....	35
Şekil 2.19. 2012 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Lu ve ark., 2012), (b) (Jensen, 2012), (c) (Kurihara ve ark, 2012), (d) (Rhyu ve ark., 2012), (e) (Higuchi ve ark., 2012)	39
Şekil 2.20. 2013 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Kahourzade ve ark., 2013) (b) (Cao ve ark., 2013).....	41

Şekil 2.21. (Shen ve ark., 2013) ile önerilen -V şeklinde konumlandırılmış gömülü SM içeren rotor topolojileri	42
Şekil 2.22. 2014 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (McElveen ve Budzynski, 2014) (b, c ve d) (Ugale ve ark., 2014).....	44
Şekil 2.23. 2015 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Huth ve Fischer, 2015), (b) (Melfi ve ark, 2015a), (c) (Melfi ve ark., 2015b).....	47
Şekil 2.24. (Chikouche ve ark, 2015) ile önerilen rotor topolojisi	49
Şekil 2.25. (Fu ve Chen, 2016) ile önerilen rotor topolojileri	50
Şekil 2.26. Topolojide değişiklik yapılmadan 2, 4 ve 6 kutuplu olarak çalıştırılan rotor topolojisi, (a) 2 kutuplu , (b) 4 kutuplu ve (c) 6 kutuplu	52
Şekil 2.27. 2017 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Lyskawinski ve ark, 2017), (b) (Sarani ve Vaez-Zadeh, 2017), (c) (Ugale ve Chaudhari, 2017).....	55
Şekil 2.28. (Bala, ve Chowdhury, 2017) ile önerilen yüksek relüktansa sahip rotor topolojisi	57
Şekil 2.29. (Yan ve ark, 2018a, 2018b) ile önerilen rotor topolojisi	61
Şekil 3.1. SM'lerin yuvadan çıkmasına engel olan kompozit gömlek yapısı.....	66
Şekil 3.2. Kayıklı nüve a) kayıklı stator b) kayıklı rotor (Anonim, 2019d; Anonim, 2019e)	67
Şekil 3.3. (Saban ve ark., 2000) ile önerilen parçalı rotor tasarımı	68
Şekil 3.4. Parçalı nüve yapısına sahip topoloji örnekleri, (a) (Yates, 1970), (b) ve (c) (Anonim, 1970), (d) (Steen, 1979).....	69
Şekil 3.5. Motor hızlanma karakteristiği	71
Şekil 3.6. ŞK-RASM'nin tork bileşenleri.....	72
Şekil 3.7. Başarılı ve başarısız senkronizasyon	74
Şekil 3.8. Optimal ŞK-RASM tasarım algoritması.....	81
Şekil 3.9. Rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvet	82
Şekil 3.10. Kullanılabilir paket boyu (Pyrhnen ve ark., 2008)	86
Şekil 3.11. Stator oluk geometrisi ve tasarım parametreleri.....	89
Şekil 3.12. Nema standart rotor oluk yapıları ve motor kalkış performansına etkileri (Chapman, 2004; Anonim, 2019f).....	94
Şekil 3.13. En yüksek enerji çarpanı, BH_{max} (Gürdal, 2015; Anonim, 2019g).....	98
Şekil 3.14. SM sıcaklığına göre BH_{max} değişim karakteristiği (Cui ve ark., 2018).	98
Şekil 3.15. Lorentz kuvveti (Pyrhnen ve ark., 2008).....	102
Şekil 3.16. Boyut sayısına göre eleman tipleri, (a) bir boyutlu eleman, (b) ve (c) iki boyutlu eleman, (d) üç boyutlu eleman (Anonim, 2019h; Aydoğan, 2019)	106
Şekil 3.17. Sonlu sayıda elemana bölünmüş 2D bir geometri (Chari, 1974)	107
Şekil 3.18. Çalışmalarda üzerinde durulan ŞK-RASM rotor topolojileri (a), Motor1 (b) Motor2 ve (c) Motor3	108
Şekil 3.19. Önerilen rotor tasarımı (Zöhra ve ark., 2018)	110

Şekil 3.20. N45SH SM malzemesi manyetik özellikleri (Anonim, 2019k)	111
Şekil 3.21. M330-50A malzemesi manyetik özellikleri (Bödrich, 2008; Anonim, 2019i)	112
Şekil 3.22. Önerilen tasarımın mesh modeli	117
Şekil 3.23. Optimizasyon parametreleri	118
Şekil 3.24. Genetik algoritmanın akış diyagramı	119
Şekil 3.25. Mesh Model	121
Şekil 3.26. 132S-4 standart pik gövdesi	124
Şekil 3.27. Stator imalatı	126
Şekil 3.28. Rotor nüvesi ve kısa devre kafesinin imal edilmesi	128
Şekil 3.29. SM yuvalarının hazırlanması ve montajı	129
Şekil 3.30. Prototipin imal edilmiş hali	129
Şekil 3.31. Test düzeneği genel görünümü (Eker, 2017)	131
Şekil 3.32. Test Birimi	132
Şekil 3.33. Pruftechnik Shaftalign OS3 motor mili hizalama cihazı	133
Şekil 3.34. Motor mili ile prototip motorun eksenlenmesi, (a) Pruftechnik Shaftalign OS3 şaft hizalama cihazı hizalama ayaklarının kaplin akuplajına yerleştirilmiş hali, (b) ve ayar parametreleri	133
Şekil 4.1. Motor hızlanma karakteristikleri	137
Şekil 4.2. Tork karakteristiği	138
Şekil 4.3. Faz akımları	139
Şekil 4.4. Önerilen ŞK-RASM kalkış performansı ($T_L=35Nm$ $J_M=1$ p.u.)	142
Şekil 4.5. Önerilen ŞK-RASM tork karakteristiği ($T_L=35Nm$ $J_M=1$ p.u.)	143
Şekil 4.6. Önerilen ŞK-RASM faz akımları ($T_L=35Nm$ $J_M=1$ p.u.)	144
Şekil 4.7. Önerilen ŞK-RASM'nin hızlanma evresindeki güç analizi	145
Şekil 4.8. Maliyet fonksiyonu (Zöhra ve ark., 2018)	146
Şekil 4.9. GA Analiz parametrelerinin evrim sayısına göre dağılımı (Zöhra ve ark., 2018)	147
Şekil 4.10. Farklı stator kaykçı açıları için elde edilen vuru ve verim (Zöhra ve ark., 2018)	149
Şekil 4.11. Farklı stator kaykçı açıları için motor senkronlanma performansı (Zöhra ve ark., 2018)	150
Şekil 4.12. $\kappa = 0$ ve $\kappa = 13$ kaykçı açıları için motorun 30° 'lik dönüşü esnasında üretilen tutma torku (Zöhra ve ark., 2018)	151
Şekil 4.13. $\kappa = 0$ ve $\kappa = 13$ kaykçı açıları için motor tarafından üretilen elektromanyetik torkun rotor devrine göre değişimi (Zöhra ve ark., 2018)	151
Şekil 4.14. Önerilen statoru kaykçılı modelin farklı motor yükleri altındaki kalkış performansı (Zöhra ve ark., 2018)	152

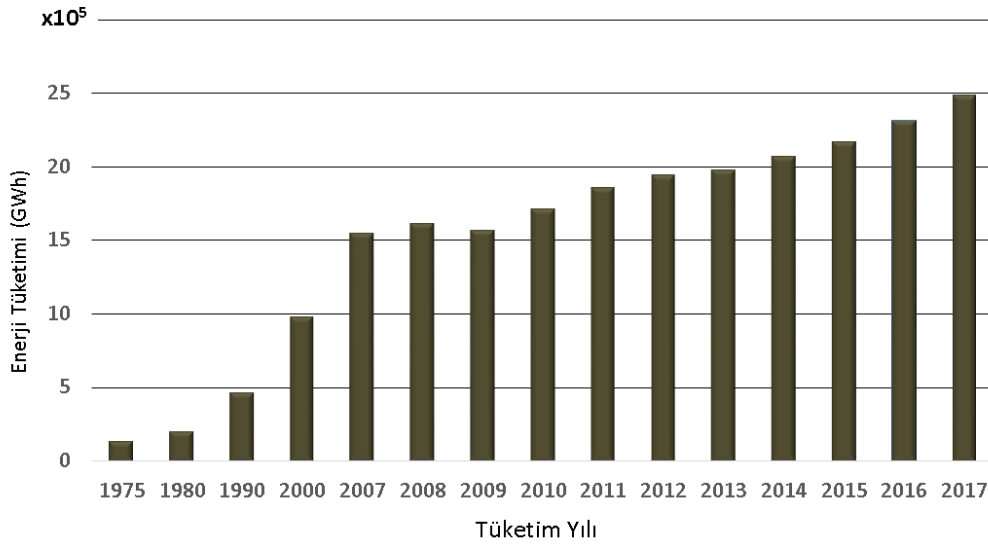
Şekil 4.15. Önerilen modelin sabit ve karesel yükteki çalışma karakteristiği ($T_L=35Nm$ $J_M=1$ p.u.) (Zöhra ve ark., 2018).....	153
Şekil 4.16. Önerilen modelin farklı karesel yüklerdeki çalışma karakteristiği (Zöhra ve ark., 2018)	153
Şekil 4.17. Yük torkuna bağlı olarak motordan elde edilen akım ve verim değerleri (Zöhra ve ark., 2018)	154
Şekil 4.18. Stator ve rotor nüvelerinde meydana gelen geçici ve kararlı durumdaki akı dağılımları, a-Geçici rejim b-Kararlı rejim (Zöhra ve ark., 2018).....	155
Şekil 4.19. 0-40 Nm yük momenti aralığında motor yol alma performansı.....	158
Şekil 4.20. Test amacı ile prototipe senkronlanma sonrası uygulanan yük torku verisi	159
Şekil 4.21. Deneysel ve SEY analiz çalışmaları ile elde edilen $\cos\phi$	160
Şekil 4.22. Verimin yük torkuna göre değişimi.....	161
Şekil 4.23. Çekilen akımın yük torkuna göre değişimi.....	161
Şekil 4.24. Deneysel ve SEY analiz sonuçlarının tork karakteristiği açısından karşılaştırılması	162
Şekil 4.25. Prototip motor ters EMK testi – hızlanma grafiği	163
Şekil 4.26. Sargı uçlarında indüklenen ters EMK	163
Şekil 4.27. Tutma torku	164
Şekil 4.28. Ani yükleme ve yükten alma deney sonuçları.....	165

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. ŞK-RASM'ler için rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvet aralıkları	83
Çizelge 3.2. Paket oranları	84
Çizelge 3.3. Tavsiye edilen hava aralığı akı yoğunluğu aralıkları.....	86
Çizelge 3.4. Akı sınırlamaları	87
Çizelge 3.5. Akım yoğunluğu sınırlamaları	88
Çizelge 3.6. Referans alınan motor ana boyutları.....	90
Çizelge 3.7. Stator tasarım detayları	90
Çizelge 3.8. Referans alınan motor etiket değerleri.....	91
Çizelge 3.9. Tavsiye edilen oluk sayısı oranları (Boldea ve Nasar, 2001)	93
Çizelge 3.10. Genetik algoritmanın koşturulmasında kullanılan çalışma parametreleri	120
Çizelge 3.11. 132S-4 standart pik (dökme demir) gövdeli motorun gövde ölçüleri.....	125
Çizelge 4.1. Analitik olarak modellenmesi yapılan önerilen topolojide ŞK-RASM tasarımına ait teknik detaylar	141
Çizelge 4.2. Genetik algoritma ile modelin optimizasyonunda kullanılan tasarım parametreleri	146
Çizelge 4.3. GA optimizasyon sonucu tasarım parametrelerinde ve motor verimindeki değişim.....	148
Çizelge 4.4. Sonuçların karşılaştırılması	166

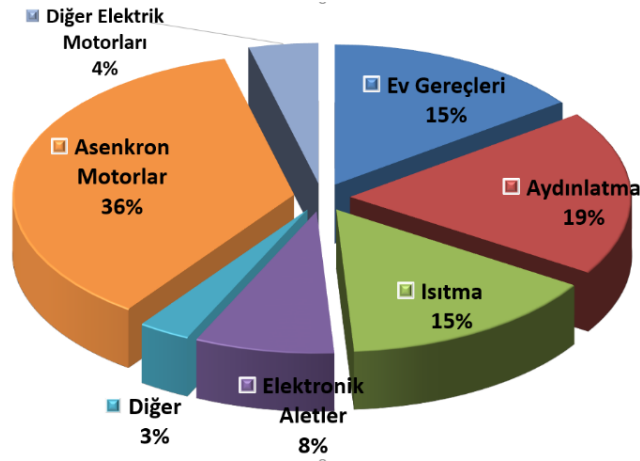
1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile enerjiye olan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Buna karşın sınırlı dünya kaynakları ile enerji arzının karşılanması giderek daha da zorlaşmaktadır. Kendi enerjisini üretebilen ve sahip olduğu enerji kaynaklarını doğru kullanan ülkeler diğerlerinin bir adım önüne geçebilmektedir. Ayrıca bu durum ülkenin ekonomik kalkınmasını ve toplumsal refahını da olumlu etkilemektedir. Şekil 1.1 ile sunulan grafikte ülkemizin 1975-2017 yılları arasındaki yıllara göre enerji tüketimi görülmektedir (Anonim, 2018).



Şekil 1.1. Türkiye’de yıllara göre enerji tüketimi

Asenkron Motorlar (ASM) söz konusu avantajlarının yanında düşük verim ve güç faktörü sunmaları dezavantajlarını da beraberinde getirmektedir. Türkiye’nin elektriğinin %36’lık kısmının bu motorlar tarafından tüketildiği göz önünde bulundurulduğunda (bkz. Şekil 1.2) bu motorların daha verimli hale getirilmesi ile ülkemiz enerji tüketiminde gözle görülür azalma sağlanabilmektedir (Akgün, 2018). Ayrıca büyük oranda ASM’lerin kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda daha verimli motorların tercih edilmesi durumunda, firma enerji giderlerinde de tasarruf sağlanabilmektedir. Bu nedenle söz konusu motorların daha verimli hale getirilmesine yönelik çalışmalara literatürde yoğun olarak rastlanmaktadır.



Şekil 1.2. Türkiye’de sektörler bazında enerji tüketimi (Akgün, 2018)

Günümüzde elektrik motorları pazarında çalışma koşullarına cevap verebilecek birçok ürün mevcut olmakla beraber pazara sunulan motorlar uluslararası düzeyde kabul gören standartlar ile karakterize edilmektedir (De Almeida ve ark., 2008; De Almeida ve ark., 2011). Elektrik motoru üreticileri tarafından da kabul gören bu standartlar ile piyasaya sunulan elektrik motorlarının çerçeve boyutları, çalışma karakteristikleri ve çalışma şartları gibi birçok konuda düzenleme yapılmaktadır (Brunner ve ark., 2007). Yoğun olarak kabul gören IEC 60034-30-1 elektrik motoru standartlarına göre 0.12 – 1000 kW mil gücü aralığındaki elektrik motorları verimliliklerine göre;

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

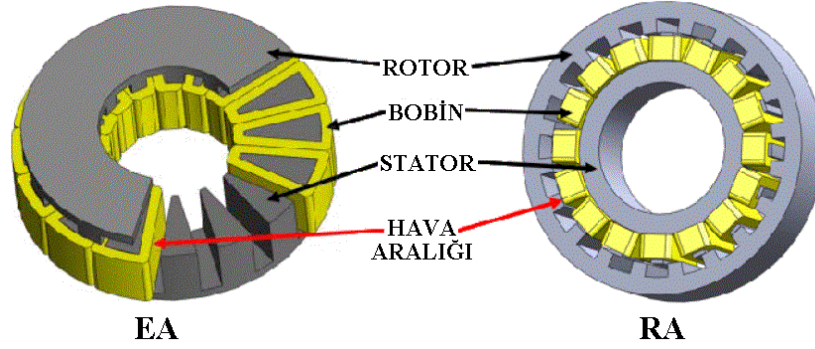
şeklinde sınıflandırılmaktadır (Anonim, 2014a).

İlk kez 2009 yılında önerilen ve daha sonra 2014 yılında güncellenerek bugün kü yürürlükteki halini alan IEC 60034-30-1 standardı, 2010 yılında Türkiye’de de yürürlüğe girmiştir (Anonim, 2010a). Söz konusu standart orijinal IEC standardı referans alınarak 2012 (Anonim, 2012a) ve 2014 (Anonim, 2014b) yılında güncellenerek bugünkü halini almıştır.

Burada üzerinde durulması gereken bir diğerk önemli konuda oldukça meşakkatli olabilen ve hassasiyet gerektiren elektrik motorlarının performansının test edilmesi ve verimliliğinin belirlenmesi konusudur. Söz konusu testlerin yapılmasında kullanılan donanım, ortam değışkenleri (ortam sıcaklığı, nemi vs.) ve testleri yapan personelin yetkinliğı elde edilen sonuçları da doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle testlerin yapılmasında kullanılan donanım, ortam değışkenleri ve test sürecine IEC 60034-30-2 standardı ile düzenleme getirilmiştir (Anonim, 2010b; Anonim, 2014c). Söz konusu düzenlemeleri takiben Türkiye’de de ilgili mevzuat hazırlanmış olup 2011 yılında TS EN 60034-2-2 standardı yürürlüğe girmiştir (Anonim, 2011).

Günümüzde ASM’ler teknolojik sınırlamalar ve malzeme limitleri neticesinde IE3 ve altı verimlikte piyasa sunulabilmektedir (Isfahani ve Vaez-Zadeh, 2009). Buna karşın ASM rotorlarının yüksek performanslı sabit mıknatıslar (SM) kullanılarak modellenmesi ile yüksek verim ve güç faktörü sunabilen yüksek güç yoğunluklu elektrik motorları üretilebilmektedir. Rotorunda sincap kafesi ve SM’lerin bir arada kullanılması nedeni hibrit bir yapıya sahip olan bu motorlar literatürde Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (ŞK-SMSM) olarak yer almaktadır. ŞK-SMSM’ler mevcut ASM’ler gibi sağlam ve az bakım gerektirmelerinin yanında rotorunda yer alan SM’ler sayesinde IE3 üstü standartlarda verimlilik sunabilmektedir (Isfahani ve Vaez-Zadeh, 2009; Behbahanifard ve Sadoughi, 2015).

Elektrik motorları Şekil 1.3’de görüldüğü gibi geometrik yapı ve manyetik akı dağılımı açısından Radyal Akılı (RA) ve Eksenel Akılı (EA) olarak sınıflandırılabilir (Goto ve ark., 2013; Dusane, 2016; Moreels ve Leijnen, 2018). RA motor yapısı yaygın kullanımı neticesinde gövde tipi, mil yüksekliğı, ayak açıklığı ve soğutma tipi gibi birçok açıdan standartlaşmış durumdadır. Buna karşın gelişmeye açık, tasarım açısından daha fazla hava aralığına sahip, sessiz ve titreşimsiz çalışabilir olmaları neticesinde EA yapısının da giderek yaygınlaştığı görülmektedir (Cavagnino ve ark., 2002; Patterson ve ark., 2009; Eker, 2017).



Şekil 1.3. Radyal ve eksenel motor yapısı (Goto ve ark., 2013)

Gövde yapısı açısından ŞK-SMSM'ler ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde RA motor yapısında (ŞK-RASM) ve EA motor yapısında (ŞK-EASM) çalışmalar yapıldığı görülmektedir. ŞK-EASM'ler özel geometrik yapıları nedeni ile mobil araçlarda kullanımı yaygınlaşırken ŞK RASM'ler standart gövde yapısına sahip olmaları ve IE3 üstü standartta verimlilik sunmaları neticesinde elektrik motoru pazarında ASM'lere alternatif olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir (Rahim ve ark 2007; Eker, 2017; Zöhra ve ark, 2018).

Bu tez çalışması ile ASM'ler gibi sağlam ve az bakım gerektiren buna ek olarak daha yüksek verim ve güç faktörü ihtiva eden standart gövde yapısında bir ŞK-RASM'nin modellenmesi ve prototip üretimi yapılmıştır. Bu kapsamda orta güç segmentinde 5.5 kW'lık standart bir ASM rotoru yeniden modellenerek motor daha verimli hale getirilmiştir. Tez çalışması sonucunda üretilebilirliği yüksek, düşük maliyetli, yüksek verimli, az bakım gerektiren yeni bir ŞK-RASM rotorunun tasarımı yapılmıştır. Tasarımda iki farklı oluk yapısının ve yüzey yerleştirilmeli SM kullanılması neticesinde motor kalkış ve senkron çalışma performansı arttırılmış yenilikçi bir rotor topolojisi ortaya konmuştur.

Tasarım sürecinde analitik yöntemlerin yanı sıra MathWorks Inc. MATLAB® ve ANSYS® Electromagnetics Suite sonlu elemanlar yazılımı geliştirme ortamlarından yararlanılmıştır. Önerilen rotor topolojisinde en yüksek verim karakteristiğine sahip geometrik tasarım verilerinin elde edilmesinde genetik algoritma kullanılmıştır. Ayrıca SM motorlarda kronik bir sorun olan ve mil torku kalitesini düşüren tork dalgalanmalarının azaltılması amacı ile motor statorunun kaykılı üretilmesine yönelik

çalışmalar yapılarak tork dalgalanmalarında %67,7'lik azalma elde edilmiştir. Çalışmada kaykılı stator yapısının mil torku kalitesine etkisinin belirlenmesinde ve nihai motor tasarımının performans eğrilerinin çizilmesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi amacı ile ANSYS® Electromagnetics Suite Maxwell 3D Transient çözücüsü kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen yenilikçi rotor topolojisine sahip ŞK-RASM modelinin kaykılı stator yapısı kullanılarak prototip üretimi yapılmıştır. Üretimi tamamlanan ŞK-RASM prototipinin performans ve çalışma karakteristiğinin belirlenmesine yönelik yapılan testlerde hali hazırda TOGÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında mevcut olan motor test düzeneğinden yararlanılmıştır.

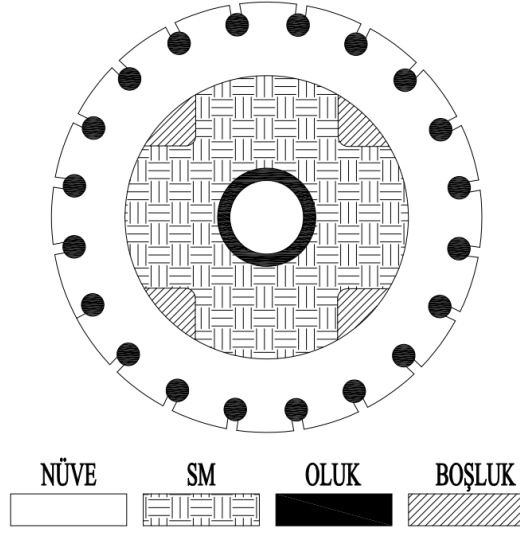
Tez çalışması kapsamında ŞK-RASM geliştirilmesi ve prototip üretimine yönelik yürütülen çalışmalar 2017/90 proje numarası ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Mekanik güç üretici olarak endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen ASM'lerin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmalara 1900'lü yılların başlarından günümüze kadar rastlanmaktadır. Düşük güç faktörü ve verim sunabilen ASM'lerin diğer önemli dezavantajı da doğrusal bir hız-tork karakteristiğine sahip olmamaları neticesinde düzenli devir üretilmemeleridir. ASM'lerin iyileştirilmesine yönelik 1900'lü yılların başlarında yapılan çalışmalarda motordan senkron devir alınması üzerine yoğunlaşıldığı görülürken (Morrill ve Pringle, 1933; Linkous, 1960; Williford, 1960; Armstrong ve Luenberger, 1961; Honsinger, 1962; Jorgensen ve ark., 1965; Dochterman, 1969), dünya genelinde boy gösteren enerji krizi etkisi ile güç faktörü ve motor veriminin iyileştirmesine yönelik çalışmalarında popülerleştiği görülmektedir.

Karakteristik olarak ASM ile oldukça benzerlik gösteren ve tez çalışmasına konu olan ŞK-RASM'lerle ilgili yapılan çalışmaların ise 1950'li yıllardan günümüze kadar devam ettiği görülmektedir. ŞK-RASM'lerin tarihsel gelişimi, geliştirilmesine katkı sağlayan araştırmacılar ve önerdikleri tasarım örnekleri de göz önünde bulundurularak bu bölümde detaylı incelenmiştir.

ŞK-RASM'lerin ilk örneği 1955 yılında Merrill tarafından önerilmiştir. Motor modelinin önerildiği yıllarda SM malzemesi olarak düşük performanslı ferrit ve alcino kullanılması neticesinde önerilen tasarım ticari bir ürün olamamıştır (Chaudhari ve ark, 2014). Merrill tarafından önerilen SM uyarımlı senkron motor tasarımı, 1955'teki makalesinde Permasyn ismi ile tanıtılmıştır (Şekil 2.1). Yayınında önerilen modelin yapısal karakteristikleri detaylı anlatılırken, 0.5 hp mil gücündeki motor yapısı için test verilerine yer verilmiştir. Ayrıca Alger, Merrill'in makalesi ile yayımlanan eleştirisinde Permasyn motorun yüksek performanslı SM kullanılarak tasarlanması durumunda ticarileşebilir nitelikte olduğunu öngörmüştür (Merrill, 1955).



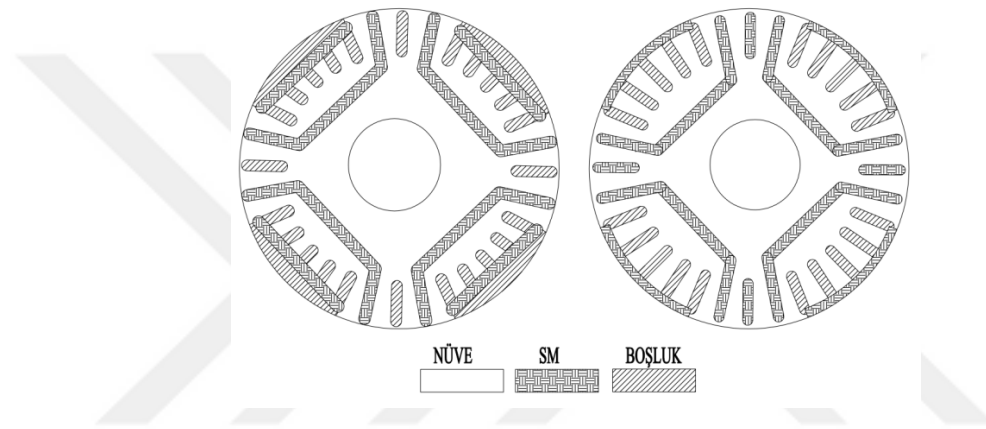
Şekil 2.1. Merril tarafından önerilen ilk ŞK-RASM

1959 yılında Douglas tarafından ASM'lerin sincap kafesinin arkasına radyal eksene dik bir şekilde konumlandırılan SM ile uyartımı yapılması üzerine çalışmıştır (Douglas, 1959a). Ayrıca aynı yıl yayımladığı başka bir makalesinde Permasyn motoru günümüz literatüründe d-q eksen takımı olarak bilinen Blondel'in ikili reaksiyon teorisini (Doherty ve Nickle, 1926) kullanarak detaylı incelemiş ve motor akım dağılımlarını karakterize etmiştir. Çalışmada gelişmiş mıknatıs yapıları ile Permasyn motorun iyileştirilebileceği öngörülmüştür (Douglas, 1959b). 1960 yılında Merrill tarafından Permasyn motorun patenti alınmıştır (Merrill, 1960).

1962 yılında Cahill ve Adkins tarafından Merrill'in tasarımından yola çıkarak geliştirilen yeni bir ŞK-RASM modeli önermiştir. Çalışmada geliştirilen modelin performansı 2 kutuplu 400V 3000 d/d 0.5 hp mil gücünde bir motordan alınan veriler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda motor güç faktörü 0.57 ve devrilme torku 1.25 p.u. bulunmuştur. Önerilen motor tipinin ASM'ler ile karşılaştırıldığında rotor resesif kayıplarının olmaması ve tam yükte yüksek hızlarda çalışabilmesi nedeni ile daha avantajlı olduğu fakat devrilme torku ve güç faktörünün iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca aynı boyutlardaki ASM'ye göre daha fazla çıkış gücü üretebileceği bilgisine yer verilmiştir (Cahill ve Adkins, 1962).

1962 yılında Honsinger tarafından yapılan çalışmada, mil torku -d eksen akısı ile -q eksen akısı farkının bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Ayrıca aynı teori ile -q eksen

takımındaki akının minimum, -d eksen akısının maksimuma yakın olması durumunda maksimum tork elde edilebileceği ifade edilmiştir. Çalışmada relüktans motor yapısında yeni bir rotor topolojisi önerilmiş olup, önerilen topolojide yer alan akı bariyerleri (hava boşlukları) aracılığı ile -q eksen akısının minimum, -d eksen akısının maksimum tutulmaya çalışılmıştır (Honsinger, 1962). Çalışma yayımlandıktan bir yıl sonra Honsinger tarafından akı bariyerleri revize edilerek farklı SM tasarımları ile topolojinin patenti alınmıştır (Şekil 2.2) (Honsinger, 1963). Daha sonraki yıllarda önerilen birçok ŞK-RASM topolojisinin senkron çalışma karakteristiği bu prensip ile tasarlanmıştır.



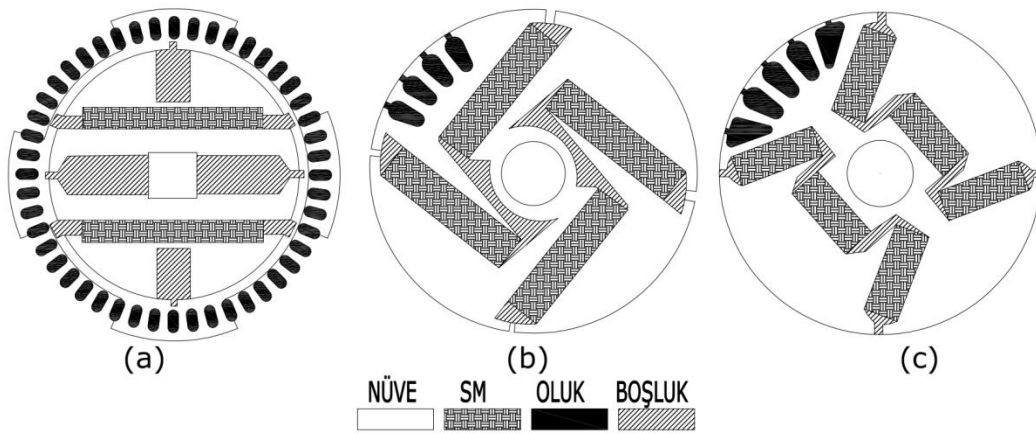
Şekil 2.2. Honsinger (1963) tarafından patenti alınan relüktans motor rotoru

1964 yılında Lawrenson geleneksel yapıya sahip bir relüktans makineyi analitik yöntemler ile tasarımda SM'lere yer vererek tekrar modellemiştir. Deneysel olarak da desteklenen çalışmada, geleneksel motorlara göre kayda değer performans kazancı elde edildiği bilgisi yer almıştır. Rotoru yerleştirilen SM nedeni ile olağan dışı akı dağılımına sahip motorun analitik yöntemlerle elde edilen d-q eksen reaktansları oldukça iyi bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Test çalışmalarında sabit frekansla çalışacak motorun değişken frekans altındaki performansı da test edilmiştir. Ayrıca DC gerilim ve düşük frekans ile yapılan test çalışmalarda mil torkunun -d ve -q eksen reaktansları farkı ile orantılı olduğu doğrulanmıştır (Lawrenson ve Agu, 1964).

Takip eden yıllarda (Jorgensen ve ark., 1965), (Kubaneck ve Tanner, 1965) ve (Rosenberg, 1968) tarafından benzer ŞK-RASM tasarımları önerilmiştir. Kubaneck tarafından önerilen tasarımda önceki yıllarda önerilen tasarımlardan farklı olarak dıştan rotorlu bir yapı

kullanılmıştır. Tasarımda kalkış performansı daha yüksek yuvarlak rotor olukları kullanılırken, modelin dıştan rotorlu olması neticesinde oluk arkasında SM yerleştirilmesi için oldukça fazla alan elde edilmiştir. Yay parçası şeklindeki SM tercih edilen tasarımda, SM sonlarına eklenen akı bariyerleri ile manyetik alanın kutup yönünde odaklanması sağlanmıştır (Kubanek ve Tanner, 1965).

1970 yılında Yates tarafından alınan patentte köşeli SM ve akı bariyeri içeren yeni bir topoloji önerilmiştir (Şekil 2.3a). Permasyn motordan esinlenen tasarımda ferrit tipi SM tercih edilirken demagnetize olma riskine karşı SM'ler motor miline yakın konumlandırılmıştır. Ayrıca rotor nüvesindeki akı yollarının düzenlenmesi amacı ile akı bariyerleri oldukça geniş tutulmuştur. Yapılan patent başvurusunda SM konumları ve akı bariyeri olarak kullanılan hava boşlukları detaylı olarak açıklanmıştır (Yates, 1970). Aynı yıl Siemens AG tarafından gömülü seramik SM'lerin kutup çiftlerine paralel olacak şekilde konumlandırıldığı birden çok rotor topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.3b ve Şekil 2.3c). Önerilen topolojilerde SM geometrisi ve konumuna göre farklı bakır oluk yapıları ve akı bariyerlerine yer verilmiştir (Anonim, 1970).



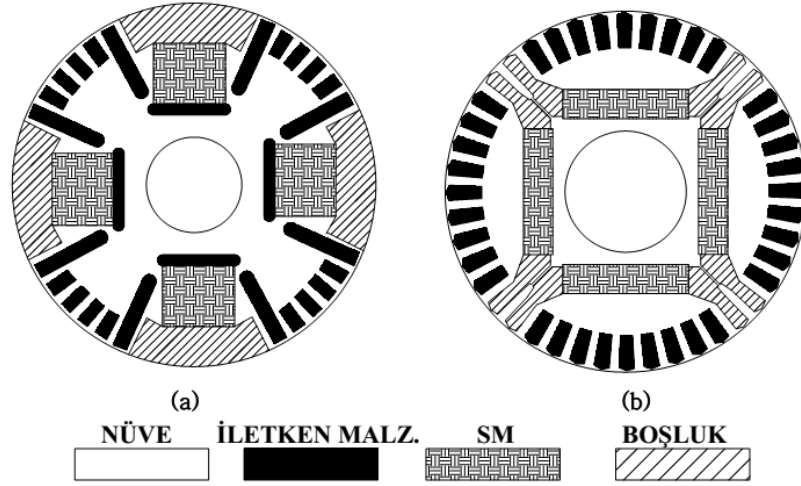
Şekil 2.3. 1970 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Yates, 1970), (b) ve (c) (Anonim, 1970)

1971 yılında Schiethart tarafından önerilen tasarımda uzatılmış bir shaft üzerine aynı topolojik yapıya sahip birden çok rotor farklı radyal açılarda dizilerek monte edilmiştir. Yapılan bu tasarım ile ASM'lerin kronik bir sorunu olan akı kaçaklarının azaltılması amaçlanmıştır. Önerilen tasarım ile tatmin edici verim ve güç faktörünün yanı sıra yüksek frekanslı asenkron çalışma rejiminde tatmin edici kalkış performansı da elde edilmek

istenmiştir. Tek parçalı sincap kafesi ve nüve kullanılması neticesinde ekonomik bir tasarım elde edilirken iki veya daha fazla rotor gövdesinin mil üzerinde dizilebileceği belirtilmiştir (Schiethart, 1971). Yapılan çalışmayı takiben De tarafından önerilen tasarımda (Yates, 1970) ve (Schiethart, 1971)'nin tasarımlarından yola çıkılarak motor mili üzerine dizilen birden çok rotor gövdesinin yer aldığı bir rotor topolojisi önerilmiştir. Rotorun yuvarlak olmaması neticesinde değişken hava aralığı uzunluğuna sahip olan tasarımda rotor yüzeyine yakın konumlandırılmış kare oluk yapıları tercih edilmiştir. Önerilen rotor topolojisi kare oluklar arasına konumlandırılan oldukça kalın SM'ler ile tamamlanmıştır. Önerilen tasarımda SM'ler yay parçası ve kare şeklinde olabilirken yay parçası şeklinde olan tasarımda akı bariyerlerine yer verilmemiştir. Ayrıca tasarımda döner manyetik alanı üreten çok fazlı sargılara ek olarak senkron çalışmaya destek olması amacı ile kararlı durum manyetik alanını üretecek harici DC sargılara yer verilmiştir (De, 1971). Aynı yıl Binns ve Barnard tarafından yayımlanan makalede önceki yıllarda önerilen rotor topolojileri eleştirilerek yeni bir rotor tasarımının önerisi yapılmıştır (Şekil 2.4). Mevcut elektrik motoru piyasası, teknolojik limitler ve çalışma şartları göz önünde bulundurularak yapılan bu eleştirilerde (Merrill, 1955) ile önerilen Permasyn motor (bkz. Şekil 2.1) yüksek tolerans gerektirmesi nedeni ile üretimi zor ve maliyetli olarak nitelendirilmiştir. Bu motorun mevcut relüktans motorlardan daha kullanışlı olmadığı, performansının tartışmalı olduğu ve kısa sürede daha kolay üretilen versiyonlarının önerildiği vurgulanmıştır. Ayrıca motorun üretimi için ekonomik ve performansı yüksek SM'lere ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. (Rosenberg, 1968) ile önerilen tasarım değişken rotor akısı sağlayan kontrol sargılarına sahip olması nedeni ile oldukça karışık olarak nitelendirilmiştir. (Anonim, 1970) ile önerilen tasarımlar ise (bkz. Şekil 2.3a. ve Şekil 2.3b) laminasyonu çok parçalı olması neticesinde rotor nüvesinin merkez kaç kuvvetlerine karşı dayanıklı olmayacağı vurgulanmıştır. Ayrıca kalkış anında SM'lerin doğrudan akıya maruz kalması neticesinde demagnetize olma riskinin arttığı üzerinde durulmuştur (Binns ve Barnard, 1971).

Takip eden yıllarda sırası ile (Binns ve Holmes, 1972), (Binns ve Barnard, 1973), (Volkrodt, 1973a), (Volkrodt, 1973b), (Binns, 1974) tarafından benzer nitelikte tasarımlar önerilmiştir.

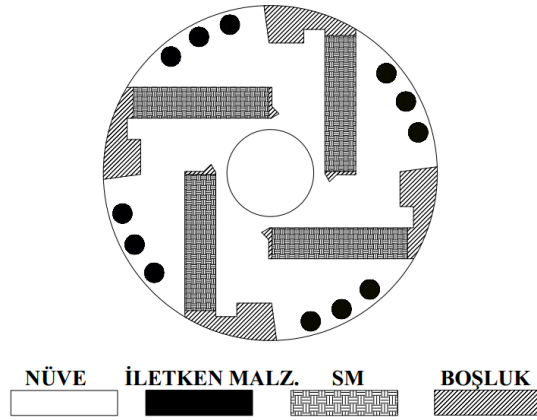
eksikler göz önünde bulundurularak yeni bir tasarım önerilmiştir (Şekil 2.5a). Tek parçalı rotor nüvesine sahip olan tasarımda relüktans akı ile SM'lerin beraber çalışarak paralel akı çizgileri oluşturmaları amaçlanmıştır. Analiz çalışmalarında akı bariyerinin performansa etkisinin gözlemlenmesi amacı ile, önerilen tasarımın akı bariyerine sahip olamayan hali de incelenmiştir. SEY kullanılarak elde edilen verilere göre akı bariyeri olmadan yapılan analizlerde SM'nin daha az etkin olduğu net olarak gözlemlenmiştir. Yapılan testler ve SEY kullanılarak yapılan hesaplamalarda motor performansının doğru tahmin edildiği gözlemlenmiştir (Binns ve ark, 1978). Aynı yıl Binns tarafından kaleme alınan makalede, SM içeren (alternatif akım) AA motorların mevcut durumunun değerlendirilmesi yapılmış olup, SM içeren hibrit ASM'ler ve relüktans motorlar verim karakteristiği ve sanayi beklentileri açısından tartışılmıştır. Makalede bu motorların sunduğu güç faktörü oranı ve verim karakteristiği ile sanayi beklentilerini karşıladığı, buna karşın uygulamalarda karşılaşılan en büyük problemin söz konusu motorların kalkış anında klasik ASM'lere göre daha fazla akım çekmesi olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca makalenin yayımlandığı tarihte iki endüstriyel firma tarafından üretim lisansı alındığı bilgisi verilmiştir (Binns, 1978). Takip eden yılda Binns ve ark. tarafından yapılan yayında ŞK-RASM'ler hibrit SM motor olarak nitelendirip doğrusal olmayan manyetik rejime sahip bölümler içermesi nedeni ile tasarım özelliklerinin de karmaşık olduğu üzerinde durulmuştur. Çalışmada bu zorluklar göz önünde bulundurularak yazarın önceki yıllarda ortaya koyduğu tasarımlara göre daha gelişmiş bir rotor topolojisi önerilmiştir. Tasarım sürecinde, tasarım parametrelerinin motor devrilme torkuna etkisi incelenmiştir. Çalışmada bazı geometrik parametrelerin motor performansı ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. İnceleme sonucunda akı bariyeri boyutlarının, hava aralığı kadar olmasa da motor performansında etkili olduğuna kanaat getirilmiştir. Ayrıca doğru tasarım parametrelerinin seçilmesi ile asenkron çalışma rejiminde meydana gelen zıt yönlü relüktans ve SM aktivitelerinin önüne geçilebileceği sonucu çıkarılmıştır (Binns ve ark, 1979). Aynı yıl Steen tarafından rotor nüvesine, motor miline paralel olacak şekilde SM'ler yerleştirilmiş bir tasarım önerilmiştir (Şekil 2.5b). Önerilen tasarımda kutup akısının kutup akı yolu boyunca kaçak akı olmadan kendini tamamlaması amacı ile mıknatıs sonlarına rotor yüzeyine kadar uzanan akı bariyerleri yerleştirilmiştir. Kutup açıklıkları akı bariyerleri ile birbirinden ayrılmakla beraber akı bariyeri olmayan bölgelerde kısa devre çubuklarına yer verilmiştir (Steen, 1979).



Şekil 2.5.(Binns ve ark. - Steen tarafından önerilen rotor topolojileri (a) (Binns ve ark, 1978) (b) (Steen, 1979)

Honsinger tarafından 1980 yılında ŞK-RASM'lerin asenkron çalışma karakteristiği genelleştirilmiş bir makina teorisi kullanılarak açıklanmıştır. Kullanılan teori ile asenkron çalışma rejiminde gelen tork bileşenleri SM torku, kafes torku ve bileşke torku şeklinde karakterize edilmiştir. Tork bileşenlerinin matematiksel olarak ifade edildiği makalede motorda üretilen vuru torku da incelenmiştir (Honsinger, 1980). Yayımlanan makale ile ŞK-RASM'lerin asenkron çalışma karakteristiği çok daha anlaşılır olmak ile beraber sonraki yıllarda yapılan birçok çalışmaya da kaynak olduğu görülmüştür.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, önerilen modellerin ağırlıklı olarak üretilebilirliği, SM'lerin demagnetizasyondan korunması, mekanik rijitliği, tork ve akım çekme rejimi üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. 1980'li yıllardan itibaren motor verimi ve güç faktörü konularının da ağırlık kazandığı gözlemlenen bir diğer durumdur. 1981 yılında Binns ve Jabbar tarafından yapılan çalışmada yazarın önceki yıllarda önerdiği tasarımlardan farklı olarak motor verimi ve güç faktörünün de performans belirleyici kriter olarak göz önünde bulundurulduğu yeni bir topoloji önerilmiştir (Şekil 2.6). Asimetrik bir kutup yapısı ihtiva eden tasarımda SM malzemesi olarak ferrit, alnico ve samaryum kobalt (Sm-Co₅) kullanılırken test sonuçlarında verim 0.85, güç faktörü de 0.95'lere kadar çıkarılabilmektedir (Binns ve Jabbar, 1981). Ayrıca yayının yapıldığı tarih göz önünde bulundurulduğunda elde edilen bu değerler ile aynı gövdedeki ASM'lere göre tatmin edici performans kazanıldığı gözlemlenen bir diğer durumdur.



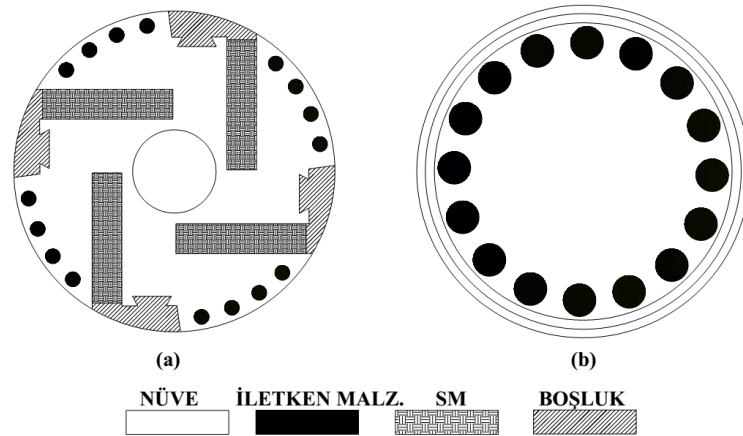
Şekil 2.6. (Binns ve Jabbar, 1981) ile önerilen rotor topolojisi

Takip eden yıllarda da akı bariyeri, SM ve kafes yapısı açısından yenilikler içeren tasarımlar önerilmiştir (Adelski ve Volkrodt, 1982; Liu ve Wagner, 1982; Liu ve ark., 1982; Ray ve Gollhardt, 1982; Miyashita ve ark., 1983).

1980'li yıllarda kaynak sıkıntılarının artması ve enerji kaynaklarının azalması ile motor üretiminde kullanılan malzemeler de giderek daha fazla önem kazanmıştır. Richter ve Neumann tarafından 1984 yılında yapılan çalışmada ferrit ve samaryum kobalt kullanılarak tasarımı yapılan aynı topolojide ŞK-RASM'ler performans ve üretim maliyeti açısından karşılaştırılmıştır. Ferrit malzemeler ile yapılan tasarımda karşılaşılan en büyük zorluk hedeflenen gücü sağlayacak hacimde SM'nin rotor gömülmesi olduğu sonucu çıkarılırken Samaryum kobaltın ferrite göre %87 daha az hacme ihtiyaç duyması neticesinde tasarım sürecini oldukça kolaylaştığı belirtilmiştir. Yüksek güç ihtiva eden samaryum kobalt ile yapılan tasarımlarda, asenkron çalışma performansının düşük olduğu ve nüvede doyumların daha fazla meydana geldiği gözlemlenmiştir. Samaryum-kobaltın, ferrite göre demagnetizasyona karşı daha hassas olduğu göz önünde bulundurulduğunda ferrit SM'lerin daha tercih edilebilir olduğu sonucu çıkarılmıştır. Bu sonucun çıkarılmasında asenkron çalışma performansı ve samaryum-kobaltın maliyetinin çok yüksek olması da etkili olmuştur. Ayrıca çalışmada ŞK-RASM'lerin ASM'lere göre daha büyük gövdeye ihtiyaç duymadığına kanaat getirilmiştir (Richter ve Neumann, 1984). Aynı yıl içinde Miller tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'lerin yük altındaki senkronlanma karakteristikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada analitik hesaplamaların yanı sıra 25 HP'lik bir motorun prototipi üretilerek test çalışmaları da yürütülmüştür. Motor kalkışı, senkronlanma performansı ve kararlı rejimin incelendiği çalışmada düşük

güçlü motorlarda düşük kafes direncinin motor senkronma performansını arttırdığı, daha büyük motorlarda ise kalkış torkunda azalma olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle büyük güçlü motorlarda çift kafesli rotor yapısının kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca yazar tarafından sürekli rejimde çalışan ŞK-RASM'lerin satın alma maliyetini kısa sürede telafi edeceği belirtilmiştir (Miller, 1984).

1980'li yıllarda bilgisayar işlemcileri ve modelleme yazılımlarındaki gelişmeler ile beraber elektrik motorlarının modellenmesinde de yazılım teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Binns, (Binns ve Jabbar, 1981) ile önerdiği model üzerinde (bkz. Şekil 2. 6) geliştirmeler yaparak yeni bir tasarım önermiş (Şekil 2.7a) ve motorun modellenmesinde bilgisayar yazılımlarından yararlanılmıştır. SEY analizleri ile desteklenen çalışma sonucunda orta güç segmentinde ŞK-RASM'ler ile %89 verim ve 0.97 güç faktörü, düşük güç segmentinde ise %86 verim ve 0.99 güç faktörü değerlerine ulaşılabilmektedir (Binns ve Wong, 1984). Aynı yıl Rahman tarafından yapılan çalışmada ise motor dinamik performansı detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada geçici rejim performansı ve doyumlarının hesaplanması amacı ile bir hesaplama algoritması ve bu algoritma ile çalışan bir simülasyon yazılımı önerilmiştir. SM alan şiddeti, eksen reaktansları, kafes direnci, besleme frekansı ve gerilimi gibi kritik motor parametreleri iteratif çalışma karakteristiğine sahip yazılım ile belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar test çalışmaları ile doğrulanmıştır (Rahman ve Little, 1984). Ayrıca aynı yıl içinde Yamashita ve ark. tarafından yapılan çalışmada yüzey yerleştirmeli SM kullanılan bir tasarımın patenti alınmıştır (Şekil 2.7b), (Yamashita ve ark., 1984).

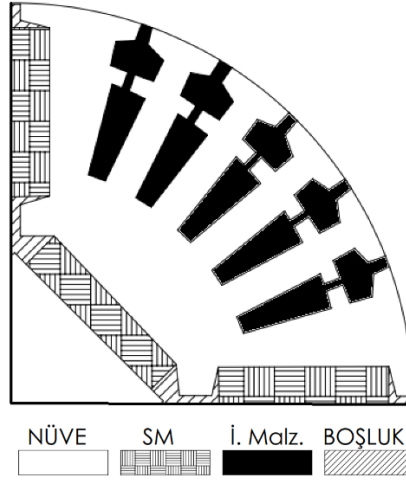


Şekil 2.7. 1984 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Binns ve Wong, 1984), (b) (Yamashita ve ark., 1984)

1985 yılında Richter ve ark. alternatif akım ile çalışan SM içeren AA motorları teknik ve ekonomik açıdan incelemiştir. Ayrıca çalışma ile aynı güçteki ASM gövdesi ölçülerinde, satın alma maliyetini 2,5 yılda telafi edebilecek yüksek verimli ve ekonomik bir motor tasarımı önerilmiştir. Önerilen modelin aynı güçteki yüksek verimli ASM ile performansı karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda yüksek verimli ASM ile daha yüksek kalkış performansı elde edildiği gözlemlenmiştir (Richter ve ark., 1985). Aynı yıl Yoshida ve Weh tarafından transfer matrisi kullanılan analitik bir yaklaşımla SM motorların analizi yapılmıştır. Çalışmada önerilen yeni metot ile motordaki SM'lere bağlı manyetik alan ve elektromanyetik kuvvet elde edilmiştir. Çalışma sonucunda uzun statorlu doğrusal bir motorun samayum-kobalt SM ile modellenmesi yapılarak, elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır (Yoshida ve Weh, 1985).

1986 yılında Ishizaki ve Yamamoto tarafından SM içeren AA motorların asenkron performansının belirlenmesine yönelik çalışılmıştır. Çalışmada d-q eksenleri arasındaki asimetrik yapı kaynaklı geçici rejimde meydana gelen tork göçmeleri üzerine yoğunlaşmıştır. Tork-hız grafiklerinde gözlemlenen bu göçmelerin mil torkunu, yük torkunun altına çekecek kadar zayıflatması durumunda motorun senkronlanamadığı üzerinde durulmuştur. Ayrıca çalışmada SEY ve hava aralığı indüktansı referans alınarak belirlenen harmonik geçirgenlik katsayısı ile motor kalkış performansı belirlenmiştir. Karmaşık manyetik devreye sahip motorların modellenmesinde kullanılan bu yöntem ile gömülü SM'ye sahip bir motorun modellenmesi yapılarak (Şekil 2.8), elde edilen sonuçlar deneyler ile doğrulanmıştır (Ishizaki ve Yamamoto, 1986). Aynı yıl içinde Consoli ve Abela tarafından SM içeren AA motorlarının geçici rejim davranışını belirlemek amacı ile analiz çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada önceki yıllarda önerisi yapılmış gömülü SM içeren tasarımlara benzer nitelikte bir topoloji önerilmiştir. Önerilen topolojinin tasarım sürecinde doyumlara neden olan kaçak akılar, d-q eksenindeki akı ve akım değişimlerine göre belirlenmiştir (Consoli ve Abela, 1986). Takip eden yılda Ostovic, manyetik devre kullanılarak SM içeren AA motorlarının doyum etkisi altındaki performansını hesaplamaya çalışmıştır. Performansın hesaplanması amacı ile yazar tarafından akı tüneli olarak isimlendirilen yeni bir metot önerilmiştir. (Consoli ve Abela, 1986) ile önerilen topoloji referans alınarak yapılan çalışmada ASM manyetik devrelerinin güncellenerek SM içeren AA motorlarda da kullanılabileceği sonucu çıkarılmıştır. Çalışmada ayrıca

kutup geçişlerinde meydana gelen anlık tork-akım değişimleri ve motor harmonikleri detaylı olarak tartışılmıştır (Ostovic, 1987).

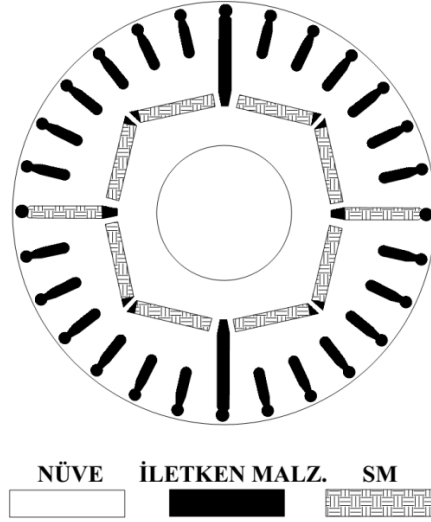


Şekil 2.8. (Ishizaki ve Yamamoto, 1986) ile önerilen rotor topolojisi

Binns, 1988 yılında ŞK-RASM'ler ile ilgili yaptığı son çalışmasında yayımın yapıldığı tarihe kadarki önerilen rotor topolojilerini değerlendirmiştir. Çalışmada gömülü ya da yüzey yerleştirmeli SM'ye sahip ŞK-RASM'lerin tek fazlı ve 3 fazlı olarak tasarlanabildiği vurgulanmıştır. Ayrıca ferrit ve nadir toprak elementi SM'lerin karşılaştırıldığı yayında yüksek performanslı motorların yapılması için genel olarak yüksek maliyetli SM kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır (Binns, 1988).

1990 yılında Abdel-Kader ve Osheba tarafından yapılan çalışmada, doğrusal olmayan karakteristikte ŞK-RASM'lerin modellenmesi amacı ile zaman domaininde çalışan analitik bir hesaplama algoritması kullanmıştır. Çalışma ile motor elektriksel parametrelerinin kafes torku performansına etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada kafes torkuna en az etkili olan parametrenin stator direnci olduğu sonucu çıkarılmıştır. Analitik olarak elde edilen motorun farklı yükler altındaki dinamik performansı test çalışmaları ile doğrulanmıştır (Abdel-Kader ve Osheba, 1990). Aynı yıl Rahman ve Osheba NdBF_e ve SmCO₅ içeren 25hp gücünde bir ŞK-RASM'yi modelleyerek prototipini üretmiştir. Tasarımı analitik olarak yapılan motor ile test sonuçlarında %94 verim ve yüksek güç faktörü elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar test çalışmaları ile doğrulanmıştır. Ayrıca çalışmada ŞK-RASM'lerin güç elektroniği ve SM teknolojisindeki ilerlemelerle sabit hız gerektiren uygulamalarda ve robotik sistemlerinde giderek yaygınlaştığı

üzerinde durulmuştur (Rahman ve Osheiba, 1990). Ayrıca aynı yıl içinde Gleghorn ve Wagner tarafından çok parçalı mıknatıs yapısı ve düzensiz oluk dizilimine sahip yeni bir topolojisi (Şekil 2.9) önerilmiştir (Gleghorn ve Wagner, 1990).



Şekil 2.9. (Gleghorn ve Wagner, 1990) ile önerilen rotor topolojisi

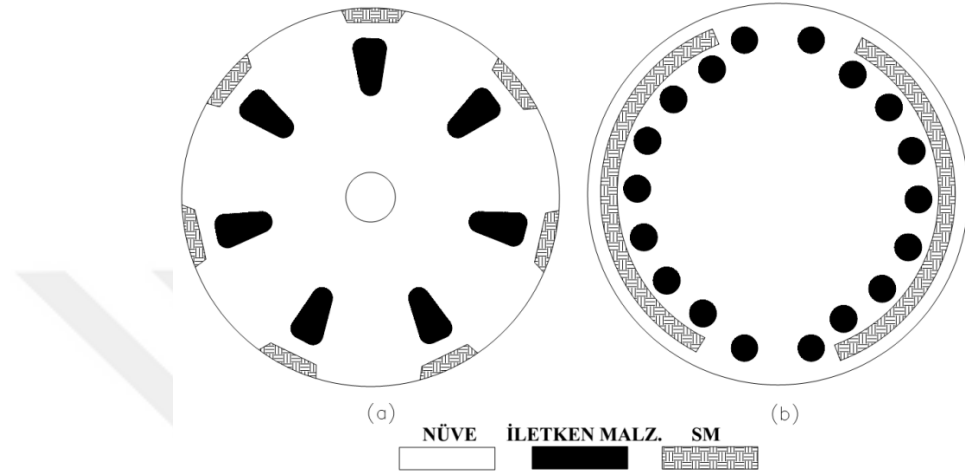
1991 yılında Abdel-Kader ve Osheba, 1990 yılında yapılan çalışmanın devamı olarak, motorun geçici durum dinamik performansını, mevcut motoru geniş bir gerilim ve frekans aralığında testler yaparak detaylı olarak incelemiştir. Çalışmada rotor kafes tasarımı, motor kalkış performansını iyileştirecek şekilde revize edilmiştir. Yapılan çalışma ile ŞK-RASM'lerin geçici durum performansına etki eden parametreler belirlenmiştir. Sonuç olarak besleme geriliminin artması ve frekansın azalması ile genel olarak düşük senkron torku elde edilirken, kalkış kafesi performansının arttığı ve daha istikrarlı çalıştığı görülmüştür. Çalışmada optimum gerilim ile beslenen motorda kalkış problemi gözlenmez iken gerilim azalması ile motor kalkışında problem meydana geleceği sonucu çıkarılmıştır (Osheba ve Abdel-Kader, 1991).

1990'lı yıllara kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, ŞK-RASM'lerin optimizasyonu ile ilgili yapılan araştırmaların sayıca oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Nitekim gelişmiş arama algoritmalarının ve yüksek işlem gücü gerektiren analiz çalışmalarının altında kalkabilen bilgisayarların yaygınlaşması ile sayıca oldukça az olan optimizasyon çalışmalarının 1990 yıllardan itibaren giderek arttığı gözlemlenen bir diğer durumdur.

1991 yılında Benghezal ve ark., kaykılı statora sahip bir ŞK-RASM'nin gerilim, akım, EMK, tork gibi motor karakteristik verilerini 2D SEY ortamında incelemiştir. Flux-2D SEY analiz yazılımı kullanılan çalışmada motor tasarımında gömülü tipte motor miline dik olarak aksenal konumlandırılmış SM içeren bir rotor tasarımı üzerinde durulmuştur. Ayrıca analizlerde özellikle hava aralığı ve SM yüzeylerindeki akılar üzerine yoğunlaşmıştır. Statorda oldukça doyum meydana geldiği belirtilen çalışmada kaykılı rotor yapısı kullanılarak vuruntu torkunun tamamen önüne geçilemediği sonucu çıkarılmıştır (Benghezal ve ark., 1991). Aynı yıl içinde Singal ve ark. tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise motorun daha sessiz çalıştırılması amacı ile titreşim frekansları ve stator titreşim karakteristiği araştırılmıştır (Singal ve ark, 1992).

1994 yılında Zhou ve ark. tarafından yapılan çalışmada gömülü tip SM içeren motorların senkron ve asenkron çalışma karakteristiğini daha iyi ifade edecek yeni bir metot önerilmiştir. Çalışmada SEY ile lumped parametre modelinin birleştirilmesi ile elde edilen metodun efor sarf etmeden motor çalışması ile ilgili detaylı mühendislik bilgisi sunabildiği belirtilmiştir. Ayrıca önerilen metot ile yapılan hesaplamaların değişken gerilim ve frekans değerlerini de kapsayabildiği vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler test verileri ile doğrulanarak metodun geçerliliği kanıtlanmıştır (Zhou, Rahman ve Jabbar, 1994). Aynı yıl Kurihara ve ark. tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise kararlı durumdaki motor akım, tork ve alan harmonikleri göz önünde bulundurularak elde edilen yeni bir metot önerilmiştir. Çalışmada alan harmoniklerinin hesaplanması amacı ile rotor konumu yüksek çözünürlüklü olarak veri edinimi ile takip edilmiştir. Analiz ve test sonuçlarının örtüştüğü gözlemlenen çalışmada önerilen metodun değişken gerilim ve frekansta çalışan SM makinelerin hesaplamalarında kullanılabileceği sonucu çıkarılmıştır (Kurihara ve ark, 1994). Takip eden yılda Ackermann ve Sottek tarafından tork dalgalanmalarının analitik modellenmesi üzerine çalışılmıştır. İdeal bir yüzey yerleştirmeli SM motorun kullanıldığı çalışmada armatür geometrisi ve manyetizasyonun tork dalgalanmalarına etkisi araştırılmış, elde edilen sonuçlar, ölçüm verileri ve SEY analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma ile ŞK-RASM'lerin modellenmesinde tork dalgalanmalarının mutlaka optimize edilmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır (Ackermann ve Sottek, 1995).

Aynı yıl içinde Kliman ve ark. tarafından yüzey yerleştirilmeli SM kullanılarak tasarlanan yeni bir topolojisi (Şekil 2.10a) önerilmiştir. Yıl içinde Dong ve ark. tarafından önerilen topolojide ise (Şekil 2.10b) yüzeye oldukça yakın konumlandırılmış yay parçası şeklinde SM'lere yer verilmiştir (Dong ve ark, 1995; Kliman ve ark, 1995).



Şekil 2.10. Kliman ve ark (a) ve Dong ve ark. (b) tarafından önerilen rotor topolojileri (Dong ve ark, 1995; Kliman ve ark, 1995)

1997 yılında Rahman tarafından ŞK-RASM'lerin hızlanma ve senkronlanma zamanındaki davranışı üzerine çalışılmıştır. Çalışmada kayma ve tork arasındaki ilişki analitik olarak ifade edilmiş olup farklı yük ve atalet momenti katsayılarında motorun kalkış performansı incelenmiştir. Ayrıca motor veriminin kayma ve besleme frekansı ile değişimi üzerine karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda ataleti büyük olan motorun daha az yük torkunda senkronlanabildiği, X_q/X_d oranının artması, besleme voltajının azalması yada frekansının artması ile motor senkronlanma performansının azaldığı gözlemlenirken, kutup çıkıntısının (magnetic saliency) senkronlanma performansını arttırdığı sonucu çıkarılmıştır (Rahman ve ark, 1997).

1998 yılında Stephens ve ark. tarafından yapılan çalışmada kalkış performansı ve tork kalitesi yüksek (tork dalgalanmaları üretmeyen), küçük gövdeli ve ekonomik bir motor tasarımı elde etmek amacı ile çalışmalar yapılmış ve yeni bir topoloji önerilmiştir. Önerilen topolojide, düzensiz dizilmiş faklı uzunluktaki oluklara yerleştirilen stator sargıları, kalkış ve senkron çalışma sargıları olmak üzere iki katmanlı olarak tasarlanmıştır. Rotor yapısında yüzey yerleştirilmeli SM kullanılan topoloji ile hem ASM hem de SM motor karakteristiği elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca kalkış

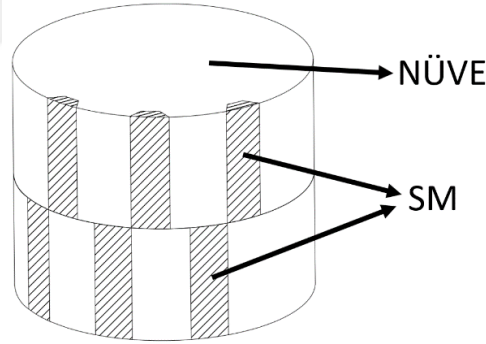
performansının artırılması amacı ile otomatik senkronlayıcı olarak isimlendirilen harici bir sürücü devresi de önerilmiştir. Bir dizi yenilik içeren tasarımın performansı SEY yazılımları ile doğrulanmıştır. Ayrıca çalışma sonucunda, hedeflenen yüksek performansın elde edilmesi için maliyeti yüksek neodyum SM kullanılması gerektiği ve bunun da motor maliyetini arttırdığı sonucu çıkarılmıştır (Stephens ve ark, 1998).

1998 yılında Bianchi ve Bolognani tarafından yapılan çalışmada elektrik motorları maliyet, verimlilik, tork ve benzeri özellikler açısından genetik algoritma (GA) kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmasında GA, SEY analiz yazılımı ile tümleşik olarak çalıştırılmıştır. Çalışma kapsamında GA analiz sonuçlarının karşılaştırılması amacı ile yüzey yerleştirmeli SM kullanılan örnek motor tasarımları yapılmıştır. Geniş bir veri uzayında çalışan GA için çok fazla zaman gerektiği not edilen çalışmada, algoritmaya SEY yazılımının da entegre edilmesi ile analiz süresinin çok daha fazla uzadığı üzerinde durulmuştur. Buna ek olarak, GA'nın bulanık mantık ya da doğrudan arama yöntemleri kullanılarak revize edilmesi ile çalışmanın daha kısa sürede sonuç verebileceği belirtilmiştir. Benzer bir yaklaşımda bazı tasarım parametrelerinin kısıtlanması ile de çalışma süresinin kısıllanacağı fakat her iki durum için de en iyi sonucu arayan algoritmanın performansının azalacağı vurgulanmıştır (Bianchi ve Bolognani, 1998).

1999 yılında Lim ve ark. kaykılı statora sahip gömülü SM içeren ŞK-RASM'nin dinamik modellemesini yapan yeni bir metot üzerine çalışmıştır. 2D analiz ve manyetik devre modeli kullanılan çalışmada kaykılı etkisini araştırılması amacı ile çok katmanlı bir hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Önerilen model ile doyum etkileri göz önünde bulundurulup çeşitli çalışma şartlarındaki motor performansı araştırılmıştır. Çalışmada özellikle motor tork, hız ve ters EMK'sı üzerine yoğunlaşmış ve elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile desteklenmiştir. Nüve kayıplarının ihmal edildiği çalışmada, önerilen metot ile motorun farklı yükler altındaki geçici ve kararlı çalışma rejimi karakterize edilmiştir (Lim ve ark, 1999).

2000 yılında McClay ve Knight tarafından yapılan çalışmada mevcut ASM'lerin SM kullanılarak veriminin çok daha fazla arttırılabileceği üzerinde durulmuştur. Çalışma kapsamında 1.5 kW'lık bir motorun zaman domaininde çalışan SEY yazılımı kullanılarak

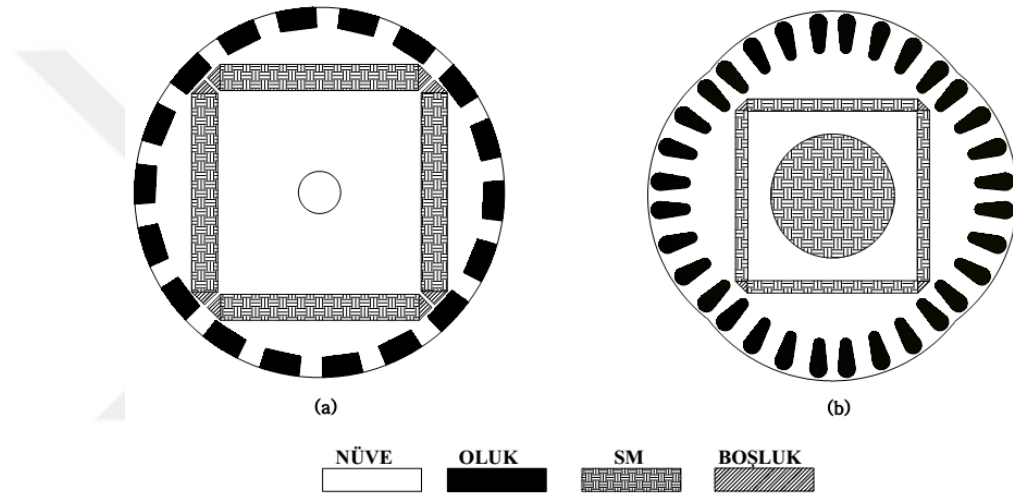
modellemesi yapılmıştır. SEY analizi sonuçlarına göre SM kullanılarak, ASM'lerin %50'ye kadar kayıplarının azaltılabileceğine kanaat getirilmiştir. Çalışmada ŞK-RASM'lerin tam yükte bile senkronlanabildiği belirtilirken, bu motorların tasarım süreci sonrası prototipinin üretilerek performans değerlendirmesi yapılması gerektiği vurgulanmıştır (McClay ve Knight, 2000). Aynı yıl Soulard ve Nee tarafından ŞK-RASM'lerin senkronizasyon karakteristiğinin belirlenmesine yönelik benzer bir çalışma daha yapılarak elde edilen bulgular test çalışmaları ile desteklenmiştir. Çalışmada özellikle motorun başarı ile senkronlanabildiği en yüksek tork değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Test çalışmaları sonucunda motor senkronlanma performansı tahmin edilenden yüksek çıkarken, tahmin edilenden daha düşük maksimum tork elde edilmiştir (Soulard ve Nee, 2000). Aynı yıl içinde Saban ve ark. tarafından kaykılı yeni bir rotor yapısı önerilmiştir (Şekil 2.11). Önerilen topolojide, yüzey yerleştirmeli SM'ye sahip iki veya üç parçalı olarak üretilen rotor gövdeleri belirli bir kaykılı açısı ile birbirine monte edilmiştir (Saban ve ark, 2000).



Şekil 2.11. (Saban ve ark, 2000) ile önerilen yüzey yerleştirmeli SM'ye sahip kaykılı rotor topolojisi

2002 yılında Madurga ve González tarafından yapılan çalışmada RASM motorların spektral harmonikler kullanılarak matematiksel modellemesi yapılmıştır. Hem yüzey yerleştirmeli hem de gömülü SM içeren motorları kapsayan çalışmada, motor matematik modeli d-q eksen koordinatlarında alan-fazör teorisine göre ifade edilmiştir. Model ile hava aralığı manyetik geçirgenliği, indüktanslar, kaçak akılar ve tork dalgalanmalarını da içeren elektromanyetik tork ve gerilim eşitlikleri elde edilmiştir. Sonuçlar, önceden yapılmış deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Madurga ve González, 2002). Aynı yıl Bianchi ve Bolognani tarafından yapılan çalışmada yüzey yerleştirmeli

SM motorlarda vuruñu torkunun azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda daha önceki yıllarda önerilen klasik ve yenilikçi yöntemler karşılaştırılmıştır. Çalışmada vuruñu torku Fourier analizi ile incelenmiştir. Ayrıca vuruñu torkunun azaltılmasının ters EMK'ya etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında yüzey yerleştirmeli SM'ye sahip motorların montaj, imalat ve yatırım maliyetleri endüstriyel açıdan tartışılmıştır (Bianchi ve Bolognani, 2002). Aynı yıl içinde Cho ve ark. sonraki yıllarda birçok çalışmaya referans olacak Şekil 2.12a'daki rotor topolojisini önermiştir (Cho ve ark., 2002).

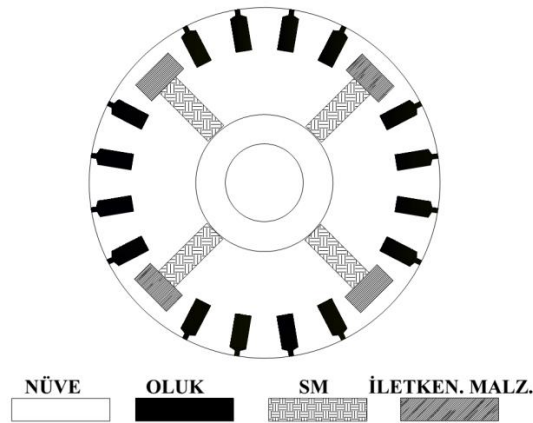


Şekil 2.12. Gömülü SM kullanılarak tasarlanmış 2002 ve 2003 yıllarında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Cho ve ark., 2002), (b) (Chu ve Chen, 2003)

2003 yılında Popescu ve ark. tarafından yapılan çalışmada tek fazlı kondansatörlü SM motorların kalıcı durum tork bileşenleri üzerine çalışılmıştır. Çalışmada vuruñu torku etkilerde göz önünde bulundurularak motorun elektromanyetik torku ve motor kalkış davranışı incelenmiştir. İncelemede simetrik tasarım parametreleri ve d-q eksen teorisini temel alan yeni bir yöntem kullanılmıştır. Kullanılan yöntemin relüktans ve çok fazlı motorları da karakterize edebildiği belirtilmiştir (Popescu ve ark., 2003). Aynı yıl Kim ve ark. tarafından yapılan çalışma ile basit eş devre formülleri kullanılarak farklı oluk yapılarının bir arada kullanıldığı ŞK-RASM kafes yapısının performansı incelenmiştir. SEY analiz ile desteklenen çalışmada manyetiklenme indüktansı, ters EMK ve uniform olmayan yapıya sahip olukların d-q eksenlerindeki tork karakteristiği de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı alana sahip uniform kafes yapısı ile karşılaştırıldığında, benzer kalkış performanslarına sahip olmalarına karşım önerilen model ile daha fazla tork elde

edilmiştir (Kim ve ark, 2003). Aynı yıl içinde Kang ve ark. ŞK-RASM'lerde SM'nin doğrusal olmayan kalıcı demagnetizasyon karakteristiğini incelemiştir. SM malzemesi olarak ferrit kullanılan çalışmada, motor tasarımı 2D SEY yazılımı ortamında modellenmiş olup nüvenin doğrusal olmayan manyetik karakteristiği de araştırılmıştır. Çalışmada en büyük deformasyonun kalkış akımının etkisi ile meydana geldiği sonucu çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak SM şekilleri optimize edilmiş ve ters EMK %53'den %10'a kadar düşürülmüştür. Sonuçlar neticesinde çalışma ile sunulan rotor topolojisi uygulanabilir olarak nitelendirilmiştir (Kang ve ark., 2003). Aynı yıl yapılan başka bir çalışmada Chu ve Chen tarafından değişken hava aralığı ihtiva eden, yuvarlak olamayan rotor gövdesine sahip yeni bir topoloji önerilmiştir (Şekil 2.12b). (Cho ve ark., 2002)' önerilen topoloji (bkz. Şekil 2.12a) ile benzer SM tasarımına sahip rotor yapısında şebekeden kalkışı kolaylaştırması amacı ile derin oluklar tercih edilmiştir (Chu ve Chen, 2003).

2004 yılında Kurihara ve Rahman tarafından yapılan çalışmada küçük boyutlu NdBF_e SM kullanılarak tasarlanan yüksek verimli ve başarılı bir rotor topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.13). Önerilen tasarımın hem şebekeden doğrudan hem de değişken frekans ile beslenebileceği belirtilen çalışmada modelin geçici ve kalıcı rejimdeki dinamik karakteristiği SEY analizleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışmada elde edilen performans bulguları analiz ve deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır (Kurihara ve Rahman, 2004).



Şekil 2.13. (Kurihara ve Rahman, 2004) ile önerilen rotor topolojisi

2004 yılında Lukaniszyn ve ark. ŞK-RASM'lerde hava aralığı akı yoğunluğunu inceleyerek, vuru torkuna neden olan harmonikleri belirlemeye çalışmıştır. Çalışmada hava aralığı, 2D SEY analiz yazılımı kullanılarak alan bazında zamana bağlı olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanarak ayrıştırılmıştır. Sonuç olarak çalışma ile statik dengesizlikler ve eksantrik bozukluklar kaynaklı vuru torkunun belirlenmesine yönelik yeni bir algoritma önerilmiştir. Çalışmada vuru torkunun yanı sıra elektromanyetik torku ve rotor yüzeyine etki eden radyal kuvvetleri belirleyebilen algoritmanın başarısı doğrulanmıştır (Lukaniszyn ve ark., 2004). Aynı yıl (Li ve ark., 2004) ve (Gieras, 2004) ile yapılan çalışmalarda da analitik yöntemler kullanılarak vuru torku belirlenmeye çalışılmıştır.

2005 yılında Popescu ve ark. tarafından yapılan çalışma ile kondansatörlü ŞK-RASM'lerin kalkış performansı detaylı olarak analiz edilmiştir. Kafes ve SM ortalama torkunun incelendiği çalışmada vuru torkunun etkileri de göz önünde bulundurularak ortalama elektromanyetik tork ve kalkış torku tahmin edilmiştir. Çalışmada motor tork karakteristiğinin belirlenmesini amacı ile simetrik parametreler ve d-q eksen takımı teorisini referans alan yeni bir metot kullanılmıştır. Geliştirilen metodun çok fazlı AC motor, senkron relüktans SM ve SMSM içinde uygulanabileceği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen önemli bulgular aşağıdaki gibidir (Popescu, Miller, Malcolm McGilp, ve ark., 2005).

- Motor kalkış performansının kafes direnci ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla yüksek rotor direnci ile yüksek kalkış torku elde edilebileceği fakat bu durumda tork geçmelerini de arttıracığı belirtilmiştir.
- Stator direncinin küçültülmesi ile SM kaynaklı frenleme torku da azaltılabilmektedir. Fakat düşük güçlü motorlarda bunun yapılması oldukça zordur.
- Besleme voltajı genliği kondansatörlü ya da doğrudan şebekeden kalkışlı motorlar için özenle seçilmelidir.
- Kafes torkunun senkron hızda sıfırlanmayıp belli bir düzeyde etkin olduğu ve asimetric topolojiye sahip rotor yapılarında motor dönüşünün tersi yönünde frenleme karakteristiği gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna karşın statorunda düzenli akım dağılımları meydana gelen ve d-q eksen reaktanslarının birbirine

yakın olduğu ($X_{2d} \approx X_{2q}$) simetrik yapılı tasarımlarda senkron rejimde kafes torkunun etkin olmadığı görülmüştür.

- Daha az SM kullanılması ya da hava aralığının büyütülmesi gibi benzer çözüm yöntemleri kullanılarak SM frenleneme torku azaltılabilmektedir. Fakat tercih edilen bu çözümlerin tamamında senkron hızdaki motor verimi de düşmektedir.
- SM fren torku, stator sargıları kısa devre edildikten sonra, bir yük motoru ile motor milinin çevrilmesi ile motor mili üzerinden ölçülebilmektedir.
- Tek fazlı motorların kalkışında, motor tarafından besleme frekansına bağlı olarak altı farklı periyotta vuru torku üretilmektedir. Motor senkron hıza geçtiğinde ise bu etki iki farklı periyotta etki göstermeye devam etmektedir.

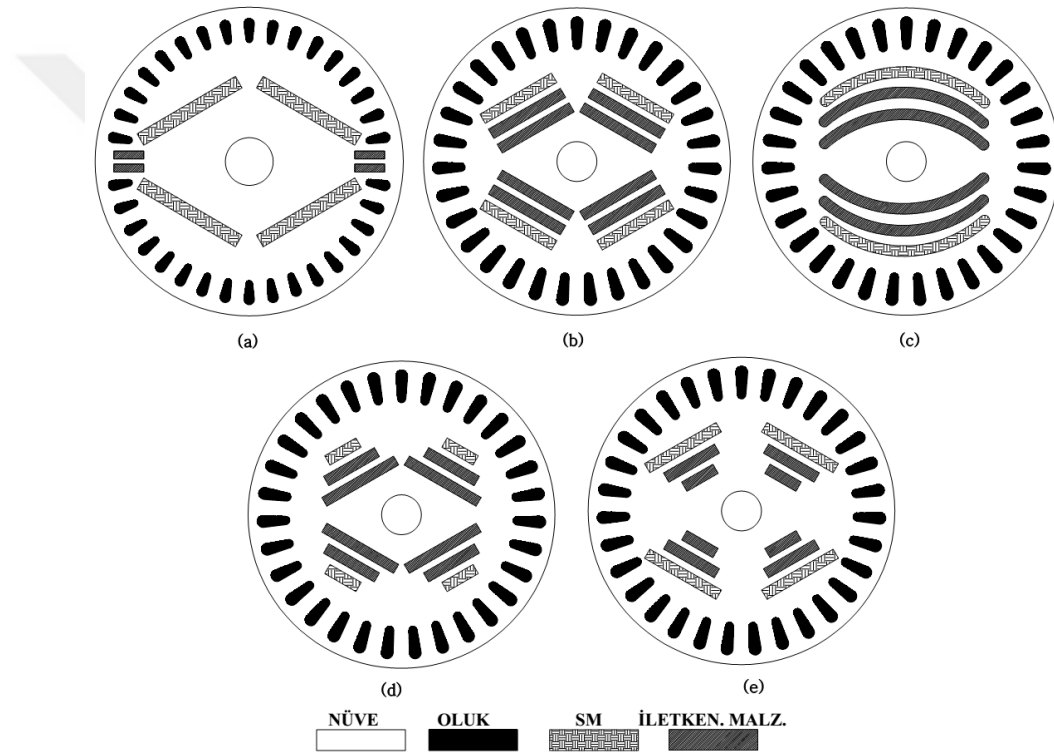
Rotorun asimetrik yapıya sahip olması durumunda oluşan vuru torku asenkron çalışmada aktif iken stator ya da sargılarındaki asimetrik tasarım kaynaklı tork dalgalanmaları asenkron hızda da kendini göstermektedir. Motorun kondansatörle kaldırılması durumunda doğru kapasite değeri ile stator kaynaklı salınımlar bir düzeyde bastırılabilirken rotor kaynaklı salınımlar hala etkindir (Popescu, Miller, Malcolm McGilp, ve ark., 2005).

Aynı yıl Popescu ve ark. tarafından yapılan ikinci çalışmada tek fazlı ŞK-RASM'lerde sargı harmoniklerinin asenkron torka etkileri araştırılmıştır. Araştırmada önceki yıllarda yapılan birçok çalışmada olduğu gibi motor simetrik parametreleri ve d-q eksen teorisine dayanan bir metot ile motor döner manyetik alanı modellenmiştir. Çalışma kapsamında stator sargılarından kaynaklanan harmonik etkilerin belirlenmesi amacı ile altı farklı motor ile teorik ve deneysel olarak çalışılmıştır. Motor ana-yardımcı sargıları ve sargı spin sayılarının da göz önünde bulundurulduğu çalışmada, hesaplama sonucu elde edilen tork-hız karakteristik değerleri ile ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak deneysel olarak da desteklenen çalışmada hem ana hem de yardımcı sargı harmoniklerinin motor performansı üzerinde kayda değer etki ettiği görülmüştür. Sargı harmoniklerinin karakterize edilmesi amacı ile kullanılan metodun önemli bir teorik rehber olduğu belirtilirken, sargı harmoniklerinin tek fazlı ASM'ye göre çok daha karmaşık olduğu ve tüm hızlarda mil torkunda etkili olduğu kanısına varılmıştır. Ayrıca azami motor performansının elde edilmesi için sargılarda etkin spin oranının optimizasyon yolu ile belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. (Popescu ve ark., 2005).

Takip eden yılda Popescu ve ark. tarafından yapılan bir diğer çalışmada, tek fazlı ŞK-RASM'lerin sürülmesinde kullanılan PWM (darbe genişlik modülasyonu) ve kondansatörlü olmak üzere iki farklı kalkış metodu, kalkış ve kararlı çalışma rejimi açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada geliştirilen metodun tek fazlı AA, senkron relüktans ya da SM içeren ŞK motorlar içinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Her iki sürücü tipinin de analitik yollarla performansı tahmin edilmiş olup yapılan uygulamalar ile elde edilen veriler doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda elektromanyetik torkun stator akımı ile değişimi doğru olarak tahmin edilmiştir. Buna ek olarak PWM sürücülü motorun senkron çalışmasında tork salınımları minimize edilebilmiştir. Ayrıca senkron çalışmada PWM ile yakalanan tork/akım oranı kondansatörlü sürücü ile yakalanamamıştır. Elde edilen veriler ışığında yüksek yük karakteristiğinde kondansatörlü, düşük yük karakterliğinde ise PWM sürücülerin avantajlı olduğu sonucu çıkarılmıştır (Popescu ve ark., 2006). Aynı yıl içinde Shin ve Son benzer tasarıma sahip yeni ŞK-RASM topolojileri önermiştir (Şekil 2.14a). Shin tarafından önerilen topolojide rotor yüzüne yakın konumlandırılmış akı bariyerleri, asimetrik bir kafes yapısı ve gömülü SM içeren yeni bir tasarım kullanılmıştır (Shin, 2006). Son tarafından önerilen birden çok topolojide ise (Şekil 2.14b, 2.14c, 2.14d ve 2.14e) kutup manyetik alanının oluşturulması amacı ile olukların altına her bir kutup için birbirine paralel 3 adet akı bariyeri konumlandırılmış olup, en üstteki bariyerlere SM yerleştirilmiştir (Son, 2006).

2007 yılında Bingyi ve ark. tarafından yapılan çalışmada yüksek torklu redüktörsüz çalışan çok kutuplu ŞK-RASM'lerin tasarıma yönelik yeni bir yöntem önerilmiştir. Stator sargıları, stator ve rotor laminasyon yapısı üzerine yoğunlaşılacak çalışmada sıcaklığının motor performansına etkisi de analiz edilmiştir. Ayrıca SM ebatları ve hava aralığı uzunluğunun hesaplanması konuları detaylı incelenmiştir. Çalışma kapsamında çok sayıda SM ve oluk içeren yeni bir ŞK-RASM topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.15a). Önerilen tasarımda harmoniklerin ve gürültünün azaltılması amacı ile hava aralığı geleneksel ASM'lere göre daha geniş tutulmuştur. Ayrıca stator boyunduruğunun mevcut ASM'lere göre daha kısa olduğu belirtilen çalışmada, harmonik ve gürültünün azaltılması ve ters EMK formunun düzgün olması açısından kesikli oluk sargıları kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada motor tasarımı MATLAB geliştirme ortamında yapılırken, kalkış performansı analizlerinde SEY analiz yazılımı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda motor kalkış performansı, manyetik alanının dağılımı ve değişimi konuları

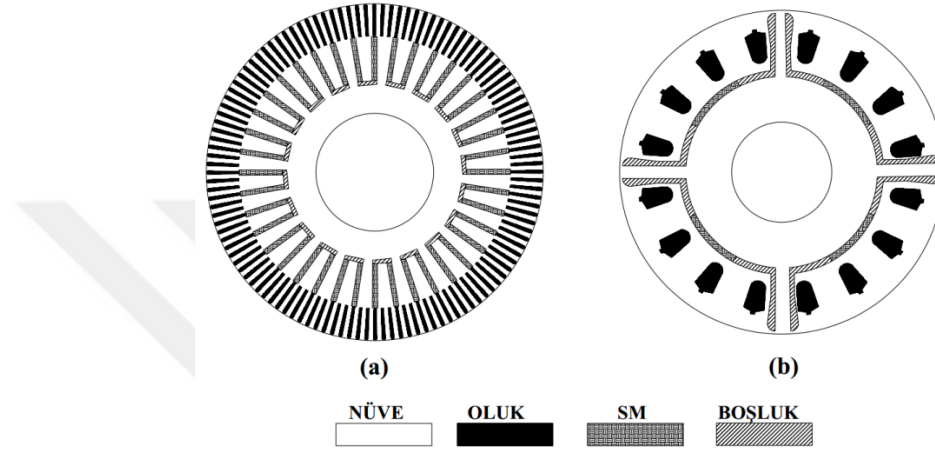
tartışılmıştır. Elde edilen veriler ışığında tasarımı yapılan çok kutuplu ŞK-RASM'nin tatmin edici kalkış performansına sahip ve mühendislik açısından uygulanabilir olduğuna kanaat getirilmiştir (Bingyi ve ark., 2007). Aynı yıl Fei ve Xu tarafından fan ve pompa gibi yüklerle çalışabilecek bir ŞK-RASM topolojisi önerilmiştir. Fan tipi yük ile akuple çalışan tasarım ile ASM yada FDAM ile yapılan uygulamalara göre sürücü devresine ihtiyaç duyulmadan daha yüksek verim elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca çalışmada önerilen topolojinin geleneksel yöntemlere göre daha sessiz çalıştığı ve ekonomik bir çözüm olduğu belirtilmiştir(Fei ve Xu, 2007).



Şekil 2.14. 2006 yılında Shin ve Son tarafından önerilen topolojileri. (a) (Shin, 2006), (b-e) (Son, 2006).

2007 yılında Stoia ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise ŞK-RASM tasarım süreci yüksek güç faktörü elde etmek amacı ile detaylı olarak incelenmiştir. Tasarım sürecinin geleneksel ASM tasarım konseptinden yola çıkılarak açıklandığı çalışmada, kalkış performansı, ters EMK, üretim maliyeti, yüksek verim ve güç faktörünün elde edilmesi gibi önemli konular da tartışılmıştır (Stoia ve ark., 2007). Aynı yıl içinde Jung ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise geleneksel bir tek fazlı ASM rotoru SM kullanılarak yeniden tasarlanmıştır (Şekil 2.15b). Çalışmada elde edilen yeni motorun geleneksel

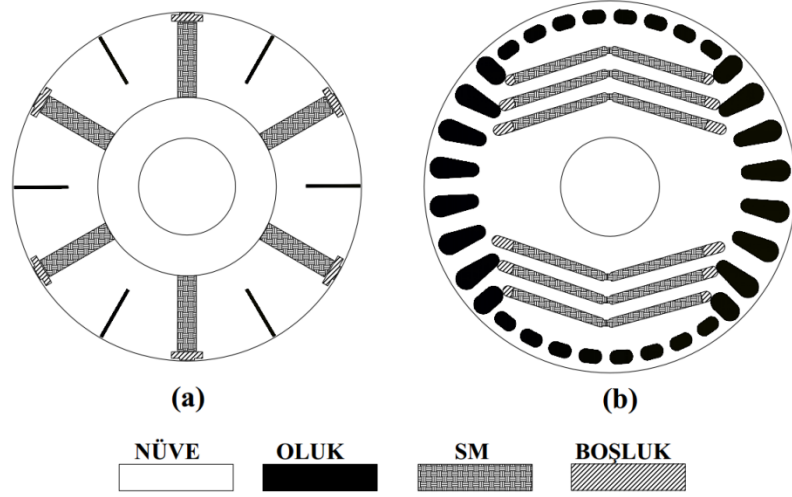
ASM'ye göre oldukça farklı geçici ve kararlı çalışma rejimine sahip olduğu göz önünde bulundurulmuş ve tasarım parametrelerinin motor performansına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak akı bariyerleri, SM ebatları ve konumları belirlenmiş olup, önerilen tasarım için olası bir durumda meydana gelebilecek demagnetizasyonlar tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar motor prototipi üretilerek doğrulanmıştır(Jung ve ark., 2007).



Şekil 2.15. 2007 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri (a) (Bingyi ve ark., 2007), (b) (Jung ve ark., 2007).

2008 yılında Xiaochen ve ark. tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarda enerji sarfiyatının azaltılmasını amaçlayan yeni bir ŞK-RASM tasarımı yapılmıştır (Şekil 2.16a). Motor miline dik olarak konumlandırılmış gömülü SM içeren bir topolojinin tercih edildiği çalışmada 30 kW'lık bir motorun analitik hesapları yapılmış ve tasarımı yapılan model 2D SEY analiz yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler ile farklı yük torkları için kalkış ve kararlı çalışma performansı, stator akımı, güç faktörü ve tork -hız eğrileri gibi önemli çalışma verileri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda elektrikli araçlarda kullanılacak SM içeren senkron motorların tasarımına yönelik önemli bilgiler elde edilmiştir. Tasarımı yapılan motor ile kayda değer kalkış performansı elde edilirken, motorun yükünün artırılması ile motor hızında dalgalanmalar meydana geldiği ve tekrar senkron rejime geçişin zaman aldığı belirtilmiştir. Buna rağmen yüksek hızlarda çalışan motorun farklı yükler altındaki çalışma karakteristiği çok fazla değişiklik göstermemiştir. Tasarlanan motor ile yeterli düzeyde kalkış performansı, maksimum tork, yüksek güç faktörü ve iyi düzeyde kararlı çalışma rejimi karakteristiği elde edilmiş olup elde edilen sonuçlar test çalışmaları ile doğrulanmıştır (Xiaochen ve ark, 2008). Aynı yıl Nam ve

Eum tarafından önerilen topolojide ise asimetrik bir kısa devre kafesine ve -V şekilli akı bariyerlerine yer verilmiştir (Şekil 2.16b). Ayrıca akı bariyeri içine akı bariyerini tamamen doldurmayacak uzunlukta SM'ler yerleştirilerek, SM sonlarında hava boşlukları bırakılmıştır (Nam ve Eum, 2008).



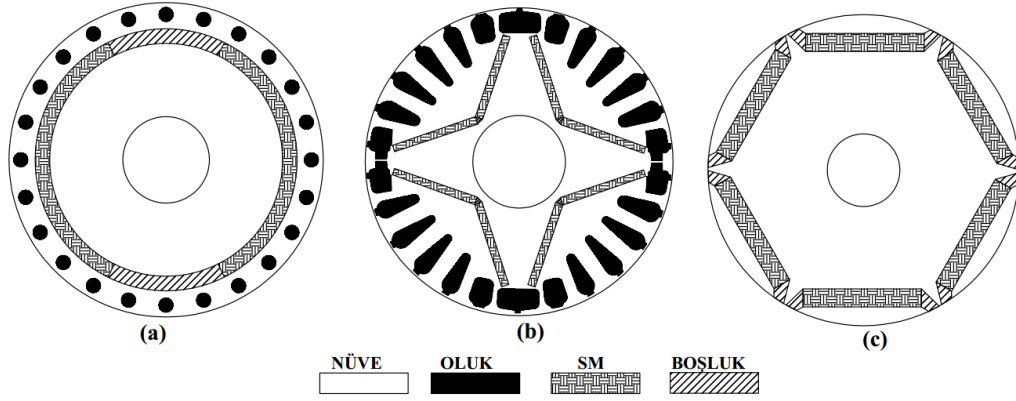
Şekil 2.16. 2008 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Xiao Chen ve ark, 2008), (b) (Nam ve Eum, 2008)

2008 yılında Yang ve ark. tarafından yapılan çalışmada basit ve oldukça yaygın olan bir topoloji kullanılarak yüksek performanslı ekonomik bir ŞK-RASM tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Motorun geliştirilmesinde öncelikle geleneksel bir ASM kafes yapısı tasarlanıp daha sonra SM'ler rotor gövdesine yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda performansı kayda değer bir şekilde arttırılmış yeni bir tasarım elde edilirken, motorun üretiminde kullanılan ekstra maliyetleri kısa sürede amorti edebileceğine kanaat getirilmiştir. Çalışma kapsamında dört kutuplu bir tasarım yapılarak prototipi üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin, analitik sonuçlar ile örtüştüğü görülmüştür (Yang ve ark, 2008). Aynı yıl Kim ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise ŞK-RASM'lerde kaykılı stator tasarımının kalkış performansına etkileri tartışılmıştır. Çalışmada kaykılı miktarının değişiminin motor ters EMK'sına ve motor kalkışına etkileri analiz edilerek optimum kaykılı açısı belirlenmiştir. Analiz çalışmalarında kaykılı etkilerinin üç boyutlu incelenmesi amacı ile çok katmanlı 2D SEY analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının doğrulanması amacı ile optimal kaykılı açısında stator ve kaykısız statora sahip motor tasarımları üretilmiştir. Üretilen prototipler test edilerek analiz

çalışmalarında elde edilen veriler karşılaştırılmalı olarak doğrulanmıştır (Kim ve ark., 2008). Yıl içinde Kim ve Kwon tarafından ŞK-RASM'ler de motor kalkış performansının iyileştirilmesine yönelik yapılan diğer bir çalışmada alan harmoniklerinin tek fazlı ŞK-RASM kalkış performansına etkisi araştırılmıştır. Harmoniklerin analizi için eşdeğer devre modeli kullanılan çalışmada, manyetik alan hesaplamaları SEY analiz yazılımı ile yapılmıştır. Devre modeli kullanılarak elde edilen motor kalkış karakteristiği, zaman domainde çalışan SEY yazılımı ve test verileri ile doğrulanmıştır. Çalışmada sonuç olarak motor kalkışında, özellikle düşük hızlarda geleneksel devre modelleri ile kestirilemeyen tork göçmeleri olduğu görülmüş ve önerilen modelin ŞK-RASM tasarımında yararlı olacağına kanaat getirilmiştir. Ayrıca motor kalkışında oldukça fazla etkili olan alan harmoniklerinin daha detaylı incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır (Kim ve Kwon, 2008). Yıl içinde Ugale ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise voltaj düşmesi ve güç kesintilerini ŞK-RASM'lerin performansına etkisi tartışılmıştır. Simülasyon çalışmaları ile de desteklenen çalışmada motor ideal bir besleme kaynağından beslenerek güç kalitesindeki düşüşün motor performansına etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamın 5 hp gücünde bir motorun Simulink modeli ile simülasyonu yapılmıştır. Çalışma sonucunda güç kesintilerinin özellikle küçük motorlarda tork dalgalanmalarını arttırdığı gözlemlenirken besleme koşullarının normale dönmesi ile motorun normal rejimde çalışmaya devam edebildiği belirtilmiştir. Çalışma ile ŞK-RASM'lerin performansının büyük oranda yüksek stator direncine ve eşdeğer uyartım akımına bağlı olduğu vurgulanmıştır (Ugale ve ark., 2008). 2008 yılında yapılan bir diğer kayda değer çalışmada ise Zarko ve ark. tarafından yüzey yerleştirmeli SM motorlarda, vurutu torkunun Maxwell Gerilme Tensörü kullanılarak hava aralığından elde edildiği yeni bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada SM manyetik özelliklerinin yanı sıra SM boyutları, pozisyonu, oluk açıklığı, hava aralığı uzunluğu, oluk ve kutup sayısı gibi birçok geometrik özelliğin vurutu torku dalga şekli ve genliğine etkileri araştırılmıştır. SEY analizi ile desteklenen çalışmada, analitik yolla hesaplanan vurutu torkunun daha yüksek tepe değerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca vurutu torkunu en aza indirgeyen SM açıklığı ve kutup adımı analitik yolla doğru olarak tahmin edilmiştir. Çalışma kapsamında dört kutuplu 7 kW'lık bir motorun hesaplamaları önerilen yöntem ile yapıлып, elde edilen veriler SEY analizi ile doğrulanmıştır. Ayrıca vurutu torkunu en aza indirgeyecek SM

açıklık açısı bulunarak önerilen metodun performansı doğrulanmıştır (Zarko ve ark, 2008).

2009 yılında Stoia ve ark. tarafından SM modellemesine yönelik yapılan çalışmada, manyetik akı ve MMK'ya bağlı B-H karakteristiği göz önünde bulundurularak analitik ve grafiksel olarak SM modellemesi yapılmıştır. Modellenen SM yapısı kullanılarak yeni bir topoloji önerilmiştir (Şekil 2.17a). Çalışmada kullanılan teorik yaklaşım ile geçici ve kalıcı rejim gerekliliklerini karşılayacak SM tasarımının yapılabileceği vurgulanırken, tasarımı yapılan SM çalışma aralığında çok yüksek manyetik enerji yoğunluğu elde edilebileceği belirtilmiştir (Stoia ve ark, 2009). Yazarların yıl içinde yaptıkları diğer bir çalışmada ise önceki çalışmada önerdikleri topolojinin yüksek verimli ve güç faktöründe tasarımı ve optimizasyonuna yönelik çalışılmıştır (Stoia ve ark., 2009). Aynı yıl Zawilak ve Zawilak (2009) tarafından yapılan çalışmada ise bilinen SM yapısındaki bir rotor topolojisi asimetrik kısa devre kafesi kullanılarak tekrar modellenmiştir (Şekil 2.17b). Tasarımda SM sonlarına kutup akısının odaklanması ve saçaklanmaların azaltılması amacı ile oluklar gibi rotor yüzeyine yakın konumlandırılmış akı bariyerlerine yer verilmiştir. Önerilen bu yeni tasarım alan harmonikleri açısından önceki tasarım ile karşılaştırılmıştır. Manyetik devreleri temel alan hesaplamaların kullanıldığı çalışmada alan harmoniklerinin yanı sıra motor ters EMK'sı, stator akımı ve elektromanyetik tork da tartışılmıştır. Çalışma ile farklı oluk derinliklerine sahip asimetrik kafes yapısının alan harmoniklerine etkisi incelenmiştir. Motor tasarımları 2D SEY analiz yazılımı ortamında modellenerek analiz çalışmaları ile analitik sonuçlar doğrulanmıştır. Analiz çalışmaları sonucunda akı bariyeri kullanılarak tasarlanan yeni geometri ile daha düzgün akı dağılımları elde edildiği, kaçak akıların önüne geçilmesinde akı bariyerlerinin işlevsel olduğu görülmüştür. Ayrıca alan harmoniklerinde ve tork salınımlarında da azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir (Zawilak ve Zawilak, 2009).



Şekil 2.17. 2009 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Stoia ve ark., 2009), (b) (Zawilak ve Zawilak, 2009), (c) (Fang ve Hong, 2009).

2009 yılında Fang ve Hong tarafından önerilen akı bariyeri tasarımı ile motor tutma torku ve vuruş torku azaltılarak, motor tork performansı artırılmıştır (Şekil 2.17c). Çalışmada tek parçalı yapıda SM sonlananlarına rotor yüzeyine kadar uzanan akı bariyerleri yerleştirilmiştir. Tutma ve vuruş torkunun SEY analiz ile elde edildiği çalışmada sonuçlar test çalışmaları ile doğrulanmıştır (Fang ve Hong, 2009). Ayrıca Fei ve ark tarafından yüksek verim ve güç faktörü elde edilmesi amacı ile mevcut ASM'lerin SM kullanılarak yeniden modellenmesi ile ilgili çalışılmıştır (Fei ve ark., 2009).

2009 yılında Ugale ve ark. ve Tarimer tarafından yapılan benzer çalışmalarda en çok tercih edilen rotor topolojileri SEY analiz yazılımı kullanılarak performans açısından birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Tarimer tarafından yapılan çalışmada farklı SM malzemelerinin motor performansına etkisi de incelenmiştir (Tarimer, 2009). Ugale ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise motorlar çalışma ömrü, güç faktörü, verim ve tork karakteristikleri açısından irdelenmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar, analiz çalışmalarının yanı sıra en iyi karakteristiğe sahip motorun üretilip test edilmesi ile de doğrulanmıştır (Ugale ve ark., 2009).

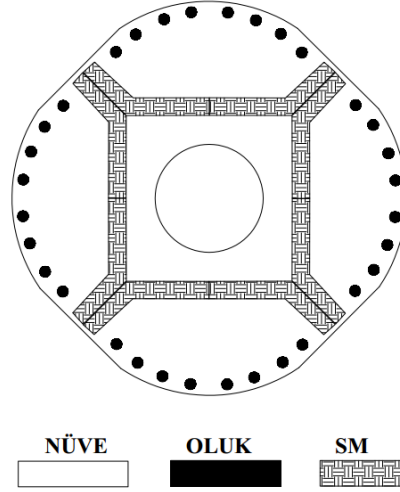
2009 yılında Ding ve ark. tarafından yapılan çalışmada pompa uygulamalarında kullanılacak ikisi gömülü, biri yüzey yerleştirmeli olmak üzere üç farklı ŞK-RASM rotor tasarımı kalkış ve kararlı çalışma karakteristiği açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada elektriksel parametrelerin motor performansına etkileri incelenmiştir. 22 kW'lık farklı topolojide modellenen motorlar çeşitli tasarım parametrelerinin değiştirilerek ters MMK, harmonikler, verim, güç faktörü ve motor resesif karakterliği açısından incelenmiştir.

Çalışma sonucunda tek parçalı gömülü SM kullanılarak tasarlanan motorun SM ile stator sargıları arasındaki etkileşim neticesinde kalkış anında çok fazlı salınım yaptığı görülmüştür. Ayrıca gömülü tip SM içeren tasarımlarda daha yüksek verim ve güç faktörü elde edilmiştir. SM tipi tasarımda motor kalkışı akış akımının yüksek olması neticesinde daha fazla araştırma yapılması gerektiğine kanaat getirilmiştir (Ding ve ark., 2009). Islam ve Fardoun tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise kayıklı rotor kullanılarak SMSM'ler de vuru ve tutma torkunun bastırılması üzerine çalışılmıştır. Çalışmada oluk-kutup kombinasyonları ve SM geometrisinin harmonik genlik ve dalga şekline etkileri incelenmiştir. Yapılan analiz ve deneysel çalışmalar sonucunda tork dalgalanmalarının azaltılması için kayıklı rotor yapısının şart olmadığı ve bu yöntem ile SM tasarımının zorlaştığı sonucu çıkarılmıştır (Islam ve ark., 2009).

2009 yılında Isfahani ve Zadeh tarafından yapılan derleme çalışmasında yayının yapıldığı tarihe kadarki çalışmalar çok yönlü olarak incelenmiştir. ŞK-RASM'lerin sunduğu verim ve güç faktörü ile elektrik motoru pazarının önemli bir üyesi olduğu vurgulanan çalışmada önceki yıllarda yapılan çalışmalar verimlilik, güç faktörü, tork ve güç yoğunluğu, rotor sıcaklığı, maliyet, kalkış ve senkron çalışma karakteristiği, gövde boyutları, üretilebilirliği gibi birçok açıdan tartışılmıştır. Çalışma sonucunda ŞK-RASM'lerin mevcut elektrik motoru pazarında ASM'lere alternatif olacağı ve satın alma maliyetini 2.5 yılda amorti edilebileceğine kanaat getirilmiştir (Isfahani ve Vaez-Zadeh, 2009).

2010 yılında Lin ve Mi tarafından oval yapılı rotor nüvesine sahip yeni bir topoloji önerilmiştir (Şekil 2.18). Rotorun oval yapılı olması neticesinde kutup konumlarına göre değişken hava aralığı elde edilen tasarım ile kalkış anındaki motor performansını artırıp çekilen akımın azaltılması amaçlanmıştır. Asimetrik manyetik devre ihtiva eden tasarımda SM konumları ve rotor nüve yapısı ile üretimi daha kolay bir tasarım yapıldığı belirtilmiştir (Lin ve Mi, 2010). Aynı yıl içinde Takahashi ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise (Stoia ve ark., 2009) ile önerilen topolojiye benzer yapıda bir ŞK-RASM, çıkık kutuplu ve yuvarlak rotorlu olarak tasarlanarak karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Sonuçların SEY analizi ile doğrulandığı çalışmada yüksek relüktans torku ve karalı çalışma karakteristiği elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada çıkık kutuplu motorda hem

geçici hem de kararlı rejimde daha yüksek performansın elde edildiği SEY analizleri ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır (Takahashi ve ark., 2010).



Şekil 2.18. (Lin ve Mi, 2010) ile önerilen rotor topolojisi

2010 yılında Stoia ve ark. tarafından yapılan bir diğer çalışmada yay parçası şeklinde gömülü SM içeren bir ŞK-RASM tasarımı referans alınarak motorun geçici rejimdeki davranışı incelenmiştir. Düşük kutup çıkıntısı oranı ve yüksek kafes direnci ihtiva eden referans motorun kullanıldığı çalışmada daha az hacimli SM kullanılması ile motor kalkış performansında iyileştirme sağlanacağı belirtilmiştir (Stoia ve ark., 2010). Tekkalmaz ve ark. tarafından Arçelik A.Ş. adına alınan Türkiye kaynaklı patentte ise yeni bir ŞK-RASM tasarımı önerilmiştir. Tek parçalı V şeklinde konumlandırılmış gömülü SM içeren tasarımda, SM'lerin SM yuvasına sabitlenmesi amacı ile rotor laminasyonu ilk ve son plakaları çıkıtlı olarak üretilmiştir. Dolayısı ile yapılan çalışmada SM ve kısa devre kafesi içeren yeni rotor topolojisinin yanı sıra motor üretimine yönelik yeni bir yöntem de önerilmiştir (Tekkalmaz ve ark., 2010).

2010 yılında Takegami ve ark. tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'lerin kalkış karakteristiğini hesaplayacak yeni bir metot önerilmiştir. Teorik sonuçların test çalışmaları ile doğrulandığı çalışmada tork dalgalanmaları da detaylı incelenmiştir. Çalışmada yapılan testler ile tatmin edici doğrulukta sonuç ürettiği doğrulanan metodun, motora ait çeşitli parametrelerin hesaplanmasında kullanılabileceği belirtilmiştir (Tsuneo Takegami ve ark., 2010). Bianchini ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise, gömülü

SM'ye sahip ŞK-RASM'lerde tutma torkunun azaltılmasına yönelik önerilen metot ve tasarım konseptleri tartışılmıştır. Karşılaştırmanın yapılabilmesi için incelenen metotlar referans kabul edilen bir motora uygulanmıştır. Farklı tasarım yaklaşımları ve metotların tutma torkuna etkisinin araştırılması amacı ile SEY analiz ortamından yararlanılan çalışmada ters MMK, tork kalitesi gibi önemli tasarım çıktıları da göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma sonucunda gömülü SM içeren motorların nominal akımda daha yüksek tork dalgalanması ürettiği gözlemlenirken, incelenen bazı metotların yüzey yerleştirmeli SM içeren motorlarda da uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır (Bianchini ve ark., 2010).

2010 yılında Fei ve Luk tarafından yapılan çalışmada redüktörsüz (doğrudan yüke bağlanan) ŞK-RASM'lerde SM kaynaklı vuruş torkunun azaltılma yönelik “aksiyal kutup çifti” olarak adlandırılan yeni bir metot önerilmiştir. Üç fazlı dıştan rotorlu motor yapısı için geliştirilen metotta düzensiz dizilime sahip kutup çıkıntıları ve kaykılı rotor yapısı kullanılmıştır. Çalışmada vuruş torkunun azaltılmasına yönelik elde edilen tatminkar sonuçlar SEY analizleri ile doğrulanmıştır. Ayrıca önerilen metodun revize edilerek farklı tipte SM içeren motorlarda da uygulanabilir olacağı belirtilmiştir (Fei ve Luk, 2010). Aynı yıl içinde motor kalkış performansının belirlenmesine yönelik Fengbo ve ark tarafından da benzer çalışmalar yapılmıştır (Fengbo ve ark., 2010).

2010 yılında Shahat ve Shewy tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'lerin MATLAB ve Simulink ortamında dinamik modellemesi ve GA ile motorun performans iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Yüzey yerleştirmeli SM tercih edilen çalışmada geliştirilen modelin otomotiv, mekatronik, yenilenebilir enerji uygulamaları ve sürücü sistemlerin geliştirilmesi gibi alanlarında kullanılması amaçlanmıştır. Çalışmada öncelikle oluşturulan dinamik modelin geçerliliği doğrulanmış daha sonra GA ile yüzey yerleştirmeli SM içeren ŞK-RASM'nin iyileştirilmesine yönelik çalışma yapılmıştır. En yüksek güç faktörünün elde edilmesini amaçlayan GA çalışmasında MATLAB GA optimizasyon aracı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda tatmin edici düzeyde motor akımı ve verim elde edilmiştir (Shahat ve Shewy, 2010). Yıl içinde Gao ve ark. tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise GA kullanılarak neodyum SM içeren senkron bir motorun tasarımı maliyet açısından optimize edilmiştir. Yürütülen çalışma ile motorun

üretiminde kullanılan etkin malzemelerde gözle görünür azalma sağlanmıştır (Gao ve ark., 2010).

2011 yılında Gwoździewicz ve Zawilak tarafından yapılan çalışmada tek fazlı ŞK-RASM yapıları incelenmiştir. Motor akımı, güç faktörü ve verimin yüke karşı değişiminin incelendiği çalışma SEY analizleri ile desteklenmiştir. Ayrıca kalkış karakteristiği ile ilgili elde edilen veriler incelenerek ASM'ler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda ŞK-RASM'ler ile aynı güçteki muadil makinalara göre daha yüksek güç yoğunluğu, verim, güç faktörü ve doğrusal hız elde edilebileceği sonucu çıkarılırken bu motorlarda karşılaşılan en büyük problemin kalkış karakteristiği nedeni ile kondansatör ile kalkış yapması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca yük karakteristiği itibari ile bu motorların karesel yük profiline sahip pompa, kompresör ve fan uygulamaları için daha uygun olduğuna kanaat getirilmiştir (Gwoździewicz ve Zawilak, 2011).

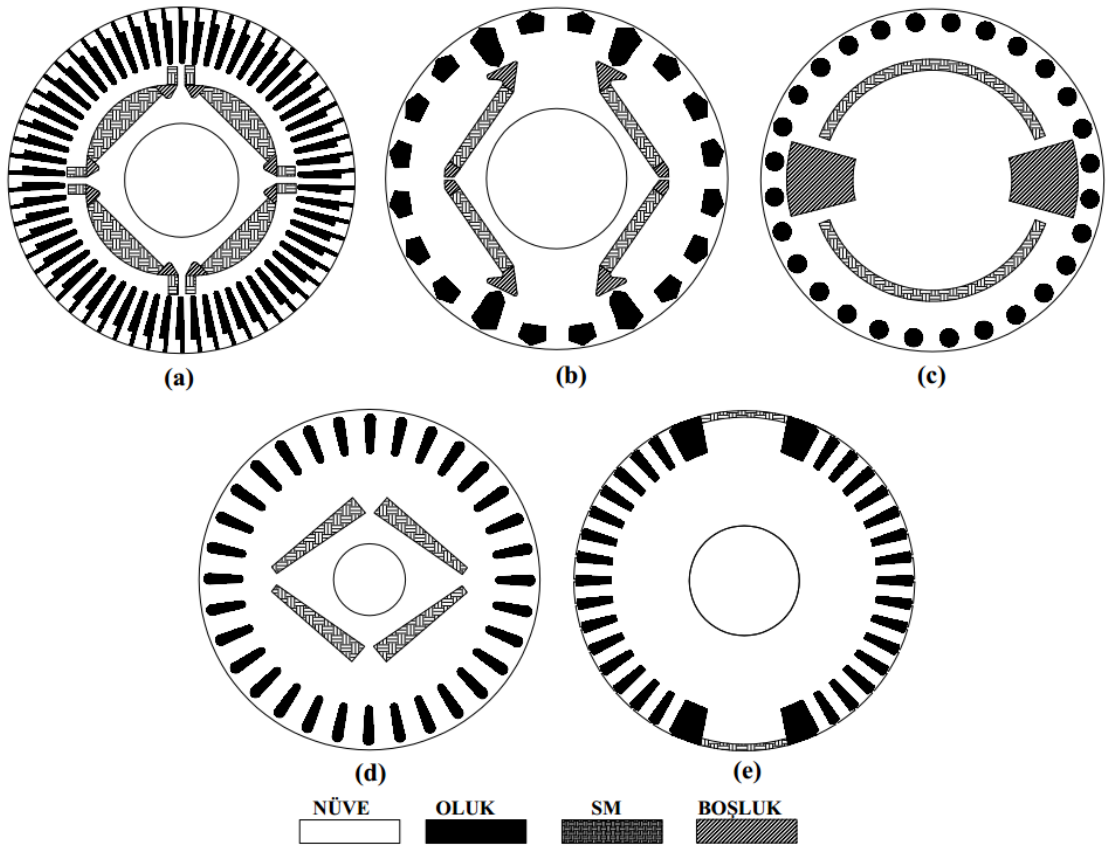
2011 yılında Isfahani ve ark. tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'lerde motor kalkışına kritik etkisi olan kayma değerinin hesaplanmasına yönelik basit bir yöntem önerilmiştir. İteratif yapıya sahip önerilen metot ile iki farklı motorun dinamik karakteristiği incelenmiştir. Özellikle motor tork karakteristiğine yoğunlaşılan çalışmada, kritik kayma değeri sabit motor yükü referans alınarak elde edilmiştir. Diğer yük tipleri için de uygulanabilir olduğu belirtilen metot ile %85 doğruluk elde edilebilirken, çalışmada kritik yük değerlerinde tork salınımının en yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir (Isfahani ve ark, 2011). Aynı yıl içinde Lu ve ark tarafından yapılan çalışmada ise kalkış anında meydana gelen armatür reaksiyonun SM demagnetizasyonuna etkileri incelenmiştir. İncelemede sürece etkisi olan faktörlerin değişimi de göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada SM'lerin büyük oranda kalkış rejiminde iken demagnetizasyona maruz kaldığı sonucu çıkarılırken, elde edilen veriler SEY analizleri ve deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. Ayrıca çalışmada aşırı yük ve atalet momenti oranlarının, düşük besleme geriliminin ve bazı özel rotor başlangıç pozisyonlarının motor kalkışını olumsuz etkilediği ve kalkış sürecini uzattığı belirlenmiştir. Tasarım sürecinde SM'lerin demagnetize olma riskine karşı bu parametrelerin göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır (Lu ve ark., 2011). Zawilak ve Gwoździewicz tarafından yapılan çalışmada ise stator sargılarında karışık yıldız-üçgen sarım kullanılarak ŞK-RASM'lerde alan harmoniklerinin önüne geçilmesi

amaçlanmıştır. SEY analizleri ile desteklenen çalışmada önerilen sarıma sahip motor ile standart sarımdaki motor tasarımı karşılaştırılmıştır. Ayrıca boşta çalışmadaki MMK ve yük torkunun akım harmoniklerine etkisi de incelenmiştir. Çalışma sonucunda önerilen stator sarım tekniği ile harmoniklerin bastırılabilirdiği, düşük sargı faktörü kullanılması durumunda ise alan harmoniklerin arttığı belirlenmiştir (Zawilak ve Gwozdziejewicz, 2011).

2011 yılında Islam ve ark. tarafından yapılan çalışmada stator ve rotor tasarım parametrelerinin optimize edilmesi ile SM uyarımı kaynaklı meydana gelen sinüzoidal tork salınımları en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Yüksek performans gerektiren sürücü uygulamalarda tork dalgalanmalarının en aza indirgenmesi gerektiği vurgulanan çalışmada çeşitli tasarım parametrelerinin tork salınımlarına etkisi elektromanyetik tork karakteristiği göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Çalışma kapsamında uygun motor tasarım parametrelerinin aranması amacı ile yeni bir yöntem önerilmiş olup önerilen yöntemden elde edilen tasarım parametreleri ile tork dalgalanmalarının en aza indirgendiği SEY analizleri ile doğrulanmıştır. Çalışmada tork salınımlarının azaltılması için manyetik akı ile elektriksel yük arasındaki denge sağlanması gerektiği sonucu çıkarılmıştır (Islam ve ark, 2011).

2012 yılında Lu ve ark. tarafından yapılan çalışmada pompa fan gibi uygulamalarda çalışabilecek yüksek güçte bir ŞK-RASM'nin performansı deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. ŞK-RASM'lerin endüstriyel fan, pompa gibi uygulamalarda daha az enerji harcayarak çalışabileceği belirtilen çalışmada, motorun yüksüz çalışmadaki ters MMK'sı analiz ve deneysel çalışmalarla elde edilmiştir. Yeni bir rotor tasarımının (Şekil 2.19a) geliştirildiği çalışmada yüksek verim ve güç faktörünün yanı sıra pompa yükü altında tatmin edici kalkış performansı elde edilmiştir (Lu ve ark., 2012). Aynı yıl içinde Jensen tarafından önerilen bir başka topoloji de olağan dışı akı bariyeri ve oluk tasarımına sahip yeni bir topoloji önerilmiştir (Şekil 2.19b), (Jensen, 2012). Ayrıca (Kurihara, Kubota ve Nitawaki, 2012) ve (Rhyu ve ark., 2012) ile de gömülü SM ile modellenmiş yenilikçi yaklaşımlar içeren yeni topolojiler önerilmiştir (Şekil 2.19c ve 2.19c). Kurihara ve ark. tarafından önerilen topoloji ile yüksek kalkış performansı elde edilmesi amaçlanmıştır. SEY analizleri ile de desteklenen çalışmada elde edilen bulgular deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen topolojide tasarlanan motor ile tam yükte

oldukça iyi kalkış elde edildiği belirtilmiştir (Kurihara ve ark., 2012). Rhyu ve ark. tarafından önerilen topolojide ise farklı kalınlıkta SM içeren bir tasarıma yer verilmiştir (Rhyu ve ark., 2012). Aynı yıl Higuchi ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise ŞK-RASM'lerin çalışma karakteristikleri incelenmiş olup, gömülü SM içeren bir rotor topolojisi akı bariyer ile ve akı bariyeri olmadan tasarlanarak tartışılmıştır. Elde edilen veriler ışığında akı bariyeri ve yüzey yerleştirmeli SM içeren yeni bir rotor topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.19e). SEY analizleri ile desteklenen çalışma sonucunda önerilen topoloji ile tatmin edici kalkış performansı elde edildiği doğrulanmıştır (Higuchi ve ark., 2012).



Şekil 2.19. 2012 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Lu ve ark., 2012), (b) (Jensen, 2012), (c) (Kurihara ve ark., 2012), (d) (Rhyu ve ark., 2012), (e) (Higuchi ve ark., 2012)

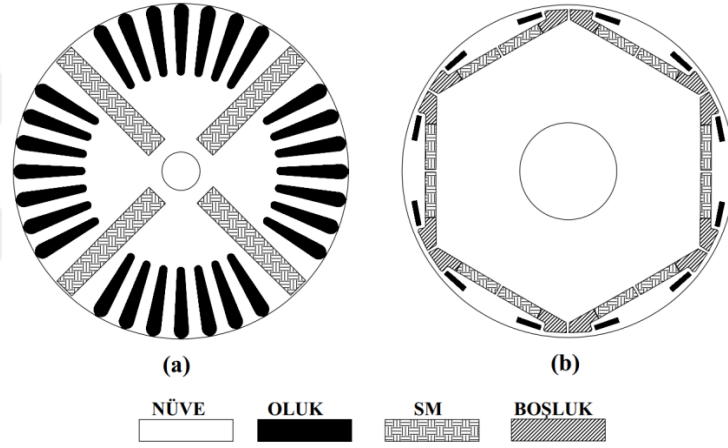
2012 yılında Štumberger ve ark. tarafından yapılan çalışmada yüksek torka gerek duyulan yarı-hermetik kompresörlerle çalışabilecek, ASM alternatifi ŞK-RASM tasarımları araştırılmıştır. Dört kutuplu 1, 2.5, 3.8, 5.5, 7.5 ve 20 HP'lik farklı güçteki motorların

performanslarının SEY analiz ile karşılaştırıldığı çalışmada sonuçlar deneysel çalışmalar ile de desteklenmiştir. İki farklı topolojide, gövdesinde derin ve geniş boşluklar içeren ŞK-RASM tasarımı kullanılarak karşılaştırmalı sonuçların elde edildiği çalışmada standart ASM'ye göre daha yüksek verim elde edilirken, motor veriminin büyük oranda gövdede yer alan boşluk derinliğine ve motor gövde boyutlarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Makine güç faktörünün ise büyük oranda ters MMK'ya ve şebeke geriliminin RMS değerine bağlı olduğu görülmüştür (Stumberger ve ark., 2012).

2012 yılında Kurihara tarafından yapılan çalışmada SM içeren motorların kalıcı ve geçici rejimdeki performansı SEY analizleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Gömülü neodyum SM'ye sahip bir ŞK-RASM'nin tasarlandığı, çalışmada sonuçlar SEY analizleri ve deneysel verilerle elde edilmiştir. Çalışma sonucunda yapılan tasarım ile beklenen kalkış performansı elde edilmiş ve sonuçlar deneysel çalışmalar ile büyük oranda doğrulanmıştır (Kurihara, 2012). Lu ve ark. tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak SM demagnetizasyonunun nedenleri ve sonuçları araştırılmıştır. Çalışmada motorun kalıcı ve geçici rejim karakteristiğinin anlaşılması amacı ile 2.8 kW gücündeki bir deney motorundan anlık konum bilgisi alınmıştır. Çalışmada d-q eksen teorisi kullanılarak motorun matematiksel modeli oluşturulup demagnetize ve sağlıklı çalışma durumları için motor davranışı incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan YSA destekli metot ile motor demagnetizasyon durumunu doğru olarak tahmin edilmiştir (Lu ve ark., 2012).

2013 yılında Kahourzade ve ark. tarafından ŞK-RASM'lerin kalkış performansının iyileştirilmesine yönelik tasarım ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada rotor direnci, motorun yumuşak kalkış yapmasını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Motorun geçici ve kararlı rejim performansının tahmin edilmesi amacı ile dinamik d-q eksen modeli ve SEY analiz ile desteklenen çalışmada doyumları, relüktansı ve boşta çalışma akımını azaltarak yüksek akı ihtiva eden ve akı bariyeri içermeyen yeni bir topoloji önerilmiştir (Şekil 2.20a). Elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile de desteklenmiş ve motorun maksimum kritik yükü tespit edilmiştir (Kahourzade ve ark., 2013). Aynı yıl içinde Shamlou ve Mirsalim tarafından yapılan çalışmada ise yeni bir gölge kutuplu ŞK-RASM tasarımı önerilmiş ve önerilen tasarımının analizi, optimizasyonu ve elde edilen verilerin deneylerle doğrulanması üzerine çalışılmıştır.

Optimizasyon sürecinde GA kullanılan çalışmada önerilen modelin avantaj ve dezavantajları tartışılmış olup, performans karakteristiği hesaplanmıştır. Analiz sürecinde özellikle motorun verimi, güç faktörü ve kalkış davranışına yoğunlaşmıştır. Çalışma sonucunda önerilen model ile literatürde çalışılan modele göre kayda değer performans ve termal karakteristik elde edilmiştir. Önerilen motorun ekstra üretim maliyetini 6 ayda amorti edeceğine kanna getirilmiştir. Ayrıca yürütülen maliyet odaklı optimizasyon çalışmaları ile önerilen motorun maliyeti %38 azaltılmıştır ((Shamlou ve Mirsalim, 2013). Aynı yıl Cao ve ark. tarafından yapılan çalışmada, gömülü SM kullanarak tasarlanmış yenilikçi bir ŞK-RASM rotoru topolojisi (Şekil 2.20b) önerilmiştir (Cao ve ark. 2013).

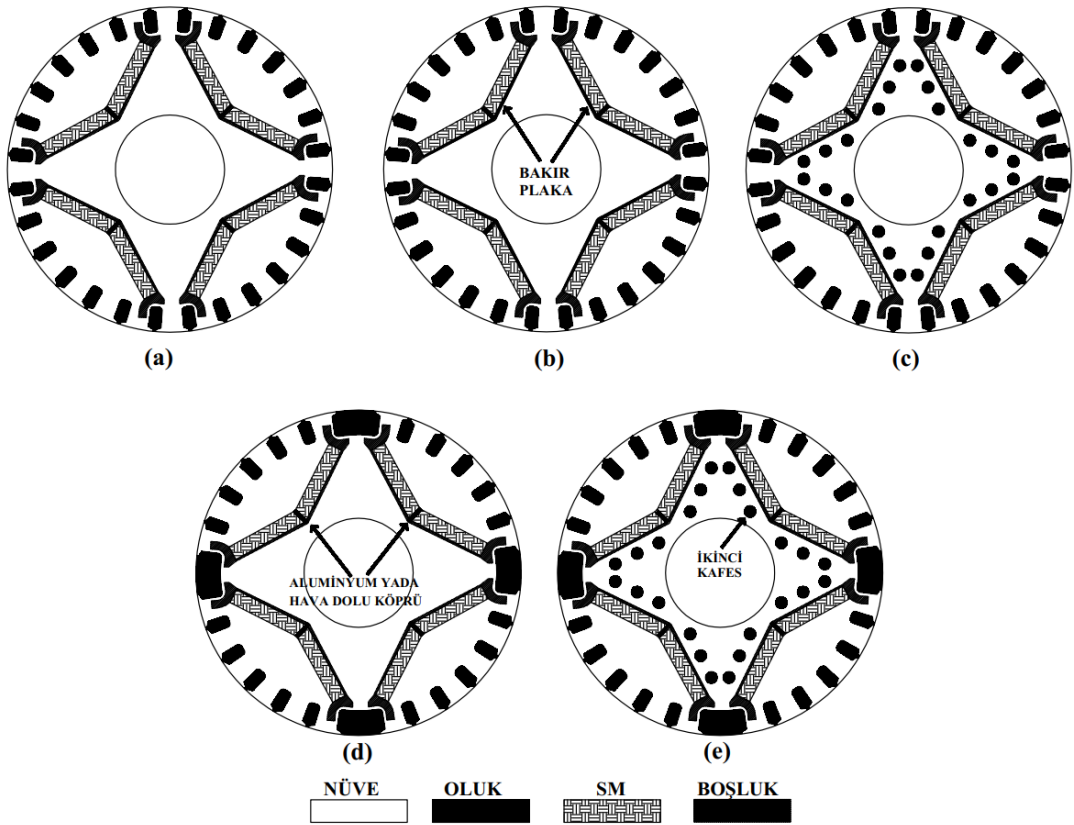


Şekil 2.20. 2013 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Kahourzade ve ark., 2013) (b) (Cao ve ark., 2013)

2013 yılında Shen ve ark. tarafından yapılan çalışmada demagnetize olmuş SM'lerin manyetik karakteristikleri SEY analiz yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca SM'lerin demagnetize olma riskini azaltan dört farklı tipte ŞK-RASM tasarımı önerilmiştir (Şekil 2.21). Kafes yapısı, akı bariyeri ve SM geometrisi açısından farklılık gösteren tasarımlarda nominal çalışma şartlarında SM'lerin demagnetizasyona karşı başarıyla korunduğu fakat motor performansında azalma olduğu gözlemlenmiştir (Shen ve ark., 2013).

2013 yılında Ferreira ve ark. tarafından yapılan çalışmada yıldız ve üçgen bağlantıdan türetilmiş birbirinden farklı altı sargı bağlantısının ŞK-RASM performansına etkisi, yük faktörü de göz önünde bulundurularak araştırılmıştır. Ayrıca çalışmada önerilen yöntem

ile motor verimi ve güç faktöründe kayda değer iyileştirme sağlanacağı belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar 3 kW'lık bir motor kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Çalışmada tüm testler motor doğrudan şebekeye bağlanarak yapılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde verim ve güç faktörünün yanı sıra ters EMK ve hat akımı da göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca ŞK-RASM'ler de yüksek verim ve güç faktörünün elde edilmesi için stator sargılarında ikiden fazla bağlantı modunun birlikte kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Konunun daha fazla güç aralığında farklı kutup sayıları da göz önünde bulundurularak daha detaylı incelenmesi gerektiği belirtilmiştir (Ferreira ve ark, 2013).



Şekil 2.21. (Shen ve ark., 2013) ile önerilen -V şeklinde konumlandırılmış gömülü SM içeren rotor topolojileri

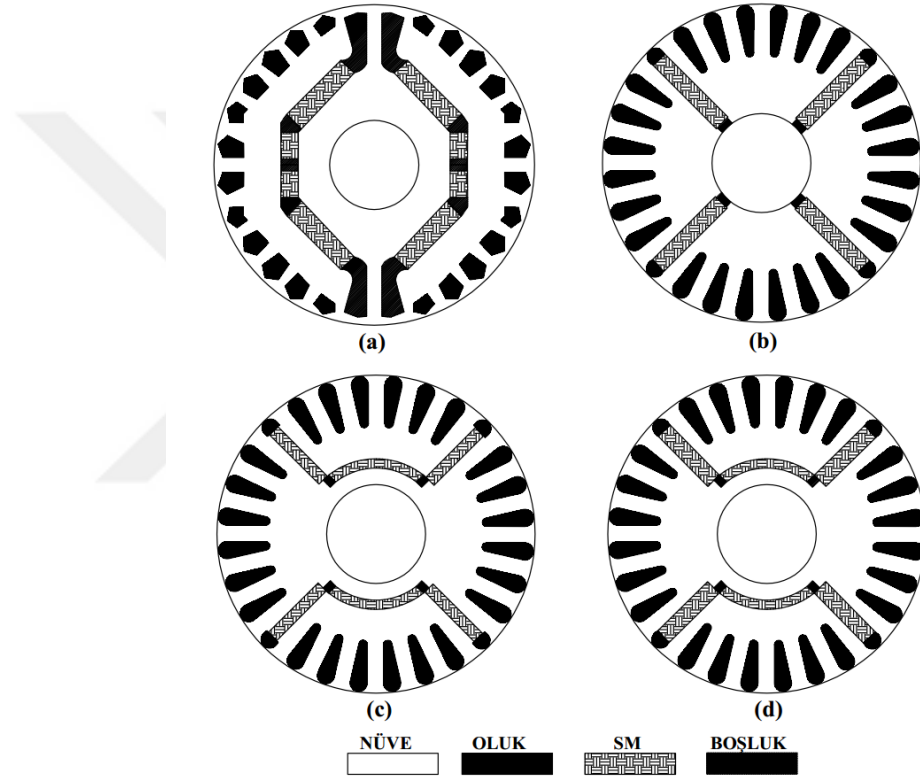
2013 yılında Lu ve ark. tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'lerde meydana gelen doyum ve demagnetizasyonlar, d-q eksen teorisi referans alınan yeni bir metot ile belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar ile metodun doğruluğu sınanmış olup motorun geçici ve kalıcı rejim karakteristiği, motor doğrudan şebekeye bağlanarak

analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda analitik sonuçlar ile deneysel sonuçların büyük oranda örtüştüğü görülmüştür (Lu ve ark., 2013a). Aynı yıl içinde Lu ve ark. tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise yüksek verimli ŞK-RASM'lerde kalkış performansının iyileştirilmesini amaçlayan yeni bir manyetik devre modeli geliştirilmiştir. SEY analizleri ile desteklenen çalışmada yaygın olarak tercih edilen dört farklı rotor topolojisi önerilen yöntem ile modellenmiştir. 0.55 kW gücünde modellenen tüm motorlarda tatmin edici kalkış ve kalıcı durum performansı elde edilmiştir (Lu ve ark., 2013b).

2014 yılında Topaloglu ve ark. tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'ler verim ve güç faktörü açısından, kullanılan malzeme miktarı ve maliyet de gözetilerek tartışılmıştır. Çalışmada üç farklı rotor topolojide motor modellenerek analiz edilmiştir. Samaryum kobalt ve neodyum SM kullanılarak modellenen motorlar kalkış performansı açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada neodyum SM kullanılan tasarım ile daha yüksek performans elde edilirken aynı SM malzemesi kullanılarak tasarlanan farklı rotor topolojilerinin benzer kalkış karakteristiğine sahip olduğu görülmüştür (Topaloglu ve ark., 2014).

2014 yılında McElveen ve ark. tarafından yapılan çalışmada SEY analizleri kullanılarak ŞK-RASM'lerin performans karakteristikleri incelenmiş olup bu motorların mevcut potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışmada iki farklı topolojide motor tasarımı mevcut muadil ASM'ler ile karşılaştırılmıştır (McElveen ve ark, 2014a). Aynı yıl McElveen ve Budzynski tarafından alınan patent ile yeni bir rotor topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.22a). Asimetrik kafes yapısı ve farklı uzunlukta gömülü SM kullanılarak modellenen topolojide, SM'ler, rotor nüvesi boyunca uzanan akı bariyerleri içine, arada boşluklar kalacak şekilde konumlandırılmıştır (McElveen ve Budzynski, 2014). Aynı yıl içinde Ugale ve ark. tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'lerin geliştirilmesine yönelik çalışılıp farklı topolojide tasarımlar performans açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçların SEY analiz ile elde edildiği çalışmada hedeflenen motor performansının elde edilmesi için spesifik bir SM miktarı gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Çalışma ile üç farklı tipte motor prototipi tasarlanmış olup (Şekil 2.22b, 2.22c ve 2.22d), topolojilerden iki tanesi üretilerek çalışma deneysel verilerinde desteklenmiştir. Çalışma sonucunda aynı gövdedeki ASM'ye göre kayda değer performans sağlanmıştır (Ugale ve ark., 2014).

2014 yılında Hombitzer ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise aynı topolojide ŞK-RASM'ler, farklı akı bariyeri tasarımları kullanılarak motor ortalama torkunda, veriminde, tork dalgalanmalarında ve harmonik bozukluklarda iyileştirme sağlanmaya çalışılmıştır. Yuvarlak akı bariyerlerinin -V şekilli SM sonlarına yerleştirildiği çalışmada tüm tasarımlar mekanik dayanıklılık açısından da incelenmiştir. SEY analiz ile desteklenen çalışmada yüksek hız ve tork rejimlerinde ısınmadan çalışabilen bir tasarım geliştirilmiştir (Hombitzer ve ark., 2014).



Şekil 2.22. 2014 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (McElveen ve Budzynski, 2014) (b, c ve d) (Ugale ve ark., 2014).

2014 yılında Tang ve Mang tarafından yapılan çalışmada, motor kalkışında kısa devre çubukları tarafından üretilen akının SM'ler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Motor kalkış sürecinin detaylı araştırılmadığı vurgulanan çalışmada, SM'lerin kısa devre kafesi kaynaklı kalkışta etkin olan akıya dayanıklı olması gerektiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında motor kalkış süreci baz alınarak SM'lerin çalışma noktasının belirlenmesi amacı ile MATLAB SIMULINK ortamında çalışan hızlı analitik bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin dinamik matematik modeli ve manyetik devre göz

önünde bulundurularak hesaplama yaptığı belirtilen çalışmada elde edilen sonuçlar SEY analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kullanılan yöntem ile SM çalışma noktasının doğru tahmin edildiği ve bu metodun motor tasarım sürecini hızlandıracağına kanaat getirilmiştir (Tang ve Wang, 2014a). Yıl içinde yazarlar tarafından yapılan diğer bir çalışmada, ani faz değişimi ile motorun ters yönde dönmeye zorlanması durumunda meydana gelen olumsuz etkiler araştırılmıştır. Çalışma ile söz konusu durumda stator sargıları ve kısa devre çubuklarında, SM'lerde giderici etki oluşturacak kadar aşırı akım indükleneyeceği vurgulanmıştır. Bu kapsamda 2D SEY analiz yazımı kullanılarak giderici etkilere karşı SM minimum çalışma noktası belirlenmeye çalışılmıştır. Ani faz değişiminin 10ms'de yapıldığı çalışmada, motor ters yönde tekrar senkron hıza ulaşana kadar hızlandırılmıştır. Çalışma ile motorun tersine dönüş süresi ve atalet momentinin etkileri detaylı incelenmiştir. (Tang ve Wang, 2014b). Aynı yıl içinde Lu ve ark. tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise güç faktörü ve atalet momenti gibi parametreler göz önünde bulundurularak SM'de meydana gelen kalıcı demagnetizasyon durumları incelenmiştir. SEY analizleri ile desteklenen çalışmada elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır (Lu ve ark, 2014).

- Daha yüksek yük ve atalet moment oranlarının kullanılması, özellikle motor kalkışında SM'lerde meydana gelen kalıcı deformasyon oranı artmaktadır.
- Aşırı yük kullanılması durumunda motor senkron hızdan düşmekte bu da SM'ler üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır.
- Sargılarda kısa devre meydana gelmesi durumunda motor durmaktadır. Bu süreçte motor devri düşerken kısa devre olan sargılarda meydana gelen manyetik alan SM'lerin demagnetizasyon riskini arttırmaktadır. Bu etki düşük yük torku ya da yüksek atalet momentine sahip motorlarda daha fazla gözlemlenmektedir.
- Akım ve tork dalgalanmaları SM'lerin demagnetizasyon riskini arttırmaktadır.

2014 yılında Els ve ark. tarafından yapılan çalışmada farklı ŞK-RASM topolojileri fan yükü altında analiz edilerek karşılaştırılmıştır. 2D SEY analizleri ile desteklenen çalışmada bu motorların doğrudan fan yüküne bağlanarak çalışabileceğine kanaat getirilmiştir (Els ve ark, 2014).

2014 yılında Debruyne ve ark. tarafından yapılan çalışmada motor sıcaklığının SM akısı başta olmak üzere, akım, tork ve verim gibi birçok parametreyi etkilediği vurgulanarak 4 kW gücündeki halihazırda piyasa sunulan bir ŞK-RASM termal açıdan değerlendirilmiştir. Çalışmada rotor, stator ve SM sıcaklığının analitik olarak elde edilmesi amacı ile ASM termal modelinden yola çıkılarak geliştirilen yeni bir Lumped termal modeli kullanılmıştır. Çalışma, SEY analizi ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Motorda meydana gelen ısınma kaynaklı kayıpların stator akımı ve SM etkisinin bir fonksiyonu olduğu belirtilen çalışmada motor sıcaklığının etkileri farklı mil gücünde motorlar için yük miktarı göz önünde bulundurularak araştırılmıştır (Debruyne ve ark., 2014a). Aynı yıl Debruyne ve ark. tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise harmoniklerin rotor üzerindeki etkileri incelenerek ŞK-RASM'lerin şebeke bozukluklarına karşı duyarlılığı araştırılmıştır. ASM harmonik hesaplanmasında kullanılan yöntemlerin, ŞK-RASM'lerde doğru sonuç vermeyeceğine kanaat getirilen çalışmada farklı harmonik bileşenlerinin motor performansına etki ettiği görülmüştür. SEY analizleri kullanılarak yapılan çalışmada, ŞK-RASM'lerde meydana gelen harmonik kayıplarının ASM'lerde olduğu gibi büyük oranda rotor üzerinde meydana geldiği sonucu çıkarılmıştır. Elde edilen veriler deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır (Debruyne ve ark., 2014b).

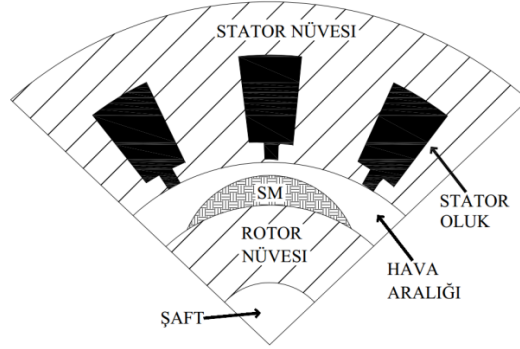
2015 yılında Knypiński ve ark. tarafından yapılan çalışmada, ŞK-RASM tasarımında kullanılan yeni bir metot ve yazılımın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Analitik motor modeli ve optimizasyon algoritması olmak üzere iki katmanlı bir Delphi yazılımının önerildiği çalışmada optimizasyon sürecinde parçacık sürü algoritması (PSO) kullanılmıştır. SEY analizleri ile de desteklenen çalışma kapsamında yapılan optimizasyonlarda en yüksek verim ve güç faktörünün elde edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda PSO optimizasyon çalışmaları ile ŞK-RASM rotor topolojisinin başarı ile iyileştirildiği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca ŞK-RASM'lerin, aynı yöntem ile kalkış performansının artırılması ve kullanılan SM miktarının azaltılması yönünden optimize edilebileceğine kanaat getirilmiştir (Knypiński ve ark., 2015).

2015 yılında Huth ve Fischer tarafından yapılan çalışmada yüzey yerleştirmeli SM'ye sahip yeni bir ŞK-RASM rotor topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.23a). Düzenli dizilmiş kısa devre çubukları ve rotor yüzeyine yerleştirilen çıkıntılı SM'lere sahip bir tasarımın

üzerine yoğunlaşmıştır. Motor tasarım ve analiz çalışmalarında motor kafes yapısını da göz önünde bulunduran bir d-q eksen teorisi kullanılmış olup, elde edilen sonuçlar deneysel olarak da desteklenmiştir. Çalışmada rotor akımının SM manyetizasyonuna etkileri incelenerek kalkış akımı düşürülmüş bir tasarım yapılmıştır. Optimize edilen tasarım ile performans hedeflerine ulaşılan çalışmada deneysel veriler ile SEY analiz sonuçlarının birbiri ile örtüştüğü görülmüştür (Saha ve Cho, 2015).

2015 yılında Kül ve ark. tarafından yapılan çalışmada yaygın bir topolojiye sahip düşük güçlü ŞK-RASM SEY analiz yazılımı ortamında modellenerek performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma ile bu tip motorlar verimlilik ve tork açısından endüstriyel bakış açısı ile tartışılmıştır. Çalışma kapsamında fan tipi yükte çalışan 1.1kW'lık bir motordaki SM miktarının motor kalkışına etkisi tartışılmıştır. SM miktarının motor kalkışına doğrudan etki ettiğine kanaat getirilen çalışmada motor senkron çalışma karakteristiği de incelenmiştir (Kül ve ark, 2015).

2014 yılında Chikouche ve ark. tarafından yapılan çalışmada yüzey yerleştirmeli SM kullanılarak tasarlanan RASM'de, SM şekli optimize edilerek vuru torku azaltılmaya çalışılmıştır. Çalışma ile yeni bir SM tasarımı önerilmiştir (Şekil 2.24) Tasarım sürecinde 3 farklı motor değerlendirilerek SM tasarımı nihai halini almıştır. Akı dağılımının analitik olarak hesaplandığı çalışmada, yarı açık stator oluk yapısı, SM geometrisi ve düzensiz fiziksel hava aralığı genişliği göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca SM demagnetizasyonu, oluk sayısının kutup ve faz sayısına oranı gibi tasarım özelliklerinin vuru torku üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Elde edilen analitik sonuçlar SEY analizleri ile doğrulanmıştır. Çeşitli SM geometrileri incelenen çalışmada oval SM yapısına sahip bir tasarım ve yüksek oluk/kutup oranı ile vuru torkunda kayda değer azalma elde edilmiştir (Chikouche ve ark, 2015).



Şekil 2.24. (Chikouche ve ark., 2015) ile önerilen rotor topolojisi

Takahashi ve ark. tarafından yapılan çalışmada rotor akımı ve SM'lere bağlı olarak ŞK-RASM'nin asenkron tork karakteristiğini hesaplayan analitik bir yaklaşım önerilmiştir. Teorik yöntemlerin yanı sıra analizlerle de desteklenen çalışmada, doyumlar kaynaklı tork salınımlarının meydana geldiği kayma değerinin geleneksel yöntemler ile belirlenemeyeceğine kanaat getirilmiştir. Ayrıca SM torku ile kafes torku arasındaki etkileşimin mil torkundaki osilasyonu arttırdığı görülmüştür. Çalışmada elde edilen veriler deneysel olarak da doğrulanmıştır (Takahashi ve ark., 2015).

2015 yılında Behbahanifard ve Sadoughi tarafından yapılan çalışmada, ŞK-RASM'ler ile ilgili detaylı bir literatür derlemesi yapılmıştır. Bu kapsamda konu ile ilgili yapılan çalışmalar, önerilen topolojiler, kalkış ve senkron performansları, vuru torku, SM manyetizasyonu ve harmonikler açısından detaylı olarak irdelenerek elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. ŞK-RASM'lerin ASM'ye gerçek bir rakip olduğu belirtilen çalışma ile bu motorların tasarımında öncelikli başarı kriterinin motor kalkış performansı olduğu ve bu anlamda birçok tasarım metodunun önerildiği üzerinde durulmuştur. Buna ek olarak motorun senkron çalışmadaki tork karakteristiği, güç faktörü ve veriminde önem arz ettiği vurgulanmıştır (Behbahanifard ve Sadoughi, 2015).

2016 yılında Fu ve Chen tarafından yapılan çalışmada yüzey yerleştirmeli SM ve bakır kısa devre çubukları kullanılan yeni bir rotor tasarımı önerilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen tasarımda dört farklı ŞK-RASM rotoru, kafes yapısında değişiklikler yapılarak birbiri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.25). SM çevresine kısa devre çubuklarının konumlandırılması ile elde edilen yeni tasarımlarda, SM manyetizasyonunun montaj sonrasında bakır kısa devre çubukları kullanılarak yapılabilmesi amaçlanmıştır. SM

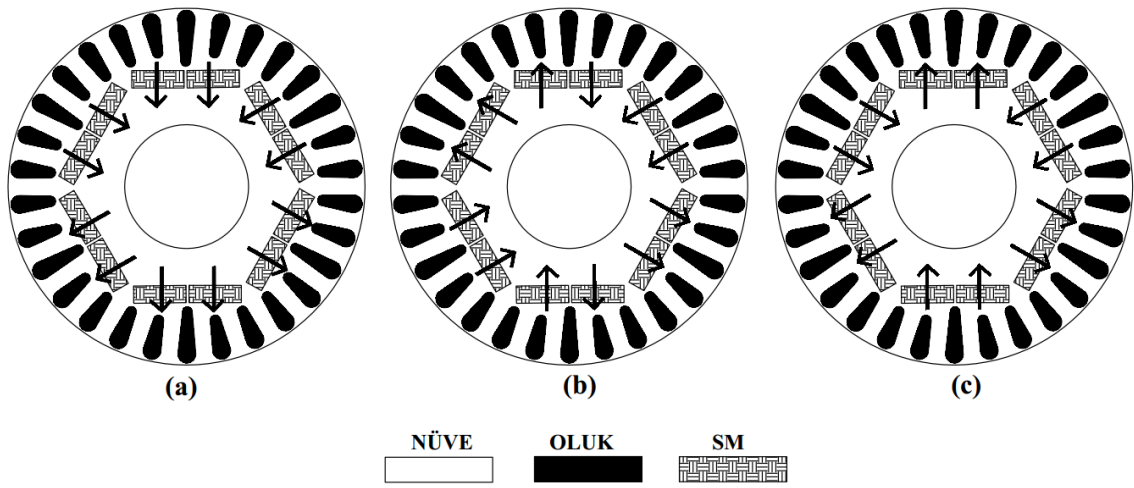
Aynı yıl içinde Lee ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise dalgıç pompalar ile çalışacak 11 kW gücünde bir ŞK-RASM tasarımı yapılmıştır. SEY analizi ile desteklenen çalışmada elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile de doğrulanmıştır (Lee ve ark., 2016a).

2016 yılında Lee ve ark. tarafından yapılan çalışmada tek fazlı bir ŞK-RASM'nin tasarımı yapılarak geçici ve kalıcı rejimdeki çalışma karakteristiği optimize edilmiştir. Motor çalışma karakteristiğinin SEY analizleri kullanılarak elde edildiği çalışmada referans bir motor modeli ile optimize edilmiş model performans açısından karşılaştırılmıştır. Motor kalkış performansının yanı sıra yüksüz çalışmada meydana gelen ters EMK, vuruğu torku, kalıcı rejimdeki motor verimi ve tork dalgalanmaları da incelenmiştir. Çalışma ile yapılan optimizasyon çalışmalarında kısa devre kafesi, akı bariyerleri, SM tasarımı, sargı tasarımı gibi detaylarda iyileştirme yapılarak tatmin edici düzeyde geçici ve kalıcı rejim performansı elde edilmiştir. Ayrıca optimize edilmiş tasarımda da kalıcı rejiminde SM demagnetizasyonu meydana gelmediği analizler ile doğrulanmıştır (Lee ve ark., 2016b).

2016 yılında Mingardi ve ark. tarafından yapılan çalışmada endüstriyel uygulamalarda giderek yaygınlaşan ŞK-RASM'lerin yüksek verim ve güç faktörü sunmalarına karşın geniş güç aralığında piyasaya sunulamamaları, üretim maliyetlerinin yüksek oluşu, tasarım ve üretimlerinin zorluğu konularının altı çizilmiştir. Bu tema ile aynı topolojide ŞK-RASM rotor tasarımları, laminasyon tasarımında değişiklik yapılmadan SM yönleri değiştirilerek 2, 4 ve 6 kutuplu olarak çalıştırılmıştır (Şekil 2.26). SEY analiz ile desteklenen çalışmada, bu tip tasarımlar ile de kayda değer performans elde edilebileceğine kanaat getirilmiştir. Önerilen bu yöntem ile aynı kalıp kullanılarak üretilen motor aksamalarının farklı motorlarda kullanılabileceği ve böylelikle üretim maliyetlerinin azaltılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca üretilen parçaların beraber depolanabileceği konusuna da değinilmiştir. Çalışma sonucunda analizleri yapılan 2 ve 4 kutuplu motorlar üretilerek çalışma ile elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır (Mingardi, Bianchi ve Dai Pre, 2016).

2016 yılında Tang ve ark. tarafından yapılan çalışmada senkron rejimde çalışan ŞK-RASM'lerin yük miktarının ani değişimi ile senkron hızdan düşmesi ya da aşırı hızlanması durumunda oluşan demagnetizasyon etkileri incelenmiştir. SM çalışma

noktalarının, SM konumuna göre değişiklik gösterdiği belirtilen çalışmada, motor demagnetizasyon karakterliğinin belirlenmesi amacı ile 2D SEY analizleri kullanılmış olup motorun sabit yük torku, zamanla değişen yük torku ve yük torkunun çalışma anında ani değişimi durumları incelenmiştir. Çalışma ile yük torkunda meydana gelen ani değişimlerin SM demagnetizasyonunda doğrudan etkili olduğu gözlemlenirken, demagnetizasyona daha az etki eden sabit yük torkunun zamana göre değişken olarak uygulanması ile bu etkinin de önüne geçilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca motorun aşırı hızlanması ya da senkron hızdan düşmesi durumlarında meydana gelen demagnetizasyonların benzer etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir (Tang ve ark., 2016).



Şekil 2.26. Topolojide değişiklik yapılmadan 2, 4 ve 6 kutuplu olarak çalıştırılan rotor topolojisi, (a) 2 kutuplu , (b) 4 kutuplu ve (c) 6 kutuplu

Behbahanifard ve Sadoughi tarafından yapılan çalışmada “SM kaydırma” olarak isimlendirilen ve yüzey yerleştirmeli SM’lerin rotor üzerinde aktif konum değiştirmesine dayanan bir metot önerilmiştir. Önerilen metot ile torkta meydana gelen dalgalanmaların azaltılması amaçlanmıştır. Önerilen metodun özellikle düşük dereceli harmonikleri azaltılmasında başarılı olduğu belirtilen çalışmada ön hazırlık olarak öncelikle motor tarafından üretilen tork dalgalanmaları Fourier analizi kullanılarak ayrıştırılmıştır. Daha sonra tasarımda, SM kaydırma metodu kullanılarak tork dalgalanmaları azaltılmaya çalışılmıştır. Motor performansının SEY analiz yazılımı kullanılarak elde edildiği çalışmada önerilen metot kullanılarak tasarlanan SM yapısının hava aralığındaki kutup MMK’sı dağılımına etkileri incelenmiştir. Ayrıca ters MMK, nüve kayıpları ve tork profilinde meydana gelen bozukluklar tartışılmıştır. Çalışma da önerilen tasarım metodu

ile motor tutma torku ve vuruñtu torkunun basari ile azaltıldığı doğrulanmıştır. Çalışma kapsamında üretimi yapılan iki farklı prototip kullanılarak SEY analiz sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Ayrıca nerilen tasarım metodunun nüve kayıplarını çok az arttırdığı fakat motor genel veriminde kayda değer değişiklik meydana gelmediği gözlemlenmiştir (Behbahanifard ve Sadoughi, 2016).

2017 yılında Cao ve ark. tarafından yapılan çalışmada fuko kayıplarının belirlenmesi amacı ile 315 kW gücünde bir şK-RASM prototipi, rotor nüvesi üzerindeki ısı dağılımı göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Çalışmada ncelikle 2D SEY analiz yazılımları kullanılarak motor kayıplarının alan bazında dağılımı incelenmiştir. Daha sonra motorun akışkan ve termal analizleri birlikte yapılarak makine sıcaklığının alan bazında dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada stator nüve ve sargılarının yanı sıra motor gövdesi ve motora etki eden aktif soğutma sistemi de göz önünde bulundurulmuştur. Hesaplanan motor performansı analizler ile doğrulanmıştır (Cao ve ark., 2017). Aynı yıl içinde Xiaochen ve ark tarafından yapılan çalışmada (Xiaochen ve ark, 2008) ile önerilen topolojinin (bkz. şekil 2.16a) tasarım özelliklerinde değişiklik yapılarak yeni bir rotor yapısı önerilmiştir. Önerilen yapıda rotor nüve sıcaklığının düşürülmesi amacı ile hava aralığından motor miline doğru, nüvenin yarısına kadar uzanan soğutma açıklıklarına yer verilmiştir. Analitik hesaplamalarla soğutma açıklarına sahip tasarımın rotor nüve sıcaklığını düşürdüğü doğrulanmıştır. Ayrıca yapılan simülasyon çalışmaları ile verimliliği yüksek, sağlam ve yapısal olarak güvenilir bir tasarım elde edildiğine kanaat getirilmiştir (Cao ve ark., 2017).

2017 yılında Sorgdrager ve ark. tarafından yapılan çalışmada Taguchi metodu kullanılarak bir şK-RASM'nin tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sürecinde motor kararlı ve geçici rejim performansı göz önünde bulundurulan çalışmada nihai bir motor tasarımı elde edilerek üretimi yapılmıştır. Çalışma ile önerilen metodun, şK-RASM çok yönlü optimizasyon problemlerinin üzümünde kullanılabileceğine kanaat getirilmiştir (Sorgdrager ve ark, 2017).

2017 yılında Knypiński ve ark tarafından yapılan çalışmada kısa devre kafesi yapısal özelliklerinin optimal řK-RASM tasarıma etkisi farklı oluk yapıları gzeterек araştırılmıştır. Motorun matematiksel modellemesinde elektromanyetik alan, elektriksel

devre ve mekanik yapı göz önünde bulundurulmuş çalışmada PSO ve SEY tabanlı sayısal hesaplama yöntemleri kullanılmıştır. Yuvarlak ve derin yuvarlak oluk tipininin göz önünde bulundurulduğu çalışmada yuvarlak oluk tipinde daha yüksek performans elde edilmiştir. Optimizasyon amacı ile kullanılan revize edilmiş PSO yönteminin ŞK-RASM optimizasyonunda başarılı olduğuna kanaat getirilmiştir (Knypiński ve ark., 2017).

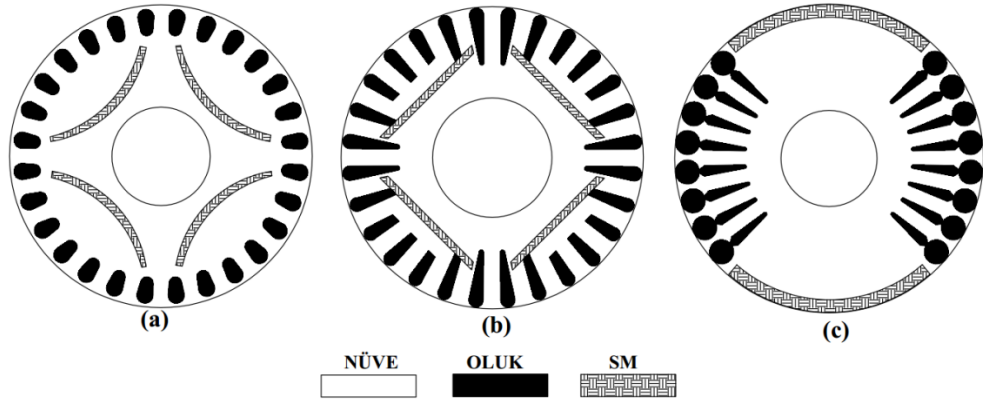
2017 yılında Azari ve ark. tarafından yapılan çalışmada, rotor oluşu derinlik ve genişliğinin ŞK-RASM kalkış performansına etkisi araştırılmıştır. Araştırmada kalkış ve senkronlanma torkunun motor senkronlanma kapasitesine etkileri de göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi amacı ile YSA ve yayılımcı rekabetçi optimizasyon (YRO) yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan sezgisel algoritmalarla elde edilen sonuçlar SEY analizleri ile doğrulanmıştır. Ayrıca 1500 d/d, dört kutuplu, 1050W gücünde bir motorun prototipi üretilerek, elde edilen sonuçlar deneysel olarak da desteklenmiştir (Azari ve ark., 2017).

2017 yılında Lyskawinski ve ark. tarafından yapılan çalışmada ay parçası şeklinde gömülü SM içeren yeni bir ŞK-RASM rotor tasarımı önerilmiştir (Şekil 2.27a). Önerilen tasarımda nüve malzemesi olarak Somaloy 500 manyetik çelik kullanılmıştır. SEY analiz yazılımı ile desteklenen çalışmada oluk ve SM şekilleri sezgisel algoritmalar kullanılarak analiz edilmiştir. Özellikle kararlı rejimin iyileştirilmesi amacı ile SM geometrisi üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışma sonucunda sinterlenmiş neodyum SM ve standart manyetik çelik kullanılan ŞK-RASM'ler ile karşılaştırılabilir bir tasarım elde edilmiştir. Elde edilen motorun özellikle maden endüstrisinde kullanılan yoğun çalışma temposuna sahip fan, pompa ve kompresörlerle çalışabileceği belirtilmiştir (Lyskawinski ve ark., 2017).

2017 yılında Esmail ve Sadegh tarafından yapılan çalışmada, ŞK-RASM tasarım sürecine yönelik motor anma gücünden bağımsız bazı tasarım ilkeleri önerilmiştir. Çalışmada temel motor tasarım parametrelerinin kalıcı ve geçici rejim karakteristiği başta olmak üzere SM frenleme torku, senkronlanma torku, verim ve güç faktörü gibi motor karakteristik özelliklerine etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca ters MMK, reaktanslar ve kutup çıkıntısı oranı da göz önünde bulundurularak, tasarım parametrelerinin birbiri ile çelişen motor karakteristik davranışına etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Önerilen motor tasarım ilkeleri ile motor performansından ödün vermeden optimal tasarım

parametrelerinin belirlenmesini amaçlamıştır. SEY analizleri ile de desteklenen çalışmada önerilen ilkeler kullanılarak bir motor tasarlanıp (Şekil 2.27b) üretimi yapılmıştır. SEY analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür. Böylelikle önerilen tasarım ilkelerinin geçerliliği doğrulanmıştır. Önerilen tasarım ilkeleri ile SM frenleneme torku, atalet momenti, -d eksen akımı ve güç faktörü arasındaki ilişki açıklanmaya çalışılmıştır. İlkeler kullanılarak tasarımı yapılan motor ile IE4'e yakın performans elde edilmiştir (Sarani ve Vaez-Zadeh, 2017).

2017 yılında Ugale ve Chaudhari tarafından yapılan çalışmada, 2014 yılında yazar ve ark. tarafından önerilen topoloji (bkz. Şekil 2.22c) geliştirilerek tekrar önerilmiş olup çalışma kapsamında önerilen topolojiden yola çıkarak yeni bir ŞK-RASM rotor tasarımı daha önerilmiştir (Şekil 2.27c). Önerilen tasarımda yüzey yerleştirmeli SM içeren çift kafesli yapı ile önceki yıllarda önerilen modellere göre daha yüksek kalkış torku elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacı ile radyal SM kullanılarak bir motor daha modellenmiştir. SEY analiz kullanılan çalışmada önerilen tasarımların prototip üretimi yapılarak, elde edilen sonuçlar deneysel olarak doğrulanmıştır. Çalışmada önerilen topolojilerin, invertör beslemeli FDAM ve SMSM tasarımları için de uygun olduğuna kanaat getirilmiştir (Ugale ve Chaudhari, 2017).



Şekil 2.27. 2017 yılında önerilen başlıca rotor topolojileri, (a) (Lyskawinski ve ark, 2017), (b) (Sarani ve Vaez-Zadeh, 2017), (c) (Ugale ve Chaudhari, 2017)

2017 yılında Mingardi ve Bianchi tarafından yapılan çalışmada motor relüktans torkunun artırılmasına yönelik yeni bir ŞK-RASM tasarım metodu önerilmiştir. Senkron torkun artırılması amacı ile skolastik bir optimizasyon algoritması kullanılan çalışmada çeşitli tasarım özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı hacimde SM tasarımı aynı

rotor topolojisinde kullanılarak, motor performansına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca çalışma sonucunda elde edilen veriler muadil bir ASM'den alınan veriler ile de karşılaştırılmıştır. SEY analizleri ile desteklenen çalışma sonucunda senkron çalışma performansı muadil ASM'ye göre oldukça yüksek bir tasarım elde edilirken, SM hacminin azaltılması ile kalkış torku performansının da arttığı gözlemlenmiştir. Optimizasyon çalışmaları ile elde edilen tasarımının prototip üretimi yapılarak elde edilen verilerin doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca bu tip motorların endüstriyel açıdan yüksek güç segmentinde iyi bir çözüm olacağına kanaat getirilmiştir (Mingardi ve Bianchi, 2017).

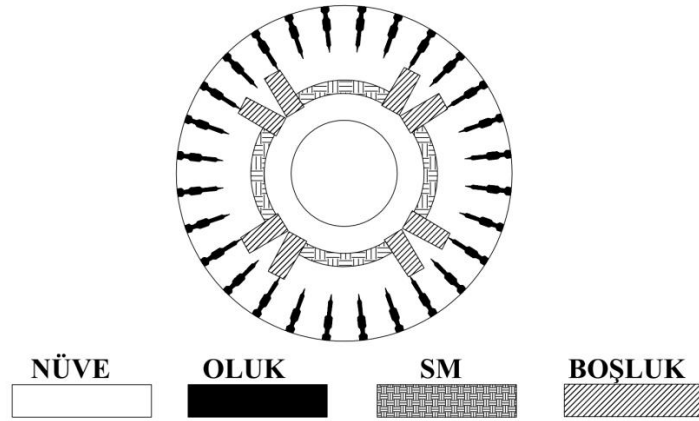
2017 yılında Ustun ve ark. tarafından yapılan çalışmada gömülü tip SM içeren üç farklı topolojide ŞK-RASM Süper Premium verimlilik sınıfı (IE4) gereksinimleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Çalışmada incelenen topolojiler kafes tasarımlarının yanı sıra kalkış ve senkron çalışma karakteristiği açısından da irdelenmiştir. Bu kapsamda incelenen topolojide motorların elektromanyetik tasarımı yapılarak, tasarımların optimizasyonuna yönelik de çalışılmıştır. Ayrıca elde edilen nihai motor tasarımları üretilerek test edilmiştir. En kabul edilir tasarımın seçilmesinde üretim kolaylığı ve maliyeti göz önünde bulundurulmuştur (Ustun ve ark., 2017).

2017 yılında Knypinski tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM'lerin optimizasyonuna yönelik bir algoritma ve bilgisayar yazılımı önerilmiş olup önerilen bilgisayar yazılımının matematik model ve optimizasyon çözücü olmak üzere iki bağımsız alt modül içerdiği belirtilmiştir. Çalışmaya konu olan motorun matematik modeli SEY analiz yazılımı ile detaylı incelenirken, optimizasyonu için Borland Delphi ortamında geliştirilen yarasa algoritmasından yararlanılmıştır. Ayrıca optimizasyon çalışması ile elde edilen önemli sonuçlar tartışılmıştır. Önerilen algoritma ile yapılan çözümün oldukça başarılı olduğu ve doğrusal olmayan karmaşık tasarım problemlerinin çözümünde kullanılabileceğine kanaat getirilmiştir (Knypinski, 2017).

2017 yılında McElveen ve ark. değişken hızlı ŞK-RASM'ler ile ilgili çalışmaların çok fazla yapılmadığını vurgulayıp, 2014 yılında yazar tarafından önerilen rotor topolojisi (bkz. Şekil 2.22a) farklı hız ve güç aralıkları için analiz edilmiştir. Motor veriminin yanı sıra yıllık işletme maliyetinden edilen tasarrufun da göz önünde bulundurulduğu çalışmada elde edilen veriler aynı güçteki geleneksel ASM'ler ile de karşılaştırılmıştır.

Çalışma, 50hp 1800 d/d bir motordan alınan deneysel veriler ile de desteklenmiştir (McElveen ve ark, 2017).

2017 yılında Bala ve ark. tarafından yapılan çalışmada yüksek relüktansa sahip akı bariyerleri içeren yeni bir ŞK-RASM topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.28). Söz konusu motorlarda birincil tasarım gereksiniminin kalkış performansı olduğu belirtilen çalışmada motor performans karakteristiğinin belirlenmesi amacı ile SEY analiz yazılımı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında önerilen motor tasarımı akı bariyeri olmadan da analiz edilerek akı bariyerlerinin motor performansına katkısı detaylı incelenmiştir. Frekans ve zaman uzayında yapılan elektromanyetik analizler sonucu nihai bir tasarım elde edilerek, tasarımın prototip üretimi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile simülasyon sonuçları doğrulanmıştır (Bala ve Chowdhury, 2017).



Şekil 2.28. (Bala, ve Chowdhury, 2017) ile önerilen yüksek relüktansa sahip rotor topolojisi

2018 yılında Sorgdrager ve ark. tarafından yapılan çalışmada Taguchi metodu kullanılarak bir ŞK-RASM'nin tasarımı yapılmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında Taguchi metodunun yapısından kaynaklanan kısıtlamaların giderilmesi amacı ile önerilen metot çok yönlü optimizasyon yöntemleri kullanılarak revize edilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen metodun geçerliliğinin doğrulanması amacı ile tasarlanan motorun prototip üretimi yapılmıştır. Sonuç olarak önerilen metodun senkron ve asenkron performansı yüksek ŞK-RASM tasarımında kullanılabileceği kanısına varılmıştır (Sorgdrager ve ark, 2018). Aynı yıl içinde Wymeersch ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise d-q eksen teorine göre simülasyon yapan bir yöntem ile tasarım parametrelerinin kalkış performansına etkileri incelenmiştir. Makine öğrenmesini temel

alan yöntemin kullanıldığı çalışmada, rotor direnci ve akı bariyeri tasarımı gibi parametrelerin motor senkronlanma performansına etkileri tartışılmıştır. Sonuç olarak besleme geriliminin ya da rotor direncindeki küçük bir değişikliğin bile motor kalkış, senkronlanma ve senkron çalışma kapasitesinde etkili olduğu görülmüştür. Arttırılan besleme geriliminin genel olarak motor performansını olumlu etkilediği gözlemlenen çalışmada ters EMK'nın yüksek olması durumunda senkronlanma performansının da yüksek olduğu fakat bu durumun düşük hızlarda motor performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. Çalışma sonucunda bir prototip üretimi yapılarak elde edilen veriler doğrulanmıştır (Wymeersch ve ark., 2018a). Gedik tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada ise 100 gövde yapısında 3 fazlı 4 kutuplu IE3 verimlilik sınıfında bir ASM'nin rotoru, yaygın olarak tercih edilen bir ŞK-RASM topolojisinde yeniden modellenerek motor verimi IE4'e yükseltilmiştir. 2D SEY analiz ile desteklenen çalışmada motor tasarım süreci detaylı olarak irdelenmiş olup SM kalınlığı motor çalışma karakteristiğine etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, deneysel çalışmalarla da desteklenmiştir (Gedik, 2018).

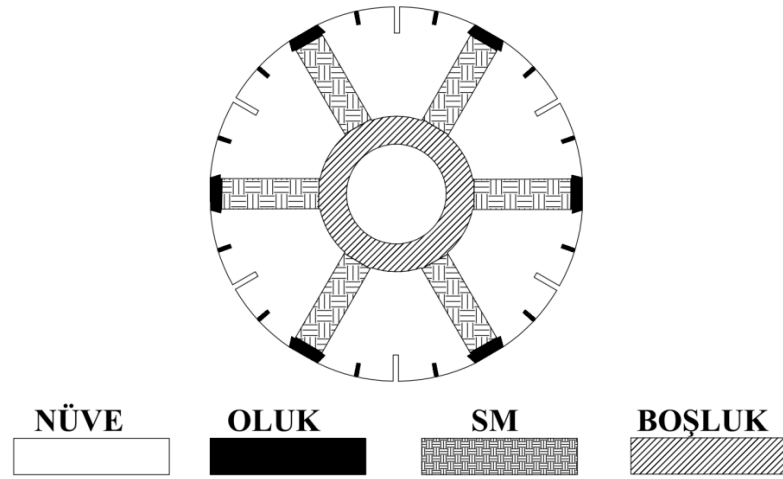
2018 yılında Bensaida ve ark. tarafından yapılan çalışmada tek fazlı ŞK-RASM'lerin kalkış performansının arttırılmasına yönelik çalışılmıştır. Rotor yüzeyde bırakılan çevresel boşluklar neticesinde değişken hava aralığı ihtiva eden bir rotor topolojisinin kullanıldığı çalışma, 2D ve 3D analizler ile desteklenmiştir. Önerilen yapı ile motor kalkış performansında iyileşme sağlandığı belirtilirken, ters EMK ve vuru torkunun da azaltıldığı vurgulanmıştır. Çalışma ile önerilen tasarımın düşük güç uygulamalarında kullanılabileceğine kanaat getirilmiştir (Bensaida ve ark., 2018). Aynı yıl içinde Isfahani ve Vaez-zadeh tarafından yapılan çalışmada ise ŞK-RASM'lerde kalkış torkunun yükseltilmesine yönelik optimum kafes direncinin hesaplanmasında kullanılan yeni bir formül önerilmiştir. Kafes direncinin belirlenmesinde motor ortama torku referans alınırken, motor parametrelerinin belirlenmesinde ise d-q eksen bileşenlerinin yanı sıra kutup çıkıntısı manyetik ve elektriksel olarak göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma sonucunda rotor direncinin aynı güç değerine sahip ASM ile oldukça yakın olduğu sonucu çıkarılmıştır. Çalışma kapsamında manyetiklenme indüktansı ve doyumların incelenmesi amacı ile yapılan dinamik simülasyonlarda, d-q eksen teorisine dayalı bir formülasyon kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları göz önünde bulundurularak kullanılan formülasyonun geçerliliği doğrulanmış ve çalışma kapsamında aynı yöntem ile stator

direnci, stator ve rotor kaçak indüktansları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler deneysel olarak da doğrulanmıştır (Isfahani ve Vaez-zadeh, 2018).

Wymeersch ve ark. tarafından yapılan çalışmada ŞK-RASM tasarım metotları incelenmiştir. Simülasyon çalışmalarında analiz sürelerinin kısaltılmasının yanı sıra yapısal ve doğrusal olmayan faktörlerin göz önünde bulundurulması amacı ile manyetik eş devre modeli kullanılmıştır. Simülasyonlar ile elde edilen motor senkronlanma verilerinin sınıflandırılmasında SVM (Destekçi Vektör Makinesi) olarak isimlendirilen bir makine öğrenmesi metodu kullanılmıştır. Kullanılan metot ile verilerin değerlendirilmesi ve simülasyon süresinin kısaltılması konusunda sağlanan avantajların da tartışıldığı çalışmada elde edilen sonuçların SEY analiz sonuçları ile tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca manyetik devre kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel olarak da doğrulanmıştır (Wymeersch ve ark., 2018b). Aynı yıl Zawilak ve Gwozdziwicz tarafından 4 kutuplu 400 V 45 kW'lık bir ŞK-RASM'nin demagnetizasyon karakteristiği üzerine çalışılmıştır. SEY analiz yazılımı ile desteklenen çalışmada, motorun senkron hızdan düşme durumunun yanı sıra kalkış kafesi malzemesi ve SM sıcaklığının etkileri de göz önünde bulundurulmuştur. SM sıcaklığındaki artışın, demagnetizasyona doğrudan etkili olduğu sonucuna varılan çalışmada, kısa devre kafesinin istenmeyen ani hız değişikliklerini sönümleyerek SM'leri demagnetizasyona karşı koruduğu kanısına da varılmıştır. Ayrıca rotor direncinin çok yüksek olması durumunda motorun senkron hızdan düşerek SM'lerin demagnetizasyona uğratabileceği de vurgulanan çalışmada SM'lerin maruz kalacağı en kötü senaryonun aşırı kayma ile çalışma durumunda olduğu üzerinde durulmuştur (Zawilak ve Gwozdziwicz, 2018).

2018 yılında Gülçin tarafından yapılan çalışmada tek fazlı bir ŞK-RASM'nin tasarımını yapılarak, aynı karakteristiğe sahip ASM'ye göre kayda değer verim kazancı sağlanmıştır. 2D SEY analiz yazılımı ile desteklenen çalışmada iki farklı oluk tipinin bir arada kullanıldığı bir topoloji üzerinde durulmuş olup tasarım süreci detaylı olarak tartışılmıştır (Gülçin, 2018). Aynı yıl içinde Yan ve ark. tarafından yapılan çalışmada, kalkış ve senkron çalışma karakteristiği iyileştirilmiş bir ŞK-RASM topolojisi önerilmiştir (Şekil 2.29). Radyal olarak motor mili etrafına dizilmiş SM içeren yaygın bir tasarım modelinin temel alındığı çalışmada, rotor yüzeyine SM önlerine denk gelecek şekilde kısa devre çubukları ve SM olmayan bölgelerde, hava aralığından nüvenin ortasına kadar uzanan

hava açıklıklarına yer verilmiştir. Kısa devre çubuklarının rotor yüzeyine konumlandırılması ile düşük rotor direncine sahip, rotor emperdansı arttırılmış bir tasarım elde edilmeye çalışılmıştır. Önerilen bu rotor yapısı ile indüksiyon torkunun arttırılarak motor kalkış ve senkron performansının da iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilerek önerilen rotor yapısının sağladığı avantajlar ve motor performansına katkısı doğrulanmıştır. Farklı tasarım özellikleri gözetilerek nihai motor tasarımının elde edildiği çalışmada, ileriye dönük olarak motor tork dalgalanmalarının azaltılması, senkron ve asenkron performansının iyileştirilmesi ve daha verimli bir motor tasarımının elde edilmesi yönünden SEY analiz destekli çalışmaların devam ettiği bilgisi sunulmuştur (Yan ve ark, 2018a). Aynı yıl yazarlar tarafından yapılan ikinci çalışmada, önceki çalışmada önerilen tasarım referans alınarak motor kalkış performansının iyileştirilmesine yönelik çalışılmıştır. 2D ve 3D SEY analizleri ile desteklenen çalışmada, yüksek kalkış torkuna sahip bir tasarım elde edildiği doğrulanmıştır (Yan ve ark, 2018b). Takip eden yılda yazarlar tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise önceki yılda önerdikleri, kendini kanıtlamış ŞK-RASM rotor tasarımı referans alınarak rotor empedansı, manyetiklenme indüktansı ve SM kaçak akısı gibi rotor karakteristikleri araştırılmıştır. Çalışmada araştırılan motor parametrelerinin sabit olmayıp, kaymaya göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Kaymanın motor karakteristik parametrelerine etkisinin gözlemlenmesi amacı ile SEY analiz ile desteklenen çalışmada belirlenen karakteristik parametreler motor dinamik modelinin oluşturulması amacı ile kullanılmıştır. Çalışmada SEY analizi ile elde edilen sonuçlara benzer verilerin, bu yeni model ile birkaç saniyede hesaplanabileceği belirtilmiştir. Ayrıca ileriye dönük çalışmalarda, önerilen yöntemin doğruluğunun belirlenmesi amacı ile bir motor prototip üretiminin yapılacağı, dolayısı ile projenin deneysel olarak da destekleneceği bilgisine yer verilmiştir (Yan ve ark, 2019).



Şekil 2.29. (Yan ve ark, 2018a, 2018b) ile önerilen rotor topolojisi

2019 yılında Jing ve ark. tarafından yapılan çalışmada, ŞK-RASM'lerin klasik SM içeren motorlardan farklı olarak hem stator hem de rotorunda oluk yer alması neticesinde karmaşık bir hava aralığı formuna sahip olduğu üzerinde durulmuştur. Söz konusu karmaşık yapı nedeni ile bu tip motorlarda vuruş torkunun klasik yöntemlerle belirlenemeyeceği belirtilen çalışmada, oluk açıklıklarından etkilenmeden hava boşluğundaki eşdeğer MMK dağılımını referans alarak rotorun modellemesini yapan yeni bir metot önerilmiştir. Önerilen metot ile stator oluk sayısı ve rotorda kutup başına düşen oluk sayısının vuruş torkuna etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada ayrıca yardımcı olukların vuruş torkuna etkisi araştırılıp, yardımcı oluk sayısı değiştirilerek vuruş torku azaltılmaya çalışılmıştır. Kayıklı ve kaykısız stator yapıları da göz önünde bulundurulmuş çalışmada elde edilen sonuçlar SEY analiz ile doğrulanmıştır (Jing ve ark, 2019).

Maraaba ve ark. tarafından yapılan çalışmada gömülü tip SM içeren ŞK-RASM'lerin tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik metotlar incelenmiştir. Çalışma d-q eksen matematik modeline dayanan analiz çalışmalarının yanı sıra deneysel olarak da desteklenmiştir. Ayrıca motor tasarım parametrelerinin belirlenmesinde motor geçici ve kalıcı rejim karakteristiği göz önünde bulundurulmuştur. Analiz ve test sonuçlarının tutarlı olduğu belirtilen çalışmada kullanılan metodun geçerliliği sınanmıştır. Yapılan çalışma ile uygun ŞK-RASM test metodunun belirlenmesine katkı sağladığına kanaat getirilmiştir (Maraaba ve ark., 2019).

Çalışmanın bu bölümünde tez çalışmasına konu olan ŞK-RASM'lerin tasarımı ve optimizasyonuna yönelik literatürde yer alan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda ön plana çıkan rotor tasarımları ve topolojik özellikleri ile ilgili detaylara yer verilmiştir. İncelenen literatür çalışmaları süzgeçten geçirilerek ŞK-RASM tasarım ve geliştirmesinde önem arz eden tasarım özellikleri araştırılmıştır. Belirlenen tasarım özellikleri materyal ve yöntem bölümünde detaylı olarak tartışılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde ŞK-RASM geliştirilmesi sürecinde kullanılan materyaller, izlenen yöntem ve yapılan tetkikler detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle literatür çalışmaları süzgeçten geçirilerek ŞK-RASM tasarım ve geliştirmesinde önem arz eden tasarım kriterleri ile ilgili detaylar tartışılmıştır. Sonraki bölümde tez çalışması kapsamında ŞK-RASM'lerin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalara detaylı olarak yer verilmiştir. Takip eden bölümde edinilen bilgilerin sınanması ve motor çalışma karakteristiğinin tecrübe edilmesi amacı ile önceki çalışmalarda literatürde yoğun ilgi gören rotor topolojileri modellenerek analiz edilmiştir. Modellenme sürecinde analitik yöntemlerin yanı sıra doğruluğu akademik olarak kabul görmüş bir SEY analiz yazılımı kullanılmıştır. Analiz edilen motorlar çalışma karakteristiği, motor performansı ve üretilebilirlik açısından detaylı olarak irdelenmiştir. Edinilen performans grafikleri ve kazanımlarla ilgili önem arz eden detaylar sunulmuştur. Sonraki bölümde edinilen tecrübeler göz önünde bulundurularak modellenmesi yapılan ŞK-RASM tasarımı ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Takip eden bölümlerde sırası ile önerilen motor tasarımına ait çalışma karakteristiği, tasarım optimizasyonu, prototip üretim ve testlerinin yapılması ilgili detaylar ayrı ayrı bölümlerde irdelenmiştir.

3.1. ŞK-RASM Tasarım Süreci

Önceki yıllarda yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda ŞK-RASM'lerin ilk önerildiği yıllardan 2000'li yıllara kadar ticarileşme kaygısı ile mücadele ettiği görülmüştür. Motor çalışma karakteristiğini yeterli düzeyde izah edecek yöntemlerin geliştirilmemesi ve yüksek performanslı olmayan imalat malzemelerinden kaynaklanan sınırlamalar nedeni oluşan bu durum 1970'li yıllara kadar oldukça etkili olmuştur. Takip eden yıllarda, yüksek verimli malzemelerin geliştirilmesinin yanı sıra motor çalışma karakteristiğini daha iyi ifade eden gelişmiş manyetik devre modelleri ve SEY analiz gibi yenilikçi yöntemlerin kullanılması ile bu motorlar daha fazla endüstrinin kullanımına açılmıştır. Son 10 yıllık dilimde ise yapılan araştırmaların meyvesini verdiği ve nihayetinde ŞK-RASM'lerin ASM'lere alternatif olacak şekilde piyasaya sunulduğu görülmektedir. Günümüzde geleneksel ASM'ler ile yakalanması oldukça zor olan IE4 verimlilik seviyesinde pazara sunulan bu motorlar, birçok büyük motor üreticisi

katalogunda yer almış durumdadır. Burada üzerinde durulması gereken bir diğer önemli konu da üretim sürecinin ASM'lere göre daha karmaşık olması ve materyal maliyetlerinin yüksekliği neticesinde, ŞK-RASM'lerin, ASM'lere göre daha yüksek ücret ile pazara sunulduğudur. Nitekim, enerji tüketimi açısından sağladığı avantajlar dolayısı ile birkaç yıllık aktif çalışma ile satın alma masraflarını amorti ettiğine yönelik birçok araştırma ve uygulama literatürde yer almaktadır.

ŞK-RASM'ler yapı olarak büyük oranda ASM'ler ile benzerlik göstermektedir. Stator yapısı, ASM statoru ile aynı olmakla beraber bu motorların en büyük farkı rotor gövdesinde SM'lere yer verilmesidir. Dolayısı ile ŞK-RASM'lerin tasarım süreci ASM'ler ile oldukça benzerlik göstermektedir. ASM tasarım süreci bilgi ve tecrübe gerektiren karmaşık bir süreç olmakla beraber literatürde çokça tartışılmış bir konudur. Tasarım sürecinin başarıya ulaşmasında en önemli faktör ise malzeme sınırları gözetilerek motorun boyutlandırılmasıdır. Elektrik motorlarının boyutlandırılmasında malzemenin çalışma sınırları gözetilerek beklentiyi karşılayan geometri ve sargı tasarımının elde edilmesi esas oluşturulmaktadır (Boldea ve Nasar, 2001). Pyrhnen ve ark. (2008)'e göre hedeflenen güçte sabit hızlı optimal bir elektrik motoru tasarımının elde edilmesinde aşağıdaki parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

- Stator dış çapı ve laminasyon uzunluğu
- Stator oluk genişliği ve yüksekliği
- Hava aralığı genişliği
- Rotor oluk genişliği ve yüksekliği
- Kutup sayısı ve besleme frekansı

ŞK-RASM'lerin tasarımına yönelik yürütülen çalışmalarda motorun sabit bir şebekeden beslendiği düşünülerek besleme frekansı ve gerilimi biliniyor kabul edilmiştir.

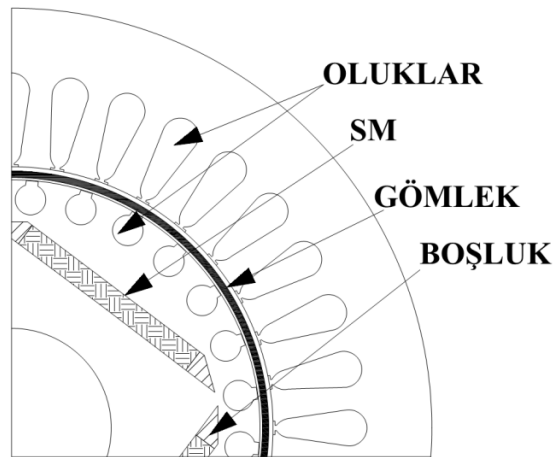
3.1.1. Tasarım kriterleri

Tez çalışması kapsamında ŞK-RASM geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmaların birinci basamağında detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu kapsamda, çalışmaya konu olan bu motorların geliştirilmesine yönelik günümüze değin yapılan araştırmalar süzgeçten geçirilmiştir. Çok sayıda araştırma ve 50'yi aşkın rotor topolojisinin incelenmesi sonucunda yıllara göre trendler şekil değıştirirse de ön plana çıkan motor tasarım kriterleri belirlenmiştir. Belirlenen tasarım kriterleri bu başlık altında detaylı olarak incelenmiş olup her bir kriterin önem ağırlığı tartışılmıştır.

Üretim kolaylığı ve basitlik

Üretim kolaylığı ve basitlik, ŞK-RASM'lerin ilk önerildiği yıllardan günümüze kadar revaçta kalan bir tasarım kriteri olmuştur. Üretim sürecinin otomatikleşmesi ve hata oranının azalması açısından önem arz eden bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde büyük oranda rotor tasarımına odaklandığı görülmüştür. ASM motorlar ile karşılaştırıldığında nüve gövdesinde SM'lere ve hava boşluklarının yer alması neticesinde daha karmaşık yapı ihtiva eden rotorun üretim süreci de karmaşıklaşmaktadır. Standart kısa devre kafesli ASM'lerde olduğu gibi bu tip motorlarda da üretim maliyetinin azaltılması ve üretim sürecinin basitleştirilmesi amacı ile laminasyon paketinin hazırlanması ve oluklara kısa devre çubuklarının konumlandırılmasında yüksek ısı ve basınç kullanılan üretim adımları tercih edilmektedir. Kullanılan bu üretim adımları mekanik ve ısıl olarak nüvede yer alan SM'leri deforme edebilmektedir. Bu nedenle genel olarak SM'lerin laminasyon paketi ve kısa devre çubukları yerleştirildikten sonra yapılmaktadır. Günümüze değin önerilen ŞK-RASM topolojileri göz önünde bulundurulduğunda gömülü ve yüzey yerleştirmeli tipte SM tasarımlarının önerildiği görülmektedir. Gömülü tip SM kullanılan tasarımlarda SM'lerin laminasyon paketine yerleştirilmesi başlı başına özen gerektiren bir konudur. Öyle ki rotor gövdesi içine konumlandırılan SM'ler mekanik olarak gerilme altında kalabilmekte bu da oldukça kırılğan yapıda olan SM'lerin deforme olmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle gömülü tip SM'lerin rotor nüvesine yerleştirilmesi üstesinden gelinmesi gereken başlı başına bir handikaptır.

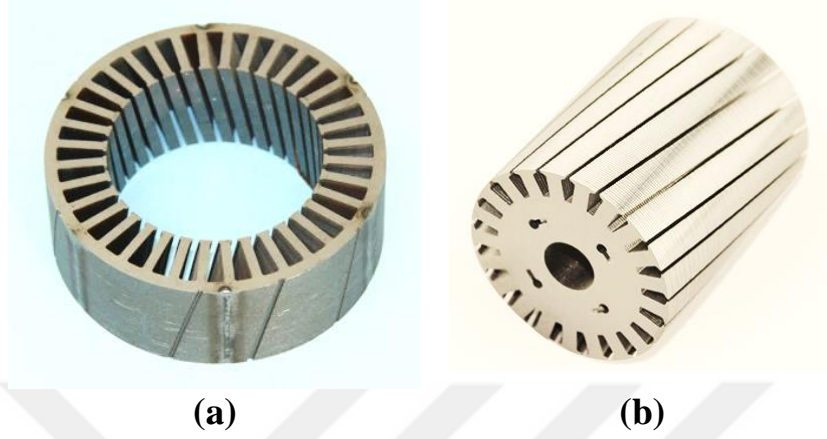
Yüzey yerleştirmeli SM kullanılan yapılarda ise SM'ler özel yapıştırıcılar kullanılarak rotor yüzeyine monte edilmektedir. Bu tip SM tasarımlarında karşılaşılan en büyük problem ise yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetlerinin yapışkan gücünü yenerek SM'leri yuvasından çıkarabilmesidir. Yuvadan çıkan SM'ler statora çarparak hava aralığına sıkışabilmektedir. Oluşan bu durum SM gövdesinde hem de stator sargı ve laminasyonunda mekanik deformasyona neden olabilmektedir. Bu gerekçe ile yüksek hız gerektiren uygulamalarda yüzey yerleştirmeli SM tasarımları daha az tercih edilmektedir. Diğer bir yandan SM'lerin yuvadan çıkmasına engel olacak yaklaşımlara da literatürde yer verilmiştir. İlgili araştırmalarda basit bir yaklaşım ile daha güçlü yapıştırıcılar kullanılarak bu problem aşılmaya çalışılmıştır (Bilcai ve ark., 2011; Lebkowski, 2017). Karşılaşılan bu problemin aşılmasına yönelik gelecek vaat eden bir diğer çözüm önerisinde ise rotor gövdesine SM'lerin yuvadan çıkmasına engel olacak şekilde karbon fiber, epoksi ve benzer özelliklerde malzemeden imal edilmiş kompozit yapılı bir gömlek giydirilmiştir (Cho ve ark., 2006; Riemer ve ark. 2010; Smith ve ark., 2010; Guangwei ve ark., 2013; Fernando ve Gerada, 2018; Kolpakhchyan ve ark., 2018). Endüstriyel bir ürün olarak da piyasanın kullanımına sunulan gömlek (Anonim, 2019a; Anonim, 2019b; Anonim, 2019c), motor manyetik ve ısıl karakteristiğine minimum etki edecek şekilde oldukça ince imal edilerek hava aralığına konumlanmaktadır (Şekil 3.1)



Şekil 3.1. SM'lerin yuvadan çıkmasına engel olan kompozit gömlek yapısı

Motor üretim sürecine doğrudan etkili olan bir diğer tasarım özelliği de motor tork kalitesini arttırması amacı ile stator ve rotor gövdesinde kayk kullanılmasıdır. Söz konusu yöntemde laminasyon sacları aksiyal yönde birbirine göre belirli bir aç kaçıklığı

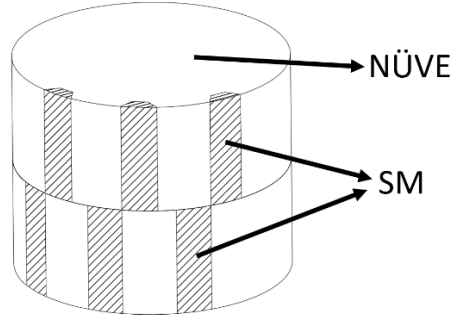
ile dizilmekte ve böylelikle laminasyon paketi boyunca uzanan bir eğiklik elde edilmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kayıklı nüve a) kayıklı stator b) kayıklı rotor (Anonim, 2019d; Anonim, 2019e)

Hem stator hem de rotor laminasyonuna uygulanan bu tasarım yöntemi ile (bkz. Şekil 3.2) nüvenin yanında nüveye montajı yapılacak olan sargılar, kısa devre kafesi ve SM tasarımında da değişiklik yapılması gerekmektedir. Kısa devre kafesinin üretilmesinde yüksek sıcaklıkta sıvılaştırılmış alüminyumun rotor oluklarına enjeksiyonu oldukça pratik ve tercih edilen bir üretim yöntemidir. Dolayısı ile yaygın olarak kullanılan bu imalat yöntemi, kayıklı rotor tasarımına sahip motorların üretiminde de doğrudan uygulanabilmektedir. Fakat kısa devre kafesi üretiminde sağlanan bu avantaj, sarım ve SM'ler için geçerli değildir. Kayık kullanılan tasarımlarda, oluk uzunluğu kaykısız tasarıma göre daha fazladır. Dolayısı ile kayıklı nüveye göre üretilen sarımlarda daha fazla iletken malzemesi kullanılmaktadır. Kullanılan fazladan iletken malzeme toplam motor maliyetinde kayda değer değişikliğe neden olmamakla beraber sarğı direncini arttırmaktadır. Literatürde sarğı direncinin motor performansında doğrudan etkili olduğunu gösteren birçok çalışma yer almaktadır (Miller, 1984; Popescu ve ark., 2005; Ugale ve ark., 2008; Pecho ve Hofmann, 2018). Bu nedenle kayıklı stator kullanılarak tasarlanan motorlarda sarım direncindeki değişim de göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer bir yandan üretim maliyetinde hatırı sayılır artışa neden olması gerekçesi ile kayıklı SM tasarımına literatürde oldukça nadir rastlanmaktadır. Eğik geometriye sahip SM'lerin üretimi daha zor olmakla beraber, özellikle gömülü SM kullanılan tasarımlarda SM'lerin nüveye yerleştirilmesi başlı başına bir problem teşkil etmektedir.

Alternatif bir çözüm olarak literatürde, kaykısız olarak üretilen nüve bloklarının birbirine göre aksiyal yönde belirli bir açı ile monte edildiği tasarımlara yer verilmiştir (Saban ve ark., 2000; Islam ve ark., 2009; Huth ve Fischer, 2015). Şekil 3.3'te (Saban ve ark., 2000) ile önerilmiş olan parçalı rotor tasarımı görülmektedir.

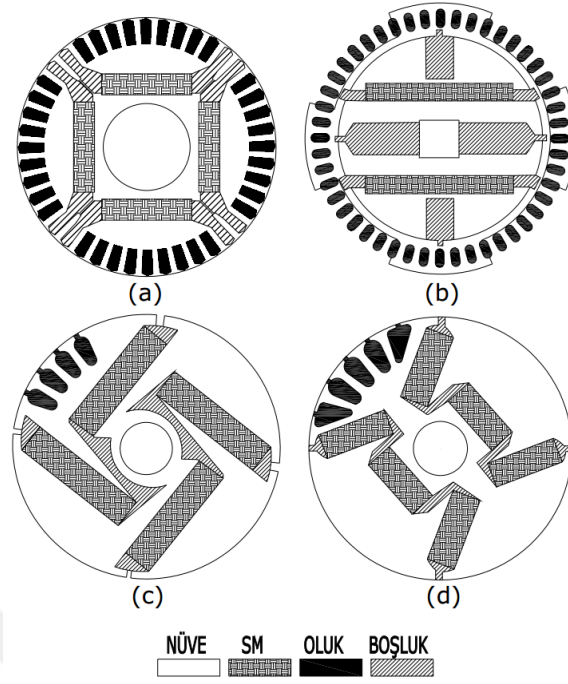


Şekil 3.3. (Saban ve ark., 2000) ile önerilen parçalı rotor tasarımı

En nihayetinde tasarımda parçalı rotor kullanımı, üretim adımlarının artması nedeni ile otomatik üretim sürecini olumsuz etkilemektedir. Dolayısı ile SM içeren rotor tasarımlarında, rotorun kaykılı modellenmesi tercih edilen bir yaklaşım değildir.

İlgili bölümde kaykılı nüve kullanımı konusu sadece üretim açısından tartışılmıştır. Tasarımda kaykılı kullanılması nedenleri, teorik açıklaması ve motor tork karakteristiğine etkileri tork kalitesi ve sessiz çalışma başlığı altında (bkz. Bölüm 3.2.1) ayrıca incelenmiştir.

Son olarak üzerinde durulması gereken diğer bir önemli konu da nüvenin parçalı olarak üretilmesidir. Tasarım açısından özellikle gömülü tip SM kullanılan topolojilerde, nüve gövdesinde SM, akı bariyeri ve oluklara yer verilmesi neticesinde nüve saclarının tek parça halinde üretilmesi mümkün olmayabilmektedir. Tercih edilen bu tasarım yaklaşımında nüve genel olarak cıvata ve rotora monte edilen kısa devre kafesi ile bir arada tutulmaktadır. Bu da motorun üretim sürecini nispeten biraz daha karmaşık hale getirmektedir. Bu yaklaşım ile modellenen bazı tasarım örnekleri Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Parçalı nüve yapısına sahip topoloji örnekleri, (a) (Yates, 1970), (b) ve (c) (Anonim, 1970), (d) (Steen, 1979)

Üretim maliyeti

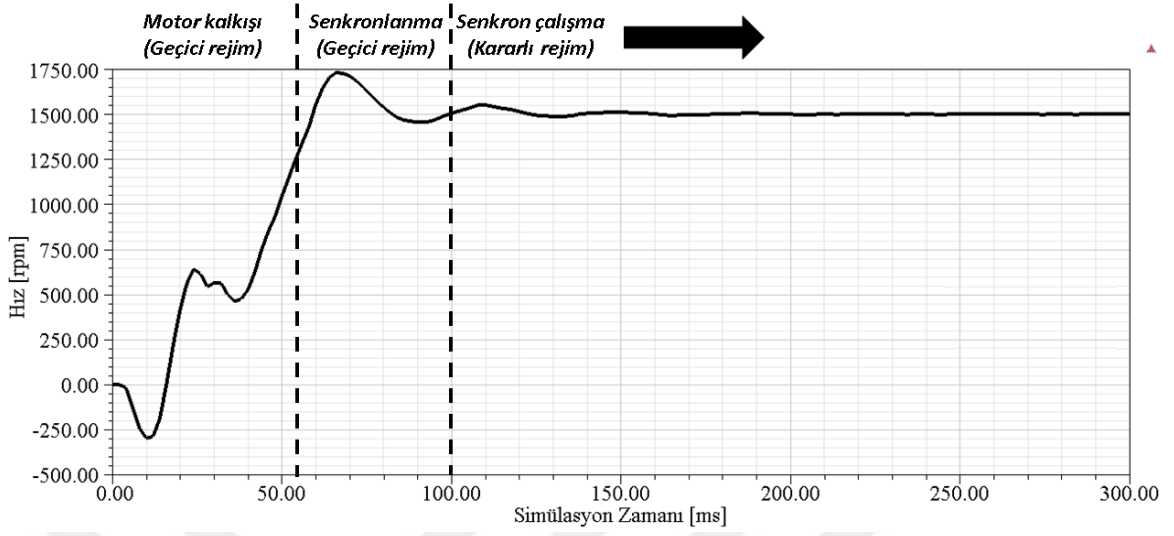
ŞK-RASM'lerin üretim maliyeti önceki bölümde tartışılan imalat prosedürünün yanı sıra büyük oranda üretim malzemesine bağlıdır. Bu motorlardan beklenen yüksek verimli çalışma karakteristiği tasarıma bağlı olduğu kadar tasarımda tercih edilen yüksek teknoloji nüve ve SM malzemesi ile de alakalıdır. Yaptığı çalışmalar ile bu tip motorların bugünkü seviyede olmasına büyük katkısı olan Binns, konu ile ilgili ulaşılabilen 1988'deki son çalışmasında, hedeflenen üstün performansın genel olarak yüksek performanslı ve oldukça maliyetli SM malzemeleri kullanılarak elde edilebileceğini öngörmüştür (Binns, 1988).

Günümüzde her ne kadar SM fiyatları daha ulaşılabilir seviyelere düşse de hala motor maliyetine hatırı sayılır etki etmektedir. Diğer bir yandan bu motorlarda mevcut ASM'lere göre ekstra üretim maliyetinin sadece SM'ler kaynaklı olduğunu söylemek mümkün değildir. Öyle ki istenen verim seviyesinin elde edilmesi için nüve malzemesi ve laminasyon kalınlığının doğru tahlil edilmesi gerekmektedir. Genel olarak tasarımda daha ince laminasyon sacı kullanılması verimi arttırmakta fakat bu seçim sacların kesim ve montajının daha meşakkatli olmasına neden olmaktadır. Dolayısı ile daha ince seçilen

laminyasyon sacı üretim ve malzeme maliyetinde doğrudan etkili olmaktadır. Üretim maliyetine etki eden bir diğerkonu da önceki başlık altında da üzerinde durulan karmaşık yapılı ve daha fazla üretim adımı gerektiren motor tasarımlarıdır. Önceki bölümde tartışıldığı gibi karmaşık üretim süreçleri otomasyon ile üretimini zorlaştırmakta ve dolayısı ile bu motorların makul fiyatlarla piyasa sunulamamasına neden olmaktadır.

Motor kalkış ve senkronlanma performansı

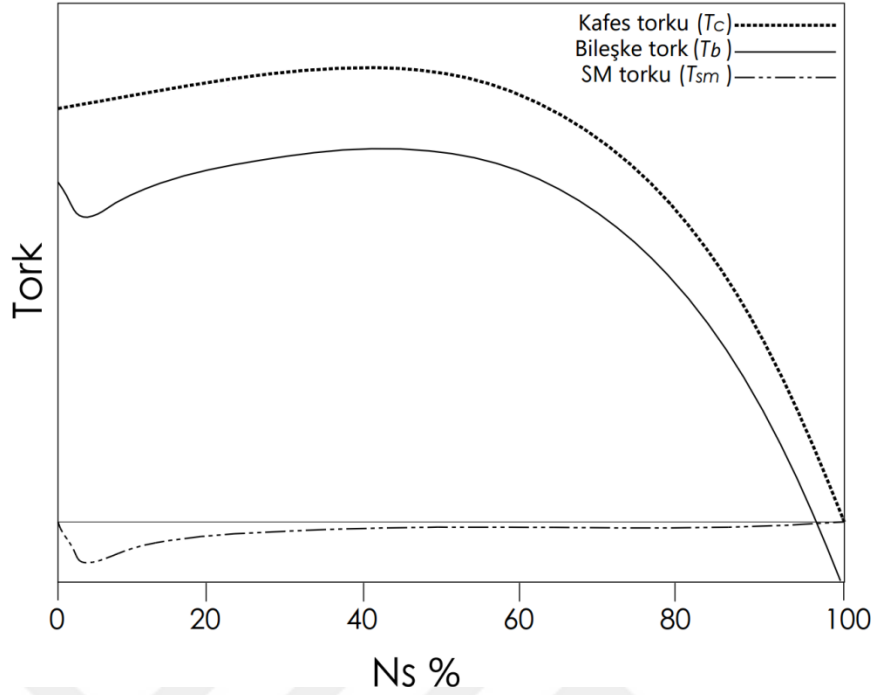
ŞK-RASM'ler, rotorunda yer alan kısa devre kafesi ile ASM'ler gibi şebekeden doğrudan beslenerek asenkron kalkış yapabilirken (geçici rejim), yüke bağlı değışken devir üreten ASM'lerin aksine senkron hıza ulaştıktan sonra sabit hızla rotor bakır kayıpları olmadan yüksek verimli olarak çalışmaya devam edebilmektedir. Şekil 3.5 ile sunulan grafikte, 4 kutuplu 50 Hz çalışmada (1500 d/d) bir motorun ilk kalkış anından normal çalışma seyrine kadarki hızlanma karakteristiğı görölmektedir. Grafikte göröldüğü gibi motor hızlanma süreci, motor kalkış (geçici rejim), senkronlanma (geçici rejim) ve senkron çalışma (kararlı rejim) olmak üzere üç farklı evreden oluşmaktadır. Tez çalışmasına konu olan bu motorların çalışma karakteristiğinin anlaşılması açısından söz konusu çalışma evrelerinin detaylı incelenmesi gerekmektedir. Çalışmanın bu adımında ilgili grafikte görölmekte olan motor kalkışı ve senkronlanma evreleri, kısa devre kafesi ve SM'lerin stator manyetik alanı ile etkileşimi gözetilerek ayrı ayrı ele alınmıştır. Senkron çalışma karakteristiğı sonraki bölümde ayrıca incelenmiştir.



Şekil 3.5. Motor hızlanma karakteristiği

Motor kalkışı

ŞK-RASM'ler rotor bünyesinde SM'lerin yanı sıra kısa devre kafesi barındıran hem asenkron hem de senkron motor çalışma karakteristiğine sahip yapısal olarak hibrit olarak nitelendirilebilecek motorlardır. Motor kalkış evresinde, ASM'lerde olduğu gibi 3 fazlı stator sargıları tarafından üretilen döner manyetik alan, rotor nüvesinde yer alan kısa devre çubuklarını kesmekte ve dolayısı ile çubuklarda bir I_r , rotor akımı akmakta ve motorun kalkışına imkân sağlayan indüksiyon torku (kafes torku, T_c) indüklenmektedir. Fakat geleneksel ASM'lerden farklı olarak rotorda yer alan SM'ler yüksek kayma meydana gelen çalışma rejimlerinde motoru yavaşlatmaya zorlayan bir frenleme torku (T_{sm}) üretmektedir. Şekil 3.6 ile sunulan grafikte motor tarafından üretilen geçici rejimdeki tork bileşenleri (T_c , T_{sm}) ve bileşke torkun (T_b) motor hızına göre değişimi görülmektedir (Miller, 1984; Stoia ve ark., 2010).



Şekil 3.6. ŞK-RASM'nin tork bileşenleri

ŞK-RASM'lerin en önemli kronik sorunu rotor nüvesinde yer alan SM'lerin motor kalkış anında motor torkunu azaltacak yönde fren etkisi yapmasıdır. Motorun kalkış performansını azaltan bu frenleme etkisi mıknatısların hava aralığına daha yakın konumlandırılması durumunda artış göstermektedir (Honsinger, 1980; Rahman ve ark., 1997). Motor tarafından üretilen T_{sm} , motor ters EMK'sı ile motor kaymasının (s) bir fonksiyonudur (Sarani ve Vaez-Zadeh, 2017). Motor kalkış anında sıfır olan T_{sm} düşük hızlarda motorun hızlanması ile beraber artış göstermekte iken motorun yüksek hızlara çıkması ile giderek azalmaya başlamaktadır. Özellikle düşük hızlarda motor kalkış performansını büyük oranda etkileyen bu etki bazı durumlarda motorun yüksek hızlara çıkmasına bile engel olabilmektedir (Miller, 1984; Stoia ve ark., 2010).

Motorun rotor ve stator manyetik alanları arasında meydana gelen hız farkından (motor kaymasından) kaynaklanan kafes torku (T_c) ise asenkron tork olarak da ifade edilmekle beraber motorun kalkış yaparak hızlanmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısı ile motor hızlanma evresinde T_{sm} ile T_c zıt yönlüdür. Motorun kalkış yapabilmesi için T_c 'nin T_{sm} , motor ataletini (J_m) ve yük torkunu (T_L) yenmesi gerekmektedir.

Motor kalkışı esnasında üretilen T_c ve T_{sm} tork bileşenleri sırası ile Eşitlik 3.1 ve 3.2 ile ifade edilmektedir (Honsinger, 1980).

$$T_c = \frac{p m}{2 w_s} \left\{ (X_{2d} - X_{2q}) I_{2d} I_{2q} + X_{md} I_d I_{2q} - X_{mq} I_q I_{2d} + E_0 V I_{2d} \right\} \quad (3.1)$$

$$T_{sm} = \frac{p m}{2 w_s} \left\{ X_{md} I_{fm} I_{md} + (X_d - X_q) I_{md} I_{mq} \right\} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1’de görülen p , kutup sayısına, m , faz sayısına, w_s , açısal senkron hızına, X_{2d} , X_{2q} , rotor -d ve -q eksenine kaçak reaktanslarına, I_{2d} , I_{2q} rotor -d ve -q eksenine akımlarına, I_d , I_q stator -d ve -q eksenine akımlarına, X_{md} , X_{mq} , -d ve -q eksenine manyetiklenme reaktanslarına, E_0 , uyartım gerilimine ve son olarak V besleme gerilimine karşılık gelmektedir. Eşitlik 3.2’de görülmekte olan I_{fm} , uyartım akımını göstermektedir.

T_c ve T_{sm} ’nin birleşimi olan elektromanyetik tork (T_e) Eşitlik 3.3. ile belirlenebilmektedir (Honsinger, 1980).

$$T_e = \frac{p m}{2 w_s} \left\{ (X_d - X_q) I_d I_q + X_{md} I_{2d} I_q - X_{mq} I_{2q} I_d + E_0 I_q \right\} \quad (3.3)$$

Motor hızlanma karakteristiği göz önünde bulundurulduğunda, ŞK-RASM’lerin motorların kalkış anında düşük yük etkisi gösteren uygulamalar için daha uygun olduğunu söylemek mümkündür. Nitekim endüstriyel uygulamalarda büyük oranda bu yük karakteristiğine sahip pompa ve fanların kullanıldığı görülmektedir (Chaudhari ve Fernandes, 2004; Puranen, 2006; Chaudhari, Ugale ve Pramanik, 2014; Melfi ve ark., 2015a).

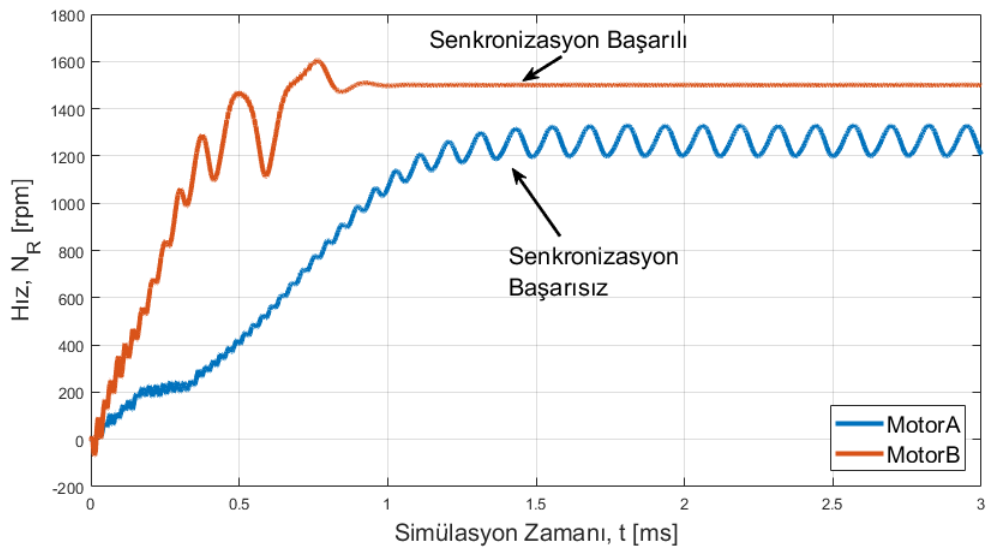
Santrifüj pompaları, fan ve körükler gibi akış gücü ile çalışan uygulamalarda yük torku dönüş hızının karesi ile orantılı olarak artmaktadır (Eşitlik 3.4). Sunulan eşitlikte görüldüğü gibi motor yük torku motor hızının karesi ile orantılı artış göstermektedir (Isfahani ve Vaez-Zadeh, 2009). Dolayısı ile T_{sm} fren torkunun en etkin olduğu düşük hızlarda yük torkunun yüksek olmaması neticesinde motor çok daha kolay kalkış yapabilmektedir.

$$T_L = k\omega^2 \quad (3.4)$$

Eşitlikte verilen k sabiti karesel yük katsayısını, ω ise motor açısal hızını temsil etmektedir.

Senkronlanma

Motor kalkışı sonrasında rotor hızının senkron hıza yaklaşması ile başlayan ve oldukça kısa süren bu evrede, T_e ve etkisi rotor topolojisine göre değişkenlik gösteren relüktans torku (T_r), rotoru senkron hızda dönmeye zorlamaktadır. Henüz kararlı rejime geçmeyen rotor bu iki tork bileşeninin etkisi ile senkron hızda dönmeye devam etmektedir. Ani yükleme durumunda, senkron hızdan kopan rotor, tekrar bu iki tork bileşeninin etkisi ile senkron hızda dönmeye zorlanmaktadır (Tang ve ark., 2016). Ani yük boşalması ile aşırı hızlanan rotor üzerinde de benzer bir etki oluşturan T_e ve T_r rotoru yavaşlatarak tekrar senkron hızda döndürmektedir. T_e ve T_r torkunun rotoru senkron hızda tutmakta yetersiz olduğu durumlarda ise rotor senkron hıza ulaşmadan sürekli salınımda dönmeye devam etmektedir (Şekil 3.7). Oluşan bu durum kısa devre kafesinde rotor akımının dolaşmasına neden olmakta ve dolayısı ile nüvede ısınma meydana gelebilmektedir. Nüvenin fazladan ısınması ve kafes manyetik alanının hala aktif olması neticesinde SM'lerde demagnetizasyon meydana gelebilmektedir.



Şekil 3.7. Başarılı ve başarısız senkronizasyon

Senkron çalışma performansı

Başarı ile senkronlanan motor, kararlı rejime geçerek SM'ler tarafından üretilen ekstra manyetik akı etkisi ile senkron hızda (kalıcı rejim) dönmeye devam etmektedir. Bu çalışma evresinde, kısa devre kafesinin stator manyetik alanını kesmemesi neticesinde kafes üzerinde rotor akımı indüklenmemekte ve bu da rotor üzerinde meydana gelen elektromanyetik kayıpların yok denecek kadar azalmasını sağlamaktadır (Harmonikler göz önünde bulundurulduğunda). T_e ve T_r tork bileşenleri, motorun senkronlanmasının yanı sıra senkron hızda dönmesinde de aktif rol oynamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, en iyi senkron çalışma performansının -q eksen takımındaki akının minimum ve -d eksen takımındaki akının maksimuma yakın olması durumunda elde edilebildiği görülmüştür (Honsinger, 1962). Büyük oranda rotor nüvesinde yer alan akı bariyerleri tasarımına bağlı olan relüktans torku, hedeflenen motor performansının elde edilmesinde avantaj sağlayabilmektedir. Buna karşın akı bariyerlerinin relüktans torku arttıracak şekilde nüveye konumlandırılması ile rotor simetrik yapısı bozulmakta bu da geçici ve kararlı rejimde motor mil torkunda dalgalanmalara neden olabilmektedir. Söz konusu tork dalgalanmaları sadece akı bariyerleri kaynaklı olmayıp, SM tasarımı, stator sargı tasarımı ve rotor oluk tasarımı da bu tork dalgalanmalarına kayda değer etki etmektedir. Bu etkilerin tamamı hava aralığında homojen olmayan akı dağılımlarına neden olmakta ve dolayısı ile motor tarafından üretilen tork kalitesinde düşüş meydana gelmektedir (Zawilak ve Gwozdziwicz, 2011; Debruyne ve ark., 2014; Hombitzer ve ark., 2014; Behbahanifard ve Sadoughi, 2015, 2016). Söz konusu bu tork dalgalanmaları ve dalgalanmaların bastırılmasına yönelik önerilen yaygın çözümler ilerleyen bölümlerde daha detaylı tartışılmıştır.

Kararlı çalışma esnasında akımlara bağlı olarak üretilen senkron tork Eşitlik 3.5'teki gibi ifade edilmektedir.

$$T_{senk} = \frac{P m}{2 w} \{E_0 I_q + I_d I_q (X_d - X_q)\} \quad (3.5)$$

Buna ek olarak EMK ile terminal voltajı arasındaki açığı γ ile gösterirsek, dirençlerin ihmal edilmesi durumunda senkron tork Eşitlik 3.6'daki gibi ifade edilebilmektedir (Chaudhari ve ark., 2014).

$$\begin{aligned} T_{senk} &= \frac{P}{2} \frac{m}{w} \left\{ \frac{E_0 V}{X_d} \sin \gamma + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\gamma \right\} \\ &= T_{sm} \sin \gamma + T_R \sin 2\gamma \end{aligned} \quad (3.6)$$

ŞK-RASM'lerin farklı yükler ve şebeke gerilimlerinde kalkış performansının iyileştirilmesi ve motorun senkronlanma sonrası daha verimli çalışabilmesi konusunda literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Yapılan bu çalışmaların motorun çalışma karakteristiğini daha iyi ifade eden motor dinamik modelinin geliştirilmesi (Lim ve ark., 1999; Madurga ve González, 2002; Lu ve ark., 2012), motorun senkronizasyon performansını etkileyen tasarım parametrelerinin belirlenmesi (Soulard ve Nee, 2000; Azari ve ark., 2017; Wymeersch ve ark., 2018) ve optimizasyonu (Knypinski, 2017; Ustun ve ark., 2017; Sorgdrager ve ark., 2018) üzerine yoğunlaştığı görülmüştür.

Rijit yapı ve SM'lerin demagnetizasyona karşı korunması

Motorun çalışma ömrünün uzun olması ve ileride oluşabilecek yüksek maliyetli SM arızalarına karşı korunması önem arz etmektedir. ŞK-RASM'lerde özellikle kayma değerinin yüksek olduğu geçici çalışma rejimlerinde kısa devre çubukları tarafından üretilen manyetik alan SM'ler üzerinde demagnetizasyon etkilerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Literatürde bu etkinin azaltılmasına yönelik çok sayıda çalışmaya rastlanmakla beraber yapılan çalışmaların yoğun olarak geçici rejim süresinin kısa tutulması, akı bariyeri kullanılarak kaçak akıların azaltılması, akı çizgilerinin odaklanması ve SM'lerin nüveye gömülmesi üzerine olduğu görülmüştür (Ding ve ark., 2009; Hombitzer ve ark., 2014; Lu ve ark., 2014; Behbahanifard ve Sadoughi, 2015).

Önceki bölümlerde tartışıldığı gibi ŞK-RASM topolojilerinde SM konumu açısından yüzey yerleştirmeli ve gömülü tipte SM içeren rotor topolojilerinin önerildiği görülmüştür. Gömülü SM tercih edilen topolojilerde, rotor nüvesinin içine yerleştirilen SM'ler hava aralığından uzaklaştırılarak mekanik ve manyetik deformasyonlara karşı korunmaktadır. Söz konusu tasarımlarda SM akısı, rotor nüvesi ve kısa devre çubuklarını aşarak hava aralığına ulaşabilmektedir. Dolayısı ile bu tip tasarımlarda SM akısından

dolaylı olarak yararlanılmaktadır. Dahası söz konusu topolojilerde SM akısının kutup alanı boyunca düzgün olarak dolaşmasını sağlayacak şekilde tasarımın iyileştirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde akı yolu uzayabilmekte ve hatta SM manyetik alanı kendisini rotor nüvesi üzerinden tamamlayabilmektedir. Söz konusu durumlarda rotor nüvesinin fazladan ısınması olası bir durumdur. Önceki bölümlerde de tartışıldığı gibi nüvede meydana gelen fazladan sıcaklık artışı SM'lerin demagnetizasyon riskini arttırabilmektedir. Yüzey yerleştirmeli SM kullanılan topolojilerde ise SM'ler tarafından üretilen akı doğrudan hava aralığına geçebilmekte dolayısı ile SM manyetik alanı rotor nüvesinde fazladan sıcaklık artışına neden olmamaktadır. Buna karşın söz konusu tasarımlarda SM'lerin hava aralığına yakın konumlandırılması nedeni ile SM'ler manyetik ve mekanik olarak daha kolay deforme olabilmektedir. Dahası motor kalkışını olumsuz etkileyen SM frenleme torkunda ve motor harmoniklerinde artış meydana gelebilmektedir.

Rotor nüvesinde akı bariyeri bırakılması da SM demagnetizasyonlarının azaltılmasında oldukça etkili olabilmektedir. SM sonlarında meydana gelen saçaklanmaların önüne geçilmesi amacı ile, saçaklanmaların meydana geldiği bölgelerde akı bariyeri kullanılarak bu durumun önüne geçilebilmekte ve dolayısı ile SM akısının hava aralığına ulaşma oranı arttırılabilmektedir. Akı bariyeri kullanılarak SM demagnetizasyonunda azalma elde edilen birçok çalışma yer almaktadır.

Söz konusu yöntemlere ek olarak geçici rejim çalışma süresinin kısa tutulması da SM demagnetizasyonlarının azaltılmasında önem arz etmektedir. Motorun geçici rejimde kalma süresi motor kalkış performansının yanı sıra motor yük karakteristiği ile de alakalıdır. Yapılan çalışmalarda SM kalınlığının, kısa devre kafesi tasarımının, atalet ve yük momentinin motor geçici rejimde kalma süresinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Motor geçici rejim çalışma karakteristiği konusu önceki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

Tork kalitesi ve sessiz çalışma

ŞK-RASM'ler, ASM'lerde olduğu gibi stator bobinleri tarafından üretilen manyetik alanın rotor ile etkileşimi sonucu tork üretmektedir. Bu etkileşim geçici rejimde kalkış torku (kısa devre kafesi kaynaklı) ve ters yönlü SM torku ile açıklanabilirken, kararlı

rejimde rotor relüktansı ve SM kaynaklı senkron torku aktif rol oynamaktadır. Sözü geçen her iki çalışma rejiminde de motor tarafından üretilen tork rotor pozisyonuna göre değişkenlik göstermektedir. Bu değişim hava aralığında düzensiz akı dağılımına neden olmakta bu da rotor üzerinden alınan torkta salınmalara (dalgalanmalara) ve dolayısı ile tork kalitesinde düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca motorun daha gürültülü çalışmasında da aktif rol oynamaktadır.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde hava aralığında meydana gelen düzensiz akı dağılımlarının harmonik olarak nitelendirildiği ve kutup/oluk geçişleri, rotor gövdesi akı yolunun asimetrik oluşu ve stator sargı tasarımı gibi birçok tasarım özelliğinin söz konusu harmoniklerin üretilmesinde etkili olabildiği görülmüştür. Temelde stator kutup ve dişlerinden akan manyetik akının rotoru belirli bir pozisyonda tutmaya çalışmasından kaynaklanan motor harmoniklerinin mil torkundaki olumsuz etkisi normal çalışma rutininde bile gözlemlenebilmektedir (Ortega ve Xu, 2017). Garner tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada harmonikler kaynaklı tork dalgalanmalarının büyük oranda stator dişlerinin tasarımına bağlı olduğu vurgulanırken, stator oluk açıklıklarına yer verilmemesi durumunda sifra kadar indirilebileceği belirtilmiştir. Ne var ki stator üretim sürecinde, stator bobinlerinin yerleştirilebilmesi için açık oluk kullanılmakta ve bu da hava aralığındaki manyetik dengesizliğe neden olmaktadır (Garner, 2015).

Rotoru belirli bir pozisyonda tutmaya çalışan tork bileşeni literatürde tutma torku olarak geçmektedir. SM içeren motorlarda, motor duruyorken motor mili el ile çevrildiğinde bile hissedilebilen bu tork bileşeninin azaltılmasına yönelik literatürde birçok çalışmaya rastlanmaktadır.

Garner (2015)'e göre harmoniklerin bastırılması ve tutma torkunun azaltılmasına yönelik yapılan araştırmaları rotor ya da statorun kaykılı üretilmesi, her kutup için kesirli oluklara yer verilmesi ve miknatıs kutup uzunluğunun optimize edilmesi olmak üzere üç ana başlıkta toplanmıştır (Garner, 2015). Bununla beraber konu ilgili yapılan araştırmalar akı bariyeri tasarımı, stator ve rotor oluk geometrisi, oluklar ve SM'nin hava aralığına yakınlığı, değişken SM kalınlığı kullanılması gibi tasarım parametrelerinde iyileştirme yapılarak da tork dalgalanmalarında azalma elde edilebileceğini göstermiştir (Stephens ve ark., 1998; Islam ve ark., 2009; Islam ve ark., 2011; Hombitser ve ark., 2014).

Tasarımın standartlara uygunluğu

Önceki bölümlerde de tartışıldığı gibi elektrik motorları pazarında çalışma koşullarına cevap verebilecek birçok ürün mevcut olmakla beraber pazara sunulan motorlar uluslararası düzeyde kabul gören standartlar ile karakterize edilmektedir (De Almeida ve ark., 2008; De Almeida ve ark., 2011). Elektrik motoru üreticileri tarafından da kabul gören bu standartlar ile piyasaya sunulan elektrik motorlarının çerçeve boyutları, çalışma karakteristikleri ve çalışma şartları gibi birçok konuda düzenleme yapılmaktadır (Brunner ve ark., 2007).

Yukarıda sözü geçen elektrik motoru standartları büyük oranda motorun kullanımına yönelik olup motor üreticileri için bağlayıcı nitelik taşımaktadır. Buna ek olarak motorda kullanılan, sarım teli, laminasyon çeliği, izolasyon ve SM malzemeleri de belirli standartlarda piyasa sunulmaktadır. Söz konusu standart malzemeler daha kolay ve ekonomik şekilde temin edilebilmekte, dolayısı ile elektrik motoru üreticileri tarafından da kabul görmektedir. Öyle ki standart olarak uluslararası pazara sunulmayan bir üretim materyalinin temin edilmesi hem meşakkatli hem de oldukça maliyetli olabilmektedir. Buna ek olarak söz konusu standartlarda piyasaya sunulan üretim malzemelerinin manyetik, ısıl ve mekanik başta olmak üzere birçok karakteristik özelliği temin edilen firma tarafından sağlanmaktadır. Karakteristik özellikleri iyi bilinen malzemelerin kullanılması ise tasarım sürecinde avantaj sağlamaktadır.

Az bakım gerektirme

Geleneksel kısa devre kafesli ASM'lerin tercih edilme nedeni, satın alma maliyetinin diğer motorlara göre daha düşük olmasının yanı sıra kuşkusuz az bakım gerektirmeleri ile de alakalıdır. Sincap kafesli ASM'lerde olduğu gibi ŞK-RASM'lerin de fırça-kollektör tertibatı gibi elektriksel bağlantı içermemesi neticesinde ŞK-RASM'ler daha az bakıma ihtiyaç duymaktadır. Yine de yapısında SM içeren bu motorlar, ASM'lere göre daha narin bir karakteristiğe sahiptir. Öyle ki tasarımın özenli yapılmaması, motorun aşırı yüklenme veya uzun süreli geçici rejimde çalıştırılması gibi olağan dışı kullanımlarda motor aşırı ısınmaktadır. Rotorun SM içermesi neticesinde söz konusu ısınmaları mevcut ASM'ler kadar tolere edememektedir. Literatürde yapılan birçok çalışmada da üzerinde durulduğu gibi rotor nüvesinde meydana gelen sıcaklık artışları SM'lerin demagnetizasyon riskini

attırmaktadır. Dahası SM'lerin arıza vermesi durumunda, aynı özellik ve ölçülerde SM'nin temin edilmesi oldukça maliyetli olabilmektedir. Gömülü tip SM kullanılan tasarımlarda ise manyetik ya da mekanik olarak deforme olan SM'lerin nüveden çıkarılarak yenisi ile değiştirilmesinin bazı durumlarda olanaksız dahi olabileceği görülmüştür. Buna ek olarak motorda meydana gelen sıcaklık artışı SM'lerin yanında motor izolasyonunda da deformasyona neden olabilmektedir. Söz konusu durumda özellikle stator performans kaybı ve kısa devreler oluşabilmektedir. Oluşan arıza ise stator sarımlarının bir kısmının ya da tamamının tekrar sarılması ve sargılar ile oluk arasındaki izolatörlerinin yenilenmesi ile giderilebilmektedir.

Son olarak burada üzerinde durulması gereken bir diğer konuda ŞK-RASM'lerin en önemli kronik sorunlarından olan mil tokundaki dalgalanmalardır. Stator dış ve oluklarında akan manyetik alanın rotoru belirli konumda tutmaya çalışmasından ileri gelen ve hava aralığında düzensiz akı dağılımlarına neden olan bu durum motorun titreşimli ve gürültülü çalışmasına neden olmaktadır. Söz konusu titreşim etkileri motor mekanik aksamının daha kolay arıza vermesine neden olabilmektedir. Tork dalgalanmaları ve söz konusu dalgalanmaların azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar ilgili başlık altında detaylı olarak ayrıca incelenmiştir.

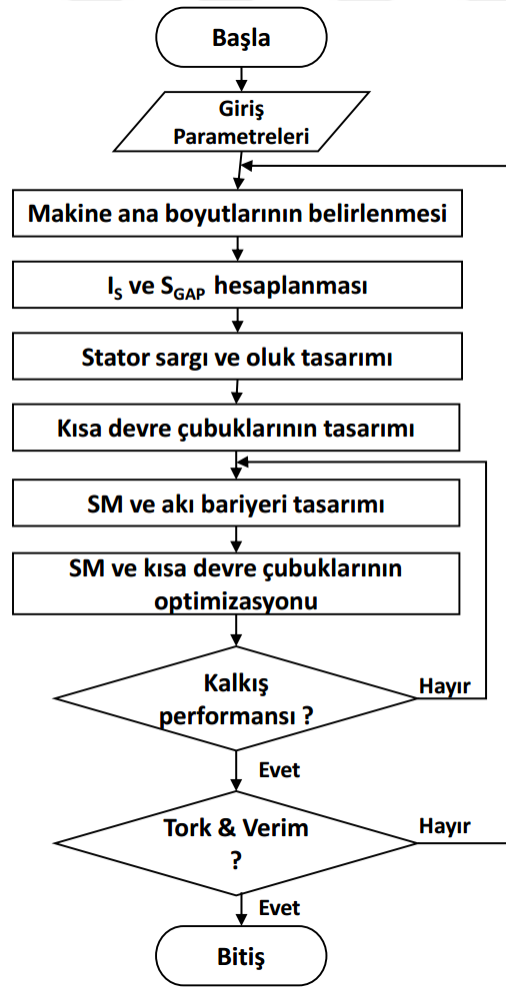
3.1.2. Tasarım algoritması

ASM'lerin tasarım süreci oldukça karmaşık olmakla beraber literatürde birçok defa tartışılmış bir konudur (Zöhra ve Akar, 2016). ŞK-RASM'ler yapı olarak büyük oranda ASM'lere benzemekte fakat yapısında SM'lerin yer alması neticesinde tasarım sürecini daha da karmaşık bir hale getirmektedir. ŞK- RASM tasarımında öncelikle hedeflenen gücü sağlayacak ASM'nin tasarlanması daha sonra rotora SM'lerin yerleştirilmesi tercih edilen bir yöntemdir (Dosiek ve Pillay, 2007; Boldea ve Tutelea, 2010; Rabbi ve Rahman, 2013; Elistratova, 2016; Jedryczka ve ark., 2018). Hedeflenen motor tasarımının elde edilmesi için oluk ve mıknatıs tasarımında iyileştirme çalışmaları yürütülmelidir. Şekil 3.8'de optimal ŞK-RASM tasarım algoritması görülmektedir (Zöhra ve ark., 2018).

Tasarım sürecine öncelikle motorun ana boyutlarının (Stator dış çapı, D_{so} , Stator iç çapı, D_{si} , Laminasyon uzunluğu (Stack length), l ve Hava aralığı, δ) belirlenmesi ile başlanması oldukça pratiktir. Bir kez ana boyutları belirlenen motorun, motor çıkış

gücüne bağlı olarak hava aralığı gücü (S_{GAP}) belirlenebilmektedir. Belirlenen S_{GAP} değeri kullanılarak stator sarım ve oluk tasarımı yapılabilmektedir. Son olarak rotor tasarımı yapılarak tasarım süreci tamamlanmaktadır.

ŞK-RASM tasarımında hedef öncelikle motorun kendi kendine senkronlanabilmesidir. Senkronlama sürecinde başarısız olan motorun SM ve kısa devre kafesi tasarımında güncelleme yapılarak senkronizasyon performansı tekrar değerlendirilmelidir. Tatmin edici düzeyde senkronizasyon performansı sunan tasarımın kararlı çalışma esnasındaki mil torku karakteristiği ve verimi kontrol edilmektedir. Tork karakteristiği veya verimi tatmin edici olmayan motor tasarımında tasarım süreci motor ana boyutlarında ve/veya SM tasarımında güncelleme yapılarak tekrarlanmalıdır.

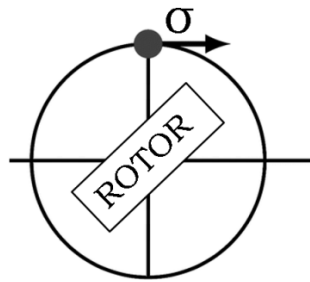


Şekil 3.8. Optimal ŞK-RASM tasarım algoritması

3.1.3. Makine ana boyutlarının belirlenmesi

ŞK-SMSM'lerde motor ana boyutlarının belirlenmesi oldukça özen gerektiren bir konudur. Motor gövdesinin gerekenden büyük seçilmesi neticesinde SM ve olukların motor gövdesine yerleştirilmesi oldukça kolaylaşmaktadır. Fakat yapılan bu tercih ile motorun üretimi için daha fazla üretim malzemesi (laminasyon çeliği, alüminyum, bakır vb.) gerekmekte sonuç olarak daha ağır gövdeli, üretim maliyeti yüksek bir motor tasarımı elde edilmektedir. Motor gövdesinin gerekenden küçük seçilmesi durumunda ise hedeflenen S_{GAP} değerini karşılayacak oluk tasarımı ve SM'nin motor gövdesine sığdırılması problem olabilmektedir. Motor gövdesine stator manyetik alanının etkisinin yanısıra SM'ler tarafından üretilen manyetik akının da etki ettiği göz önünde bulundurulduğunda küçük seçilen motor gövdesinde özellikle de stator boyunduruğunda doyumlar aşırı artış göstermekte bu da motor veriminde gözle görünür düşüşe neden olmaktadır. Son olarak seçilen motor gövdesi boyutlarının mevcut standart çerçeve boyutları ile uyumlu olması tasarımın standartlara uygunluğu açısından önem arz eden bir konudur.

Boldea ve Nasar (2011)'a göre ihtiyaç duyulan çıkış gücüne sahip motor ana boyutları rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvetten (σ), (Şekil 3.9) ya da hava aralığı gücünden yola çıkılarak belirlenebilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).



Şekil 3.9. Rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvet

Pyrhnen ve ark. (2008) tarafından motor tipine göre rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvetler detaylı olarak incelenerek karakterize edilmiştir (Pyrhnen ve ark., 2008). Tez çalışmasına konu olan ŞK-RASM'ler yapı olarak ASM'lerin yanı sıra SM motor ve senkron motorların da çalışma karakteristiğine sahiptir. Sorgdrager (2014) ile yapılan çalışmaya göre, ŞK-RASM'ler için rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel

kuvvetler, Pyrhnen ve ark. (2008)'nin çalışmaları da göz önünde bulundurularak Çizelge 3.1'deki gibi kabul edilebilmektedir (Sorgdrager, 2014).

Çizelge 3.1. ŞK-RASM'ler için rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvet aralıkları

	Teğetsel kuvvet, (σ , Pa)
En az	12000
Ortalama	21500
En Çok	33000

Rotor gövdesinden alınan tork, rotor yüzeyine etki eden teğetsel kuvvet etkisi ile meydana gelmektedir. Teğetsel kuvvete (σ) bağlı olarak motor anma torku (T_{anma}) Eşitlik 3.7. ile hesaplanabilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

$$T_{anma} = \frac{\pi \sigma D_r^2 l}{2} \quad (3.7)$$

Eşitlikte görülen D_r , rotor çapını göstermektedir. Verilen eşitlik ile elektrik makinelerinin boyutlandırılmasında yaygın olarak kullanılan $D_r^2 l$ katsayısı (Boldea ve Nasar, 2001; Pyrhnen ve ark., 2008; Boldea ve Tutelea, 2010) hesaplanabilmektedir. $D_r^2 l$ katsayısından D_r ve l bileşenlerinin ayrılmasında ise motor paket oranından (λ) (Boldea ve Nasar, 2001) ya da $X = D_r/l$ oranından (Pyrhnen ve ark., 2008) yararlanılabilmektedir. Pyrhnen ve ark. (2008)'na göre X değeri Eşitlik 3.8'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$X = \frac{\pi}{2p} \sqrt[3]{p} \quad (3.8)$$

Eşitlikte görülen, p değeri motor kutup çifti sayısını göstermektedir. Pyrhnen ve ark. (2008)'na göre hesaplamalar sonucunda elde edilen X değerinin yüksek performans için $X \cong 1$ civarında olması gerekmektedir. Çok düşük güçlü motorlar hariç mevcut uygulamalarda kullanılan standart ölçülerle de D_r/l oranının $X \cong 1$ civarında olduğu görülmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

Motor ana boyutlarının belirlenmesinin yanında diğer bir önemli husus da motor hava aralığının (δ) hesaplanmasıdır. Hava aralığı, motor gücüne (P_n) ve kutup sayısına (p) bağlı olarak Eşitlik 3.9'daki gibi hesaplanabilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

$$\delta = \frac{0.2+0.01P^{0.4}}{1000} m; \quad p = 2 \quad (3.9)$$

$$\delta = \frac{0.18+0.006P^{0.4}}{1000} m; \quad p > 2$$

$D_f^2 l$ katsayısının belirlenmesinde rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvetin yanı sıra, faydalanma katsayısı olarak bilinen Esson sabiti, (C_0) kullanılabilir. C_0 katsayısı, S_{GAP} 'in bir fonksiyonu olarak Eşitlik 3.10'daki gibi hesaplanabilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).

$$D_{si}^2 l = \frac{1}{C_0} \frac{60}{n_1} \frac{K_E P_n}{\eta \cos \varphi} \quad (3.10)$$

Eşitlikte n_1 senkron hızı, η motor verimi, P_n motor çıkış gücünü, $\cos \varphi$ hedeflenen güç katsayısı göstermektedir. $K_E : 0.98 - 0.005p_1$ olup kutup sayısına bağlı olarak hesaplanan MMK sabitidir (Boldea ve Nasar, 2001).

Eşitlik 3.10. ile verilen $D_{si}^2 l$ katsayısındaki D_{si} , stator iç çapını göstermektedir. Dolayısı ile D_{si} ve l 'nin hesaplanmasında Eşitlik 3.8 ve 3.9'dan yararlanılabilmektedir. Alternatif bir yaklaşımla D_{is} ve l 'nin belirlenmesinde, l 'nin stator sargısı kutup adımına (τ) oranını gösteren, paket oranı (λ) kullanılabilir (Akman ve Ürkmez, 2004). Paket oranı (λ), τ ve l 'ye bağlı olarak Eşitlik 3.11'deki gibi ifade edilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).

$$\lambda = \frac{L}{\tau} = \frac{2lp_1}{\pi D_{si}} \quad (3.11)$$

Boldea ve Nasar (2001)'a göre elde edilen tecrübeler ışığında λ , kutup sayısına bağlı olarak Çizelge 3.2'ye göre seçilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).

Çizelge 3.2. Paket oranları

$2p$	2	4	6	8
λ	0.6-1.0	1.2-1.8	1.6-2.2	2-3

3.1.4. Stator tasarımı

Hedeflenen motor çıkış gücünü sağlayacak stator tasarımının yapılması ile ilgili detaylar bu başlık altında incelenmektedir. Stator tasarımında öncelikle stator oluk sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Stator oluk sayısı, Q_s Eşitlik 3.12. ile hesaplanabilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).

$$Q_s = 2pmq_s \quad (3.12)$$

Eşitlikte görülen m , faz sayısını, q_s statorun bir kutuptaki oluk sayısını göstermektedir. Stator oluk sayısına bağlı olarak hesaplanan bir diğer önemli parametre de Eşitlik 3.13. ile hesaplanan τ_{us} , oluk adımıdır (Boldea ve Tutelea, 2010).

$$\tau_{us} = \pi D_s / Q_s \quad (3.13)$$

Stator sargılarının tasarımında öncelikle stator sarım faktörünün (k_{w1}) hesaplanması gerekmektedir (Mergen ve Kocabaş, 2007). Bu değer kirişleme faktörü, k_{ps1} ve dağılma faktörü, k_{ds1} 'e bağlı olarak Eşitlik 3.14'deki hesaplanmaktadır.

$$k_{w1} = k_{ps1}k_{ds1} = \sin\left(\frac{W\pi}{\tau_p 2}\right) \frac{\sin\frac{\pi}{2m}}{q \sin\frac{\pi}{2mq}} \quad (3.14)$$

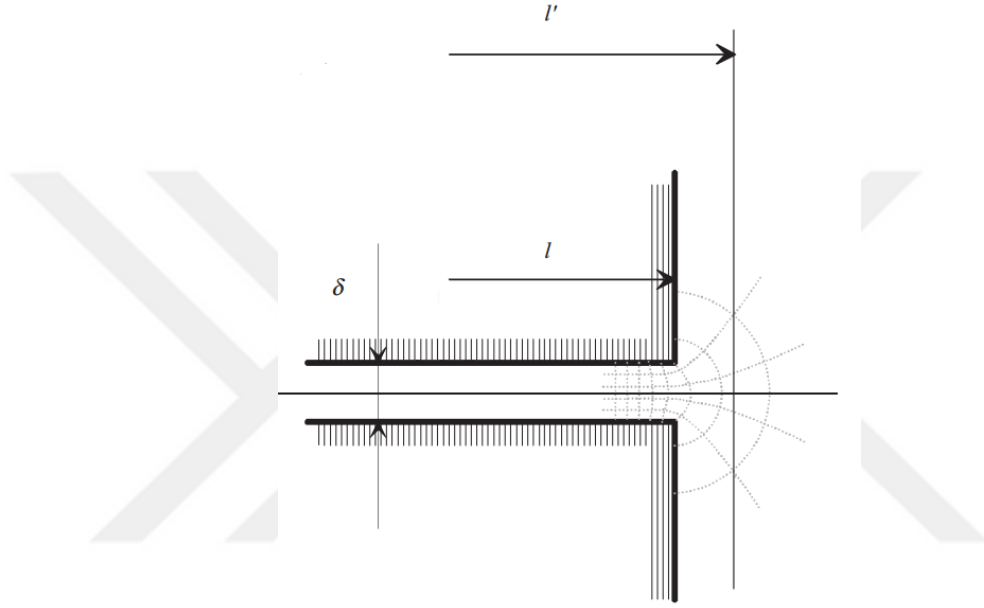
Çalışmanın sonraki adımında, Eşitlik 3.15. kullanılarak statorun bir sarım serisindeki spir sayısı, N_s hesaplanmaktadır (Boldea ve Nasar, 2001).

$$N_s = \frac{\sqrt{2}E_m}{w_s k_{w1} l' \tau_p \alpha_i B_\delta} \quad (3.15)$$

Eşitlikte yer alan E_m terminal akımı göstermekte ve ASM'ler için faz akımının (I_{ph1}) yaklaşık 0.97 katına karşılık gelmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008). Eşitlikte yer alan l' , kullanılabilir paket boyunu, α_i , kutuptaki ortalama akı yoğunluğunu göstermektedir. Eşitlikte görülmekte olan τ_p , kutup adımına karşılık gelmekte ve Eşitlik 3.16'daki gibi hesaplanmaktadır (Boldea ve Nasar, 2001).

$$\tau_p = \pi D_{si}/2p \quad (3.16)$$

Pyrhnen ve ark. (2008)'na göre laminasyon bitiminde meydana gelen saçaklanmalar nedeni ile kullanılabilir paket boyu, l' , fiziksel paket boyundan hava aralığı kadar daha büyük olmaktadır (Pyrhnen ve ark., 2008). Sargı sonunda meydana gelen saçaklanma etkisi ve kullanılabilir paket boyu Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. Kullanılabilir paket boyu (Pyrhnen ve ark., 2008)

Saçaklanmaların laminasyonun iki tarafında meydana geldiği göz önünde bulundurulduğunda, l' Eşitlik 3.17'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$l' = l + 2\delta \quad (3.17)$$

Son olarak Eşitlik 3.15'te görülmekte olan B_δ hava aralığında meydana gelen akı yoğunluğunu göstermektedir. Bu değer Boldea ve Nasar (2001)'e göre Çizelge 3.3 ile verilen sınırlar içinde kalmalıdır (Boldea ve Nasar, 2001).

Çizelge 3.3. Tavsiye edilen hava aralığı akı yoğunluğu aralıkları

	$2p$	En çok	En az
Hava aralığı akı yoğunluğu, B_δ	2	0.75T	0.5T
	4	0.78T	0.65T
	6	0.82T	0.7T
	8	0.85T	0.75T

Elde edilen N_s değerine bağlı olarak oluktaki iletken sayısı z_{Q_s} Eşitlik 3.18'deki gibi hesaplanmaktadır (Boldea ve Nasar, 2001).

$$z_{Q_s} = \frac{2am}{Q_s} N_s \quad (3.18)$$

Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta Eşitlik 3.18'de de görüldüğü gibi hesaplanan N_s değerinin (bkz. Eşitlik 3.15.) pq_s 'nin katı olması gerektiğidir. Bu nedenle elde edilen N_s değerinin, pq_s 'nin katı olacak şekilde tekrar düzenlenmesi gerekmektedir. Eşitlikte görülen a , serideki paralel iletken sayısını göstermektedir.

Elde edilen veriler ışığında stator geometrik hesaplamaları yapılarak stator tasarımı tamamlanacaktır. Bu kapsamda öncelikle stator dış genişliğinin en küçük değerinin hesaplanması gerekmektedir. Daha sonraki adımda stator dişleri arasına olukların yerleştirilmesi yapılacaktır. Stator dış genişliği (b_{ds}) Eşitlik 3.19'daki hesaplanabilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

$$b_{ds} = \frac{l' \tau_{us}}{k_{Fe}} \frac{B_{\delta}}{B_{ds}} + 0.1 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Eşitlikte görülen k_{Fe} , paket boşluk oranına karşılık gelmekte olup laminasyon sacları arasında meydana gelen boşluğun etkisini göstermektedir. B_{ds} stator dişinde meydana gelen akı yoğunluğuna karşılık gelmektedir. Bu değer Boldea ve Nasar (2001)'e göre Çizelge 3.4 ile verilen sınırlar içinde kalmalıdır (Boldea ve Nasar, 2001).

Çizelge 3.4. Akı sınırlamaları

B_{ys}, B_{yr}	Rotor/Stator boyunduruk akı yoğunluğu	1.4-1.7 T
B_{ds}, B_{dr}	Rotor ve stator dişleri akı yoğunluğu	1.5-2.1 T

Çalışmanın bir sonraki adımında stator oluklarının boyutlandırılması yapılacaktır. Hesaplamalarda öncelikle stator akımı ve bu akımı taşımak için gereken oluk alanı hesaplanacaktır. Daha sonra elde edilen verilerden yararlanarak seçilen oluk tasarımı için oluk yüksekliği ve genişliği hesaplanacaktır. Stator akımı, (I_s) Eşitlik 3.20'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$I_s = \frac{P}{m\eta V_{ph1} \cos \varphi} \quad (3.20)$$

Hesaplanan stator akımını taşıyacak iletken yolu kesiti (S_{cs}) Eşitlik 3.21 ile elde edilebilmektedir.

$$S_{cs} = \frac{I_s}{a_1 J_s} \quad (3.21)$$

Eşitlikte yer alan J_s , sargılarda meydana gelen akım yoğunluğunu göstermekte olup Çizelge 3.5 ile verilen sınırlamalar içinde kalmasına özen gösterilmelidir. Eşitlikte görülen serideki paralel iletken sayısı, a_1 düşük güçlü motorlarda 1 ile 3 arasında seçilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008)

Çizelge 3.5. Akım yoğunluğu sınırlamaları

J_s	Stator sargıları akım yoğunluğu	3-8 A/mm ²
J_r	Alüminyum rotor çubukları akım yoğunluğu	3-6.5 A/mm ²

Elde edilen S_{cs} 'e bağlı olarak oluk alanı, S_{us} Eşitlik 3.22 ile hesaplanabilmektedir.

$$S_{us} = \frac{z_{Q_s} S_{cs}}{k_{Cu}} \quad (3.22)$$

Eşitlikte görülen k_{Cu} alan faktörü olarak isimlendirilmekte ve sargı malzemesi, gerilim seviyesi ve sargı tipine göre belirlenmektedir (Boldea ve Tutelea, 2010).

Elde edilen veriler ışığında stator oluklarının boyutlandırılması ve stator dişleri arasına yerleştirilmesi yapılabilmektedir. Şekil 3.11 ile yüksek verimli ASM'lerde tercih edilen stator oluk geometrisi ve tasarım parametreleri gösterilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

arttırılarak kesitin azaltılması amacı ile kullanılmaktadır. Son olarak hesaplamalar sonucunda elde edilen nihai d_{Co} değerinin temin edilebilirlik ve maliyet açısından standartlara göre tekrar düzenlenmesi gerekebilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).

Çalışmanın buraya kadar olan bölümünde, ŞK-RASM tasarım sürecinin anlaşılması açısından da önem arz eden motor ana boyutlarının belirlenmesi ve stator tasarımı konuları detaylı olarak incelenmiştir. Tez çalışmasında halihazırda endüstrinin kullanımına sunulan mevcut bir ASM'nin sadece rotorunun yeniden tasarlanarak daha verimli hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla stator tasarımı halihazırda piyasa sunulan IEC 60034-30-1 standardında 5.5 kW IE2 bir ASM'den alınmıştır. Oluk sayısı $Q_s = 36$ olan stator tasarımına ait motor ana boyutları Çizelge 3.6'da ve stator sarım detayları Çizelge 3.7'de görülmektedir.

Çizelge 3.6. Referans alınan motor ana boyutları

Gövde	Çıkış gücü	Paket boyu, l	Stator dış çapı, D_{so}	Stator iç çapı, D_{si}
132s	5.5 kW	125mm	200mm	125mm

Çizelge 3.7. Stator tasarım detayları

Sargı katmanı	Sargı tipi	Oluktaki iletken sayısı	Bobin adımı	Paralel iletken sayısı	İletken çapı	Sac Tipi	Oluk sayısı	Paket oranı
2	Tam kalıp	28	7	3	0.9116	M330 50A	36	0.96

Çalışmada stator tasarımının doğrudan standart bir ASM'den alınması neticesinde D_{so} , D_{si} ve l zaten bilinmektedir (bkz. Çizelge 3.6). Buna ek olarak yeni rotor tasarımı için hava aralığı uzunluğunun yeniden belirlenmesi gerekmektedir (bkz. Eşitlik 3.9.).

Analitik olarak belirlenen hava aralığı uzunluğu, δ standart ASM'lerin modellenmesi için gereken ideal değerdir. Tasarım kriterlerinde de üzerinde durulduğu gibi ŞK-RASM'lerde hava aralığının çok küçük seçilmesi durumunda SM tarafından üretilen frenleme torku ve SM'lerin demagnetizasyon riski artmaktadır (bkz. Bölüm 3.2.1). Dolayısı ile bu değer analitik değerlerden daha büyük seçilmesi gerekebilmektedir. Son olarak referans alınan standart IE2 ASM'nin etiket bilgileri Çizelge 3.8'deki gibidir.

Çizelge 3.8. Referans alınan motor etiket değerleri

Mil Gücü	Anma akımı	Motor devri	Güç Faktörü	Verim	Kalış akımı	Anma Momenti	Kalkış momenti	Ağırlık
5.5kW	11.8A	1440d/d	0.83	%85	7 p.u.	36,5Nm	2.3p.u.	63kg

Çizelge 3.8. ile sunulan tabloda, stator tasarımı referans alınan orta güç segmenti alt sınırındaki (5.5 kW) standart ASM'nin etiket değerleri görülmektedir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere stator tasarımında IE2 ($\eta=\%85$) verimlilikte piyasada yaygın olarak tercih edilen bir motor kullanılmıştır. Önceki bölümlerde de üzerinde durulduğu gibi söz konusu motorun rotoru yeniden modellenerek, motorun veriminin artırılması amaçlanmıştır. Diğer bir yandan ŞK-RASM'lerin tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar stator tasarımının da motor verimi ve tork karakteristiğinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Dolayısı ile stator tasarımı alınan ASM'nin yüksek verimli olması (IE3), çalışma ile tasarlanan SM motorun performansında da etkili olacaktır. Tez çalışması ile piyasada yaygın olarak tercih edilen ASM'lerin daha verimli hale getirilmesine yönelik bir tasarımın elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle stator tasarımında, alım maliyeti açısından daha ekonomik, ortalama verimlilikte bir motor tercih edilmiştir.

3.1.5. Rotor tasarımı

ŞK-RASM rotoru tasarımı oluk tasarımı ve SM tasarımı olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Tasarım sürecinde öncelikle tercih edilecek rotor topolojisinin belirlenmesi daha sonra kısa devre kafesi tasarımı ve son olarak ihtiyaç duyulan SM miktarının rotor gövdesine yerleştirilmesi tasarım sürecini oldukça pratikleştirmektedir.

Oluk tasarımında, stator tasarımında olduğu gibi öncelikle dış genişliğinin en küçük değeri hesaplanmıştır. Sonraki adımda dış aralarına rotor olukları yerleştirilmiştir. Rotor dış genişliği (b_{dr}) Eşitlik 3.28'deki gibi hesaplanabilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001; Boldea ve Tutelea, 2010).

$$b_{dr} = \frac{l' \tau_r}{k_{Fe}} \frac{B_{\delta}}{B_{dr}} + 0.1 \text{ mm} \quad (3.28)$$

Eşitlikte görülen B_{dr} değeri rotor dişi akı yoğunluğunu göstermekte ve statorda olduğu gibi Çizelge 3.4'den seçilmesi gerekmektedir. Bir sonraki adımda rotor akımı ve bu akımı taşımak için gereken oluk alanı hesaplanacaktır. Rotor akımı (I_r) stator akımına bağlı olarak Eşitlik 3.29'daki gibi hesaplanmaktadır (Pyrhnen ve ark., 2008).

$$I_r = \frac{z_{Q_s} Q_s}{a Q_r} I_s \cos \varphi \quad (3.29)$$

Rotor akımına bağlı olarak kısa devre halkası akımı (I_{halka}) Eşitlik 3.30. ile hesaplanabilmektedir (Boldea ve Tutelea, 2010).

$$I_{halka} = \frac{I_r}{2 \sin(\pi p / Q_r)} \quad (3.30)$$

Elde edilen akım değerleri için gereken rotor oluk alanı, S_{cr} ve kısa devre halkası alanı, S_{chalka} sırası ile Eşitlik 3.31 ve 3.32 ile hesaplanabilmektedir (Boldea ve Tutelea, 2010).

$$S_{cr} = \frac{I_r}{J_r} \quad (3.31)$$

$$S_{chalka} = \frac{I_{halka}}{J_{halka}} \quad (3.32)$$

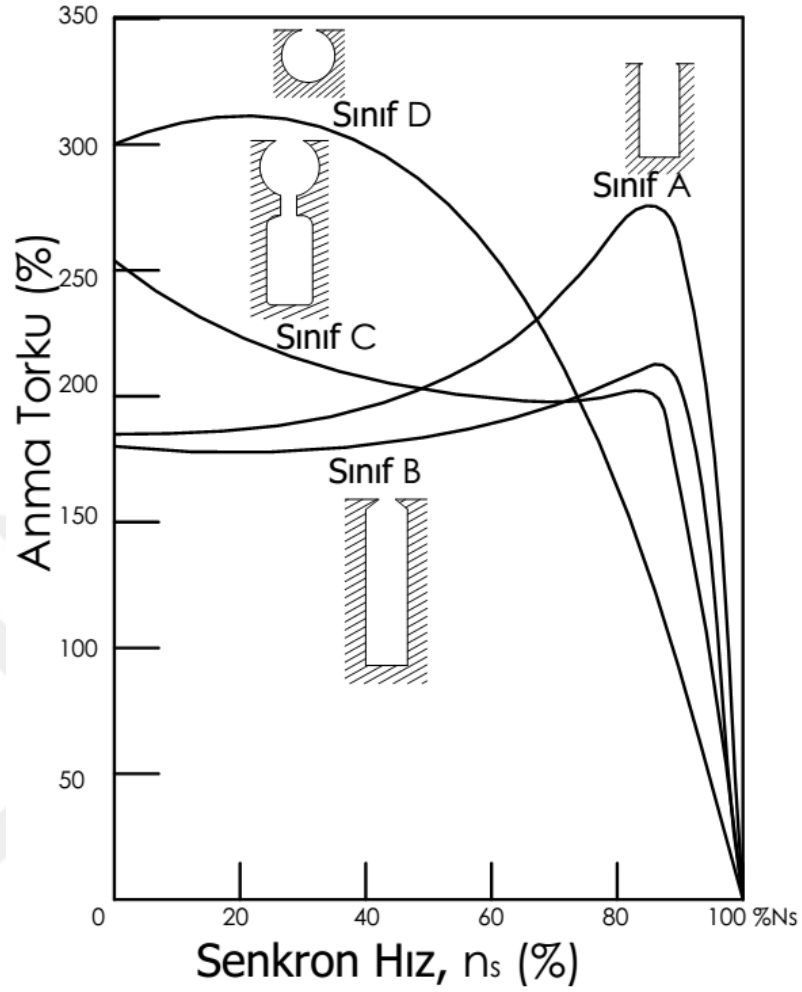
Eşitliklerde görülen (J_r, J_{halka}) değerleri sırası ile rotor çubuklarında ve kısa devre halkalarında meydana gelen akım yoğunluklarını göstermektedir. J_r , statorda olduğu gibi Çizelge 3.5'den seçilmelidir. J_{halka} ise Boldea ve Nasar (2001)'a göre $J_{halka} = 0.75J_r$ olarak kabul edilmektedir. Çalışmanın bu adımında rotor oluk sayısının (Q_r) ve rotor oluk tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Tork dalgalanmalarının meydana gelmemesi ve harmoniklerinin en aza indirilmesi açısından rotor oluk sayısının doğru seçilmesi gerekmektedir. Boldea ve Nasar (2001) tarafından tavsiye edilen oluk sayıları Çizelge 3.9'da görülmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).

Çizelge 3.9. Tavsiye edilen oluk sayısı oranları (Boldea ve Nasar, 2001)

$2p$	Q_s	Q_r							
2	24	18	20	22	28	30	33	34	
	36	25	27	28	29	30	43		
	48	30	37	39	40	41			
4	24	16	18	20	30	33	34	35	36
	36	28	30	32	34	45	48		
	48	36	40	44	57	59			
	72	42	48	54	56	60	61	62	68
6	36	20	22	28	44	47	49		
	54	34	36	38	40	44	46		
	72	44	46	50	60	61	62	82	83
8	48	26	30	34	35	36	38	58	
	72	42	46	48	50	52	56	60	
12	72	69	75	80					
	90	86	87	93	94				

Ünlükaya ve ark. tarafından yapılan çalışmada ASM tasarımında birçok farklı tipte oluk geometrisinin tercih edilebileceği üzerinde durulmuştur (Ünlükaya ve ark., 2014). Diğer bir yandan NEMA (Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği) tarafından oluk tipleri çalışma karakteristiklerine göre dört farklı tipte sınıflandırılmıştır (Anonim, 2003).Yapılan bu sınıflandırmaya göre, oluk tork karakteristikleri Şekil 3.12’de görülmektedir (Chapman, 2004; Anonim, 2019f).

ŞK-SMSM’ler motor ataletini ve SM tarafından üretilen frenleme torkunu yenerek kalkış yapabilmektedir. Bu da motorun senkronlama problemi yaşamaması için performansı yüksek bir kafes tasarımının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca motorun çalışma esnasında senkron hızdan düşmesi durumunda, kalkış sargılarının motoru tekrar senkronlanması gerekmektedir. Bu nedenle seçilen topolojiye uygun olarak doğru oluk geometrisinin tercih edilmesi önem arz eden bir konudur.



Şekil 3.12. Nema standart rotor oluk yapıları ve motor kalkış performansına etkileri (Chapman, 2004; Anonim, 2019f)

Oluk geometrisi belirlendikten sonra rotor dişlerinden kalan boşluklara olukların dizilimi yapılmaktadır. Olukların rotor üzerinden dizilmesi işlemi, oluk genişliği, b_{4r} , oluk alanı, (S_{cr}) 'e bağlı olarak Eşitlik 3.33'deki gibi yapılabilmektedir. Ayrıca söz konusu oluk tipi için oluk genişliği, b_{4r} ve yüksekliği, h_r birbirine eşit olmaktadır ($h_r = b_{4r}$).

$$b_{4r} = \sqrt{\frac{4S_{cr}}{\pi}} \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.33 ile hesaplanan oluk genişliği yuvarlak oluk tipinin (Sınıf D, bkz. Şekil 3.12) tercih edilmesi durumunda geçerli olup oluk genişliğinin alabileceği en yüksek değerine karşılık gelmektedir. Dolayısı ile farklı bir oluk tipi seçilmesi durumunda, oluk

genişliğinde de azalma elde edilebilmektedir. Söz konusu durumda oluk derinliği artacaktır. Bu da gömülü tip SM tercih edilen tasarımlarda, boyundurukta SM ve akı bariyeri için yeterli alanın kalmamasına neden olabilmektedir. Burada üzerinde durulması gereken bir diğer konu da olukların rotor yüzeyine uzaklığı (oluk ağız yüksekliği), (h_{1r}) ve oluk ağız açıklığıdır, (b_{1r}). Açık oluk tercih edilen tasarımlarda ek olarak (h_{1r}) ve (b_{1r}) değerlerinin belirlenmesinde teknolojik limitler göz önünde bulundurulmalıdır (Boldea ve Nasar, 2001).

Kısa devre halkası alanı, (S_{cring}), oluk yüksekliği, (h_r) ve olukların rotor yüzeyine uzaklığı, (h_{1r}) kullanılarak kısa devre halkası yüksekliği, (b_r) ve genişliği, (a_r) hesaplanabilmektedir. Söz konusu (b_r) değeri analitik olarak Eşitlik 3.34'teki gibi hesaplanabilmektedir.

$$b_r = h_r + h_{1r} \quad (3.34)$$

Boldea ve Nasar (2001)'e göre, gerçek b_r değeri, analitik olarak elde edilen değerden çok az daha büyük olması gerekmektedir. Gerçek (b_r) değeri Eşitlik 3.35'teki gibi hesaplanabilmektedir (Boldea ve Nasar, 2001).

$$b_r = (1.1.2)(b_{4r} + h_r) \quad (3.35)$$

Nihayetinde elde edilen b_r değerine göre a_r genişliği Eşitlik 3.36'daki gibi hesaplanabilmektedir.

$$a_r = \frac{Scr}{b_r} \quad (3.36)$$

3.1.6. SM tasarımı

Önceki bölümlerde yapılan çalışmalar ile yüksek verimli bir ASM'nin tasarım süreci detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde ASM rotoruna SM'lerin yerleştirilmesi ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Yapılan hesaplamalarda hedeflenen hava aralığı gücünü sağlayacak miktarda SM'nin rotor gövdesine yerleştirilmesi esas alınmıştır.

SM boyutları uygulamaya göre özel olarak belirlenmektedir. Akı yolu manyetik geçirgenliğinin SM ve hava aralığına göre sonsuz kabul edilmesi koşulu ile SM akı yoğunluğu ile hava aralığı akı yoğunluğu birbirine eşit kabul edilebilmektedir (Eşitlik 3.37).

$$\phi_{\delta} = \phi_{pm} \quad (3.37)$$

Eşitlik 3.37'deki kabul ile kaçak akı ve saçak etkisi kısıtlamaları da göz ardı edilmiştir. Bu kabullerin ışığında Eşitlik 3.38 ve 3.39 yazılabilmektedir (Fitzgerald ve ark, 2003; Garner, 2015).

$$A_{mag}B_{mag} = A_{\delta}B_{\delta} \quad (3.38)$$

$$B_{\delta} = \frac{A_{mag}}{A_{\delta}} B_{mag} \quad (3.39)$$

Eşitlikte görülen B_{mag} , SM akı yoğunluğunu, A_{mag} SM alanını, A_{δ} ise hava aralığı kesit alanını göstermektedir. Son olarak mıknatıs boyutlarının belirlenebilmesi için SM malzemesi ve sınıfının belirlenmesi gereklidir.

Dünyanın doğal kaynaklarının sınırlı olduğu göz önüne alındığında, daha iyi tasarım ve uygun malzeme seçimi ile yüksek verimli ekonomik elektrik makinaları üretmek gerekmektedir. SM'ler, sargı olmadan manyetik akı sağlama yeteneklerinden dolayı elektro-mekanik makineler ve cihazlar, otomasyon uygulamaları gibi birçok teknoloji alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Gündoğdu ve Kömürgöz, 2013). SM seçiminde uygulamaya göre en yüksek enerji çarpanı, (BH_{max}), manyetik giderme, H_C , iyi bir manyetik giderme eğrisi, korozyon direnci, elektrik direnci, düşük mıknatıslanma alanı gereksinimi, kullanılabilir bir sıcaklık aralığı, sıcaklıkla kabul edilebilir mıknatıslanma değişikliği, rijitlik, kullanılabilirlik özel boyut ve şekiller ve üretilebilirlik gibi şartlar göz önünde bulundurulmaktadır (Gündoğdu ve Kömürgöz, 2013). Bununla beraber SM seçiminde önem arz eden şartları,

- Manyetik özellikler
- Sıcaklık

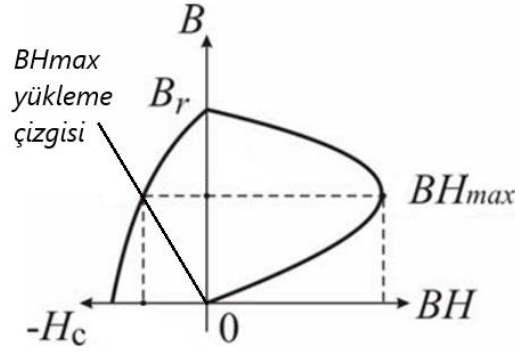
- Üretim özellikleri olarak üç grup altında toplamak mümkündür (Gündoğdu ve Kömürgöz, 2013).

Manyetik özelliklerin temeli, her mıknatıs malzemesini karakterize eden BH eğrisi veya histerisiz döngüsüdür. Bu eğri, bir mıknatısın kapalı bir devredeki doygunluğa getirildiği, manyetikten arındırıldığı, ters yönde doygunlaştırıldığı ve daha sonra harici bir manyetik alanın etkisi altında tekrar manyetikleştirildiği bir döngüyü tarif eder. BH eğrisinin ikinci çeyreğindeki manyetik giderme eğrisi, SM'lerin pratikte kullanıldığı koşulları açıklar. Belirli bir malzemenin çeşitli manyetik yükleme ve sıcaklık koşulları altında nasıl performans gösterdiği hakkında özel bilgiler sağlar. Söz konusu eğri, SM yapımında kullanılan özel malzemeyi temsil eder ve SM geometrisinden bağımsızdır (Gündoğdu ve Kömürgöz, 2013).

Ünal (2011)'a göre tasarım sürecinde önem arz eden manyetik özellikler aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır (Ünal, 2011).

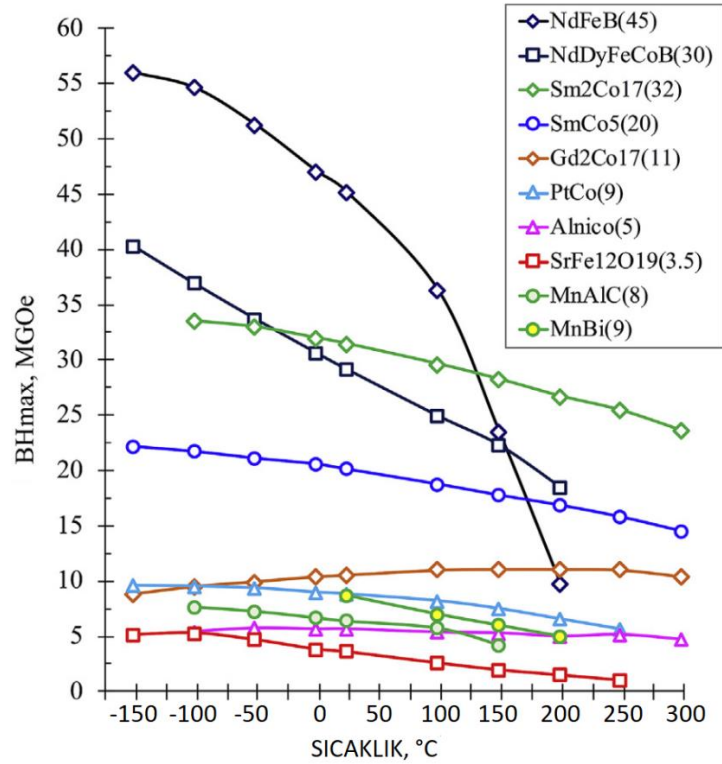
- Manyetik doyum sınırı (B_{max}): SM için geçerli en yüksek akı dayanımını ifade eder.
- Geçirgenlik (μ): SM'nin manyetik geçirgenliği
- Koersif Kuvvet (H_C): Kalıcı manyetikliği (B_r) yok etmek için uygulanması gereken giderici manyetik kuvveti ifade eder.
- Toplam Çekirdek Kaybı: SM'de meydana gelen girdap ve histerisiz kayıplardır.

Gürdal (2015) ile yapılan çalışmada SM seçiminde en önemli kriterin en yüksek enerji çarpanı (BH_{max}) olduğunu belirtilmiştir (Şekil 3.13). SM'den alınabilecek en yüksek enerji miktarına karşılık gelen bu değer ile motor tasarımında ihtiyaç duyulacak en az SM miktarı belirlenebilmektedir (Gürdal, 2015; Integrated Magnetics, 2019).



Şekil 3.13. En yüksek enerji çarpanı, BH_{max} (Gürdal, 2015; Anonim, 2019g)

SM'lerde BH döngüsü sıcaklık ile değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik karakteristiği SM malzemesi tipine bağlı olmakla beraber, malzemenin sıcaklığa karşı toleransı tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gereken bir konudur. Öyle ki çalışma esnasında meydana gelen ısınma, SM'lerin, kalıcı manyetik özelliğinin kaybolmasına (demagnetizasyonuna) neden olabilmektedir (Gündoğdu ve Kömürgöz, 2013). Şekil 3.14 ile sunulan grafikte yaygın SM malzemeleri için sıcaklığa göre BH_{max} değişim karakteristiği görülmektedir (Cui ve ark., 2018).



Şekil 3.14. SM sıcaklığına göre BH_{max} değişim karakteristiği (Cui ve ark., 2018).

Şekil 3.14 ile sunulan grafikte görülmekte olan MGOe, SI birim sistemine göre *Mega – Gauss x Oersted* (Oe) karşılık gelmektedir. Ayrıca $1 \text{ Oe} = 79.57 \text{ A/m}$ 'ye eşittir. Grafikten de anlaşılacağı gibi düşük sıcaklıklarda en yüksek enerji çarpanı neodyum (NdFeB) tarafından sağlanmaktadır. Fakat yüksek sıcaklıklarda performansı büyük oranda düşmektedir. Grafikte SM malzemesin yanında parantez içinde belirtilmekte olan değer SM malzemesinin sınıfını göstermekte olup, malzemenin üretilmesinde kullanılan kompozisyon oranına göre değişiklik göstermektedir (Cui ve ark., 2018).

SM malzemesi seçimi tamamlandıktan sonra basitleştirilmiş manyetik devre kullanılarak hava aralığındaki MMK'nın SM'ye bağlı eşitliği, Eşitlik 3.40'taki gibi yazılabilmektedir (Fitzgerald ve ark, 2003).

$$\frac{H_{mag} h_{mag}}{H_{\delta} \delta} = -1 \quad (3.40)$$

Eşitlik 3.40'tan yararlanarak H_{δ} ve B_{δ} Eşitlik 3.41'deki gibi hesaplanabilmektedir. Eşitlikte yer alan μ_0 havanın manyetik geçirgenliğine karşılık gelmektedir.

$$H_{\delta} = -\frac{H_{mag} h_{mag}}{\delta} \quad (3.41)$$

$$\frac{B_{\delta}}{\mu_0} = -\frac{H_{mag} h_{mag}}{\delta}$$

Buraya kadar elde edilen veriler ile Eşitlik 3.42 ve 3.43 yazılabilmektedir.

$$B_{\delta}^2 = \mu_0 \frac{A_{mag}}{\delta} \frac{A_{mag}}{A_{\delta}} H_{mag} B_{mag} \quad (3.42)$$

$$B_{\delta}^2 = \mu_0 \frac{Vol_{mag}}{Vol_{\delta}} H_{mag} B_{mag} \quad (3.43)$$

Eşitlik 3.43'ten yararlanarak her kutup için gereken SM malzemesi hacmi (V_{mag}) hesaplanmaktadır. Eşitlikte görülen hava aralığı hacmi, Vol_{δ} , motor ana boyutları kullanılarak analitik yollarla hesaplanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta SM kalınlığının ihtiyaç duyulan akıyı sağlayacak nitelikte olmasının yanında tutma torkunun da artmaması açısından gerekenden kalın seçilmemesi gerekliliğidir.

Önceki bölümde de olduğu gibi demir nüvenin manyetik geçirgenliğinin sonsuz kabul edilmesi koşulu ile (bkz. Eşitlik 3.37.) Eşitlik 3.44 yazılabilmektedir (Garner, 2015).

$$\int Hdl = H_{mag}h_{mag} + H_{\delta}\delta = 0 \quad (3.44)$$

Buradan h_{mag} mıknatıs kalınlığı değerinin çekilmesi ile Eşitlik 3.45 elde edilmektedir.

$$h_{mag} = -\frac{(H_{\delta}\delta)}{H_{mag}} \quad (3.45)$$

Hava aralığındaki manyetik alanın şiddeti, H_{δ} Eşitlik 3.46 ile hesaplanmaktadır (Garner, 2015).

$$H_g = \frac{B_{\delta}}{\mu_r\mu_0} \quad (3.46)$$

Eşitlik 3.45 ve 3.46'dan yararlanarak t_{mag} mıknatıs kalınlığı denklemi Eşitlik 3.47'deki gibi yazılabilmektedir.

$$t_{mag} = \frac{\frac{B_{\delta}}{\mu_r\mu_0} \delta}{H_{mag}} \quad (3.47)$$

Önceki bölümlerde de tartışıldığı gibi rotor gövdesinde yer alan SM'ler tarafından üretilen akının tamamının rotor nüvesinden çıkarak hava aralığı aracılığı ile statora geçmesi istenen bir durumdur. Fakat üretilen akının bir kısmı hava aralığına varamadan rotor nüvesi içinde kaybolmaktadır. Bu kayıplar temelde rotor dişlerinin ve mıknatıs konumlarının doğru tasarlanmamasından kaynaklanmakla beraber, mıknatıs uçlarında meydana gelen saçaklanma etkisi de mıknatıs akısından yeterince yararlanılmasına engel olmaktadır. Bu istenmeyen saçaklanma etkisi mıknatıs uçlarına akı bariyeri olarak isimlendirilen manyetik olmayan bölümlerin yerleştirilmesi ile büyük oranda azaltılabilmektedir. Bu nedenle özellikle gömülü SM'ye sahip motorlarda akı bariyeri tasarımı da çalışmaya dahil edilmelidir.

3.1.7. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY)

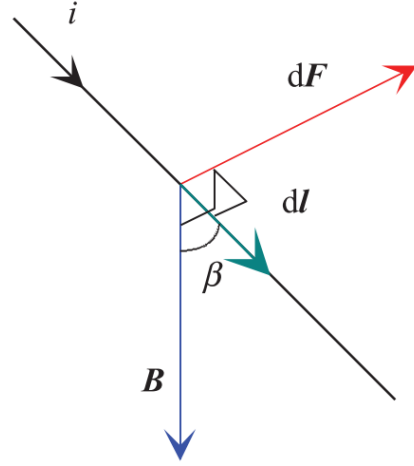
Elektrik makinelerinin dönüşüne olanak sağlayan elektromanyetik tork, hava aralığındaki manyetik alan etkisi ile üretilmektedir (Ge, 2014). Bu nedenle manyetik akının motor gövdesinde ve hava aralığındaki dağılımının doğru şekilde hesaplanması gerekmektedir. Elektromanyetik fenomenler Maxwell denklemleri ile kapsamlı olarak açıklanabilmektedir. Bir grup alan eşitliği yazılarak açıklanabilen elektromanyetik alan, temelde beş vektör ve bir skaler büyüklüğü ile ifade edilebilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008). Bunlar;

- Elektrik alan şiddeti, E
- Manyetik alan şiddeti, H
- Elektrik akı yoğunluğu, D
- Manyetik akı yoğunluğu, B
- Akım yoğunluğu, J
- Elektrik yükü yoğunluğu, ρ

Elektriksel bir manyetik alanın varlığı, manyetik alanın yüklü bir cisme veya akım taşıyan bir iletkeneye uyguladığı kuvvet ile açıklanmaktadır. Manyetik alan etkisi ile oluşan bu kuvvet, Lorentz kuvveti eşitliği ile (Şekil 3.15) ile hesaplanabilmektedir. Lorentz kuvvet vektörü, v hızıyla hareket eden dQ yükü için Eşitlik 3.48. ile ifade edilebilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

$$dF = dQ(E + v \times B) = dQE + \frac{dQ}{dt} dl \times B = dQE + idl \times B \quad (3.48)$$

Eşitlikte görülen son bölüm, dl boyunda akım taşıyan iletkeni referans alarak formülize edilmiştir. Elektrik makinelerinde tork bu prensiple üretilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).



Şekil 3.15. Lorentz kuvveti (Pyrhnen ve ark., 2008)

Lorentz kuvveti (dF), B manyetik alanında, üzerinden i akımı akan dl boyunda iletkene etki etmektedir. β açısı, iletken ile B manyetik vektörü arasındaki açıya karşılık gelmektedir. Buna göre $idl \times B$ vektörü, $idl \times B = idlB \sin \beta$ şeklinde yazılabilmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008).

Elektrik mühendisliği teorisinde, başlangıçta ampirik olarak ifade edilebilen birçok temel prensip sonraki yıllarda, Maxwell tarafından matematiksel eşitliklerle karakterize edilmiştir. Diferansiyel olarak ifade edilen bu eşitlikler alan ve pozisyonun bağımsız olarak belirli bir alandaki, bir noktadan akan akım noktanın yükünü azaltır prensibine dayanır. Bu prensip Eşitlik 3.49'daki iraksak denklem ile ifade edilir (Pyrhnen ve ark., 2008).

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.49)$$

Söz konusu eşitlik elektrik akımının süreklilik denklemi olarak bilinir (Pyrhnen ve ark., 2008). Buna göre gerçek diferansiyel formdaki Maxwell denklemleri diferansiyel formda Eşitlik 3.50, 3.51, 3.52 ve 3.53'teki gibi yazılabilir (Pyrhnen ve ark., 2008; Felipe, 2019).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.50)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.51)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.52)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.53)$$

Yukarıda görülen Eşitlik 3.50 indüksiyon akımı için Faraday kanununa, Eşitlik 3.51. manyetizma için Gauss yasasına, Eşitlik 3.52 Ampere yasasına ve Eşitlik 3.53 elektrik için Gauss yasasına karşılık gelmektedir (Pyrhnen ve ark., 2008; Felipe, 2019). Durağan yada kısmen durağan elektromanyetik alan dağılımı için yer değiştirme akım yoğunluğu $\frac{\partial D}{\partial t}$ ihmal edilirse, Eşitlik 3.52'deki Ampere kanunu, Eşitlik 3.54'teki gibi yazılabilir (Ge, 2014).

$$\nabla \times H = J \quad (3.54)$$

Buna göre, üç boyutta, herhangi bir vektör alanının kıvrımının sapması sıfıra eşit olduğunda, Eşitlik 3.55 elde edilebilir (Ge, 2014).

$$\nabla \times J = \nabla \cdot (\nabla \times H) = 0 \quad (3.55)$$

Ge (2014)'e göre makroskopik malzemenin özellikleri, Eşitlik 3.56, 3.57 ve 3.58'deki yapısal ilişkiler ile tanımlanır.

$$J = \sigma E \quad (3.56)$$

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (3.57)$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3.58)$$

Burada, σ elektriksel iletkenliğe, ε elektriksel geçirgenliğe ve μ manyetik geçirgenliğe karşılık gelir. ε ve μ için kullanılan 0 ve r indisleri, sırası ile boşluk ve bağlı geçirgenliği ifade eder.

Vektör potansiyelinin hesaplanmasında Eşitlik 3.59 kullanılabilir. Eşitlikte görülen A , vektör potansiyeline karşılık gelmektedir.

$$\nabla \times A = B \quad (3.59)$$

Elde edilen bu eşitlik tüm problem bölgesinde tanımlanmış olup, Eşitlik 3.50 ile gösterilen Faraday kanununa göre V skaler potansiyeli ile birleştirilirse Eşitlik 3.60 elde edilir (Ge, 2014; Felipe, 2019).

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (3.60)$$

Verilen bu eşitlikte elektriksel skaler potansiyeli için, iletken bölgenin iki ucunda ayrı ayrı yüksek ve düşük V değerleri tanımlanır. Burada V iletken olmayan bölgelerde sıfıra eşittir. Bu nedenle Eşitlik 3.54, 3.56, 3.58, 3.59 ve 3.60 birleştirilerek, manyetik akı yoğunluğu B ve akım yoğunluğu J hesaplanabilmektedir (Eşitlik 3.61).

$$J = \sigma E = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = \nabla \times H = \nabla \times \frac{B}{\mu} = \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \times A) \quad (3.61)$$

Buradan, kuramsal fizikte temel etkileşmeleri açıklamak için kullanılan Yerelleştirilmiş Bakışım Kuramının kullanılması ile Eşitlik 3.62 elde edilir.

$$\nabla \times A = 0 \quad (3.62)$$

Sonuç olarak elektromanyetik alan, geçici hal formülasyonları için Eşitlik 3.63'teki gibi bir çözüm elde edilir.

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = \nabla \times H_c - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) + \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \cdot A) \quad (3.63)$$

Eşitlikte görülen H_c giderici kuvvete karşılık gelir.

Ayrıca Eşitlik 3.60'ın, Eşitlik 3.53'deki Gauss yasasına eklenmesi ile Eşitlik 3.64. elde edilir (Felipe, 2019).

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{A}) = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (3.64)$$

Poisson denklemi olarak bilinen Eşitlik 3.64 kullanılarak, elektrostatik problemlerinin çözümüne yönelik Laplace denklemi Eşitlik 3.65'teki gibi elde edilir.

$$\nabla V = \nabla^2 V = 0 \quad (3.65)$$

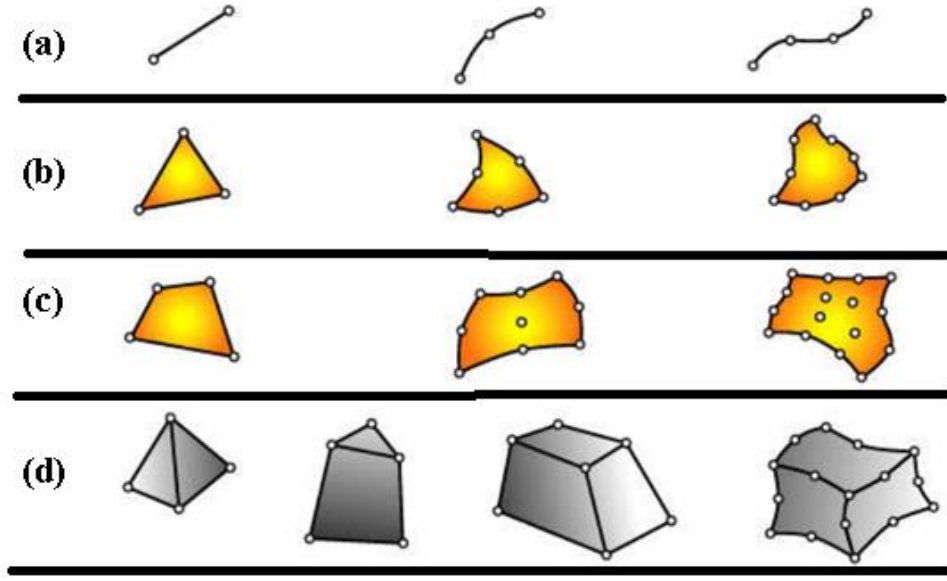
Eşitlik 3.65'teki Laplace eşitliği kartezyen koordinat sistemine göre Eşitlik 3.66'daki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3.66)$$

Laplace ve Poission eşitliklerinin çözümünde kullanılan SEY, problemin tamamı için gerçek bir çözüm sağlanmadığı durumlarda, problemin sonlu sayıda parçaya bölünerek aranması prensibine dayanmaktadır (Korkmaz ve Kürüm, 2013).

Belirli kuvvet noktaları referans alınarak çözülen fiziksel mühendislik problemlerinde, genel olarak fiziksel sistemini yeterince ifade edemeyen kısmi bir sonuç elde edilir. SEY yönteminde ise çözümü aranan fiziksel sistem küçük elemanlara bölünerek, sistem daha küçük parçalar halinde incelenir ve sistemin çalışması hakkında daha gerçekçi bir çözüm elde edilir. Söz konusu yöntemde artan eleman sayısı ile çözüm süresi de artmakla beraber sonuçta elde edilen genel çözümün sistemi daha iyi ifade etmesi de sağlanır.

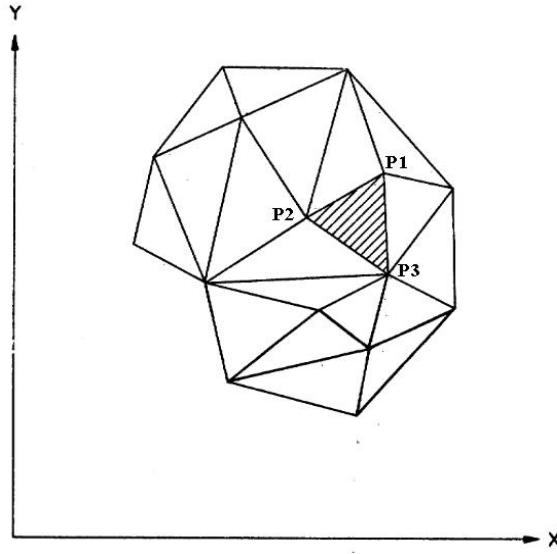
SEY mühendislik, fizik ve matematik problem çözümlerinin elde edilmesinin yanı sıra yapısal analizlerin yapılmasında da yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Bu araç günümüzde gerilme analizi, ısı transferi, akış analizi, titreşim, elektrik ve manyetik alanların analiz edilmesi gibi birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Günümüzde fiziksel sistemlerin benzetimi ve analizine yönelik birçok SEY tabanlı çalışan üçüncü parti bilgisayar yazılımı yer almaktadır. Söz konusu yazılımların birçoğu birbirinden farklı tasarım mantığına sahip olsa da, tüm yazılımlar için çözüm arayışı ön işlem, çözüm ve son işlem olmak üzere temel üç evrede gerçekleşmektedir (Roensch, 2013; Ge, 2014).



Şekil 3.16. Boyut sayısına göre eleman tipleri, (a) bir boyutlu eleman, (b) ve (c) iki boyutlu eleman, (d) üç boyutlu eleman (Anonim, 2019h; Aydoğan, 2019)

Ön işlem evresinde öncelikle çözülmek istenen sisteme karşılık gelen bir sistem modeli oluşturulur. Oluşturulan model kullanılarak sistemin giriş ve sınır şartları belirlenir. Sonraki adımda oluşturulan sistem modeli önceden belirlenen bir yöntem ile sonlu sayıda elemana bölünür (mesh modelinin oluşturulması). Bu bölme işleminde tek boyutlu problem çözümleri için (1D), iki nokta ile tanımlanan ve uzunluğu olan bir çizgi, iki boyutlu problem çözümleri için (2D), en az üç nokta ile tanımlanan bir alan, üç boyutlu problemlerin çözümünde ise en az 4 nokta ile tanımlanan bir hacme sahip elemanlar kullanılır (Anonim, 2019h; Aydoğan, 2019). Şekil 3.16 ile sunulan görselde farklı eleman tipleri görülmektedir.

Sonlu sayıda elemana bölünen sistemde her bir eleman için, yanındaki diğer elemanlar ile etkileşimi de gözetilerek ayrı ayrı çözüm aranır (Şekil 3.17). Elemanların birbirine etkileşimi, elemanları birbirine bağlayan düğüm noktalarına göre (P1, P2 ve P3) belirlenmektedir (Chari, 1974).



Şekil 3.17. Sonlu sayıda elemana bölünmüş 2D bir geometri (Chari, 1974)

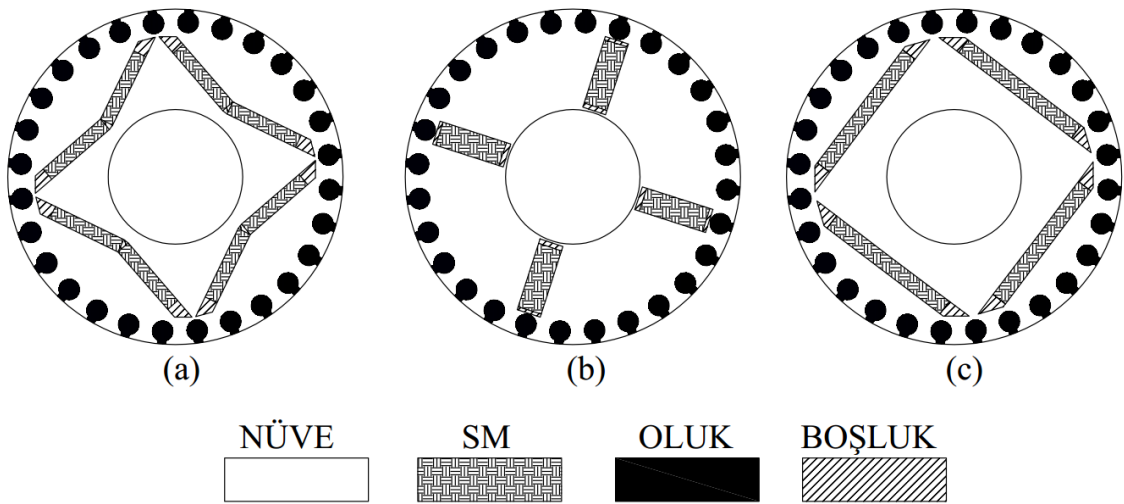
Sonuç olarak ön işlem evresinde sistemde yer alan her bir elemanın etkisinin ayrı ayrı hesaplandığı genelleştirilmiş bir çözüm matrisi elde edilmektedir. Çözüm evresinde ise ön işlem evresinde elde edilen genelleştirilmiş çözüm matrisinin çözümü aranır. Çözüm süreci temelde frekans ve zaman uzayı olmak üzere iki farklı yaklaşım ile elde edilebilir. Frekans uzayında yapılan hesaplamalarda, sistem parametreleri durağan kabul edilip, sistemin sadece bir anlık durumu değerlendirilmektedir. Söz konusu yöntem ile sistemin genel çözümü ile ilgili yakınsak bir sonuç elde edilir fakat elde edilen sonuçlar zamandan bağımsız olduğu için gerçek sistemi tam olarak yansıtmamaktadır. Zaman uzayında yapılan hesaplamalarda ise sistem parametrelerinin zamana göre değiştiği göz önünde bulundurulur. Söz konusu çözüm yaklaşımı ile sistemin belirli zaman aralığındaki, her bir ayırık zaman adımı için daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir. Hesaplanan zaman aralığındaki ayırık zaman sayısı arttıkça sistemi daha iyi ifade eden sonuçlar elde edilirken hesaplama süresi de kayda değer artış göstermektedir.

3.2. Mevcut ŞK-RASM Tasarımlarının İncelenmesi

ŞK-RASM'lerin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar ve çalışmalarla önerilmiş birçok tasarım örneği önceki bölümlerde tartışılmıştır. Ayrıca bu motorların geliştirilmesinde önem arz eden tasarım kriterleri ve tasarım süreci detaylı olarak incelenmiştir. Tasarım sürecinde makine ana boyutlarının belirlenmesi, stator sargı ve oluk tasarımı, kısa devre kafesi ve SM tasarımı konuları ayrı ayrı başlıklar altında

tartışılmıştır. Çalışmanın bu adımında edinilen bilgilerin sınanması ve motor çalışma karakteristiğinin tecrübe edilmesi amacı ile literatürde yoğun ilgi gören rotor topolojileri modellenerek analiz edilmiştir. Modelleme sürecinde önceki bölümde detayları verilen analitik hesaplamalar kullanılmıştır. Buna ek olarak modellenen motorların performans karakteristiğinin belirlenmesinde doğruluğu akademik olarak kabul görmüş bir SEY analiz yazılımı kullanılmıştır. Analiz edilen motorlar çalışma karakteristiği, motor performansı ve üretilebilirlik açısından detaylı olarak irdelenmiştir.

Literatür bölümünde incelenen topolojiler ve Elistratova tarafından yapılan çalışmalar (Garner, 2015; Elistratova, 2016) göz önünde bulundurularak literatürde yoğun olarak üç farklı rotor topolojisi üzerinde durulduğuna kanaat getirilmiştir (Şekil 3.18)



Şekil 3.18. Çalışmalarda üzerinde durulan ŞK-RASM rotor topolojileri (a), Motor1 (b) Motor2 ve (c) Motor3

Şekil 3.18 ile sunulan ŞK-RASM topolojileri tork ve performans açısından farklı karakteristiklere sahiptir. Üretim kolaylığı ve daha yüksek verim sunabilmeleri nedeni ile literatürde daha sık rastlanan bu topolojiler çalışma kapsamında modellenerek detaylı olarak incelenmiştir. Her üç motorda da 5.5 kW gücünde 132s gövde yapısı için aynı stator ve kısa devre kafesi kullanılmıştır. Oluk tasarımında kalkış performansının daha yüksek olması nedeni ile Nema D Sınıfı oluk geometrisi (bkz. Şekil 3.12) tercih edilmiş olup SM'ler oluk altına (rotor boyunduruğuna) yerleştirilmiştir. Ayrıca her üç tasarımda da sonuçların karşılaştırılabilir olması açısından aynı miktarda SM kullanılmasına özen gösterilmiş olup, SM'lerden kalan alanlarda akı bariyerlerine yer verilmiştir. Elde edilen

motor tasarımlarının çalışma karakteristiğinin anlaşılması amacı ile, her üç tasarımda SEY analiz ortama aktarılmıştır. Her üç motorda da analiz süresinin kısa olması açısından ¼ 2D motor modeli tercih edilmiştir.

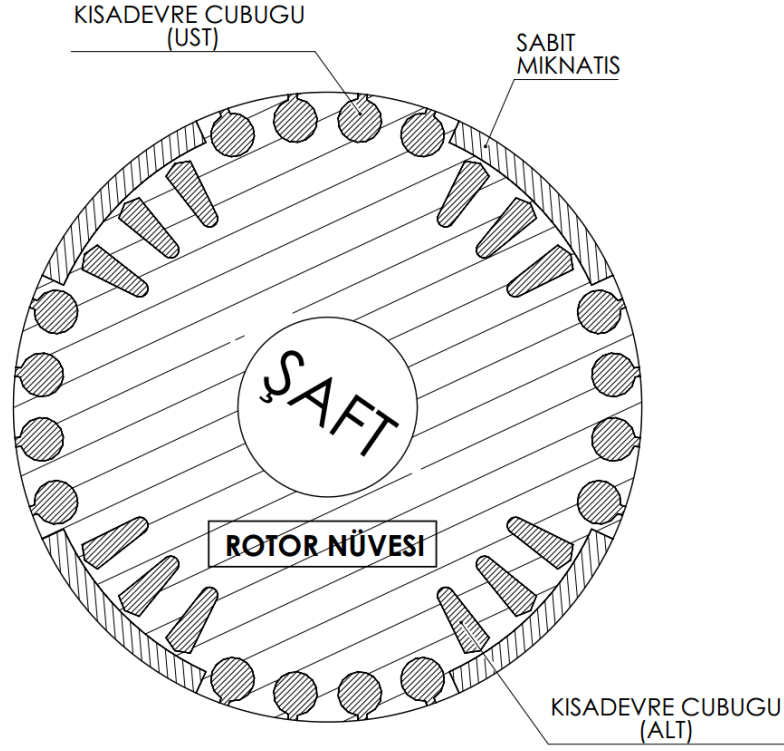
3.3. Önerilen ŞK-RASM Topolojisi

Çalışmanın bu adımında edinilen bulgular ışığında tasarımı yapılan yeni ŞK-RASM topolojisi ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Söz konusu topolojide, gömülü SM kullanılan motorlarda yaşanan tasarım ve üretim sorunları göz önünde bulundurularak yüzey yerleştirmeli SM tasarımı tercih edilmiştir. Böylelikle ihtiyaç duyulan SM miktarının rotora yerleştirilmesi ve oluk tasarımında esneklik sağlanmıştır. Ayrıca yapılan bu tercih ile SM'lerin rotor gövdesine deforme olmadan yerleştirilmesi olanaklı hale gelmiş olup SM manyetik akısının en az kayıp ile hava aralığına aktarımı sağlanmıştır. Tabii ki hava aralığına yaklaşan SM'lerin, motor kalkışını olumsuz etkilememesi için rotor kafes tasarımına ayrıca özen gösterilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır.

Yüzey yerleştirmeli SM'lerin tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli konu SM boyutlarının (kalınlık ve genişlik) doğru seçilmesidir. SM'lerin çok ince seçilmesi durumunda demagnetizasyon riski artarken çok kalın seçilmesi durumunda ise SM tarafından üretilen frenleme torku motor kalkışını olumsuz etkilemektedir. SM etkisi ile meydana gelen tork dalgalanmaları da üzerinde durulması gereken bir diğer konudur.

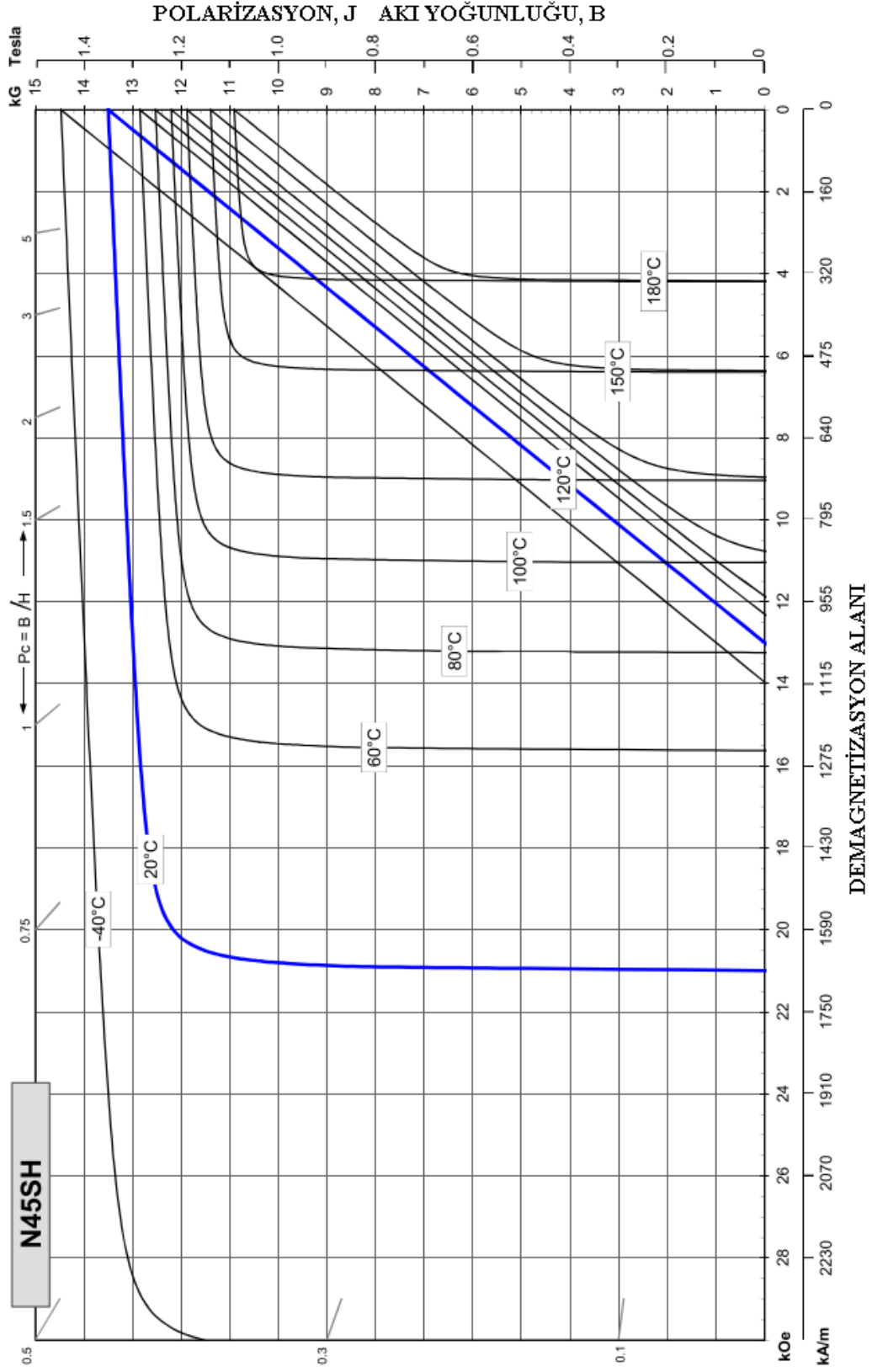
3.3.1. Önerilen topoloji ile ilgili teknik detaylar

Şekil 3.12 ile NEMA standart oluk yapıları ve olukların motor hız-tork karakteristikleri önceki bölümde incelenmiştir. İlgili şekilden de anlaşılacağı üzere en iyi kalkış performansı D sınıfı oluk yapısı ile elde edilirken, senkron hız civarındaki en yüksek tork A ve B sınıfı oluk yapıları ile elde edildiğinden motor senkronlanma performansı daha yüksektir. Sonuç olarak yapılan çalışmada motor kalkış ve senkronlanma performansının yüksek olabilmesi amacı ile her iki oluk tipinin bir arada kullanıldığı yeni bir rotor topolojisi önerilmektedir (Şekil 3.19).

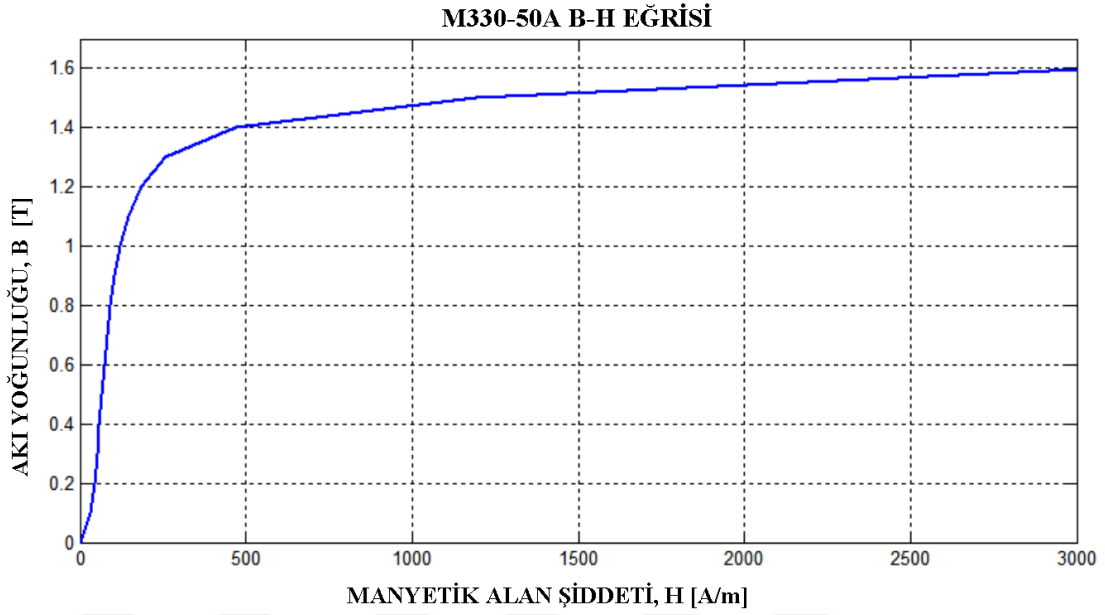


Şekil 3.19. Önerilen rotor tasarımı (Zöhra ve ark., 2018)

Önerilen modelde ŞK-RASM hızlanma karakteristiği göz önünde bulundurularak SM yanlarına motor kalkışında daha yüksek performans gösteren 16 adet NEMA D sınıfı oluk yerleştirilmiştir. Buna ek olarak motorun kararlı çalışma esnasında senkron hızdan düşmesi durumunda tekrar senkronlanmasına yardımcı olması ve motor kalkışına destek olması amacı ile SM altlarına 12 adet NEMA B sınıfı kapalı oluk yerleştirilmiştir. Ayrıca kısa devre kafesinde indüklenen rotor akımının kısa devre çubuklarına düzenli dağılması açısından her iki oluk tipinin de kesit alanının olabildiğince yakın olmasına özen gösterilmiştir. Tasarımda statorda olduğu gibi rotorda da M330 50A çelik malzemesi kullanılmıştır. SM malzemesi olarak N45SH tercih edilmiştir. Tasarımda kullanılan nüve ve SM malzemesi ile ilgili teknik detaylar Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de görülmektedir (Bödrich, 2008; Anonim, 2019i; Anonim, 2019j).



Şekil 3.20. N45SH SM malzemesi manyetik özellikleri (Anonim, 2019k)



Şekil 3.21. M330-50A malzemesi manyetik özellikleri (Bödrich, 2008; Anonim, 2019i)

Yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda motor tasarım uygulamalarında cazip manyetik karakteristikleri nedeni ile yeni nesil SM malzemelerin yoğun olarak tercih edildiği görülmektedir. Bununla beraber bu yönelimin çoğunlukla SmCo (samaryum kobalt) ve NdFeB (neodyum) tipi SM malzemeleri üzerinde olduğunu söylemek mümkündür. SmCo ile yapılan tasarım uygulamalarında yüksek sıcaklıklarda kararlı çalışma sağlanabilirken NdFeB tipi SM malzemeleri ile düşük maliyetle yüksek enerji çarpanı elde edilebilmektedir (Gürdal, 2015).

Şekil 3.20'dede görüldüğü gibi tercih edilen N45SH SM malzemesi 100°C çalışma sıcaklığının altındaki uygulamalarda yüksek enerji çarpanı ($BH_{max}=354\text{kJ/m}$) sunabilmektedir. Nominal çalışma sıcaklığındaki SM manyetik karakteristiği ($B_r=1.37\text{T}$ ve $H_C=1114\text{kA/m}$) tatmin edicidir.

Motor tasarımında hedeflenen yüksek verimin elde edilmesi özenli bir tasarım işi ve doğru malzemelerin tercih edilmesi ile mümkün olabilmektedir (Zöhra ve Akar, 2016). Yukarıda da üzerinde durulduğu gibi tasarımında SM malzemesi olarak nominal çalışma sıcaklığında oldukça performanslı olan N45SH tercih edilmiştir. Yapılan bu tercih ile motor senkron çalışma performansında kayda değer artış sağlanacağı muhakkaktır. Fakat hedeflenen motor veriminin elde edilmesinde SM malzemesinin yanı sıra seçilen nüve malzemesi de önem arz etmektedir. Doğru nüve malzemesi seçilmemesi durumunda

çekirdek kayıpları aşırı artış göstermekte ve bu da motor veriminde düşüşe neden olmanın yanı sıra ısı rejimini de olumsuz etkilemektedir. Şekil 3.21’de de görüldüğü gibi nüve malzemesi olarak mevcut pazardan kolayca temin edilebilen M330-50A laminasyon çeliği tercih edilmiş olup nominal çalışmada 1.57T’ya kadar tatmin edici performans elde edilmektedir. Seçilen nüve malzemesi için 1.5T - 50Hz çalışma koşullarında 3.03 W/kg kayıp meydana gelmektedir. M330-50A laminasyon çeliği karakteristik verilerine EK-1 ayrıca yer verilmiştir.

3.3.2. SEY yazılımı ile tasarımın performans değerlendirilmesi

Önerilen topolojide ŞK-RASM tasarımının performans testlerinin yapılmasında yaygın olarak kullanılan ANSYS Maxwell SEY analiz yazılım ortamında yararlanılmıştır. Modelleme sürecinde öncelikle önerilen topolojinin analitik olarak boyutlandırılması yapılmış olup hesaplamalar sonucu elde edilen analitik veriler SEY analiz ortamına aktarılmıştır. Modelleme sürecinde analiz süresinin kısaltılması açısından ¼ 2D motor modeli tercih edilmiştir. Modelde nüve ve SM malzemesi olarak Şekil 3.20 ve 3.21’de detayları sunulan malzemeler kullanılmıştır. Yapılan analizler ile motor çalışma karakteristiği verimlilik, tork kalitesi ve performans açısından detaylı olarak incelenmiştir.

SEY analiz yazılımı ortamında yapılan hesaplamalarda motor verimi Eşitlik 3.67. kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlikte görülen P_M , motor milinden alınan mekanik güç, P_E ise motor tarafından çekilen elektriksel güç karşılık gelmektedir.

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} \quad (3.67)$$

Motor milinden çekilen mekanik güç IEC 60034-2-1 standardına göre motor yükü (T_L) ve motor açısal hızına göre (w_r) Eşitlik 3.68’deki gibi hesaplanabilmektedir (BS EN 60034-2-1, 2014).

$$T_L w_r \quad (3.68)$$

Ayrıca motor tarafından çekilen elektriksel güç (P_E), motor tarafından üretilen mekanik güce P_M ve motorda meydana gelen toplam kayıpların (P_{Toplam}) eklenmesi ile elde edilebilmektedir (Eşitlik 3.69).

$$P_E = P_M + P_{Toplam} \quad (3.69)$$

Motorda meydana gelen kayıplar ANSYS Maxwell SEY analiz yazılım ortamında çekirdek kayıpları, solid kayıplar, tek fazlı sargı kayıpları ve üç fazlı sargı kayıpları olmak üzere dört farklı tipte sunulmaktadır (Tikhonova ve ark., 2019; Anonim, 2012b; Tikhonova ve Plastun, 2018). Önerilen ŞK-RASM tasarımının üç fazlı bir motor olması nedeni ile hesaplamalarda çekirdek kayıpları, solid kayıplar ve üç fazlı sargı kayıpları göz önünde bulundurulmuş olup kayıpların hesaplanmasında kullanılan eşitliklere ilerleyen bölümde yer verilmiştir.

Çekirdek kayıpları (P_c): Stator ve rotor nüvelerinde meydana gelen kayıpları ifade etmekte olup 3 temel bileşenden meydana gelmektedir (Eşitlik 3.70.)

$$P_c = p_c + p_h + p_e \quad (3.70)$$

Eşitlikte görülen p_c , girdap akımı kayıplarına, p_h , histerisiz kayıplarına ve son olarak p_e , hesaplanamayan ek kayıplara karşılık gelmekle beraber sırası ile Eşitlik 3.71, Eşitlik 3.72, ve Eşitlik 3.73'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$p_c = k_c (f B_{max})^2 \quad (3.71)$$

$$p_h = k_h f B_{max}^2 \quad (3.72)$$

$$p_e = k_e (f B_{max})^{1.5} \quad (3.73)$$

Eşitliklerde görülen k_h , histerisiz kayıpları katsayısına, k_e ek kayıp katsayısına karşılık gelmektedir. Eşitlik 3.71'de görülen k_c girdap akımı katsayısına karşılık gelmekte olup Eşitlik 3.74'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_c = \pi^2 \vartheta^2 \frac{d^2}{6} \quad (3.74)$$

Eşitlikte görülen d , laminasyon kalınlığını ve ϑ ise elektriksel geçirgenliği ifade etmektedir. ANSYS Maxwell SEY analiz yazılımı k_h ve k_e katsayılarının belirlenmesinde, K_1 ve K_2 katsayılarından yararlanılmaktadır (Eşitlik 3.75 ve Eşitlik 3.76).

$$K_1 = k_h f + k_c f^2 \quad (3.75)$$

$$K_2 = k_e f^2 \quad (3.76)$$

K_1 ve K_2 katsayılarının belirlenmesinde Eşitlik 8'deki $F(K_1, K_2)$ fonksiyonunun minimize edilmesi ile elde edilir (Eşitlik 3.76)

$$F(K_1, K_2) = \sum_i [p_{vi} - (K_1 B_{mi}^2 + K_2 B_{mi}^{1.5})]^2 = \min \quad (3.76)$$

Eşitlikte görülen p_{vi} ve B_{mi} kayıp karakteristik eğrisinden elde edilen kayıp ve akı yoğunluğu değerlerine karşılık gelir. Elde edilen bu veriler ışığında k_h , ve k_e katsayıları sırası ile Eşitlik 3.77 ve 3.78 ile elde edilmektedir.

$$k_h = \frac{K_1 - k_c f^2}{f} \quad (3.77)$$

$$k_e = \frac{K_2}{f^{1.5}} \quad (3.78)$$

Eşitlikte görülen f , kayıp eğrisinden veri alınan noktadaki frekansa karşılık gelmektedir.

Solid kayıplar (P_{rr}): Kısa devre kafesi gibi solid tipte iletkende meydana gelen elektriksel kayıplara karşılık gelmektedir.

Üç fazlı sargı kayıpları (P_{rs}): Statorda meydana gelen sargı kayıplarının ifade etmekte olup Eşitlik 3.79'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{rs} = 3I_a^2 R_s \quad (3.79)$$

Eşitlikte görülen R_s sargı direncini ifade etmektedir.

Buraya kadar olan bölümde ANSYS Maxwell SEY analiz yazılımı tarafından hesaplanan kayıplar üzerinde durulmuştur. Söz konusu bu kayıplara ek olarak hareketli parçalar arasında meydana gelen sürtünme ve ısınan motorun hava ile soğutulması kaynaklı kayıplar da meydana gelmektedir. Yapılan hesaplamalarda sürtünme (P_f) ve soğutma (P_s) kayıpları 60 W olarak (mil gücünün %4'ü) kabul edilmiştir. Böylelikle motorda meydana gelen toplam kayıplar Eşitlik 3.80'deki gibi elde edilmiştir.

$$P_{toplam} = P_c + P_f + P_s \quad (3.80)$$

Söz konusu eşitlikte P_c yerine Eşitlik 3.70'in konması ile Eşitlik 3.81 elde edilmektedir.

$$P_{toplam} = p_c + p_h + p_e + P_f + P_s \quad (3.81)$$

Elde edilen toplam kaybın Eşitlik 3.69'da yerine konması ile Eşitlik 3.82 yazılabilmektedir.

$$P_E = P_M + p_c + p_h + p_e + P_f + P_s \quad (3.82)$$

Böylelikle motor verimi Eşitlik 3.83'deki gibi hesaplanabilmektedir.

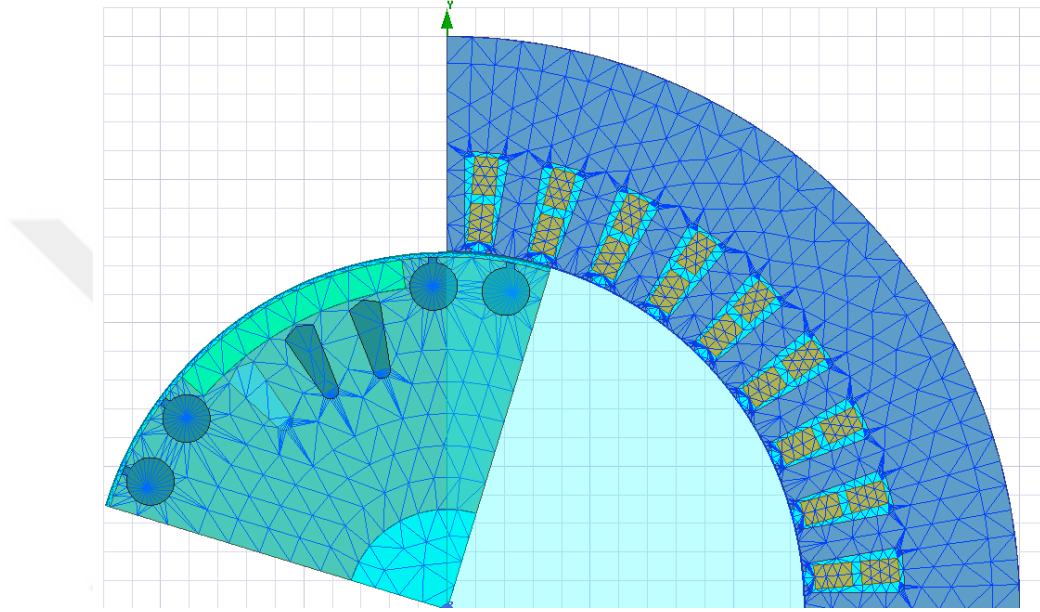
$$\eta = \frac{P_M}{P_M + p_c + p_h + p_e + P_f + P_s} \quad (3.83)$$

Hesaplanan bu verim değeri analiz verilerine dayanarak hesaplanmış olup motorun üretimi sürecinde meydana gelebilecek olası aksaklıklar nedeni ile gerçek verim değerinden daha yüksek olabilmektedir. Yapılan hesaplamalarda oluşabilecek aksaklıkların da göz önünde bulundurulması amacı ile motor kayıplarına 0.005 oranında bir ekleme yapılmıştır. Sürtünme ve soğutma kayıplarının 60W olduğu göz önünde bulundurularak motordan alınan verim Eşitlik 3.83'deki gibi yazılabilmektedir.

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{T_L w_r}{T_L w_r + 1.005(P_M + p_c + p_h + p_e + 60W)} \quad (3.83)$$

Tez çalışması kapsamında yapılan performans değerlendirilmelerinde, motor veriminin elde edilmesinde Eşitlik 3.83 kullanılmıştır.

Şekil 3.22’de SEY analizlerinde kullanılan düzensiz dağılıma sahip motor mesh modeli görülmektedir. Şekil 3.22’den de anlaşılacağı gibi akı dağılımının daha kritik olduğu bölgelerde (rotor üst olukları ve çevresinde, SM önlerinde ve statorun hava aralığına yakın olan bölgelerinde) bölüntü sayısı daha fazladır. Böylelikle ilgili bölgeler, SEY analizde daha detaylı incelenmektedir.



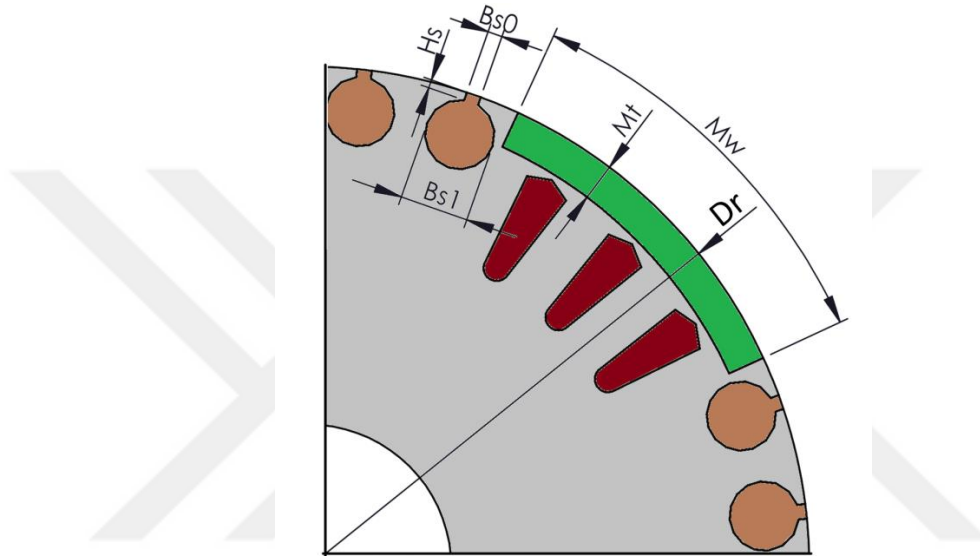
Şekil 3.22. Önerilen tasarımın mesh modeli

3.4. Optimizasyon Çalışmaları

Önceki bölümde tasarımı yapılan yeni ŞK-RASM’ye ait detaylar sunulmuştur. Çalışmanın bu adımında ortaya konan modelin veriminin artırılması ve vuruğu torkunun azaltılmasına yönelik optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Yürütülen çalışmalarda, SM açıklığı (M_w) – kalınlığı (M_t), rotor dış çapı (D_r) ve üst oluk geometrik parametrelerinde motor verimi ve tork kalitesini arttıracak şekilde iyileştirme yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 3.23).

Teorik olarak kafes tasarımı açısından ASM ve ŞK-RASM’ler birbiri ile benzer çalışma karakteristiğine sahiptir. ASM’ler gerek kalkışta gerekse nominal devir üretirken indüksiyon torku (kafes torku) ile mekanik güç üretmektedir. ŞK-RASM’ler ise kafes torkunun yanı sıra relüktans torku ve SM torkunda motor çalışmasında aktif rol oynamaktadır. Nüvede yer alan kısa devre çubukları ve SM’lerin beraber

konumlandırılması nedeni ile -d ve -q eksenine göre rotor relüktansları farklılık göstermektedir. Literatürde yapılan birçok araştırmaya göre söz konusu farklılık motor kalkışı ve verimini artırırken hava aralığında düzensiz akı dağılımları meydana gelmesi neticesinde motor tork kalitesinde düşüşe neden olabilmektedir. Söz konusu durum nedeni ile rotor tasarımında kullanılan geometrik parametrelerin analitik ya da geleneksel arama algoritmaları ile tespiti oldukça zordur.



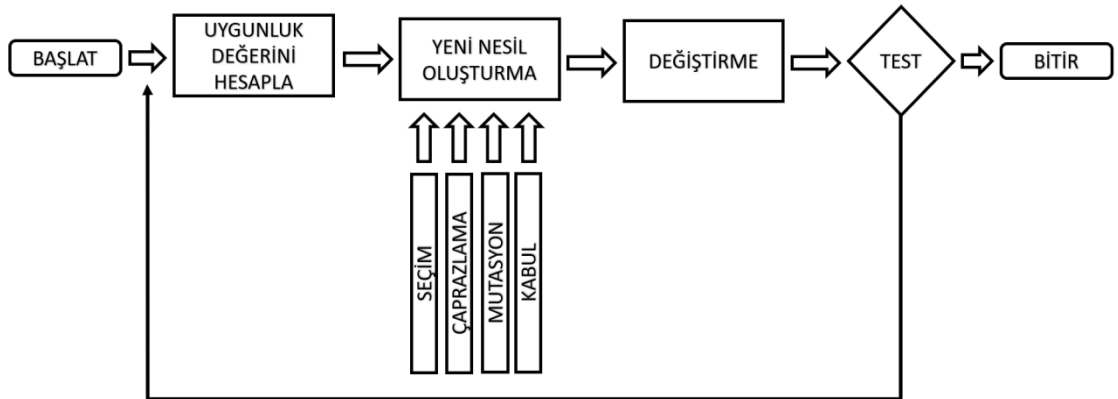
Şekil 3.23. Optimizasyon parametreleri

ŞK-RASM'lerin geometrik optimizasyonuna yönelik yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, Parçacık Sürü Algoritması, (PSO), Destekçi Vektör Makinesi, (SVM) ve Genetik Algoritma, (GA) gibi sezgisel yöntemlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Söz konusu yöntemler ile büyük çözüm uzayına sahip problemlerin çözümünde avantaj sağladığına dair birçok araştırmaya literatürde yer verilmiştir (Shahat ve Shewy, 2010; Sooriyakumar, 2010; Karnavas ve Korkas, 2014). Tez çalışması ile önerilmiş olan ŞK-RASM topolojisinin optimizasyonuna yönelik çalışmalarda da sezgisel bir optimizasyon algoritması olan GA kullanılmış olup konu ile ilgili detaylara sonraki bölümde yer verilmiştir.

3.4.1. Önerilen modelin genetik algoritma ile optimizasyonu

GA büyük veri kümelerinden (popülasyon) belirtilen kıstaslara göre en uygun verilerin (bireylerin) belirlenmesinde kullanılan gelişmiş bir optimizasyon yöntemidir ve bu nedenle geometrik optimizasyon çalışmalarında oldukça tercih edilmektedir. Yapılan çalışmada yeni ŞK-SMSM en uygun tasarım parametrelerinin belirlenmesinde genetik algoritmadan yararlanılmıştır.

Şekil 3.24 ile genetik algoritma temel akış diyagramı görülmektedir. Genetik algoritma tasarım sürecinde öncelikle seçim yapılacak popülasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra algoritma kullanıcı tarafından belirlenen ya da popülasyondan rasgele seçilen başlangıç değerleri ile çalışmaya başlamaktadır. Bir sonraki adımda her popülasyon bireyi için ayrı bir uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu uygunluk değeri ile hedefe en yakın sonucu veren giriş verilerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Hesaplama sonucunda en yüksek değere sahip giriş verisi bir sonraki iterasyona doğrudan aktarılmakta, diğer giriş verileri ise mutasyon ve çaprazlama işlemlerine tabi tutularak bir sonraki iterasyonda kullanılmaktadır (Bianchi ve Bolognani, 1998; Sooriyakumar, 2010; Mutluer ve Bilgin., 2012; Mahmoudi ve ark., 2013; Dinh, 2017; Mutluer, 2018; Ruba ve ark., 2018).



Şekil 3.24. Genetik algoritmanın akış diyagramı

GA'nın koşturulmasında kullanılan çalışma parametreleri Çizelge 3.10'da görülmektedir.

Çizelge 3.10. Genetik algoritmanın koşturulmasında kullanılan çalışma parametreleri

Yetişkin birey sayısı (Parents)	30
Çocuk birey sayısı (Children)	30
Seçme algoritması	Rulet çarkı
Aktarılan birey sayısı	10
Maksimum evrim sayısı	1000

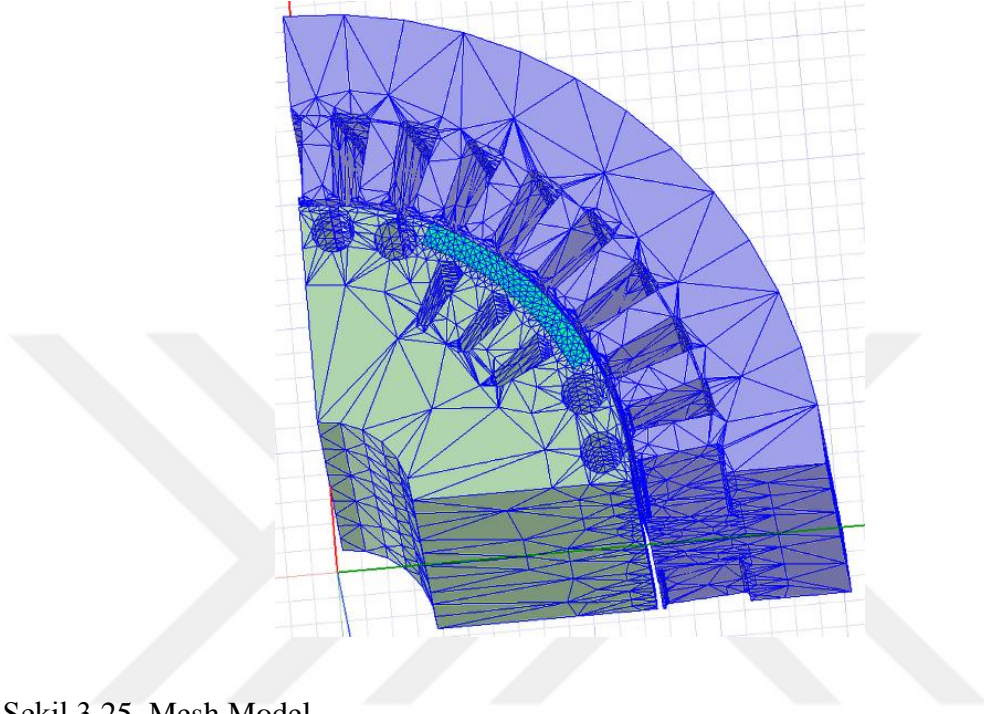
Çizelge 3.10’da görölmekte olan yetişkin birey sayısı hesaplamalarda kullanılan başlangıçtaki popölyasyon sayısını, çocuk birey sayısı ise bir sonraki neslin popölyasyon sayısını göstermektedir. Aktarılan birey sayısı popölyasyon bireylerinin incelenmesi sonucunda popölyasyonda tutulacak en iyi (daha performanslı) birey sayısını göstermektedir. Dolayısı ile algoritmanın her bir sonraki nesle geçişinde 10 adet en iyi birey seçilmekte, kalan 20 birey ise seçilen en iyi 10 bireyin mutasyona uğratılması ya da çaprazlanması ile yeniden üretilmektedir. Çizelgede görölen Rulet çarkı seçim şekli yeni bireylerin üretilmesinde kullanılan bir çeşit rasgele seçim algoritmasını göstermektedir. Bu yolla yapılan seçimlerde birey popölyasyonuna seçilebilirliği az olan bireylerin de düşük bir oranda girmesine olanak sağlamaktadır. Böylelikle GA veri havuzunun sadece bir yerine odaklanıp çalışma alanını kısıtlamamaktadır.

3.4.2. Vuruntu torkunun azaltılması

Optimizasyon çalışmalarında yüksek verimli optimum rotor tasarımınn elde edilmesine yönelik çok sayıda analiz çalışması yürütölmüştür. Yapılan analizlerde kısa sürede çözümler üretmesi nedeni ile motor tasarımı iki boyutlu olarak değerlendirilmiş ve analiz çalışmaları Maxwell 2D Transient çözücü ile tamamlanmıştır. Çalışmanın bu adımında GA analizleri sonucunda elde edilen motor modelinin tork kalitesinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Analizlerde özellikle motorun kararlı rejimdeki tork karakteristiğine yoğunlaşılmış olup motor tork kalitesinin belirlenmesinde mil torkunda meydana gelen salınım oranı (T_R) referans alınmıştır. Salınım oranı SI birimi Eşitlik 3.84’teki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlikte görölen, T_{rms} ve T_{ort} , sırası ile motor torkunun RMS ve ortalama değerine karşılık gelmektedir.

$$T_R = \frac{T_{rms}}{T_{ort}} \quad (3.84)$$

Yapılan analiz çalışmalarında modelin geçici ve kararlı rejim çalışma karakteristiğinin daha detaylı incelenmesi amacı ile SEY analizlerinde 3D motor modeli tercih edilmiştir. Analizlerin yapılmasında Maxwell 3D Transient çözücüsü kullanılmıştır.



Şekil 3.25. Mesh Model

Şekil 3.25 ile sunulan görselde analizlerde kullanılan motor 3D tetrahedra mesh modeli görülmektedir. Analiz çalışmalarında motor modeli 173665 elemana bölünmüştür. Sunulan görseldeki stator nüvesi 35569 elemandan oluşurken, rotor nüvesi 26133 elemana bölünmüştür. Kalan elemanlar stator sargıları, motor mili kısa devre çubukları, SM'ler ve çalışma alanındaki boşluklar da kullanılmıştır.

ŞK-RASM'lerde stator dişleri ile SM'lerin etkileşimi sonucunda, özellikle de kutup geçişlerinde üretilen bileşke torkta dalgalanmalar meydana gelmekte (Cetin ve ark., 2018) ve bu da motorun vurutulu bir tork üretmesine neden olmaktadır. Vuruntu torku temelde stator oluklarının rotor manyetik alanı ile etkileşimi nedeni ile meydana gelen tutma torku ve uyartım akımının motor ters EMK'sı ile uyumlu olmaması kaynaklı meydana gelmektedir. Dolayısı ile vurutu torkunun azaltılması için motor tutma torkunun ve ters EMK karakteristiğinin detaylı incelenmesi gerekebilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde vurutu torkunun azaltılmasına yönelik birçok farklı perspektifte yaklaşıma yer verildiği görülmekle beraber çoğunlukla stator uyartım akımı, manyetik

alan dağılımından yola çıkarak SM şekli ve oluk ağzı açıklığı gibi geometrik özellikleri ve rotor üzerinde meydana gelen teğetsel kuvvetlerin etkileri üzerine yoğunlaştırıldığı görülmüştür (Hanselman, 1997). Torkta meydana gelen dalgalanmaların azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde stator dişlerinin ve/veya SM'lerin optimizasyonu, stator ya da rotorun kaykılı üretilmesi üzerinde durulmuştur (Zhu ve Howe, 2000; Sheth ve ark., 2006; Kim ve ark., 2008; Hsiao ve ark, 2011; Islam ve Ortega, 2017). Teğetsel kuvvetten yola çıkan çalışmalarda vuru torkunun Fourier serisi ile analiz edildiği ve oluk geçişlerinin kolaylaştırılması ile vuru torkunun azaltılabileceği sonucu çıkarıldığı görülmüştür. Bu da vuru torkunun azaltılmasında kaykılı olukların, kutup ve oluk sayısının önem arz ettiğini ortaya koymuştur. Söz konusu yaklaşım ile yapılan diğer çalışmalara göre manyetik akı dağılımının karaktersize edilmesi gibi iş aşırı efor zaman gerektiren çalışmalardan da kaçınılabilmektedir (Hanselman, 1997).

SM'lerin, tork dalgalanmalarını azaltacak şekilde optimize edilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntem SM'lerin stator dişleri ile etkileşiminin azalması amacı ile rotor nüvesine gömülmesidir. Fakat bu yöntem yüzey yerleştirmeli SM yer alan rotor topolojilerinde uygulanabilir değildir. Buna ek olarak çalışmada stator tasarımının mevcut bir ASM'den alınması neticesinde stator oluk ve diş yapısında güncelleme yapılması mümkün değildir.

Diğer bir yandan rotorun kaykılı üretilmesi SM'lerin rotor gövdesine yerleştirilmesini zorlaştırmakta bu da motorun üretim maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenlerden dolayı tork dalgalanmalarının azaltılmasında stator nüvesinin kaykılı üretilmesi üzerinde durulmuştur. Böylelikle stator oluk ve diş tasarımında değişiklik yapılmadan sadece nüvenin kaykılı üretilmesi ile torktaki dalgalanmaların azaltılması amaçlanmıştır.

Kaykılı metodu FDAM'lerde tutma torkunun azaltılması amacı ile yoğun olarak kullanılmaktadır. Teorik olarak doğru kaykılı açısı ile tutma torku etsinin önüne tamamı ile geçilebilmektedir. Kaykılı kullanılarak hava aralığındaki relüktans dalgalanmaları azaltılabilmekte dolayısı ile bu da torku torkunun etkisi azaltmaktadır. Tutma torku hava aralığında depolanan enerjiden yola çıkılarak hesaplanabilmektedir. Eşitlik 3.85'te tutma torkunun ko-enerjideki dalgalanmalara bağlı olarak ifadesi yer almaktadır (Donmezer ve Ergene, 2010).

$$T_{tutma} = \frac{\partial W}{\partial E_{\theta}} \quad (3.85)$$

Eşitlikte görülmekte olan T_{tutma} tutma torkunu, W mekanik konumu ve E_{θ} hava aralığında depolanan ko-enerjiyi ifade etmektedir. Buna ek olarak Eşitlik 3.86'da tutma torkunun hava aralığı relüktansındaki (\mathcal{R}_{δ}) değişime bağlı olarak ifadesi yer almaktadır (Donmezer ve Ergene, 2010).

$$T_{tutma} = \frac{1}{2} \phi_{\delta}^2 \frac{d\mathcal{R}_{\delta}}{d\theta_k} \quad (3.86)$$

Eşitlikte görülen θ_k hareket eden rotor referans eksenini ile stator eksenini arasındaki açıyı ifade etmektedir. Buradan tutma torkunun Fourier serisi açılımını ile Eşitlik 3.87'deki gibi elde edilebilmektedir (Donmezer ve Ergene, 2010).

$$T_{kaykılı}(\theta_k) = \sum_{i=1}^{\infty} K_{kaykılı} T_i \sin(iC_k \theta_k + \theta_i) \quad (3.87)$$

Eşitlikte görülen $K_{kaykılı}$ kaykılı faktörünü ifade etmekte olup, $K_{kaykılı} = 1$ değeri laminasyon da kaykılı kullanılmadığı anlamına gelmektedir. C_k ise kutup sayısı ile oluk sayısının en küçük katını, T_i harmoniklerin mutlak değerini göstermektedir. Son olarak eşitlikte görülen θ_i faz açısını göstermektedir. Bu veriler ışığında $K_{kaykılı}$ Eşitlik 3.88'deki gibi tanımlanabilmektedir (Donmezer ve Ergene, 2010).

$$T_{kaykılı} = \frac{\sin(iC_k \pi \kappa / Q_s)}{iC_k \pi \kappa / Q_s} \quad i = 1, 2, 3.. \quad (3.88)$$

Eşitlikte görülen κ kaykılı açısını ifade etmekte olup Eşitlik 3.89'daki hesaplanabilmektedir (Donmezer ve Ergene, 2010).

$$\kappa = \frac{360}{Q_s N_{tutma}} \quad (3.89)$$

Doğru kaykılı açısı (κ) oluk sayısına ve bir oluk adımındaki tutma torku periyoduna (N_{tutma}) bağlıdır. N_{tutma} değeri eşitlik 3.90'daki gibi elde edilebilmektedir (Donmezer ve Ergene, 2010).

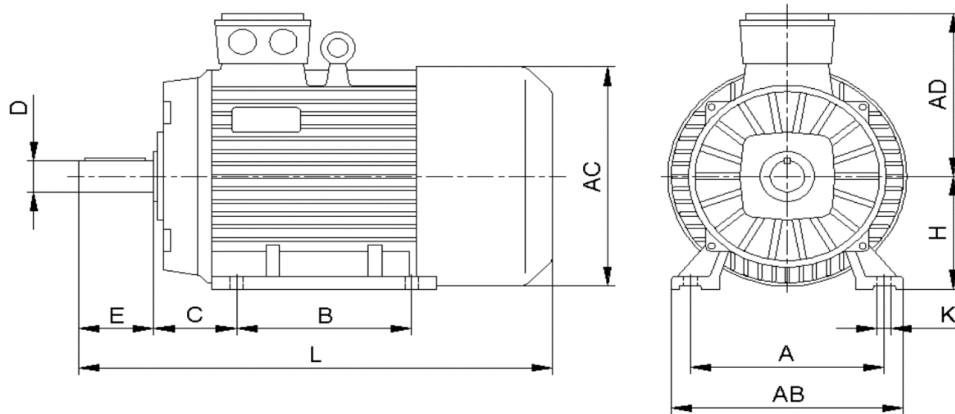
$$N_{tutma} = \frac{p}{EBOB(Q_s, p)} \quad (3.90)$$

Eşitlikte görülen EBOB, p ve Q_s 'nin en büyük ortak böleni göstermektedir.

3.5. Prototip Üretimi

Önceki bölümlerde ŞK-RASM'lerin tasarım süreci detaylı olarak incelenmiş ve yeni bir ŞK-SMSM topolojisi önerilmiştir (bkz. Şekil 3.17). Ayrıca yürütülen çalışmalar kapsamında önerisi sunulan yeni motor modelinin performans açısından iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılarak nihai motor modeli elde edilmiştir. Elde edilen nihai motor tasarımının çalışma karakteristiği ve performansı ile ilgili detaylı analiz çalışmaları yapılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Elde edilen ŞK-RASM'nin prototip üretimine yönelik yapılan çalışmalara bu başlık altında yer verilmiştir.

Önceki bölümlerde üzerinde durulduğu gibi ŞK-RASM'ler ASM ile aynı stator yapısına sahiptir. Bu nedenle her iki motor tipinde de aynı motor gövdesi, motor kapakları ve soğutma pervanesi kullanılabilir. Tez çalışması ile önerisi sunulan modele ait prototipin üretilmesinde, maliyetin düşürülmesi açısından motor gövdesi ve stator nüvesi sacları yerel bir motor üreticisine ait 4 kutuplu IE2 5.5kW'lık 132s-4 gövdeli ASM'nin üretim hattından temin edilmiştir. 132S-4 standart pik (dökme demir) motor gövdesi Şekil 3.26'da ve gövde ölçüleri Çizelge 3.11'de görülmektedir (Anonim, 2019l).



Şekil 3.26. 132S-4 standart pik gövdesi

Çizelge 3.11. 132S-4 standart pik (dökme demir) gövdeli motorun gövde ölçüleri

GÖVDE	132s-4	GA	41	GD	8
H	132mm	A	216	B	140
C	89mm	AB	265	AC	275
AD	213	K	12	L	470
ØD	38	E	80	F	10

Önceki bölümlerde de üzerinde durulduğu gibi stator nüve plakaları ve gövdenin temin edildiği IE2 ASM’de stator ve rotor nüvesinin imal edilmesinde piyasa koşullarında daha kolay bulunan M330 50A tipi silisli çelik sac tercih edilmiştir. Dolayısı ile tez çalışması ile önerilen prototipin üretilmesinde de maliyetin düşük olması açısından silisli sac malzemesinde değişiklik yapılmamıştır. Stator sargı tasarımında Çizelge 3.7 ile belirtilen sargı özellikleri kullanılmış olup, kullanılan sargı şeması EK-2’de ayrıca sunulmuştur.

Şekil 3.27 ile sunulan görsellerde statorun imalat adımlarına yer verilmiştir. İmalat adımları ile ilgili detaylar aşağıdaki gibidir.

- (a) Standart IE2 ASM’ye ait M330 50A tipi silisli çelikten imal edilmiş stator plakaları
- (b) Stator plakaları (rotor plakaları ile birlikte)
- (c) Stator nüvesinin imal edilmesi (plakalar 13° kaykılı olarak diziliyor)
- (d) 13° kaykılı olarak dizilmiş stator nüvesi
- (e) 13° kaykılı olarak dizilmiş stator nüvesi (kaynakla birleştirilmiş)
- (f) 13° kaykılı olarak dizilmiş stator nüvesi (kaynakla birleştirilmiş)
- (g) Stator nüvesinin preslenmesi (plakalar arasında kalan boşlukların kapatılması amacı ile)
- (h) Stator nüvesi ve sargıları (motor gövdesine yerleştirilmiş)
- (i) Gövde, gövde kapakları ve rulmanlar görülmektedir.



(a)

(b)

(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



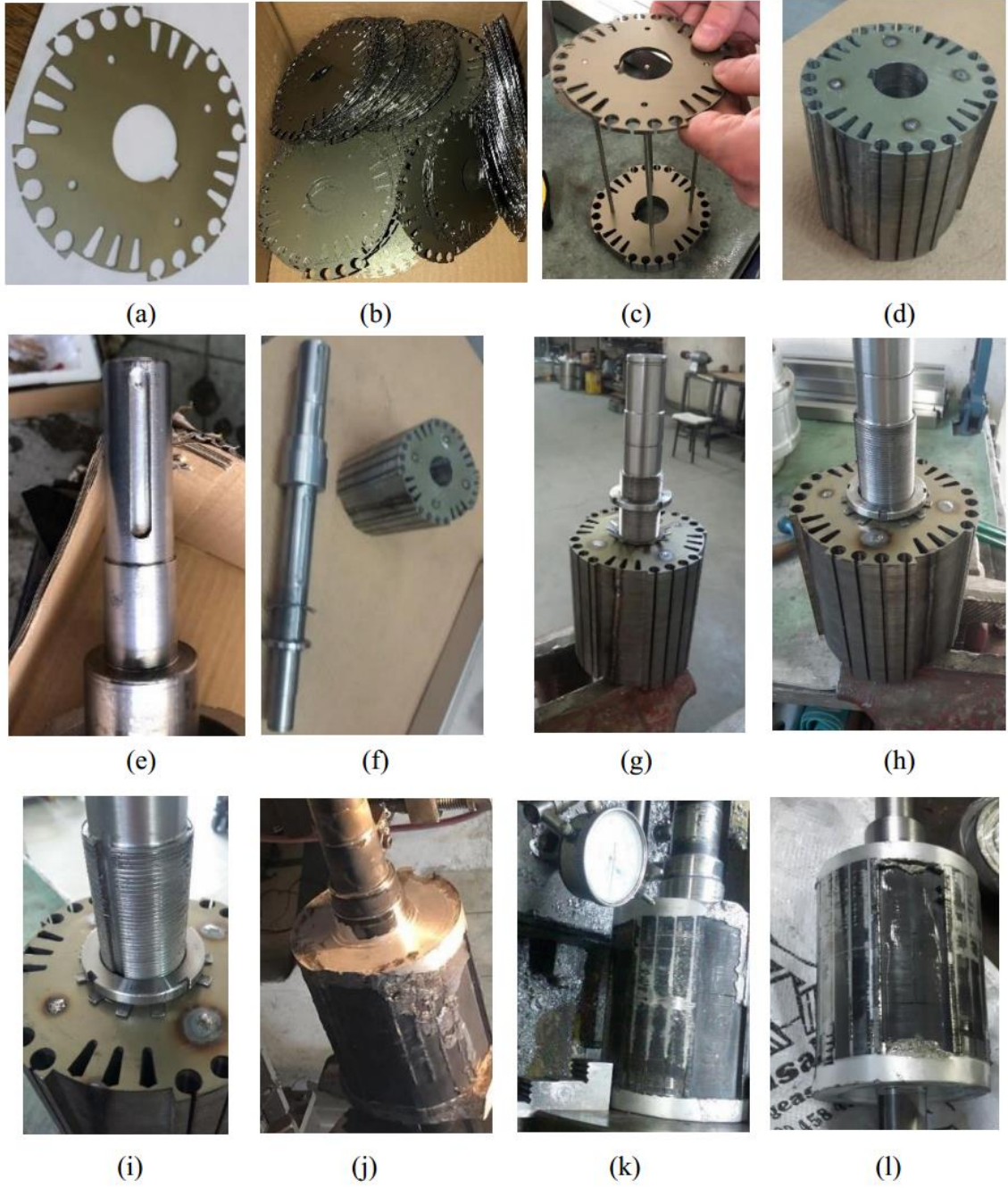
(i)

Şekil 3.27. Stator imalatı

Şekil 2.28 ile sunulan görsellerde rotorun imalat adımlarına yer verilmiştir. İmalat adımları ile ilgili detaylar aşağıdaki gibidir.

- (a) Özgün rotor topolojisinde M330 50A tipi silisli çelikten kesimi yapılan rotor plakaları

- (b) Özgün rotor topolojisinde kesimi yapılan rotor plakaları (tümü)
- (c) Rotor nüvesinin dizilmesi
- (d) Rotor nüvesinin tamamlanmış hali
- (e) Rotor mili (kamalı motor mili)
- (f) İmalatı tamamlanan rotor nüvesi ve motor mili
- (g) Motor milinin rotor nüvesine montajı
- (h) Motor milinin rotor nüvesine montajı (tamamlanmış)
- (i) Motor milinin rotor nüvesine montajı (tamamlanmış)
- (j) Kısa devre kafesinin imal edilmesi (işlenmemiş kütük hali)
- (k) Dökümü yapılan kafesin tornalanması
- (l) Dökümü yapılan kafesin tornalanması (tamamlanmış)



Şekil 3.28. Rotor nüvesi ve kısa devre kafesinin imal edilmesi

Şekil 2.28(l) ile sunulan görselde rotor nüvesi ve kısa devre kafesinin imal edilmiş hali görülmektedir. İlgili görselde de görüldüğü gibi SM yuvaları, SM montajı için hazır değildir. Şekil 2.29 ile sunulan görselde SM yuvalarının hazırlanması ve montajı adımlarına yer verilmiştir. Şekilde sunulan görseller ile ilgili açıklamalar aşağıdaki gibidir.

- (a) SM yuvalarının frezelenerek temizlenmesi
- (b) Rotor (SM'lerin montajına hazır)
- (c) Rotor (SM'lerin montajı tamamlanmış)
- (d) Rotor (SM'ler ve rulman takılmış)



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.29. SM yuvalarının hazırlanması ve montajı

Son olarak Şekil 3.30'da prototipin imal edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 3.30. Prototipin imal edilmiş hali

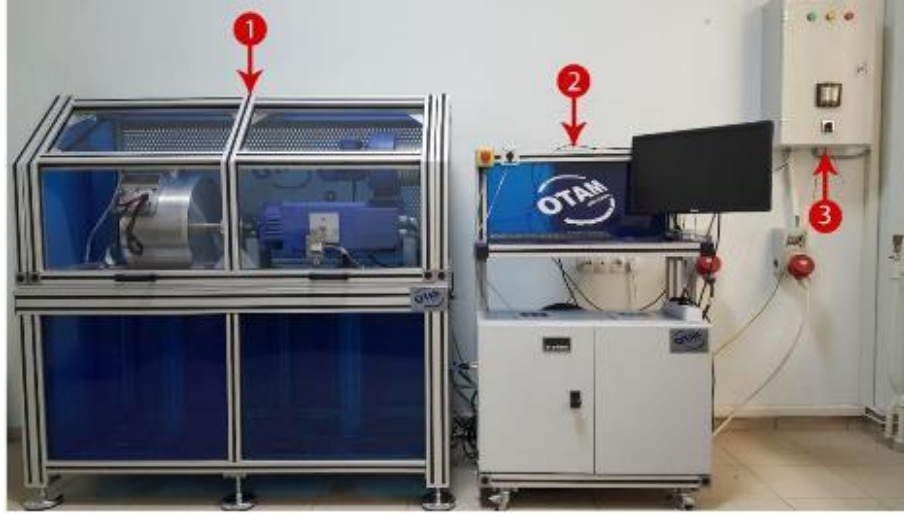
3.6. Üretimi Yapılan Motorun Performans Testleri

Önerilen topolojide üretimi yapılan ŞK-RASM prototipinin performans ve çalışma karakteristiği belirlenmesine yönelik, IEC 60034-30-2-1 standardına göre yapılan test çalışmaları bu bölüm altında incelenmiştir. Bu kapsamda motorun sargı direncinin bulunması, farklı yük profillerinde motorun kararlı – geçici rejim performansı, motor verimi ve güç faktörünün belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Test çalışmalarında halihazırda TOGÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında mevcut olan motor test düzeneğinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçların güvenilir olması açısından yapılan tüm testler 3'er kez tekrar edilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde, elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

İlerleyen bölümlerde öncelikle testlerin yapıldığı test düzeneği ve testler öncesinde yapılan hazırlık çalışmaları ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Daha sonra yapılan testlerle ilgili detaylar, her test için ayrı ayrı tartışılmıştır.

3.6.1. Test donanımı

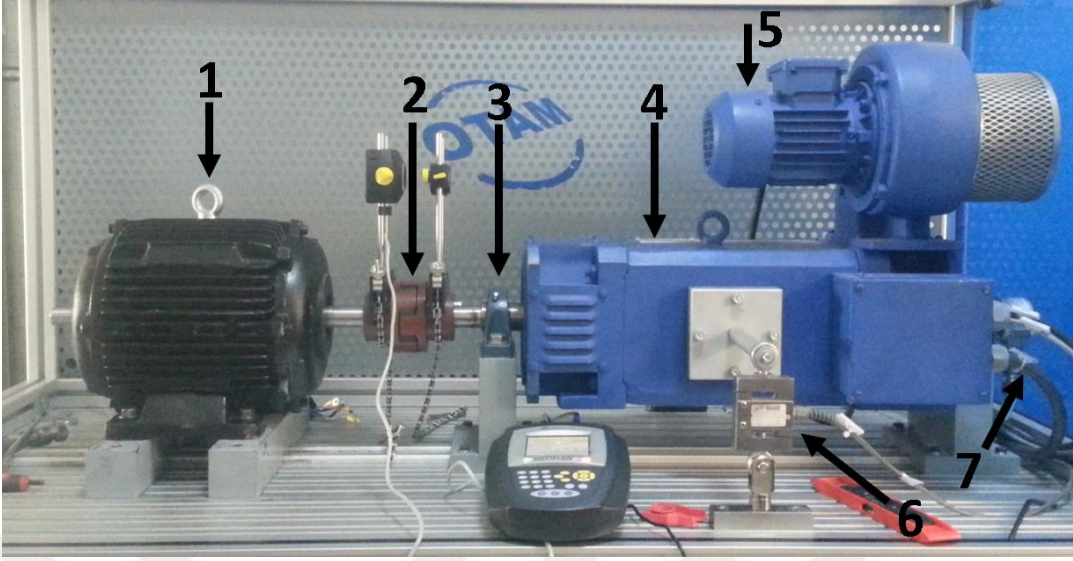
Motor yüklemelerinin yapılmasına olanak sağlayan bir adet yük motoruna sahip test düzeneğine 100 Nm'ye kadar yüklemeleri algılayan bir yük hücresi yerleştirilmiştir. Bir kontrol bilgisayarı üzerinden kontrol edilen düzenek, bilgisayarda yer alan bir paket program aracılığı ile, test anında çekilen akım, gerilim, motor tarafından üretilen mil torku, konum bilgisi ve dönüş miktarı anlık olarak kaydetmektedir. Test düzeneğinin genel görünümü Şekil 3.31'de görülmektedir (Eker, 2017).



Şekil 3.31. Test düzeneği genel görünümü (Eker, 2017)

Şekilde de görüldüğü gibi test düzeneği, test alanı (1), kumanda sehvası (2) ve güç ünitesi (3) olmak üzere üç ana kısımdan meydana gelmektedir.

750mm yüksekliğindeki alüminyum sigma profil sehpa üzerine yerleştirilmiş test birimi, 1500mm x 700mm çalışma alanına sahiptir. Sehpa üzerine, çalışma alanını ortalayacak şekilde kızaklı bir fikstür yerleştirilmiştir. Böylelikle yük motoru ile test motorunun aynı ekseninde karşılıklı bağlanması olanaklı hale gelmiştir. Şekil 3.32 ile sunulan görselde üretimi yapılan prototipin test alanına bağlanmış hali görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi test birimi, test motoru (1) ve yük motorunun (4) karşılıklı bağlanmasına olanak sağlayan kapalı bir çalışma alanına sahiptir. Çalışma alanında testlerde yük görevi üstlenen bir adet 10 kW mil gücüne sahip DA motor yer almaktadır (4). DA yük motorunun maksimum devri 4000 1/dak, nominal torku 2270 1/dak'da 42 Nm'dir. DA motoru üzerinde dahili radyal fanlı bir soğutma ünitesi (5), motor devrinin ölçülmesi amacı ile bir adet motora akuple enkoder (Baumer EIL580 1024 darbe/devir (7) ve bir adet tork sensörü (6) yer almaktadır. Tork sensörü olarak, kuvvet kolu ile motor gövdesine bağlanan IP66 Sınıfı, -300C - +700C aralığında çalışabilen ve 100 Nm'ye kadar ölçüm aralığına sahip bir yük hücresi kullanılmıştır. Mil ekseninde döner serbestliğe sahip (no 3 ile gösterilen kaymalı tip yatak aracığı ile) motor gövdesi üzerinde meydana gelen kuvvet gövdeye bağlanan kuvvet kolu aracılığı ile yük hücresi aktarılmaktadır.



Şekil 3.32. Test Birimi

Yukarıda motor testlerinin yapıldığı test düzeneği ile ilgili detaylar sunulmuştur. Söz konusu düzeneğe ek olarak testler esnasında test ortamından harici veri edinimi yapılmıştır. Veri ediniminde National Instrument firmasının cDAQ-9174 kabini ve NI9225 ve NI9239 modülleri kullanılmış olup motor hız ve tork bilgisi yüksek çözünürlüklü olarak haricen kayıt altına alınmıştır. Veri toplama ve analizinde LabVIEW programı (versiyon 2011) ve modülleri kullanılmıştır. Söz konusu bu donanımlara ek olarak motor eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesinde Simatics S120 AC sürücüsü kullanılmıştır. AC sürücüsünün konfigürasyonu ve kumanda edilmesi amacı ile Sinamics Micromaster Starter V5.1 yazılım ortamından yararlanılmıştır.

3.6.2. Testler öncesi hazırlık

Testlere başlamadan önce gerekli güvenlik önlemleri alınarak motorun terminal bağlantıları yapılmıştır. Test verilerinin doğru bir şekilde alınması amacı ile prototip ile yük motoru arasında mil eksenlemesi yapılmıştır. Eksenleme işlemi TOĞÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında mevcut olan Pruftechnik Shaftalign OS3 motor mili hizalama cihazı (Şekil 3.33) ile yapılmıştır.

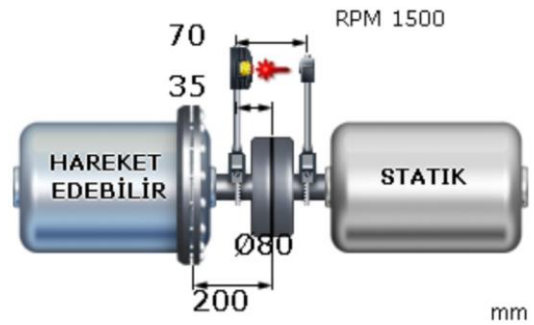


Şekil 3.33. Pruftechnik Shaftalign OS3 motor mili hizalama cihazı

Şekil 3.34a ile Pruftechnik Shaftalign OS3 şaft hizalama cihazı hizalama ayaklarının kaplin akuplajına yerleştirilmiş hali ve Şekil 3.34b ile bağlantı giriş parametreleri görülmektedir. Hizalama sonucu yatayda ve dikeyde sapma kabul edilebilir düzeye kadar indirilerek testlere başlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.34. Motor mili ile prototip motorun eksenlenmesi, (a) Pruftechnik Shaftalign OS3 şaft hizalama cihazı hizalama ayaklarının kaplin akuplajına yerleştirilmiş hali, (b) ve ayar parametreleri

3.6.3. Testlerin yapılması

Test çalışmalarında motor farklı yük profillerinde çalıştırılarak, tork, akım, gerilim, devir ve konum bilgileri yüksek çözünürlükle kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veriler ışığında geçici ve kararlı rejimdeki motor verimi, güç faktörü, tork karakteristiği ve akım rejimi

belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca testlere ters EMK ve tutma torkunun belirlenmesine yönelik çalışmalar da dahil edilmiştir. Elde edilen sonuçların güvenilir olması açısından yapılan tüm testler 3'er kez tekrar edilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Yapılan testler dört kategoride toplanmış olup, ilgili detaylar ayrı ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

Boşta çalıştırma

Testlerin bu adımında prototip motor, eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi amacı ile Simatics S120 AC sürücüsü üzerinden yüksüz olarak çalıştırılmıştır. AC sürücüsünün konfigürasyonu ve kumanda edilmesi amacı ile Sinamics Micromaster Starter V5.1 yazılım ortamından yararlanılmıştır. Test aşamasında motor sıcaklığı nominal çalışma noktasına kadar yükseltilmiştir.

Sabit yük profili ile yapılan testler

Bu başlıkta yapılan testlerde motorun farklı sabit yükler altındaki kalkış ve geçici rejim performansı incelenmiştir. Bu kapsamda motor yüksüz çalışmadan 40 Nm'ye kadar 5Nm aralıkla, her bir sabit yük için ayrı ayrı test edilmiştir. Ayrıca senkron çalışma karakteristiğinin daha iyi anlaşılması amacı ile motor yükü kararlı rejimde iken yüksüz çalışmadan 40 Nm'ye kadar 2 Nm aralıkla arttırılarak motor senkron çalışma karakteristiği incelenmiştir.

Ters EMK ve Tutma torkunun belirlenmesi

Sargı dağılımı dengeli ve tork dalgalanmaları düşük olan motorlarda, motor tarafından üretilen Ters-EMK'nın da düzgün bir sinüzoidal profil çizmesi beklenmektedir. Düzensiz Ters-EMK'ya sahip bir motorda hava aralığı akı dağılımının da düzensiz olduğu sonucu çıkarılmakta ve motor tarafından üretilen tork kalitesinde düşüş gözlemlenmektedir. Tutma torku ise önceki bölümlerde de tartışıldığı gibi, motor milinde meydana gelen ve motor boşta iken etkisinin hissedildiği motor milinin dönmesine engel olan bir tork etkisidir. Rotor gövdesinde SM'lerin yer alması nedeni ile üretilen bu tork bileşeni motor tarafından üretilen mil torkunun kalitesinin düşmesine neden olan bir faktördür.

Ters-EMK'nın elde edilmesinde prototip motor, test düzeneğinin yer alan SM makinenin motor olarak kullanılması ile 1500 d/d'ya kadar hızlandırılmıştır. Test süresinde motor sargı uçlarında meydana indüklenen gerilim yüksek çözünürlüklü olarak kaydedilmiştir. Tutma torkunun belirlenmesinde ise prototip motor 10 sn süresince 15 d/d hızla döndürülerek motor milinde meydana tutma torku anlık kayıt altına alınmıştır.

Ani yükleme ve yükten alma testleri

Testlerin bu adımında motorun kararlı çalışma rejiminde iken ani yüklenmesi ve yükten düşmesi durumundaki senkronizasyon performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Yükten alma testlerinde nominal yükte çalışan motorun yükü, aniden 25 Nm'ye kadar düşürülmüştür. Ani yükleme testlerinde ise nominal yükte çalışan motorun yükü, aniden 40 Nm'ye kadar çıkarılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Önceki bölümde yapılan çalışmalarda kullanılan yöntem ve materyaller ile ilgili detaylar sunulmuştur. Bu kapsamda konuyla ilgili detaylı bir literatür özeti sunulmuştur. Sonraki bölümde tez çalışmasına konu olan ŞK-RASM'lerin tasarım süreci detaylı olarak incelenmiştir. Edinilen bilgilerin tecrübe edilmesi amacı ile literatürde yoğun olarak çalışılan üç farklı ŞK-RASM topolojisi modellenmiştir. Oluşturulan motor modelleri ile ilgili detaylar sunulmuştur. Edinilen tasarım tecrübesinin yanı sıra üretim kolaylığı, verimlilik ve az bakım gerektirme gibi konular da göz önünde bulundurularak yeni bir ŞK-RASM topolojisi önerilmiştir. Önerilen topolojinin yapısal detayları ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Daha sonra önerilen topolojinin verimlilik ve tork kalitesinin artırılmasında kullanılan yöntem ve materyaller sunulmuştur. Son olarak önerilen iyileştirilmiş topolojinin prototip üretimi ve yürütülen test çalışmaları ile ilgili detaylara yer verilmiştir.

Önceki bölümde detayları sunulan çalışmalar sonucu elde edilen bulgular bu bölümde incelenmiştir. Bu kapsamda konunun anlaşılması açısından öncelikle önceki bölümde detayları sunulan üç yaygın ŞK-RASM topolojisi analiz edilerek elde edilen bulgular tartışılmıştır. Daha sonra önerilen topolojide analitik modellenmesi yapılan ŞK-RASM'nin çalışma karakteristiği ile ilgili detaylar sunulmuştur. Sonraki bölümlerde modelin iyileştirilmesi, prototip üretimi ve prototipin test edilmesi ile ilgili elde edilen bulgular detaylı olarak tartışılmıştır. Test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılarak performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

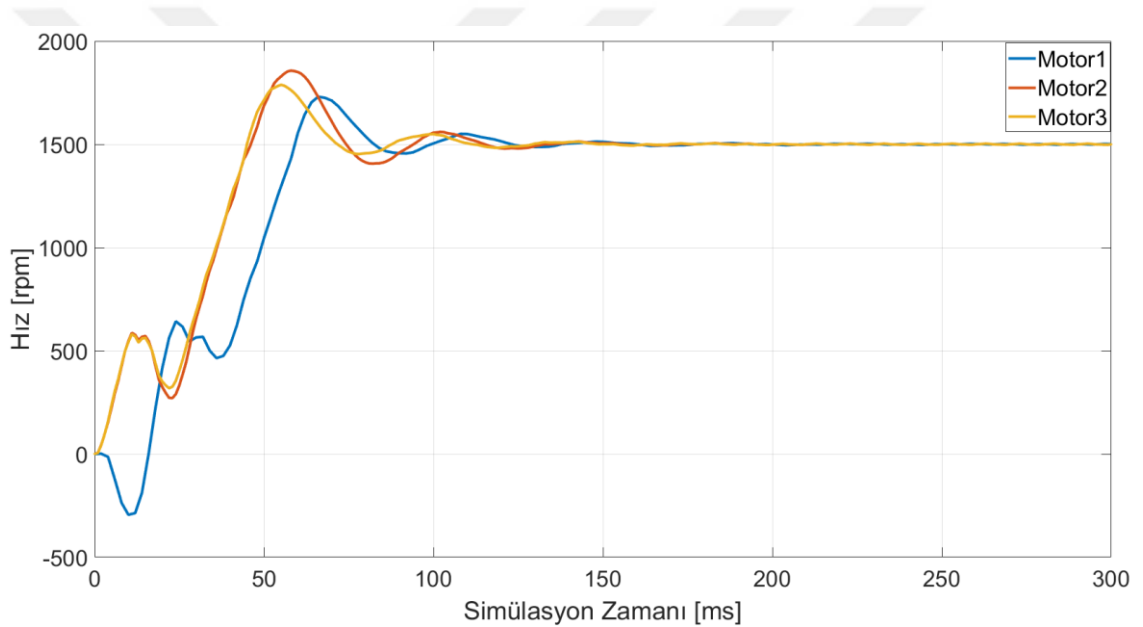
4.1. Mevcut ŞK-RASM Tasarımlarının İncelenmesi

Önceki bölümde de üzerinde durulduğu gibi literatürde yoğun olarak üç farklı rotor topolojisinin çalışıldığına kanaat getirilmiştir (bkz. Şekil 3.18). Tez çalışması kapsamında her üç topolojide 5.5 kW gücünde 132s gövde yapısı için aynı stator ve kısa devre kafesi kullanılarak modellenmiştir. Oluk tasarımlarında kalkış performansının daha yüksek olması nedeni ile Nema D Sınıfı oluk geometrisi (bkz. Şekil 3.12) tercih edilmiş olup SM'ler oluk altına (rotor boyunduruğuna) yerleştirilmiştir. Ayrıca her üç tasarımda da sonuçların karşılaştırılabilir olması açısından aynı miktarda SM kullanılmasına özen gösterilmiş olup SM'lerden kalan alanlarda akı bariyerlerine yer verilmiştir. Elde edilen motor tasarımlarının çalışma karakteristiğinin anlaşılması amacı ile, her üç tasarım da

SEY analiz ortamına aktarılmıştır. Her üç motorda da analiz süresinin kısa olması açısından ¼ 2D motor modeli tercih edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen bulgular ilerleyen bölümde detaylı olarak incelenmiştir.

4.1.1. Tasarımların performans değerlendirilmesi

2D SEY analiz ortamında ¼ motor modeli kullanılarak modellenen ŞK-RASM'ler 300ms boyunda simüle edilerek geçici ve kalıcı motor performansları incelenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında kalkış performansı, senkron çalışma performansı, tork karakteristiği ve akım rejimi birbiri ile karşılaştırılmıştır.

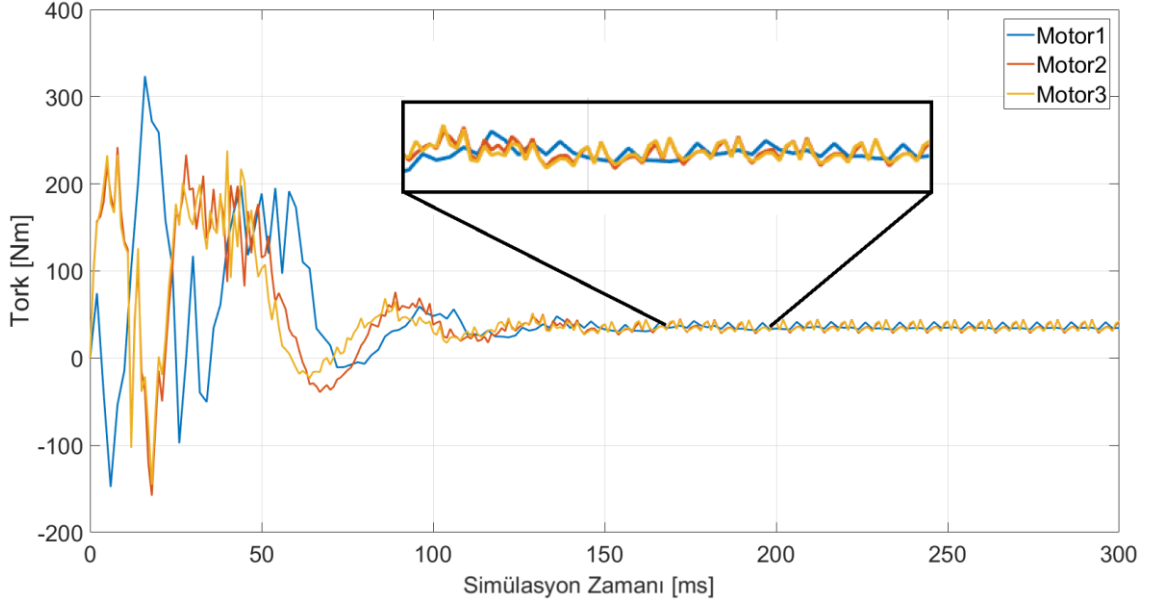


Şekil 4.1. Motor hızlanma karakteristikleri

Şekil 4.1 ile sunulan grafikte tam yük analizleri sonucunda elde edilen motor hızlanma karakteristikleri görülmektedir. Grafikten de anlaşıldığı üzere Motor1 diğer iki motora göre senkron hıza daha geç ulaşabilmektedir. Buna ek olarak tasarımında daha kalın SM kullanılan Motor1'in kalkışında ciddi bir çökme meydana gelmektedir. Her ne kadar Motor2 ve Motor3 benzer hızlanma karakteristiklerine sahip olsa da Motor3'ün daha istikrarlı bir kalkış sergilediği söylenebilir.

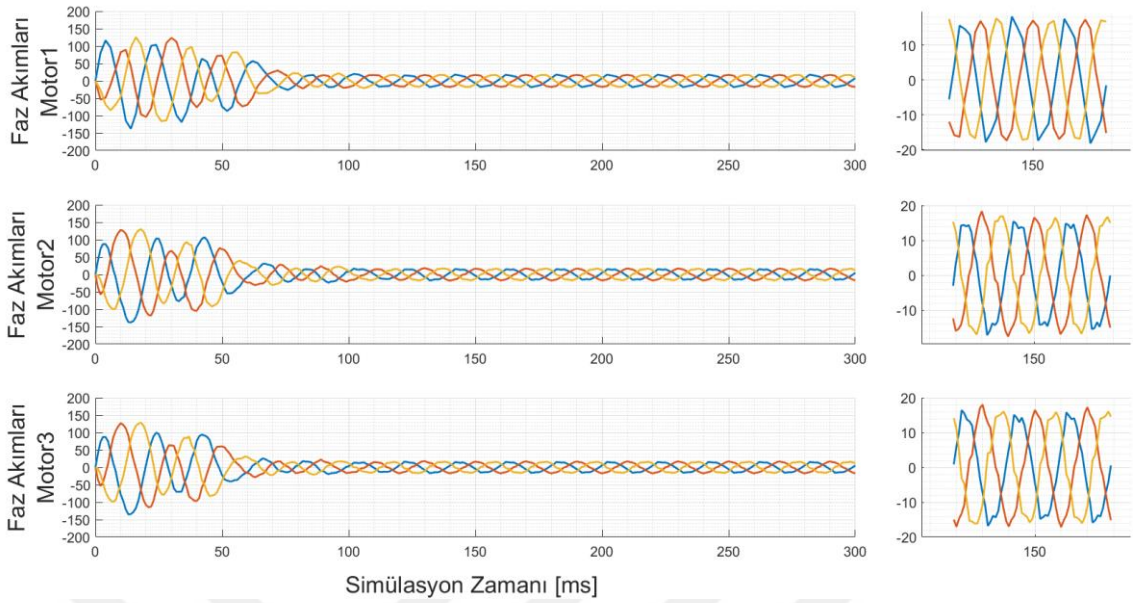
Şekil 4.2 ile sunulan grafikte analizler sonucu elde edilen tork karakteristikleri görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi her üç motorda benzer tork karakteristikleri gösterilen kalkış esnasında Motor1'in diğer iki motora göre mil torkunda daha fazla

dalgalanma ürettiği gözlemlenmiştir. Kararlı çalışma durumunda ise her üç motorun da hedeflenen anma torkunu üretebildiği görülebilmektedir. Son olarak kararlı durumda iken her üç motorun da milinde tork dalgalanmaları meydana geldiği, söz konusu dalgalanmaların Motor1'de tercih edilen tasarımda çok daha az etkin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. Tork karakteristiği

Şekil 4.3 ile sunulan grafikte ise üç motora ait analizler sonucunda elde edilen faz akımları görülmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere her üç motorda kalkış anında anlık 100 A'dan fazla akım(anlık) çekebilmektedir. Buna ek olarak hat akımının her motor için 12 A (RMS) civarında olduğu gözlemlenmiştir. Hesaplanan bu değerlerin endüstriyel ürünlerle karşılaştırıldığında %8-10 civarında daha yüksek olduğu gözlemlenen diğer bir durumdur.



Şekil 4.3. Faz akımları

Söz konusu motor tasarımları üretim kolaylığı ve tasarım açısından incelendiğinde tüm tasarımlarda gömülü SM kullanılması neticesinde, motorların üretim sürecinin yüzey yerleştirmeli SM'lere göre daha meşakkatli olacağı görülmüştür. Diğer bir yandan tek parça SM kullanılması nedeni ile Motor1 ve Motor 2'nin , Motor3'e göre daha zahmetsiz bir şekilde üretilebileceği söylenebilmektedir. Ayrıca burada üzerinde durulması gereken bir diğer konu da Motor1'de SM'lerin gövdeye dik konumlandırılması nedeni ile istenen miktar ve geometride SM'nin rotor gövdesine yerleştirilmesi mümkün olmayabilmektedir. Karşılaşılan bu problem SM tasarımının hedeflenenden kalın olması ya da daha az miktarda SM kullanılması ile aşılabilmektedir. Her iki durumda da motor veriminde düşme meydana gelmektedir.

Motor2 ve Motor3 ile sunulan tasarımlarda rotora gömülen SM'ler gövdeye göre sırası ile yatay ve açılı olarak konumlandırılmaktadır. Her iki tasarımda da mıknatıs sonlarından meydana gelen saçak etkisinin azaltılması amacı ile akı bariyerlerine yer verilmiştir. Burada üzerinde durulması gereken bir diğer konu da her iki tasarımda da SM'lerin hava aralığına daha yakın olması nedeni ile motor tarafından üretilen tork dalgalanmalarında artış meydana gelmektedir. Ayrıca özellikle kalkış esnasında stator tarafından üretilen manyetik akının etkisi ile SM'ler demagnetize olabilmektedir.

Son olarak her üç tasarımda da SM'lerin rotor içine rahatça yerleştirilmesi için rotor oluk yüksekliğinin mümkün olduğunca en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu durum doğrudan rotor oluk alanının azalmasına ve dolayısı ile kısa devre çubuklarında meydana gelen akı yoğunluğunun artmasına ve motor veriminin düşmesine neden olabilmektedir. Nitekim her üç motorda da IEC IE4 taban verimlilik değerine ulaşılabilmektedir.

4.2. Önerilen Topolojide ŞK-RASM'nin Analitik Tasarımı

4.2.1. Tasarım detayları

Çalışmanın bu adımında öncelikle önerilen topolojide ŞK-RASM'nin analitik modellenmesi yapılmıştır. Söz konusu modelin oluşturulmasında ŞK-RASM tasarımı başlığı altında detayları sunulan analitik yöntemler kullanılmıştır. Oluşturulan model ile teknik detaylar Çizelge 4.1'de görülmektedir.

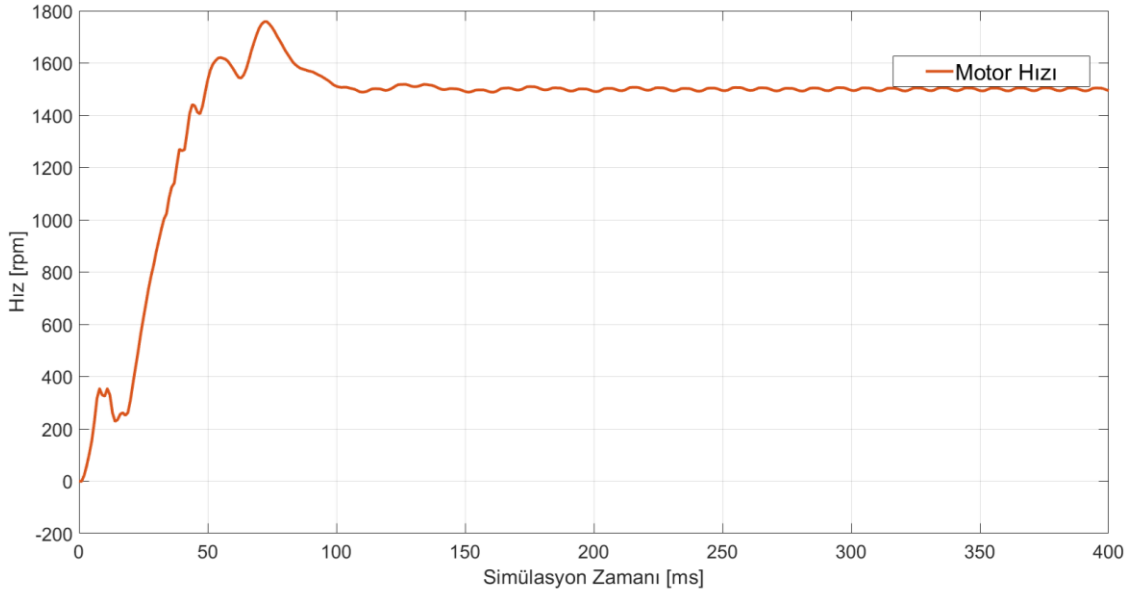
Çizelge 4.1. Analitik olarak modellenmesi yapılan önerilen topolojide ŞK-RASM tasarımına ait teknik detaylar

Makine ana boyutları	Gövde tipi	132s4
	Stator dış çapı, D_{so}	200mm
	Stator iç çapı, D_{si}	125mm
	Rotor çapı, D_r	124mm
	Rotor iç çapı, D_{ri}	35mm
	Laminasyon boyu, l	125mm
	Hava aralığı genişliği, δ	1mm
	Stator oluk tasarımı	Oluk ağız genişliği, $Bs0$
Oluk alt genişliği, $Bs1$		5.10mm
Oluk alt genişliği, $Bs2$		7.75mm
Oluk ağız yüksekliği, $Hs0$		0.6mm
Oluk üst radüs yüksekliği, $Hs1$		0.6mm
Oluk yüksekliği, $Hs2$		15.1mm
Oluk alt radüs yüksekliği, Rs		1.2mm
Stator sarımları		Katman sayısı
	Sargı tipi	Tam kalıp
	Oluktaki iletken sayısı, z_{Q_s}	28
	Oluk adımı, τ_{us}	7
	İletken kesiti, d_{Co}	0.9116
	Sargı faktörü, k_{w1}	0.96
	Oluk Sayısı, Q_s	36
	Nüve Malzemesi	M330 50A
	Sac kalınlığı	0.5mm
Rotor olukları (üst oluk)	Oluk ağız genişliği, $Bs0$	1.5mm
	Oluk ağız yüksekliği, $Hs0$	0.5mm
	Oluk alt genişliği, $Bs1$	9mm
Rotor olukları (alt oluk)	Oluk ağız genişliği, $Bs0$	Mevcut değil
	Oluk alt genişliği, $Bs1$	5.6mm
	Oluk alt genişliği, $Bs2$	3mm
	Oluk ağız yüksekliği, $Hs0$	0.5mm
	Oluk ağız yüksekliği, $Hs01$	0.5mm
	Oluk üst radüs yüksekliği, $Hs1$	1.2mm
	Oluk yüksekliği, $Hs2$	11.5mm
	Nüve Malzemesi	M330 50A
	Sac kalınlığı	0.5mm
Kısa devre halkaları	Kısa devre halkası genişliği, a_r	10mm
	Kısa devre halkası yüksekliği, b_r	20mm
PM özellikleri	SM Malzemesi	N45SH
	SM açıklığı, M_w	41 °
	SM kalınlığı, M_t	4.7mm
	B_r	1.37T
	H_C	1114kA/m

4.2.2. Performans değerlendirmesi

Çalışmanın bu bölümünde, önceki bölümde detayları sunulan, önerilen topolojide ŞK-RASM analitik tasarımının performans değerlendirmesi yapılacaktır. Söz konusu motorun performans değerlendirmesinde doğruluğu akademik olarak kabul görmüş bir elektromanyetik SEY yazılım ortamından yararlanılmıştır. Bu kapsamda önerilen topolojideki motor tasarımı, Çizelge 4.1’de görülmekte olan tasarım parametreleri kullanılarak, SEY analiz yazılımında 2D olarak modellenip, motorun kalkışı analiz edilmiştir.

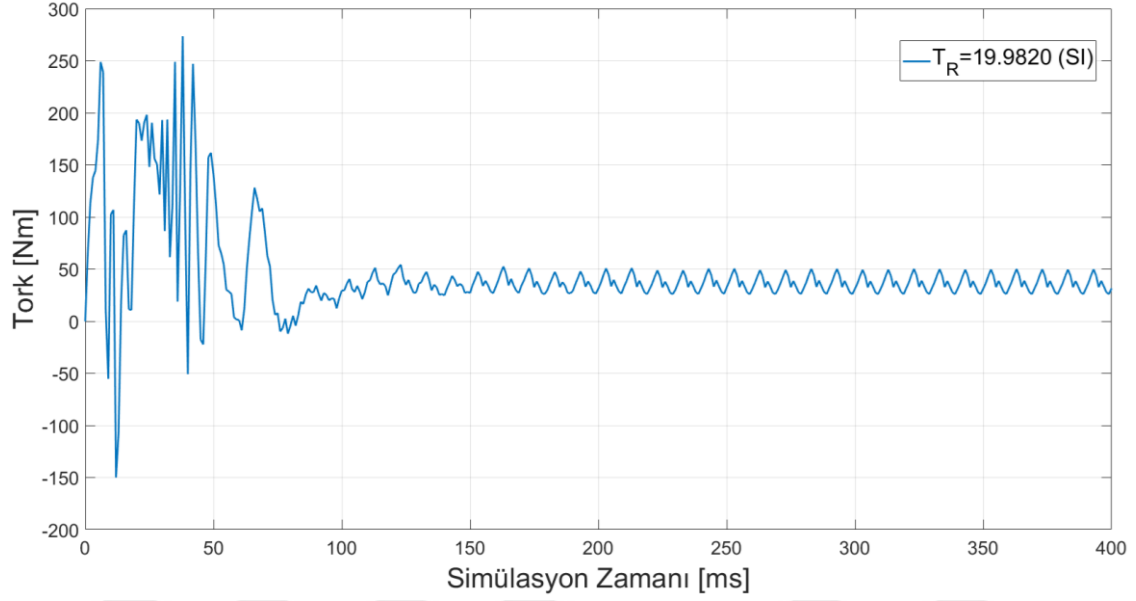
Şekil 4.4 ile sunulan grafikte analiz edilen motorun kalkış karakteristiği görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, analitik tasarımı yapılan motor, kalkışından itibaren ani hız düşüşlerine rağmen 50ms içinde senkron hızı yakalamaktadır. Sonraki 80 ms içinde (50 ms-130 ms) başarı ile senkronizasyonu tamamlayan motor, 150 ms’den itibaren kararlı rejime geçerek düzenli devir ve tork üretmektedir.



Şekil 4.4. Önerilen ŞK-RASM kalkış performansı ($T_L=35Nm$ $J_M=1$ p.u.)

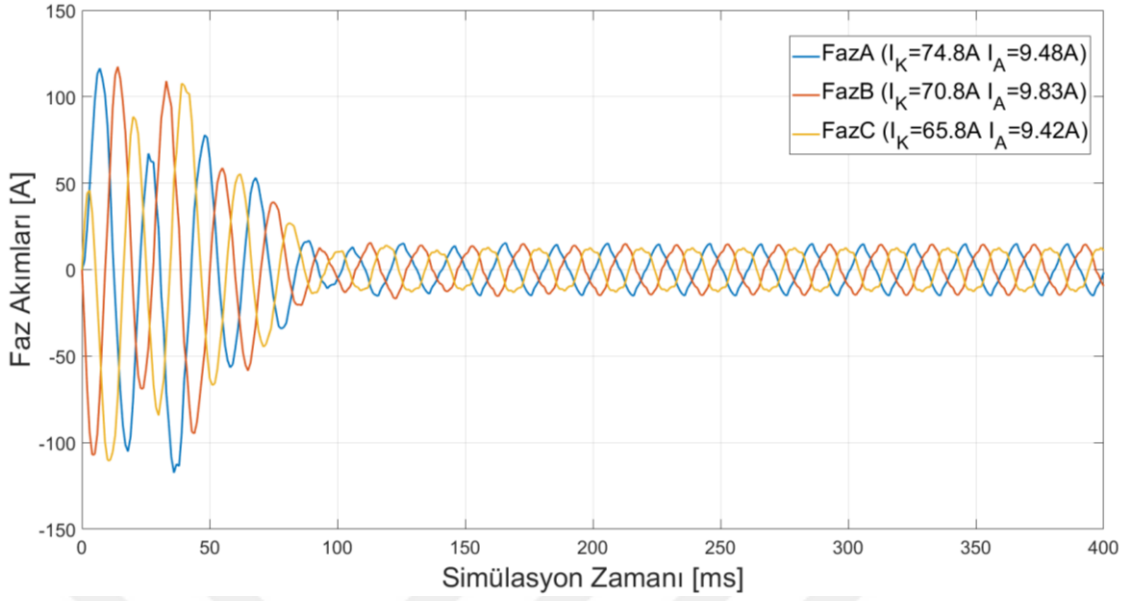
Şekil 4.5 ile sunulan grafikte motor kalkışından, kararlı rejime geçişine kadarki, motor tarafından üretilen elektromanyetik tork görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi motor tarafından üretilen torkta, özellikle ilk 90ms civarında aşırı salınım meydana gelmektedir. Geçici rejimdeki SM harmoniklerinin etkisi ile meydana gelen bu tork

dalganmaları 130 ms'den itibaren daha az etkin olmaktadır. Söz konusu titreşimlerin senkron çalışma rejiminde de belli bir düzeyde aktif olduğu grafikte açıkça görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi karalı çalışma esnasında motor tarafından aşırı titreşimli bir mil torku üretilmektedir.



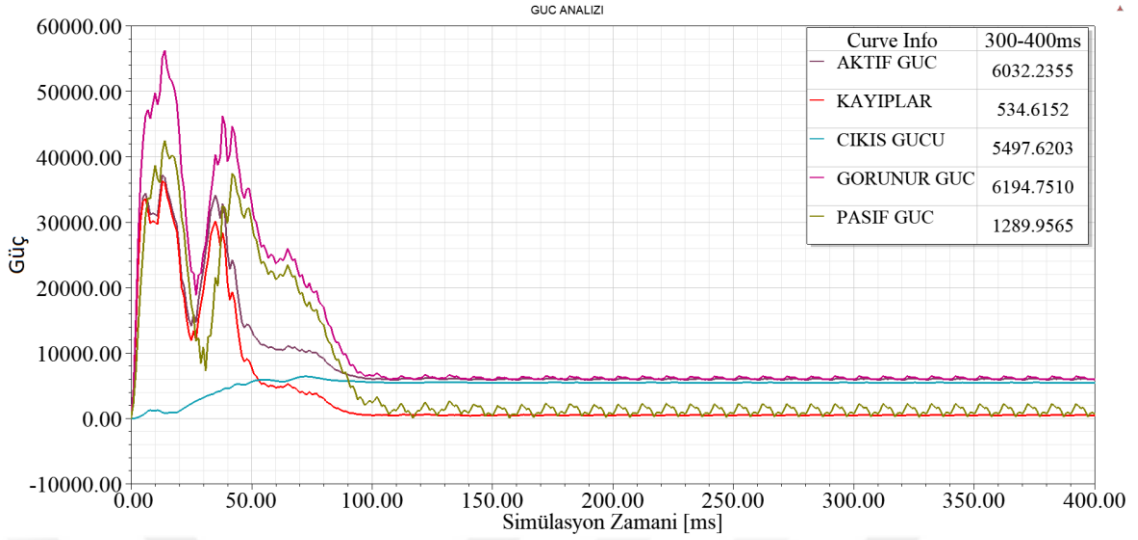
Şekil 4.5. Önerilen ŞK-RASM tork karakteristiği ($T_L=35\text{Nm}$ $J_M=1$ p.u.)

Şekil 4.6 ile sunulan grafikte önerilen tasarıma ait faz akımları görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere motor tarafından çekilen kalkış akımı (RMS) ortalama 75 A'e kadar çıkabilirken kararlı durumda çekilen akım $I_A=9,5$ A civarındadır. Elde edilen bu akım değerleri, önceki bölümlerde incelenen yaygın ŞK-RASM topolojileri ve referans alınan ASM ile karşılaştırıldığında oldukça tatminkardır.



Şekil 4.6. Önerilen ŞK-RASM faz akımları ($T_L=35\text{Nm}$ $J_M=1$ p.u.)

ŞK-RASM'ler de kalkış esnasında rotor ile stator manyetik alanı aynı hızda dönmemesi nedeni ile ASM'lerde olduğu gibi bir kayma meydana gelmektedir. Oluşan kayma ile kısa devre çubukları üzerinde bir manyetik alan (rotor manyetik alanı) meydana gelmektedir. Oluşan manyetik alan stator manyetik alanı ile etkileşime girerek motoru dönmeye zorlamaktadır. Dolayısı ile bu sayede motor kendi başına kalkış yapabilmektedir. Söz konusu kalkış süreci önceki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir. Bu tip motorlarda da ASM'lerde olduğu gibi kalkış anında, özellikle yüksek kayma oranlarında rotor kısa devre çubuklarında kayda değer elektromekanik kayıplar meydana gelmektedir. Şekil 4.7 ile sunulan grafikte motorun hızlanma evresindeki güç analizi görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere geçici rejimde motorda meydana gelen kayıplar oldukça yüksektir. Buna ek olarak söz konusu kayıplar kararlı çalışma rejiminde azalarak 535 W'a kadar düşmektedir. Elde edilen söz konusu kayıp değer göz önünde bulundurulduğunda motorun kararlı rejimdeki verimi, $\eta=91.14\%$ olarak hesaplanmıştır. Diğer bir yandan ilgili şekilde görülmekte olan motor aktif ve görünür güç referans alınarak $\cos\phi=0.97$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. Önerilen ŞK-RASM'nin hızlanma evresindeki güç analizi

Söz konusu 2D SEY analiz sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, topoloji ile önerilen yenilikçi kafes tasarımı motor kalkışında oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Buna ek olarak rotorda SM'lerin yer alması neticesinde, motor kararlı rejim performansında da hatırı sayılır kazanç sağlanmıştır. Öyle ki stator tasarımı referans alınan ASM'de $\eta = \%85$ ve $\cos\phi = 0.83$ olduğu göz önünde bulundurulduğunda (bkz. Çizelge 3.8), motor veriminde $\%6.14$ ve güç faktöründe 0.14 kazanç sağlanmıştır. Buna ek olarak motor kalkış süresi ve motor akım karakteristiği göz önünde bulundurulduğunda mevcut tasarımın muadil endüstriyel motorlar ile benzer çalışma karakteristiğine sahip olduğu görülmüştür. Buna karşın motor tork karakteristiği incelendiğinde, motor milinde aşırı bir titreşim meydana geldiği ($T_R = 19.98(SI)$) görülmüştür (bkz. Şekil 4.2). Söz konusu bu değer motor tork kalitesinde düşüşe neden olmakla beraber motorun daha gürültülü çalışmasına neden olmaktadır. Motorun vurutulu çalışmasının verdiği zararlar tasarım kriterleri altında detaylı olarak tartışılmıştır. Tez çalışmasının sonraki bölümünde motor veriminin artırılması ve vurutu torkunun azaltılmasına yönelik yapılan iyileştirme çalışmalarına yer verilmiştir.

4.3. Genetik Algoritma ile Optimizasyon Çalışması

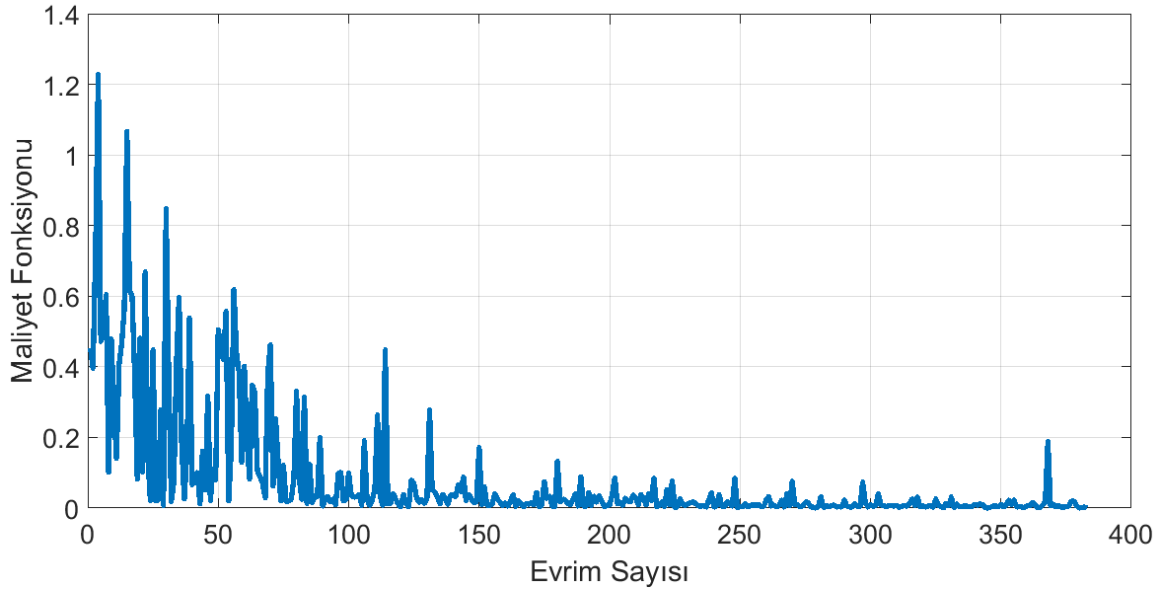
Yürütülen optimizasyon çalışmalarında, hedef tasarımın elde edilmesinde motor veriminin ($\eta \geq 92.0$)'nın üstüne çıkması koşul olarak kabul edilmiştir. GA ile modelin

optimizasyonunda kullanılan tasarım parametreleri ve her bir parametre için algoritmanın çalışma aralığı Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Genetik algoritma ile modelin optimizasyonunda kullanılan tasarım parametreleri

Tasarım Parametresi	İlk Değer	En Az	En Fazla
M_w	41 °	36 °	42 °
M_t	4.7 mm	4mm	5mm
$Bs0$	1.5mm	1mm	2mm
$Bs1$	8.5mm	8mm	9mm
H_s	0.5mm	0.25mm	1.2mm
D_r	61.5	61mm	62mm

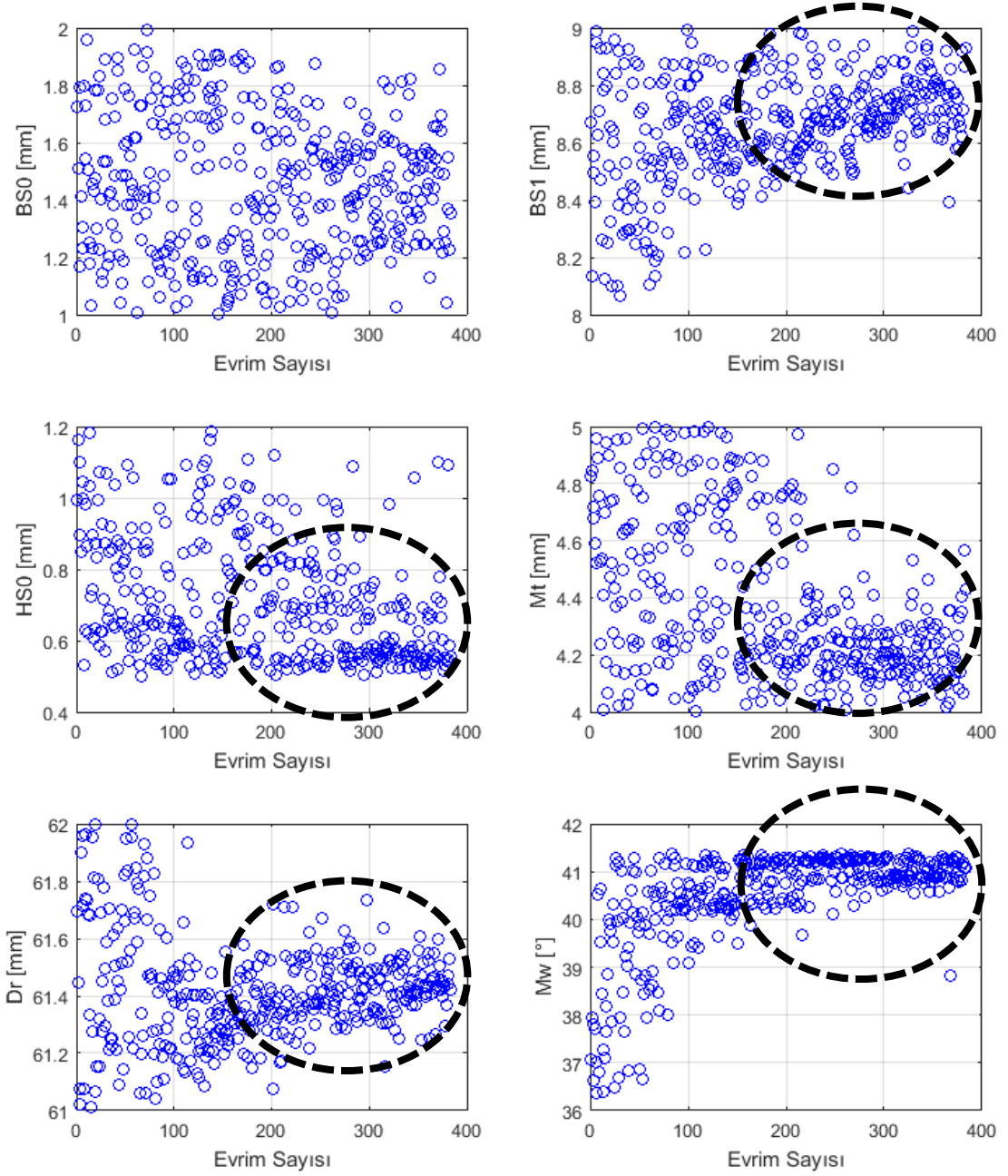
Şekil 4.8 ile sunulan grafikte GA optimizasyonu sonucunda elde edilen maliyet fonksiyonu görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi hedeflenen verime (92%) 383 evrim sonucunda ulaşılabilmektedir.



Şekil 4.8. Maliyet fonksiyonu (Zöhra ve ark., 2018)

Şekil 4.9 ile sunulan grafikte GA tarafından işleme alınan tasarım parametreleri ve parametrelerin dağılımı görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere $Bs1$, H_s , D_r , M_t ve M_w değerlerinde homojen bir dağılım olmayıp optimizasyon çalışması belirli değer aralıklarına daha fazla odaklanmıştır. Buna ek olarak sunulan grafik $Bs0$ değerinin motor performansına etkisinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak GA optimizasyon çalışması sonucunda hedeflenen verim $Bs1=8.5$ mm, $H_s=1$ mm, $Bs0=1.79$

mm, $M_t=4.48$ mm, $M_w= 40.5^\circ$ ve $D_r= 61.30$ mm civarında elde edilmiştir. Bununla beraber motor tarafından üretilen tork dalgalanmaları $T_R=7.090$ (SI) seviyelerine kadar düşürülmüş ve motor anma akımı $I_A=9.26$ A olarak bulunmuştur. Çizelge 4.3 ile GA optimizasyon çalışması sonucunda tasarım parametreleri ve motor çalışma karakteristiğindeki değişim özetlenmiştir.



Şekil 4.9. GA Analiz parametrelerinin evrim sayısına göre dağılımı (Zöhra ve ark., 2018)

Çizelge 4.3. GA optimizasyon sonucu tasarım parametrelerinde ve motor verimindeki değişim

	Optimizasyon öncesi	Optimizasyon sonrası
M_w	41 °	40.5°
M_t	4.7 mm	4.48mm
B_{s0}	1.5mm	1.79mm
B_{s1}	9mm	8.5mm
H_s	0.5mm	1mm
D_r	61.5	61.30mm
η	%91.14	%92
T_R	19.98(SI)	7.090(SI)
I_A	9.5A	9.26A

Optimizasyon çalışmalarında yüksek verimli optimum rotor tasarımının elde edilmesine yönelik çok sayıda analiz çalışması yürütülmüştür. Yapılan analizlerde kısa sürede çözüm üretmesi nedeni ile motor tasarımı iki boyutlu olarak değerlendirilmiş ve analiz çalışmaları Maxwell 2D Transient çözücü ile tamamlanmıştır. GA ile elde edilen yüksek verimli optimize edilmiş modelin daha detaylı incelenmesi amacı ile çalışmanın sonraki adımlarında Maxwell 3D Transient çözücüsü kullanılmıştır.

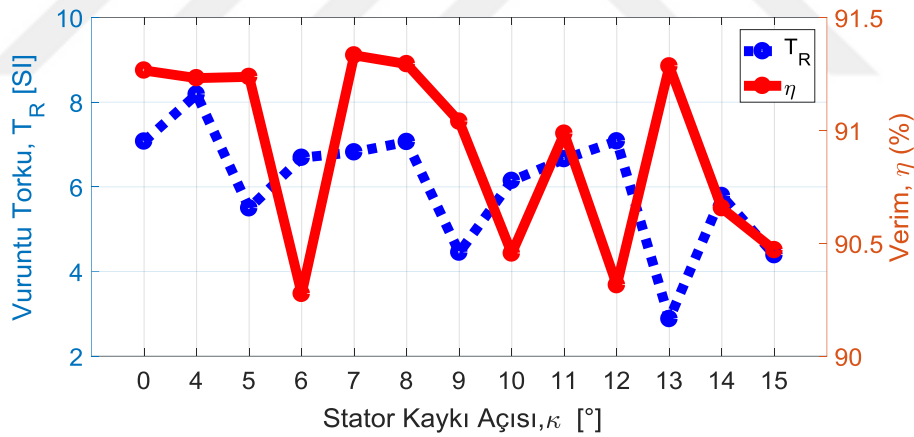
Motor mil torkunda meydana gelen tork dalgalanmaları ilk modelde $T_R=19.98$ (SI) olurken, yeni tasarımda $T_R=7.090$ (SI) 'a kadar düşürülmüştür. Nitekim elde edilen bu değer hala oldukça yüksek bulunmuştur. Bu nedenle tez kapsamında tork dalgalanmalarının azaltılmasını amaçlayan iyileştirme çalışmaları da yapılmıştır. Önceki bölümde de üzerinde durulduğu gibi torkta meydana gelen dalgalanmaların azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde stator dişlerinin ve/veya SM'lerin optimizasyonu, stator ya da rotorun kaykılı üretilmesi üzerine yoğunlaşıldığı görülmüştür (Zhu ve Howe, 2000; Sheth, Sekharbabu ve Rajagopal, 2006; Kim ve ark., 2008; Hsiao ve ark., 2011; Islam ve Ortega, 2017). Yapılan tez çalışmasında statorun kaykılı üretilmesi yöntemi tercih edilmiş olup gerekçeleri önceki bölümde tartışılmıştır.

4.4. Kaykılı Stator ile Tork Dalgalanmaların Azaltılması

Yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda bir oluk adımı kadar kaykılı üretilen nüve tasarımlarının motor harmoniklerinin bastırılması ve vuruş torkunun azaltılmasında etkili olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak yapılan bazı çalışmalar oluk sayılarının uyumsuz olması durumunda rotor ya da stator nüvesinde bir oluk adımı kaykılı

kullanımının motor ters EMK'sında harmonik bileşenlerin artmasına neden olduğunu göstermiştir (Hanselman, 1997). Dolayısı ile oluk sayısı ve şeklinde kendine has özellikleri olan tasarımlarda farklı kaykı oranlarının etkileri ayrıca incelenmelidir. Bu nedenle özgün rotor topolojisinde motor tasarımı için uygun stator kaykı değerinin belirlenmesinde farklı kaykı açılarının ($\kappa=3,4,5\dots$) motor karakteristiğine etkileri de incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda kullanılan bakır miktarı ve stator direncindeki artışın sınırlandırılması amacı ile $\kappa = 15^\circ$ 'ye kadar kaykı açıları göz önünde bulundurulmuştur.

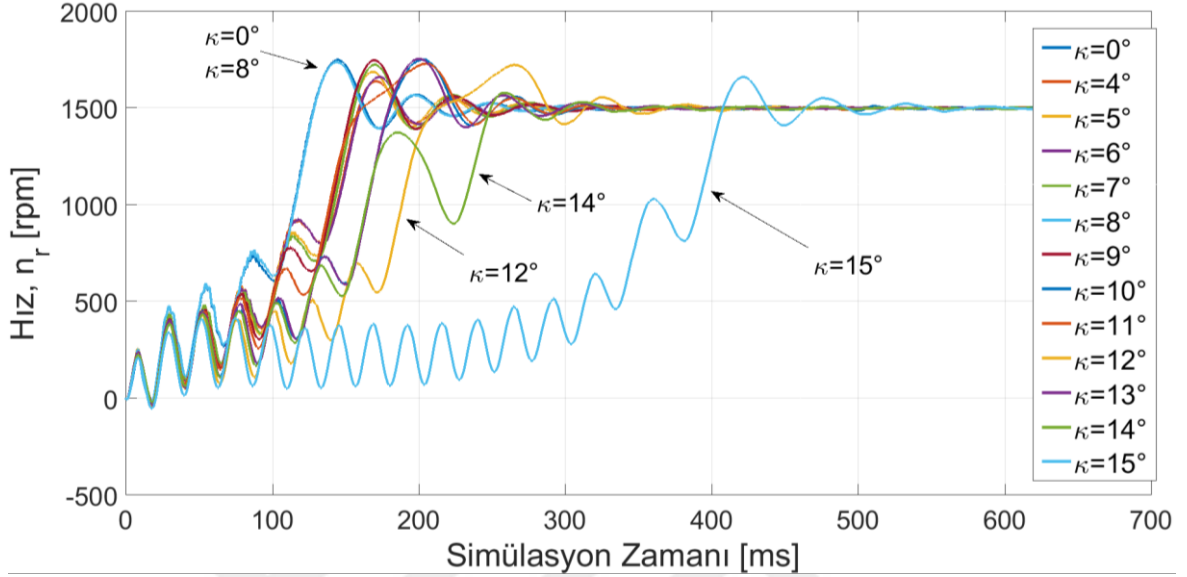
Şekil 4.10 ile sunulan grafikte farklı stator kaykı açıları ile modellenmiş motorlar tarafından üretilen T_R değerleri görülmektedir. Sunulan grafikte elde edilen T_R değerlerinin arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmekle beraber en düşük T_R değerleri, $T_{R(\kappa=9)} = 4.48 (SI)$, $T_{R(\kappa=13)} = 2.9 (SI)$ ve $T_{R(\kappa=15)} = 4.39 (SI)$ olarak üretilmiştir. Yine grafikten görüleceği gibi en yüksek verim değerleri $\eta_{(\kappa=7)} = \%91.33$, $\eta_{(\kappa=8)} = \%91.29$ ve $\eta_{(\kappa=13)} = \%91.28$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Farklı stator kaykı açıları için elde edilen vuruñtu ve verim (Zöhra ve ark., 2018)

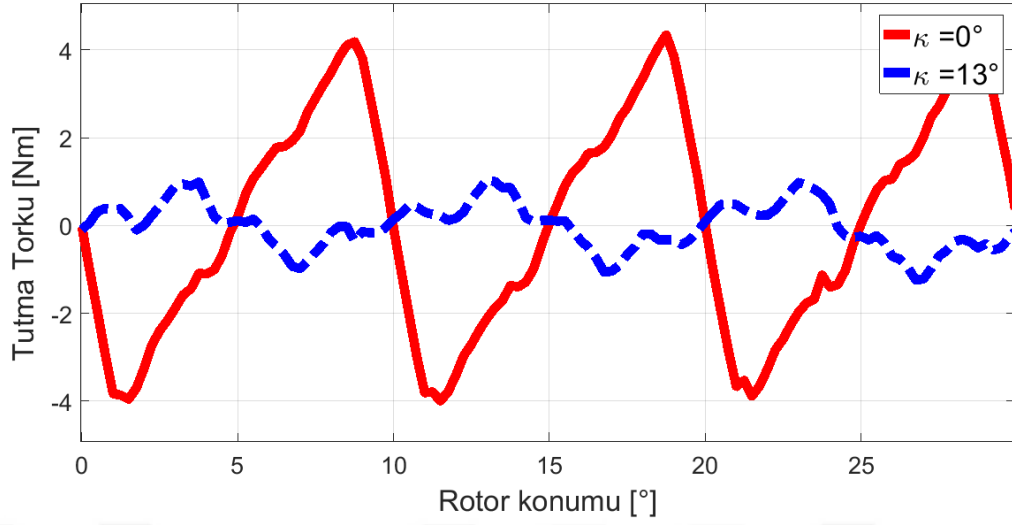
Stator kaykı açısının motor senkronlanma performansına etkisinin gösterildiği Şekil 4.11 ile sunulan grafikte açıkça görüldüğü gibi $\kappa = 0$ ve $\kappa = 8$ açılarında motor en yüksek senkronlanma performansına sahiptir. Ne var ki her iki kaykı açısı için de $T_R = 7 (SI)$ civarında yüksek tork dalgalanmaları üretmekte ve bu değer motor mil torku kalitesinde kabul edilemez seviyede düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca tork dalgalanmalarında tatmin edici düzeyde bir azalma elde edilen $\kappa = 15$ 'te motor verimi ve performansının gözle görülür şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yapılan çalışmalarda

senkronizasyon performansının tatmin edici ve tork dalgalanmalarının en düşük olması neticesinde stator kaykısı açısı $\kappa = 13$ olarak tercih edilmiştir.

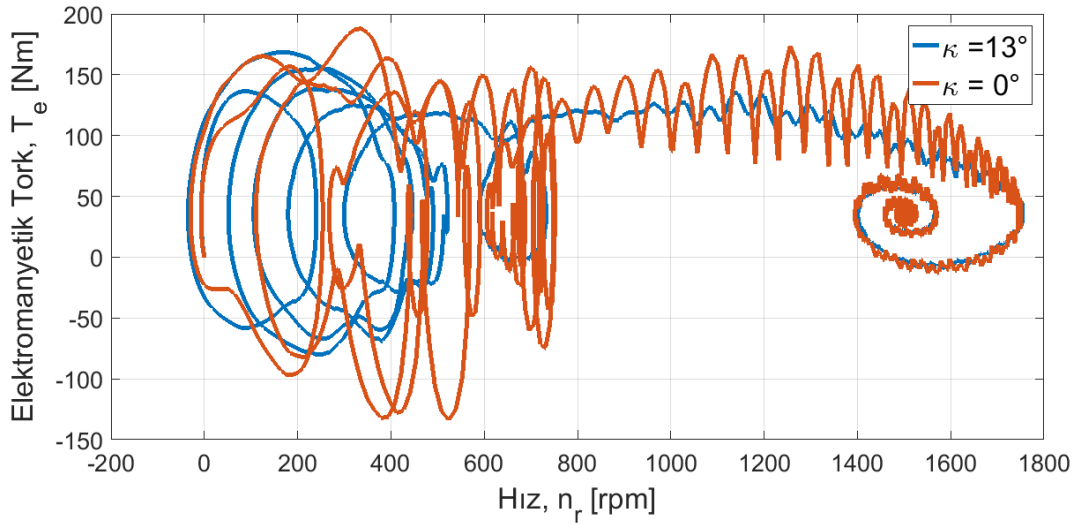


Şekil 4.11. Farklı stator kaykısı açıları için motor senkronlanma performansı (Zöhra ve ark., 2018)

Tutma torku, motor milinde meydana gelen ve motor boşa iken etkisinin hissedildiği motor milinin dönmesine engel olan bir tork etkisidir. Rotor gövdesinde SM'lerin yer alması nedeni ile üretilen bu tork bileşeni motor tarafından üretilen mil torkunun kalitesinin düşmesine neden olan bir faktördür. Şekil 4.12'de yer alan grafikte $\kappa = 0$ ve $\kappa = 13$ kaykısı açıları için motorun 30° lik dönüşü esnasında üretilen tutma torku gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi statoru kaykılı motor tasarımı ile tutma torku büyük oranda (%67.7) azaltılmıştır. Ayrıca $\kappa = 0$ ve $\kappa = 13$ kaykısı açıları için motor tarafından üretilen elektromanyetik torkun gösterildiği Şekil 4.13'de de görüldüğü gibi $\kappa = 13$ açısının tercih edilmesi ile motor tork kalitesinde de belirgin bir şekilde iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 4.12. $\kappa = 0$ ve $\kappa = 13$ kaykık açıları için motorun 30° 'lik dönüşü esnasında üretilen tutma torku (Zöhra ve ark., 2018)

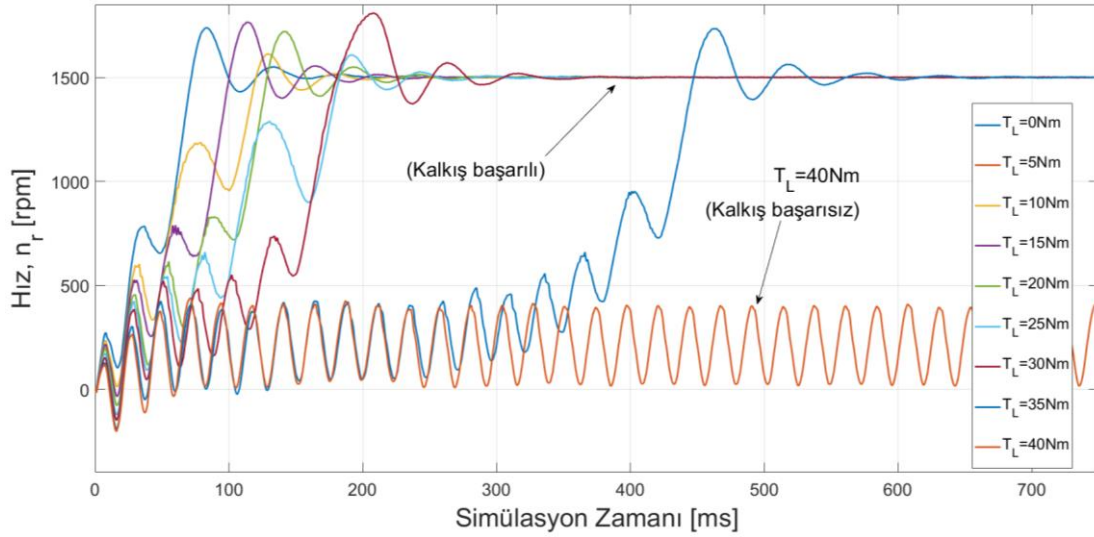


Şekil 4.13. $\kappa = 0$ ve $\kappa = 13$ kaykık açıları için motor tarafından üretilen elektromanyetik torkun rotor devrine göre değişimi (Zöhra ve ark., 2018)

4.5. Optimize Edilen Tasarımın Performans Karakteristiği

Çalışmanın bu adımında önerilen rotor topolojisi kullanılarak modellenen $\kappa = 13$ kaykık açılı statora sahip motor tasarımının performans karakteristiği incelenecektir. ŞK-RASM'lerin muzdarip olduğu en önemli konu asenkron çalışma esnasında üretilen SM kaynaklı frenleme torkudur. Bu etki ŞK-RASM'lerin motorun aşırı yüklenmesi gibi durumlara oldukça duyarlı olmasına neden olmaktadır. Şekil 4.14 ile sunulan grafikte

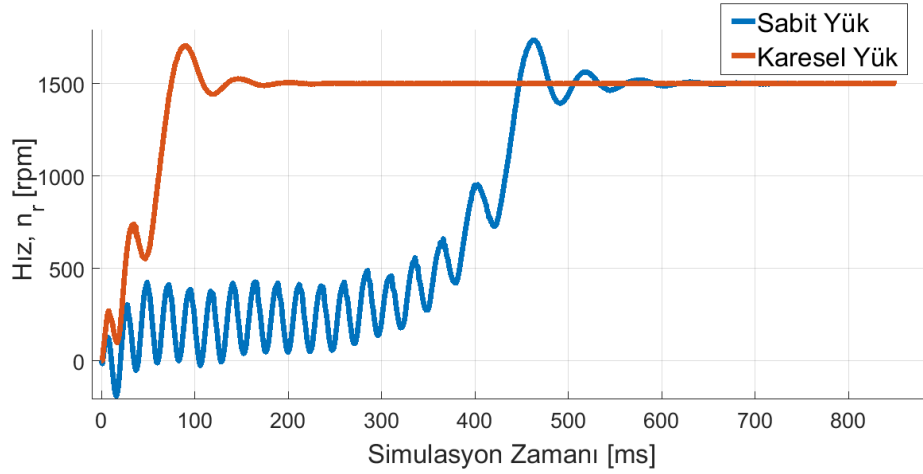
önerilen statoru kaykılı modelin farklı motor yükleri altındaki kalkış performansı görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi motor $T_L=35$ Nm (Tam yük) altında 0.3 s’de 1500 d/d’lık senkron hıza ulaşabilmektedir. Buna ek olarak %14’lük aşırı yüklenme ($T_L=40$ Nm) motorun senkronlanma sürecinin başarısız olmasına neden olmaktadır.



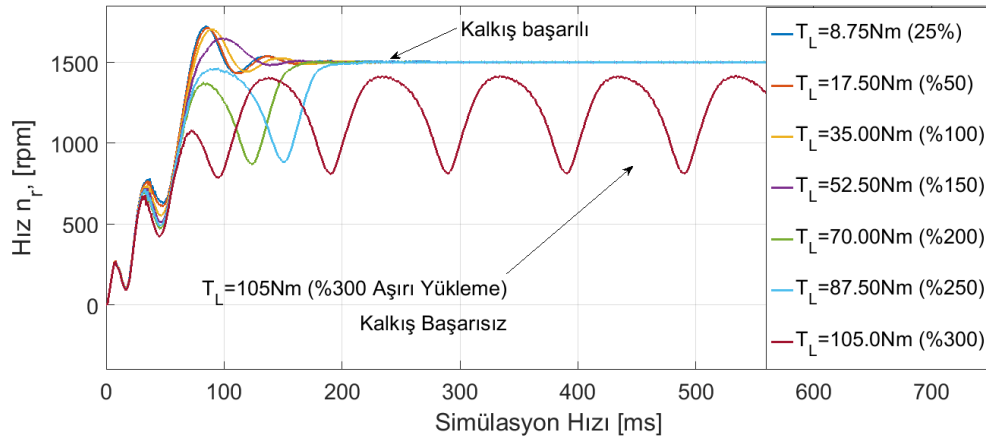
Şekil 4.14. Önerilen statoru kaykılı modelin farklı motor yükleri altındaki kalkış performansı (Zöhra ve ark., 2018)

Şekil 4.14 ile önerilen tasarımın sabit yük altındaki kalkış performansı incelenmiş ve $T_L=40$ Nm’lik sabit yük altında senkronlanamadığı gözlemlenmiştir. Analiz çalışmaları sonucunda elde edilen bu değer referans motor tarafından üretilen %230’lık kalkış torku ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür (bkz. Çizelge 3.8).

Santrifüj pompaları, fanlar ve körük gibi akış gücü ile çalışan uygulamalarda yük torku dönüş hızının karesi ile orantılı olarak artmaktadır (bkz. Eşitlik 3.4.). Bu nedenle sabit yük altında düşük kalkış performansı sunan ŞK-RASM’ler ile karesel yük profiline sahip uygulamalarda daha yüksek performans elde edilebilmektedir. Şekil 4.15 ile sunulan grafikte önerilen modelin $T_L=35$ Nm (tam yük) sabit ve karesel yük altında kalkış performansı karşılaştırılmıştır. Grafikten de anlaşılacağı gibi $T_L=35$ Nm sabit yük altında 600ms’de senkronlanan motor karesel yük ile 200 ms içinde kalkış yaparak oldukça yüksek performans sunabilmektedir. Şekil 4.16 ile önerilen modelin $T_L= 87.50$ Nm (250% anma torku)’e kadar yüklerde 200ms içinde başarılı ile senkronlandığı görülmektedir.

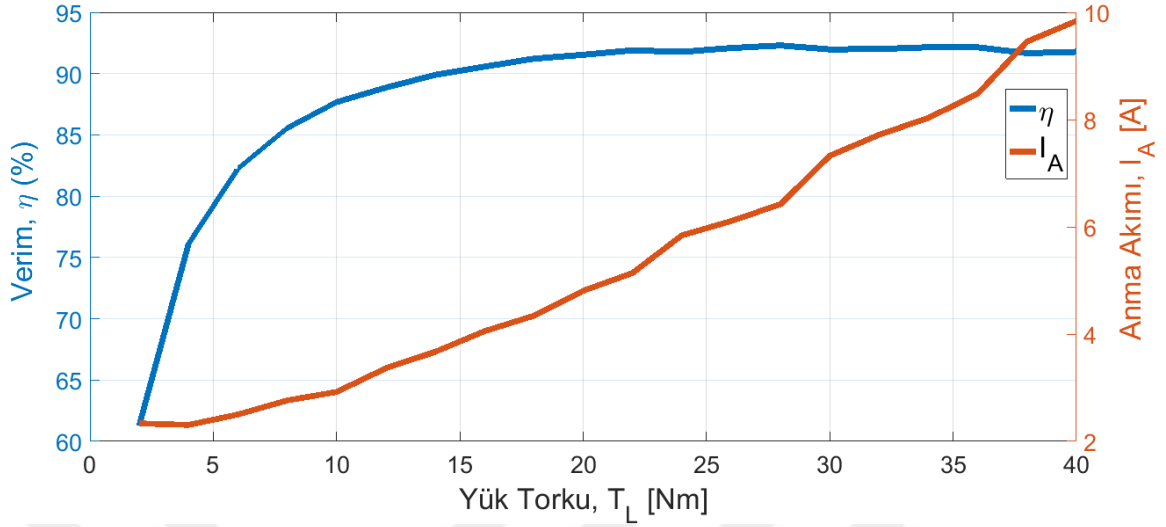


Şekil 4.15. Önerilen modelin sabit ve karesel yükteki çalışma karakteristiği ($T_L=35\text{Nm}$ $J_M=1$ p.u.) (Zöhra ve ark., 2018)



Şekil 4.16. Önerilen modelin farklı karesel yüklerdeki çalışma karakteristiği (Zöhra ve ark., 2018)

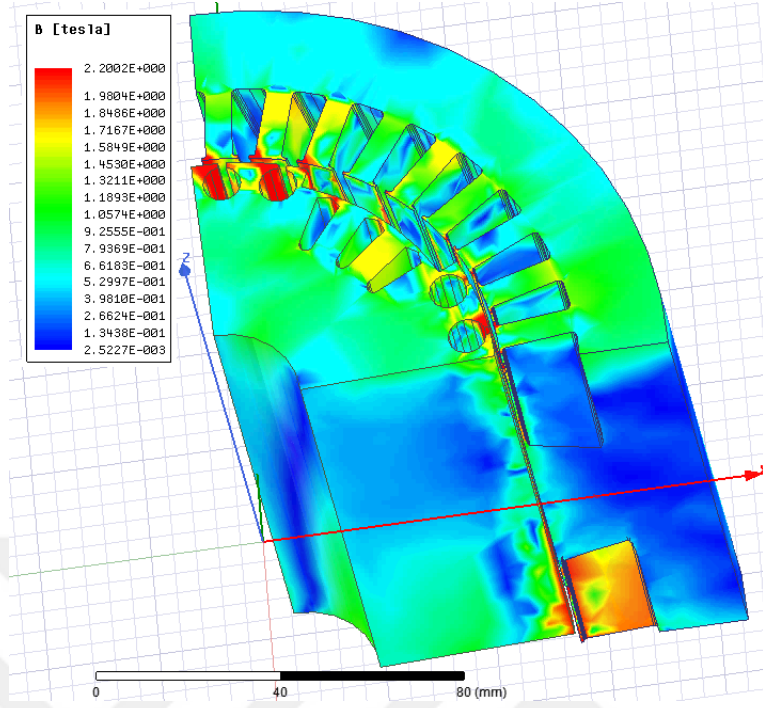
Şekilde 4.17 ile sunulan grafikte yük torkuna bağlı olarak akımlar ve verim değerleri görülmektedir. Grafikte açıkça görüldüğü gibi motor boşta iken çekilen akım $I_A=2.3$ A civarındadır. 40Nm'lik aşırı yükleme durumunda ise $I_A=9.84\text{A}$ değerine kadar yüksektir. $\frac{1}{4}$ yükte çekilen akım 2.8 A, $\frac{1}{2}$ yükleme durumunda ise 4.3 A'dır. Motor verimi (η) $\frac{1}{4}$ yükleme durumunda %86, $\frac{1}{2}$ yükte %91'e kadar yüklenirken %91.28'lik maksimum değerine tam yükte ulaşmıştır.



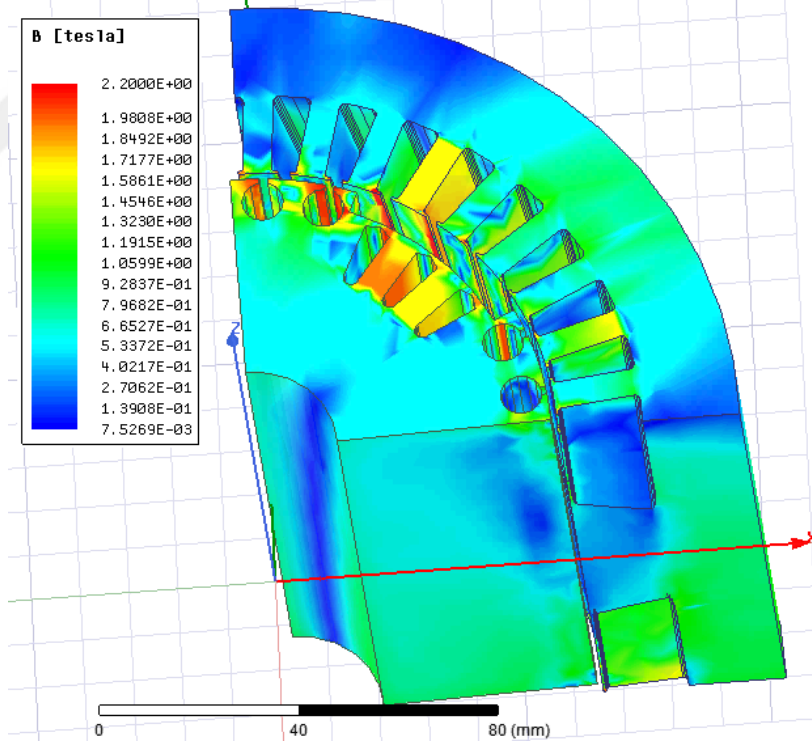
Şekil 4.17. Yük torkuna bağlı olarak motordan elde edilen akım ve verim değerleri (Zöhra ve ark., 2018)

Şekil 4.18 ile sunulan $\frac{1}{4}$ motor modelinde stator ve rotor nüvelerinde meydana gelen geçici ve kararlı durumdaki akı dağılımları görülmektedir. Önerilen motor topolojisinde alt ve üst olmak üzere iki farklı oluk tipi yer almaktadır. Şekil 4.18a ile sunulan görselden de anlaşıldığı gibi asenkron çalışmada rotor frekansının yüksek olması neticesinde manyetik akı rotor nüvesine derinlemesine nüfus etmeyerek büyük oranda üst oluklarda yoğunlaşmaktadır. Dolayısı ile düşük hızlarda üst oluklarda akı yoğunluğu daha yüksektir. Şekil 4.18b ile sunulan görselde motorun kararlı çalışma esnasında stator ve rotor nüvesinde meydana gelen akı yoğunlukları görülmektedir. Görselden de anlaşılacağı gibi yüksek hızlarda rotor frekansının düşük olması neticesinde manyetik akı rotor nüvesine derinlemesine nüfus edebilmekte bu da yüksek hızlarda alt olukların da motor senkronlanmasında aktif olmasını sağlamaktadır. Ayrıca motorun senkron hızdan düşmesini zorlaştırmaktadır.

Her iki grafikte de rotor ve stator boyunduruklarında akı yoğunluklarının güvenli sınırlarda kaldığı gözlemlenmekle beraber düşük hızlarda kısa süreliğine de (kalkışta geçen ilk 200ms) olsa akı yoğunluklarının 2.2 T'lik maksimum değere kadar çıktığı görülmektedir. Kararlı çalışma sürecinde ise meydana gelen akı yığılmalarının 1.9 T – 2 T değerini geçmediği görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.18. Stator ve rotor nüvelerinde meydana gelen geçici ve kararlı durumdaki akı dağılımları, a-Geçici rejim b-Kararlı rejim (Zöhra ve ark., 2018)

4.6. Deneysel Sonuçların İncelenmesi

Bu bölümde prototipi üretilen ŞK-RASM'nin performans karakteristiğinin belirlenmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalar ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Deneysel çalışmalarda motor tarafından farklı çalışma koşullarında üretilen devir, güç ve tork, motor tarafından çekilen akım verileri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlara ve sonuçların SEY analiz sonuçları ile karşılaştırılmasına bu bölüm altında yer verilmiştir.

ŞK-RASM'ler şebekeden ilk yol aldıklarında motor yük torku ve motor ataletinin yanında, rotor bünyesinde yer alan SM'ler tarafından üretilen frenleme torkunu da yenmek zorundadır. Dolayısı ile bu tip motorlar pompa ve fan gibi yükün hız ile orantılı olarak değiştiği uygulamalarda daha yüksek performans gösterebilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalar motor sabit yüklemelerinin yanında fan tipi hız bağımlı yüklemeleri de kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Prototipin farklı sabit yük değerleri altında performansının test edilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar bu bölüm altında incelenmiştir. Çalışmalar neticesinde elde edilen deneysel ve SEY analiz sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

4.6.1. Boşta çalıştırma

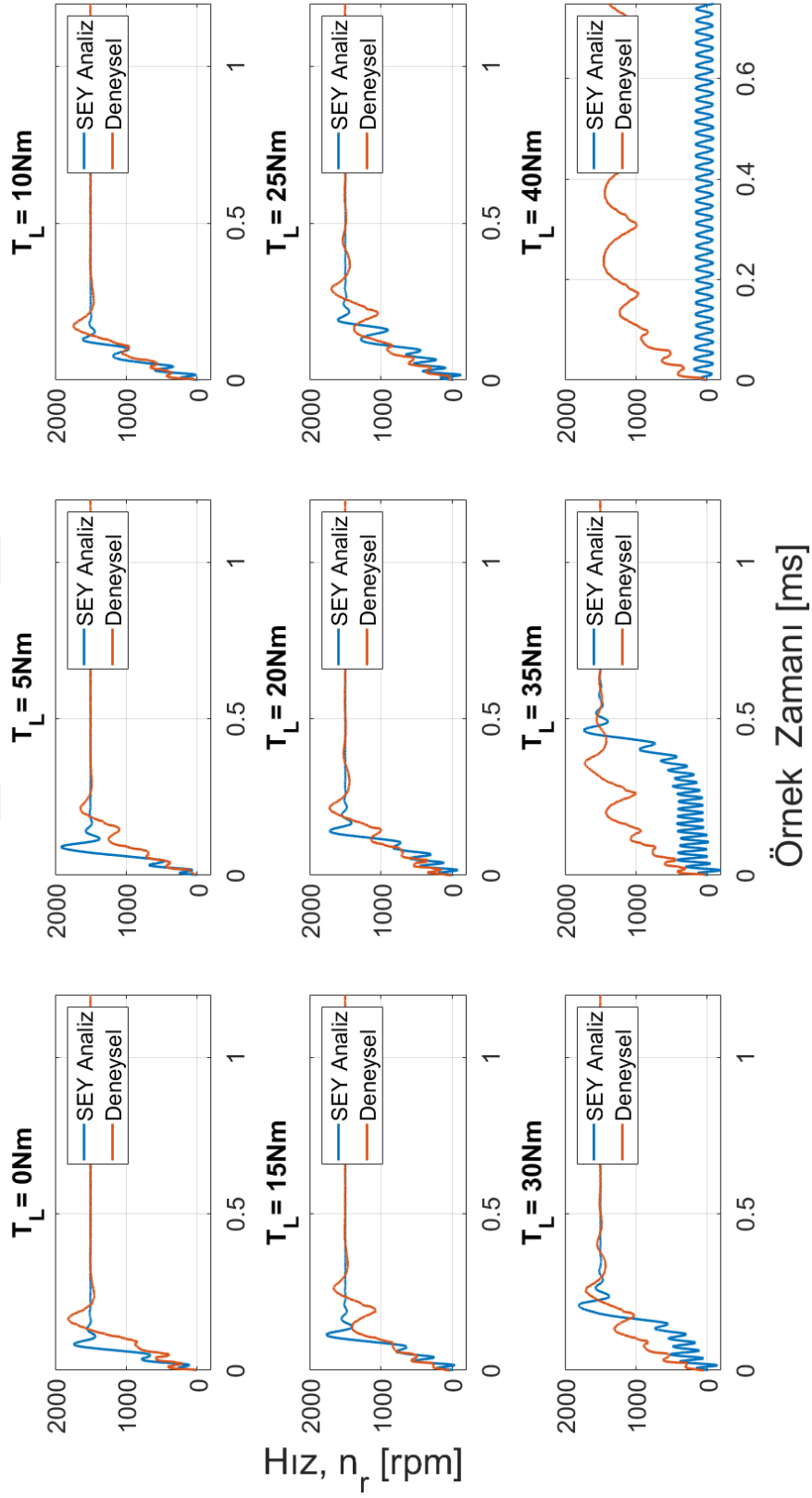
Testlerin bu adımında prototip motor, eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi amacı ile Simatics S120 AC sürücüsü üzerinden yüksüz olarak çalıştırılmıştır. AC sürücüsünün konfigürasyonu ve kumanda edilmesi amacı ile Sinamics Micromaster Starter V5.1 yazılım ortamından yararlanılmıştır. Test aşamasında motor sıcaklığı nominal çalışma noktasına kadar yükseltilmiştir. Çalışma sonucunda stator sargı direnci $R_s = 1.02 \Omega$ olarak ölçülmüştür.

4.6.2. Sabit yük deneyleri

Bu başlıkta yapılan testlerde motorun farklı sabit yükler altındaki kalkış ve geçici rejim performansı incelenmiştir. Bu kapsamda motor öncelikle yüksüz çalışmadan 40 Nm'ye kadar 5 Nm aralıkla, her bir sabit yük için ayrı ayrı test edilmiştir. Test süresinde motorun güç, akım, $\cos \varphi$, verim, tork vb. verileri kaydedilmektedir. Elde edilen veriler ışığında çıkış gücüne bağlı olarak verim ve güç faktörünün değişimi incelenmiştir.

Şekil 4.19 ile sunulan grafiklerde yüklemeler neticesinde elde edilen yol alma performans eğrileri görülmektedir. Grafiklere ayrıca SEY analiz çalışması sonucu elde edilen verilerde eklenmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı 35 Nm'e kadar (tam yük) olan yüklemelerde motor en fazla 0.6 s civarında senkronlanabilmiştir. Elde edilen 1 s'nin altındaki bu değer endüstriyel uygulamalar içinde oldukça tatmin edicidir. Ayrıca yük miktarı arttıkça motorun deneysel verilerde, analiz verilerine göre daha fazla performans gösterdiği gözlemlenebilmektedir. 40Nm'lik motor yol alma testinde hem deneysel çalışmada hem de analiz çalışmasında motorun senkronlanamadığı fakat deneysel verilerde motor performansının bir nebze daha yüksek olduğu gözlemlenen bir diğer durumdur.

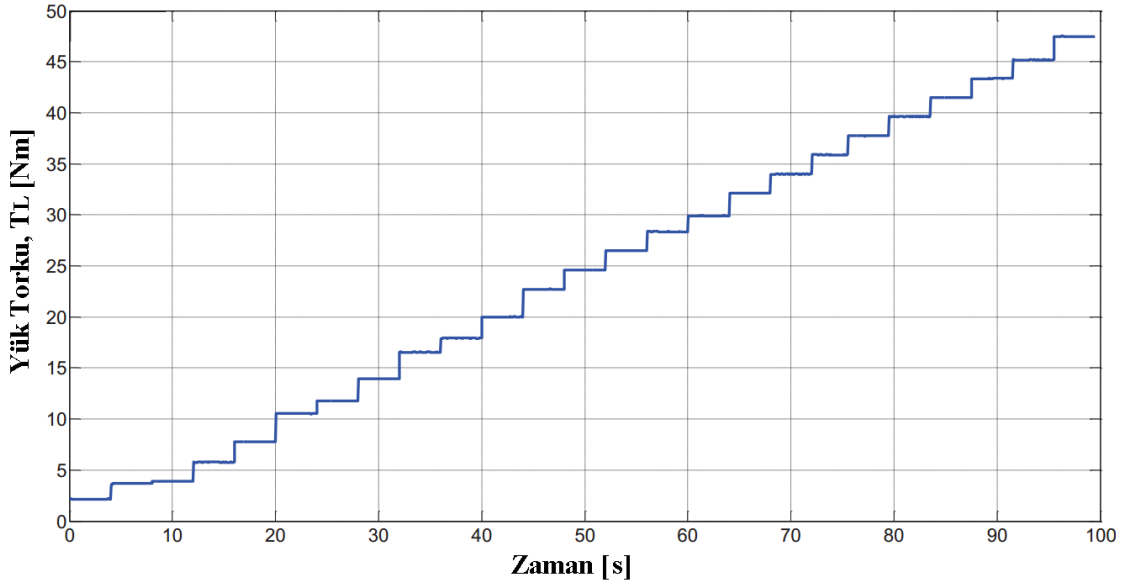




Şekil 4.19. 0-40 Nm yük momenti aralığında motor yol alma performansı

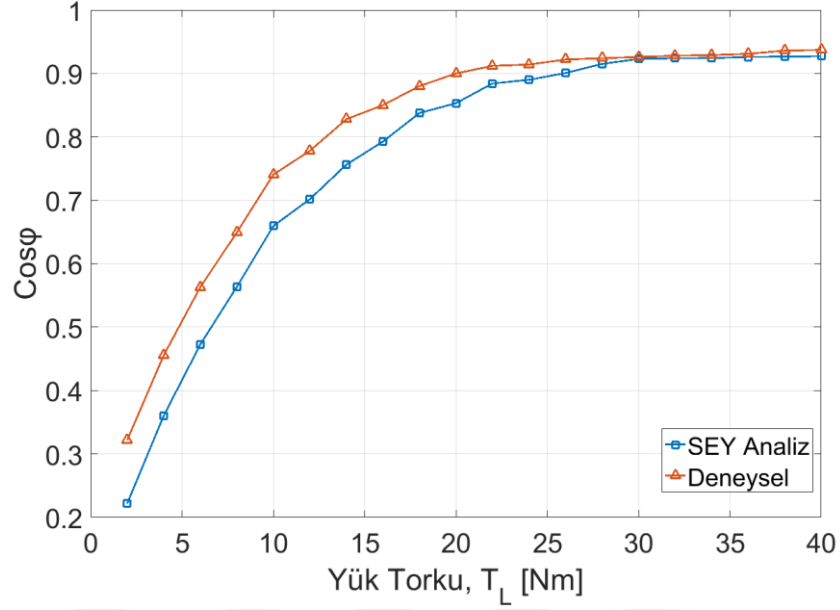
Şekil 4.19 ile sunulan grafikte farklı yük miktarlarında motor kalkış performansı tartışılmıştır. Buna ek olarak senkron çalışma karakteristiğinin daha iyi anlaşılması amacı ile motor yükü kararlı rejimde iken yüksüz çalışmadan 40 Nm'ya kadar Nm aralıklarla artırılarak motor senkron çalışma karakteristiği daha detaylı incelenmiştir.

Test çalışmasında motor senkron hızda iken (1500 d/d) belirli zaman aralıklarında motor yükü 2 Nm'nin katları şeklinde artırılmıştır. Senkron çalışma esnasında her yük değeri için (0, 2 Nm, 4 Nm...40 Nm) motorun güç, akım, $\cos \varphi$, verim, tork vb. verileri kaydedilmektedir. Elde edilen veriler ışığında çıkış gücüne bağlı olarak verim ve güç faktörünün değişimi incelenmiştir. Şekil 4.20 ile sunulan grafikte test amacı ile prototipe senkronlanma sonrası uygulanan yük torku verisi görülmektedir.



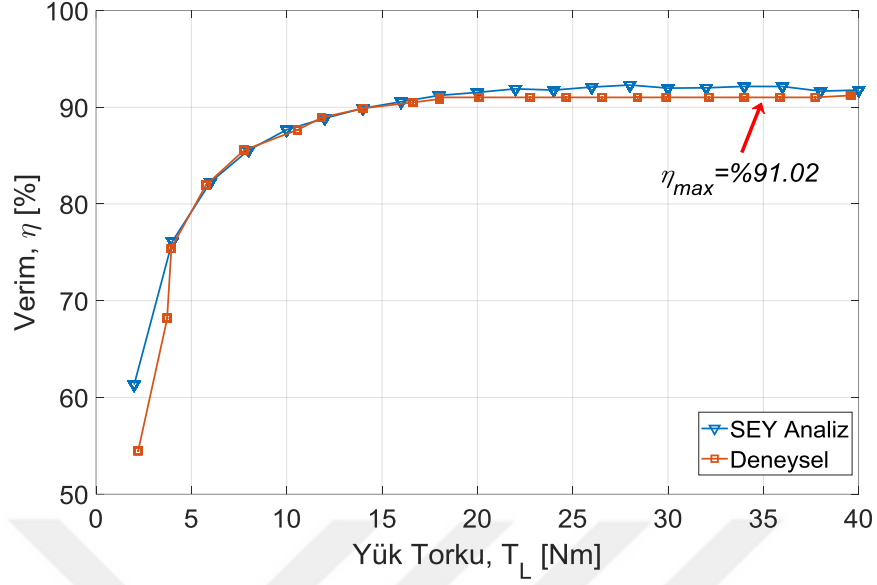
Şekil 4.20. Test amacı ile prototipe senkronlanma sonrası uygulanan yük torku verisi

Test çalışmasında motorun öncelikle senkron hıza ulaşması ve kararlı çalışmaya geçmesi gerekmektedir. Daha sonra sunulan grafikte de görüldüğü gibi motor yük momenti kademeli olarak artırılarak yük altındaki çalışma karakteristiği incelenmiştir. Şekil 4.21 ile sunulan grafikte yükleme sonucu elde edilen güç faktörü sunulmaktadır. Ayrıca karşılaştırılması amacı ile grafiklere SEY analiz verileri de eklenmiştir.



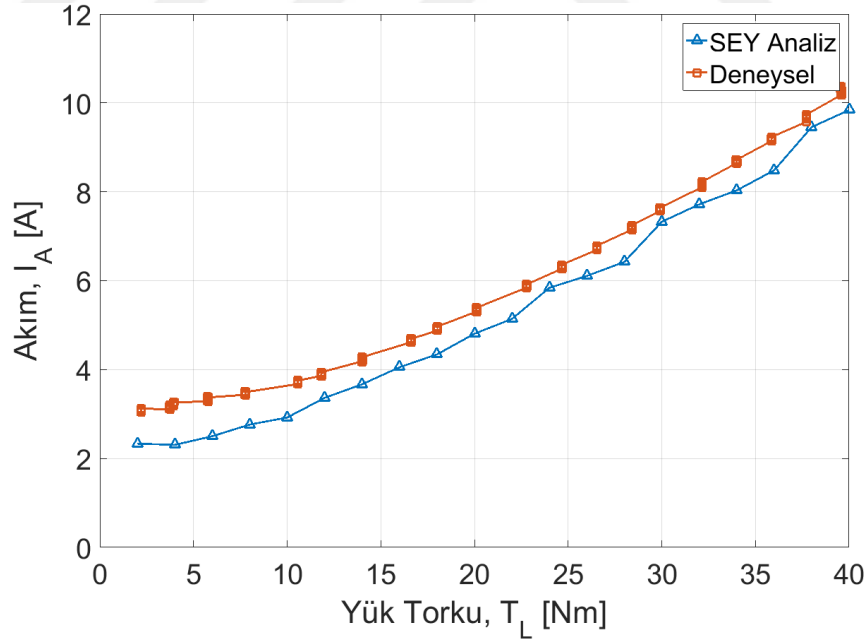
Şekil 4.21. Deneysel ve SEY analiz çalışmaları ile elde edilen $\cos \phi$

Şekil 4.22’de motor veriminin, Şekil 4.23’te motor tarafından çekilen akımın motor yüküne göre değişimi görülmektedir. Her iki grafikte incelendiğinde SEY analiz sonuçları ile deneysel verilerin birbiri ile büyük orada uyduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.22’de de görüldüğü gibi en yüksek verim tam yükte $\eta = \%91.02$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer IEC 60034-2-1 standardı ile tanımlanan doğrudan ölçüm yöntemi göre belirlenmiştir. IEC 60034-1 standardı bölüm 12’ye göre 150kW ve daha düşük güçteki motorlar için motor toplam kayıplarında % 15’e kadar toleransa yer verilmiştir (Anonim, 2010b). Buna göre 5.5 kW IE4 50Hz minimum motor verimi $\eta_{min} = \%89.53$ olarak hesaplanmıştır. Test çalışmaları sonucunda elde edilen $\eta = \%91.02$ değerinin, η_{min} değerinin üzerinde olması neticesinde, üretilen prototipin 5.5 kW IE4 50Hz taban verimlik değerlerini karşıladığına kanaat getirilmiştir.



Şekil 4.22. Verimin yük torkuna göre değişimi

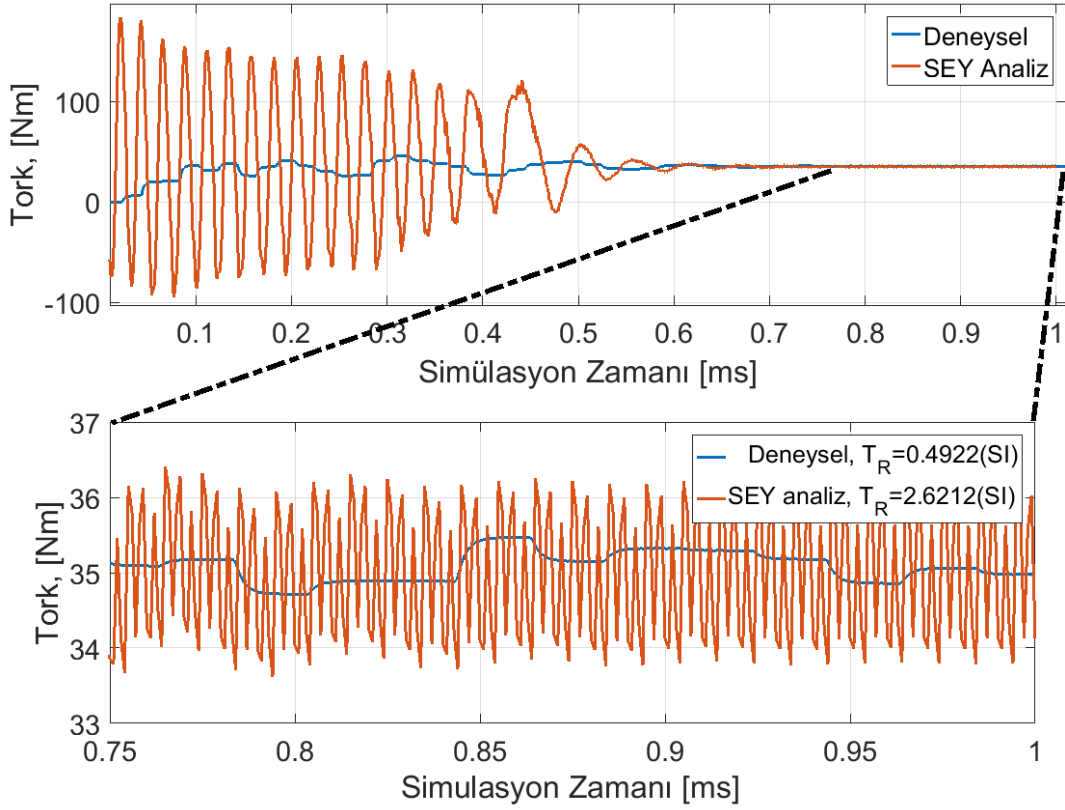
Şekil 4.23'deki deneysel veriler incelendiğinde motor tarafından çekilen akımın düşük yüklerde normalin biraz üzerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.23. Çekilen akımın yük torkuna göre değişimi

ŞK-RASM'lerde rotorda SM'lerin yer alması neticesinde, SM'ler ile stator dişleri etkileşime girerek motor mil torkunda dalgalanmalar meydana gelmektedir. Meydana gelen bu dalgalanmalar motor tarafından üretilen mil torkunun kalitesini olumsuz etkilemektedir. Şekil 4.24 ile sunulan grafikte motorun 5 Nm'lik yük altında ürettiği tork

dalganmaları incelenmiştir. İlgili grafikte de görüldüğü gibi senkronizasyon sonrası mil torkunda meydana gelen dalgalanmalar SEY analizlerinde $T_R = 2.6212$ (SI) olurken, deneysel çalışmalarda bu değer $T_R = 0.4922$ (SI) olarak hesaplanmıştır.

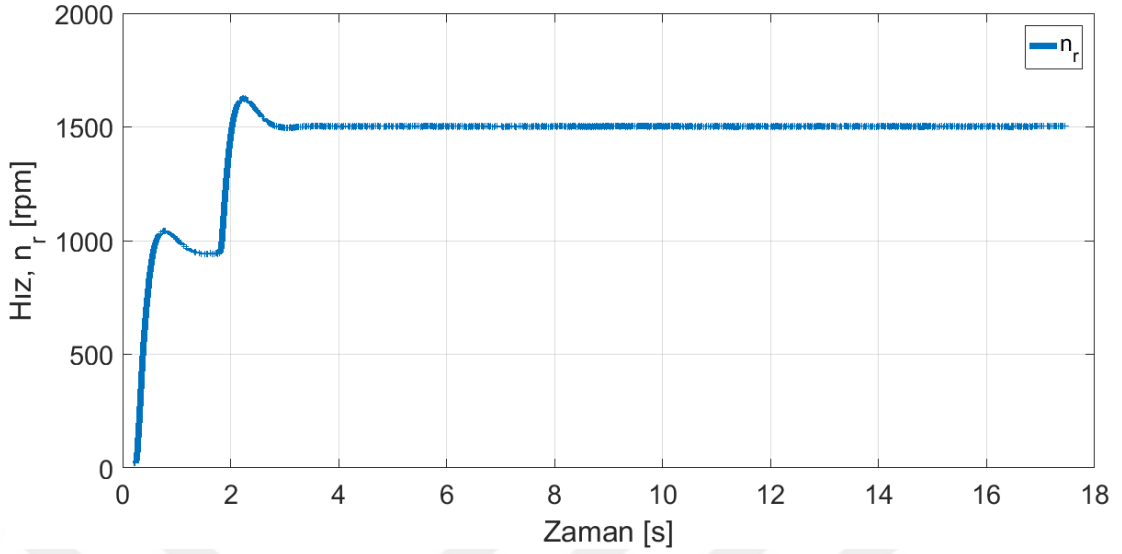


Şekil 4.24. Deneysel ve SEY analiz sonuçlarının tork karakteristiği açısından karşılaştırılması

4.6.3. Ters EMK ve tutma torkunun belirlenmesi

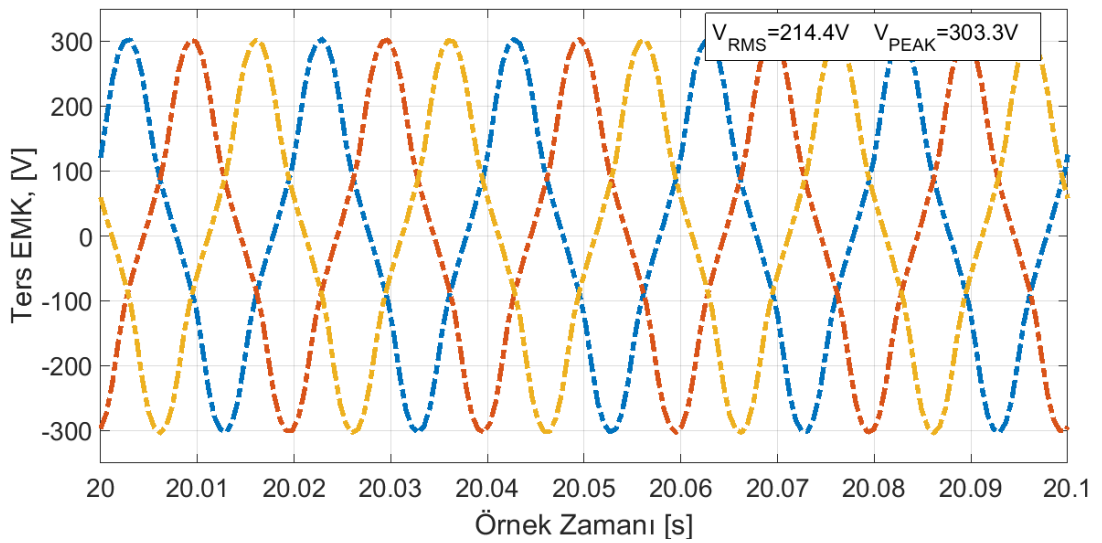
Sargı dağılımı dengeli ve tork dalgalanmaları düşük olan motorlarda, motor tarafından üretilen ters-EMK'nın da düzgün bir sinüzoidal profil çizmesi beklenmektedir. Düzensiz ters-EMK'ya sahip bir motorda hava aralığı akı dağılımının da düzensiz olduğu sonucu çıkarılmakta ve motor tarafından üretilen tork kalitesinde düşüş (üretilen tork dalgalanmaları neticesinde) gözlemlenmektedir.

Testlerin bu adımında prototip motor, test düzeneğinde yer alan DA makinenin motor olarak kullanılması ile 1500 d/d'ya kadar hızlandırılmıştır. Veri alma işlemi 17 s boyunca sürdürülmüştür. Prototipin hızlanma grafiği Şekil 4.25'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.25. Prototip motor ters EMK testi – hızlanma grafiği

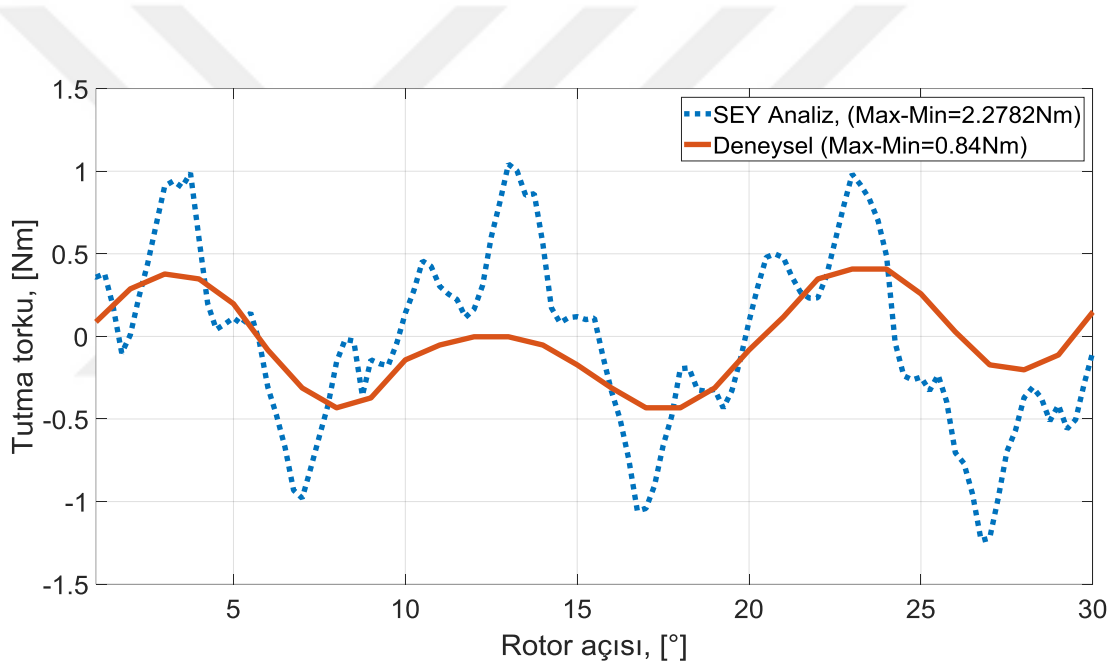
Ters EMK testinde test motoru temelde generator olarak çalıştırılmaktadır. Motorun devirlenmesi ile stator sargılarının SM akısını kesmesi neticesinde stator sargı uçlarında ters EMK gerilimi indüklenmektedir. Sargı uçlarında indüklenen gerilim değeri ve motor hız bilgisi National Instrument firmasının cDAQ-9174 kabini ile birlikte NI9225 ve NI9239 modülleri kullanılarak yüksek çözünürlükte haricen alınmıştır. Alınan veriler LabVIEW 2011 geliştirme ortamında tasarlanan bir arayüz yolu ile kaydedilmiştir. Test sonucu sargı uçlarından okunan ters EMK'nın 0.1 s'lik bir kesiti Şekil 4.26'da görülmektedir.



Şekil 4.26. Sargı uçlarında indüklenen ters EMK

Şekil 4.26’da görüldüğü gibi sargı uçlarından okunan gerilimin her üç fazının da oldukça düzgündür. Sargılarda indüklenen en yüksek gerilim $V_{MAX}=303.3$ V, RMS değeri $V_{RMS}=214.4$ V olarak okunmuştur.

Tutma torku testleri için sistemdeki DA makine motor olarak kullanılmıştır. Test sürecinde prototip motor 10 s süresince 15 d/d hızla döndürülerek motor milinde meydana tutma torku kaydedilmiştir. Şekil 4.27 ile deneysel çalışma ve SEY analiz sonucunda elde edilen tutma torku verileri görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi analiz çalışmalarında ± 2.27 Nm olarak hesaplanan dalgalanma (tam yük referans alınırsa %6.5) deneysel verilerde ± 0.84 Nm olarak (tam yüke göre %2.4) hesaplanmıştır.

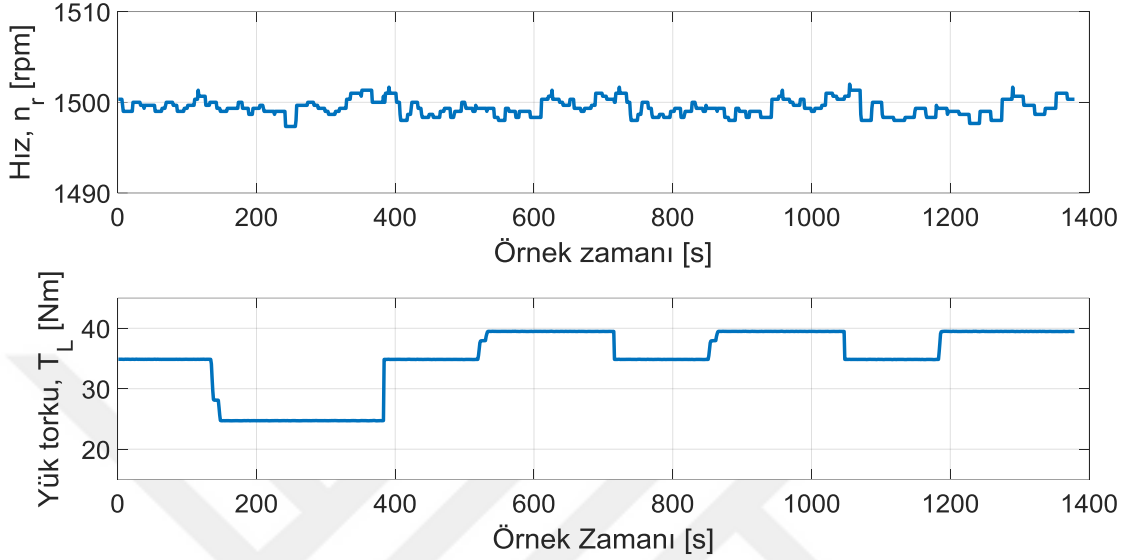


Şekil 4.27. Tutma torku

4.6.4. Ani yükleme ve yükten alma testleri

Yapılan bu test ile ŞK-RASM prototipinin ani yüklemesi ve yükten düşmesi durumlarının motor hızına etkisi test edilmiştir. Çalışmada motor 35 Nm yükte 1500 d/d ile çalışırken, motorun aniden yükten alınması (yükün 25Nm’ye çekilmesi) veya ani yüklenmesi (yükün 40Nm’ye çıkarılması) durumunda prototip motorun senkron hızda davranışı incelenmiştir. Şekil 4.28 ile motora uygulanan yük torku profili ve motorun değişen yük torkuna karşı hız karakteristiği görülmektedir. Sunulan hızlanma grafiğinde de görüldüğü

prototip motor ani yük değişimlerine karşı oldukça toleranslıdır. Dolayısı ile motorun kararlı durum performansının oldukça yüksek olduğunun söylemek mümkündür.



Şekil 4.28. Ani yükleme ve yükten alma deney sonuçları

Son olarak Çizelge 4.4 ile tasarım ve optimizasyon çalışmaları sonucu elde edilen bulguların genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü gibi analitik analiz süresini kısaltılması amacı modelin performans değerlendirmesinde ve GA çalışmalarında 2D SEY analiz kullanılmıştır. Analitik olarak hesaplanan motorda $\eta = \%91.14$ iken önerilen tasarımın GA optimizasyonu ile verim $\eta = \%92.00$ 'a kadar yükseltilmiştir. Analitik olarak tasarımı yapılan motorun tokunda $T_L = 19.9820$ (SI) gibi aşırı bir vuruş olduğu gözlemlenmiştir. GA analiz çalışmaları ile motor veriminin yanı sıra torkta ki vuruşta da azalma elde edilerek $T_L = 7.090$ (SI) değerine kadar indirgenebilmiştir. Elde edilen bu vuruş değerinin de oldukça yüksek olduğu göz önünde bulundurularak, motor tasarımının vuruş torkunu azaltacak şekilde yenilenmesi üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Motorda meydana gelen vuruş torkunun azaltılması yöntemleri irdelenerek, önerilen ŞK-RASM tasarımı için en uygun yöntemin statorun kaykılı üretilmesi olduğuna kanaat getirilmiştir. Yürütülen SEY analiz çalışmaları ile en tercih edilebilir verim ve vuruş torku karakteristiğinin $\kappa = 13$ kaykılı açısı ile elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 4.4. Sonuçların karşılaştırılması

Tasarım Özelliği	Standart IE2 ASM	Analitik Model (2D Analiz)	GA Analiz (2D Analiz)	Kaykılı Stator (3D Analiz)	Prototip (Deneysel)
Verim	%85	%91.14	%92.00	%91.28	%91.02
Güç Faktörü	0.830	0.970	0.974	0.98	0.936
Anma Akımı	11.8A	9.5A	9.26A	8.74A	9.31A
KalkışAkımı	7 p.u.	7.8 p.u.	6.9 p.u.	6.6 p.u.	7 p.u.
Senkronlanma Süresi	100ms	130ms	200ms	600ms	550ms
Vuruntu Torku	-	19.9820(SI)	7.090(SI)	2.6212(SI)	0.4922

Kaykılı stator kullanılarak tasarlanan motorun çalışma karakteristiğinin elde edilmesinde 3D SEY analiz kullanılmış olup analizler sonucunda tork dalgalanmalarının $T_L=2.6212$ (SI) değerine kadar düşürüldüğü görülmüştür. Statoru kaykılı üretilen motor tasarımı ile vuruntu torkunda kayda değer azalma elde edilmekle beraber yapılan bu değişiklik motor performansında da düşüğe neden olmuştur. Grafikte de görüldüğü gibi verimde %0.72'lik azalma ve motor senkronlanma süresinde 400ms'lik bir gecikme olduğu görülmüştür. Tamamlanmış bulunana test çalışmaları sonunda SEY analiz ile elde edilen verilerin büyük oranda SEY analiz sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür. Test çalışmaları sonucunda nihai motor veriminin %91.02 olduğu görülmüştür. Elde edilen bu değer ile stator tasarımı alınan ASM'ye göre verimde %6.02'lik kazanç sağlanmıştır. Çalışmaların tüm adımlarında motor akım karakteristiğinin kabul edilebilir sınırlarda olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

Tamamlanmış bulunan tez çalışması ile ASM'ler gibi sağlam ve az bakım gerektiren buna ek olarak daha yüksek verim ve güç faktörü ihtiva eden standart gövde yapısında bir ŞK-RASM'nin geliştirilmesi ve prototip üretimi yapılmıştır. Tez çalışmasında halihazırda endüstrinin kullanımına sunulan mevcut bir ASM'nin sadece rotorunun yeniden tasarlanarak daha verimli hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla stator tasarımı halihazırda piyasaya sunulan IEC standardında 5.5 kW IE2 bir ASM'den alınmıştır.

Diğer bir yandan ŞK-RASM'lerin tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar stator tasarımının da motor verimi ve tork karakteristiğinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Dolayısı ile stator tasarımı alınan ASM'nin yüksek verimli olması (IE3), çalışma ile tasarlanan SM motorun performansında da etkili olacağı muhakkaktır. Tez çalışması ile piyasada yaygın olarak tercih edilen ASM'lerin daha verimli hale getirilmesine yönelik bir tasarımın elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle stator tasarımında, alım maliyeti açısından daha ekonomik, ortalama verimlilikte bir motor tercih edilmiştir.

ŞK-RASM'lerin tasarımına yönelik elde edilen bilgilerin tecrübe edilmesi amacı ile çalışmalarda yaygın olarak tercih edilen üç farklı ŞK-RASM topolojisi modellenmiştir. Elde edilen bilgi ve tecrübeler göz önünde bulundurularak yenilikçi bir rotor topolojisi önerilmiştir. ŞK-RASM'lerde karşılaşılan en önemli tasarım probleminin motor kalkışı olduğu göz önünde bulundurularak önerilen prototipinde motor kalkış ve senkronlama performansını arttırmaya yönelik iki farklı oluk tasarımı bir arada kullanılmıştır. Rotor yüzeyine yakın konumlandırılan 16 adet NEMA D sınıfı oluk ile motor kalkış performansı yükseltmek istenmiştir. Buna ek olarak SM altına konumlandırılan 12 adet NEMA B sınıfı kapalı oluk ile motor senkron çalışma performansında da iyileştirme sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca önerilen topolojide üretim ve bakımı sürecinin daha kolay olması amacı ile yüzey yerleştirmeli SM tercih edilmiştir. Yapılan bu tercih ile SM akısında doğrudan hava aralığına geçmesi olanaklı hale gelmiştir. Buna ek olarak rotorda meydana gelen SM kaçak akısı kaynaklı akı yığılmaları ve ısınmaların önüne geçilmiştir. Yapılan tercih ile tasarımda akı bariyeri kullanılması zorunluluğunun da ortadan kaldırılmıştır. Tasarımda nüve malzemesi olarak M330 50A çelik, SM malzemesi olarak N45SH tercih edilmiştir.

Önerilen topolojide ŞK-RASM tasarımının performans testlerinin yapılmasında yaygın olarak kullanılan ANSYS Maxwell SEY analizden yararlanılmıştır. Modelleme sürecinde öncelikle önerilen topolojinin analitik olarak boyutlandırılması yapılmış olup hesaplamalar sonucu elde edilen analitik veriler SEY analiz ortamına aktarılmıştır. Modelleme sürecinde analiz süresinin kısaltılması açısından ¼ 2D motor modeli kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kararlı çalışma rejimindeki motor kayıpları 535 W olarak hesaplanmıştır. Elde edilen söz konusu kayıp değer göz önünde bulundurulduğunda motorun kararlı rejimdeki verimi, $\eta = \%91.14$ olarak hesaplanmıştır. Diğer bir analiz sonucu elde edilen motor aktif ve görünür güç referans alınarak $\cos\phi = 0.97$ olarak belirlenmiştir. Motor anma akımı, $I_A = 9,5$ A olarak hesaplanırken, motor kalkış akımının 75A (7.8 p.u.)'e kadar çıktığı görülmüştür.

Analitik olarak tasarımı yapılan motor için 2D SEY analiz sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, topoloji ile önerilen yenilikçi kafes tasarımı motor kalkışında oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak rotorda SM'lerin yer alması neticesinde, motor kararlı rejim performansında da hatırı sayılır kazanç sağlanmıştır. Stator tasarımı referans alınan ASM'de $\eta = \%85$ ve $\cos\phi = 0.83$ olduğu göz önünde bulundurulduğunda (bkz. Çizelge 3.8), motor veriminde $\%6.14$ ve güç faktöründe 0.14 kazanç elde edilmiştir. Motor kalkış süresi ve motor akım karakteristiği göz önünde bulundurulduğunda mevcut tasarımın muadil endüstriyel motorlar ile benzer çalışma karakteristiğine sahip olduğu görülmüştür. Buna karşın motor tork karakteristiği incelendiğinde, motor milinde aşırı bir titreşim meydana geldiği ($T_R = 19.98$ (SI)) sonucu çıkarılmıştır. Söz konusu bu değer motor tork kalitesinde düşüşe ve motorun daha gürültülü çalışmasına neden olduğuna kanaat getirilerek vuru torkunun azaltılmasına yönelik yapılan iyileştirme çalışmalarına yer verilmiştir.

İyileştirme çalışmalarında öncelikle motor gövdesinden en yüksek verimin elde edilmesi amaçlanmış olup çalışmalarda da sezgisel bir optimizasyon algoritması olan GA kullanılmıştır. Yürütülen iyileştirme çalışmalarında, SM açıklığı (M_w) – kalınlığı (M_t), rotor dış çapı (D_r) ve üst oluk geometrik parametrelerinin performansa etkisi incelenmiştir. Ayrıca hedef tasarımın elde edilmesinde motor veriminin ($\eta \geq 92.0$)'nın üstüne çıkması koşul olarak kabul edilmiştir. Hedeflenen verim değerine 383 evrim sonucunda ulaşılmıştır. Hedeflenen verimin elde edilmesinde çok sayıda analiz çalışması

yapılmış olup iyileştirmesi yapılan tasarım parametrelerinin de motor performansına etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda $Bs1$, Hs , D_r , M_t ve M_w 'nin motor performansında doğrudan etkili olduğu ve sadece belirli değer aralıklarının da tatminkar motor performansının elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak sunulan $Bs0$ değerinin motor performansına etkisinin oldukça düşük olduğunu görülmüştür. Sonuç olarak GA çalışması sonucunda hedeflenen verim $Bs1=8.5$ mm, $Hs=1$ mm, $Bs0=1.79$ mm, $M_t=4.48$ mm, $M_w=40.5^\circ$ ve $D_r=61.30$ mm civarında elde edilmiştir. Bununla beraber motor tarafından üretilen tork dalgalanmaları $T_R=7.090$ (SI) seviyelerine kadar düşürülmüş ve motor anma akımı $I_A=9.26$ A olarak bulunmuştur.

Tork kalitesinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda farklı kaykı açılarının (κ) başta tork dalgalanmaları olmak üzere motor çalışma karakteristiğine etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Analiz çalışmaları sonucunda elde edilen T_R değerlerinin arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmekle beraber en düşük T_R değerleri, $T_{R(\kappa=9)} = 4.48$ (SI), $T_{R(\kappa=13)} = 2.9$ (SI) ve $T_{R(\kappa=15)} = 4.39$ (SI) olarak elde edilmiştir. Buna ek olarak en yüksek verimin $\eta_{(\kappa=7)} = \%91.33$, $\eta_{(\kappa=8)} = \%91.29$ ve $\eta_{(\kappa=13)} = \%91.28$ olduğu görülmüştür. Buna ek olarak en yüksek kalkış performansı $\kappa = 0$ ve $\kappa = 8$ açılarının da elde edilebilmiştir. Ne var ki her iki kaykı açısı için de $T_R = 7$ (SI) civarında yüksek tork dalgalanmaları üretildiği görülmüş ve bu değer motor mil torku kalitesinde kabul edilemez seviyede düşüşe neden olacağına kanaat getirilmiştir. Ayrıca $\kappa = 15$ ile tork dalgalanmalarında tatmin edici düzeyde bir azalma elde edilirken motor verimi ve performansının gözle görülür şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yapılan çalışmalarda senkronizasyon performansının tatmin edici ve tork dalgalanmalarının en düşük olması neticesinde stator kaykı açısı $\kappa = 13$ olarak tercih edilmiştir. Yapılan bu tercih ile tutma torku da %67.7 oranında azaltılmıştır. Böylelikle motor tork kalitesinde belirgin bir şekilde iyileşme sağlanmıştır.

Statoru $\kappa = 13$ kaykı açılı olarak tasarlanan motorun performans karakteristiği detaylı incelendiğinde motorun $T_L=35$ Nm (Tam yük) altında 0.3 s'de 1500 d/d'lık senkron hıza ulaşabildiği ve 0.6 s'de tamamen senkronlandığı görülmüştür. Buna ek olarak %14'lük aşırı yükleme ($T_L=40$ Nm) motorun senkronlanma sürecinin başarısız olduğu görülmüştür. ŞK-RASM'lerin santrifüj pompa, fan ve körük gibi karesel yük

karactersisine sahip uygulamalarda yoğun olarak kullanıldığı göz önünde bulundurularak SEY analiz çalışmalarında tasarımın bu tip yükler altındaki performansı da incelenmiştir. Analizler sonucunda $T_L=35$ Nm sabit yük altında 600 ms'de senkronlanan motorun, karesel yük ile 200 ms içinde kalkış yaparak oldukça yüksek performans sunabildiği görülmüştür. Ayrıca analizlerde önerilen modelin $T_L= 87.50$ Nm (250% anma torku)'e kadar yüklerde başarılı ile senkronlandığı gözlemlenmiştir.

Analiz çalışmaları ile statoru $\kappa = 13$ kaykılı açılı olarak tasarlanan motorun boşta iken çekilen akım $I_A=2.3$ A civarında akım çektiği, 40 Nm'lik aşırı yükleme durumunda ise çekilen akımın $I_A=9.84$ A değerine kadar yükseldiği görülmüştür. Tam yük altındaki çekilen akım, $I_A=8.74$ A olurken motor verimi $\eta = \%91.28$ olarak elde edilmiştir. Motorun geçici ve kararlı rejiminin detaylı incelendiği SEY analiz çalışmalarında rotor ve stator boyunduruklarında akı yoğunluklarının güvenli sınırlarda kaldığı gözlemlenmekle beraber düşük hızlarda kısa süreliğine de (kalkışta geçen ilk 200ms) olsa akı yoğunluklarının 2.2 T'lik maksimum değere kadar çıktığı görülmüştür. Kararlı çalışma sürecinde meydana gelen akı yığılmalarının 1.9 T – 2 T değerini geçmemiştir.

Statoru $\kappa = 13$ kaykılı açılı olarak tasarlanan iyileştirilmiş motorun performansının deneysel olarak sınanması amacı ile motorun prototip üretim yapılmıştır. Prototipin üretilmesinde, maliyetin düşürülmesi açısından motor gövdesi ve stator nüvesi sacları yerel bir motor üreticisine ait 4 kutuplu IE2 5.5 kW'lık 132s-4 gövdeli ASM'nin üretim hattından temin edilmiştir. Üretimi yapılan prototip ile motor sargı direncinin bulunması, farklı yük profillerinde motorun kararlı – geçici rejim performansı, motor verimi ve güç faktörünün belirlenmesine yönelik test çalışmaları yapılmıştır.

Prototip motor, eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi amacı ile Simatics S120 AC sürücüsü üzerinden yüksüz olarak çalıştırılmıştır. AC sürücüsünün konfigirasyonu ve kumanda edilmesi amacı ile Sinamics Micromaster Starter V5.1 yazılım ortamından yararlanılmıştır. Test aşamasında motor sıcaklığı nominal çalışma noktasına kadar yükseltilmiştir. Çalışma sonucunda stator sargı direnci $r_s = 1.102 \Omega$ olarak ölçülmüştür.

Motor verimi IEC 60034-2-1 standardı ile tanımlanan doğrudan ölçüm yöntemi göre $\eta = \%91.02$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca IEC 60034-1 standardı Bölüm 12'de yer alan

toleranslar gözetilerek 5.5 kW IE4 50Hz minimum motor verimi $\eta_{min} = \%89.53$ olarak hesaplanmıştır. Test çalışmaları sonucunda elde edilen $\eta = \%91.02$ değerinin, η_{min} değerinin üzerinde olması neticesinde, üretilen prototipin 5.5 kW IE4 50Hz taban verimlilik değerlerini karşıladığına kanaat getirilmiştir.

Yapılan test çalışmalarında SEY analiz sonucu elde edilen motor performans verilerinin deneysel veriler ile büyük oranda örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca deneysel çalışmalarda tork kalitesinde kayda değer iyileştirme sağlandığı $T_R = 0.4922$ (SI) doğrulanmıştır. Ayrıca tutma torkunun da başarılı şekilde azaltıldığı (± 2.27 Nm) görülmüştür. Ters EMK testlerinde sargı uçlarından okunan gerilimin her üç fazının da oldukça düzgün olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak tamamlanmış bulunan tez çalışması ile analitik yöntemler ve sonlu elemanlar analiz yazılımı kullanılarak 5.5 kW gücündeki 4 kutuplu IE2 verimlilik sınıfında bir ASM'nin rotor bölümü SM kullanılarak tekrar modellenmiştir. Elde edilen motorun stator bölümünün halihazırda endüstriyel olarak pazara sunulan bir üründen alınması neticesinde, stator iç çapı ve laminasyon boyunun uyumlu olması koşuluyla tasarlanan rotorun aynı güçteki diğer ASM'ler ile uyumlu çalışması olanaklı hale gelmiştir. Çalışmada ŞK-RASM'lerde motor tarafından üretilen ve mil torkunun kalitesinin gözle görünür düşüne neden olan tork dalgalanmalarının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Önerilen topoloji ile endüstriyel pompa ve fan uygulamalarında kullanılacak yeni bir motor tasarımı tanıtılmıştır. Ayrıca önerilen modelin tasarımında yüzey yerleştirmeli SM kullanılması nedeni ile gömülü SM içeren motorlar da karşılaşılan ve çözümü oldukça zahmetli olan SM'lerin rotor nüvesine yerleştirilmesi gibi problemlerin önüne geçilmiştir. Tez çalışması sonucunda önerilmiş bulunan yenilikçi rotor tasarımının patentlenmesine yönelik çalışmalarda yapılmış olup, ilgili patent başvurusuna ait detaylara EK-3'de ayrıca yer verilmiştir.

Yürütülen çalışmalarda stator tasarımı mevcut IE2 bir motordan temin edilmiştir. Tasarımda daha üst seviye verimlilikte bir motor statorunun referans alınması ile daha yüksek performans elde edilmesi muhakkaktır. Dolayısı ile ileriye dönük çalışmalarda stator tasarımında değişiklik yapılarak (olukların kapalı tasarımı, sargıların yeniden modellenmesi vb.) motor verimi ve tork kalitesinde daha fazla iyileştirme sağlanması

olasıdır. Ayrıca önerilen topolojide yüzey yerleştirmeli yay parçası SM'ler yerine baklava dilimi şeklinde üretimi daha kolay olan parçalı SM'lerin kullanılması ile motorun üretim maliyeti de düşüş sağlanabilmektedir. Söz konusu SM tasarımının motor çalışma karakteristiği ve performansına etkisi ayrıca incelenmelidir. Yüzey yerleştirmeli tasarımlarda SM'lerin rotor yüzeyinden ayrılmasına engel olan gömlek yapıları her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. Tamamlanan tez çalışmasında bu tasarım özelliği kullanılmamıştır. İleriye dönük çalışmalarda bu tasarım özelliği ile rotorun rijitliğinin artırılması olasıdır. Gömlek yapısının motor performansı ve üretim maliyetine etkisi ayrıca incelenmelidir.



6. KAYNAKLAR

- Abdel-Kader, F. M. ve Osheba, S. M., 1990. Performance analysis of permanent magnet synchronous motors. I. Dynamic performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5(2), 366–373. doi: 10.1109/60.107234.
- Ackermann, B. ve Sottek, R., 1995. Analytical modeling of the cogging torque in permanent magnet motors. *Electrical Engineering*, 78(2), 117–125. doi: 10.1007/BF01245643.
- Adelski, H.-J. ve Volkrodt, W., 1982. Interior rotor for an electric machine. U.S. Patent No: US4324996A.
- Akgün, E., 2018. Motor kullanılan sistemlerde enerji verimliliği, 9. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı, İstanbul.
- Akita, S., Higuchi, T., Yokoi, Y., Saikusa, H., Abe, T. ve Makino, S., 2016. Experimental characteristics of a line-start permanent magnet motor. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, Japan.
- Akman, O. ve Ürkmez, A., 2004. Asenkron motor tasarımının bilgisayar programı ile gerçekleştirilmesi, *Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı (ELECO'2004)*, Bursa.
- Anonim, 1970. An Electric Machine having Permanent Magnets Mounted in the Rotor between its Pole Segments. U.S. Patent No: US1177247.
- Anonim, 2003. Motors and Generators. MG-1. NEMA Standard Publication.
- Anonim, 2010a. Döner elektrik makineleri - Bölüm 30: Tek hız kademeli, üç fazlı kafesli endüksiyon motorlarının verimlilik sınıfları (IE kodu) (TS EN 60034-30). Türk Standardları Enstitüsü.
- Anonim, 2010b. Rotating electrical machines Part 1: Rating and performance (BS EN 60034-1). BSI Standards.
- Anonim, 2011. Döner elektrik makineleri - Bölüm 2-2: Büyük makinelerin deneylerden ayrı kayıpların tayini için belirli yöntemler (TS EN 60034-2-2). Türk Standardları Enstitüsü.
- Anonim, 2012a. Döner elektrik makineleri - Bölüm 30: Tek hız kademeli, üç fazlı kafesli endüksiyon motorlarının verimlilik sınıfları (IE kodu) (TS EN 60034-30). Türk Standardları Enstitüsü.
- Anonim, 2012b. ANSYS User's guide – Maxwell 2D v15. Canonsburg
- Anonim, 2014a. Rotating electrical machines Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE code) (IEC 60034-30-1). BSI Standards.
- Anonim, 2014b. Döner elektrik makineleri - Bölüm 30-1: Şebeke tarafından beslenen a.a motorlar için verimlilik sınıfları (IE kodu) (TS EN 60034-30-1). Türk Standardları Enstitüsü.
- Anonim, 2014c. Rotating electrical machines Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) (BS EN 60034-2-1). BSI Standards.
- Anonim, 2018. Türkiye ve Kişi Başına Kurulu Güç Brüt Üretim Arz ve Net Tüketimin Yıllar İtibariyle Gelişimi (1975-2017). <https://www.teias.gov.tr/tr/iii-elektrik-enerjisi-uretimi-tuketimi-kayıplar-0> (30.12.2018).
- Anonim, 2019a. Wraptite. https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Arnold_DS_Wraptite_Final-1.pdf (07.03.2019).
- Anonim, 2019b. Magnet Bonding Adhesives. <https://www.permabond.com/2015/12/06/magnet-bonding-adhesives/#> (07.03.2019).

- Anonim, 2019c. Submersible Pump Sleeve. <https://www.indiamart.com/proddetail/submersible-pump-sleeve-11801103033.html> (07.03.2019).
- Anonim, 2019d. Skewed Rotor and Stator Stacks for Brushless Motors for Paper Shredders. <http://www.yumalaminations.com/rotor-stacks-for-brushless-motors/paper-shredders-1.html> (13.05.2019).
- Anonim, 2019e. Skewed Stator. <http://www.zhi-xing.com/en/product.asp?sortid=466vetypeid=476> (18.05.2019).
- Anonim, 2019f. Standards and legislation. https://people.ucalgary.ca/~aknigh/electrical_machines/induction/i_standard.html (16.03.2019)
- Anonim, 2019g. Permanent magnets design guide. <https://www.intemag.com/magnet-design-guide> (30.03.2019).
- Anonim, 2019h. Sonlu Elemanlar Yöntemi. http://insaatmuh.cbu.edu.tr/db_images/site_115/file/66-sonlu-elemanlar-yontemi.pdf (28.03.2019).
- Anonim, 2019i. Modelica Magnetic Flux Tubes Material Hysteresis Table Data. <https://build.openmodelica.org/Documentation/Modelica.Magnetic.FluxTubes.Material.HysteresisTableData.html> (19.05.2019)
- Anonim, 2019j. N45SH. <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0994/8998/files/N45SH.pdf> (29.03.2019).
- Anonim, 2019k. Sintered neodymium-iron-boron magnets (N45SH). <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N45SH-151021.pdf> (29.03.2019).
- Anonim, 2019l. Norm Elektrik Motorları (IEC 80-355). http://elsanas.com.tr/downloads/Katalog_NMSa.pdf (25.03.2019).
- Armstrong, P. R. ve Luenberger, F. O., 1961. Rotor structure for synchronous induction motors. U.S. Patent No: US2975310A.
- Aydoğan, M., 2019. Yapı Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi. http://www.imogaziantep.org.tr/resimler/dosya_ekler/163b412846f30e4_ek.pdf (28.03.2019)
- Azari, M. N., Mirsalim, M., Pahnehkolaei, S. M. A. ve Mohammadi, S., 2017. Optimum design of a line-start permanent-magnet motor with slotted solid rotor using neural network and imperialist competitive algorithm. *IET Electric Power Applications*, 11(1), 1–8. doi: 10.1049/iet-epa.2016.0109.
- Bala, M. J., Deb, N. K. ve Chowdhury, S. K., 2017. Improvement of the performances of line start permanent magnet synchronous motor with flux barrier in the rotor, 2017, *IEEE Calcutta Conference (CALCON)* (pp. 357–361). Kolkata, India.
- Behbahanifard, H. ve Sadoughi, A., 2015. Line start permanent magnet synchronous motor performance and design ; A review. *J. World. Elect. Eng. Tech.*, 4(2), 58–66.
- Behbahanifard, H. ve Sadoughi, A., 2016. Cogging torque reduction in line start permanent magnet synchronous motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 11(4), 878–888. doi: 10.5370/JEET.2016.11.4.878.
- Benghezal, K., Ivanes, M., Yonnet, J. P. ve Leduc, D., 1991. Skewed stator synchronous motor modeling by a 2D electromagnetic simulation software. *IEEE Transactions on Magnetics*, 27(5), 4235–4237. doi: 10.1109/20.105036.
- Bensaïda, K., Abdennadher, I., Masmoudi, A. ve Marignetti, F., 2018. On the enhancement of the starting capabilities of single phase line-start PMSMs. 2018,

- Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte-Carlo, Monaco.
- Bianchi, N. ve Bolognani, S., 1998. Design optimisation of electric motors by genetic algorithms. *IEE Proceedings - Electric Power Applications* (Vol. 145, p. 475). doi: 10.1049/ip-epa:19982166.
- Bianchi, N. ve Bolognani, S., 2002. Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(5), 1259–1265. doi: 10.1109/TIA.2002.802989.
- Bianchini, C., Immovilli, F., Bellini, A. ve Davoli, M., 2010). Cogging torque reduction methods for internal permanent magnet motors: Review and comparison. 19th International Conference on Electrical Machines, IECM 2010, Rome, Italy.
- Bilcai, E., Haslberger, S. ve Barriau, E., 2011. Method for attaching a magnet on or in a rotor or stator. U.S. Patent No: US8778129.
- Bingyi, Z., Zhang, W., Zhuang, F. ve Guihong, F., 2007. Design and starting process analysis of multipolar line-start PMSM. *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2007*, Seoul, Korea.
- Binns, K. J. ve Barnard, W. R., 1971. Novel design of self-starting synchronous motor. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 118(2), 369. doi: 10.1049/piee.1971.0065.
- Binns, K. J. ve Holmes, J. E., 1972. Alternating current electric machine. U. S. Patent No: GB1263300.
- Binns, K. J. ve Barnard, W. R., 1973. Permanent magnet rotor for synchronous electric machine. U.S. Patent No: US1324147.
- Binns, K. J., 1974. Permanent magnetic rotor for synchronous electric machines. U.S. Patent No: US1359548.
- Binns, K. J., Jabbar, M. A. ve Barnard, W., 1975a. A rapid method of computation of the magnetic field of permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(5), 1538–1540. doi: 10.1109/TMAG.1975.1058860.
- Binns, K. J., Jabbar, M. A. ve Barnard, W., 1975b. Computation of the magnetic field of permanent magnets in iron cores. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(12), 1377–1381.
- Binns, K. J., Barnard, W. R. ve Jabbar, M. A., 1978. Hybrid permanent-magnet synchronous motors. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 125(3), 203. doi: 10.1049/piee.1978.0053.
- Binns, K. J., 1978. Self-starting permanent-magnet a.c. motors. *Electronics and Power*, 24(10), 745. doi: 10.1049/ep.1978.0420.
- Binns, K. J., Jabbar, M. A. ve Parry, G. E., 1979. Choice of parameters in the hybrid permanent-magnet synchronous motor. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 126(8), 741. doi: 10.1049/piee.1979.0162.
- Binns, K. J. ve Jabbar, M. A., 1981. High-field self-starting permanent-magnet synchronous motor. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, 128(3), 157. doi: 10.1049/ip-b.1981.0021
- Binns, K. J. ve Wong, T. M., 1984. Analysis and performance of a high-field permanent-magnet synchronous machine. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, 131(6), 252. doi: 10.1049/ip-b.1984.0038.
- Binns, K. J., 1988. Permanent magnet synchronous motors, colloquium on permanent magnet machines. London.

- Boldea, I., ve Tutelea, L., 2010). *Electric Machines. Steady State, Transients and Design with MATLAB*. CRC Press, 775 p, Florida.
- Boldea, I., ve Nasar, S. A., 2001). *Induction Machines Handbook*. CRC Press LLC, 950p, Florida,
- Bödrich, T., 2008. Electromagnetic actuator modelling with the extended modelica magnetic library. *Modelica*, 3–4, 221-227.
- Brunner, C. U., De Almeida, A., Niederberger, A. A. ve De Keulenaer, H., 2007. Standards for efficient electric motor systems SEEEM-Building a worldwide community of practice. *Conf. Proc. of Energy-Efficiency Motor Driven Systems*, 1443–1455.
- Cahill, D. P. M. ve Adkins, B., 1962. The permanent-magnet synchronous motor. *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*, 109(48), 483. doi: 10.1049/pi-a.1962.0141.
- Cao, P., Li, X., LEE, X., Zhang, Z. ve Fargo, V., 2013. Rotors and stators for dynamoelectric machines. WIPO Patent No: WO2014139132.
- Cao, Z., Li, W., Li, J., Zhang, X., Li, D. ve Zhang, M., 2017. Research on the Temperature Field of High-Voltage High Power Line Start Permanent Magnet Synchronous Machines with Different Rotor Cage Structure. *Energies*, 10(11), 1829. doi: 10.3390/en10111829.
- Cavagnino, A., Lazzari, M., Profumo, F. ve Tenconi, A., 2002. A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(6), 1517–1524. doi: 10.1109/TIA.2002.805572.
- Cetin, E., Daldaban, F., Cetin, E. ve Daldaban, F., 2018. Analyzing the profile effects of the various magnet shapes in axial flux pm motors by means of 3D-FEA. *Electronics*, 7(2), 13. doi: 10.3390/electronics7020013.
- Chapman, S. J., 2004. *Electric Machinery Fundamentals (4th ed.)*. McGraw-Hill, 746 p, Australia.
- Chaudhari, B.N. ve Fernandes, B. G., 2004. Performance of line start permanent magnet synchronous motor with single-phase supply system. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 151(1), 83. doi: 10.1049/ip-epa:20030849.
- Chaudhari, B. N., Ugale, R. T. ve Pramanik, A., 2014. Overview of research evolution in the field of line start permanent magnet synchronous motors. *IET Electric Power Applications*, 8(4), 141–154. doi: 10.1049/iet-epa.2013.0241.
- Chari, M. V. K., 1974. Finite-element solution of the eddy-current problem in magnetic structures. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93(1), 62–72. doi: 10.1109/TPAS.1974.293916.
- Chikouche, B. L., Boughrara, K. ve Ibtouen, R., 2015. Cogging torque minimization of surface-mounted permanent magnet synchronous machines using hybrid magnet shapes. *Progress In Electromagnetics Research B*, 62(January), 49–61. doi: 10.2528/PIERB14112302.
- Cho, H. W., Jang, S. M. ve Choi, S. K., 2006. A design approach to reduce rotor losses in high-speed permanent magnet machine for turbo-compressor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(10), 3521–3523. doi: 10.1109/TMAG.2006.879086.
- Cho, K. Y., Han, S. Do, Kim, Y. H. ve Shin, H. J., 2002. Single phase line start permanent magnet synchronous motor. European Patent No: EP1267475.

- Chu, M. T. ve Chen, M. C., 2003. Rotor structure of line-start permanent magnet synchronous motor. U.S. Patent No: US6844652.
- Consoli, A. ve Abela, A., 1986). Transient performance of permanent magnet AC motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22(1), 32–41. doi: 10.1109/TIA.1986.4504678.
- Cui J., Kramer M., Zhou L., Liu F, Gabay A., Hadjipanayis G., Balasubramanian B. ve Sellmyer D., 2018. Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. *Acta Materialia*, 158, 118–137. doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2018.07.049.
- De Almeida, A.T., Ferreira, F. J. T. E., Fong, J. A. C. ve Brunner, C. U., 2008. Electric motor standards, ecodesign and global market transformation. *Conference Record - Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 1–9. doi: 10.1109/ICPS.2008.4606292.
- De Almeida, A.T, Ferreira, F. J. T. E. ve Fong, J. a C., 2011. Standards for Efficiency of Electric Motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 17(1), 12–19. doi: 10.1109/MIAS.2010.939427.
- De, J. H., 1971, Synchronous electric machine. U.S. Patent No: US3743873.
- Debruyne, C., Polikarpova, M., Derammelaere, S., Sergeant, P., Pyrhonen, J., Desmet, J. J. M. ve Vandeveld, L., 2014a. Evaluation of the efficiency of line-start permanent-magnet machines as a function of the operating temperature. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8), 4443–4454. doi: 10.1109/TIE.2013.2279127.
- Debruyne, C., Sergeant, P., Derammelaere, S., Desmet, J. J. M. ve Vandeveld, L., 2014b. Influence of supply voltage distortion on the energy efficiency of line-start permanent-magnet motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2), 1034–1043. doi: 10.1109/TIA.2013.2277593.
- Ding, T., Takorabet, N., Sargos, F. M. ve Wang, X., 2009. Design and analysis of different line-start PM synchronous motors for oil-pump applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1816–1819. doi: 10.1109/TMAG.2009.2012772.
- Dinh, B. M., 2017. Optimal rotor design of line start permanent magnet synchronous motor by genetic algorithm. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2(3), 1181–1187. doi: 10.25046/aj0203149.
- Dochterman, R. W., 1969. Laminated rotors and stators with flux barriers for synchronous induction motors and method of making the same. U.S. Patent No: US3457445A.
- Doherty, R. E. ve Nickle, C. A., 1926. Synchronous machines I — An extension of Blondel's two-reaction theory. *Journal of the A.I.E.E.*, 45(10), 974–987. doi: 10.1109/JAIEE.1926.6537307.
- Dong, L., Dong, L. ve Lu, H., 1995. Self-starting permasyn motor. China Patent No: CN2245295Y.
- Donmezer, Y. ve Ergene, L. T., 2010. Skewing effect on interior type BLDC motors. *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Italy.
- Dosiek, L. ve Pillay, P., 2007. Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(6), 1565–1571. doi: 10.1109/TIA.2007.908160.
- Douglas, J. F. H., 1959a. Induction motors with permanent magnet excitation. *Electrical Engineering*, 78(12), 1195–1195. doi: 10.1109/EE.1959.6446093.

- Douglas, J. F. H., 1959b. Current Loci of Permanent-Magnet Synchronous Motors: An Extension or Blondel Theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 78(3), 76–78. doi: 10.1109/AIEEPAS.1959.4500265.
- Dusane, P. M., 2016. Simulation of BLDC Hub Motor in ANSYS. (Master Thesis), Faculty of Electrical Engineering Department of Power Engineering Student. Czech Technical University, Prague.
- Eker, M., 2017. Şebeke Yol vermeli Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı. (Doktora Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Elistratova, V., 2016, November. Optimal design of line-start permanent magnet synchronous motors of high efficiency. (Docteur Thesis), Ecole Centrale de Lille. France.
- Els, J., Sorgdrager, A. ve Wang, R.-J., 2014. A Study of rotor topologies of line-start pm motors for cooling fan applications. 22nd South African Universities Power Engineering Conference, Durban, South Africa.
- Fang, L. ve Hong, J. P., 2009. Flux-barrier design technique for improving torque performance of interior permanent magnet synchronous motor for driving compressor in HEV. 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09, Dearborn, MI, USA.
- Fei, R. ve Xu, H., 2007. Fan assemblies employing LSPM motors and LSPM motors having improved synchronization. U.S. Patent No: US20070132330.
- Fei, W., Luk, P. C. K., Ma, J., Shen, J. X. ve Yang, G., 2009. A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(10), 4724–4727. doi: 10.1109/TMAG.2009.2022179.
- Fei, W. ve Luk, P. C. K., 2010. A New Technique of Cogging Torque Suppression in Direct-Drive Permanent-Magnet Brushless Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4), 1332–1340. doi: 10.1109/TIA.2010.2049551.
- Felipe, Y. J., 2019. The Poisson Equation for Electrostatics. http://academic.uprm.edu/erwin.suazo/Yese_ThePoissonEquationforElectrostatics.pdf (28.03.2019)
- Fengbo, Q., Zhipeng, L., Shukang, C. ve Weili, L., 2010. Calculation and simulation analysis on starting performance of the high-voltage line-start PMSM. ICCASM 2010 - International Conference on Computer Application and System Modeling, Proceedings, Taiyuan, China.
- Fernando, W. U. N. ve Gerada, C., 2018. High speed permanent magnet machine design with minimized stack-length under electromagnetic and mechanical constraints. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 46(1), 95–109. doi: 10.3233/jae-141750.
- Ferreira, F. J. T. E., Baoming, G. ve de Almeida, A. T., 2013. Stator Winding Connection-Mode Management in Line-Start Permanent Magnet Motors to Improve Their Efficiency and Power Factor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(3), 523–534. doi: 10.1109/TEC.2013.2270084.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. J. ve Umas, S. D., 2003. *Electric Machinery*. McGraw-Hill, 688 p, New York.
- Fu, W. N. ve Chen, Y., 2016. A Post-Assembly Magnetization Method for a Line-Start Permanent-Magnet Motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(4), 1–4. doi: 10.1109/TASC.2016.2535968.

- Gao, J., Liu, J., Huang, S. ve Huang, K., 2010. Optimum Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Gene Handling Genetic Algorithms. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering , Wuhan, China.
- Garner, K. S., 2015. Retrofit design of a line-start permanent- magnet synchronous machine. (Magister Thesis), North-West University. Potchefstroom.
- Ge, X., 2014. Simulation of vibrations in electrical machines for hybrid-electric vehicles. (Master Thesis), Automotive Engineering Master's Programme. Chalmers University Of Technology.
- Gedik, B. D., 2018. IE4 verim sınıfı şebeke kalkışlı sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Gieras, J. F., 2004. Analytical Approach to cogging torque calculation of pm brushless motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 40(5), 1310–1316. doi: 10.1109/TIA.2004.834108.
- Gleghorn, R. L. ve Wagner, P. D., 1990. Synchronous machine rotor lamination. European Patent No: EP0352573.
- Goto, H., Shibamoto, T., Nakamura, K. ve Ichinokura, O., 2013. Development of high torque density axial-gap switched reluctance motor for in-wheel direct-drive EV. 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), France.
- Gülçin, E. A., 2018. Tek fazlı şebeke kalkışlı sabit mıknatıslı senkron motor tasarımı. (Yüksek Lisans Tez.), Fen Bilimleri Enstitüsü. Gaziosmanpaşa Üniversitesi.
- Gündoğdu, T. ve Kömürgöz, G., 2013. Impact of the selection of permanent magnets on the design of permanent magnet machines—a case study: permanent magnet synchronous machine design. Przegląd Elektrotechniczny, R.89(3a), 103–108
- Gürdal, O., 2015. Elektrik Makinalarının Tasarımı. Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları. 518 s, Bursa.
- Gwozdziwicz, M. ve Zawilak, J., 2011. Single-phase line start permanent magnet. Zeszyty Problemowe, (93), 25–29.
- Hanselman, D. C., 1997. Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 144(5), 325. doi: 10.1049/ip-epa:19971205.
- Higuchi, T., Yokoi, Y., Abe, T. ve Egawa, T., 2012. Fundamental characteristics of a novel self-starting type permanent magnet synchronous motor. 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Sapporo, Japan.
- Hombitzer, M., Elfgren, S., Franck, D. ve Hameyer, K., 2014. Performance improvement of a high-speed permanent magnet excited synchronous machine by flux-barrier design. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Germany.
- Honsinger, V. B., 1962. Synchronous induction motor. U.S. Patent No: US3045135A.
- Honsinger, V. B., 1963. Improved synchronous induction motor. German Patent No: DE1203378.
- Honsinger, V. B., 1980. Permanent magnet machines: asynchronous operation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-99(4), 1503.
- Hsiao, C.-Y., Yeh, S.-N. ve Hwang, J.-C., 2011. A Novel Cogging Torque Simulation Method for Permanent-Magnet Synchronous Machines. Energies, 4(12), 2166–2179. doi: 10.3390/en4122166.

- Huth, G. ve Fischer, R., 2015. Running up and pulling into step of PM line-start motors with surface-mounted magnets. *Electrical Engineering*, 97(1), 13–24. doi: 10.1007/s00202-014-0308-z.
- Isfahani, H. A. ve Vaez-Zadeh, S., 2009. Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. *Energy*, 34(11), 1755–1763. doi: 10.1016/j.energy.2009.04.022.
- Isfahani, A. H., Vaez-Zadeh, S. ve Rahman, M. A., 2011. Evaluation of synchronization capability in line start permanent magnet synchronous motors. 2011 IEEE International Electric Machines ve Drives Conference (IEMDC), Canada.
- Isfahani, A. H., ve Vaez-zadeh, S., 2018. Rotor resistance for improved start-up performance of line-start permanent-magnet synchronous motors. 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), California.
- Ishizaki, A. ve Yamamoto, Y., 1986. Asynchronous performance prediction of ac permanent magnet motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, EC-1(3), 101–108. doi: 10.1109/TEC.1986.4765741.
- Islam, R., Husain, I., Fardoun, A. ve McLaughlin, K., 2009. Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(1), 152–160. doi: 10.1109/TIA.2008.2009653.
- Islam, M. S., Islam, R. ve Sebastian, T., 2011. experimental verification of design techniques of permanent-magnet synchronous motors for low-torque-ripple applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), 88–95. doi: 10.1109/TIA.2010.2091612.
- Islam, R. ve Ortega, A. P., 2017. Practical aspects of implementing skew angle to reduce cogging torque for the mass-production of permanent magnet synchronous motors. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney.
- Jedryczka, C., Wojciechowski, R. M. ve Demenko, A., 2015. Influence of squirrel cage geometry on the synchronisation of the line start permanent magnet synchronous motor. *IET Science, Measurement ve Technology*, 9(2), 197–203. doi: 10.1049/iet-smt.2014.0198.
- Jedryczka, C., Knybinski, L., Demenko, A. ve Sykulski, J. K., 2018. Methodology for Cage Shape Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor Under Line Start Conditions. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1–4. doi: 10.1109/TMAG.2017.2764680.
- Jensen, F., 2012. Rotor. U.S. Patent No: US20140021821.
- Jing, L., Gong, J. ve Lin, Y., 2019. Analysis and Reduction of Cogging Torque of Line-Start Permanent Magnet Motors. *Progress In Electromagnetics Research M*, 78(December 2018), 115–124.
- Jorgensen, M. V, Albertson, B. E., Michaels, E. J. ve Turner, G. E., 1965. Synchronous induction machine. U.S. Patent No: US3210584A.
- Jung, D. S., Lim, S. Bin, Lee, J. H., Lee, S. H., Lim, H. Bin, Kim, Y. H. ve Lee, J., 2007. A study on the design and the characteristics in single-phase Line-Start Permanent magnet Motor. 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Seoul, South Korea.
- Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Hew, W. P. ve Uddin, M. N., 2013. Design and performance improvement of a line-start PMSM. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013, Denver, USA.

- Kang, G. H., Hur, J., Nam, H., Hong, J. P. ve Kim, G. T., 2003. Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(3 I), 1488–1491. doi: 10.1109/TMAG.2003.810330.
- Karnavas, Y. L. ve Korkas, C. D., 2014. Optimization methods evaluation for the design of radial flux surface PMSM. 2014 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014, Berlin, Germany.
- Kim, B. T., Kim, Y. K. ve Kim, D. J., 2003. Analysis of squirrel cage effect. Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003, Beijing, China.
- Kim, B.-T., Kim, D.-K., Kwon, B.-I. ve Lipo, T. A., 2008. Optimal skew angle for improving of start-up performance of a single-phase line-start permanent magnet motor. 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, Canada.
- Kim, B. T. ve Kwon, B. -I., 2008. Influence of space harmonics on starting performance of a single-phase line start permanent-magnet motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(12), 4668–4672. doi: 10.1109/TMAG.2008.2001484.
- Kliman, G. B., Preston, M. A. ve Jones, D. W., 1995. Rotor for permanent magnet motor. European Patent No: EP0678967A1.
- Knypiński, Ł., Nowak, L. ve Jedryczka, C., 2015. Optimization of the rotor geometry of the line-start permanent magnet synchronous motor by the use of particle swarm optimization. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 34(3), 882–892. doi: 10.1108/COMPEL-10-2014-0276.
- Knypinski, L., 2017. Application of Bat Algorithm in the optimal design of line-start permanent magnet synchronous motor. 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF), Lodz, Poland.
- Knypiński, Ł., Jedryczka, C. ve Demenko, A., 2017. Influence of the shape of squirrel-cage bars on the dimensions of permanent magnets in an optimized line-start permanent magnet synchronous motor. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 36(1), 298–308. doi: 10.1108/COMPEL-03-2016-0103.
- Kolpakhchyan, P. G., Lobov, B. N., Mikitinskiy, A. P. ve Rusakevich, I. V., 2018. The production possibility of permanent magnet high speed electric generator rotors. 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018, Novocherkassk.
- Korkmaz, S. A. ve Kürüm, H., 2013. Sonlu elemanlar yöntemi ile asenkron motor analizi ve motorun farklı kayma değerlerine göre momentinin matlab programlama dili ile hesaplanması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 4(2), 121–129.
- Kubaneck, N. ve Tanner, F., 1965. Permanentregter Aussenläufersynchronmotor. Swiss Patent No: CH446511.
- Kül, S., Bilgin, O. ve Mutluer, M., 2015. Application of finite element method to determine the performances of the line start permanent magnet synchronous motor. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2586–2591. doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.458.

- Kurihara, Kazumi, Wakui, G. ve Kubota, T., 1994. Steady-state performance analysis of permanent magnet synchronous motors including space harmonics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(3), 1306–1315. doi: 10.1109/20.297769.
- Kurihara, K. ve Rahman, M. A., 2004. High-efficiency line-start interior permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(3), 789–796. doi: 10.1109/TIA.2004.827476.
- Kurihara, Kazumi., 2012. Steady-state and transient performance analysis of permanent-magnet machines using time-stepping finite element technique. In *Finite Element Analysis - New Trends and Developments*. InTech. doi: 10.5772/48426.
- Kurihara, Kazumi, Kubota, T. ve Nitawaki, D., 2012. Rotor design for high starting performance of a self-starting single-phase permanent-magnet motor. *Przełąd Elektrotechniczny*, R. 88(NR 7b), 5–8.
- Lawrenson, P. J. ve Agu, L. A., 1964. Theory and performance of polyphase reluctance machines. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 111(8), 1435. doi: 10.1049/piee.1964.0237.
- Łebkowski, A., 2017. A way of neodymium-iron-boron magnets regeneration in surface-mounted PMSM used in electric vehicles. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 65(5), 751–758. doi: 10.1515/bpasts-2017-0081.
- Lee, J.-J., Rhyu, S.-H., Jung, I.-S. ve Kim, Y.-W., 2016a. Design of high efficiency line start permanent magnet motor for submersible pumps. *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, Italy.
- Lee, W.-S., Kang, M.-C., Kim, G.-T., Shin, H.-K. ve Kim, C.-J., 2016b. Optimal design for characteristics improvement of single phase line-start permanent magnet synchronous motor. *19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, Japan.
- Li, J. T., Liu, Z. J., Jabbar, M. A. ve Gao, X. K., 2004. Design optimization for cogging torque minimization using response surface methodology, *IEEE Transactions on Magnetics* (Vol. 40, pp. 1176–1179). doi: 10.1109/TMAG.2004.824809.
- Lim, S. P., Tseng, K. J. ve Member, S., 1999. Dynamic model of interior permanent magnet motor with skewed stator slots. *25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'99)*, San Jose.
- Lin, Q. ve Mi, X., 2010. Sine-wave current line-start three-phase rare-earth permanent magnet synchronous motor. U.S. Patent No: US2012146446A1.
- Linkous, C. E., 1960. Rotor for use in a synchronous induction motor. U. S. Patent No: US3113230A.
- Liu, G., Zhang, F., Wei, H., ve Bian, X., 2013. Structure design and dynamics analysis on high speed claw pole machine with outer permanent magnet rotor. *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Busan.
- Liu, J. C.-C. ve Wagner, P. D., 1982. Permanent-magnet excited rotor for a synchronous machine. European Patent No: EP0072460A1.
- Liu, J. C., Wagner, P. D. ve Keuper, J. J., 1982. Two-pole permanent magnet synchronous motor rotor. U.S. Patent No: US4358697A.
- Lu, Q., Huang, X., Ye, Y. ve Fang, Y., 2012. Experiment and analysis of high power line-start PM motor. *Przełąd Elektrotechniczny*, 88(2), 274–277. doi: 10.1.1.889.9473.
- Lu, W., Liu, M., Luo, Y. ve Liu, Y., 2011. Influencing factors on the demagnetization of line-start permanent magnet synchronous motor during its starting process.

- International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2011, Beijing, China.
- Lu, X., Iyer, K. L. V., Mukherjee, K. ve Kar, N. C., 2012. Study and detection of demagnetization in line start permanent magnet synchronous machines using artificial neural network. 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Sapporo, Japan.
- Lu, X., Iyer, K. L. V., Mukherjee K. and Kar, N. C., 2013a. A novel two-axis theory-based experimental approach towards determination of magnetization characteristics of line-start permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(8), 4733–4737. doi: 10.1109/TMAG.2013.2259152.
- Lu, X., Iyer, K. L. V., Mukherjee K. and Kar, N. C., 2013b. Development of a novel magnetic circuit model for design of premium efficiency three-phase line start permanent magnet machines with improved starting performance. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(7), 3965–3968. doi: 10.1109/TMAG.2013.2242869.
- Lu, W., Zhao, H. ve Liu, S., 2014. Demagnetization conditions comparison for line-start permanent magnet synchronous motors. 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) , Hangzhou.
- Lukaniszyn, M., Jagiela, M., Wróbel, R. ve Latawiec, K., 2004. 2D harmonic analysis of the cogging torque in synchronous permanent magnet machines. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 23(3), 774–782. doi: 10.1108/03321640410540719.
- Lyskawinski, W., Jedryczka, C. ve Szlag, W., 2017. Influence of magnet and cage shape on properties of the line start synchronous motor with powder hybrid rotor. *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Naleczow, Poland.
- Madurga, J. B. ve González, A. D., 2002. Modelling of permanent magnet synchronous motors with spatial harmonics. *European Transactions on Electrical Power*, 12(5), 369–375. doi: 10.1002/etep.4450120508.
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Rahim, N. A. ve Hew, W. P., 2013. Design, analysis, and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(4), 1479–1492. doi: 10.1109/TMAG.2012.2228213.
- Maraaba, L.S.; Al-Hamouz, Z.M.; Milhem, A.S.; Twaha, S., 2019. Comprehensive Parameters Identification and Dynamic Model Validation of Interior-Mount Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors. *Machines* 2019, Vol. 7, Page 4, 7(1), 4. doi: 10.3390/MACHINES7010004.
- McClay, C. I. ve Knight, A. M., 2000. The design of high-efficiency line-start motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(6), 1555–1562. doi: 10.1109/28.887206.
- McElveen, R., Melfi, M. ve Daugherty, R., 2014. Line start permanent magnet motors - starting, standards and application guidelines. *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, San Francisco.
- McElveen, R. F. ve Budzynski, R. J., 2014. End Ring and Rotor Bar for Line Start Permanent Magnet Motor. U.S. Patent No: US20150303747A1.
- McElveen, R. F., Holub, R. ve Martin, W. E., 2017. Replacing induction motors with caged rotor permanent magnet motors: application considerations veamp; cost

- analysis. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC) , Calgary, Canada.
- Melfi, M., Schiferl, R. ve Umans, S., 2015a. Asymmetric rotor for a line start permanent magnet machine. WIPO Patent No: WO2015171485A1.
- Melfi, M., Schiferl, R., Umans, S., Mcelveen, R. F. ve Martin, W. E., 2015b. Lamination for a permanent magnet machine. WIPO Patent No: WO2015171486.
- Mergen, F. ve Kocabaş, D. A., 2007. Elektrik Makinalarında Sargılar (1. Baskı). Birsen Yayınevi, 304 s, İstanbul.
- Merrill, F. W., 1955. Permanent magnet excited synchronous motors. *Electrical Engineering*, 74(2), 143–143. doi: 10.1109/EE.1955.6439788.
- Merrill, F. W., 1960. Rotors for permanent magnet type synchronous motors. U.S. Patent No: US2927229A.
- Miller, T. J. E., 1984. Synchronization of Line-Start Permanent-Magnet AC Motors. *IEEE Power Engineering Review*, PER-4(7), 57–58. doi: 10.1109/MPER.1984.5525902.
- Mingardi, D., Bianchi, N. ve Dai Pre, M., 2016. Geometry of line start synchronous motors suitable for various pole combinations. XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland.
- Mingardi, D. ve Bianchi, N., 2017. Line-Start PM-Assisted Synchronous Motor Design, Optimization, and Tests. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9739–9747. doi: 10.1109/TIE.2017.2711557.
- Miyashita, K., Yamashita, S., Watanabe, H. ve Tanabe, S., 1983. Permanent magnet rotor. U.S. Patent No: US4403161A.
- Moreels, D. ve Leijnen, P., 2018. High Efficiency Axial Flux Machines - Why Axial Flux Motor and Generator Technology Will Drive the Next Generation of Electric Machines. www.magnax.com (10.02.2019).
- Morrill, W. J. ve Pringle, W. A., 1933. Synchronous induction motor. U.S. Patent No: US1915069A.
- Mutluer, M., 2018. A fuzzy-genetic based design of permanent magnet synchronous motor. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 6(4), 275–281. doi: 10.18201/ijisae.2018648453.
- Mutluer, M., ve Bilgin, O., 2012. Application of Genetic Algorithm In Design Synchronous Motor. *Journal of Life Sciences*, 1(2), 18–20.
- Nam, H. ve Eum, S.-J., 2008. Motor and the compressor including the same. U.S. Patent No: US20100187935.
- Ogbuka, C. U., Nwosu, C. M. ve Agu, M. U., 2016. Performance Comparison of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors with Interior and Surface Rotor Magnets. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(4). doi: 10.17485/ijst/2016/v9i4/72038.
- Osheba, S. M. ve Abdel-Kader, F. M., 1991. Performance analysis of permanent magnet synchronous motors. II. Operation from variable source and transient characteristics. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6(1), 83–89. doi: 10.1109/60.73793.
- Ostovic, V., 1987. Computation of saturated permanent-magnet ac motor performance by means of magnetic circuits. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-23(5), 836–841. doi: 10.1109/TIA.1987.4504992.

- Patterson, D. J., Colton, J. L., Mularcik, B., Kennedy, B. J., Camilleri, S. ve Rohoza, R., 2009. A comparison of radial and axial flux structures in electrical machines. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami.
- Pecho, J. ve Hofmann, W., 2018. Analysis of start-up of line-start permanent magnet synchronous machines with anisotropic rotor reluctance. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece.
- Pina Ortega, A. J. ve Xu, L., 2017. Investigation of effects of asymmetries on the performance of permanent magnet synchronous machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 32(3), 1002–1011. doi: 10.1109/TEC.2017.2684165.
- Popescu, M., Miller, T. J. E., McGilp, M. I., Strappazon, G., Trivillin, N. ve Santarossa, R., 2003. Line-start permanent-magnet motor: single-phase starting performance analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, 39(4), 1021–1030. doi: 10.1109/TIA.2003.813745.
- Popescu, M., Miller, T. J. E., McGilp, M., Kalluf, F. J., da Silva, C. ve von Dokonal, L., 2005. Effect of winding harmonics on the asynchronous torque of a single-phase line-start permanent-magnet motor. Fourtieth IAS Annual Meeting, Industry Applications Conference, Kowloon, Hong Kong.
- Popescu, M., Miller, T. J. E., McGilp, M., Strappazon, G., Trivillin, N. ve Santarossa, R., 2005. Asynchronous performance analysis of a single-phase capacitor-start, capacitor-run permanent magnet motor. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(1), 142–150. doi: 10.1109/TEC.2004.837307.
- Popescu, M. , Miller, T. J. E. , McGilp, M. I. , Strappazon, G. , Trivillin, N. ve Santarossa, R., 2006. Torque behavior of one-phase permanent-magnet AC motor. IEEE Transactions on Energy Conversion, 21(1), 19–26. doi: 10.1109/TEC.2005.845450.
- Puranen, J., 2006. Induction Motor Versus Permanent Magnet Synchronous Motor in Motion Control Applications : A Comparative Study. Lappeenranta University, Lappeenranta.
<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31238/tmp.objres.448.pdf?sequence=1> (17.03.2019).
- Pyrhnen, J., Jokinen, T. ve Hrabovcov, V., 2008. Design of Rotating Electrical Machines., John Wiley and Sons, 584 p, Chichester UK.
- Rabbi, S. F. ve Rahman, M. A., 2013. Determination of the synchronization criteria of line start IPM motors. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013, Chicago.
- Rahim, N. A., Ping, H. W. ve Tadjuddin, M., 2007. Design of axial flux permanent magnet brushless dc motor for direct drive of electric vehicle. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa.
- Rahman, M. A. ve Little, T. A., 1984. Dynamic Performance analysis of permanent magnet synchronous motors. IEEE Power Engineering Review, PER-4(6), 40–40. doi: 10.1109/MPER.1984.5526098.
- Rahman, M. A. ve Osheiba, A. M., 1990. Performance of large line-start permanent magnet synchronous motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 5(1), 211–217. doi: 10.1109/60.50833.
- Rahman, M. A., Osheiba, A. M. ve Radwan, T. S., 1997. Synchronization process of line-start permanent magnet synchronous motors. Electric Machines and Power Systems, 25(6), 577–592. doi: 10.1080/07313569708955761.

- Ray, G. ve Gollhardt, J. B., 1982. Permanent magnet motor armature. U.S. Patent No: US4322648A.
- Rhyu, S., Seo, J., Kim, Y., Lee, J. ve Jung, I., 2012. Rotor including permanent magnets having different thicknesses and motor including same. WIPO Patent No: WO2013085231.
- Richter, E. ve Neumann, T. W., 1984. Line start permanent magnet motors with different materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-20(5), 1762–1764. doi: 10.1109/TMAG.1984.1063427.
- Richter, E., Miller, T. J. E., Neumann, T. W. ve Hudson, T. L., 1985. The Ferrite Permanent Magnet AC Motor---A Technical and Economical Assessment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-21(3), 644–650. doi: 10.1109/TIA.1985.349721.
- Riemer, B., Leßmann, M. ve Hameyer, K., 2010. Rotor design of a high-speed Permanent Magnet Synchronous Machine rating 100,000 rpm at 10kW. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings, Atlanta.
- Roensch, S., 2013. Finite Element Analysis: Post-processing. <http://www.finiteelement.com/feawhite4.html> (28.03.2019)
- Rosenberg, H., 1968. Permanent magnet excited electric machine. U. S. Patent No: US411027
- Ruba, M., Jurca, F., Czumbil, L., Micu, D. D., Martis, C., Polycarpou, A. ve Rizzo, R., 2018. Synchronous reluctance machine geometry optimisation through a genetic algorithm based technique. *IET Electric Power Applications*, 12(3), 431–438. doi: 10.1049/iet-epa.2017.0455.
- Saban, D. M., Stephen, C. M. ve Kliman, G. B., 2000. Rotors utilizing stepped skew. China Patent No: CN1307742A.
- Saha, S. ve Cho, Y., 2015. Starting characteristic analysis of LSPM for pumping system considering demagnetization. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9(7), 1289–1295. doi: 10.5281/zenodo.1108186.
- Sarani, E. ve Vaez-Zadeh, S., 2017. Design procedure and optimal guidelines for overall enhancement of steady-state and transient performances of line start permanent magnet motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(3), 885–894. doi: 10.1109/TEC.2017.2694485.
- Schiethart, L., 1971. Synchronous electric motor. U.S. Patent No: US3614496A.
- Shahat, A. ve Shewy, H., 2010. Permanent magnet synchronous motor dynamic modeling with genetic algorithm performance improvement. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(2), 93–106. doi: 10.4314/ijest.v2i2.59152.
- Shamlou, S. ve Mirsalim, M., 2013. Design, optimisation, analysis and experimental verification of a new line-start permanent magnet synchronous shaded-pole motor. *IET Electric Power Applications*, 7(1), 16–26. doi: 10.1049/iet-epa.2012.0064.
- Shen, J. X., Li, P., Jin, M. J. ve Yang, G., 2013. Investigation and countermeasures for demagnetization in line start permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(7), 4068–4071. doi: 10.1109/TMAG.2013.2244582.
- Sheth, N. K., Sekharbabu, A. R. C. ve Rajagopal, K. R., 2006). Torque ripple minimization in a doubly salient permanent magnet motors by skewing the rotor

- teeth. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304(1), e371–e373. doi: 10.1016/J.JMMM.2006.02.073.
- Shin, N.-C., 2006. Rotor assembly for use in line start permanent magnet synchronous motor. U.S. Patent No: US20070138894.
- Singal, R. K., Williams, K. ve Verma, S. P., 1992. Theoretical and experimental study of vibrational behaviour of laminated stators of electrical machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 6(6), 535–549. doi: 10.1016/0888-3270(92)90048-N.
- Smith, D. J. B., Mecrow, B. C., Atkinson, G. J., Jack, A. G. ve Mehna, A. A. A., 2010. Shear stress concentrations in permanent magnet rotor sleeves. 19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Italy.
- Son, S. G., 2006. Rotor assembly for use in line start permanent magnet synchronous motor. U.S. Patent No: US20070138893.
- Sooriyakumar, G., 2010, Design optimisation for permanent magnet synchronous motors using genetic algorithm. 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, Wales.
- Sorgdrager, A J., 2014, Development of a line-start permanent-magnet synchronous machine. North-West University, Potchefstroom.
- Sorgdrager, Albert J., Wang, R.-J. ve Grobler, A. J., 2017. Design optimization of a line-start PMSM considering transient and steady-state performance objectives. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati.
- Sorgdrager, Albert Johan, Wang, R.-J. ve Grobler, A. J., 2018. Multiobjective Design of a Line-Start PM Motor Using the Taguchi Method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 4167–4176. doi: 10.1109/TIA.2018.2834306.
- Soulard, J. ve Nee, H.-P., 2000. Study of the synchronization of line-start permanent magnet synchronous motors. *IEEE Industry Applications Conference - Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy*, Rome, Italy.
- Steen, C. R., 1979. Direct axis aiding permanent magnets for a laminated synchronous motor rotor. U.S. Patent No: US4139790.
- Stephens, C. M., Kliman, G. B. ve Boyd, J., 1998. A line-start permanent magnet motor with gentle starting behavior. *IEEE Industry Applications Conference - Thirty-Third IAS Annual Meeting*, St. Louis.
- Stoia, D., Antonoaie, M., Ilea, D. ve Cernat, M., 2007. Design of line start PM motors with high power factor. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Setubal, Portugal.
- Stoia, D., Cernat, M., Hameyer, K. ve Ban, D., 2009. Line-start permanent magnet synchronous motors, analysis and design. *International Conference on Electric Drives and Power Electronics (EDPE 2009)*. Dubrovnik, Croatia.
- Stoia, D., Cernat, M. ve Ilea, D., 2009. Educational bench of line-start permanent magnet synchronous motors part I: Operating point of permanent magnet. 4th International Conference on Interdisciplinarity in Education, Vilnius, Lithuania.
- Stoia, D., Chirilă, O., Cernat, M., Hameyer, K. ve Ban, D., 2010. The behaviour of the LSPMSM in asynchronous operation. *EPE-PEMC 2010 - 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Ohrid, Macedonia.
- Stumberger, B., Marcic, T. ve Hadziselimovic, M., 2012. Direct comparison of induction motor and line-start IPM synchronous motor characteristics for semi-hermetic

- compressor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(6), 2310–2321. doi: 10.1109/TIA.2012.2227094.
- Takahashi, A., Kikuchi, S., Miyata, K. ve Binder, A., 2015. Asynchronous torque of line-starting permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(2), 498–506. doi: 10.1109/TEC.2014.2361836.
- Takahashi, A., Kikuchi, S., Miyata, K., Wakui, S., Mikami, H., Ide, K. ve Binder, A., 2010. Dynamic and steady-state performance of line-starting permanent magnet motors. XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, Italy.
- Tang, X. ve Wang, X., 2014a. Calculation of magnets' average operating point during the starting process of line-start permanent magnet synchronous motor. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, China.
- Tang, X. ve Wang, X., 2014b. Research of the demagnetization mechanism of line-start permanent magnet synchronous motor under operating condition of sudden reversal. 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2014. Hangzhou, China.
- Tang, X., Wang, X., Li, G. ve Tian, M., 2016. Demagnetization study of line-start permanent magnet synchronous motor under out-of-step and supersynchronous faults. 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Hefei, China.
- Tarimer, I., 2009. Investigation of the effects of rotor pole geometry and permanent magnet to line start permanent magnet synchronous motor's efficiency. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 2(90), 67–72.
- Tekkalmaz, T., Ayvazoğlu, C. ve Albaş, G.Ç., 2010. Bir elektrik motoru. Türkiye Patent No: 2010 05175.
- Tikhonova, O., Malygin, I., Beraya, R., Sokolov, N. ve Plastun, A., 2019. Loss calculation of induction motor with ring windings by “ANSYS MAXWELL.” <http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/62620/1/apeet-2017-12.pdf> (09.05.2019)
- Tikhonova, O. V. ve Plastun, A. T., 2018. Electromagnetic calculation of induction motor by “ANSYS Maxwell”. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow.
- Topaloglu, I., Mamur, H., Korkmaz, F. ve Cakir, M. F., 2014. Design and optimization of surface mounted line start permanent magnet synchronous motor using electromagnetic design tool. International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Milwaukee.
- Tsuneo Takegami, Tsuboi, K., Hasegawa, M., Hirotsuka, I. ve Nakamura, M., 2010. Calculation method for asynchronous starting characteristics of line-start permanent magnet synchronous motor. International Conference on Electrical Machines and Systems, Incheon, South Korea.
- Ugale, R. T. ve Chaudhari, B. N., 2017. Rotor configurations for improved starting and synchronous performance of line start permanent-magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), 138–148. doi: 10.1109/TIE.2016.2606587.
- Ugale, R. T., Nagabhushanrao, V., Chaudhari, B. N. ve Bhasme, N. R., 2008. Behavior of line start permanent magnet synchronous motor under short interruptions. International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference. New Delhi.

- Ugale, R. T., Singh, G., Baka, S. ve Chaudhari, B. N., 2009. Effective energy conservation for the agricultural sector using line start permanent magnet synchronous motors. TENCON 2009 - IEEE Region 10 Conference, Singapore.
- Ugale, Rajaram T., Chaudhari, B. N., Baka, S. ve Pramanik, A., 2014. A hybrid interior rotor high-performance line start permanent magnet synchronous motor. *Electric Power Components and Systems*, 42(9), 901–913. doi: 10.1080/15325008.2014.903539.
- Ustun, O., Bayram, D., Durak, B. ve Kivanc, O. C., 2017. Comparison of different line start interior permanent magnet synchronous motor types with respect to IE4 efficiency class. 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, Lodz, Poland.
- Ünal, M. S., 2011. Doğal Kaynaklardan ve Atık Malzemelerden Stronsiyum Ferrit Mıknatıs Üretimi. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/Üretim Metalurjisi Ve Teknolojileri Mühendisliği, İstanbul.
- Ünlükaya, E., Yetgin, A. G., Çanakoğlu, A. İ. ve Turan, M., 2014. Rotor oluk şekillerinin asenkron motor performansına etkileri. Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa
- Volkrodt, W., 1973a. Dauermagneterregte Elektrische Maschine. German Patent No: DE2142466.
- Volkrodt, W., 1973b. Individual drive for textile machine spinning spindle. Retrieved from U.S. Patent No: US3742268.
- Williford, J. V., 1960. Electric motor. U.S. Patent No: US2939025A.
- Wymeersch, B., De Belie, F., Rasmussen, C. B. ve Vandeveld, L., 2018a. The Effect of Design Considerations on the Synchronization Capability Limits of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motors. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM) , Alexandroupoli, Greece.
- Wymeersch, B.; De Belie, F.; Rasmussen, C.B.; Vandeveld, L., 2018b. Classification method to define synchronization capability limits of line-start permanent-magnet motor using mesh-based magnetic equivalent circuit computation results. *Energies*, 11(4), 998. doi: 10.3390/en11040998.
- Xiaochen, Z., Shukang, C. ve Weili, L., 2008. Development of line-start PMSM with solid rotor for electric vehicles. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008, Harbin, China.
- Yamashita, S., Miyashita, K., Tanabe, S. ve Shimotsu, T., 1984. U.S. Patent No: US4454438A.
- Yan, B., Wang, X. ve Yang, Y., 2018a. Comparative parameters investigation of composite solid rotor applied to line-start permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1–5. doi: 10.1109/TMAG.2018.2844550.
- Yan, B., Wang, X. ve Yang, Y., 2018b. Starting Performance Improvement of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Composite Solid Rotor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1–4. doi: 10.1109/TMAG.2017.2753238.
- Yan, B., Wang, X. ve Yang, Y., 2019. Parameters determination and dynamic modelling of line-start permanent-magnet synchronous motor with a composite solid rotor. *IET Electric Power Applications*, 13(1), 17–23. doi: 10.1049/iet-epa.2018.5064.

- Yang, G., Shen, J. ve Wang, Y., 2008. Optimal design and experimental verification of a line-start permanent magnet synchronous motor. International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China.
- Yates, W. W., 1970. Permanent magnet rotor. U.S. Patent No: US3492520A.
- Yoshida, K. ve Weh, H., 1985. A method of modeling permanent magnets for analytical approach to electrical machinery. Archiv Für Elektrotechnik, 68(4), 229–239. doi: 10.1007/BF01845934.
- Zarko, D., Ban, D. ve Lipo, T. A., 2008. Analytical solution for cogging torque in surface permanent-magnet motors using conformal mapping. IEEE Transactions on Magnetics, 44(1), 52–65. doi: 10.1109/TMAG.2007.908652.
- Zawilak, T. ve Gwozdziejewicz, M., 2011. Limitation of higher harmonics in line start permanent magnet synchronous motor by star-delta mixed stator winding. IET 8th International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2011), Wrocław, Poland.
- Zawilak, T. ve Gwozdziejewicz, M., 2018. Demagnetization Process in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor. International Symposium on Electrical Machines (SME), Andrychów, Poland.
- Zawilak, T. ve Zawilak, J., 2009. Minimization of higher harmonics in line-start permanent magnet synchronous motor. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 63(29), 107–155.
- Zhou, P., Rahman, M. A. ve Jabbar, M. A., 1994. Field circuit analysis of permanent magnet synchronous motors. IEEE Transactions on Magnetics, 30(4), 1350–1359. doi: 10.1109/20.305531.
- Zhu, Z. Q. Q. ve Howe, D., 2000. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 15(4), 407–412. doi: 10.1109/60.900501.
- Zöhra, B. ve Akar, M., 2016. Matlab grafik arayüzü kullanılarak 3 fazlı asenkron motorların analitik modellenmesi. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Adana.
- Zöhra, B., Akar, M. ve Eker, M., 2018. Design of A Novel line start synchronous motor rotor. Electronics, 8(1), 25. doi: 10.3390/electronics8010025.

7. EKLER

7.1. EK-1: M330-50A Karakteristik Özellikleri

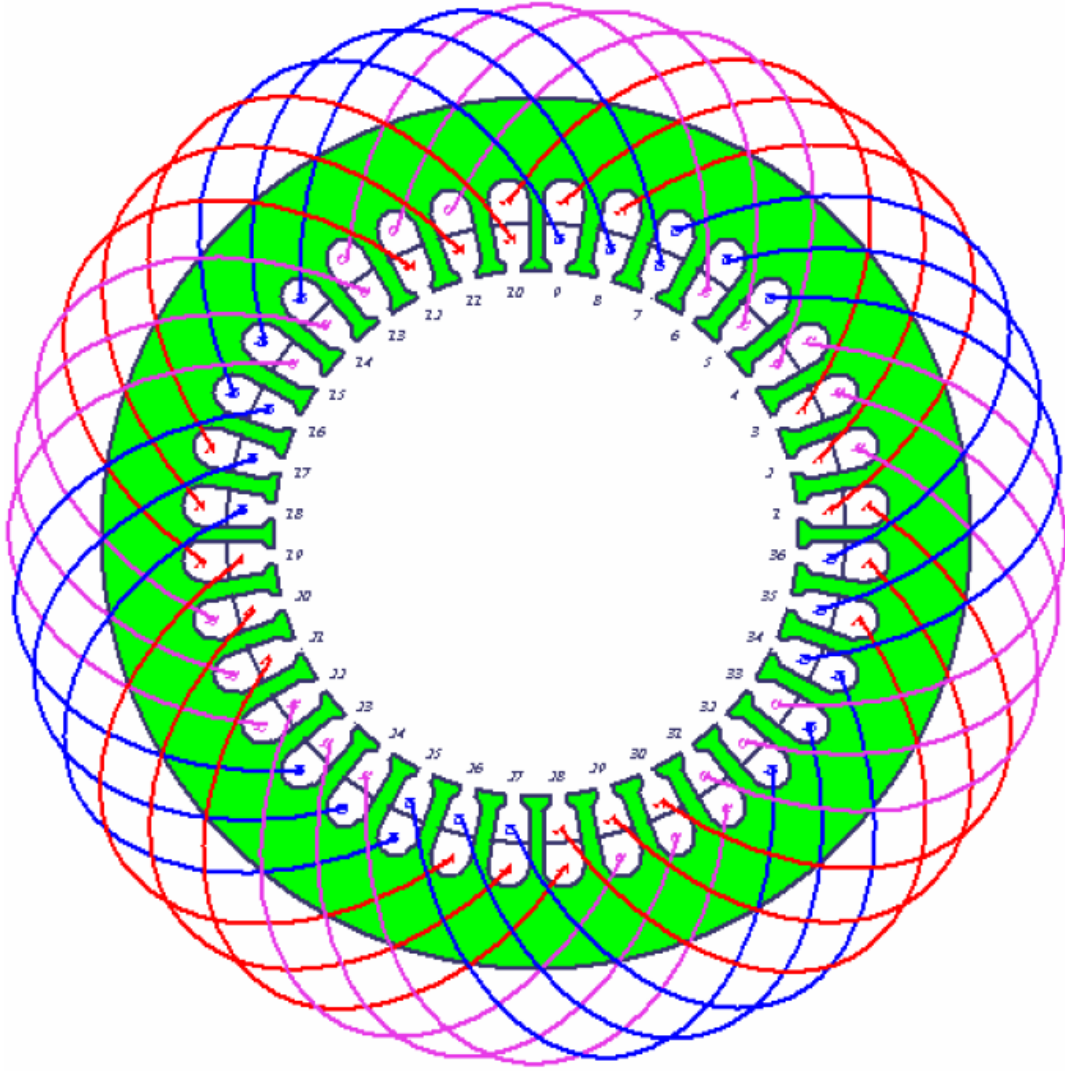
T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,03	0,07	27,7	0,05	0,13	0,34	1,64	6,55
0,2	0,09	0,19	36,4	0,20	0,49	1,36	5,71	22,7
0,3	0,18	0,34	42,4	0,43	1,06	2,84	11,7	47,8
0,4	0,28	0,51	47,8	0,71	1,78	4,77	19,7	82,9
0,5	0,41	0,70	52,9	1,04	2,65	7,18	30,1	130
0,6	0,55	0,93	58,3	1,42	3,66	10,1	43,1	194
0,7	0,71	1,20	64,1	1,84	4,83	13,6	59,2	281
0,8	0,89	1,50	71,0	2,32	6,17	17,7	78,2	392
0,9	1,08	1,86	79,7	2,85	7,69	22,5	103	529
1,0	1,29	2,30	91,8	3,43	9,42	28,1	132	697
1,1	1,53	2,86	110	4,08	11,4	34,6	166	
1,2	1,81	3,65	140	4,81	13,6	42,0		
1,3	2,12	5,00	205	5,63	16,0	50,2		
1,4	2,56	8,27	399	6,60	18,7	59,3		
1,5	3,03	19,9	1097	7,71	21,8	69,6		
1,6	3,49	54,7	2925					
1,7	3,84	124	6118					
1,8	4,15	239	10828					

T	W/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	A/m at 100 Hz	A/m at 200 Hz	A/m at 400 Hz	A/m at 1000 Hz	A/m at 2500 Hz
0,1	0,03	27,7	27,9	28,8	34,0	54,7	83
0,2	0,09	36,4	39,0	43,7	54,7	89,3	139
0,3	0,18	42,4	47,4	55,4	71,4	118	194
0,4	0,28	47,8	54,7	66,0	86,8	149	258
0,5	0,41	52,9	61,6	76,2	103	184	336
0,6	0,55	58,3	68,6	86,8	121	225	427
0,7	0,71	64,1	75,8	98,3	141	270	536
0,8	0,89	71,0	83,4	111	163	322	663
0,9	1,08	79,7	91,8	124	187	380	808
1,0	1,29	91,8	101	139	215	447	969
1,1	1,53	110	115	155	246	522	1147
1,2	1,81	140	145	173	280		
1,3	2,12	205	209	210	319		
1,4	2,56	399	404	397	398		
1,5	3,03	1097	1093	1066	1070		
1,6	3,49	2925					
1,7	3,84	6118					
1,8	4,15	10828					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,03
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,29
Anisotropy of loss, %	10
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,57
H = 5000 A/m, T	1,66
H = 10000 A/m, T	1,77
Coercivity (DC), A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42
Yield strength, N/mm ²	315
Tensile strength, N/mm ²	455
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HV5 (VPN)	155



7.2. Ek-2: Stator sarım şeması



7.3. Patent başvurusu

Başvuru Bilgileri		
Başvuru Numarası : 2017/21249	Evrak Numarası : 2017-GE-539782	Tescil Numarası :
Başvuru Tarihi : 2017/12/22	Evrak Tarihi : 2017/12/22	Tescil Tarihi :
Başvuru Şekli : Ulusal Başvuru	Koruma Tipi : Patent	Yayın Tarihi :
Başvuru Sahipleri		Buluşun Tasnif Sınıfları
Berkan Zöhra Mehmet Akar		H02K 1/27
Buluş Sahipleri		
Berkan Zöhra Mehmet Akar		
Buluş Başlığı		
Şebeke Kalkışlı Radyal Akıllı Senkron Motor		
Buluş Özeti		
<p>Bu buluş, yol almada asenkron olarak çalışan, kalkış sonrası sürekli rejimde senkron olarak çalışan, gelişmiş bir rotor yapısına sahip, yüksek verimli hibrit tipte bir stator, bir rotor ve bir şaft ana elemanlarına sahip bir elektrik motoru ile ilgilidir. Buluş yapısında, rotor yüzeyine dizilmiş sabit mıknatıslar ve sabit mıknatıs olmayan kısımlarında rotor yüzeyine yakın, sabit mıknatıs yer alan kısımlarda ise sabit mıknatısın arkasına konumlandırılmıştır kısa devre çubukları bulunan bir rotor topolojisine sahiptir. Sunulan bu gelişmiş rotor yapısı, rotor dış çapı ve stator iç çapının uyumlu olması neticesinde, standart bir asenkron motoru statoru ile uyumlu çalışabilir niteliktedir.</p>		

8. ÖZGEÇMİŞ



E-Posta : berkan.zohra@amasya.edu.tr
Telefon : 358 513 5103-2774
Faks : 358 513 5104

Öğrenim Bilgisi

Doktora	2014	TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ/MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ (DR)
		Tez adı: Şebeke kalkışlı radyal akıllı sabit mıknatıslı senkron motor tasarımı ve prototip üretimi Tez Danışmanı:(DOÇ. DR. MEHMET AKAR)
Lisans	2014 2016	GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ/MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ/MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ PR
Yüksek Lisans	2009 2011	MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ/MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ (YL) (TEZLİ)
		Tez adı: Aşağı-yukarı hareketli dalga enerjisi konvertörü modelleme ve kontrol uygulaması (Frog - Form 2) Tez Danışmanı:(DOÇ. DR. HAKAN YAVUZ)
Lisans	2004 2008	MARMARA ÜNİVERSİTESİ TEKNİK EĞİTİM FAKÜLTESİ/MEKATRONİK EĞİTİMİ BÖLÜMÜ/MEKATRONİK ÖĞRETMENLİĞİ PR.

Görevler

ÖĞRETİM GÖREVLİSİ	2011	AMASYA ÜNİVERSİTESİ/MERZİFON MESLEK YÜKSEKOKULU/ELEKTRONİK VE OTOMASYON BÖLÜMÜ)
-------------------	------	---

Proje Görevleri

BURSIYER		108M098 - Salımlı tip dalga enerjisi konvertörleri için kontrol sistemi tasarımı ve geliştirilmesi, TÜBİTAK PROJESİ, (ULUSAL)
----------	--	--

Ödüller

		Patentle Türkiye- I. Ulusal Üniversiteler Patent Yarışması, BİLİM SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI, 2018
--	--	--

Verilen Dersler (Son üç yıl)

Yıl	Ders Adı	Öğrenim Dili	Ders Saati
2018-2019	Hidrolik ve Pnömatik	Türkçe	4
	Kontrol Sistemleri	Türkçe	3
	Algılayıcılar ve Dönüştürücüler	Türkçe	3
	SCADA sistemleri	Türkçe	2
	Mekanizmalar	Türkçe	2
	Elektrik Motorları	Türkçe	4
	Endüstriyel Robotlar	Türkçe	2
	Malzeme Teknolojisi	Türkçe	2
2017-2018	Elektrik Motorları	Türkçe	4
	Kontrol Sistemleri	Türkçe	3
	Mekanizmalar	Türkçe	2
	Algılayıcılar ve Dönüştürücüler	Türkçe	3
	Endüstriyel Robotlar	Türkçe	2
	Hidrolik ve Pnömatik	Türkçe	4
	SCADA sistemleri	Türkçe	2
	2016-2017	Teknik ve Meslek Resmî	Türkçe
Hidrolik ve Pnömatik		Türkçe	4
Mekanizmalar		Türkçe	2
Algılayıcılar ve Dönüştürücüler		Türkçe	3
Malzeme Teknolojisi		Türkçe	2

Eserler

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. ZÖHRA BERKAN, AKAR MEHMET, EKER MUSTAFA (2019). Design of A Novel Line Start Synchronous Motor Rotor. Electronics, 8(1), doi:10.3390/electronics8010025.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler :

1. ZÖHRA BERKAN, AKAR MEHMET (2017). RA-SMSM Tasarımı ve Mevcut Topolojilerin Karşılaştırılması. Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar ve Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu ISMSIT 2017 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3633590)

2. ZÖHRA BERKAN, AKAR MEHMET (2016). MATLAB Grafik Arayüzü Kullanılarak 3 Fazlı Asenkron Motorların Analitik Modellenmesi. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), 6501-3659. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2887770)