

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK MOMENT DALGALANMASINA SAHİP YÜKSEK VERİMLİ
TEK STATOR TEK ROTORLU EKSENEL AKILI ASENKRON
MOTOR TASARIMI

Fatma KESKİN ARABUL

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman
Prof. Dr. İbrahim ŞENOL

Aralık, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK MOMENT DALGALANMASINA SAHİP YÜKSEK VERİMLİ TEK
STATOR TEK ROTORLU EKSENEL AKILI ASENKRON MOTOR
TASARIMI**

Fatma KESKİN ARABUL tarafından hazırlanan tez çalışması 03.12.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. K. Nur BEKİROĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Derya Ahmet KOCABAŞ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yasemin ÖNER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erhan BÜTÜN, Üye
İstanbul Ayyansaray Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. İbrahim ŞENOL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Düşük Moment Dalgalanmasına Sahip Yüksek Verimli Tek Stator Tek Rotorlu Eksenel Akılı Asenkron Motor Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fatma KESKİN ARABUL

İmza



Alya Naz'ima

TEŞEKKÜR

Tüm akademik hayatım boyunca bana yol gösteren, yönlendiren, her durumda benden desteğini esirgemeyen ve motive eden, kendisiyle çalışmaktan her zaman büyük onur duyduğum danışman hocam, Sayın Prof. Dr. İbrahim ŞENOL'a her zaman elini omzumda hissettirdiği için minnettarlığımı sunarım.

Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimim boyunca, gerek değerli bilgi birikimi gerekse manevi olarak her zaman desteğini gördüğüm, bana bir hocadan fazlası olduğu için hocam, Sayın Prof. Dr. K. Nur BEKİROĞLU'na, tez sürecim boyunca değerli katkılarından ötürü çok teşekkür ederim.

Yine Lisans eğitimimden bu yana, kendisinden çok şey öğrendiğim, bana hem bir abla olan hem de akademik olarak destek olan, bana makine tasarımı sevdiren hocam, Sayın Doç. Dr. Yasemin ÖNER'e destekleri ve tez çalışmam boyunca bana yol gösterdiği için çok teşekkür ederim.

Tez sürecim boyunca Tez İzleme Komitesi'nde olan, tezimin kritik aşamalarında yol göstericiliği ve değerli katkılarından ötürü Sayın Dr. Öğr. Üyesi Derya Ahmet KOCABAŞ'a ve tez savunmamdaki değerli katkılarından ötürü hocam, Prof. Dr. Erhan BÜTÜN'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca desteklerini ve dostluklarını esirgemeyen, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Celal Fadıl KUMRU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YAŞA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Yiğit ARABUL'a, hayatımın her döneminde yanımda olduğu ve olacağı için, bana bir eşten fazlası olduğu için, çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu sabrı ve sonsuz sevgisi için, kızıma olunabilecek en iyi baba olduğu için ve bugünlere gelirken bana her zaman yol gösterip, elimden hep tuttuğu için sonsuz sevgi, saygı ve minnettarlığımı sunarım.

Her zaman bir kale gibi dimdik arkamda olan canım babacığım Hasan KESKİN'e, tüm hayatım boyunca her zaman ve her durumda bana destek olan canım anneciğım Fahriye KESKİN'e, sevgileri ile beni sardıkları ve benim için yaptıkları her bir fedakarlık için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yine bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, sevgilerini her zaman hissettiren, canım anneanneciğım Nazmiye KIRMIZI ve canım dedeciğım Ali KIRMIZI'ya, eğitim hayatımın dönüm noktalarında yanımda olan, bana destek ve değer veren canım teyzelerim Nafia ve Nurcan KIRMIZI'ya bir değil pek çok kez teşekkür ederim.

Sevgili kayınvalidem Zeynep ARABUL ve kayınpederim Tuncer ARABUL'a, ilk andan beri beni de kendi evlatları gibi benimsedikleri ve her konuda beni destekledikleri için çok teşekkür ederim.

Canım kızım Alya Naz ARABUL'a, hayatıma bir güneş gibi iyi ki doğduğu için, benim mutluluk ve neşe kaynağım, hayat enerjim, oyun arkadaşım olduğu için ve bana en güzel duyguları yaşattığı için sonsuz teşekkür ederim.

Fatma KESKİN ARABUL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
TABLO LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xviii
ABSTRACT	xx
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	11
1.3 Hipotez	11
2 EKSENEL AKILI ASENKRON MOTOR YAPILARI VE TASARIM	
PARAMETRELERİ.....	14
2.1 Eksenel Akıllı Makinelerin Yapısı.....	14
2.1.1 Tek Hava Aralıklı Makineler	14
2.1.2 İki Hava Aralıklı Makineler	15
2.1.3 Çoklu Hava Aralıklı Makineler.....	17
2.2 Eksenel Akıllı Asenkron Motor Tasarım Parametreleri	18
2.3 Eksenel Akıllı Asenkron Motora Uygulanan Kaykı Açılarının Hesaplanması ...	22
3 RADYAL AKILI ASENKRON MOTOR İLE EKSENEL AKILI ASENKRON	
MOTORUN GENEL TASARIM PARAMETRELERİ.....	24
3.1 Asenkron Motorların Verimlilik Açısından Sınıflandırılması	24
3.2 Radyal Akıllı Asenkron Motor Modeli	26
3.3 Eksenel Akıllı Asenkron Motor Modeli	28

3.4 Radyal Akıllı Asenkron Motor Modeli ile Eksenel Akıllı Asenkron Motor Modeli Karşılaştırması	30
4 BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	33
4.1 Farklı Rotor Oluk Sayılarına göre Tasarlanan Eksenel Akıllı Asenkron Motor Sonuçları.....	33
4.2 Rotorlarına Kaykı Açısı Uygulanan Eksenel Akıllı Asenkron Motorların Analiz Sonuçları	36
4.3 YMK Malzeme Kullanılarak Tasarlanan Eksenel Akıllı Asenkron Motorların Analiz Sonuçları	70
5 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKÇA	81
A IEC 60034-30-1 ENERJİ VERİMLİLİĞİ SINIFLARI	88
B EKSENEL AKILLI ASENKRON MOTOR BENZETİM ÇALIŞMALARI MOMENT DEĞİŞİM GRAFİKLERİ.....	89
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	111

SİMGELİSTESİ

P_o	Çıkış Gücü
p	Çift Kutup Sayısı
F_1	Dağıtılmış Manyetomotor Kuvvet
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
ϕ_{ax}	Disk Tipi Hava Aralığındaki Eksenel Döner Manyetik Alan
°	Derece
D_2	Eksenel Akı Asenkron Motor Nüve Dış Çapı
r_2	Eksenel Akı Makine Nüve Dış Yarıçapı
D_1	Eksenel Akı Asenkron Motor Nüve İç Çapı
ϕ_{rad}	Eksenel Akı Asenkron Motor için Akı Değeri
r_1	Eksenel Akı Makine Nüve İç Yarıçapı
D_a	Eksenel Akı Asenkron Motor Nüve Ortalama Çapı
C_{ax}	Eksenel Akı Asenkron Motor Sabiti
P_i	Giriş Gücü
S_i	Görünür İç Güç
r_{HL}	Harmonik Kayıplar
B_{max}	Hava Aralığındaki Maksimum Manyetik Akı Yoğunluğu
Hz	Hertz
η_{ref}	IEC 60034-30-1 Standardındaki Sınır Verim Değeri
η_n	IEC 60034-30-2 Standardı Enerji Verimliliği Sınıfı
P_{STR}	Kaçak Yük Kayıplar
kWh	Kilowatt Saat
$\sum_i h_i$	Makinenin Toplam Yüksekliği
τ_{max}	Maksimum Moment

P_{FW}	Mekanik Kayıplardan Olan Sürtünme ve Vantilasyon Kayıpları
mm	Milimetre
τ_{min}	Minimum Moment
Nm	Newton Metre
L	Nüvenin Radyal Genişliği
ϕ_{ax}	Radyal Akılı Asenkron Motor için Akı Değeri
r_r	Radyal Akılı Makinenin Rotor Yarıçapı
L_r	Radyal Akılı Makinenin Uzunluğu
β_r	Rotora Göre Kaykı Açısı
V_r	Rotor Nüvesinin Hacmi
N_r	Rotor Oluk Sayısı
α	Sapma, Kutup Form Faktörü
k_w	Sargı Faktörü
ϕ_{rad}	Silindirik Hava Aralığındaki Radyal Döner Manyetik Alan
β_s	Statora Göre Kaykı Açısı
V_s	Stator Nüvesinin Hacmi
N_s	Stator Oluk Sayısı
P_{cu}	Stator ve Rotor Bakır Kayıpları
P_c	Stator ve Rotor Nüve Kayıpları
V	Stator ve Rotorun Toplam Nüve Hacmi
r_o	Şaft Açıklığının Yarıçapı
τ_{avg}	Ortalama Moment
V	Volt
W	Watt
Y/ Δ	Yıldız-Üçgen Bağlantı
τ_{ripple}	Yüzdesel Olarak Moment Dalgalanması
η	Yüzdesel Olarak Verim

KISALTMA LİSTESİ

ÇSTR	Çift Stator Tek Rotor
DC	Doğru Akım
EAAG	Eksenel Akıllı Asenkron Generatör
EAAM	Eksenel Akıllı Asenkron Motor
EAM	Eksenel Akıllı Makine
2D	İki Boyutlu
IE3	Premium Verim
PWM	Pulse Width Modulation
RAAM	Radyal Akıllı Asenkron Motor
RAM	Radyal Akıllı Makine
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SMC	Soft Magnetic Composites
IE1	Standart Verim
IE4	Süper Premium Verim
TSÇR	Tek Stator Çift Rotor
TSTR	Tek Stator-Tek Rotor
3D	Üç Boyutlu
YMK	Yumuşak Manyetik Kompozit
IE2	Yüksek Verim

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 TSTR Yapısı	15
Şekil 2. 2 ÇSTR Yapısı	16
Şekil 2. 3 TSÇR Yapısı	17
Şekil 2. 4 (a) RAAM geometrisi, (b) EAAM geometrisi	19
Şekil 3. 1 RAAM model geometrisi	27
Şekil 3. 2 EAAM model geometrisi	29
Şekil 3. 3 (a) RAAM manyetik akı yoğunluğu dağılımları, (b) EAAM manyetik akı yoğunluğu dağılımları	31
Şekil 4. 1 Farklı oluk sayılarına göre tasarlanan EAAM'lerden elde edilen verimler	34
Şekil 4. 2 Farklı oluk sayılarına göre tasarlanan EAAM'lerin moment dalgalanması grafiği	35
Şekil 4. 3 28 oluklu EAAM'nin kaykısı açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri	37
Şekil 4. 4 28 oluklu EAAM'nin kaykısı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları	38
Şekil 4. 5 28 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykısı açısı uygulanmamış model (b)10° kaykısı açısı uygulanmış model, (c) 12,86° kaykısı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykısı açısı uygulanmış model, (e) 20° kaykısı açısı uygulanmış model	40
Şekil 4. 6 30 oluklu EAAM'nin kaykısı açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri	42
Şekil 4. 7 30 oluklu EAAM'nin kaykısı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları	43
Şekil 4. 8 30 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykısı açısı uygulanmamış model, (b)10° kaykısı açısı uygulanmış model, (c) 12° kaykısı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykısı açısı uygulanmış model, (e) 20° kaykısı açısı uygulanmış model	45
Şekil 4. 9 32 oluklu EAAM'nin kaykısı açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri	47

Şekil 4. 10	32 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları.....	48
Şekil 4. 11	32 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kayk1 açısı uygulanmamış model, (b)10° kayk1 açısı uygulanmış model, (c) 11,25° kayk1 açısı uygulanmış model, (d) 15° kayk1 açısı uygulanmış model, (e) 20° kayk1 açısı uygulanmış model, (f) 22,5° kayk1 açısı uygulanmış model.....	50
Şekil 4. 12	34 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri.....	52
Şekil 4. 13	34 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları.....	53
Şekil 4. 14	34 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kayk1 açısı uygulanmamış model, (b)10° kayk1 açısı uygulanmış model, (c) 10,58° kayk1 açısı uygulanmış model, (d) 15° kayk1 açısı uygulanmış model, (e) 20° kayk1 açısı uygulanmış model, (f) 21,17° kayk1 açısı uygulanmış model.....	55
Şekil 4. 15	38 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri.....	57
Şekil 4. 16	38 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları.....	58
Şekil 4. 17	38 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kayk1 açısı uygulanmamış model, (b) 9,47° kayk1 açısı uygulanmış model, (c)10° kayk1 açısı uygulanmış model, (d) 15° kayk1 açısı uygulanmış model, (e) 18,95° kayk1 açısı uygulanmış model, (f) 20° kayk1 açısı uygulanmış model.....	60
Şekil 4. 18	40 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri.....	62
Şekil 4. 19	40 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları.....	63
Şekil 4. 20	40 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kayk1 açısı uygulanmamış model, (b) 9° kayk1 açısı uygulanmış model, (c)10° kayk1 açısı uygulanmış model, (d) 15° kayk1 açısı uygulanmış model, (e) 18° kayk1 açısı uygulanmış model, (f) 20° kayk1 açısı uygulanmış model.....	65
Şekil 4. 21	42 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri.....	66
Şekil 4. 22	42 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları.....	67
Şekil 4. 23	42 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kayk1 uygulanmamış model, (b) 8,57° kayk1 açısı uygulanmış model, (c)10° kayk1 açısı uygulanmış model, (d) 15° kayk1 açısı	

uygulanmış model, (e) 17,14° kaykısı açısı uygulanmış model, (f) 20° kaykısı açısı uygulanmış model.....	69
Şekil 4. 24 Statorunda YMK malzeme, rotorunda çelik malzeme kullanılmış EAAM modeli	71
Şekil 4. 25 Statorunda çelik malzeme, rotorunda YMK malzeme kullanılmış EAAM modeli	72
Şekil 4. 26 Statorunda ve rotorunda YMK malzeme kullanılmış EAAM modeli	73
Şekil 4. 27 YMK malzeme uygulanan EAAM'den elde edilen verim değerleri	74
Şekil 4. 28 YMK malzeme uygulanan EAAM'nin moment dalgalanması grafiği	74
Şekil 4. 29 32 oluklu EAAM'nin rotoruna uygulanan kaykısı durumu ve kullanılan malzemeye göre yapılan analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunlukları dağılımı.....	76
Şekil A. 1 IEC 60034-30-1 standardına göre enerji verimliliği sınıfları tablosu	88
Şekil B. 1 28 oluklu rotoruna kaykısı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi	89
Şekil B. 2 28 oluklu rotoruna 10° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	90
Şekil B. 3 28 oluklu rotoruna 12° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	90
Şekil B. 4 28 oluklu rotoruna 15° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	91
Şekil B. 5 28 oluklu rotoruna 20° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	91
Şekil B. 6 30 oluklu rotoruna kaykısı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi	92
Şekil B. 7 30 oluklu rotoruna 10° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	92
Şekil B. 8 30 oluklu rotoruna 12° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	93
Şekil B. 9 30 oluklu rotoruna 15° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	93
Şekil B. 10 30 oluklu rotoruna 20° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	94
Şekil B. 11 32 oluklu rotoruna kaykısı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi	94
Şekil B. 12 32 oluklu rotoruna 10° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi	95

Şekil B. 13	32 oluklu rotoruna 11,25° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	95
Şekil B. 14	32 oluklu rotoruna 15° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	96
Şekil B. 15	32 oluklu rotoruna 20° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	96
Şekil B. 16	32 oluklu rotoruna 22,5° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	97
Şekil B. 17	34 oluklu rotoruna kayk1 açısı uygulanmamış modele ait moment değışimi	97
Şekil B. 18	34 oluklu rotoruna 10° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	98
Şekil B. 19	34 oluklu rotoruna 10,58° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	98
Şekil B. 20	34 oluklu rotoruna 15° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	99
Şekil B. 21	34 oluklu rotoruna 20° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	99
Şekil B. 22	34 oluklu rotoruna 21,17° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	100
Şekil B. 23	38 oluklu rotoruna kayk1 açısı uygulanmamış modele ait moment değışimi	100
Şekil B. 24	38 oluklu rotoruna 9,47° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	101
Şekil B. 25	38 oluklu rotoruna 10° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	101
Şekil B. 26	38 oluklu rotoruna 15° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	102
Şekil B. 27	38 oluklu rotoruna 18,95° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	102
Şekil B. 28	38 oluklu rotoruna 20° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	103
Şekil B. 29	40 oluklu rotoruna kayk1 açısı uygulanmamış modele ait moment değışimi	103
Şekil B. 30	40 oluklu rotoruna 9° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	104
Şekil B. 31	40 oluklu rotoruna 10° kayk1 açısı uygulanmış modele ait moment değışimi	104

Şekil B. 32	40 oluklu rotoruna 15° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	105
Şekil B. 33	40 oluklu rotoruna 18° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	105
Şekil B. 34	40 oluklu rotoruna 20° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	106
Şekil B. 35	42 oluklu rotoruna kaykısı uygulanmamış modele ait moment değişimi	106
Şekil B. 36	42 oluklu rotoruna 8,57° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	107
Şekil B. 37	42 oluklu rotoruna 10° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	107
Şekil B. 38	42 oluklu rotoruna 15° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	108
Şekil B. 39	42 oluklu rotoruna 17,14° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	108
Şekil B. 40	42 oluklu rotoruna 20° kaykısı uygulanmış modele ait moment değişimi	109
Şekil B. 41	Stator malzemesi olarak YMK, rotor malzemesi olarak çelik kullanılmış EAAM'e ait moment değişimi	109
Şekil B. 42	Stator malzemesi olarak çelik, rotor malzemesi olarak YMK kullanılmış EAAM'e ait moment değişimi	110
Şekil B. 43	Hem stator hem rotor malzemesi olarak YMK kullanılmış EAAM'e ait moment değişimi	110

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Kaçak yük kayıpları için IEEE 112-2017 numaralı standartta belirlenen değerler	21
Tablo 3. 1 IEC 60034-30-1 enerji verimliliği sınıfları.....	25
Tablo 3. 2 IEC 60034-30-1 enerji verimlilik sınıfları sınır değerleri	25
Tablo 3. 3 IEC 60034-30-2 enerji verimlilik sınıfları sınır değerleri	26
Tablo 3. 4 RAAM tasarım parametreleri.....	28
Tablo 3. 5 EAAM'lere ait genel tasarım parametreleri.....	30
Tablo 4. 1 Farklı oluk sayılarına göre tasarlanan, rotorlarına kaykı açısı uygulanmamış modellere ait verim ve moment dalgalanması değerleri 35	
Tablo 4. 2 Rotoru 28 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları	36
Tablo 4. 3 Rotoru 28 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları.....	39
Tablo 4. 4 Rotoru 30 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları	41
Tablo 4. 5 Rotoru 30 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları.....	43
Tablo 4. 6 Rotoru 32 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları	46
Tablo 4. 7 Rotoru 32 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları.....	49
Tablo 4. 8 Rotoru 34 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları	51
Tablo 4. 9 Rotoru 34 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları.....	54
Tablo 4. 10 Rotoru 38 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları.....	56
Tablo 4. 11 Rotoru 38 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları.....	59
Tablo 4. 12 Rotoru 40 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları.....	61

Tablo 4. 13 Rotoru 40 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları.....	64
Tablo 4. 14 Rotoru 42 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları.....	66
Tablo 4. 15 Rotoru 42 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları.....	68
Tablo 4. 16 YMK malzeme uygulanan EAAM'den elde edilen analiz sonuçları.....	75



Düşük Moment Dalgalanmasına Sahip Yüksek Verimli Tek Stator Tek Rotorlu Eksenel Akılı Asenkron Motor Tasarımı

Fatma KESKİN ARABUL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İbrahim ŞENOL

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte her alanda olduğu gibi elektrik makinalarının da daha kompakt bir yapıya sahip olmaları ile birlikte verimlerinin yükseltilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Küresel enerji talebinin artması nedeniyle enerji verimliliği yüksek motorların kullanılması önem kazanmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Premium enerji verimlilik (IE3) sınıfında yer alan radyal akılı asenkron motor (RAAM) ile aynı enerji verimliliği sınıfına ait bir eksenel akılı asenkron motor (EAAM) tasarlamaktır. Farklı rotor oluk sayılarına sahip çeşitli EAAM'ler tasarlanarak, verimlilik ve moment dalgalanması açısından performans analizleri yapılmıştır. Elektrik makinaları tasarımı açısından moment dalgalanmasının düşük

tutulması en önemli parametrelerden biridir. Ayrıca, yapılan çalışmada moment dalgalanmasının düşürülmesi için tasarımlar yapılırken, EAAM'lerin verimlerinin ve momentlerinin düşürülmemesine dikkat edilmiştir. Bu bağlamda, bu çalışmada EAAM'lerin rotor oluklarına kaykık açıları uygulanmıştır. Kaykık açıları belirlenirken stator oluk sayılarına ek olarak rotor oluk sayıları da dikkate alınarak, rotora uygulanacak kaykık açıları hesaplanmıştır. Ayrıca tasarımda Yumuşak Manyetik Kompozit (YMK) malzemenin kullanılması da araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda, IE3 enerji verimlilik sınıfında EAAM'ler tasarlanmış olup bu modeller üzerinde; farklı rotor oluk sayısının, stator ve rotora göre kaykık açıları uygulanmasının ve YMK malzeme kullanımının performans üzerine etkileri irdelenmiştir. Sonuç olarak, uygulanan farklı tasarım yaklaşımlarıyla IE3 enerji verimlilik sınıfında ve düşük moment dalgalanmasına sahip yeni EAAM tasarımları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eksenel akıllı asenkron motor, elektrik motorları, makine tasarımı, enerji verimliliği, sonlu elemanlar analizi

ABSTRACT

Design of Low Torque Ripple High Efficiency Single Stator Single Rotor Axial Flux Induction Motor

Fatma KESKIN ARABUL

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ibrahim SENOL

In recent years, with the developing technology in the field of electrical machines, more efficient electric motors that occupy less volume than their power have been produced. The use of high energy efficiency motors gain importance due to the increase in global energy demand. Main purpose of this study is designing an Axial Flux Induction Motor with the same efficiency class as Radial Flux Induction Motor in premium efficiency (IE3) class which is used commonly in industrial applications. Various Axial Flux Induction Motors (AFIM) are designed with different rotor slots number and performance analyses as efficiency and torque ripple changes are investigated. It is known that torque ripple is one of the key parameter in electrical machine design which should be kept as low as possible. In addition, it is provided not to reduce the efficiency and torque values of AFIMs while making designs to reduce the torque ripple. In this regard, skew angles are applied to the rotor slots of

AFIMs in this study. While determining the skew angles, in addition to the number of stator slots, the number of rotor slots is also taken into consideration for calculating the skew angles. In addition, use of Soft Magnetic Composite (SMC) material in the design process is also investigated. As a result of this study, IE3 energy efficiency class AFIMs are designed and on these models; effects of different number of rotor slots, application of skew angles due to stator and rotor slot number and use of SMC material on the efficiency and torque ripple performances are examined. Consequently, new AFIM designs with low torque ripple and IE3 energy efficiency class are obtained with different design approaches.

Keywords: Axial flux induction motor, electric motors, machine design, energy efficiency, finite element analysis

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde, dünya çapında enerji tüketim miktarının %40'ından fazlası asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir ve bu oran endüstride % 70'i aşmaktadır. [1]–[7]. Asenkron motorlar diğer elektrik motorları ile kıyaslandığında birçok avantaja sahip olmalarından, pek çok endüstriyel sürecin temel bileşeni olmaktadır. Bu avantajların başında: sürekli bakıma ihtiyaç duymamaları, yük altında devir sayılarının fazla değişmemesi, güç elektroniği devreleri ile devir sayılarının kolayca ayarlanabilmesi, çalışmaları sırasında elektrik arkı meydana getirmediklerinden daha güvenilir olmaları ve üretim maliyetlerinin düşük olması gelmektedir [8], [9]. Bu özelliklerinden ötürü asenkron motorlar endüstride en yaygın kullanılan motorlar olmaktadır.

Asenkron motorların tükettikleri enerji miktarı göz önüne alındığında, verimlerdeki küçük bir değişikliğin bile dünya çapında tüketilen enerji miktarında önemli tasarruf sağlayacağı öngörülmektedir. Özellikle orta ve küçük güçlü motorlar için en büyük enerji tasarrufu, yüksek verimlilik sınıflarında tasarlanmasıyla sağlanabilmektedir [10], [11]. Bu nedenle birçok ülkede premium verim (IE3) enerji verimlilik sınıfına ait motorların kullanılması, çıkarılan yasalar doğrultusunda zorunlu hale gelmiştir. Örneğin; Amerika Birleşik Devletleri'nde IE3 verimlilik sınıfı motorların kullanılması 2011 yılından itibaren zorunlu iken Türkiye, Çin ve AB ülkelerinde 2015 yılından itibaren yasalarla zorunlu hale gelmiştir [12]–[15].

Günümüzde yüksek verimlilik sınıfına ait motorların kullanımı ile enerji tüketimi ve çevresel etki azalmaktadır. Ek olarak, motor güvenilirliği, sürdürülebilir kullanımı

ve yatırım talebini de artırmaktadır [16]. Dünyanın pek çok ülkesinde, yüksek verimli motorların kullanımının artmasını sağlamaya yönelik birçok teşvik programı vardır. Bu programlar arasında “Verimlilik Artırma Projesi” ve “Verimli Motor Değişimi Projesi” öne çıkmaktadır. Düşük verimli mevcut motorların, yüksek verimli motorlar ile değiştirilmesi ile aynı hacimde motorlar kullanılsa dahi ciddi enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [17], [18]. Diğer bir yandan, eksenel akı asenkron motorlar (EAAM), geleneksel radyal akı asenkron motorlara (RAAM) tercih edilirse daha küçük hacimli ve daha verimli motorlar tasarlanabilmektedir [19]–[21].

Asenkron motorlar, manyetik akı yönüne göre radyal akı ve eksenel akı asenkron motorlar olmak üzere ikiye ayrılır. Konvansiyonel RAAM’lerin en büyük dezavantajları: düşük kalkış momenti ve yüksek kalkış akımına sahip olmaları ile gürültülü çalışmalarıdır.

Eksenel akı makinelerin (EAM) keşfi 19. yüzyıla dayanmaktadır. İlk olarak Faraday’ın 1821 yılında icat ettiği bu makine topolojisi bilinen en eski EAM olarak tarihe geçmektedir. Faraday’ın bu ilkel EAM’sinin temel çalışma prensibi elektromanyetik indüksiyona dayanmaktadır. Bu makinenin icadından bir süre sonra 1837 yılında Davenport, icat ettiği radyal akı makinenin (RAM) patentini alınca, RAM’ler, üretimi EAM’lere göre daha kolay olduğundan elektrik makinelerinin ana şekli olarak kabul edilmiştir. EAM’lerin ilk yıllarda üretiminin RAM’lere göre daha az olmasının ana sebebi, stator manyetik nüvesinin üretim zorluğu, maliyeti ve rotor tasarımının yüksek döner hızları karşılamak için yetersiz olması ile rotor üzerindeki eksenel kuvvetin tek taraflı manyetik çekme problemine neden olmasıdır. 1940’lı yıllarda tekrardan üzerinde çalışılmaya başlanan EAAM’ler, teknolojinin de ilerlemeye başlamasıyla çeşitli yapısal değişikliklere uğramıştır. Özellikle malzeme ve üretim metotlarının gelişmesiyle eksenel akı makinelerin konstrüksiyonuna dayalı problemler çözüme kavuşmuştur [19], [20], [22]–[30].

Değiştirilmiş ve geliştirilmiş yapıya rağmen, EAAM, yüksek üretim maliyeti ve karmaşıklığı nedeniyle geleneksel RAAM ile rekabet edememiştir. 1960’lı yıllarda, eksenel akı senkron alternatör ve farklı eksenel doğru akım motorları içeren başka özel makinelerin geliştirilmesi ile dikkatler EAAM’lerden uzaklaşmıştır [31].

Gelişen teknoloji ile birlikte her alanda olduğu gibi elektrik motorlarının da daha kompakt bir yapıya sahip olmaları ile birlikte verimlerinin yükseltilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Ülkemiz endüstrisi için çok önemli bir yere sahip olan asenkron motorlar adına da yapılan pek çok çalışmada, bu motorların radyal akılı olarak tasarlanmasının yerine eksenel akılı olarak tasarlanarak hem daha kompakt bir yapıya sahip olduğu görülmekte hem de verimlerinin ve moment yoğunluğunun daha da artırılabilceği sonucuna varılmaktadır [20], [24], [26], [32], [33].

EAAM'ler, RAAM'ler ile aynı çalışma prensibine sahip olmasına rağmen tasarımları birbirlerinden çok farklıdır. Aralarındaki en temel fark, manyetik akı yönüdür. RAAM'lerde manyetik akı, makine eksenine göre radyal yönde iken EAAM'lerde üretilen manyetik akı, makine eksenine göre eksenel yöndedir.

Son yıllarda, EAAM konusu, araştırmacılar için popüler araştırma konuları arasındadır. Literatürde EAAM tasarımı ve kontrolü üzerine birçok çalışma yapılmıştır [34]–[37]. Bu çalışmalar arasında en önemlileri, farklı yapıların tasarımı ve uygulanmasıdır. Ek olarak, birçok EAAM, pompalar, elektrikli araçlar, rüzgar türbini vb. uygulamalar için tasarlanmıştır [38]–[44]. Örneğin; günümüzün popüler araştırma konusu ve uygulama alanı olan elektrikli araçlarda EAAM'lerin farklı kullanım alanları mevcuttur. Bunlar: tekerleğe doğrudan akupile, tekerlek üzerinde veya ana motor olarak [45]–[47]. Ayrıca bazı çalışmalarda demir, manyeto dielektrik, süperiletkenler vb. gibi farklı malzemeler kullanılmıştır [48]–[54].

Ashari ve diğerleri (2015) [55], elektrikli araç uygulamaları için tek hava aralıklı (tek stator-tek rotor yapısına sahip olan) bir EAAM'nin tasarımı ve uygulaması üzerine çalışmışlardır. Elektrikli araçların tasarımında süregelen problemlerin başında enerji ve güç yoğunluğu gelmektedir. Bu problem boyut ve ağırlıkla dolaylı olarak ilgilidir. Araç tasarımı bu problemten dolayı daha karmaşık hale gelmektedir. Elektrik motorunun araçta yerleştirildiği yer de sınırlı olduğundan dolayı aracın boyutuna göre en verimli motor gerekmektedir. Bu problemleri çözmek amacıyla araçlarda kullanılan asenkron motorların eksenel akılı olarak tasarlanıp, motorun daha küçük boyutlu ve ince olması mümkün hale gelmektedir. Bu çalışmada, motorda çelik tipi olarak ST37 kullanılmış ve bu sayede motorun daha küçük boyutlarda yapılması sağlanmıştır. Motor 3 fazlı, sincap kafesli, 4 kutuplu, 500W,

100/58 V Y/ Δ , 50 Hz etiket değerlerine sahip olup, güç faktörü 0,8'dir. Bu çalışma tek stator-tek rotorlu bir motor üzerine olduğu için üretilen momentin 2 statorlu veya 2 rotorlu yapıya göre daha az olduğu söylenmektedir. Bu EAASM'nin nominal hızı 1366 rpm olup, kayma %9 değerindedir. Çalışmada motora boşa ve kısa devre deneyleri yapılarak eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır. Moment-hız eğrilerinin analizinde maksimum moment 0,79 Nm, kalkış momenti 0,19 Nm'dir.

Benoudjit ve Said (1998) [46], çift hava aralıklı motorun hava aralıklarından birinin eksenel diğerinin radyal şekilde olduğu yeni bir motor üzerine çalışmışlardır. Bu motor tek stator-iki rotor topolojisindedir. Bu yeni tasarımla bir önceki çalışmalarındaki toplam direnç ve kaçak reaktansı azaltarak kalkış momentini artırmışlardır. Statorunda konsantrik sargılar kullanarak stator üretimin zorluklarını azaltmışlardır.

Chan (1987) çalışmasında [56], tavan pervanesi için EAAM tasarlamıştır. Fanlar, pompalar, mutfak robotları, vb. gibi küçük güçlü evsel uygulamalarda tek fazlı EAAM'lerin kullanımının pek çok avantajı vardır. Bu avantajların başında EAAM'nin disk şeklinin bahsedilen uygulamalar için arzu edilen bir konfigürasyon olması ve rotorun, mekanik yükün dönen parçasına entegre edilebilir olması gelmektedir. Stator ve rotor arasındaki eksenel kuvvet küçük güçlerde çok ciddi olmadığından demirsiz rotor diski kullanılarak manyetik akı dönüş yönü rotorun karşı tarafına yerleştirilebilmektedir. Aynı güçlere sahip (150W) olan RAAM ile EAAM'yi karşılaştırarak hacimsel olarak EAAM'nin daha avantajlı olduğunu ispatlamıştır.

Hecker ve diğerleri (2010) [57], EAAM'nin parametrelerini, "sargı fonksiyonu teorisi" ile açıklamışlardır. Daha öncesinde, bu teori ile ilgili yapılan çalışmalar radyal akı makineler üzerinedir. Bu çalışmada bu teori, EAAM'ler için uygulanmakta ve böylece EAAM'nin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi sağlanmaktadır.

Igelspacher ve Herzog (2010) [58], tek statorlu eksenel akılı sincap kafesli asenkron makinenin analitik metodunu açıklamışlardır. Bu çalışmada, levha yöntemi kullanılarak, bu yöntemin tek statorlu EAAM'lere uygulanması açıklanmıştır. Buna dayanarak, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu incelenmiştir. Buradan stator fazları ile bağlantılı akılar ve endüktanslar hesaplanmıştır. Analitik tanımlama,

elektromanyetik momentin kestirimi ve 1 faz eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması ile tamamlanmıştır. EAAM'nin 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile yapılan hesaplamalarında, eddy akımları düşürülerek transient çalışma ile hesaplama süresinin kısaltılması sağlanmıştır. RAAM'lerin teorik temelleri, EAAM'leri tanımlamak için yeterli olmadığından, EAAM'ler için teorik temeller incelenmiştir. Bu temeller, levha yöntemi, hava aralığındaki akı yoğunluğu, stator ve rotorun bağlantılı akıları, elektromanyetik moment ve 1 faz eşdeğer devre parametreleridir.

Kubzdela ve Weglinski (1987) [48], EAAM'nin statorunu manyetodielektik (yumuşak manyetik toz kompozit) malzemeden üreterek verimde ve çıkış gücünde iyileşme sağlamıştır. İleriki çalışmalarında rotor manyetik nüvesini de manyetodielektrik malzemeden üretmeye çalışacaktır.

Nasiri-Gheidari ve Lesani (2012) [59], EAAM ile ilgili yapılan çalışmaların kapsamlı bir literatür taramasını sunmuşlardır.

Nasiri-Gheidari ve Lesani (2012) [60], bu çalışmalarında, bir fazlı, kapasitör yol vermeli eksenel akılı sincap kafesli asenkron motorun 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile karakteristiklerinin incelenmesi üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmalarının amacı EAAM'nin performansını bulmaya yönelik olup, 3 boyutlu time-stepping sonlu elemanlar metodunu kullanarak, elektromanyetik alan analizi de yapmışlardır. Hem eddy akımları hem de doyum etkileri simülasyonda dikkate alınmıştır. Bu transient çözümüne alternatif olarak d-q alan teorisine dayalı matematiksel model de sunmuşlardır. Motorun elektriksel parametreleri, d-q modeli için gerekli olduğundan dolayı, bu parametreleri analitik metot kullanarak ve doğru akım (DC) şarj testi ile hesaplamışlardır. DeneySEL ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ile simülasyon sonuçlarının başarılı olduğu doğrulanmıştır. Sonuçlar bölümünde 3 farklı radyal akılı asenkron motor ve çalışmalarında kullandıkları EAAM'nin nominal hızlarını, güç faktörlerini, verimlerini, kalkış momentlerini ve kalkış akımlarını karşılaştırmışlardır. Bu kıyaslamaya göre EAAM'nin diğer konvansiyonel makinalara göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Nasiri-Gheidari ve Lesani (2012) [61], EAAM'nin parametre hesabı için stator deşarj akımına dayalı yeni bir metot sunmuşlardır. Hesaplanan parametreler, d-q eksen teorisine dayalı modellenip, 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları ile test sonuçları, sunulan metodu doğrulamaktadır. Ölçüm sonuçları ile stator deşarj akımı sonuçları karşılaştırıldığında maksimum hatanın kalkış momentinde olduğu görülmektedir. Bu hata değeri bu metot için %15 iken, 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile yaklaşık %14 ve klasik metot ile %80 civarındadır.

Nasiri-Gheidari ve Lesani (2013) [62], doğrudan sürüş için yeni bir iki hızlı, kapasitör yol vermeli, bir fazlı EAAM tasarlamışlardır. EAAM'nin doğrudan sürüş sistemlerinde pek çok avantajı olsa da stator ve rotor arasındaki eksenel kuvvetler, hava aralığının azalması ile artmakta bu da ciddi endişelere neden olmaktadır. Hava aralığındaki herhangi bir artış ise motor performansını olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada EAAM'nin yeni bir yapı tekniği ile hava aralığı uzunluğunun ayarlanabilir olması sağlanmıştır. Yazarlar, bu çalışma ile yeni bir 1 fazlı kapasitör yol vermeli EAAM tasarlamışlar, motorun tüm geometrik boyutları ve elektriksel eşdeğer devre parametrelerinin analitik hesaplamalarını yapmışlar ayrıca yeni bir teknik kullanarak hava aralığını 0,1 mm yaparak güç faktörü ve motor performansını artırmışlar ve düşük hızlarda yüksek kalkış momenti sağlamışlardır.

Nasiri-Gheidari ve Lesani (2013) [63], bir diğer çalışmalarında, tek stator-tek rotorlu EAAM'de statik eksen kayıklığı için yeni bir tasarım çözümü üretmişlerdir. Statik eksen kayıklığı elektrik makinelerinde en fazla karşılaşılan hatalardan biridir. Statik eksen kayıklığı, rotorun kendi geometrik ekseninde dönmesi demektir. Bu durum hava aralığında akı yoğunluğunun bozulmasına yol açar ve bu da motorun manyetik davranışına etki eder. Ayrıca bu hata, mil yatağı hasarlarına, dengesiz manyetik çekişlere, motorun ömrünün azalmasına, gürültü ve titreşime neden olur. Bu çalışmada doğrudan sürüşteki statik eksen kayıklığının motor performansını azaltıcı etkisinin optimizasyonu yapılmıştır. Transient ve kararlılık durumundaki d-q eksen teorisine dayalı matematiksel model çıkartılmış, nüve doyumunun etkisi ve statik eksen kayıklığının modellenmesi yapılmıştır. Motor tasarlanılarak test edilmiş, deneysel ölçümlere göre motorun parametreleri hesaplanmıştır. Sonuç

olarak statik eksen kayıklığından oluşan maksimum hata %28'den %16'ya düşürülmüştür.

Nasiri-Gheidari ve Lesani (2014) [64], 1 fazlı, eksenel akılı, sincap kafesli asenkron motorun 2 boyutlu elektromanyetik alan analizi ile moment-hız karakteristiklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada elektromanyetik nüvenin doyum ve anizotropisi ile harmonik etkileri de dikkate alınmıştır. 2 boyutlu ve 3 boyutlu zaman adımlı sonlu elemanlar analizi, teorik sonuçları doğrulamak için kullanılmıştır. Motor prototipi gerçekleştirilerek test edilmiştir. Test sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması ile kalkış momenti kestirimi için maksimum hatanın %10 civarında olduğu görülmüştür. Eksenel akılı asenkron motorların performans kestirimleri için yapılan çalışmalar üç grupta incelenmektedir. Bunlar: sonlu elemanlar metodu, motor matematiksel modelinin çıkarılması ve motorun eşdeğer devresini kullanarak yapılan çalışmalardır. Geçmiş çalışmaların çoğunda 3 fazlı tek parça rotorlu EAAM kullanılmıştır. Bu çalışmada rotoru lamine edilmiş, sincap kafesli 1 fazlı EAAM kullanılmıştır. Tek parça rotorlu motorlar, güç faktörleri ve verimleri daha düşük olsa da, atalet momentleri küçük olduğundan dolayı yüksek hızlı uygulamalarda tercih edilirler. Fakat evsel uygulamalarda, motorun veriminin ve güç faktörünün yüksek olması önemli olduğundan, rotoru lamineli sincap kafesli motorlar tercih edilirler. Ayrıca lamine edilmiş nüve kullanılarak, stator ve rotor arasındaki manyetik çekiş kuvvetinin de azaldığı görülmektedir.

Profumo ve diğerleri (1997) [38], elektrikli araçlar için eksenel akılı makine sürücülerinde, yeni bir uygulanabilir çözüm sunmuşlardır. 3 fazlı radyal akılı asenkron motorda olduğu gibi PWM inverter, sabit batarya gerilimini alternatif gerilime dönüştürerek motoru besler. Alan yönlendirmeli moment kontrolü ile kararlı ve transient halde moment kontrolü sağlanır. Maksimum gerilime ulaşıldığında akı zayıflatma işlemi ile akı ve akım bileşenlerinin kontrolü sağlanır. Elektrikli araç sürüş sistemleri için, tekerlek motoru için kullanılacak elektrik makinesinin kompakt, güçlü, yüksek verimli ve yüksek momente sahip olması gerekmektedir. EAM'ler, motorun doğrudan sürüş tekerleklerine akuple edilebilmesi ya da tekerleklerin içinde bulunması açısından oldukça avantajlıdır. Bu çalışmada, EAAM, tekerlek motoru uygulaması olarak sunulmuş ve bazı

değerlendirmeler yapılmıştır. 2 rotorlu yapı, elektrikli araçlar için geleceği parlak bir çözümdür. EAAM'lerde bu iki rotor farklı hızlarda dönebilir. Böylece motor mekanik diferansiyel olarak rol oynayabilir. Elektrikli araçlar kullanılan motor sayısına göre tek veya çok motorlu sistemler olarak ikiye ayrılır. Çok motorlu sistemlerde 2 ya da daha fazla motor doğrudan tekerleklere monte edildiğinden mekanik diferansiyel ve redüksiyon dişlisine ihtiyaç duyulmaz. Elektrikli araçlarda sabit güç kontrolü ve yüksek sabit momente ihtiyaç duyulduğundan EAAM'lerin kullanılması avantajlıdır. Ayrıca bu makinelerin konfigürasyonu tekerlek motoru olarak kullanıma gayet uygundur. İkiz rotorlu EAAM'lerin iki rotorunun da farklı hızlarda dönebilmesi, farklı kayma değerlerine sahip olmasına ve farklı akılara sahip olmasını sağlar. Böylece motor dengeli momentte tutulabilir. İkiz rotorlu EAAM'ler de NN tip ve NS tip olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu motorlardan NN tipinde bakırdan tasarruf edilebilirken, NS tipinde demirden tasarruf sağlanır ve böylece güç yoğunluğu artar. Dezavantaj olarak, ikiz rotorlu yapılarda, motor iki tekerleğin arasına yerleştirildiğinde, motor çap uzunluğu, araç uzunluğuna göre uzun olabilir.

Ramesh Babu ve Soni (2012) [65], eksenel akıllı asenkron generatörün (EAAG), rüzgar enerji dönüşüm sistemleri için yeni bir kullanım tekniği üzerinde çalışmışlardır. Genelleştirilmiş d-q eksen teorisine dayanılarak makinenin analizi yapılmış ve MATLAB ortamında matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Rüzgardan güç üretimi için ikiz rotorlu EAAG kullanılmıştır. Konvansiyonel asenkron generatörlerde aynı rüzgar hızından iki kat güç elde etmek için rotor çapının ve kanat boyutunun belli oranda artırılması gerekir. Buna bağlı olarak kule yapımında ve türbinin zemininde yapısal olarak bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Fakat ikiz rotorlu EAAG kullanılarak aynı rotor çapında ve aynı rüzgar hızında yaklaşık 2 kat güç elde edilebilmektedir. Aynı zamanda dişli kutusunun oranı azaltılarak sistemin maliyeti ve ağırlığı azalmakla birlikte sürtünme-vantilasyon kaybı azaltılarak sistemin verimi de artırılabilir.

Shuo ve diğerleri (2011) [66], EAAM'nin yeni bir yapısı ve karakter analizi üzerine çalışmışlardır. Bu yapı manyetik kaldırma sistemleri üzerine uygulanmıştır. Kaldırma hareketini sağlamak için sistemde bir EAAM kullanılmış, bu motorda üç adet bobin, üç adet -bobin ve sekonderi manyetik olmayan- iletken kullanılmıştır.

Üç boyutlu transient manyetik alan matematiksel modeli kurulmuş, deneysel çalışmalar ile teorik analizleri doğrulamıştır. 3 fazlı alternatif akımlar 3 simetrik bobine akarak bir döndürme alanı oluşturulmakta ve eddy manyetik alanı sekonderde iletilmektedir. Bu iki tür manyetik alanın birbirleriyle etkileşimi sonucu kaldırma kuvveti ve moment üretilmektedir. EAAM'lerin yüksek kalkış momenti ve düşük kalkış akımı ile yüksek termal stabiliteye sahip olması manyetik kaldırma sistemleri ile uyumlu olarak çalışmasına olanak sağlamıştır. Bu çalışmada kullanılan EAAM'nin 3 oluk ve 3 bobin içermesi ile motor hacmi büyük ölçüde azalmıştır. Konsantrik sargılar kullanılarak büyük girdap akımları altında motor karakteristiklerinin iyileşmesi sağlanmış ve sonuçta kaldırma kuvvetinin artması sağlanmıştır. EAAM'nin test sistemi 3 temel parçadan oluşmaktadır. Bunlar: inverter, kaldırma kuvveti ölçüm seti ve moment ölçüm setidir. Kaldırma kuvveti basınç sensörü kullanılarak ve osiloskoptan gözlemlenerek ölçülmektedir. Basınç sensörü yerine moment sensörü kullanıldığında moment da ölçülebilmektedir.

Smith ve Platt (1990) [67], çalışmasında iki tekerleğin sürülmesi için bir adet EAAM'yi teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada elektrikli araç sürüş motoru için iki tekerlekte iki ayrı konvansiyonel asenkron motor kullanmak yerine, bir adet EAAM tekerleklerin arasına monte edilmiştir. Elektrikli araçlar için sürüş motorunun yüksek güç ve moment yoğunluğuna, yüksek verim ve güç faktörüne ayrıca hafif yapıya sahip olmaları gerekmektedir. Kullanılan EAAM çift hava aralıklı olup (tek stator-iki rotor yapısına sahip) değişken frekanslı kaynaktan beslenmektedir ve ayrıca bu yapıda moment/hız karakteristiklerinin daha ideal olduğu sonucuna varılmıştır.

Valtonen ve diğerleri (2007) [36], tek parça rotorlu 11 kW, 7200 rpm'lik EAAM'de inverter anahtarlama frekansının rotor kayıpları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. PWM inverterdeki anahtarlama frekansına bağlı rotor kayıpları, 2 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. 240 Hz-180 Hz-120 Hz anahtarlama frekanslarında rotor kayıplarının anahtarlama frekansı azaldıkça arttığı görülmüştür.

Valtonen ve diğerleri (2008) [21], 45 kW, 6000 rpm etiket değerlerine sahip motorun, hava aralığı boyutunun motor performansı üzerine etkilerini

incelemişlerdir. Hava aralığı boyutu, elektrik makinelerinin karakteristikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. 3000 rpm'nin üzerinde tasarlanan elektrik makinelerinde rotor tek parça olarak tasarlanmışsa hava aralığı uzunluğu özel olarak belirlenmelidir. Motorun verim hesabında, eddy kayıpları 2 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Bu çalışmada hava aralığı uzunluğu değişerek kayıpların minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Hava aralığı uzunluğu arttığında motorun mıknatıslanma akımı ve stator bakır kayıpları artmaktadır. Minimum kayıplar stator bakır kayıplarını artırıp, rotor harmonik eddy akımı kayıplarını azaltmakla sağlanabilmektedir. Artan hava aralığı güç faktörünü de azaltmaktadır. Bu çalışmada bir frekans dönüştürücü, bir de sinüsoidal kaynaktan beslenen EAAM'nin hava aralığının artmasıyla, kayıplar ile verim ve güç faktörünün değişimi incelenmiştir. Rotor kayıpları hava aralığı uzunluğu ile doğrudan ilgilidir ve hava aralığı arttıkça azalmaktadır. Güç faktörü, küçük hava aralığında artan kayıplar ile birlikte artmaktadır. Maksimum verim 2,1 mm'de elde edilmiştir. 50 Hz sinüsoidal kaynak kullanıldığında ise, hava aralığı 1,9 mm'den 0,9 mm'ye azaltıldığında, verimin %87'den %89'a çıktığı, güç faktörünün 0,72'den 0,76'ya yükseldiği ve stator bakır kayıplarının azaldığı görülmüştür.

Wei ve diğerleri (2011) [68], çalışmalarında kaldırma kuvvetini sağlamak için tek parça alüminyum rotorlu EAAM'nin elektrodinamik sistemini sunmuşlardır. Motorun alan dağılımının kestirimi için analitik model geliştirilmiştir. Analitik modelden kestirimi yapılan sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar birbirleriyle uyum sağlamıştır. Bu motor konfigürasyonu, 3 fazlı alternatif akım ile birincil sargılarda elektromanyetik alan üretilip, ikincil sargılarda bir eddy alanı endüklenerek kaldırma ve çekiş gücü yaratılır. Kaldırma kuvveti ve elektromanyetik moment kutup sayısı, birincil sargıya uygulanan akım ve hava aralığına bağlı olarak değişim gösterir. Eğer hava aralığı çok büyükse, kaldırma kuvveti ve elektromanyetik moment, birincil sargıya uygulanan akım ile iyileştirilebilir.

Zhang ve Tseng (2010) [69], bir eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron ve bir EAAM'yi, her ikisi de çift statorlu-tek rotorlu olarak tasarlamışlardır. Yapılan bu çalışmada bu iki motorun matematiksel modelleri incelenmiş ve performansları

matematiksel olarak karşılaştırılmıştır. 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak, eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun, aynı yapıdaki EAAM'ye göre daha yüksek moment yoğunluğuna ve daha yüksek verime sahip olduğu anlaşılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışma ile,

- Endüstride yaygın olarak kullanılan IE3 enerji verimliliği sınıfındaki bir RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında EAAM tasarımlarının yapılması,
- Farklı rotor oluk sayıları kullanılarak yeni EAAM tasarımlarının yapılarak yüksek verim elde edilmesi ve moment dalgalanma değerinin düşürülmesi,
- Farklı rotor oluk sayılarına göre tasarlanan modellerin rotoruna kaykısı açısı uygulanarak tasarlanan EAAM'lerde verimin yükseltilmesi ve moment dalgalanmasının düşürülmesi,
- Tasarlanan EAAM'ler arasından verim ve moment değerleri açısından uygun bir modelin seçilerek YMK malzemenin motorun farklı parçalarına uygulanarak, bu malzemenin kullanılmasının ve kullanım yerlerinin verim ve moment dalgalanması üzerindeki etkisinin incelenmesi, amaçlanmıştır.

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada elektrikli araç çalışmaları ve uygulamaları artmaktadır. Elektrikli araç uygulamalarında da sıklıkla kullanılan motorlardan biri de EAAM'dir. Bu çalışmada tasarlanan yüksek verimli motorlar, elektrikli araç uygulamaları açısından da ümit vaat etmektedir.

Sonuç olarak; bu tez çalışması ile ülkemizde yerli ve milli teknoloji gelişme çalışmalarının bu kadar arttığı bir dönemde gerekli altyapı sağlandığı takdirde özellikle mıknatıs kullanılmayan bir makine modeli olduğundan, sadece ülkemizin imkanları kullanılarak üretilebilecek bir motor geliştirilmesi, hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

EAM ilk keşfedilen elektrik makinesi olsa da RAM'lerin üretimi daha kolay olduğundan dolayı RAM'lere göre üretimi daha az olmuştur. EAM'lerin stator nüvesinin üretim zorluğu ve maliyeti nedeniyle de uygulama alanları sınırlı

kalmıştır. Malzeme ve üretim metotlarının geliştirilmesiyle son yıllarda tekrardan üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, öncelikle EAAM'nin genel bir incelemesi yapılmıştır. Tezin amacı doğrultusunda, yüksek verimli EAAM modelleri tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan modellerde moment dalgalanmasının düşürülmesi hedeflenmiştir. Bu modeller tasarlanırken literatürden farklı olarak stator oluk sayısına ek olarak rotor oluk sayıları da dikkate alınarak kaykı açıları belirlenmiş ve rotoruna kaykı açısı uygulanmış farklı motorlar tasarlanmıştır.

Literatürden farklı olarak ilk kez EAAM motorun parçalarında YMK malzeme kullanılmıştır. Ayrıca, YMK malzemenin farklı parçalara uygulanmasıyla malzemenin ve uygulanan parçanın verim ve moment dalgalanması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Rotoruna kaykı uygulanmamış ve çelik malzeme kullanılmış model ile YMK malzeme kullanılmış modelin moment dalgalanması değerleri kıyaslandığında zaten düşük seviyelerde olan moment dalgalanmasının daha da düşük seviyelere inerek değerinde %11,2'lik bir azalma olduğu da görülmektedir.

Bu tez çalışmasının geri kalan kısımlarının düzeni şu şekildedir:

Bölüm 2'de EAM'lerin hava aralıklarına göre yapı çeşitleri sunulduktan sonra stator/rotor çekirdek yapılarına ait geometrik özellikler dikkate alınarak radyal ve eksenel akı makinelere ait denklemler sunulmuştur.

Bölüm 3'te referans alınan RAAM ile analiz edilen EAAM'lerin genel tasarım parametreleri sunulmaktadır. Ek olarak, tasarlanan birçok EAAM, referans gösterilen RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarımlar yapılırken, stator üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamakla birlikte tasarlanan tüm motorların statorları birbirinin aynısıdır. Motorlarda aynı stator kullanılırken, rotor oluk sayıları ve değişik oluk sayılarındaki rotora verilen kaykılarının açıları değişmektedir. Benzetim çalışmaları gerçekleştirilirken ANSYS Maxwell programı kullanılmıştır.

Bölüm 4'te referans alınan RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında olacak şekilde birçok EAAM tasarlanmıştır. Bu tasarımlar yapılırken stator üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamakta ve her bir EAAM için aynı stator nüve ve sargıları

kullanılmaktadır. Aşağıda detaylı bir şekilde sunulan EAAM'lerin statorları aynı olsa da rotor oluk sayıları ve kaykы açıları değışiklik göstermektedir. Toplamda yedi farklı rotor oluk sayısı için yapılan analizlerin rotor oluklarına kaykы açısı uygulanmamış ve kaykы açıları uygulanmış haldeki analizleri sonraki alt başlıklarda incelenmektedir. Bu benzetim çalışmalarının sonuçları dikkate alınarak en uygun model üzerinde YMK malzeme kullanılarak verim ve moment üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

Bölüm 5'te yapılan benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar incelenmiş, gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.



2

EKSENEL AKILI ASENKRON MOTOR YAPILARI VE TASARIM PARAMETRELERİ

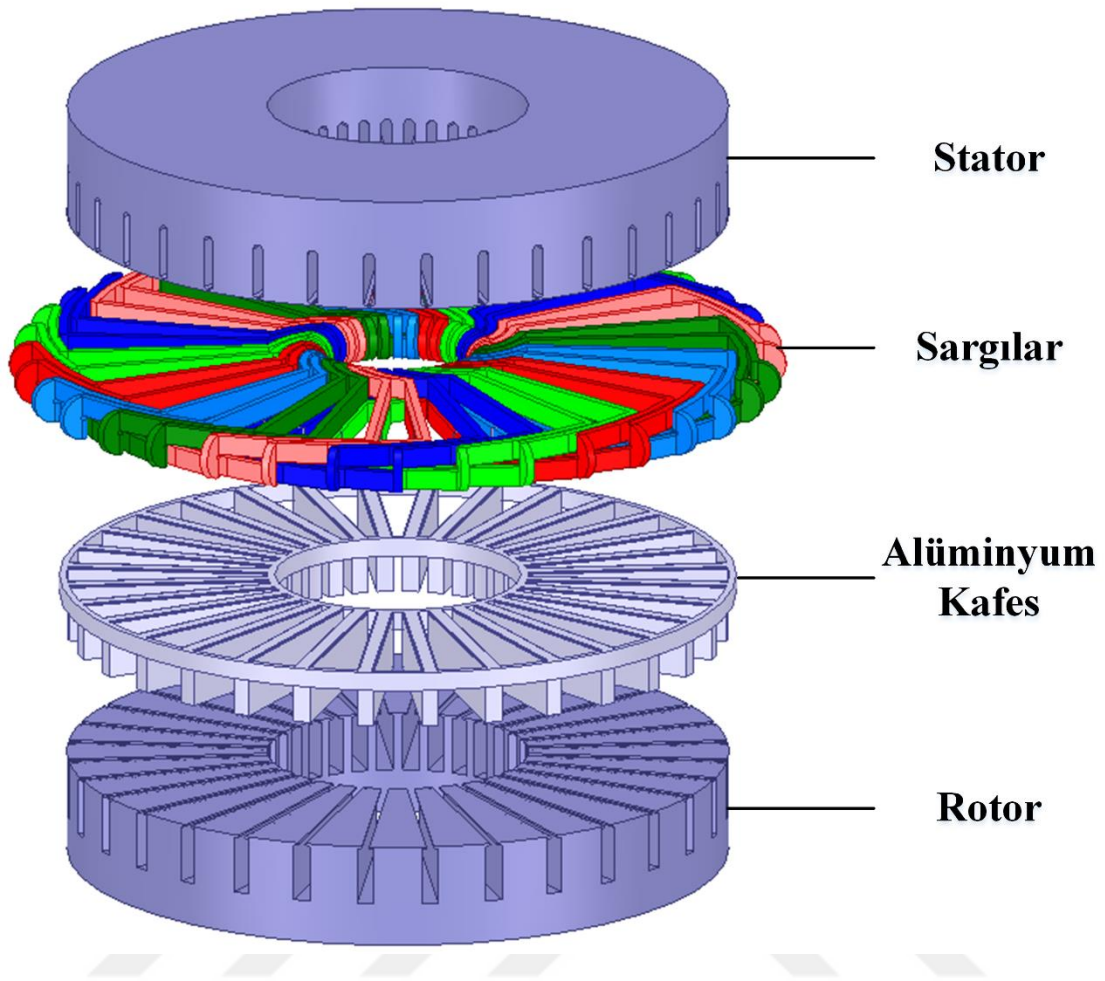
Bu bölümde, EAM'lerin hava aralıklarına göre yapı çeşitleri sunulduktan sonra stator/rotor çekirdek yapılarına ait geometrik özellikler dikkate alınarak radyal ve eksenel akılı makinelere ait denklemler sunulmuştur.

2.1 Eksenel Akılı Makinelerin Yapısı

Bu bölümde EAM'ler hava aralıklarının sayısına göre üç farklı kategoride incelenmektedir.

2.1.1 Tek Hava Aralıklı Makineler

Tek hava aralıklı makineler, EAM'lerin en eski ve en basit yapısı olmaktadır. Tek hava aralıklı makineler, tek taraflı makineler olarak da isimlendirilmektedir ve tek stator-tek rotordan (TSTR) oluşmaktadır. Bir hava aralığına sahip olduklarından yapısı daha basittir [57]. Şekil 2.1'de TSTR'nin yapısı gösterilmektedir.



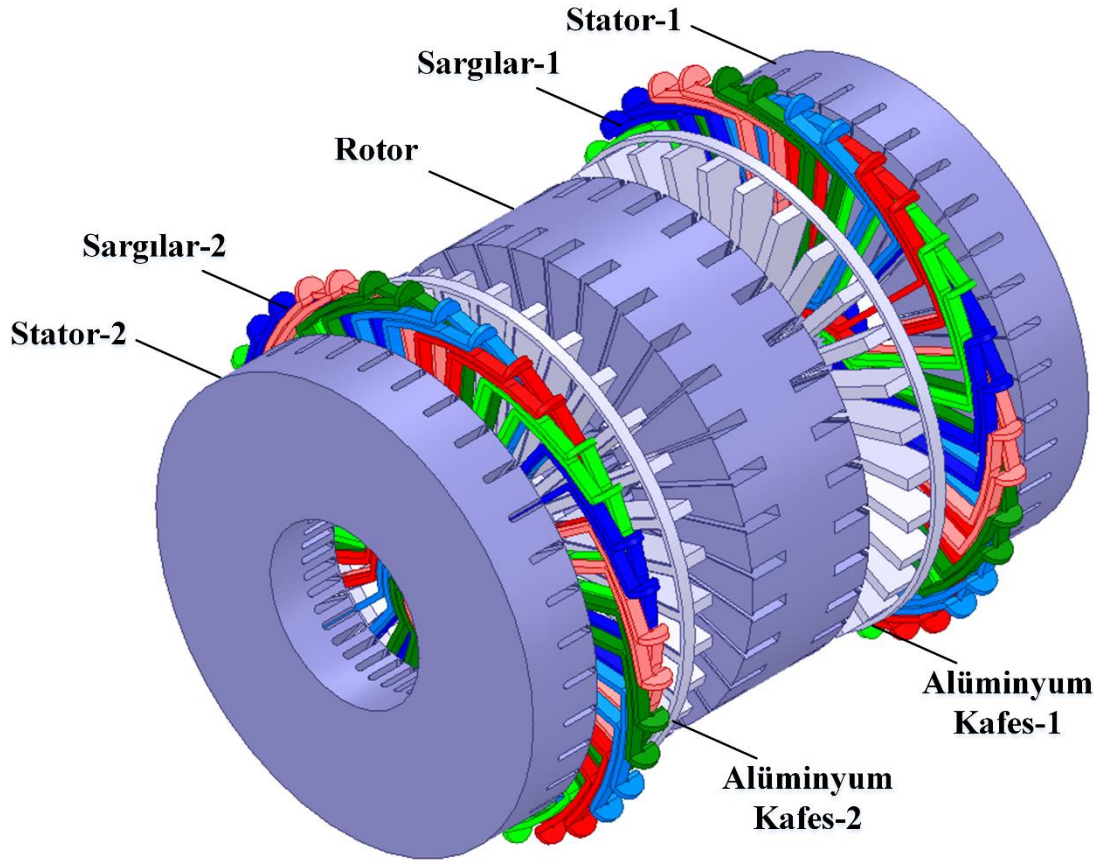
Şekil 2. 1 TSTR Yapısı

Tek taraflı makineler fanlar, pompalar, gıda işlemcileri gibi düşük momentli uygulamalar tercih edilirler [49], [56]. Ayrıca, tek taraflı EAAM'lerin EAM'lerdeki en sık karşılaşılan hata olan statik eksen kayıklığına, geleneksel motorlardan daha dayanıklı olduğu söylenmektedir [63], [70], [71]. Bu makinelerde mil ömrünün mil yüküne bağlı olması bir dezavantajdır. Aktif malzeme kullanımı TSTR makinelerde daha yüksektir [72].

2.1.2 İki Hava Aralıklı Makineler

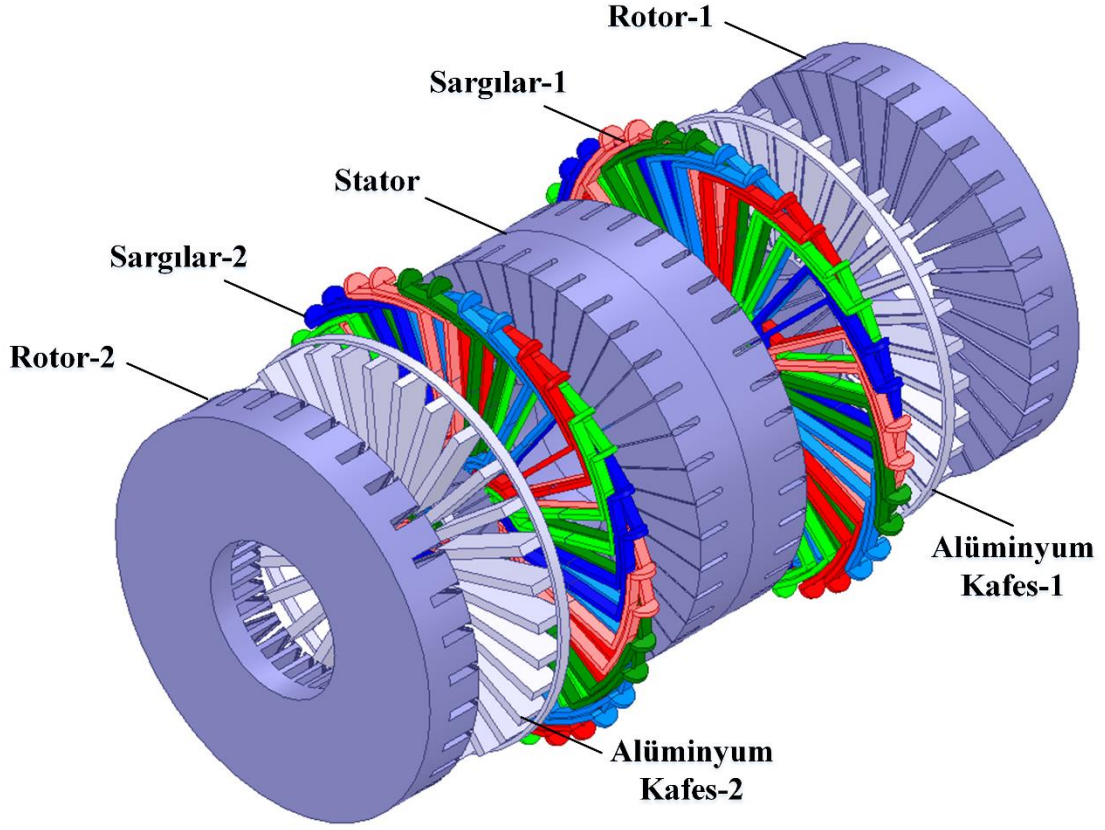
Bu tip makinelerde iki hava aralığı vardır. İki hava aralıklı makineler, her iki hava aralığının da aksenal olduğu (çift taraflı makineler) veya bir hava aralığı aksenal diğer hava aralığının radyal olduğu makineler olmak üzere ikiye ayrılır. Bu makineler stator ve rotor sayısına göre farklı yapılarda olabilmektedir. Çift stator-

tek rotorlu (ÇSTR) yapıda, rotor statorların arasındadır. Şekil 2.2’de ÇSTR yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2. 2 ÇSTR Yapısı

Tek stator-çift rotorlu yapıda (TSÇR) ise stator, iki rotorun arasındadır. Şekil 2.3’te TSÇR yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2. 3 TSÇR Yapısı

Yüksek moment yoğunluğu ve dengeli aksenal kuvvetler, çift taraflı motorların avantajları arasında yer almaktadır. Fakat maliyet açısından düşünecek olursak, iki statorun üretimi, özellikle küçük güçlü makinelerde tek taraflı yapıya göre daha maliyetlidir. Ancak yüksek momentli makinelerde, tek taraflı motor ile çift taraflı motor arasındaki üretim maliyeti farkı azalmaktadır. Çift taraflı motorlarda atalet momenti daha düşüktür ve rotor daha hafiftir [73], [74].

2.1.3 Çoklu Hava Aralıklı Makineler

Çift taraflı motor yapısı daha iyi performansa sahip olmasına rağmen, yüksek güçlü motorlar için çoklu hava aralıklı makine yapısı daha iyi bir seçimdir [59].

Çoklu hava aralıklı makineler de yapısal olarak iki topolojide incelenmektedir. Bu topolojiler makinedeki stator ve rotor sayısına göre belirlenmektedir. Eğer makinedeki statorların sayısı, rotorların sayısından daha fazla ise bu makineler dış stator-iç rotor makineler denilmektedir. Eğer makinedeki rotorların sayısı, statorların sayısından daha fazla ise bu makineler iç stator-dış rotor makineler

denilmektedir. İç stator-dış rotor makineler, daha yüksek verimlere sahip olmalarından dolayı daha çok tercih edilirler [75].

Bu topoloji, bir makine tipinden ziyade bir kavram olarak tanımlanabilir. Amaç, statorları ve rotorları uygulamanın gereksinimlerini karşılamak için dönüşümlü olarak yerleştirmektir. Bu konfigürasyonun bir avantajı da modülerlik sunmasıdır [76].

Bu tez çalışmasında tasarım ve analiz kolaylığı açısından da öne çıkan tek hava aralıklı motor topolojisi kullanılmıştır. Bu yapının hacminin daha küçük olması da bir avantajdır.

Endüstriyel olarak IE3 verimlilik sınıfında kullanılan geleneksel bir RAAM, tasarlanan EAAM'lere referans olarak alınmıştır.

2.2 Eksenel Akılı Asenkron Motor Tasarım Parametreleri

Döner manyetik alan, temel akıyı tüm yarıçapa (r) ve kutup form faktörüne (α) entegre ederek bulunmaktadır. Döner manyetik alan, bir kutup aralığı içinde oluşur ve çözümünde elektriksel açı değerleri kabul edilir. Eksenel döner manyetik alan denklem 2.1'deki gibi kabul edilir.

$$\phi_{ax} = \frac{2 \cdot B_{max}}{p} (r_2^2 - r_1^2) \cos \omega t \quad (2.1)$$

Burada ϕ_{ax} , disk tipi hava aralığındaki eksenel döner manyetik alan; B_{max} , hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu, p çift kutup sayısı; r_2 EAM nüvesinin dış yarıçapı ve r_1 , EAM nüvesinin iç yarıçapıdır. EAM'lerde stator ve rotor nüvelerinin iç ve dış yarıçapları birbirine eşittir.

Temel olarak, elektrik makinelerinin çıkış gücü (P_o), Denklem 2.2'de görüldüğü gibi kutup başına düşen akının bir fonksiyonudur.

$$P_o = f(\phi) \quad (2.2)$$

Bu nedenle, her iki asenkron motor tipi olan RAAM ve EAAM, döner manyetik alanın akı denklemleri kullanılarak karşılaştırılabilmektedir. Varga, 1986 yılında çalışmasında, her iki motor tipini, döner manyetik alanın akı denklemlerini

kullanarak karşılaştırmıştır [31]. Böylece EAAM akı eşitliği (Denklem 2.1), RAAM'nin akı eşitliği denklemi (Denklem 2.3) ile karşılaştırılmıştır.

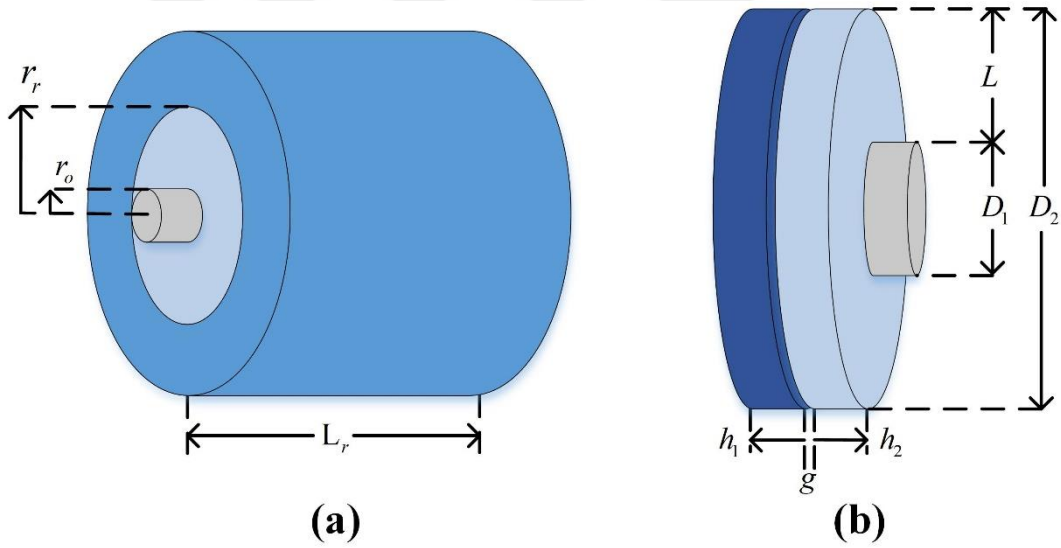
$$\phi_{rad} = \frac{4 \cdot B_{max}}{p} L_r (r_r - r_o) \cos \omega t \quad (2.3)$$

Burada ϕ_{rad} , silindirik hava aralığındaki radyal döner manyetik alandır. L_r RAM'nin uzunluğu; r_r , RAM'nin rotor yarıçapı ve r_o , shaft açıklığının yarıçapıdır.

RAAM ve EAAM için akı değerleri birbirine eşit ($\phi_{ax} = \phi_{rad}$) kabul edildiğinden, her iki akı değeri, Denklem 2.4'te görüldüğü gibi yeniden düzenlenmektedir.

$$2 \cdot L_r (r_r - r_o) = (r_2^2 - r_1^2) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4 eşitliğinin her iki tarafı, RAAM ve EAAM'nin enine kesit alanlardaki toplam manyetik akılarını ifade etmektedir. Şekil 2.4'te RAAM ve EAAM geometrileri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2. 4 (a) RAAM geometrisi, (b) EAAM geometrisi

Bu karşılaştırmada, farklı tip asenkron motorların (RAAM ve EAAM) yalnızca geometrik özellikleri dikkate alınmaktadır.

RAAM'daki shaft açıklığı (r_o) uzunluğu arttıkça, rotor yarıçapı uzunluğu (r_r) da artmaktadır. EAAM için sunulan denklemler tek bir hava aralığı içindir ve hacimsel varsayımlar yapılamamaktadır. Denklem 2.5'te, görünür iç gücün eşitliği verilmektedir ve r_1 ile r_2 sırasıyla D_1 ve D_2 'nin yarısına eşit olmaktadır.

$$S_i = C_{ax} \cdot (D_2^2 - D_1^2) \cdot n_1 \quad (2.5)$$

Burada S_i , görünür iç güç; C_{ax} , EAAM sabiti; D_2 , oluklar hesaba katılmadan nüvenin dış çapı; D_1 is nüve iç çapı ve n_1 EAAM'nin senkron hızıdır.

EAAM sabiti C_{ax} 'in eşitliği, Denklem 2.6'da sunulmaktadır.

$$C_{ax} = \frac{\pi^2 \cdot \alpha \cdot k_w}{\sqrt{2} \cdot 480} \cdot B_{max} \cdot F_1 = \frac{B_{max} \cdot F_1}{109,13} \quad (2.6)$$

Burada α sapma, kutup form faktörü; k_w , sargı faktörü ve F_1 ise dağıtılmış manyetomotor kuvvettir. k_w ve α değerleri genellikle kullanılan ortalama değerler olarak sırasıyla 0,9 ve 0,7 olarak alınmaktadır [77].

Nüvenin ortalama çapı D_a , Denklem 2.7'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$D_a = \frac{D_2 + D_1}{2} \quad (2.7)$$

Nüvenin radyal genişliği (L), Denklem 2.8 aracılığı ile hesaplanmaktadır.

$$L = \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (2.8)$$

EAAM'nin çap boyutlarını hesaplamak amacıyla denklemler oluşturulurken, oluklar ihmal edilmektedir. Oluklar ihmal edildiğinden, motorun hava aralığı sabit kabul edilmektedir. Bu durumda, nüvenin dış çapı (D_2), Denklem 2.9'da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 + \frac{2 \cdot p \cdot \phi_{ax}}{B_{max}}} \quad (2.9)$$

Stator ve rotorun toplam nüve hacmi (V), denklem 2.10'da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$V = V_s + V_r = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) \sum_i h_i \quad (2.10)$$

Burada V_s , stator nüvesinin hacmi; V_r rotor nüvesinin hacmi ve $\sum_i h_i$, makinenin toplam yüksekliğidir.

IEEE 12-2017 numaralı Standart'a göre verim, Denklem 2.11'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + \sum P_l} \quad (2.11)$$

Burada η , yüzdesel olarak verimi; P_o , çıkış gücünü ve P_i , giriş gücünü ifade etmektedir [39]. $\sum P_l$, motorun toplam kayıplarını ifade etmekte ve Denklem 2.12'deki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sum P_l = P_c + P_{cu} + P_{FW} + P_{STR} \quad (2.12)$$

Burada P_c , stator ve rotor nüve kayıplarını; P_{cu} , stator ve rotor bakır kayıplarını; P_{FW} , mekanik kayıplardan olan sürtünme ve vantilasyon kayıplarını ve P_{STR} , kaçak yük kayıplardır. Motor yük altında çalışırken oluşan harmonik enerjiler, kaçak yük kayıplarını artırmada önemli rol oynarlar. Eğer yük akımı harmonik bileşenlerden oluşmaktaysa, akı genliği ve dalga şekli bozulmakta ve böylece harmonik momente, titreşimlere ve gürültüye neden olmaktadır [40,41]. IEEE 112-2017 numaralı Standart'ta belirtilen kaçak yük kayıpları Tablo 2.1'de sunulmaktadır. Tablo 2.1'e göre, çalışmada tasarlanan EAAM'ler için nominal yükün kaçak yük kayıpları yüzdesi 1,8 olarak alınmıştır [78], [79].

Tablo 2. 1 Kaçak yük kayıpları için IEEE 112-2017 numaralı standartta belirlenen değerler

Makine gücü (kW)	Nominal yükün kaçak yük kaybı yüzdesi
0,7457 - 90	% 1,8
91 - 375	% 1,5
376 - 1850	% 1,2
≥ 1851	% 0,9

Bu çalışmada, transient analizler ve moment değeri hesaplamaları ANSYS Maxwell Programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzdesel olarak moment dalgalanması

(τ_{ripple}), Denklem 2.13'te belirtildiği üzere, maksimum moment (τ_{max}) ve minimum moment (τ_{min}) arasındaki farkın, ortalama moment (τ_{avg}) değerine oranı olarak hesaplanmaktadır.

$$\tau_{ripple} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{avg}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

Farklı rotor oluk sayılarına dayalı EAAM analizleri bir sonraki bölümde incelenmektedir.

2.3 Eksenel Akıllı Asenkron Motora Uygulanan Kaykı Açılarının Hesaplanması

Bu tez çalışmasında, rotor oluklarına, daha iyi verim ve daha az moment dalgalanması elde edebilmek için kaykı açısı uygulanmaktadır. Kaykı açısı uygulanmayan modellerin tüm oluk sayıları için kaykı açıları verilmektedir. Kaykı açıları, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak verilmiş olup; analizler stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak yapılmaktadır.

Stator oluk sayısına göre rotora verilen kaykı açısının analizleri Denklem (2.14)-(2.16)'da sunulmaktadır.

$$\beta_s = \frac{360}{N_s} \quad (2.14)$$

$$1,5 \cdot \beta_s = \frac{360}{N_s} = 15^\circ \quad (2.15)$$

$$2 \cdot \beta_s = \frac{360}{N_s} = 20^\circ \quad (2.16)$$

Bu denklemlerde β_s , derece cinsinden stator oluk sayısına göre kaykı açısı, N_s stator oluk sayısıdır. Denklem 14, 15 ve 16 kullanılarak, rotora verilecek kaykı açıları 10° , 15° ve 20° olarak hesaplanmaktadır. Bu değerler tüm EAAM tasarımları için aynıdır ve hepsi için analiz edilmektedir.

Rotor oluk sayısına göre rotora verilen kaykı açısının analizleri Denklem (2.17) ve (2.18)'de sunulmaktadır.

$$\beta_r = \frac{360}{N_r} \quad (2.17)$$

$$2 \cdot \beta_r = \frac{360}{N_r} \quad (2.18)$$

Bu denklemlerde β_r , derece cinsinden rotor oluk sayısına göre kaykı açısı, N_r rotor oluk sayısıdır.

Bu bağlamda, bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak üç farklı kaykı açısı daha belirlenmiştir. Böylece, EAAM geometrileri için kullanılan kaykı açıları: β_s , $1,5 \cdot \beta_s$, $2 \cdot \beta_s$, β_r ve $2 \cdot \beta_r$; 28, 30, 32, 34, 38, 40 ve 42 rotor oluklu modeller için uygulanmış olup, analiz sonuçları ileriki bölümlerde sunulmuştur.

RADYAL AKILI ASENKRON MOTOR İLE EKSENEL AKILI ASENKRON MOTORUN GENEL TASARIM PARAMETRELERİ

Bu bölümde, referans alınan RAAM ile analiz edilen EAAM'lerin genel tasarım parametreleri sunulmaktadır. Ek olarak, tasarlanan birçok EAAM, referans gösterilen RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarımlar yapılırken, stator üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamakla birlikte tasarlanan tüm motorların statorları birbirinin aynısıdır. Motorlarda aynı stator kullanılırken, rotor oluk sayıları ve değişik oluk sayılarındaki rotorlara verilen kaykılar açıları değişmektedir. Benzetim çalışmaları gerçekleştirilirken ANSYS Maxwell programı kullanılmıştır.

3.1 Asenkron Motorların Verimlilik Açısından Sınıflandırılması

Özellikle, asenkron motorların sanayide kullanımı düşünüldüğünde küresel sanayi enerji tüketiminin %70'inden fazlasını kapsadığı görülmektedir. Bu bağlamda, bu tür makinelerin verimindeki ufak bir artışın bile dünya çapındaki enerji tüketiminde çok ciddi bir etkisi olacaktır. Orta gerilim çift terimli bir sanayi kullanıcısı 30 kW'lık bir asenkron motorunu standart verim (IE1) enerji verimliliği sınıfından IE3 enerji verimliliği sınıfında bir motor ile değiştirdiği takdirde kWh ve TL bazlı yıllık toplam tasarruf miktarları 8977,25 kWh ve 4699,31 TL olarak hesaplanmıştır. Burada enerji bedeli "EPDK Tarafından Onaylanan ve 1 Ekim 2020 Tarihinden İtibaren Uygulanacak Faaliyet Bazlı Tarifeler"i dikkate alınarak 52,3469 krş/kWh olarak alınmıştır. Ayrıca yıllık kWh çalışma süresi hesaplanırken, bir yıl 365 gün olarak alınmış ve motorun günlük 24 saat çalıştığı varsayılmıştır. Sadece bir tane motorun

enerji sınıfının değişmesinde bile bu denli bir tasarruf sağlanırken sanayide kullanılan motorların yüksek enerji verimliliği sınıfında seçilmesinin hem işletme hem de küresel ölçekte ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

Asenkron motorların enerji verimliliği sınıflandırmasında birçok standart kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanı ise 2014 yılında yayınlanan IEC 60034-30-1 standardıdır. Bu standartta dört enerji verimliliği sınıfı mevcuttur. Tablo 3.1’de IEC 60034-30-1 standardında yer alan enerji verimliliği sınıfları gösterilmektedir.

Tablo 3. 1 IEC 60034-30-1 enerji verimliliği sınıfları

Enerji verimlilik sınıf adı	Tanımlama
Süper premium verim	IE4
Premium verim	IE3
Yüksek verim	IE2
Standart verim	IE1

IEC 60034-30-1 standardında yer alan enerji verimliliği tablosu EK A’da verilmiştir [80]. Bu çalışmada, 30 kW’lık 6 kutuplu RAAM ile EAAM’ler tasarlandığı için EK A’da sunulan tablodan sadece bu değerlere ait bilgiler Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3. 2 IEC 60034-30-1 enerji verimlilik sınıfları sınır değerleri

Tanımlama	Verim (%)
IE4	94,2
IE3	92,9
IE2	91,7
IE1	90,2

IEC 60034-30-1 standardı sadece 50 Hz ve 60 Hz makineler için geçerliken bu standardın kapsamına girmeyen motorları kapsayacak bir standart 2016 yılında

değişken hızlı motorlar ismi ve IEC 60034-30-2 kodu ile yayınlanmıştır. IEC 60034-30-1 standardı kapsamına girmeyen asenkron motorlar için enerji verimliliği sınıfları için IEC 60034-30-2 standardı geçerlidir. IEC 60034-30-2 standardı kapsamında enerji verimliliği sınıflarının sınır verim değerleri belirlenirken IEC 60034-30-1 standardı verim değerlerinin referans değer olarak kullanıldığı hesaplama yöntemi Denklem 3.1’de sunulmaktadır [81].

$$\eta_n = \frac{1}{1 + (1 + r_{HL}) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{ref}} - 1 \right)} \quad (3.1)$$

Burada η_n IEC 60034-30-2 standardı enerji verimliliği sınıfları için sınır verim değeri, η_{ref} ilgili motor değeri için IEC 60034-30-1 standardındaki sınır verim değerini ve r_{HL} harmonik kayıplarını göstermektedir. Harmonik kayıplar, 90 kW ve altındaki güç değerine sahip motorlar için 0,15 yani %15 olarak alınırken, 90 kW üstünde güce sahip motorlar için 0,25 yani %25 olarak hesaplamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan motorlar 30 kW olduğu için harmonik kayıplar için 0,15 kullanılmıştır. Denklem 3.1 kullanılarak elde edilen IEC 60034-30-2 standardına göre yeni verimlilik sınıfı sınır değerleri Tablo 3.3’te sunulmuştur.

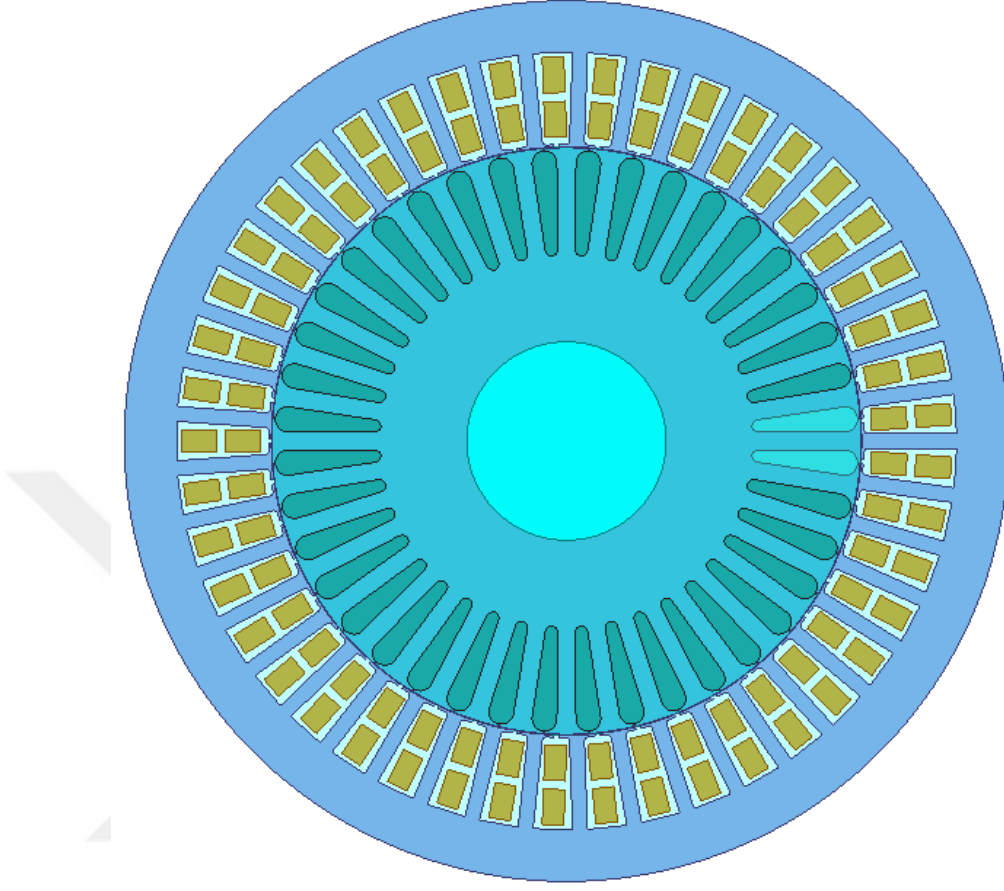
Tablo 3. 3 IEC 60034-30-2 enerji verimlilik sınıfları sınır değerleri

Tanımlama	Verim (%)
IE4	93,39
IE3	91,92
IE2	90,57
IE1	88,89

3.2 Radyal Akıllı Asenkron Motor Modeli

Bu bölümde, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir RAAM’nin parametreleri hakkında bilgi verilmektedir. Referans olarak ele alınan bu motorun, verimi %93,2 ve moment dalgalanması %7,49’dur. IE3 verimlilik sınıfında olan bu motorun analiz sonuçları ANSYS Maxwell programı kullanılarak elde edilmiştir.

Motor modeli, iki boyutlu (2D) analize uygun olduğu için programdaki analizler iki boyutlu olarak yapılmaktadır. Motorun, ANSYS modeli Şekil 3.1'te gösterilmektedir.



Şekil 3. 1 RAAM model geometrisi

RAAM modelinde stator nüve malzemesi olarak M19_24G tipi çelik kullanılmıştır. Referans alınan RAAM'ye ait genel tasarım parametreleri Tablo 3.4'te sunulmaktadır.

Tablo 3. 4 RAAM tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Nominal güç	30 kW
Nominal gerilim	400 V
Nominal hız	2980 rpm
Frekans	150 Hz
Stator nüvesi dış çapı	355 mm
Rotor nüvesi dış çapı	236,5 mm
Motor uzunluğu	250 mm
Stator/rotor oluk sayıları	45/40

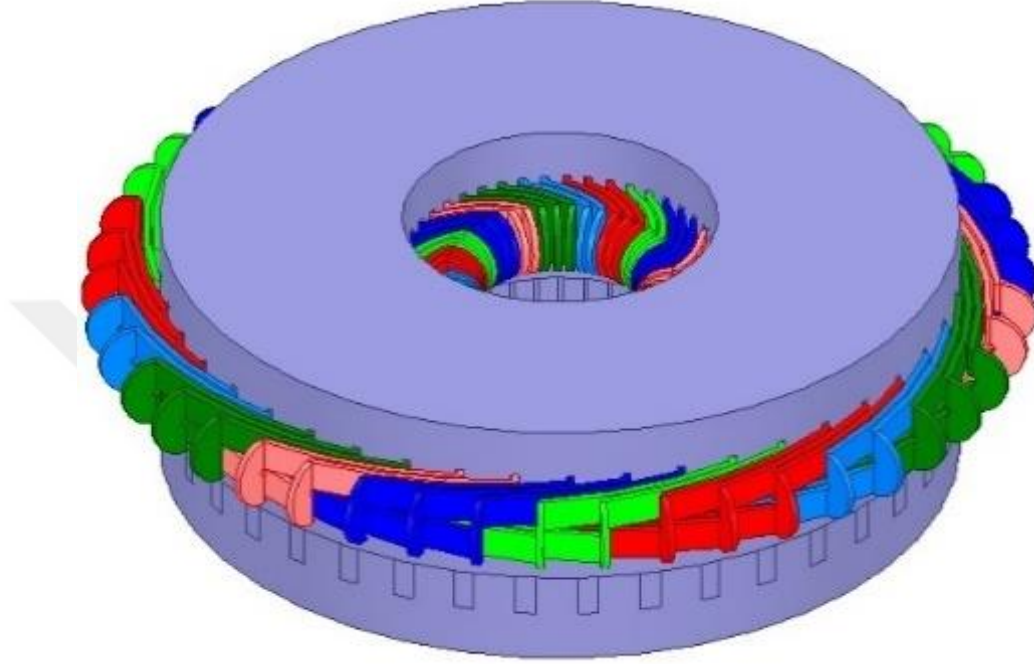
Referans RAAM'nin nominal gücü endüstride sıklıkla kullanılan değer olan 30 kW olup, nominal gerilimi 400 V, nominal hız değeri ise 2895 rpm'dir. Stator dış çapı 355 mm ve rotor dış çapı 236,5 mm olarak belirlenirken, tasarlanan EAAM'lerin de dış çapının 355 mm olarak seçilmesine dikkat edilmiştir. RAAM'nin uzunluğu 250 mm ve stator oluk sayısı 45, rotor oluk sayısı ise 40'tır.

3.3 Eksenel Akıllı Asenkron Motor Modeli

EAAM'nin elektromanyetik analizleri Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Diğer makine türlerinden farklı olarak, EAM analizlerinde, 2D analiz ayrıntılı sonuçlar vermediğinden, bu motorun analizi için üç boyutlu (3D) analiz zorunludur. Bu nedenle analizler, üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde yapılmakta ve bu analizlerde ağ yoğun olarak atıldığından, benzetim çalışması süresi oldukça fazla zaman almaktadır. Ayrıca ayrıntılı analiz için işlemcinin izin verdiği ölçüde ağ sayısı yüksek tutulmuştur. Bu tez çalışmasında, ANSYS Maxwell programı, makinelerin manyetik alan analizine uygun olması ve geniş kullanım alanına sahip olması nedeniyle SEA analizi için tercih edilmiştir.

EAAM analizlerine başlarken ilk olarak RAAM ile aynı stator ve rotor oluk sayılarına sahip bir modele ait analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de RAAM ile aynı oluk

sayılarına sahip EAAM modeli gösterilmektedir. Bu model tasarlanırken rotoruna kaykı açısı uygulanmamıştır. Benzetim çalışması sonuçlarına göre; EAAM'e ait moment dalgalanmasının %7,4, motorun veriminin ise %82,83 olduğu görülmektedir. Bu verim değeri ile EAAM modeli hiçbir enerji verimliliği sınıfına girmemektedir.



Şekil 3. 2 EAAM model geometrisi

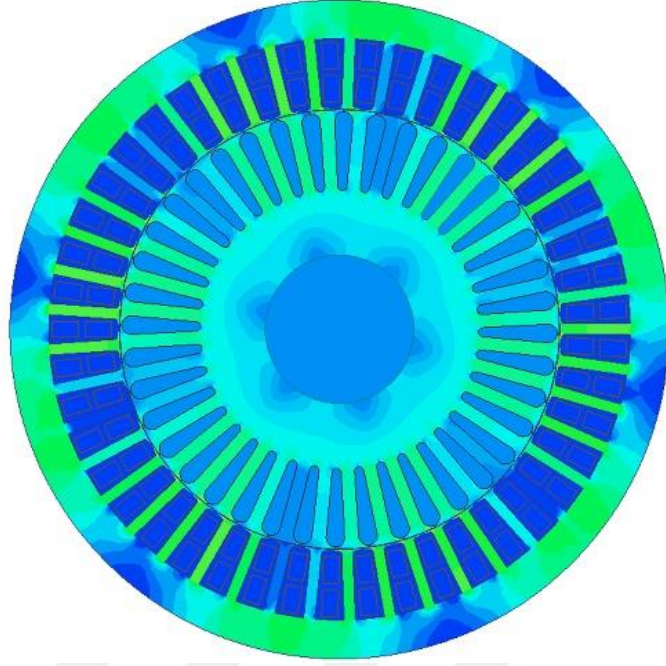
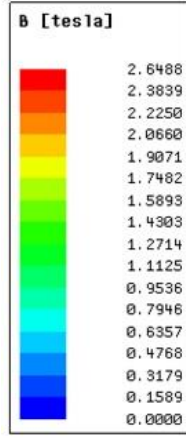
Tasarlanan farklı EAAM'lara ait genel tasarım parametreleri Tablo 3.5'te sunulmaktadır. Bütün analizlerde EAAM'lara ait güç değeri 30 kW olarak belirlenmiştir. Bununla beraber uygulanan gerilim 400 V, nominal hız ise 2895 rpm olarak uygulanmıştır. Ayrıca, tasarım açısından bilindiği üzere EAAM'larda stator ve rotor birbirlerine paralel olarak tasarlandığı için dış ve iç çapları aynı değerdedir. Stator/rotor dış çapı 355 mm ve iç çapı 140 mm olarak belirlenirken, ileriki çalışmalarda bu motorların elektrikli araçlarda kullanılan motorlar olarak da kullanılabilecek boyutlarda olmasına dikkat edilmiştir. Bu düşünce doğrultusunda stator uzunluğu 60 mm ve rotor uzunluğu 55 mm gibi küçük boyutlarla sınırlandırılmıştır. Stator oluk sayısı 36 olarak tasarlanırken tüm EAAM'ler için statorda bir değişim yapılmamıştır. Dolayısıyla, bütün tasarımlar sonucunda rotordaki değişimlerin etkisi belirgin bir şekilde incelenmiştir.

Tablo 3. 5 EAAM'lere ait genel tasarım parametreleri

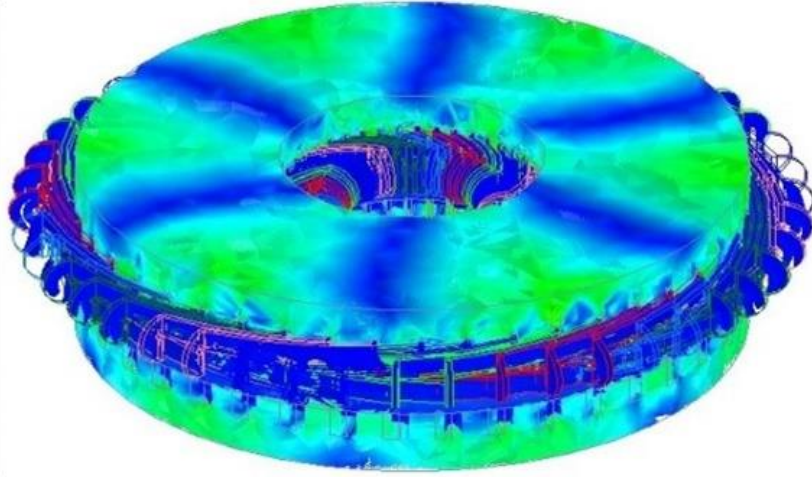
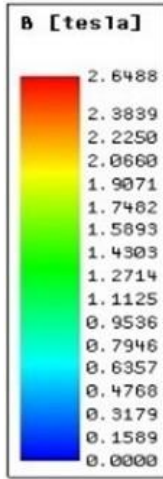
Parametre	Değer
Nominal güç	30 kW
Nominal gerilim	400 V
Nominal hız	2895 rpm
Frekans	150 Hz
Stator/Rotor nüvesi dış çapı	355 mm
Stator/Rotor nüvesi iç çapı	140 mm
Hava aralığı uzunluğu	2 mm
Stator/rotor uzunluğu	60/55 mm
Stator oluk sayısı	36
Rotor oluk sayısı	28, 30, 32, 34, 38, 40, 42

3.4 Radyal Akılı Asenkron Motor Modeli ile Eksenel Akılı Asenkron Motor Modeli Karşılaştırması

Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'teki sonuçlar ele alındığında, aynı stator ve rotor oluk sayılarına göre RAAM ile EAAM karşılaştırıldığında verimin %93,2'den %82,83'e %12,5'lik ciddi bir düşüş yaşadığı görülmüştür. Bununla birlikte moment dalgalanmaları %7,49 ile %7,4 olarak benzerlik göstermektedir. Bu tez çalışmasının ana amacı yaygın olarak kullanılan bir RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında bir EAAM analizinin gerçekleştirilmesi olduğu için yapılan EAAM analizinin IE3 enerji verimliliği sınıfında bir modele dönüştürebilmek adına bir sonraki bölümde farklı rotor oluk sayıları ve çeşitli rotor kaykçı açıları kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3. 3 (a) RAAM manyetik akı yoğunluğu dağılımları, (b) EAAM manyetik akı yoğunluğu dağılımları

Şekil 3.3 (a)'da gösterilen manyetik akı yoğunluğuna ait gösterge çizelgesi ile Şekil 3.3 (b)'de gösterilen EAAM modeline ait manyetik akı yoğunluğuna ait gösterge çizelgesi değerleri iki modelin karşılaştırmasının daha iyi yapılabilmesi adına aynı alınmıştır. Buradan, RAAM'ye ait manyetik alan yoğunluğu dağılımının oluk kenarlarında hafif artış gösterdiği görülse de bu dağılımın motorun çalışması açısından uygun olduğu görülmektedir. RAAM'ye benzer şekilde EAAM'de de olukların köşelerinde manyetik alan zorlanmalarından kaynaklı hafif bir artışın

olduğu gözlemlenmektedir. Her iki model için de bu manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının ideal çalışma şartlarına uygun olduğu görölmektedir.



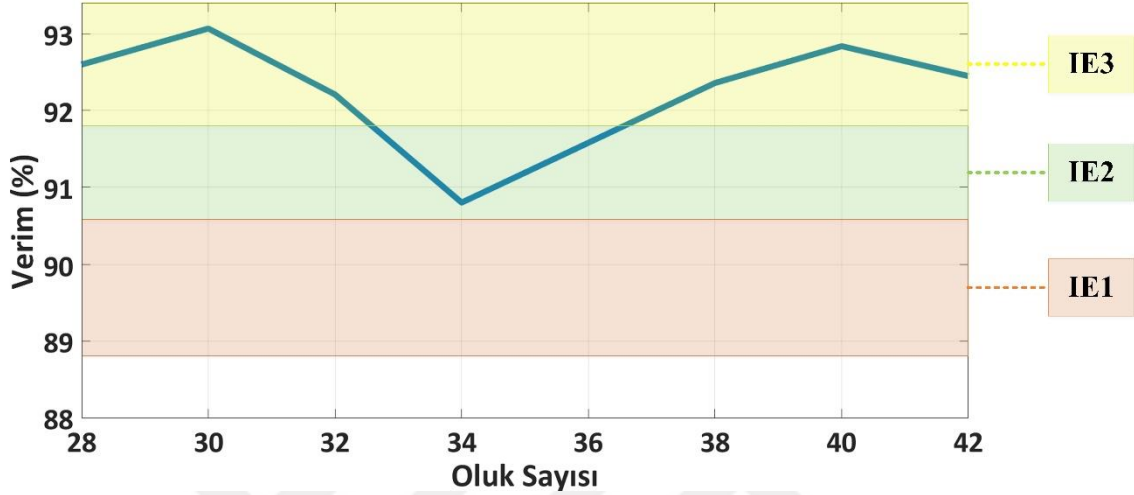
Bu bölümde, referans alınan RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında olacak şekilde EAAM tasarımları yapılmıştır. Bu tasarımlar yapılırken stator üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamakta ve her bir EAAM için aynı stator nüve ve sargıları kullanılmaktadır. Aşağıda detaylı bir şekilde sunulan EAAM'lerin statorları aynı olsa da rotor oluk sayıları ve kaykçı açıları değişiklik göstermektedir. Toplamda yedi farklı rotor oluk sayısı için yapılan analizlerin rotor oluklarına kaykçı açısı uygulanmamış ve kaykçı açıları uygulanmış haldeki analizleri sonraki alt başlıklarda incelenmektedir. Bu benzetim çalışmalarının sonuçları dikkate alınarak en uygun model üzerinde YMK malzeme kullanılarak verim ve moment üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

4.1 Farklı Rotor Oluk Sayılarına göre Tasarlanan Eksenel Akılı Asenkron Motor Sonuçları

Bu bölümde, EAAM'nin sırasıyla 28, 30, 32, 34, 38, 40 ve 42 olmak üzere yedi farklı rotor oluk sayısına göre kaykçı açısı verilmemiş ve kaykçı açısı verilmiş analizleri yapılmıştır. Rotor oluk sayıları belirlenirken makine boyutuna göre rotor oluk genişlikleri dikkate alınmıştır. Bu nedenle, rotor, maksimum 42 oluklu ve minimum 28 oluklu olacak şekilde belirlenmiştir. 36 oluklu rotor tasarımı, stator oluk sayısı 36 olduğu için stator ve rotor oluk alanları üst üste geleceğinden, manyetik akı üretiminin mümkün olmamasından dolayı yapılamamaktadır.

Moment dalgalanması, elektrik makine tasarımlarında en zorlu parametrelerden biri olarak bilinmektedir. Makine tasarımı yapılırken, moment dalgalanmasının

değerini düşürmek de amaçlanır. Bu nedenle karşılaştırma yapılırken moment dalgalanmaları da dikkate alınmaktadır. Şekil 4.1’de rotoruna kaykısı açısı uygulanmamış EAAM’nin, 28’den 42’ye kadar olan yedi farklı rotor oluk sayısına göre yapılan analizlerinden elde edilen verim ve Şekil 4.2’de ise moment dalgalanmalarının grafikleri gösterilmektedir.

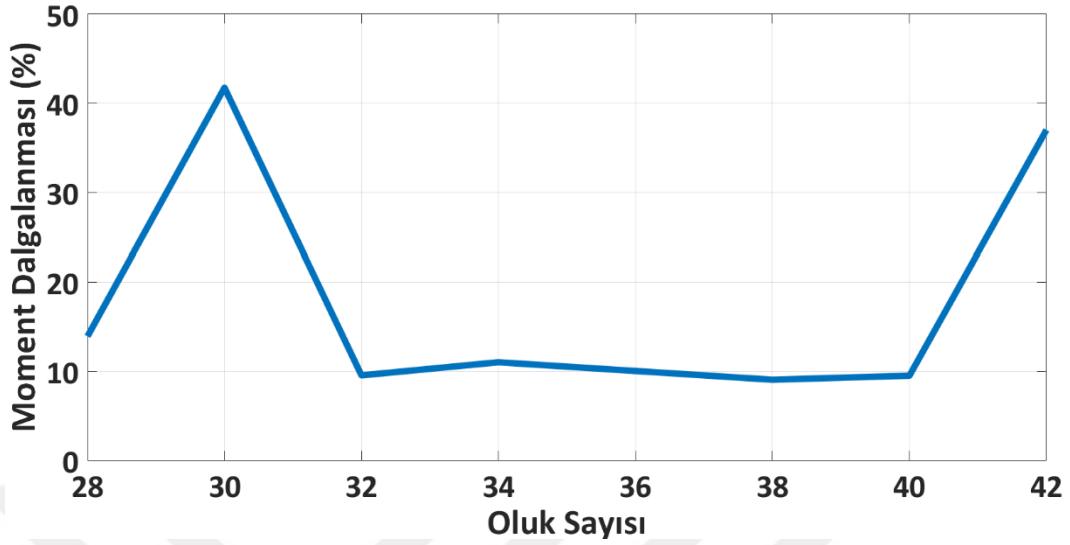


Şekil 4. 1 Farklı oluk sayılarına göre tasarlanan EAAM’lerden elde edilen verimler

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, referans alınan RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfı olan IE3 verimlilik sınıfında, altı adet model vardır. Bunlar, 28, 30, 32, 38, 40 ve 42 rotor oluklu modellerdir. Yalnızca 34 rotor oluk sayısına sahip olan model, daha düşük bir verimlilik sınıfı olan IE2 sınıfına aittir.

Rotoruna kaykısı açısı uygulanmamış 28, 30, 32, 34, 38, 40 ve 42 oluklu modellere ait moment değişimi grafikleri Ek B’de sunulmuştur. Şekil 4.2’de 30 ve 42 rotor oluk sayısına sahip olan EAAM’lerdeki moment dalgalanması diğer rotor oluk sayıları ile kıyaslandığında çok farklılık göstermektedir. Bunun nedeni olarak bu iki oluk sayısının, motorun kutup sayısı olan 6’nın katları olan sayılar olması söylenebilmektedir. Bu nedenle, bu iki rotor oluk sayısına sahip olarak tasarlanan motorlar, manyetik alan geçişinde daha fazla zorlanmaktadır. Tasarlanan diğer beş adet EAAM ‘nin moment dalgalanmalarından bahsedecek olursak, şekilden de görüldüğü gibi, yalnızca 28 ve 34 rotor oluk sayılı tasarımlardaki moment dalgalanmaları %10’nun üzerindeyken, diğer üç tasarım olan 32, 38 ve 40 rotor oluk sayısına sahip EAAM’lerdeki moment dalgalanmaları %9 olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, moment dalgalanmaları açısından en iyi performansa sahip olan EAAM modelleri, 32, 38 ve 40 rotor oluklu modellerdir.



Şekil 4. 2 Farklı oluk sayılarına göre tasarlanan EAAM'lerin moment dalgalanması grafiği

Farklı oluk sayılarına göre tasarlanan, rotorlarına kaykısı açısı uygulanmamış modellere ait verim ve moment dalgalanması değerleri Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4. 1 Farklı oluk sayılarına göre tasarlanan, rotorlarına kaykısı açısı uygulanmamış modellere ait verim ve moment dalgalanması değerleri

Rotor Oluk Sayısı	Moment Dalgalanması	Verim (%)	Verimlilik Sınıfı
28	13,9	92,6	IE3
30	41,7	93,07	IE3
32	9,5	92,21	IE3
34	11	90,8	IE2
38	9,04	92,36	IE3
40	9,49	92,84	IE3
42	36,9	92,45	IE3

Farklı rotor oluk sayılarına göre yapılan analizler neticesinde, en yüksek verime sahip olmasa da referans RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında olduğundan ve en iyi verim elde edilen model ile aralarında çok az bir fark bulunduğundan, rotor oluk sayısı 38 olan modelin, moment dalgalanması çok daha az olduğu için yedi farklı rotor oluk sayısına göre yapılan EAAM analizleri içerisindeki en iyi model olduğu söylenebilmektedir. EAAM modellerinin rotoruna kaykısı açısı uygulanarak verim ve moment dalgalanması üzerine etkileri Bölüm 4.2’de incelenmektedir.

4.2 Rotorlarına Kaykısı Açısı Uygulanan Eksenel Akı Asenkron Motorların Analiz Sonuçları

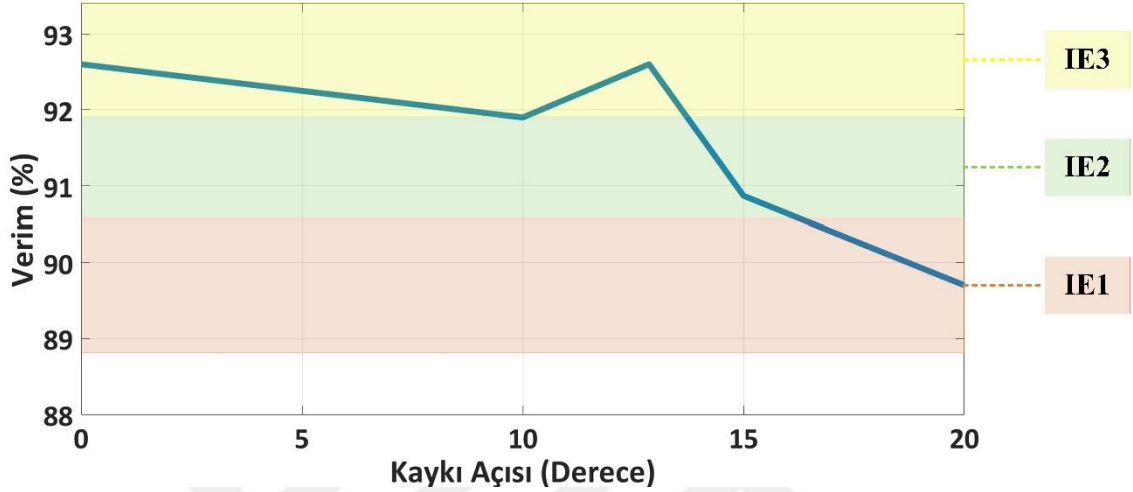
Bu bölümde yedi farklı rotor oluk sayısı için yapılan EAAM analizleri genişletilerek rotorlarına kaykısı açıları uygulanacaktır. Kaykısı açıları belirlenirken hem stator hem de rotor oluk sayıları dikkate alınmış ve Bölüm 2’de gösterildiği şekilde her bir EAAM modeli için beş farklı kaykısı açısı değeri belirlenmiştir. Rotoruna kaykısı uygulanmış 28, 30, 32, 34, 38, 40 ve 42 oluklu modellere ait moment değişimi grafikleri Ek B’de sunulmuştur.

Analizlerin ilk adımı olarak, 28 rotor oluklu EAAM modeline kaykısı açıları uygulanmıştır. Bölüm 4.1’de yapılan analizlerin sonucunda kaykısı açısı uygulanmamış, 28 rotor oluklu EAAM modeline ait analiz sonuçlarında, moment dalgalanmasının %13,9, veriminin ise %92,6 olduğu görülmektedir. Bu verim değeri ile model IE3 enerji verimlilik sınıfına girmektedir. 28 rotor oluklu model için analizlerde uygulanan kaykısı açıları Tablo 4.2’de sunulmaktadır.

Tablo 4. 2 Rotoru 28 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykısı açıları

Kullanılan denklem	Kaykısı açısı (°)
β_s	10
$1,5 \cdot \beta_s$	15
$2 \cdot \beta_s$	20
β_r	12,86
$2 \cdot \beta_r$	25,72

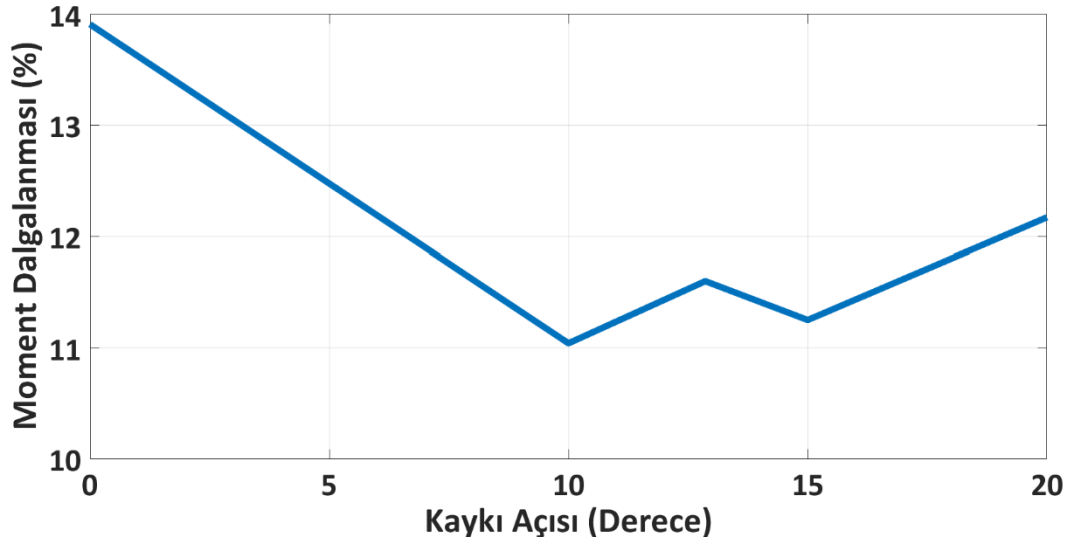
Tablo 4.2'ye göre uygulanan kaykçı açıları sırası ile 10°, 12,86°, 15° ve 20°'dir. Stator ve rotor arasında meydana gelen aşırı kaykçı açısı uygulanmasından dolayı oluşan çakışma sonucunda 25,72°'lik kaykçı açısıyla analizlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmamıştır. Analizlerde, farklı kaykçı açıları uygulanarak elde edilen verimler ile verimlere göre verimlilik sınıfı sonuçlarının grafiğı Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



Şekil 4. 3 28 oluklu EAAM'nin kaykçı açısı analizlerinden elde edilen verim değeri

Şekil 4.3'ten, rotora kaykçı açısı uygulandığında verimde bir artış olmadığı görülmektedir. Fakat stator oluk sayısı göz önüne alınarak uygulanan kaykçı açısı değeri için inceleme yapıldığında, uygulanan kaykçı açısı arttıkça verimin azaldığı görülmektedir. Öte yandan, rotor oluk sayısı dikkate alınarak kaykçı açıları uygulandığında verim kaykçı açısı uygulanmamış model ile aynı değerde kalmaktadır.

Farklı rotor kaykçı açıları uygulanmış 28 rotor oluklu EAAM analiz sonuçlarından elde edilen moment dalgalanmalarının grafiğı ise Şekil 4.4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. 4 28 oluklu EAAM'nin kaykı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları

Rotoru 28 oluklu EAAM için moment dalgalanması değişimi açısından incelendiğinde hem stator hem de rotor olukları dikkate alınarak rotoruna kaykı açısı uygulanmasının kaykı açısı uygulanmamış modele göre daha iyi moment dalgalanması sonuçları elde edilmiştir. En az moment dalgalanması ise %11,04 ile rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modelde elde edilmiştir.

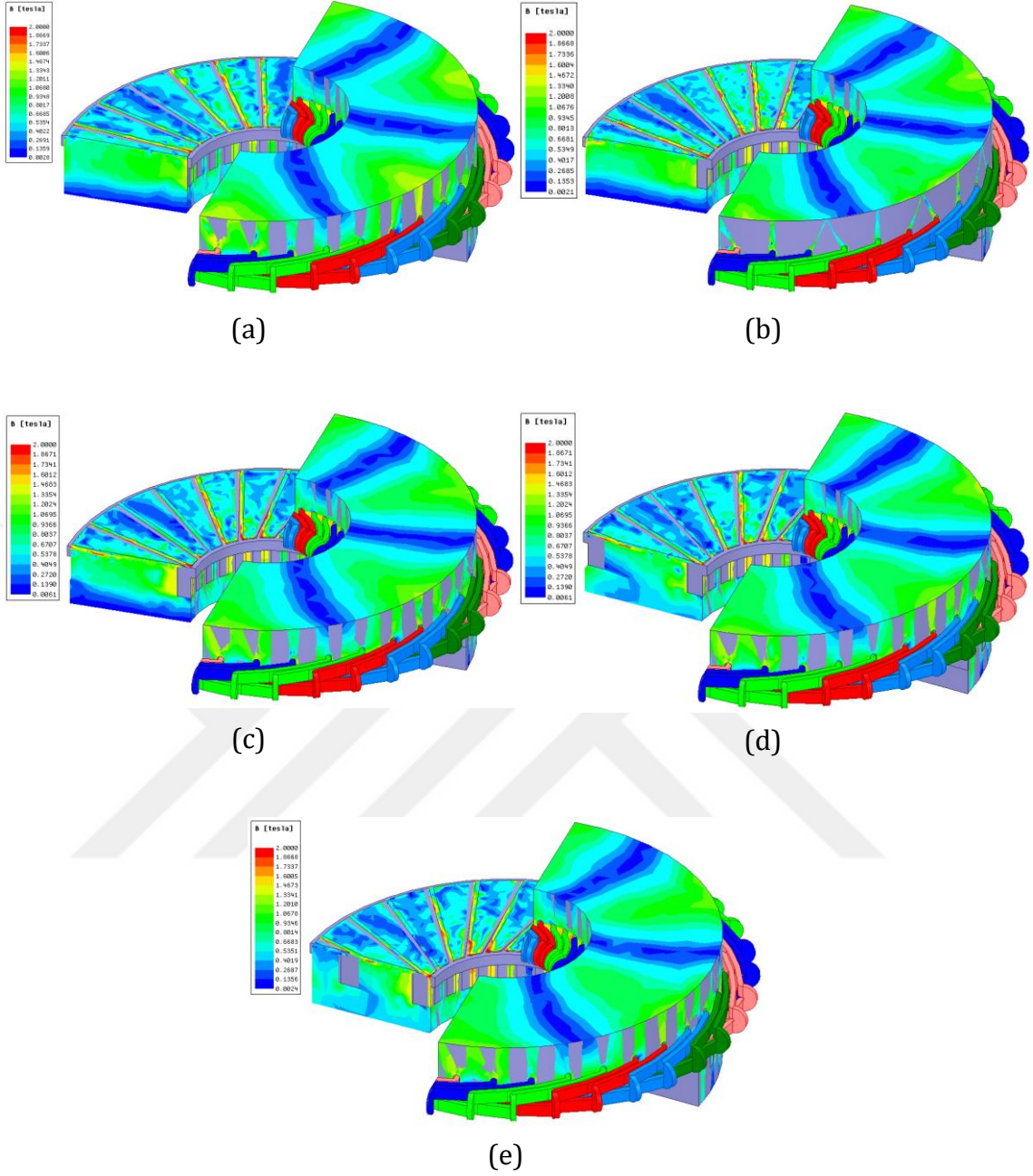
Rotoru 28 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılara göre elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.3'te sunulmaktadır.

Tablo 4. 3 Rotoru 28 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kayk1 aç1larına göre elde edilen analiz sonuçları

Kayk1 açısı (°)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıfı
0	13,91	92,6	IE3
10	11,04	91,9	IE2
12,86	11,6	92,6	IE3
15	11,25	90,87	IE2
20	12,17	89,7	IE1
25,72	-	-	-

Rotoru 28 oluklu modellerin tamamı göz önünde tutulduğunda enerji verimliliğı sınıfının IE3 olması ve moment dalgalanma miktarının ise diğ1r modellere kıyasla çok yüksek olmaması sebebiyle kayk1 açısı olarak β_r uygulanan modelin en iyi 28 rotor oluklu model olduğı söylenebilir.

Şekil 4.5'te rotoru 28 oluklu EAAM'nin rotoruna, kayk1 açısı uygulanmamış ve uygulanmış her bir kayk1 açısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımları sunulmuştur. Bu analizlerde EAAM'nin yarım modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. 5 28 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykı açısı uygulanmamış model (b)10° kaykı açısı uygulanmış model, (c) 12,86° kaykı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykı açısı uygulanmış model, (e) 20° kaykı açısı uygulanmış model

Şekil 4.5'ten, rotoru 28 oluklu EAAM'nin her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir.

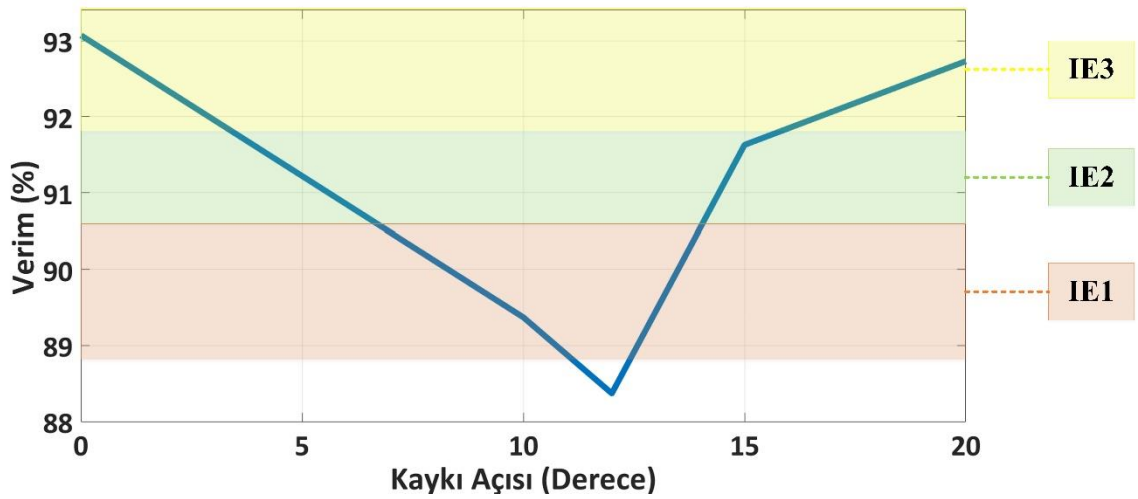
İkinci analiz adımı olarak, kaykı açısı uygulanmayan modeller arasından rotoru 30 oluklu EAAM modeline, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak motorun

rotoruna kaykçı aılları uygulanmıştır. Rotoruna kaykçı açısı uygulanmayan modellere ait analizlerin sonucunda, 30 rotor oluklu EAAM modelinin, en yüksek moment dalgalanma değerine ve en iyi verime sahip olduğu görülmüştür. şekil 4.5'te, kaykçı açısı uygulanmayan rotoru 30 oluklu EAAM modeline ek olarak, rotoruna uygulanan kaykçı aılları Tablo 4.4'de sunulmaktadır.

Tablo 4. 4 Rotoru 30 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykçı aılları

Kullanılan denklem	Kaykı açısı (°)
β_s	10
$1,5 \cdot \beta_s$	15
$2 \cdot \beta_s$	20
β_r	12
$2 \cdot \beta_r$	24

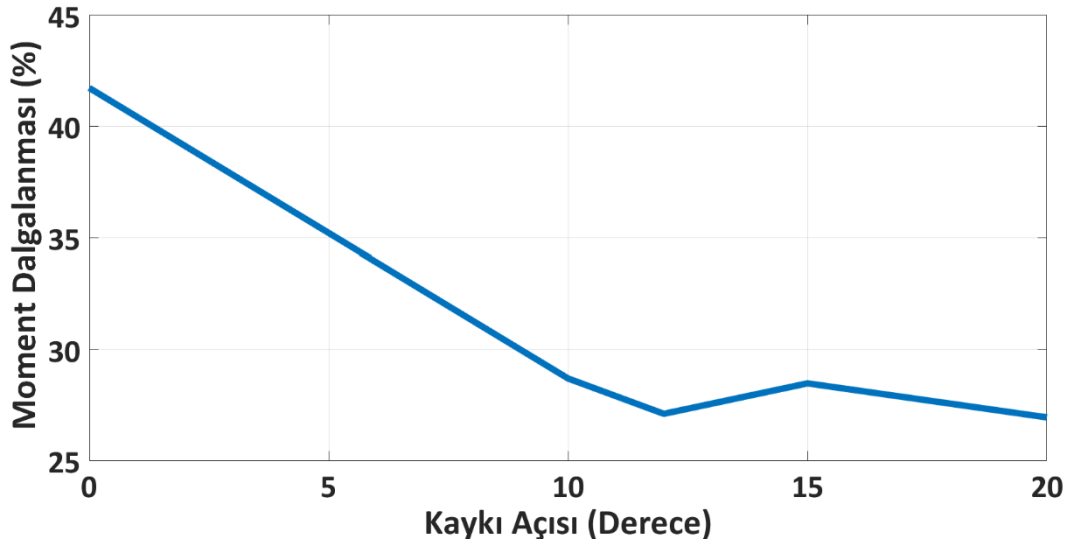
Tablo 4.4'e göre 30 oluklu EAAM'ye uygulanan kaykçı aılları sırası ile 10°, 12°, 15° ve 20°'dir. Kaykı açısı uygulanan rotoru 30 oluklu EAAM'den elde edilen verimler ve verimlilik sınıfları şekil 4.6'da sunulmaktadır. Bu modele uygulanması planlanan rotor oluk sayısı dikkate alınarak elde edilen ikinci kaykçı açısının (24°) analizleri de, bir önceki modelde olduğu gibi aşırı kaykıdan kaynaklanan çakışmadan dolayı gerçekleştirilememiştir.



Şekil 4. 6 30 oluklu EAAM'nin kaykçı açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri

Şekil 4.6'dan, rotora kaykçı açıları uygulandığında, kaykçı açısı uygulanmayan EAAM ile karşılaştırıldığında, motorun veriminde bir artış gözlenememektedir. Ancak, rotoruna stator oluk sayısı dikkate alınarak kaykçı açısı uygulanmış modeller kendi aralarında karşılaştırıldığında ise uygulanan kaykçı açısı arttıkça verimin arttığı görülmektedir. Rotor oluk sayıları dikkate alınarak elde edilen 12° kaykçı açısı uygulanmış modelin verimi %88,37 ile en düşük verime sahiptir.

Bu analizlere ait moment dalgalanmaları grafiği ise ekil 4.7'de sunulmaktadır.



Şekil 4. 7 30 oluklu EAAM'nin kaykı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları

Stator oluk sayısına göre uygulanan kaykı açısı analizleri kendi aralarında karşılaştırıldığında, rotora uygulanan kaykı açısı arttıkça moment dalgalanmasının azaldığı görülmektedir.

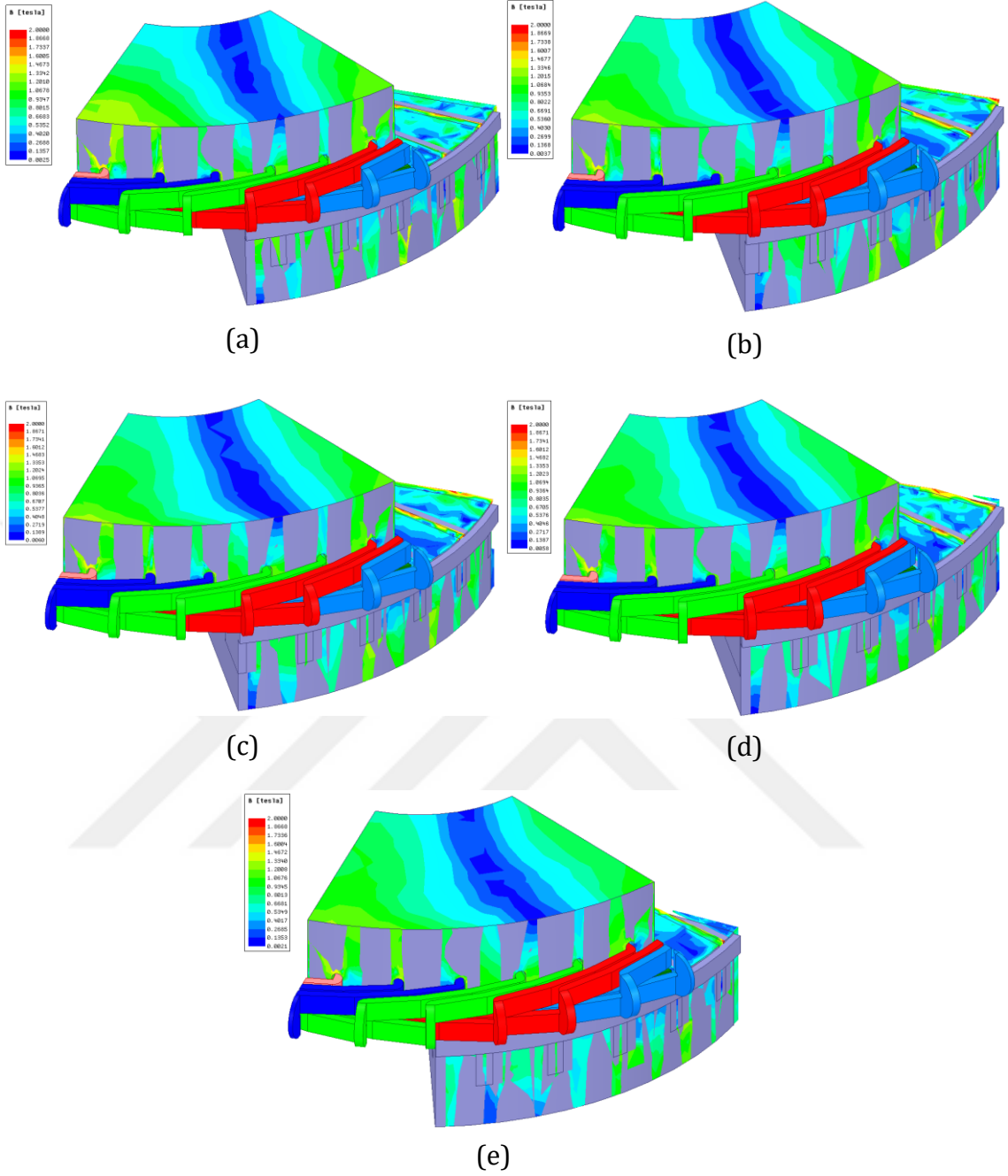
Rotoru 30 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.5'te sunulmaktadır.

Tablo 4. 5 Rotoru 30 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları

Kaykı açısı (°)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıfı
0	41,73	93,07	IE3
10	28,69	89,37	IE1
12	27,1	88,37	-
15	28,47	91,63	IE2
20	26,94	92,73	IE3
24	-	-	-

Rotoru 30 oluklu modellerin tamamı incelendiğinde moment dalgalanmasının en düşük olduğu modelin $2 \cdot \beta_s$ kaykısı açısı uygulanan model olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu model kaykısı açısı uygulanmış modeller arasında IE3 enerji verimliliği sınıfında olan tek model olup kaykısı açısı uygulanmamış modele göre çok daha iyi bir moment dalgalanmasına sahiptir. Verim olarak kaykısı açısı uygulanmamış modelden daha düşük bir değere sahip olsa da aynı enerji verimlilik sınıfında oldukları için rotoru 30 oluklu modeller arasında rotoruna 20° kaykısı açısı uygulanmış modelin en iyi sonuçlar elde edilen model olduğu söylenebilir.

Şekil 4.8’de rotoru 30 oluklu EAAM’nin rotoruna, kaykısı açısı uygulanmamış ve uygulanmış her bir kaykısı açısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımları sunulmuştur. Bu analizlerde EAAM’nin 1/6 modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. 8 30 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykı açısı uygulanmamış model, (b)10° kaykı açısı uygulanmış model, (c) 12° kaykı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykı açısı uygulanmış model, (e) 20° kaykı açısı uygulanmış model

Şekil 4.8’den, rotoru 30 oluklu EAAM’nin her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir.

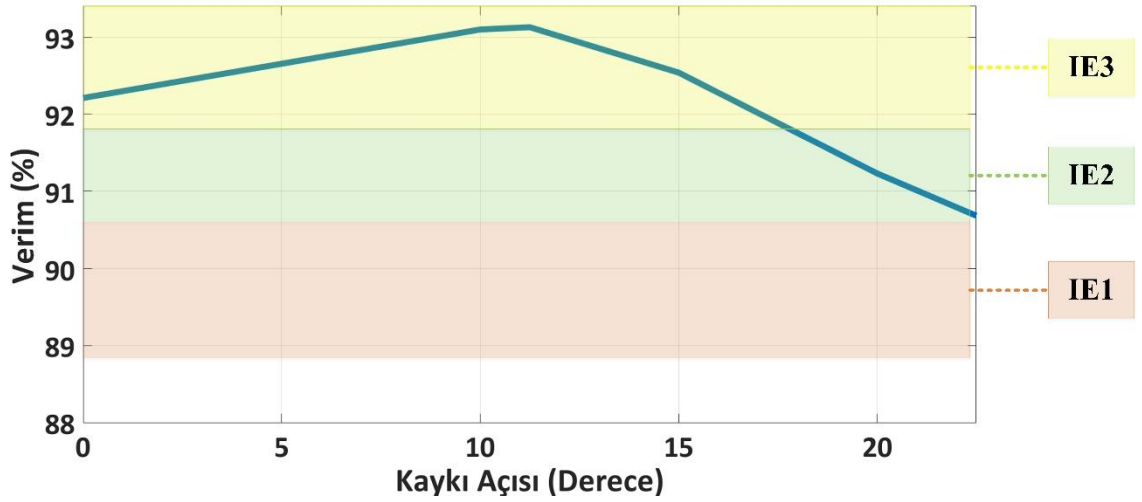
Üçüncü analiz adımında, kaykı açısı uygulanmayan modeller arasında, rotoru 32 oluklu EAAM için, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak, motorun rotoruna

kayk1 açıları uygulanmıştır. Rotoru 32 oluklu EAAM'nin rotoruna uygulanan kayk1 açıları Tablo 4.6'da sunulmaktadır.

Tablo 4. 6 Rotoru 32 oluklu EAAM modeline uygulanan kayk1 açıları

Kullanılan denklem	Kayk1 açısı (°)
β_s	10
$1,5 \cdot \beta_s$	15
$2 \cdot \beta_s$	20
β_r	11,25
$2 \cdot \beta_r$	22,5

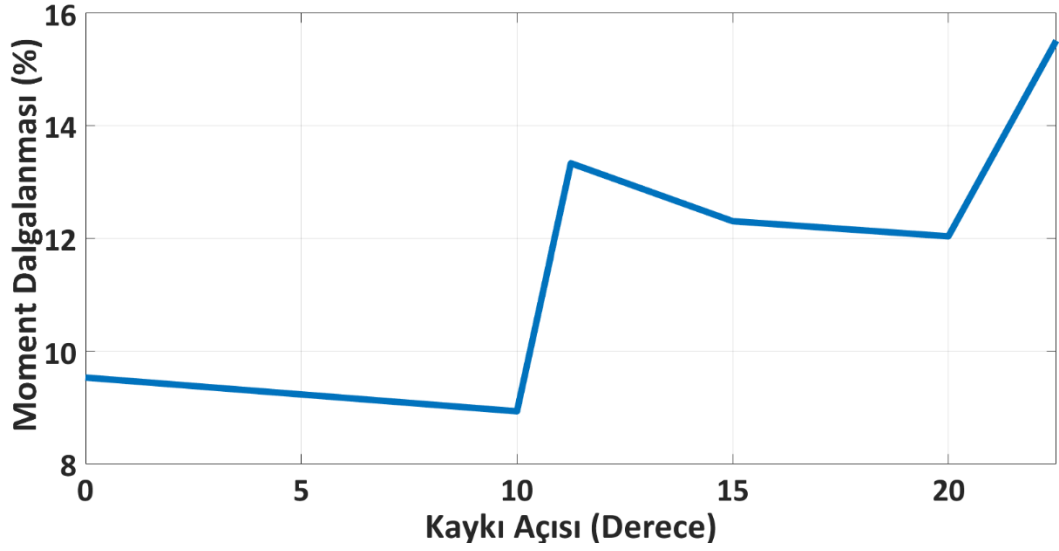
Tablo 4.6'ya göre motorun rotoruna uygulanan kayk1 açıları 10°, 11,25°, 15°, 20° ve 22,5°'dir. Daha önce yapılan analiz sonucunda rotoru 32 oluklu EAAM modelinin moment dalgalanması %9,5 ve verimi %92,2 olarak elde edilmiştir. Elde edilen verime göre motorun verimlilik sınıfı IE3 verimlilik sınıfı olmaktadır. Motora, kayk1 açıları uygulanarak yapılan analizler sonucunda elde edilen verim ve verimlilik sınıfı değerleri, şekil 4.9'da sunulmaktadır.



Şekil 4. 9 32 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri

Şekil 4.9'dan, rotoruna kayk1 açısı uygulanmayan rotoru 32 oluklu EAAM modeli ile rotoruna 10° kayk1 açısı uygulanan EAAM modeli karşılaştırıldığında, verimin kayk1 açısı uygulanan modelde daha yüksek olduğu ve verimlilik sınıfının 10°'lik kayk1 açısı uygulanarak, IE2 verimlilik sınıfından IE3 verimlilik sınıfına yükseldiği görülmektedir. Sadece stator oluk sayısı dikkate alınarak uygulanan kayk1 açılı modellerde, kayk1 açısı arttıkça verimin azaldığı görülmektedir. Öte yandan, rotor oluk sayısı dikkate alınarak uygulanan kayk1 açılı modellerde ise uygulanan kayk1 açısı arttıkça verimin azaldığı görülmektedir.

Motora, kayk1 açıları uygulanarak yapılan analizler sonucunda elde edilen moment dalgalanması değerleri, Şekil 4.10'da sunulmaktadır.



Şekil 4. 10 32 oluklu EAAM'nin kaykı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları

Şekil 4.10'dan, rotoruna kaykı açısı uygulanmamış 32 oluklu EAAM ile rotoruna 10° kaykı açısı uygulanan EAAM modeli karşılaştırıldığında, kaykı açısı uygulanan modelin daha az moment dalgalanmasına sahip olduğu görülmektedir. Diğer yandan, yalnızca rotoruna kaykı açıları uygulanan modeller karşılaştırıldığında, 10° kaykı açısı uygulanan modelin en düşük, 15° kaykı açısı uygulanan modelin ise en yüksek moment dalgalanmasına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca rotor oluk sayısı dikkate alınarak uygulanan kaykı açılı modellerde, uygulanan kaykı açısı arttıkça moment dalgalanmasının arttığı görülmektedir. Rotoru 32 oluklu, rotoruna kaykı açısı uygulanmayan EAAM modeli ile rotoruna kaykı açıları uygulanan modeller karşılaştırıldığında moment dalgalanmasının en az 10°'lik kaykı açısı uygulanan modelde olduğu görülmektedir.

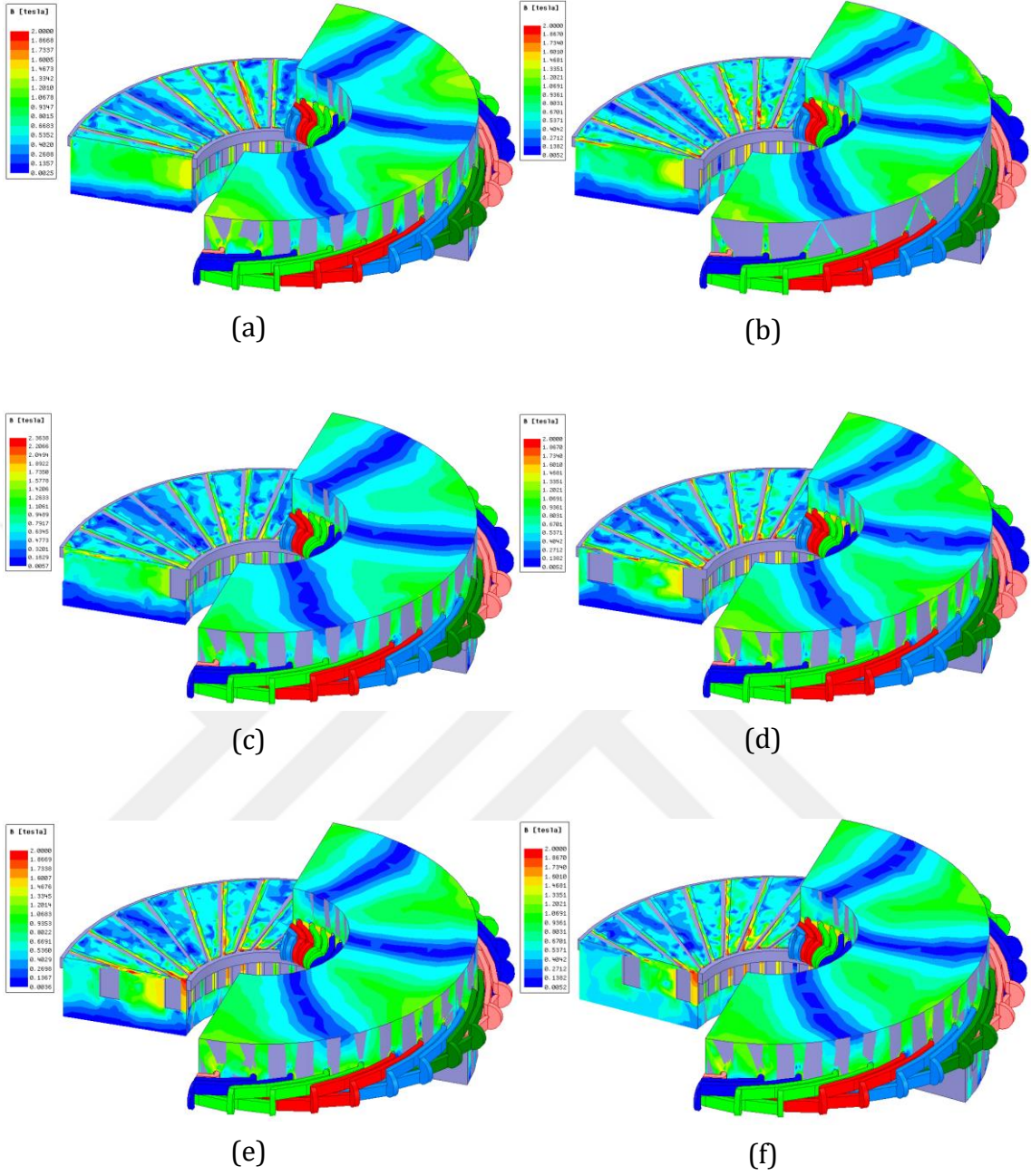
Rotoru 32 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.7'de sunulmaktadır.

Tablo 4. 7 Rotoru 32 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları

Kaykı açısı (°)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıf
0	9,53	92,21	IE3
10	8,93	93,1	IE3
11,25	13,33	93,13	IE3
15	12,3	92,54	IE3
20	12,03	91,23	IE2
22,5	9,53	92,21	IE2

Rotoru 32 oluklu Kaykı açısı uygulanmamış EAAM sonuçlarına bakılacak olursa hem IE3 enerji verimliliği sınıfında hem de moment dalgalanmasının %10'un altında olan iyi sonuç vermiş bir model olduğu görülmektedir. Buna rağmen kaykı açısı uygulanmış modellere ait sonuçlar incelendiğinde bu modelden daha da iyi sonuç veren bir model elde edilmiştir. Kaykı açısı uygulanan üç model IE3 enerji verimliliği sınıfında olsa da bunlardan rotoruna β_s kaykı açısı uygulanmış modelin moment değeri kaykı açısı uygulanmamış modele göre daha da düştüğü görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde rotoru 32 oluklu modeller arasında en iyi modelin rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış model olduğu görülmektedir.

şekil 4.11'de rotoru 32 oluklu EAAM'nin rotoruna, kaykı açısı uygulanmamış ve uygulanmış her bir kaykı açısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımları sunulmuştur. Bu analizlerde EAAM'nin yarım modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. 11 32 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykı açısı uygulanmamış model, (b) 10° kaykı açısı uygulanmış model, (c) 11,25° kaykı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykı açısı uygulanmış model, (e) 20° kaykı açısı uygulanmış model, (f) 22,5° kaykı açısı uygulanmış model

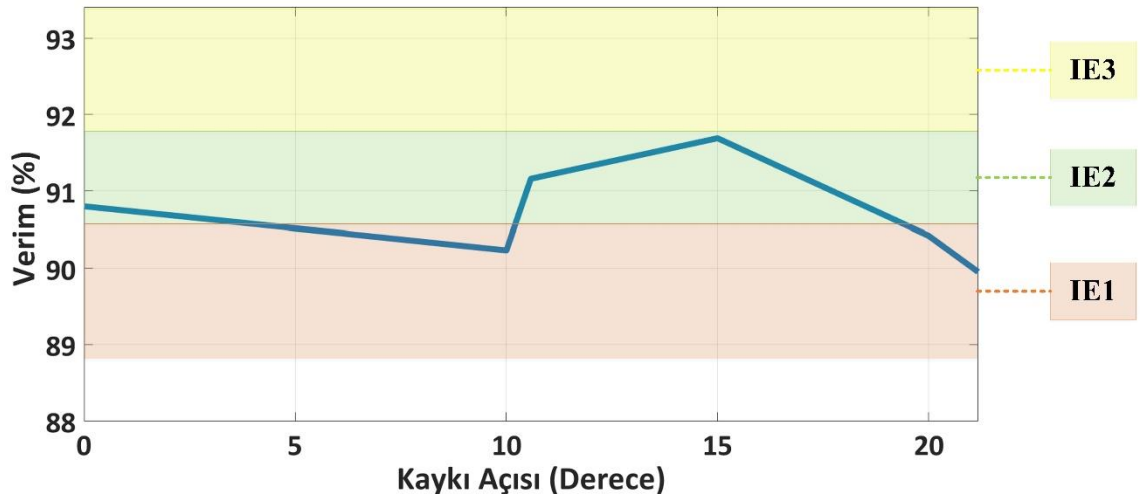
Şekil 4.11'den, rotoru 32 oluklu EAAM'nin her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir.

Dördüncü analiz adımında, rotoru 34 oluklu EAAM modeline, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak belirlenen kaykı açıları uygulanmıştır. Tablo 4.8’de uygulanan kaykı açısı hesaplamaları gösterilmektedir.

Tablo 4. 8 Rotoru 34 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları

Kullanılan denklem	Kaykı açısı (°)
β_s	10
$1,5 \cdot \beta_s$	15
$2 \cdot \beta_s$	20
β_r	10,58
$2 \cdot \beta_r$	21,17

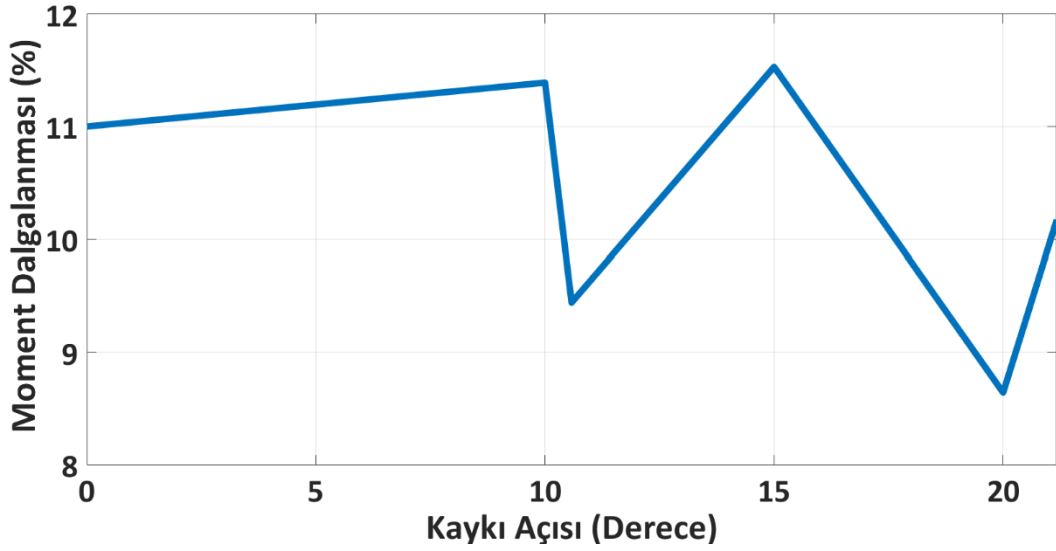
Tablo 4.8’de hesaplanan ve rotoru 34 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykı açıları sırasıyla 10°, 10,58°, 15°, 20° ve 21,17°’dir. Daha önce yapılan analizlerde, rotoru 34 oluklu EAAM modeline ait moment dalgalanması %11 ve bu modelin verimi %90,8 olarak elde edilmiştir. Buna göre 34 oluklu modelin ait olduğu verimlilik sınıfı IE2 verimlilik sınıfıdır. Rotoruna kaykı açıları uygulandıktan sonra 34 rotor oluklu EAAM modelinden elde edilen verime ait grafikler Şekil 4.12’de sunulmaktadır.



Şekil 4. 12 34 oluklu EAAM'nin kayıkı açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri

Şekil 4.12'den görüldüğü üzere, bu rotor oluk sayısına sahip EAAM modelleri arasında en yüksek verim 15° kayıkı açısı uygulanmış modelde %91,69 olarak elde edilmiştir. Kayıkı derecesi daha da arttıkça verimde bir düşme görülmüş ve en düşük verim $22,5^\circ$ kayıkı açısı uygulanmış modelde %89,95 olduğu görülmüştür. Kayıkı açısı uygulanmamış model dahil olmak üzere 34 rotor oluklu EAAM modeline ait yapılan toplam altı model için de verim grafiği incelendiğinde kayıkı açısının değişimiyle verim değerleri de çok değişkenlik göstermektedir. En yüksek ve en düşük verim değerleri arasında %1,74'lük ufak bir fark olsa da sonuçlar kayıkı açısına göre belirgin bir karakteristik göstermemektedir. 34 rotor oluklu EAAM modellerinin enerji verimliliği sınıflarının sadece IE1 ve IE2 olduğu görülmektedir. IE3 enerji verimliliği sınıfında hiçbir modeli olmayan tek rotor oluk sayılarına göre tasarlanan model 34 oluk sayılı EAAM olmuştur.

Şekil 4.13'te rotoru 34 oluk sayısına sahip EAAM modeline, belirlenen kayıkı açıları uygulanarak yapılan analizler sonucunda elde edilen moment dalgalanması değerleri sunulmaktadır.



Şekil 4. 13 34 oluklu EAAM'nin kaykı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları

Bu rotor oluk sayılı modelin verim değişimlerinde olduğu gibi Şekil 4.13'ten momentinde de değişimlerin kaykı açılarından bağımsız olarak değiştiği görülmektedir. Belirgin bir karakteristiğe oturmada değişim gösteren moment değerlerinin en düşük olanının 20° kaykı açısı uygulanmış EAAM modelinde %8,64 olduğu görülmektedir. Diğer modellere bakıldığında moment dalgalanma değerlerinin birbirine yakın olduğu görülse de %11,53 moment dalgalanması ile en yüksek verime sahip model olan 15° kaykı açısı verilmiş EAAM modeli olduğu görülmektedir.

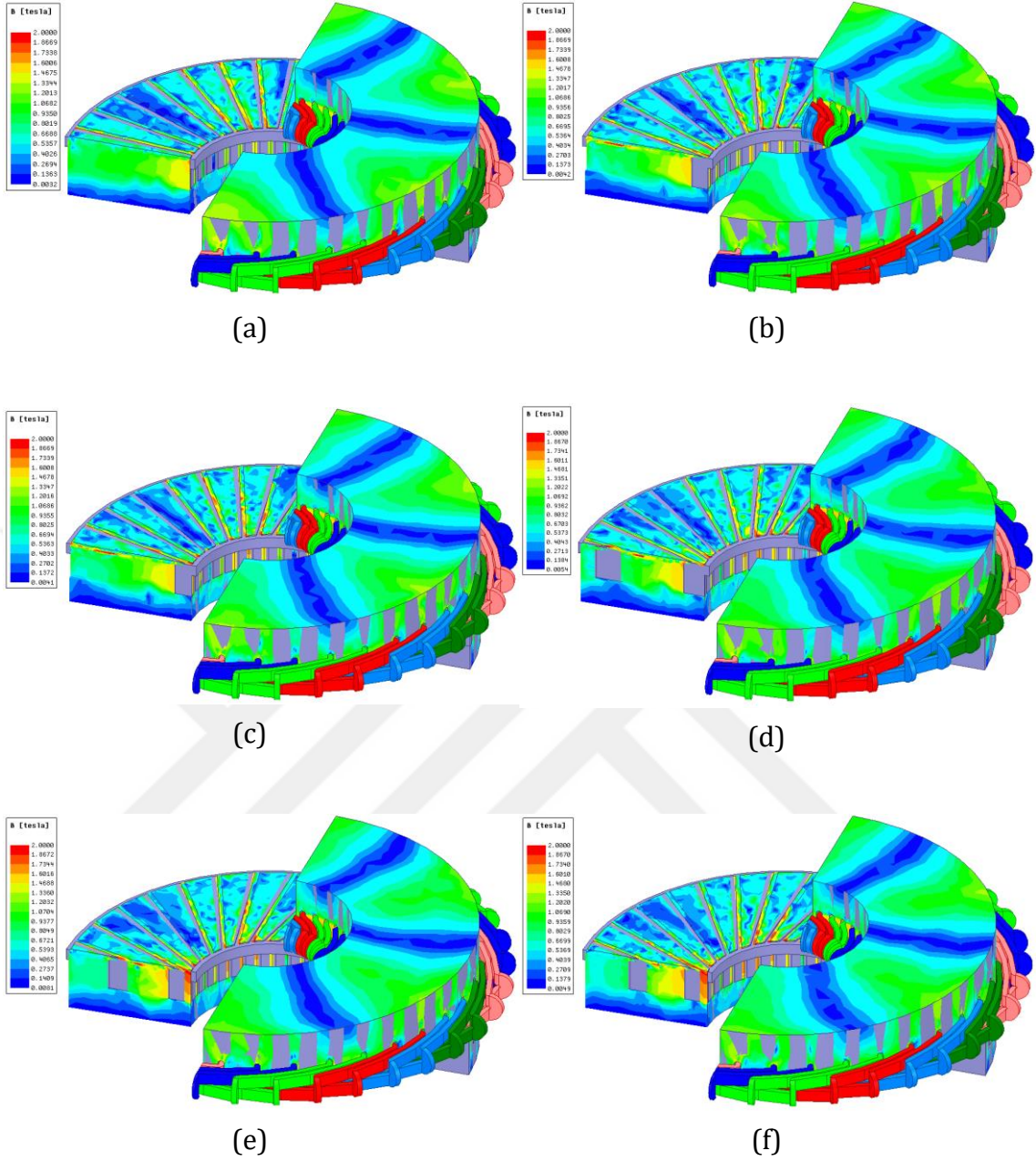
Rotoru 34 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılara göre elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.9'da sunulmaktadır.

Tablo 4. 9 Rotoru 34 oluklu EAAM’lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları

Kaykı açı (°)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıfı
0	11	90,8	IE2
10	11,39	90,23	IE1
10,58	9,44	91,16	IE2
15	11,53	91,69	IE2
20	8,64	90,42	IE1
21,17	10,17	89,95	IE1

Rotoru 34 oluklu modellerin tamamı incelendiğinde verim açısından tatmin eden sonuçlar elde edilmese de moment dalgalanması açısından iyi sonuçlar elde edilmiştir. En iyi moment dalgalanması rotoruna $2 \cdot \beta_s$ kaykı açı uygulanmış modelde görülse de rotoruna β_r kaykı açı uygulanmış modelin verim sınıfı bir üst seviyede olduğu için rotoru 34 oluklu modeller arasında en iyi modelin rotoruna β_r kaykı açı uygulanmış model olduğu görülmektedir.

Şekil 4.14’te rotoru 34 oluklu EAAM’nin rotoruna, kaykı açı uygulanmamış ve uygulanmış her bir kaykı açı için manyetik akı yoğunluğu dağılımları sunulmuştur. Bu analizlerde EAAM’nin yarım modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. 14 34 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kayki açısı uygulanmamış model, (b) 10° kayki açısı uygulanmış model, (c) 10,58° kayki açısı uygulanmış model, (d) 15° kayki açısı uygulanmış model, (e) 20° kayki açısı uygulanmış model, (f) 21,17° kayki açısı uygulanmış model

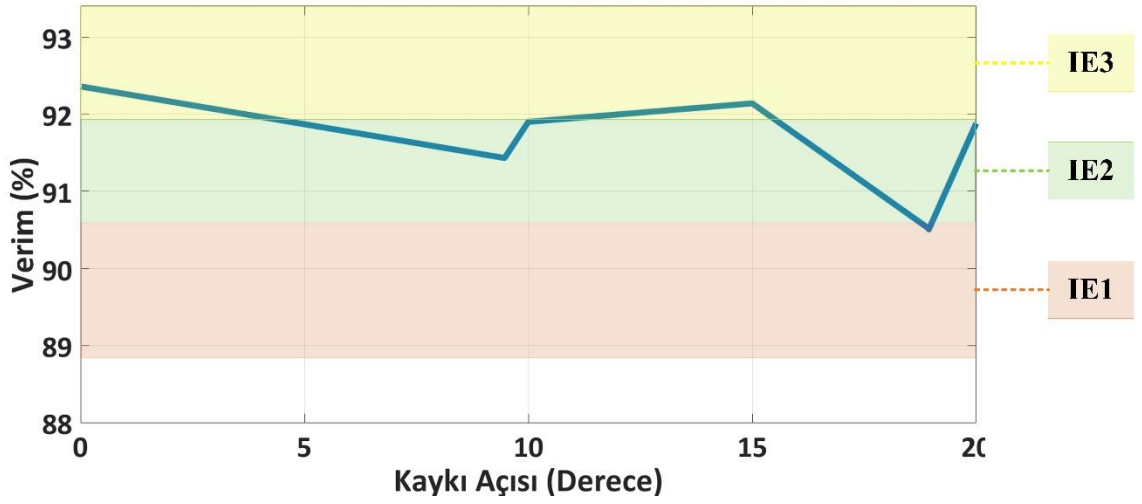
Şekil 4.14'ten, rotoru 34 oluklu EAAM'nin her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir.

Beşinci analiz adımı olarak, daha önce yapılan analizlerden elde edilen değerlere göre en az moment dalgalanmasına sahip olan rotoru 38 oluk sayısına sahip, kaykısı açısı uygulanmayan EAAM modeline, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak belirlenen kaykısı açıları uygulanmıştır. Tablo 4.10'de uygulanan kaykısı hesaplamaları gösterilmektedir.

Tablo 4. 10 Rotoru 38 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykısı açıları

Kullanılan denklem	Kaykısı açısı (°)
β_s	10
$1,5 \cdot \beta_s$	15
$2 \cdot \beta_s$	20
β_r	9,47
$2 \cdot \beta_r$	18,95

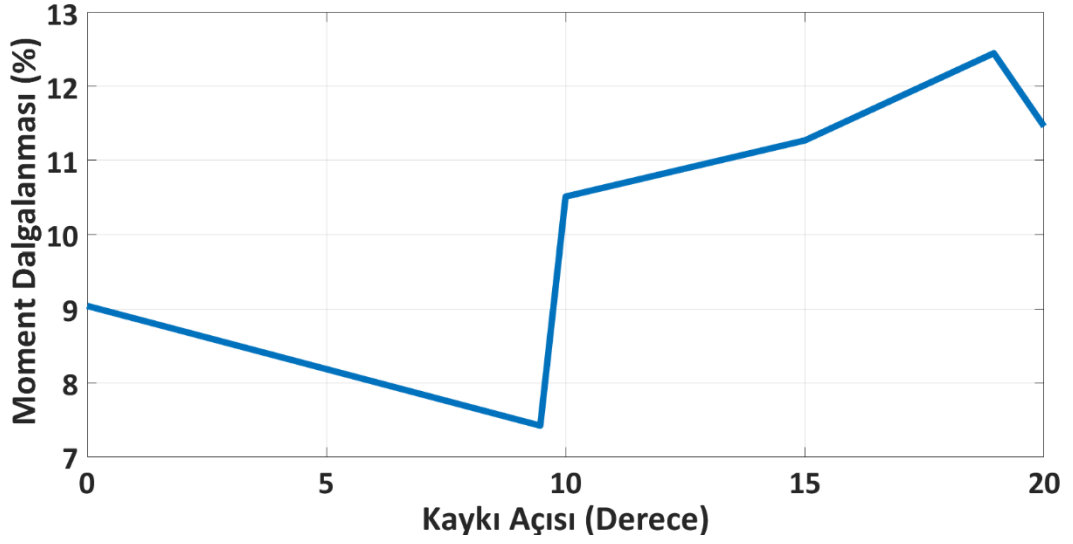
Tablo 4.10'a göre kaykısı açıları sırasıyla 9,47°, 10°, 15°, 18,95° ve 20° olarak belirlenmiştir. Daha önce yapılan analizlerde rotoruna kaykısı açısı uygulanmayan 38 rotor oluklu EAAM'nin verimi 92,36 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.15'te, belirlenen kaykısı açıları uygulanan rotoru 38 oluklu EAAM modelinden elde edilen verimlerin grafiği sunulmaktadır.



Şekil 4. 15 38 oluklu EAAM'nin kayk1 açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri

Şekil 4.15'ten, rotoru 38 oluklu EAAM modeline stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak belirlenen kayk1 açıları uygulandığında verimin üzerinde olumlu bir etki oluşturmadığı görülmektedir. Elde edilen verim sonuçları birbirine yakın olsa da, rotoruna kayk1 açısı uygulanmayan modelden elde edilen verimin %92,36 ile en yüksek olduğu görülmektedir. Bu modelde elde edilen tek IE1 enerji verimliliği sınıfında olan 18,95° kayk1 açısı verilmiş modelde en düşük verim %90,51 elde edilmiştir.

Rotoru 38 oluk sayılı EAAM'ye ait moment dalgalanması sonuçları Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4. 16 38 oluklu EAAM'nin kaykı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları

Şekil 4.16'dan, rotoru 38 oluklu EAAM için, rotoruna belirlenen kaykı açıları uygulanan modeller ile kaykı açısı uygulanmamış model karşılaştırıldığında, en düşük moment dalgalanmasına sahip modelin, rotoruna 9,47°'lik kaykı açısı uygulanan model olduğu görülmektedir.

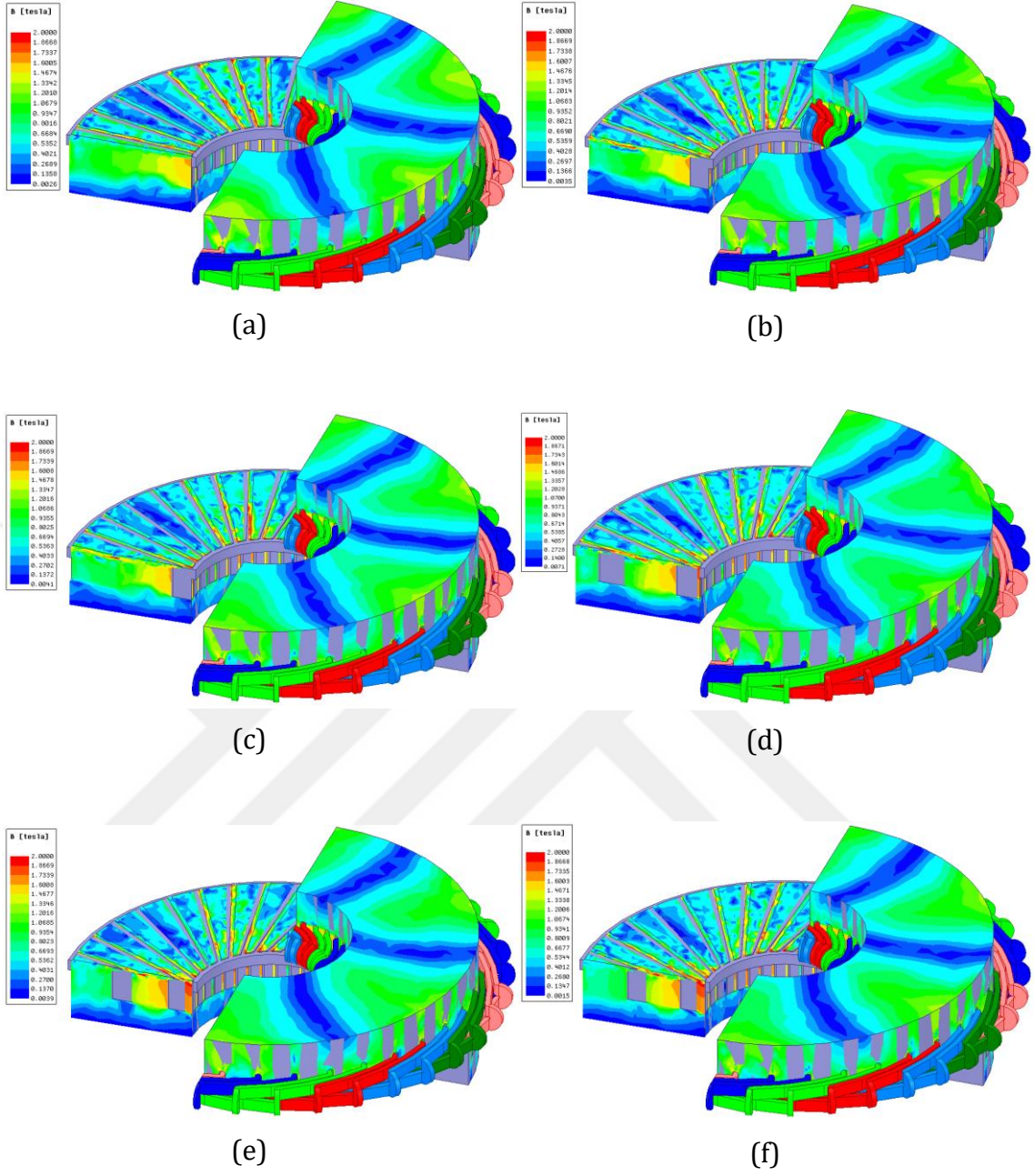
Rotoru 38 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.11'de sunulmaktadır.

Tablo 4. 11 Rotoru 38 oluklu EAAM’lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları

Kaykı açısı (°)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıf
0	9,04	92,36	IE3
9,47	7,42	91,43	IE2
10	10,51	91,9	IE2
15	11,27	92,14	IE3
18,95	12,45	90,51	IE1
20	11,46	91,88	IE2

Kaykı açısı uygulanmamış 38 rotor oluklu EAAM modeline kaykı açısı uygulanmasının verim açısından olumlu sonuç vermediğı görülmüş olup moment dalgalanması açısından da bir EAAM modeli hariç olumlu bir etkisi görülmemiştir. Rotoruna β_r kaykı açısı uygulanmış modelin moment dalgalanmasında bir düşme görülse de verim sınıf bir alt seviyeye düştüğü için genel olarak bakıldığında daha iyi bir model elde edilmediğı görülmektedir.

şekil 4.17’de rotoru 38 oluklu EAAM’nin rotoruna, kaykı açısı uygulanmamış ve uygulanmış her bir kaykı açısı için manyetik ak yoğunluğı dağılımları sunulmuştur. Bu analizlerde EAAM’nin yarım modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. 17 38 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykı açısı uygulanmamış model, (b) 9,47° kaykı açısı uygulanmış model, (c) 10° kaykı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykı açısı uygulanmış model, (e) 18,95° kaykı açısı uygulanmış model, (f) 20° kaykı açısı uygulanmış model

Şekil 4.17’den, rotoru 38 oluklu EAAM’nin her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir.

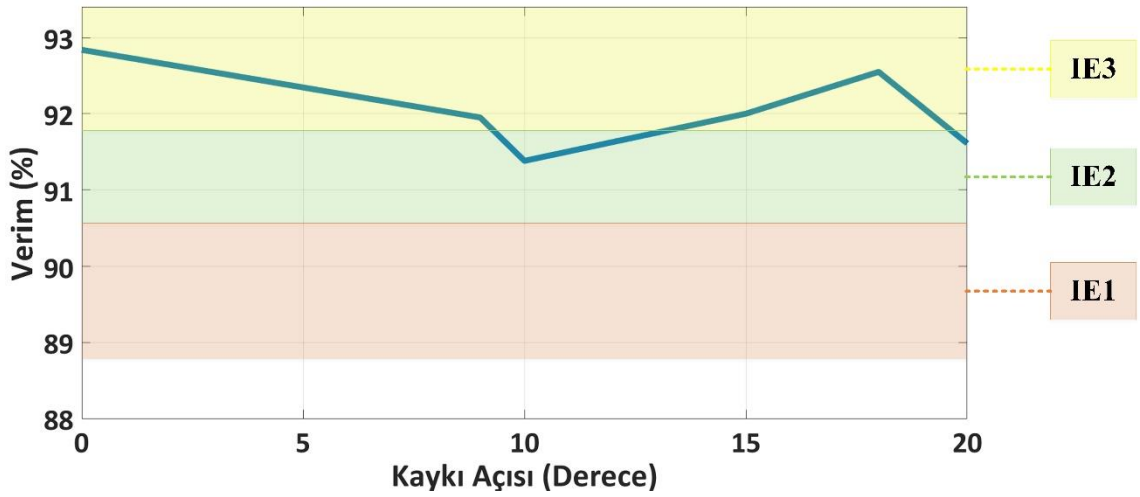
Altıncı analiz adımında, rotoru 40 oluklu EAAM modeline, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak belirlenen kaykı açıları uygulanmıştır. Tablo 4.12’de rotoru

40 oluk sayısına sahip olan EAAM modeline uygulanacak kaykçı açıları belirlenmiştir. Daha önce yapılan analizlerde, rotoru 40 oluk sayısına sahip EAAM modelinden, rotoruna herhangi bir kaykçı açısı değeri uygulanmayan modeller arasındaki en iyi ikinci verim elde edildiği görülmüştür. Bu model aynı zamanda IE3 enerji verimliliği sınıfına ait olup, düşük moment dalgalanmasına sahip tek modeldir.

Tablo 4. 12 Rotoru 40 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykçı açıları

Kullanılan denklem	Kaykı açısı (°)
β_s	10
$1,5 \cdot \beta_s$	15
$2 \cdot \beta_s$	20
β_r	9
$2 \cdot \beta_r$	18

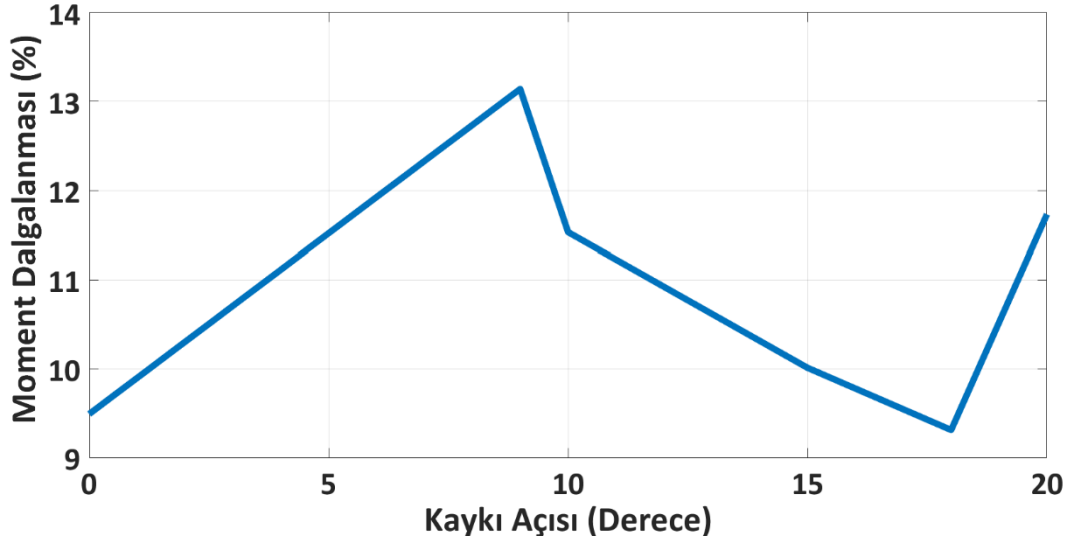
Tablo 4.12’den görüldüğü üzere, uygulanan kaykçı açıları sırasıyla 9°, 10°, 15°, 18° and 20° olarak hesaplanmıştır. şekil 4.18’de rotoru 40 oluklu EAAM modeline belirlenen kaykçı açıları uygulandığında yapılan analizler sonucunda elde edilen verim değerleri ve verimlilik sınıfları grafiği sunulmaktadır.



Şekil 4. 18 40 oluklu EAAM'nin kaykı açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri

Şekilden görüleceği üzere verimi en yüksek modelin rotorun kaykı açısı uygulanmamış modelin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, 40 rotor oluk sayılı modele kaykı açısı uygulanmasının verim açısından olumlu sonuç verilmediği görülmüştür. Her ne kadar daha düşük verimler elde edilse de 9°, 15° ve 18° kaykı açısı uygulanmış modellerin kaykı açısı uygulanmamış model ile aynı IE3 enerji verimliliği sınıfında olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak tasarlanan 10° ve 20° kaykı açısı verilmiş modellerin verimlerinin ise IE2 enerji verimliliği sınıfında olduğu görülmektedir.

Rotoru 40 oluk sayılı EAAM'ye ait moment dalgalanması sonuçları Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



Şekil 4. 19 40 oluklu EAAM'nin kayık açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları

Bu modele genel olarak bakılacak olursa rotora kayık açısı uygulanmasının verimde olduğu gibi moment dalgalanması açısından faydalı olmadığı görülmektedir. 18° kayık açısı uygulanmış modelde oluşan %9,31 moment dalgalanması kayık açısı uygulanmamış modelden daha iyi sonuç veren tek model olması bu durumun tek istisnasıdır.

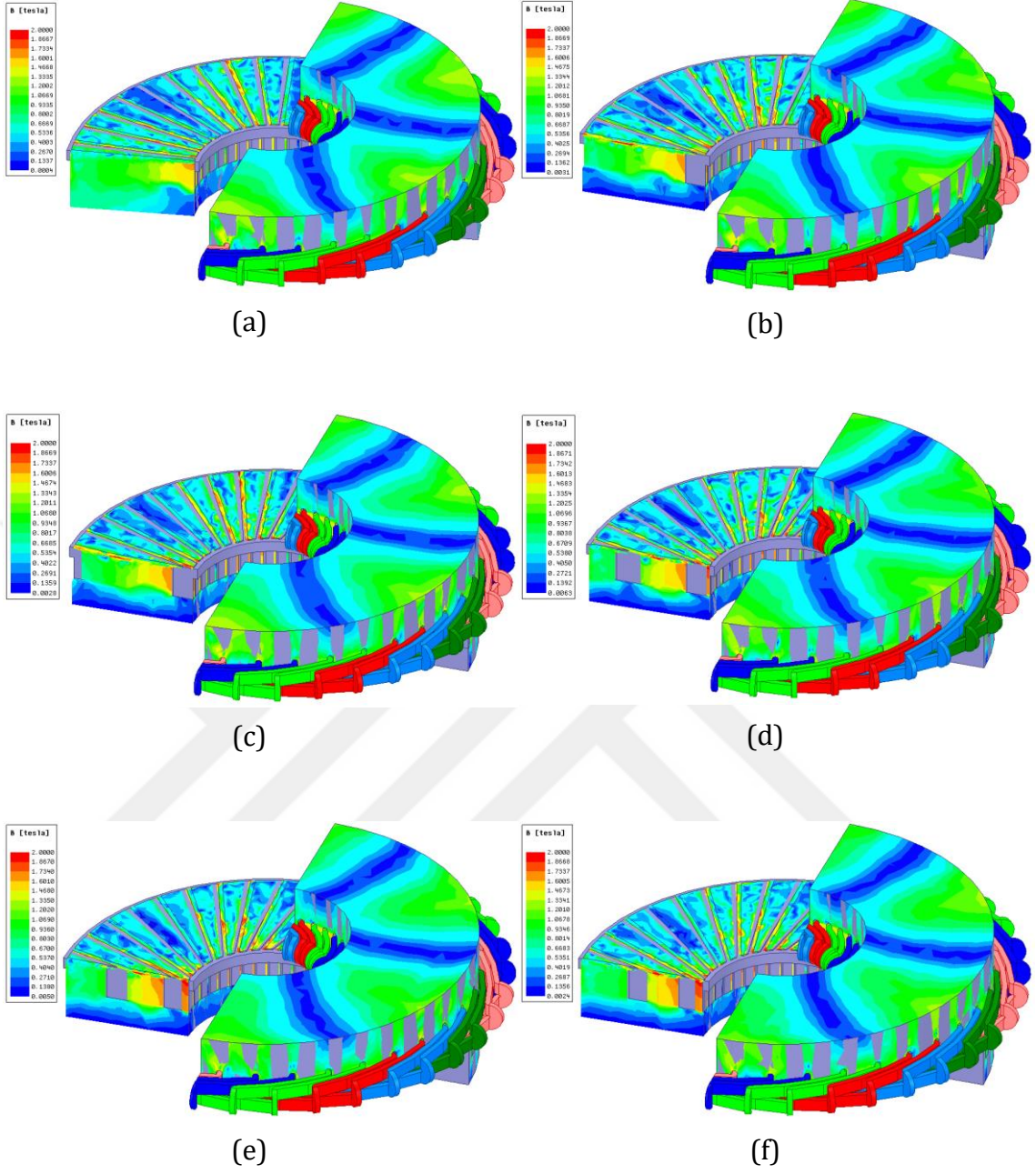
Rotoru 40 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kayık açılarına göre elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.13'te sunulmaktadır.

Tablo 4. 13 Rotoru 40 oluklu EAAM’lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları

Kaykı açısı (°)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıf
0	9,49	92,84	IE3
9	13,14	91,95	IE3
10	11,53	91,38	IE2
15	10,01	92,00	IE3
18	9,31	92,55	IE3
20	11,73	91,61	IE2

Rotoruna kaykı açısı uygulanmamış rotoru 40 oluklu EAAM’nin hem verimi IE3 enerji verimliliği sınıfında hem de moment dalgalanma miktarı %10’nun altında olsa da kaykı açısı uygulandığında pozitif etki görülen bir model elde edilmiştir. Rotoruna $2 \cdot \beta_r$ kaykı açısı uygulanmış EAAM’nin en iyi sonuç veren rotoru 40 oluklu EAAM modeli olduğu görülmektedir.

Şekil 4.20’de rotoru 40 oluklu EAAM’nin rotoruna, kaykı açısı uygulanmamış ve uygulanmış her bir kaykı açısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımları sunulmuştur. Bu analizlerde EAAM’nin yarım modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. 20 40 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykı açısı uygulanmamış model, (b) 9° kaykı açısı uygulanmış model, (c) 10° kaykı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykı açısı uygulanmış model, (e) 18° kaykı açısı uygulanmış model, (f) 20° kaykı açısı uygulanmış model

Şekil 4.20’den, rotoru 40 oluklu EAAM’nin her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir.

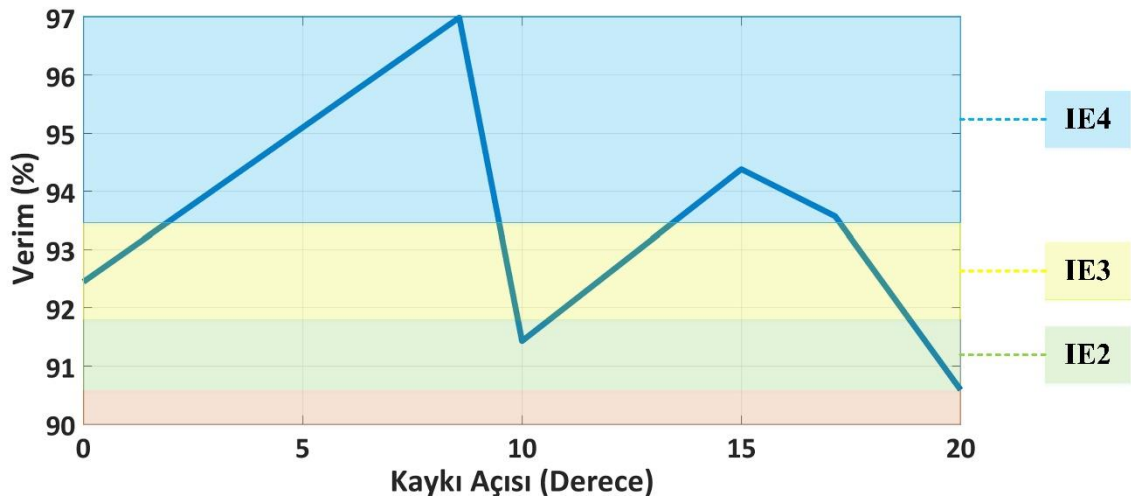
Yedinci ve son analiz adımı olarak, daha önce kaykı açısı uygulanmadan yapılan analizlerde, yüksek moment dalgalanmasına sahip olan rotoru 42 oluklu EAAM

modeline, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak belirlenen kaykçı açıları uygulanmıştır. Rotora uygulanan kaykçı açılarının hesaplanması Tablo 4.14'te sunulmaktadır.

Tablo 4. 14 Rotoru 42 oluklu EAAM modeline uygulanan kaykçı açıları

Kullanılan denklem	Kaykı açısı (°)
β_s	10
$1,5 \cdot \beta_s$	15
$2 \cdot \beta_s$	20
β_r	8,57
$2 \cdot \beta_r$	17,14

Tablo 4.14'ten görüleceği üzere rotoru 42 oluk sayısına sahip EAAM modelinin rotoruna uygulanacak kaykçı açıları sırasıyla 8,57°, 10°, 15°, 17,14° ve 20°'dir. 42 oluklu EAAM modelinin kaykçı açısı uygulanmamış ve belirlenen kaykçı açıları uygulanmış analiz sonuçları şekil 4.21'de sunulmaktadır.

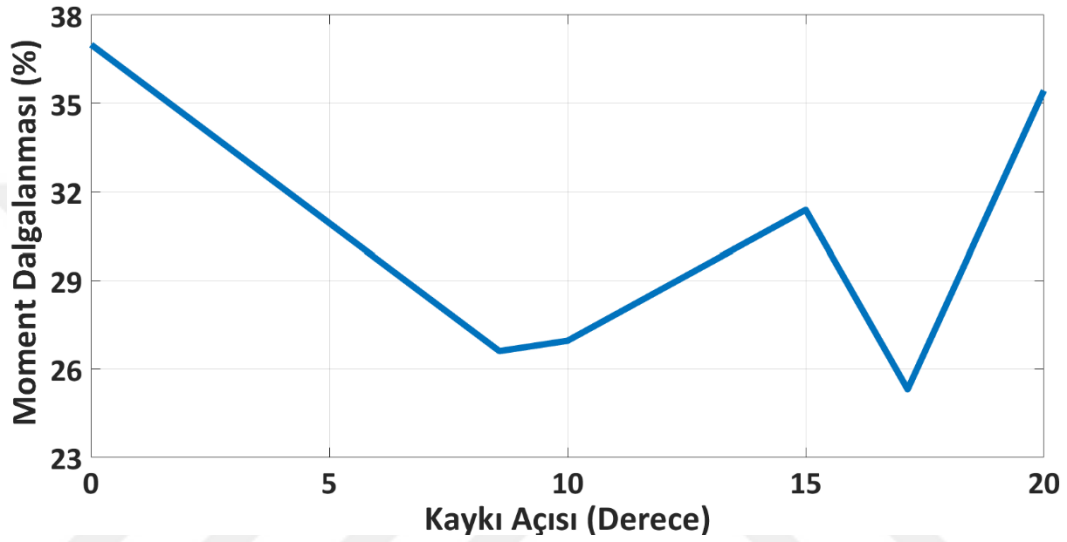


şekil 4. 21 42 oluklu EAAM'nin kaykçı açısı analizlerinden elde edilen verim değerleri

şekil 4.21'den grldği üzere, rotoruna kaykçı açısı uygulanmamış, rotoru 42 oluklu EAAM modeli, IE3 verimlilik sınıfına aittir. Analiz sonuçları incelendiğinde,

verim açısından, EAAM'nin diğer oluk sayılarında karşılaşılmayan farklı bir durum olduğu görülmektedir. Verim, rotora uygulanan kaykı açısı 10° ve 20° olduğunda azalırken, $8,57^\circ$ ve 15° olduğunda önemli ölçüde artmaktadır. Bu modellerden üçü IE4 verimlilik sınıfına ait olmakla birlikte, bu modeller analizler arasında elde edilen en verimli modellerdir.

Rotoru 42 oluk sayılı EAAM'ye ait moment dalgalanması sonuçları Şekil 4.22'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 22 42 oluklu EAAM'nin kaykı açısı analizlerinden elde edilen moment dalgalanmaları

Şekil 4.22'den görüldüğü üzere, 42 rotor oluklu model de rotoru 30 oluklu modelde olduğu gibi diğer modellere göre çok daha yüksek moment dalgalanmasına sahiptir. Kaykı açısı uygulanmamış modele kıyasla, modele kaykı açısı verilmesi ile moment dalgalanmasının azaltıldığı görülmektedir. En iyi moment dalgalanmasının görüldüğü model ise $17,14^\circ$ kaykı açısı uygulanmış modelde %25,3 olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar dalgalanma miktarı %46,2 oranında azalmış olsa da tasarım açısından bu değer hala çok yüksek olduğu görülmektedir.

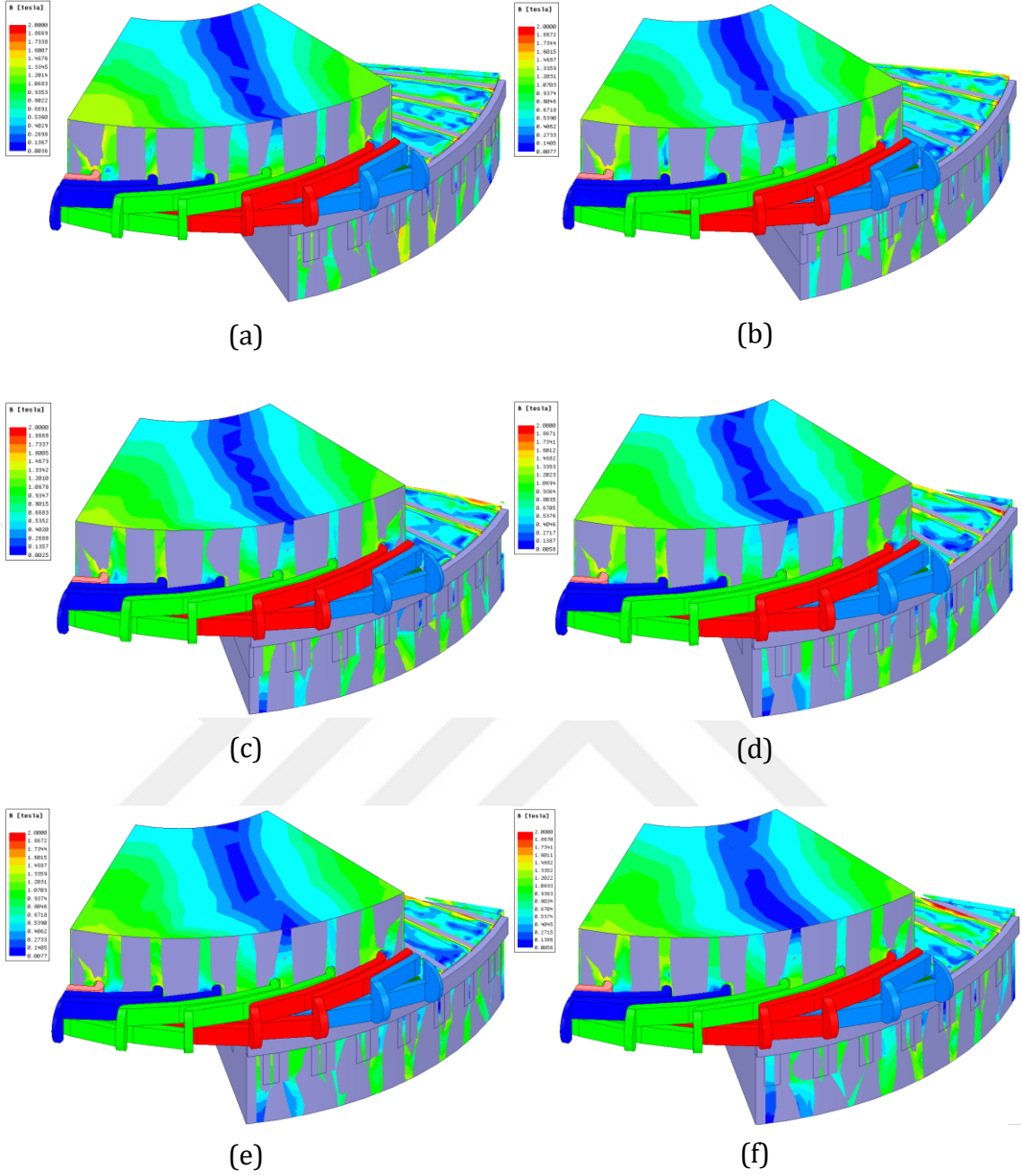
Rotoru 42 oluklu EAAM'lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.15'te sunulmaktadır.

Tablo 4. 15 Rotoru 42 oluklu EAAM’lerin rotorlarına, stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak uygulanan kaykı açılarına göre elde edilen analiz sonuçları

Kaykı açısı (°)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıfı
0	36,99	92,45	IE3
8,57	26,6	96,99	IE4
10	26,95	91,43	IE2
15	31,38	94,38	IE4
17,14	25,3	93,57	IE4
20	35,43	90,59	IE2

Rotoru 30 oluklu modellerde olduğu gibi rotoru 42 oluklu modellerde de moment dalgalanmasının çok yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bu dalgalanma miktarı rotoruna kaykı açıları uygulanarak ciddi derece düşürülse de makine tasarımı açısından kabul edilebilir seviyelerin üstünde olduğu görülmektedir. Rotoru 40 oluklu modeller arasında verim ve moment dalgalanması açısından yapılan inceleme sonucunda verimi IE4 enerji verimliliği sınıfında olan iki modelin moment dalgalanma miktarı açısından da en düşük iki model olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, rotoru 40 oluklu EAAM modelleri arasından rotoruna β_r ve $2 \cdot \beta_r$ kaykı açıları uygulanmış modellerin en iyi modeller olduğu görülmektedir.

Şekil 4.23’te rotoru 42 oluklu EAAM’nin rotoruna, kaykı açısı uygulanmamış ve uygulanmış her bir kaykı açısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımları sunulmuştur. Bu analizlerde EAAM’nin 1/6 modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. 23 42 oluklu EAAM analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları (a) Kaykı uygulanmamış model, (b) 8,57° kaykı açısı uygulanmış model, (c) 10° kaykı açısı uygulanmış model, (d) 15° kaykı açısı uygulanmış model, (e) 17,14° kaykı açısı uygulanmış model, (f) 20° kaykı açısı uygulanmış model

Şekil 4.23'ten, rotoru 42 oluklu EAAM'nin her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir.

Rotor oluk sayıları ve kaykı açılarına göre yapılan bütün analizler sonucunda, motorun rotoruna kaykı açıları uygulandıkça verimin ve moment dalgalanmasının

farklı şekillerde etkilendiği görülmüştür. Bazı EAAM modellerinde, kaykы açısı uygulanması moment dalgalanması açısından olumlu bir etkiye sahip olup, moment dalgalanmasını azaltırken, bazı modellerde moment dalgalanmasını artırdığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde verimlilik açısından da kaykы açısı uygulamasının farklı etkileri olmuştur. Örnek olarak; rotoru 42 oluklu EAAM modeline 8,57°, 15° ve 17,14° olarak belirlenen kaykы açıları uygulandığı takdirde motorun verimi, IE4 verimlilik sınıfına ait olmaktadır. Ayrıca, aynı modelin moment dalgalanması %28 ile %26,6 oranında azalma göstermiştir. Bu nedenle rotoru 42 oluklu EAAM modelleri arasında verim ve moment dalgalanması açısından en iyi sonucu veren model, rotoruna 8,57°'lik kaykы açısı uygulanan model olmaktadır.

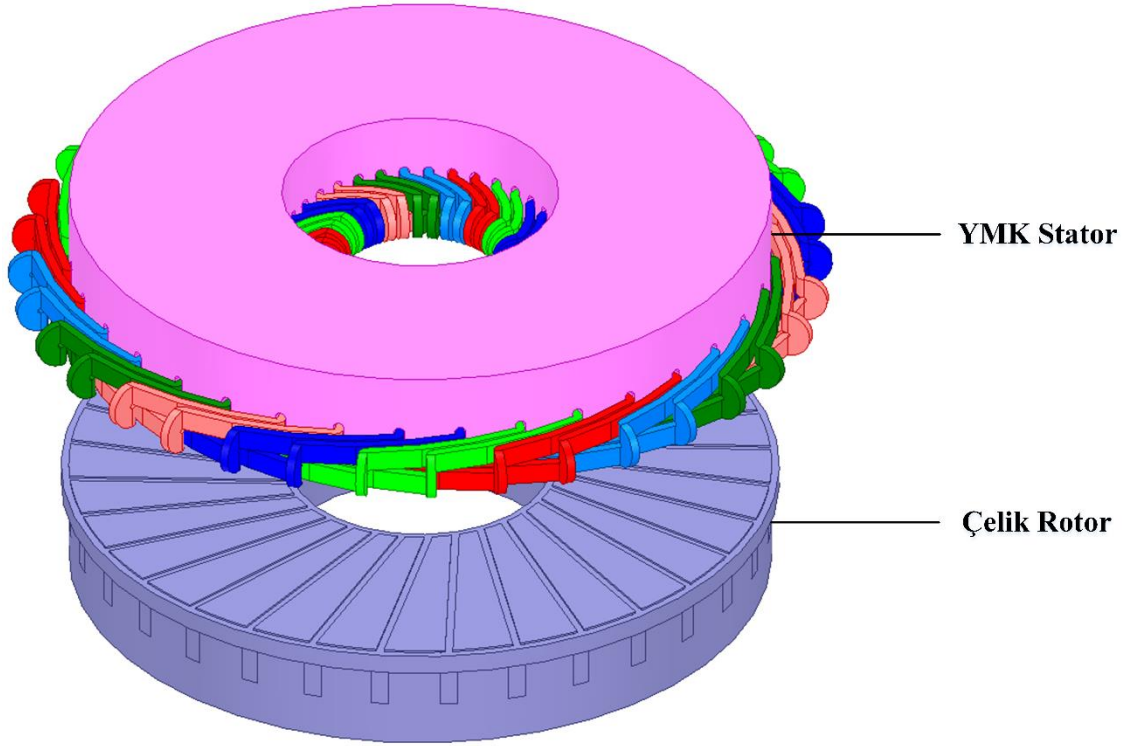
Ancak, hem moment dalgalanması hem de verimlilik açısından yapılan analizlerde, rotoru 32 oluklu EAAM modellerinden, rotoruna 10° kaykы açısı uygulanan modelde en uygun sonuçlar alınmıştır. Bu modelin moment dalgalanması %8,93 ve verimi %93,1 olarak elde edilmekte ve motor, IE3 verimlilik sınıfında yer almaktadır. Bir sonraki bölümde, bu modele YMK malzeme kullanılarak, malzemenin verim ve moment dalgalanması üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.3 YMK Malzeme Kullanılarak Tasarlanan Eksenel Akılı Asenkron Motorların Analiz Sonuçları

Bu bölümde, farklı rotor sayılarına göre ve rotoruna kaykы açısı uygulanmış bütün modeller arasından uygun bir modelin seçilerek ve YMK malzemenin motorun farklı parçalarına uygulanarak, bu malzemenin kullanılmasının ve kullanım yerlerinin verim ve moment dalgalanması üzerindeki etkisi incelenmektedir. Bu seçim yapılırken IE3 enerji verimliliği sınıfındaki rotoru 32 oluklu EAAM modellerinden rotoruna 10° kaykы açısı uygulanan model seçilmiştir. Bunun sebebi de moment dalgalanmasının %8,93 gibi çok düşük bir değer olmasıdır. Bu bağlamda, motorun statoru, rotoru ve hem stator hem de rotoru YMK malzeme kullanılarak tasarlanmıştır. YMK malzeme olarak yoğunluğu 7,57 g/cm³ Somaloy 700-3P kullanılmıştır [42].

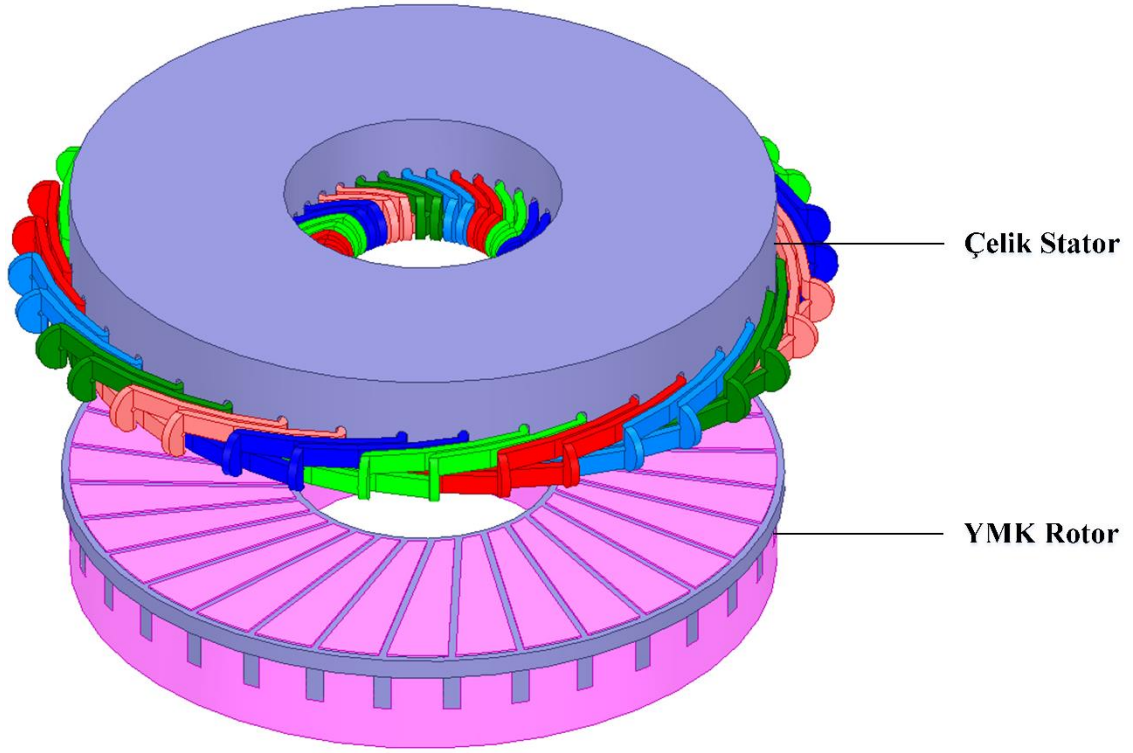
Analizlere ilk olarak sadece statora YMK malzeme uygulanarak başlanmıştır. Şekil 4.24'te statorunda YMK malzeme, rotorunda çelik malzeme kullanılmış EAAM

modeli sunulmuştur. Bu modelde verimin %93,56 olarak IE4 verimlilik sınıfında olduğu görülürken, moment dalgalanmasının ise %9,57 olduğu görülmektedir. Bu modelin en yüksek verime sahip olmakla birlikte kıyaslanan modeller arasında tek IE4 verimlilik sınıfında olan model olduğu görülmektedir. YMK malzeme kullanılan modellere ait moment değişimi grafikleri Ek B’de sunulmuştur.



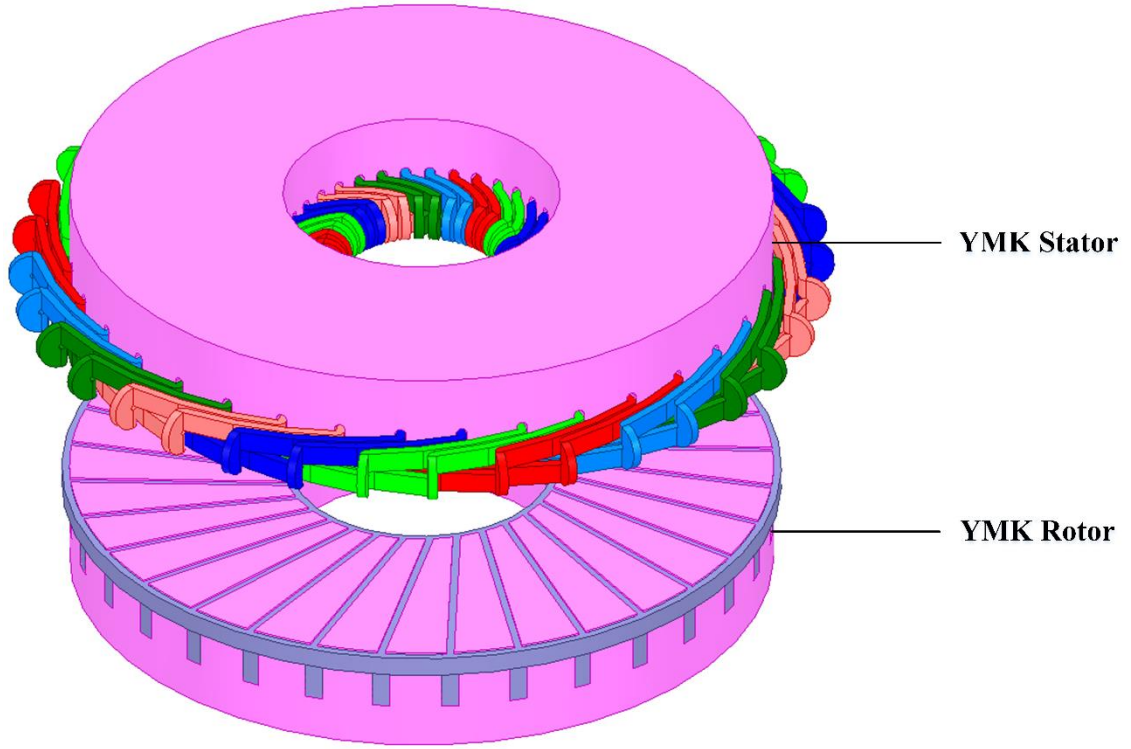
Şekil 4. 24 Statorunda YMK malzeme, rotorunda çelik malzeme kullanılmış EAAM modeli

Analizler sadece rotora YMK malzeme uygulanmasıyla devam etmektedir. Şekil 4.25'te statorunda çelik malzeme, rotorunda YMK malzeme kullanılmış EAAM modeli sunulmuştur. Bu modelde ise verim sınıfının IE3 olduğu görülmektedir. Verim %93,34 iken, moment dalgalanması %10,75 olarak belirlenmiştir. Bu değer, kıyaslanan modeller arasında en yüksek moment dalgalanmasına sahip modeldir.



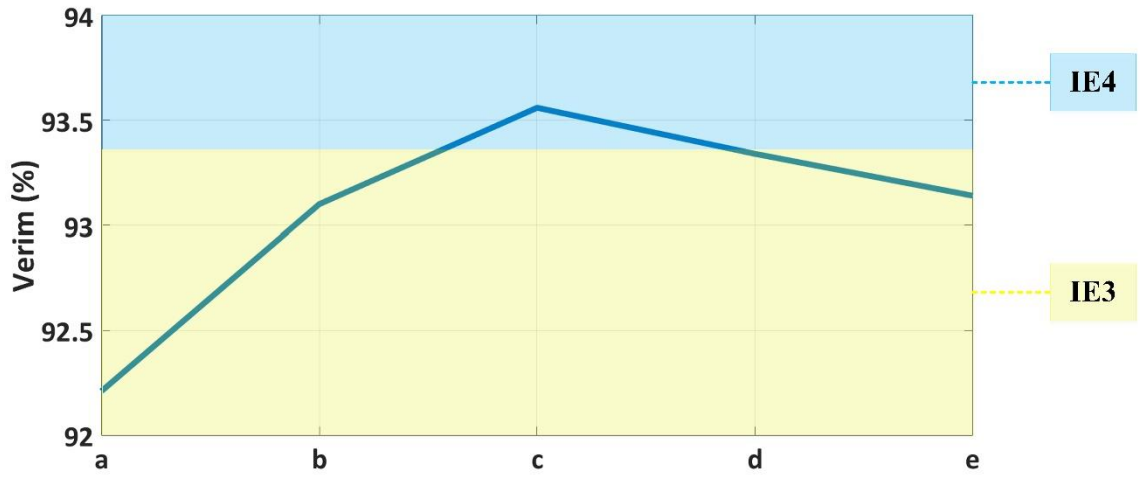
Şekil 4. 25 Statorunda çelik malzeme, rotorunda YMK malzeme kullanılmış EAAM modeli

YMK analizlerinin sonuncusu olarak hem statora hem de rotora YMK malzeme uygulanarak bir tasarım yapılmıştır. Şekil 4.26'da statorunda ve rotorunda YMK malzeme kullanılmış EAAM modeli sunulmuştur. Analiz sonuçlarına baktığımızda bu modelde verim sınıfı yine IE3 verimlilik sınıfında kalarak %93,14 olarak ölçülmüştür. Her iki parçada da YMK uygulanan modelde özellikle dikkat çeken nokta ise %8,57 ile en iyi moment dalgalanmasına sahip olmasıdır. Rotoruna kaykı uygulanmamış çelik malzeme kullanılmış modelin moment dalgalanması değeriyle kıyaslandığında %11,2'lik bir azalma olduğu da görülmektedir. Ayrıca, genel olarak bir kıyaslama yapılacak olursa YMK malzeme kullanımının verim açısından pozitif etkisi olduğu görülmektedir.

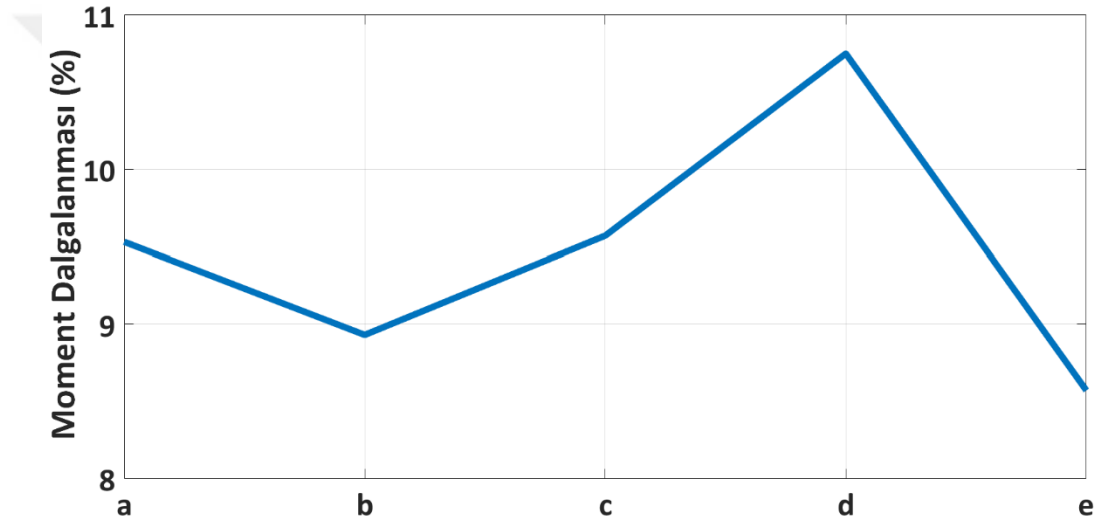


Şekil 4. 26 Statorunda ve rotorunda YMK malzeme kullanılmış EAAM modeli

YMK kullanılan modellerin kıyaslanması daha detaylı yapılabilmesi adına bu bölümdeki grafiklerde statoruna ve rotoruna kaykısı uygulanmamış ve kaykısı uygulanmış malzeme olarak çelik kullanılan modellere ait sonuçlar eklenmiştir. Şekil 4.27’de farklı kısımlara YMK malzeme uygulanan modellerin verim açısından kıyaslanması sunulmaktadır. Şekil 4.28’de ise YMK malzeme uygulanmasının moment dalgalanması açısından kıyaslanması gösterilmektedir.



Şekil 4. 27 YMK malzeme uygulanan EAAM'den elde edilen verim değerleri



Şekil 4. 28 YMK malzeme uygulanan EAAM'nin moment dalgalanması grafiği

Şekil 4.24 ve 4.25'teki grafiklerin X eksenini, rotora uygulanan kayk ve kullanılan malzeme açısından aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- (a) Rotora kayk uygulanmamış ve hem stator hem rotor malzemesi olarak çelik kullanılmıştır.
- (b) Rotora kayk uygulanmış ve hem stator hem rotor malzemesi olarak çelik kullanılmıştır.
- (c) Rotora kayk uygulanmış ve stator malzemesi olarak YMK, rotor malzemesi olarak çelik kullanılmıştır.
- (d) Rotora kayk uygulanmış ve stator malzemesi olarak çelik, rotor malzemesi olarak YMK kullanılmıştır.

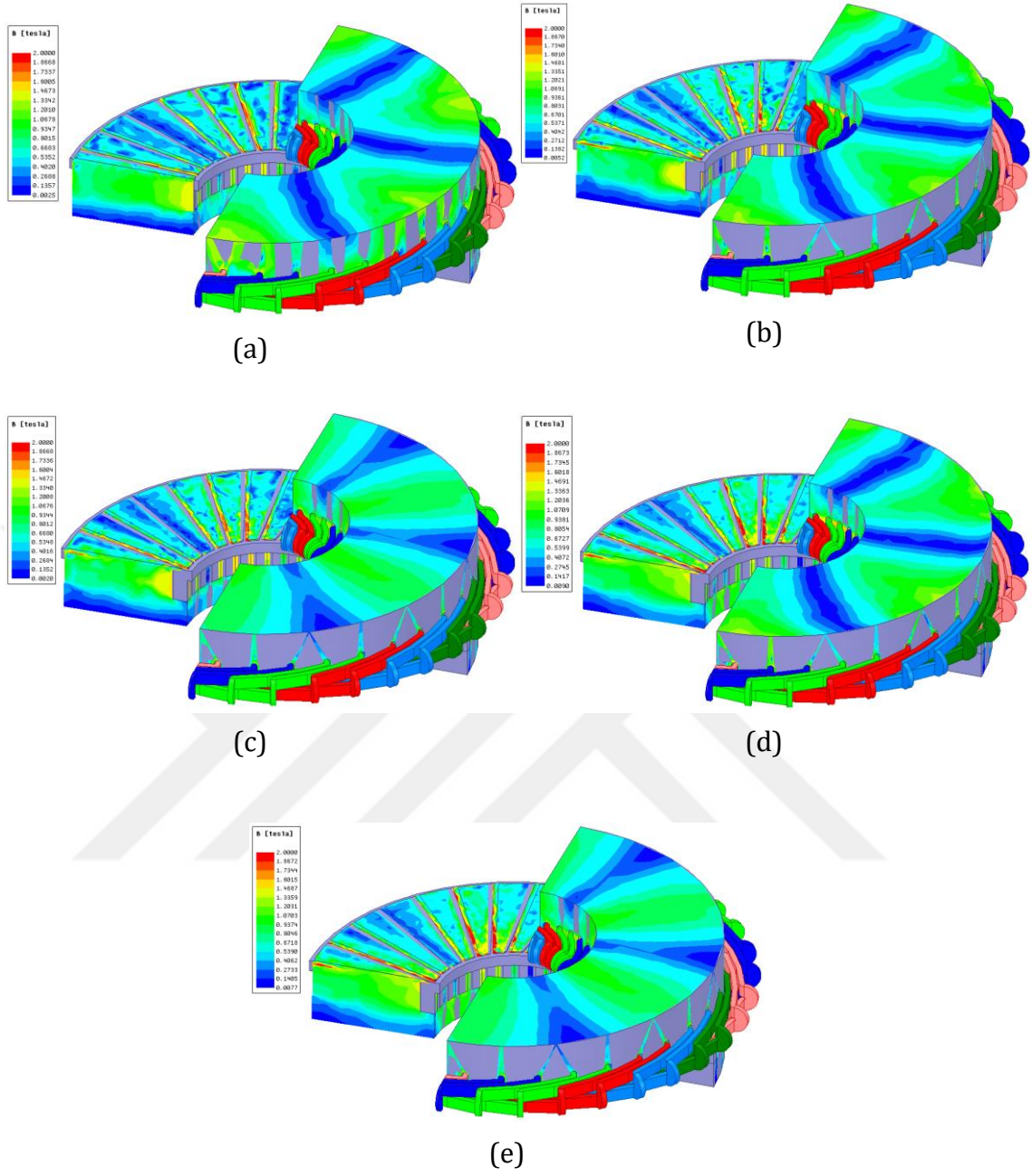
(e) Rotora kayk\u0131 uygulanm\u0131\u015f ve hem stator hem rotor malzemesi olarak YMK kullan\u0131lm\u0131\u015ftir.

YMK malzeme uygulanan EAAM'den elde edilen analiz sonu\u00e7ları Tablo 4.16'da sunulmaktadır.

Tablo 4. 16 YMK malzeme uygulanan EAAM'den elde edilen analiz sonu\u00e7ları

EAAM Modeli	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Verimlilik Sınıfı
Kayk\u0131 a\u00e7ısı uygulanmam\u0131\u015f	9,53	92,21	IE3
10° kayk\u0131 a\u00e7ısı uygulanm\u0131\u015f	8,93	93,1	IE3
Stator	9,57	93,56	IE4
Rotor	10,75	93,34	IE3
Stator ve Rotor	8,57	93,14	IE3

\u015eekil 4.29'a rotoru 32 oluklu EAAM'nin yukarıda belirtildi\u011fi \u015fekilde rotoruna uygulanan kayk\u0131 durumu ve stator ile rotorunda kullanılan malzemeye g\u00f6re tasarlanan modellerinin manyetik ak\u0131 yo\u011funlu\u011fu da\u011f\u0131lımları sunulmu\u015ftur. Bu analizlerde EAAM'nin yarım modeli kullan\u0131lm\u0131\u015ftir.



Şekil 4. 29 32 oluklu EAAM'nin rotoruna uygulanan kaykı durumu ve kullanılan malzemeye göre yapılan analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunlukları dağılımı

Şekil 4.26'dan rotoru 32 oluklu EAAM'nin rotoruna uygulanan kaykı durumu ve kullanılan malzemeye göre tasarlanan her bir modelinin elektromanyetik performansının uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm modellerin manyetik akı dağılım değerlerinin benzer seviyelerde olduğu görülmektedir.

RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında bir EAAM elde etmek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Endüstride yaygın olarak kullanılan IE3 enerji verimliliği sınıfındaki bir RAAM'a ait 2D analizler gerçekleştirilmiş olup verim ve moment değerleri elde edilmiştir. Daha sonra aynı stator ve rotor oluk sayıları kullanılan bir EAAM modeli tasarlanmış ve iki model karşılaştırılmıştır. RAAM modelinden IE3 enerji verimliliği sınıfında bir sonuç elde edilirken, aynı stator ve rotor oluk sayıları kullanılan EAAM modelinin herhangi bir enerji verimliliği sınıfında olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak, aynı stator ve rotor oluk sayıları kullanılarak tasarlanan EAAM modelinin veriminde RAAM modelinin verimine kıyasla %12,5'lik bir düşüş yaşadığı görülmüştür.
- RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında yani IE3 enerji verimliliği sınıfında EAAM modellerinin tasarlanması için farklı rotor oluk sayıları kullanılarak yedi farklı model tasarlanmıştır.
- EAAM modelleri için yapılan benzetim çalışmalarının hepsi 3D olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu modellere sık ağ atılarak benzetim sonuçlarının doğruluğu arttırılmıştır. Benzetim çalışmalarının hem 3D hem de detaylı olarak yapılmasından dolayı analizler Üniversitemiz bünyesinde bulunan süper hızlı bilgisayarlarda bile çok uzun sürmektedir. Bu zorluğu minimize etmek için EAAM modellerinin simetriklik durumları göz önünde bulundurularak 30 ve 42 rotorlu oluklu modellerinin 1/6 oranındaki kesitleri kullanılırken diğer modellerin ise yarım modelleri kullanılmıştır.

- Elektrik makinaları tasarımında en önemli kriterlerden biri de moment dalgalanması olduğu için tasarımlar yapılırken, IE3 enerji verimliliği sınıfında bir EAAM modeli tasarlamakla birlikte moment dalgalanmasının düşük seviyelerde tutulmasının da önemli olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, yedi farklı modelin rotoruna kaykı açıları uygulanmıştır.
- Literatürden farklı olarak, EAAM modellerinin rotorlarına kaykı açıları uygulanırken stator oluk sayıları ile birlikte rotor oluk sayıları da dikkate alınmıştır. Bu bağlamda her bir farklı rotor oluk sayılı EAAM modeli için beş farklı kaykı açısı belirlenmiştir. Bunlardan üç kaykı açısı stator oluk sayıları dikkate alınarak belirlenirken, iki kaykı açısı ise rotor oluk sayıları dikkate alınarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yedi farklı rotor oluk sayılı EAAM modellerine ek otuzbeş adet rotoruna kaykı açısı uygulanmış EAAM modeli daha tasarlanmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Stator ve rotor oluk sayıları dikkate alınarak, modeller arasında, rotoruna kaykı açısı olarak β_s ve β_r uygulanan modeller incelendiğinde yedi farklı oluk sayısı arasından beş tanesinde β_r uygulanan modellerin verimlerinin daha iyi olduğu görülmektedir.
- Rotor oluk sayılarına göre kaykı açısı olarak β_r ve $2 \cdot \beta_r$ kaykı açısı uygulanmış modellerin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda 34 rotor oluklu modelden itibaren, oluk sayıları arttıkça verimin de artmış olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, buradan rotor oluk sayısının stator oluk sayısına göre daha yüksek olduğu modellerde oluk sayısı arttıkça verimin de arttığı görülebilmektedir.
- Sadece kaykı açısı uygulanmış modellerin sonuçlarına bakıldığında dokuz adet EAAM modelinin IE3 enerji verimliliği sınıfında olduğu görülmektedir. Ancak, bu modellerin çoğunda moment dalgalanmasının yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Sadece iki adet modelin moment dalgalanmasının %10'nun altında olduğu tespit edilmiştir. Bu modeller arasından ise en düşük moment dalgalanmasının 32 rotor oluklu EAAM'nin rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modelinde olduğu görülmektedir.
- Bütün analiz sonuçları değerlendirildiğinde onbeş adet EAAM modelinin IE3 enerji verimliliği sınıfında olduğu görülmektedir. Ancak, bu modellerin

çoğunda moment dalgalanmasının yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Sadece beş adet modelin moment dalgalanmasının %10'nun altında olduğu tespit edilmiştir. Bu modeller arasından ise en düşük moment dalgalanmasının 32 rotor oluklu EAAM'nin rotoruna 10° kaykısı açısı uygulanmış modelinde olduğu görülmektedir.

- Literatürden farklı olarak, bu tez çalışmasında ilk kez EAAM'un parçalarında YMK malzeme kullanılmıştır. YMK malzemenin motorun farklı parçalarına uygulanmış ve bu malzemenin kullanılması ile birlikte kullanım yerlerinin de verim ve moment dalgalanması üzerindeki etkisinin incelenmiştir.
- Bu bağlamda, YMK malzeme kullanımının genel olarak verime olumlu etki ettiği görülmüştür. Ayrıca, rotoruna kaykısı uygulanmamış ve çelik malzeme kullanılmış model ile hem statorunda hem de rotorunda YMK malzeme kullanılmış modelin moment dalgalanması değerleri kıyaslandığında zaten düşük seviyelerde olan moment dalgalanmasının daha da düşük seviyelere inerek değerinde %11,2'lik bir azalma elde edilmiştir.
- EAAM'nin hem stator hem rotorunda YMK malzemesinin kullanılması ile verimlilik sınıfı IE3 iken moment dalgalanması, rotoruna kaykısı uygulanmamış ve çelik malzeme kullanılmış modelin moment dalgalanması değeri ile kıyaslandığında %11'in üzerinde moment dalgalanmasını azaltması ile bu modelin performans analizi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.
- Yapılan tez çalışmasında IE3 enerji verimliliği sınıfında birçok farklı model tasarlanmıştır. İleriki çalışmalarda, farklı uygulama alanları için yeni EAAM model tasarımları yapılabilir.
- Bu çalışmada EAAM parçalarında YMK malzeme kullanılarak malzemenin ve parçaların verim ve moment üzerine etkisi incelenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda ise farklı malzemeler kullanılarak EAAM modelleri tasarlanabilir. Tasarlanan modeller ile bu çalışmada elde edilen veriler de kullanılarak en uygun malzeme seçimi üzerine çalışmalar yapılabilir.

Sonuç olarak bu çalışmada amaç, RAAM ile aynı enerji verimliliği sınıfında bir EAAM elde etmek olduğundan, EAAM'lerin verimliliği ve moment dalgalanması araştırılmıştır. Bu çalışmada ANSYS Maxwell programı yardımıyla manyetik

analizleri yapılmış ve moment değerleri hesaplanmıştır. 28'den 42'ye kadar yedi farklı rotor oluk sayısına göre analiz sonuçlarının verimlilik değerleri sunulmuştur. Verimlilik değerlerinin yanı sıra yüzde moment dalgalanmaları ve enerji verimliliği sınıfı da incelenmiştir. Moment dalgalanma değerlerini azaltmak için rotora, stator ve rotor oluk sayılarına göre kaykı açısı uygulanmasının moment dalgalanması üzerindeki etkilerinin değişken olduğu görülmüştür. Ayrıca, sadece stator oluk sayısına göre değil, rotor oluk sayısı ile de kaykı açısı derecelerinin seçilmesinin EAAM'lerin performansını olumlu yönde etkileyebileceği gözlemlenmiştir. Son olarak parametrik analizleri gerçekleştirilen tasarımların en iyisi seçilerek YMK materyalin etkisini gözlemlemek amacıyla manyetik analizleri gerçekleştirilmiş, verimlilik ve moment dalgalanması üzerindeki pozitif etkisi saptanmıştır. Manyetik geçirgen laminasyonların geleneksel üretim metodlarıyla kesilerek EAAM'lerin üretilmesindeki zorluklardan dolayı, YMK materyaller yeni üretim metodlarıyla EAAM'ler için avantajlı olmaktadır. Bu sebeple, EAAM'ler üzerine yapılacak çalışmalarda YMK materyal kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir.

- [1] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, J. A. C. Fong, and C. U. Brunner, "Electric motor standards, ecodesign and global market transformation," in *Conference Record - Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 2008.
- [2] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and J. A. C. Fong, "Standards for Efficiency of Electric Motors," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 17, no. 1, pp. 12–19, 2010.
- [3] C. U. Brunner *et al.*, "Standards for efficient electric motor systems SEEEM building a worldwide community of practice," in *Conf. Proc. of Energy-Efficiency Motor Driven Systems*, 2007.
- [4] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and J. A. C. Fong, "Standards for super-premium efficiency class for electric motors," in *Conference Record - Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 2009.
- [5] F. J. T. E. Ferreira, B. Leprettre, and A. T. De Almeida, "Comparison of Protection Requirements in IE2-, IE3-, and IE4-Class Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 4, pp. 3603–3610, Jul. 2016.
- [6] C. U. Brunner, P. Waide, and M. Jakob, "Harmonized Standards for Motors and Systems Global progress report and outlook," 2011.
- [7] S. D. Sudhoff, D. C. Aliprantis, B. T. Kuhn, and P. L. Chapman, "An induction machine model for predicting inverter-machine interaction," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 17, no. 2, pp. 203–210, Jun. 2002.
- [8] D. A. Elvira-Ortiz, D. Morinigo-Sotelo, A. L. Zorita-Lamadrid, R. A. Osornio-Rios, and R. de J. Romero-Troncoso, "Fundamental frequency suppression for the detection of broken bar in induction motors at low slip and frequency," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 12, pp. 1–17, Jun. 2020.
- [9] W. Pietrowski and K. Górny, "Analysis of Torque Ripples of an Induction Motor Taking into Account a Inter-Turn Short-Circuit in a Stator Winding," *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3626, Jul. 2020.
- [10] G. K. Esen and E. Ozdemir, "A New Field Test Method for Determining Energy Efficiency of Induction Motor," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 12, pp. 3170–3179, Dec. 2017.
- [11] A. Parviainen, *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machines*. 2005.
- [12] A. Boglietti, A. Cavagnino, and S. Vaschetto, "Induction motor EU standards for

- efficiency evaluation: The scenario after IEC 60034-2-1," in *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, pp. 2786–2791.
- [13] "IEC-Governments & International Organizations, Examples by industry sector: Electric motors-measuring efficiency." [Online]. Available: https://www.iec.ch/perspectives/government/sectors/electric_motors.htm. [Accessed: 18-Mar-2020].
 - [14] "Electric motors | European Commission." [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/energy-efficient-products/electric-motors_en. [Accessed: 18-Mar-2020].
 - [15] "Elektrik Motorlari ile İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklere Dair Tebliğ ." 2012.
 - [16] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and G. Baoming, "Beyond induction motors - Technology trends to move up efficiency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 3, pp. 2103–2114, 2014.
 - [17] F. J. T. E. Ferreira, G. Baoming, and A. T. De Almeida, "Reliability and operation of high-efficiency induction motors," in *2015 IEEE/IAS 51st Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, I and CPS 2015*, 2015.
 - [18] "The Impact of New IE3 Requirements on Motors and Controls." [Online]. Available: <https://www.totallyintegratedautomation.com/2017/11/impact-new-ie3-requirements-motors-controls/>. [Accessed: 18-Mar-2020].
 - [19] M. Valtonen, A. Parviainen, and J. Pyrhönen, "Electromagnetic field analysis of 3D structure of axial-flux solid-rotor induction motor," in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006*, 2006, vol. 2006, pp. 174–178.
 - [20] P. D. Evans and J. F. Eastham, "Disc-geometry homopolar synchronous machine," *IEE Proc. B Electr. Power Appl.*, vol. 127, no. 5, pp. 299–307, 1980.
 - [21] M. Valtonen, A. Parviainen, and J. Pyrhönen, "Influence of the air-gap length to the performance of an axial-flux induction motor," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08*, 2008.
 - [22] P. Andrada, B. Blanqué, E. Martínez, J. I. Perat, J. A. Sánchez, and M. Torrent, "Influence of Manufacturing and Assembly Defects and the Quality of Materials on the Performance of an Axial-Flux Switched Reluctance Machine," *Energies*, vol. 12, no. 24, p. 4807, Dec. 2019.
 - [23] R. Wallace, L. Moran, G. Cea, and F. Perez, "Design and construction of medium power axial flux induction motors," in *IEE Conference Publication*, 1991, pp. 260–265.
 - [24] M. Valtonen, A. Parviainen, and J. Pyrhönen, "The effects of the number of rotor slots on the performance characteristics of axial-flux aluminium-cage solid-rotor core induction motor," in *IEEE International Electric Machines &*

Drives Conference, 2007, vol. 1, pp. 668–672.

- [25] M. A. Tapia Montero, A. E. Hoffer Garces, J. A. Tapia Ladino, and R. R. Wallace Collao, "Simulation and Analysis of an Axial Flux Induction Machine," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 7, pp. 1263–1269, 2017.
- [26] M. 1979- Valtonen and Digipaino, "Performance characteristics of an axial-flux solid-rotor-core induction motor," Lappeenranta University of Technology, 2007.
- [27] D. Yu, X. Huang, L. Wu, and Y. Fang, "Design and Analysis of Outer Rotor Permanent-Magnet Vernier Machines with Overhang Structure for In-Wheel Direct-Drive Application," *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1238, Apr. 2019.
- [28] F. Kutt, K. Blecharz, and D. Karkosiński, "Axial-Flux Permanent-Magnet Dual-Rotor Generator for a Counter-Rotating Wind Turbine," *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2833, Jun. 2020.
- [29] S. J. Hajnrych, R. Jakubowski, and J. Szczypior, "Yokeless Axial Flux Surface-Mounted Permanent Magnets Machine Rotor Parameters Influence on Torque and Back-Emf," *Energies*, vol. 13, no. 13, p. 3418, Jul. 2020.
- [30] Zhao, Han, Dai, and Hua, "Study on the Electromagnetic Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles," *Energies*, vol. 12, no. 18, p. 3451, Sep. 2019.
- [31] J. S. Varga, "Magnetic and Dimensional Properties of Axial Induction Motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. EC-1, no. 2, pp. 137–144, Jun. 1986.
- [32] A. Gonzalez-Parada, F. Trillaud, R. Guzman-Cabrera, and M. Abatal, "Torque ripple reduction in an axial flux high temperature superconducting motor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, pp. 1–5, 2015.
- [33] D. K. Banchhor, A. K. Kalo, A. Dwivedi, and R. K. Srivastava, "Experiences with Axial-Flux induction motor," in *2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth, ICEPE 2015*, 2016, pp. 1–6.
- [34] B. Dianati, S. Kahourzade, and A. Mahmoudi, "Analytical design of axial-flux induction motors," in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 - Proceedings*, 2019.
- [35] D. Rodger, P. C. Coles, N. Allen, H. C. Lai, P. J. Leonard, and P. Roberts, "3D finite element model of a disc induction machine," in *IEE Conference Publication*, 1997, no. 444, pp. 148–149.
- [36] M. Valtonen, A. Parviainen, and J. Pyrhönen, "Inverter switching frequency effects on the rotor losses of an axial-flux solid-rotor core induction motor," in *POWERENG 2007 - International Conference on Power Engineering - Energy and Electrical Drives Proceedings*, 2007.
- [37] F. K. Arabul, I. Senol, and Y. Oner, "Performance analysis of axial-flux induction motor with skewed rotor," *Energies*, vol. 13, no. 19, p. 4991, 2020.
- [38] F. Profumo, Z. Zhang, and A. Tenconi, "Axial flux machines drives: A new viable solution for electric cars," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 1, pp. 39–45,

1997.

- [39] W. Xu, J. Zhu, Y. Guo, S. Wang, Y. Wang, and Z. Shi, "Survey on electrical machines in electrical vehicles," in *2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2009*, 2009, pp. 167–170.
- [40] J. Mei, C. H. T. Lee, and J. L. Kirtley, "Design of axial flux induction motor with reduced back iron for electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 293–301, 2020.
- [41] F. Caricchi, F. Crescimbeni, and E. Santini, "Axial-flux electromagnetic differential induction motor," in *IEE Conference Publication*, 1995, no. 412, pp. 1–5.
- [42] P. H. F. De Sousa, N. M. M. E Nascimento, P. P. R. Filho, and C. M. S. De Medeiros, "Detection and classification of faults in induction generator applied into wind turbines through a machine learning approach," in *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2018, vol. 2018-July.
- [43] S. Das and Y. Sozer, "Design and analysis of an axial flux doubly fed induction generator for wind turbine applications," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2019*, 2019, pp. 442–447.
- [44] N. Esposito, A. Musolino, and B. Tellini, "Electromagnetic Analysis of an Induction Motor with Massive Disk," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 3, pp. 2076–2079, 1995.
- [45] A. Benoudjit, A. Guettafi, and N. Nait Saïd, "Axial flux induction motor for on-wheel drive propulsion system," *Electr. Mach. Power Syst.*, vol. 28, pp. 1107–1125, 2000.
- [46] A. Benoudjit and N. Nait Said, "New dual-airgap axial and radial-flux induction motor for on wheel drive electric propulsion systems," in *POWERCON 1998 - 1998 International Conference on Power System Technology, Proceedings*, 1998.
- [47] A. Dwivedi, S. K. Gupta, S. K. Singh, and R. K. Srivastava, "Experiences with axial flux sheet rotor induction motor," in *2015 IEEE IAS Joint Industrial and Commercial Power Systems / Petroleum and Chemical Industry Conference (ICPSPCIC)*, 2017, pp. 115–118.
- [48] S. Kubzdela and B. Weglinski, "Magnetodielectrics in Induction Motors with Disk Rotor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 1, pp. 635–638, Jan. 1987.
- [49] G. B. Kliman and N. Assignee, "Induction Disk Motor with Metal Tape Components," 14-Oct-1980.
- [50] A. Álvarez *et al.*, "Superconducting armature for induction motor of axial flux based on YBCO bulks," *Phys. C Supercond. its Appl.*, 2002.
- [51] A. Álvarez, P. Suárez, D. Cáceres, X. Granados, B. Pérez, and J. M. Ceballos, "Disk-shaped superconducting rotor for an axial flux induction motor," *Phys. C Supercond. its Appl.*, 2003.
- [52] A. Álvarez, P. Suárez, D. Cáceres, E. Cordero, J. M. Ceballos, and B. Pérez, "Disk-

- shaped superconducting rotor under a rotating magnetic field: Speed dependence," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2174–2177, 2005.
- [53] I. Muta, H. Jung, T. Nakamura, and T. Hoshino, "Performance of axial-type motor with Bi-2223 HTS bulk rotor," *Phys. C Supercond. its Appl.*, 2002.
 - [54] I. Muta, T. Nakamura, T. Hirata, T. Hoshino, and T. Konishi, "Preliminary study on axial-type BSCCO superconducting motor," *Phys. C Supercond. its Appl.*, 2001.
 - [55] M. Ashari *et al.*, "Design and Implementation of Axial Flux Induction Motor Single Stator - Single Rotor for Electric Vehicle Application," *IPTEK J. Proc. Ser.*, vol. 1, no. 1, pp. 497–501, 2015.
 - [56] C. C. Chan, "Axial-field electrical machines - design and applications," *IEEE Trans. Energy Convers.*, 1987.
 - [57] Q. Hecker, J. Igelspacher, and H. G. Herzog, "Parameter identification of an axial-flux induction machine by winding functions," in *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010*, 2010.
 - [58] J. Igelspacher and H. G. Herzog, "Analytical description of a single-stator axial-flux induction machine with squirrel cage," in *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010*, 2010, pp. 1–6.
 - [59] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "A survey on axial flux induction motors," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 2, pp. 300–305, 2012.
 - [60] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Investigation of characteristics of a single-phase axial flux induction motor using three-dimensional finite element method and d-q model," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 7, no. 1, pp. 47–57, 2013.
 - [61] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Using stator discharge current for the parameter estimation of a single-phase axial flux induction motor," *Sci. Iran.*, vol. 19, no. 6, pp. 1794–1801, 2012.
 - [62] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Optimal design of adjustable air-gap, two-speed, capacitor-run, single-phase axial flux induction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp. 543–552, 2013.
 - [63] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "New design solution for static eccentricity in single stator-single rotor axial flux induction motors," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 7, no. 6, pp. 523–534, 2013.
 - [64] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Theoretical modeling of axial flux squirrel cage induction motor considering both saturation and anisotropy," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 335–346, 2014.
 - [65] V. R. Babu and M. P. Soni, "A novel method of using twin-rotor axial flux induction machine for wind energy conversion and the reactive power compensation by TSC-TCR," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 2, no. 8, pp. 399–407, 2012.
 - [66] L. Shuo, F. Yu, Z. Xi, and Q. Wei, "New structure of axial flux induction motor and characterization analysis," in *2011 International Conference on Electrical*

Machines and Systems, ICEMS 2011, 2011, pp. 1–5.

- [67] B. H. Smith and D. Platt, "Compound, Series, Axial Flux Induction Machines: Single Phase Analogy," *IEE Proc. B Electr. Power Appl.*, vol. 137, no. 4, pp. 265–272, 1990.
- [68] Q. Wei, F. Yu, Z. Xi, and L. Shuo, "Analysis on electromagnetic field of an axial-flux solid aluminum rotor induction motor," in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2011*, 2011, pp. 1–4.
- [69] C. Zhang, K. J. Tseng, and T. D. Nguyen, "Analysis and comparison of axial flux PM synchronous motor and induction motor," in *2010 9th International Power and Energy Conference, IPEC 2010*, 2010, pp. 572–577.
- [70] F. C. Mushid and D. G. Dorrell, "Review of axial flux induction motor for automotive applications," in *Proceedings - 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2017*, 2017, pp. 146–151.
- [71] A. Nobahari, A. Darabi, and A. Hassannia, "Axial flux induction motor, design and evaluation of steady state modeling using equivalent circuit," in *8th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC 2017*, 2017.
- [72] D. J. Patterson, J. L. Colton, B. Mularcik, B. J. Kennedy, S. Camilleri, and R. Rohoza, "A comparison of radial and axial flux structures in electrical machines," in *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC '09*, 2009, pp. 1029–1035.
- [73] W. M. Arshad, T. Backstrom, and C. Sadarangani, "Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine," in *IEMDC 2001 - IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2001, pp. 115–121.
- [74] M. Mirzaei, M. Mirsalim, and S. E. Abdollahi, "Analytical modeling of axial air gap solid rotor induction machines using a quasi-three-dimensional method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 7, pp. 3237–3242, Jul. 2007.
- [75] V. R. Babu and D. S. M. P., "Modelling of Twin Rotor Axial Flux Induction Machine and its Application as Differential in Electrical Vehicles," *IJIREICE*, vol. 5, no. 5, pp. 118–127, 2017.
- [76] A. Egea, "Overview of Axial Flux Machines," *Electr. Energy Mag.*, vol. 4, pp. 2–13, 2013.
- [77] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*. 2008.
- [78] C. Ejiofor, Oti & Nwosu, Cajethan & Awah, "Loss Estimation and Parameters Calculation of a 7.5kW Induction Machine," *Int. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, pp. 31–36, 2014.
- [79] IEEE, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," *IEEE Std 112-2017 (Revision IEEE Std 112-2004)*, pp. 1–115, 2018.
- [80] International Standard, "Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)," *IEC 60034-30-12014*, pp. 1–50, 2014.

- [81] Technical Specification, “Rotating electrical machines - Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code),” *IEC TS 60034-30-22016*, pp. 1–22, 2016.



A

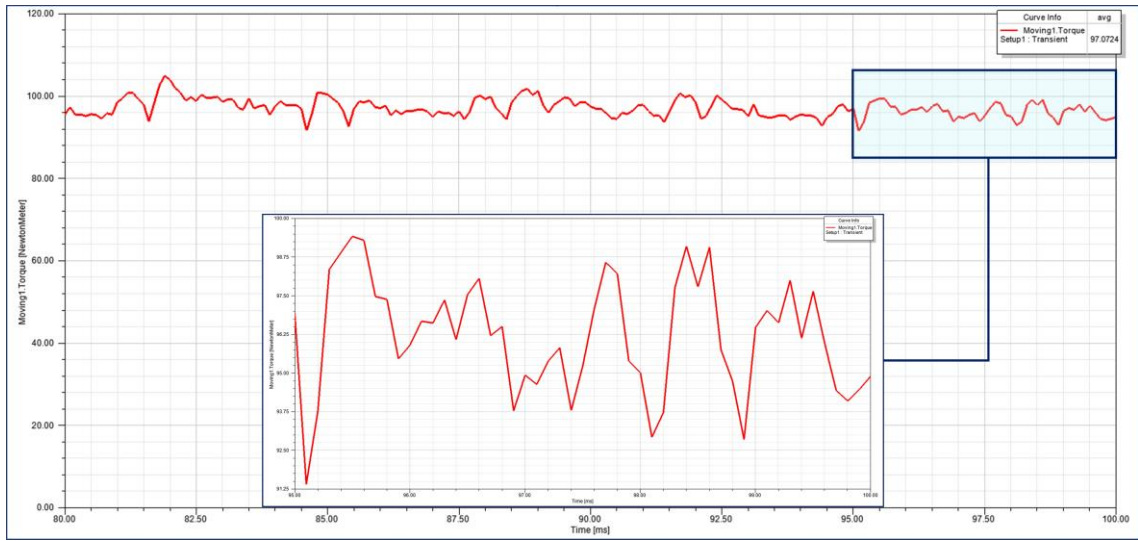
IEC 60034-30-1 ENERJİ VERİMLİLİĞİ SINIFLARI

Output kW	IE1				IE2				IE3				IE4			
	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole
0.12	45.0	50.0	38.3	31.0	53.6	59.1	50.6	39.8	60.8	64.8	57.7	50.7	66.5	69.8	64.9	62.3
0.18	52.8	57.0	45.5	38.0	60.4	64.7	56.6	45.9	65.9	69.9	63.9	58.7	70.8	74.7	70.1	67.2
0.20	54.6	58.5	47.6	39.7	61.9	65.9	58.2	47.4	67.2	71.1	65.4	60.6	71.9	75.8	71.4	68.4
0.25	58.2	61.5	52.1	43.4	64.8	68.5	61.6	50.6	69.7	73.5	68.6	64.1	74.3	77.9	74.1	70.8
0.37	63.9	66.0	59.7	49.7	69.5	72.7	67.6	56.1	73.8	77.3	73.5	69.3	78.1	81.1	78.0	74.3
0.40	64.9	66.8	61.1	50.9	70.4	73.5	68.8	57.2	74.6	78.0	74.4	70.1	78.9	81.7	78.7	74.9
0.55	69.0	70.0	65.8	56.1	74.1	77.1	73.1	61.7	77.8	80.8	77.2	73.0	81.5	83.9	80.9	77.0
0.75	72.1	72.1	70.0	61.2	77.4	79.6	75.9	66.2	80.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	75.0	75.0	72.9	66.5	79.6	81.4	78.1	70.8	82.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	77.2	77.2	75.2	70.2	81.3	82.8	79.8	74.1	84.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	79.7	79.7	77.7	74.2	83.2	84.3	81.8	77.6	85.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	81.5	81.5	79.7	77.0	84.6	85.5	83.3	80.0	87.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	83.1	83.1	81.4	79.2	85.8	86.6	84.6	81.9	88.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	84.7	84.7	83.1	81.4	87.0	87.7	86.0	83.8	89.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	85.0	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	88.7	88.7	87.7	86.2	90.3	90.6	89.7	88.0	91.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	86.9	90.9	91.2	90.4	88.6	92.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	89.9	89.9	89.2	87.4	91.3	91.6	90.9	89.1	92.7	93.0	92.2	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	90.7	90.7	90.2	88.3	92.0	92.3	91.7	89.8	93.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	91.2	91.2	90.8	88.8	92.5	92.7	92.2	90.3	93.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	91.7	91.7	91.4	89.2	92.9	93.1	92.7	90.7	94.0	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	92.1	92.1	91.9	89.7	93.2	93.5	93.1	91.0	94.3	94.6	94.1	92.5	95.3	95.7	95.1	93.7
75	92.7	92.7	92.6	90.3	93.8	94.0	93.7	91.6	94.7	95.0	94.6	93.1	95.6	96.0	95.4	94.2
90	93.0	93.0	92.9	90.7	94.1	94.2	94.0	91.9	95.0	95.2	94.9	93.4	95.8	96.1	95.6	94.4
110	93.3	93.3	93.3	91.1	94.3	94.5	94.3	92.3	95.2	95.4	95.1	93.7	96.0	96.3	95.8	94.7
132	93.5	93.5	93.5	91.5	94.6	94.7	94.6	92.6	95.4	95.6	95.4	94.0	96.2	96.4	96.0	94.9
160	93.8	93.8	93.8	91.9	94.8	94.9	94.8	93.0	95.6	95.8	95.6	94.3	96.3	96.6	96.2	95.1
200	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
250	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.5	95.4
315	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
355	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
400	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
450	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
500-																
1000	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4

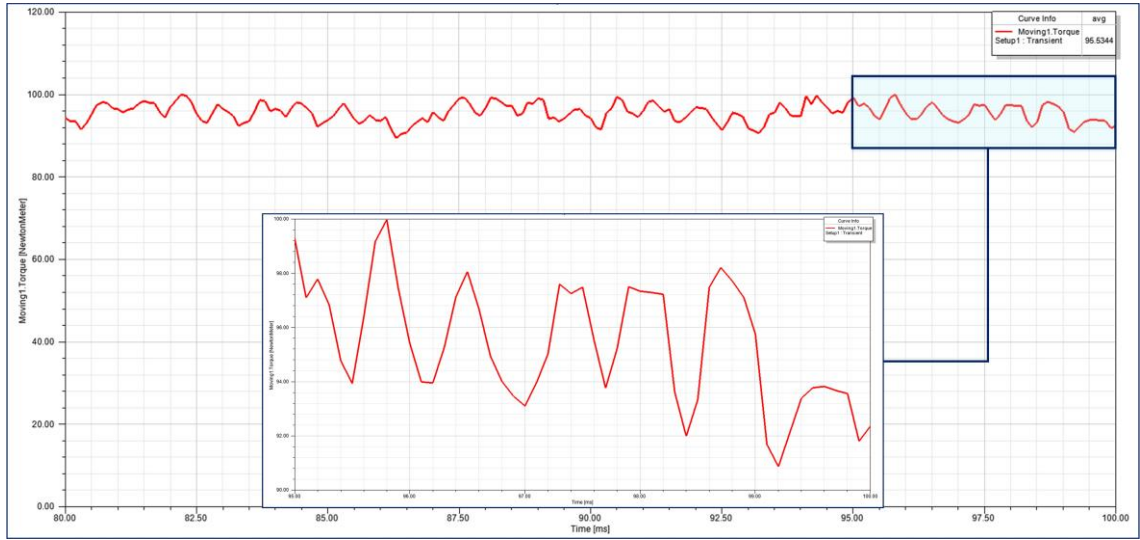
Şekil A. 1 IEC 60034-30-1 standardına göre enerji verimliliği sınıfları tablosu

B

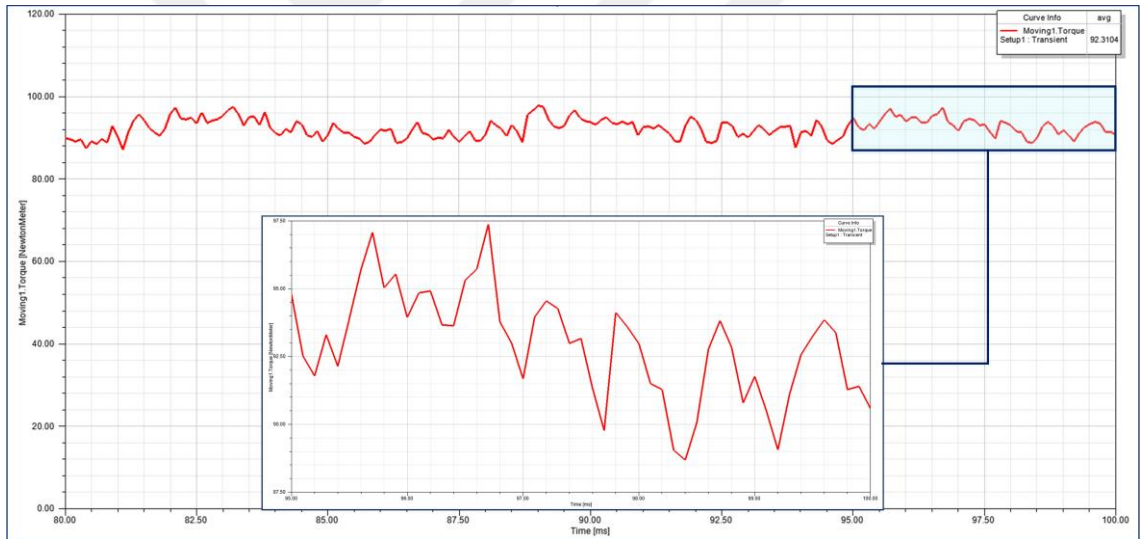
EKSENEL AKILI ASENKRON MOTOR BENZETİM ÇALIŞMALARI MOMENT DEĞİŞİM GRAFİKLERİ



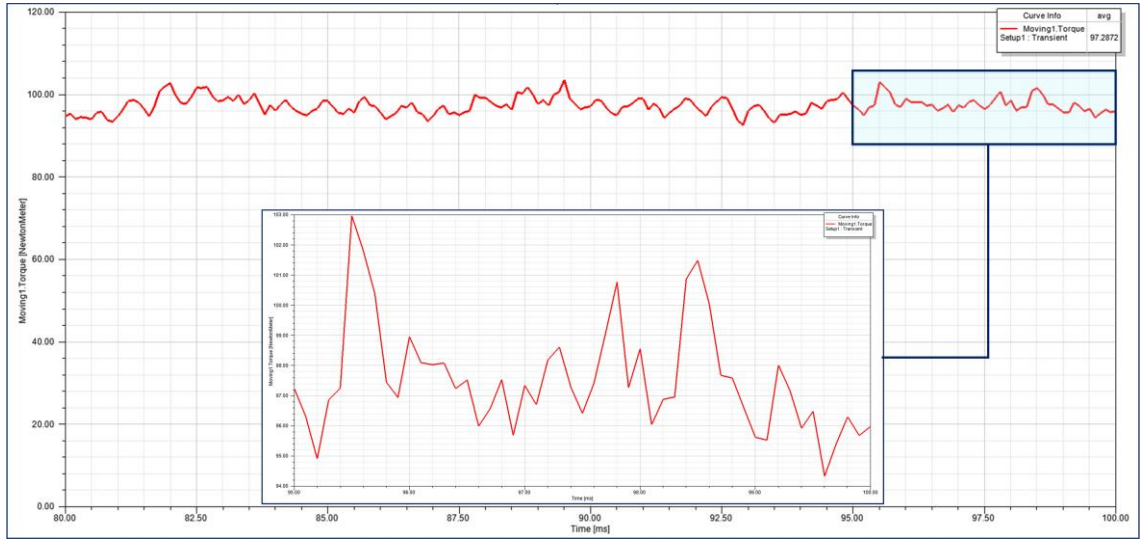
Şekil B. 1 28 oluklu rotoruna kaykçı açığı uygulanmamış modele ait moment değişimi



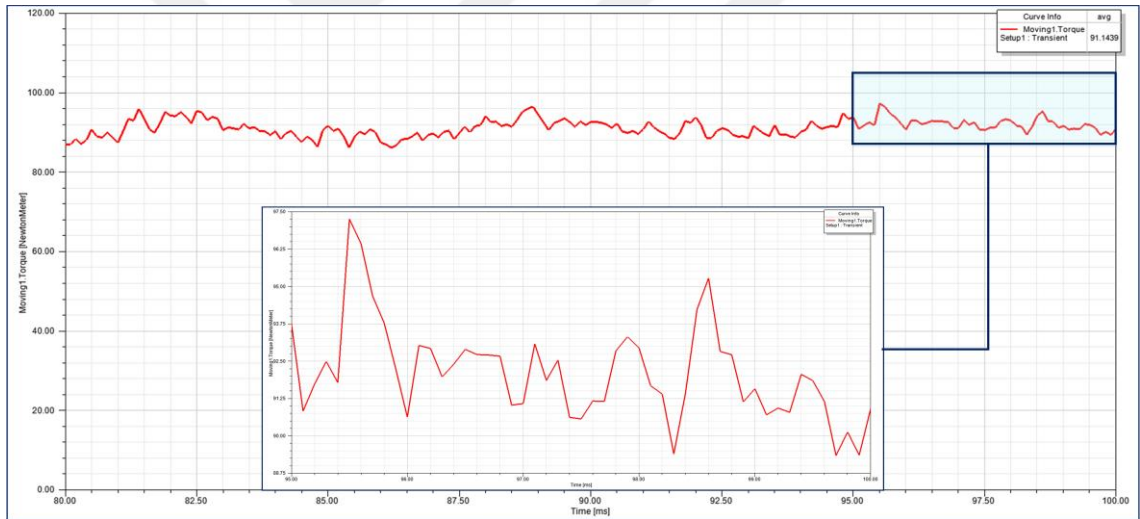
Şekil B. 2 28 oluklu rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



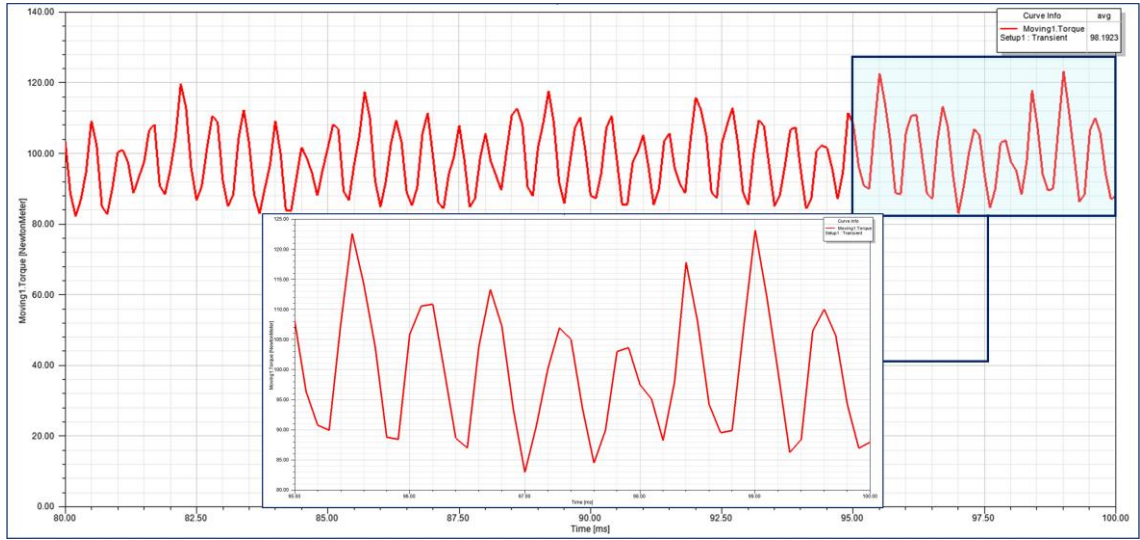
Şekil B. 3 28 oluklu rotoruna 12° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



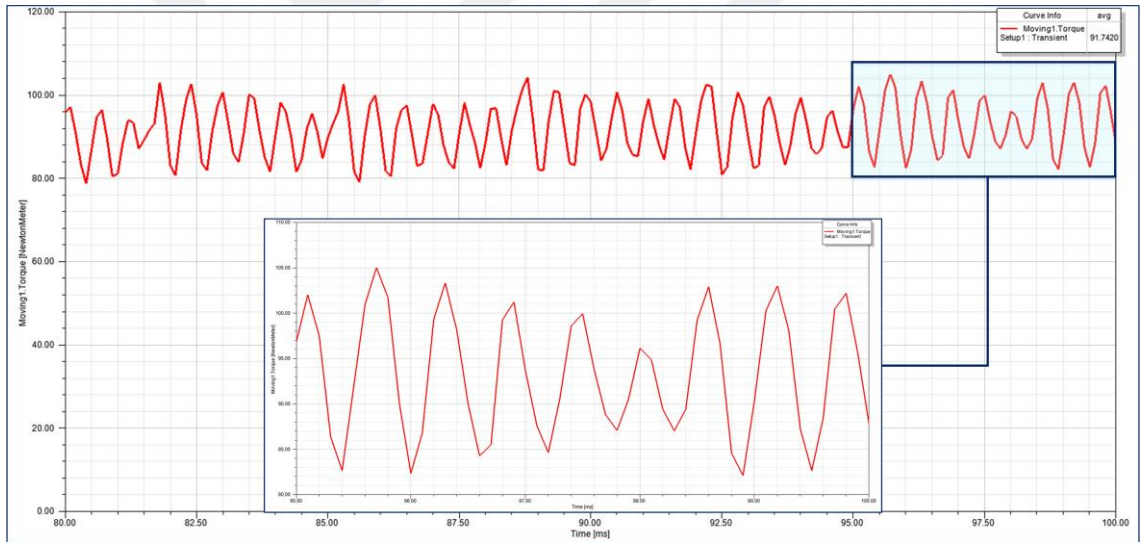
Şekil B. 4 28 oluklu rotoruna 15° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



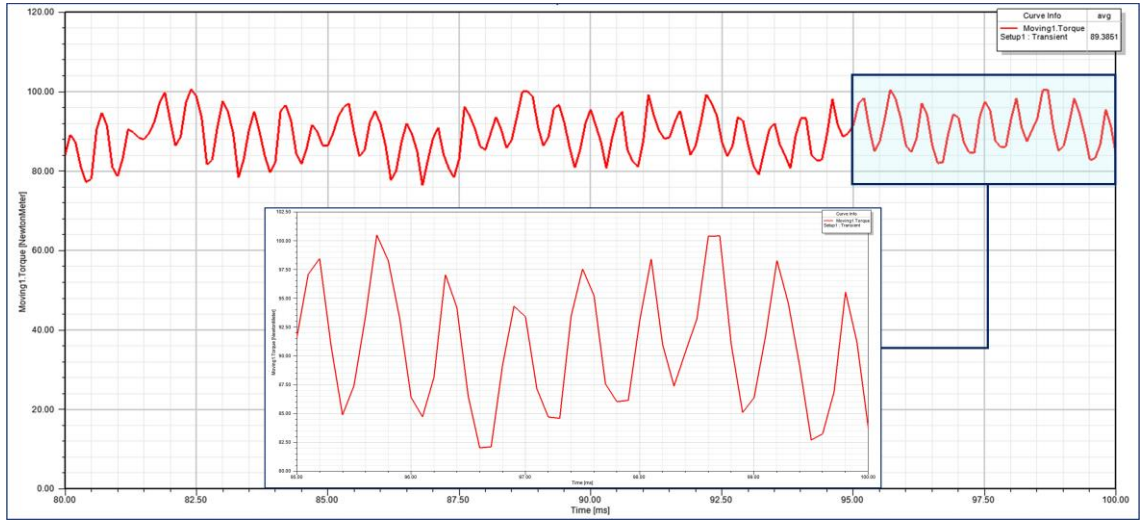
Şekil B. 5 28 oluklu rotoruna 20° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



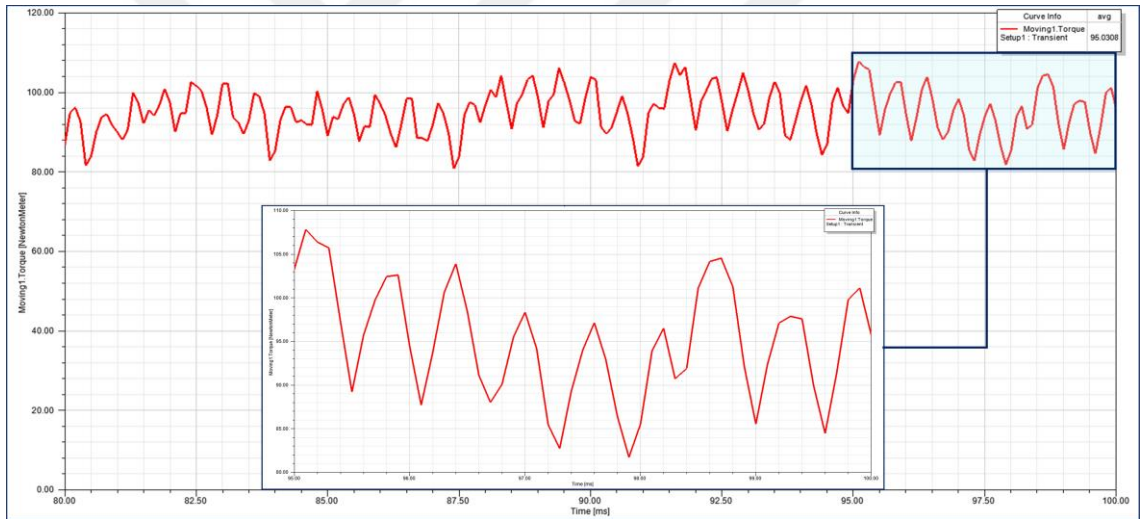
Şekil B. 6 30 oluklu rotoruna kaykı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi



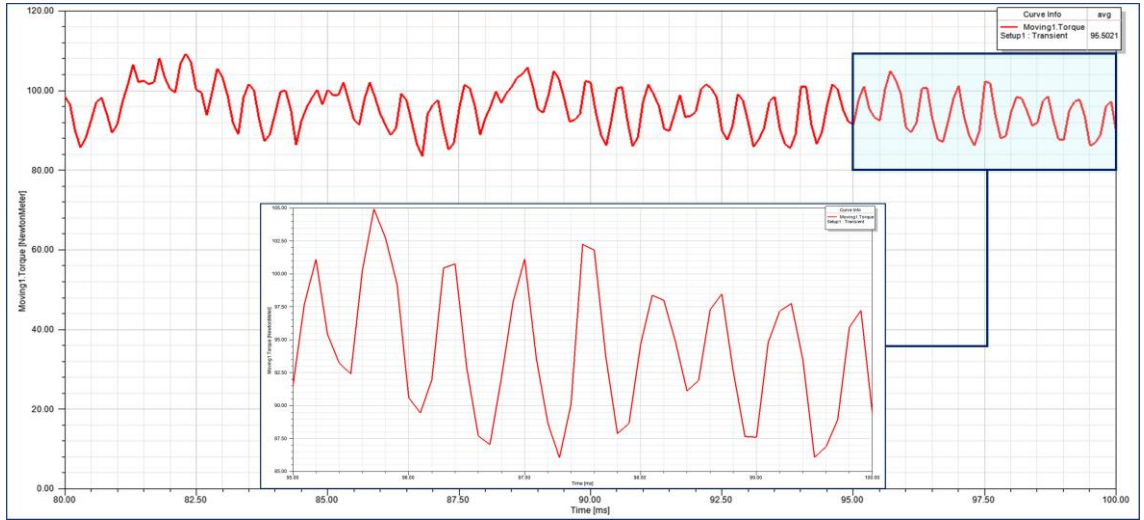
Şekil B. 7 30 oluklu rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



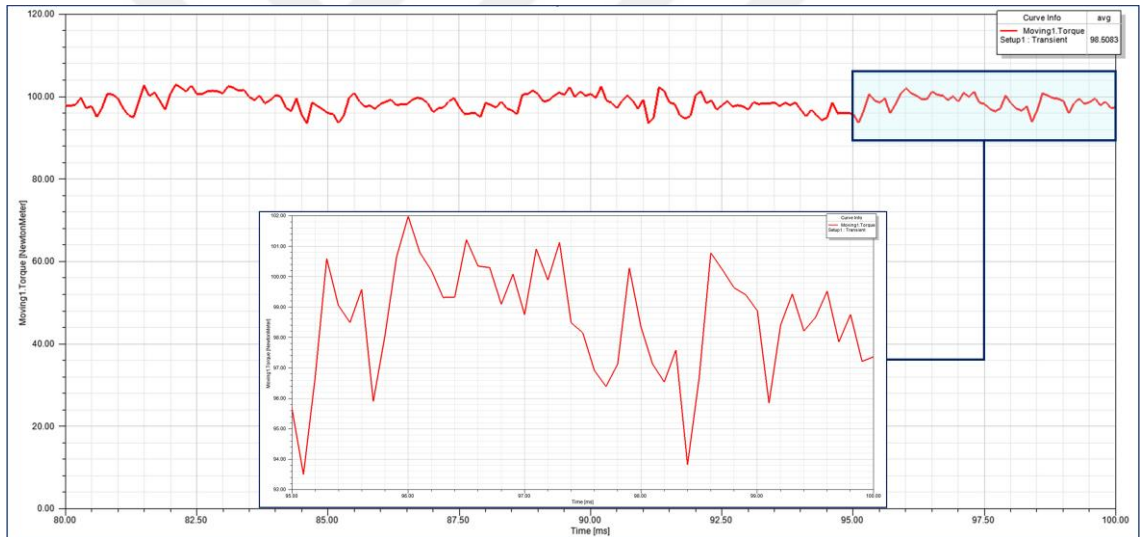
Şekil B. 8 30 oluklu rotoruna 12° kayık açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



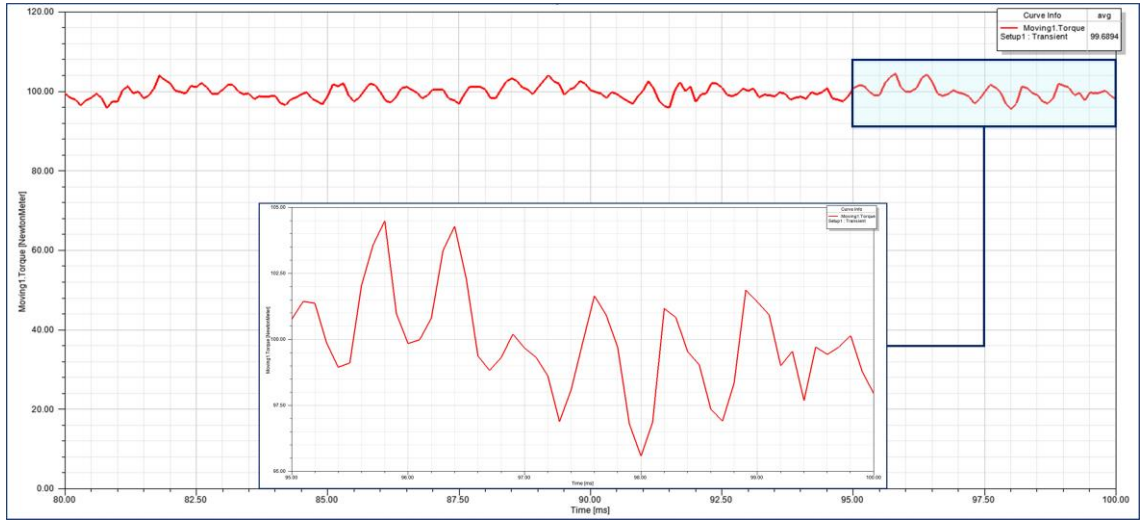
Şekil B. 9 30 oluklu rotoruna 15° kayık açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



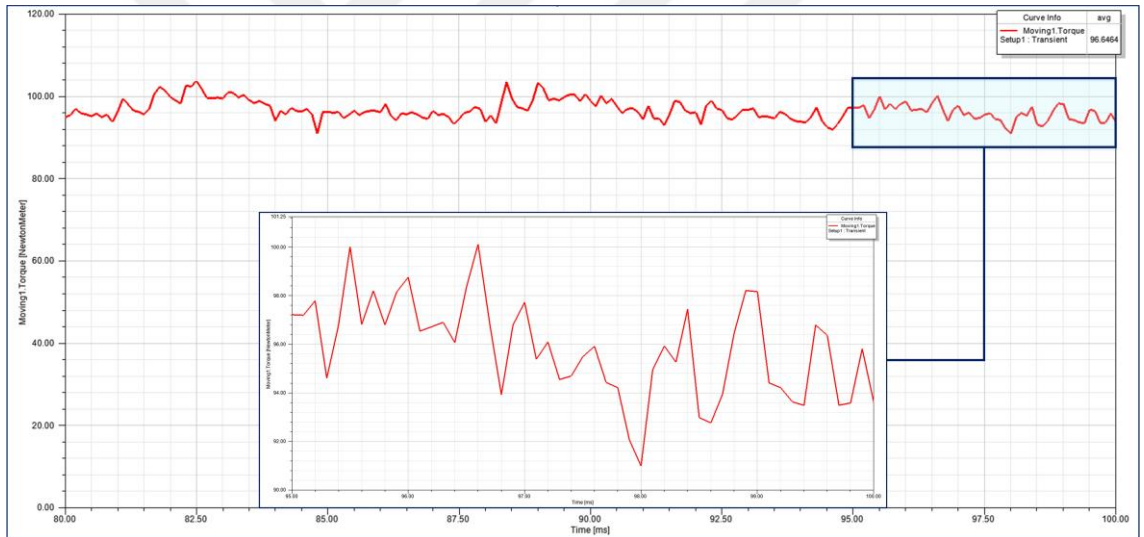
Şekil B. 10 30 oluklu rotoruna 20° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



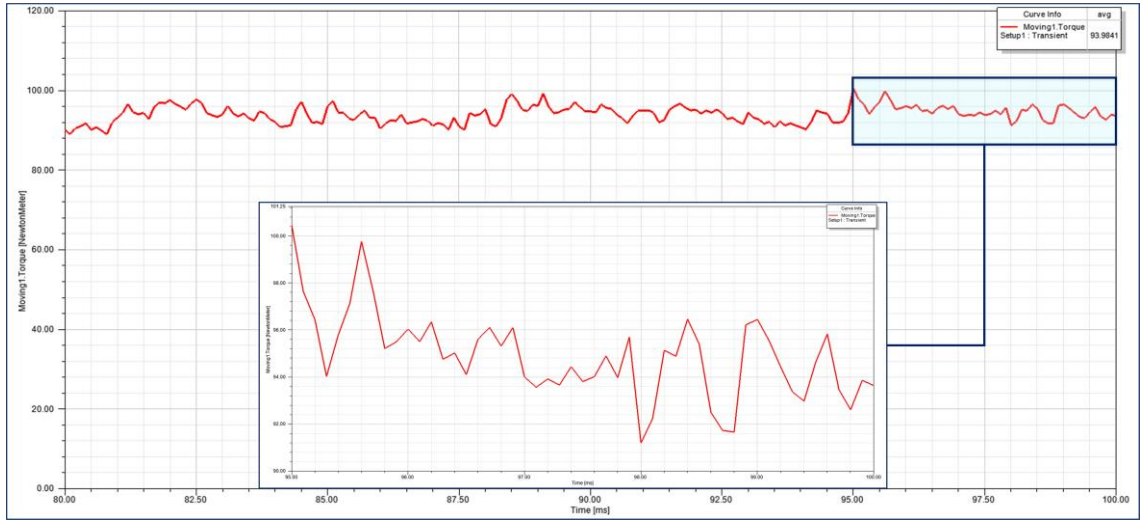
Şekil B. 11 32 oluklu rotoruna kaykı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi



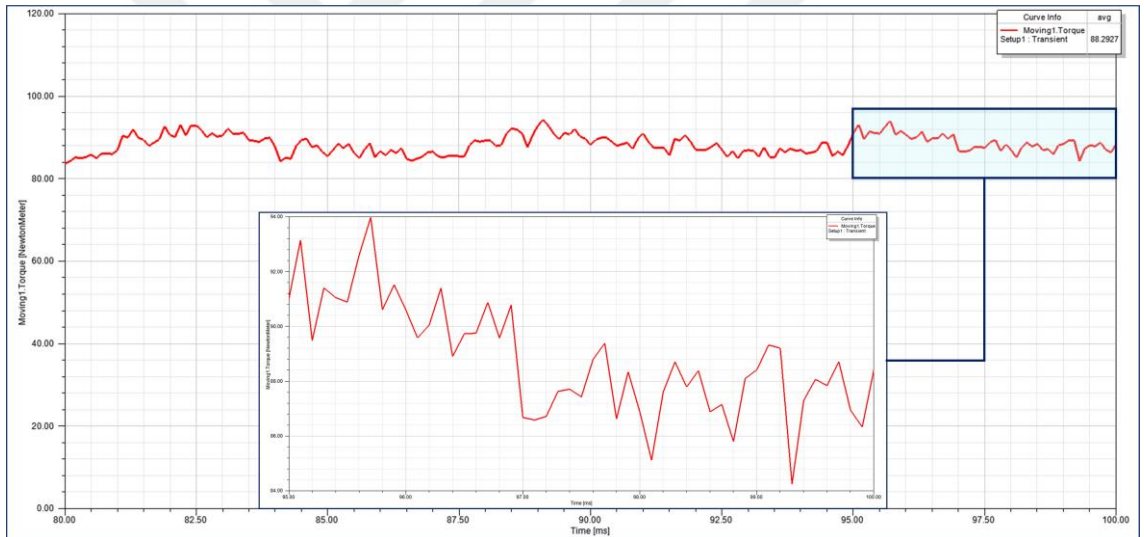
Şekil B. 12 32 oluklu rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



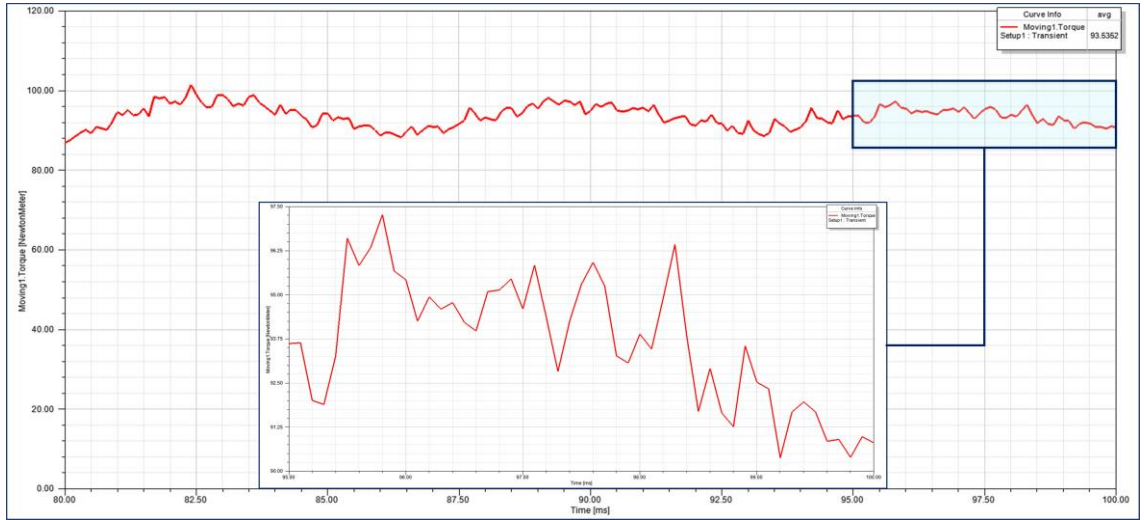
Şekil B. 13 32 oluklu rotoruna $11,25^\circ$ kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



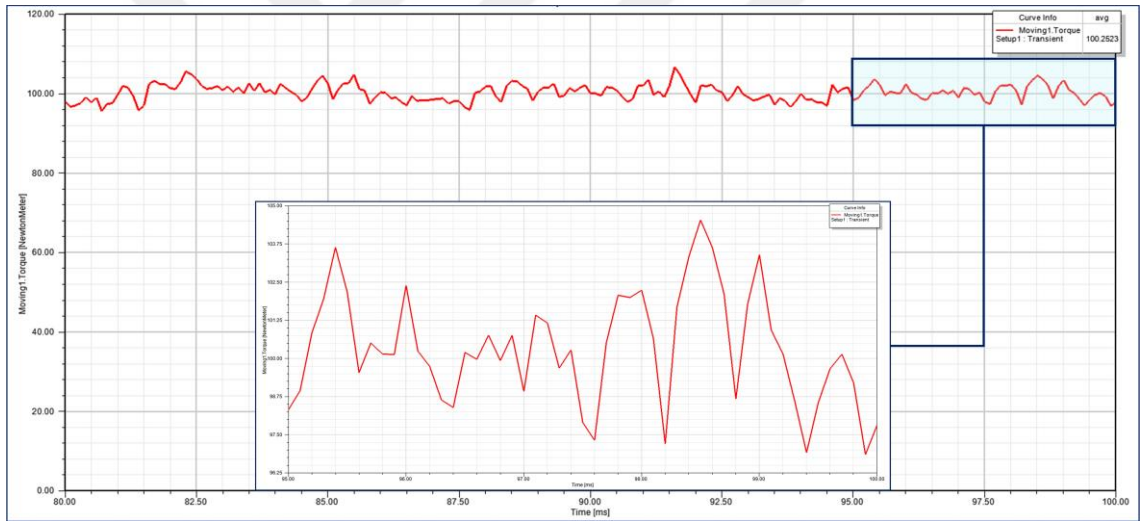
Şekil B. 14 32 oluklu rotoruna 15° kaykık açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



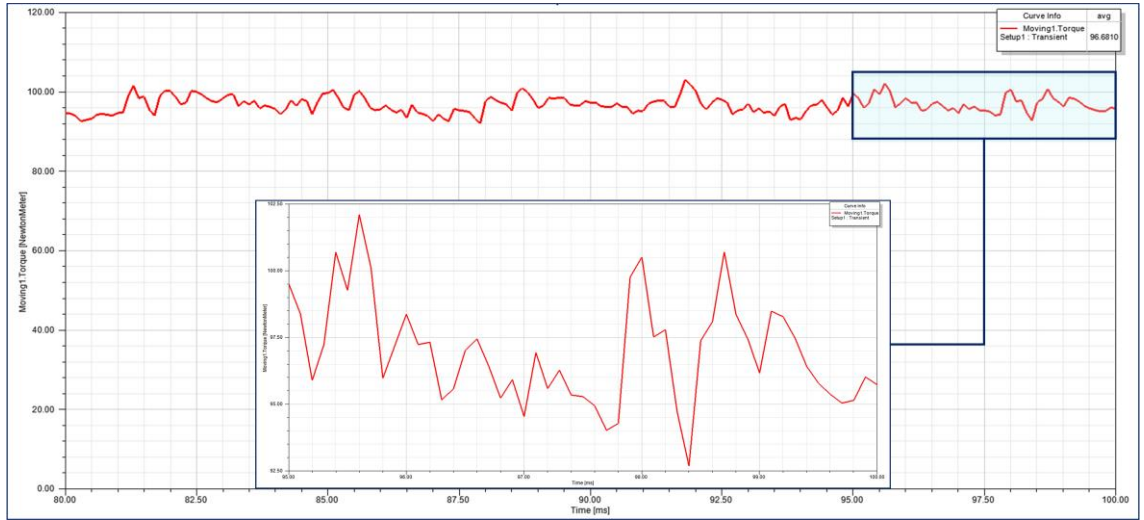
Şekil B. 15 32 oluklu rotoruna 20° kaykık açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



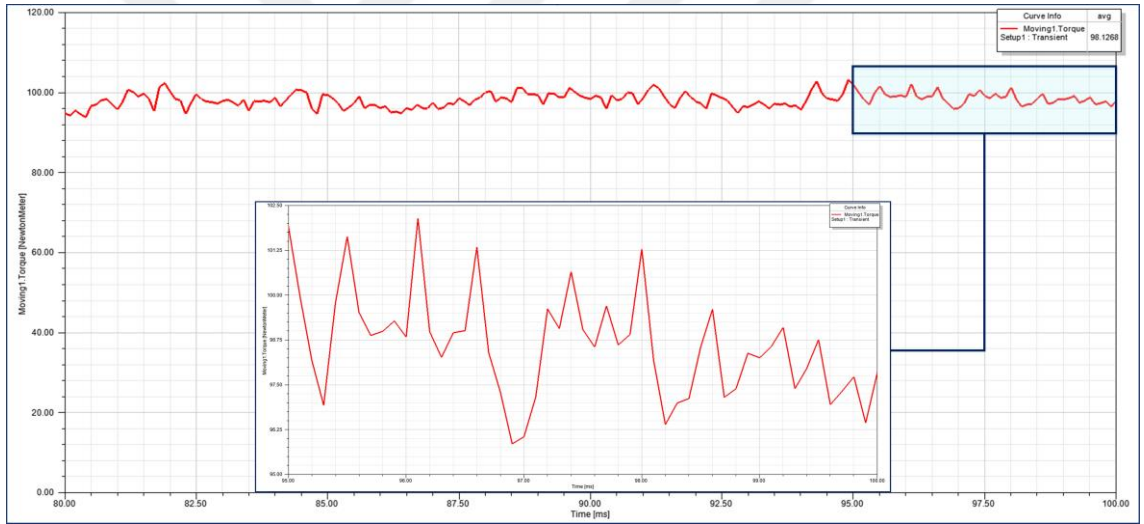
Şekil B. 16 32 oluklu rotoruna 22,5° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



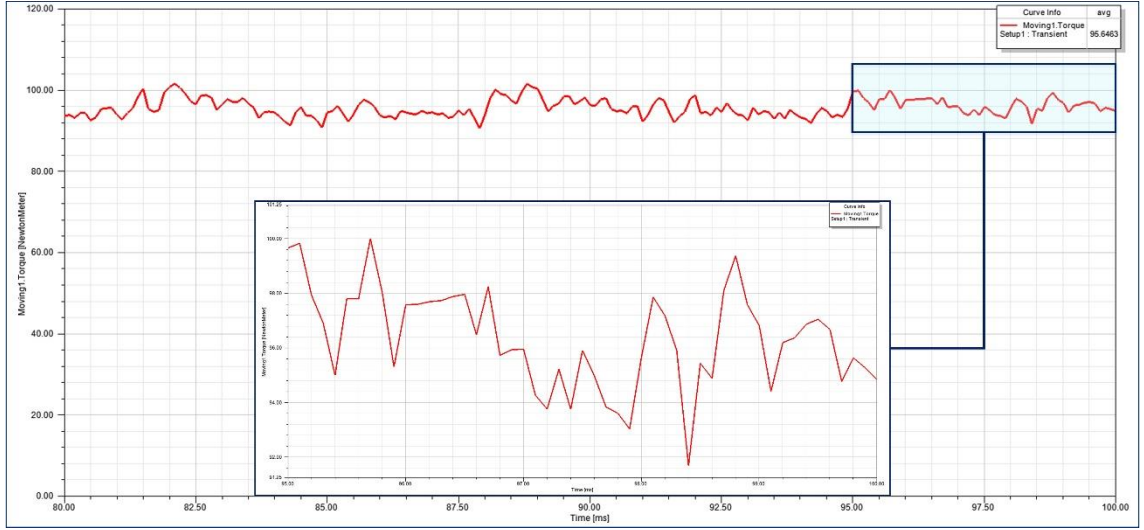
Şekil B. 17 34 oluklu rotoruna kaykı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi



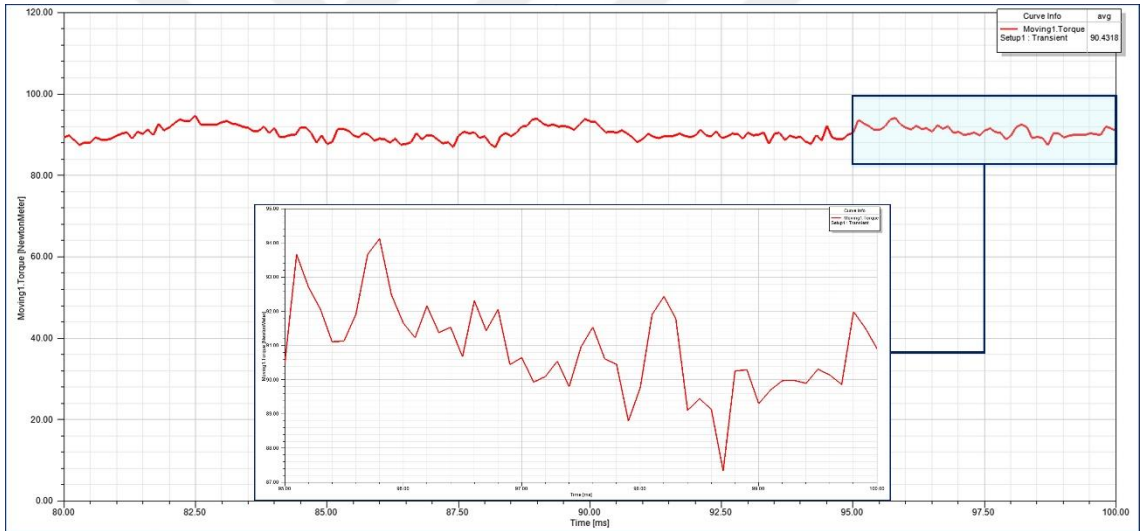
Şekil B. 18 34 oluklu rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



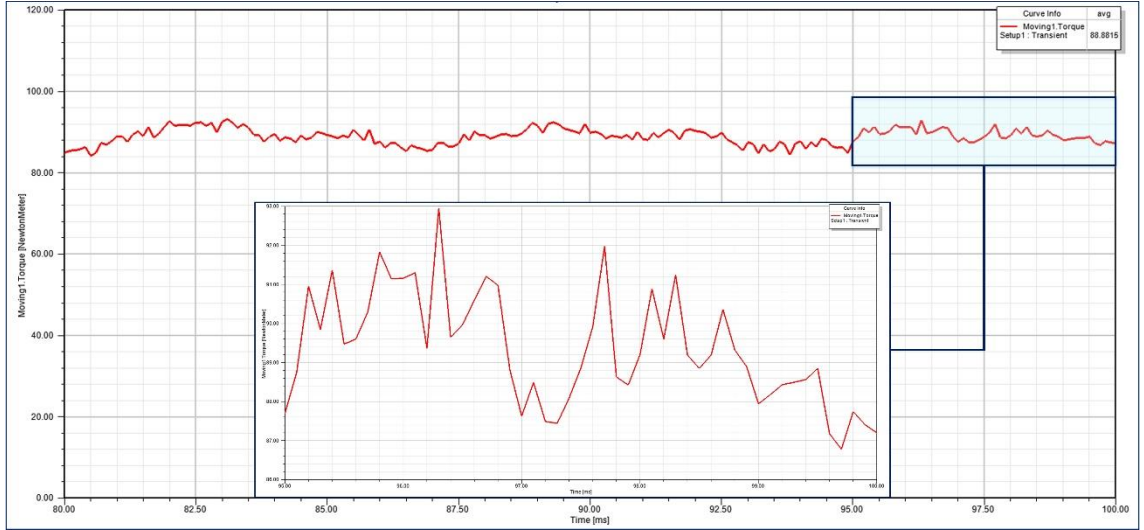
Şekil B. 19 34 oluklu rotoruna $10,58^\circ$ kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



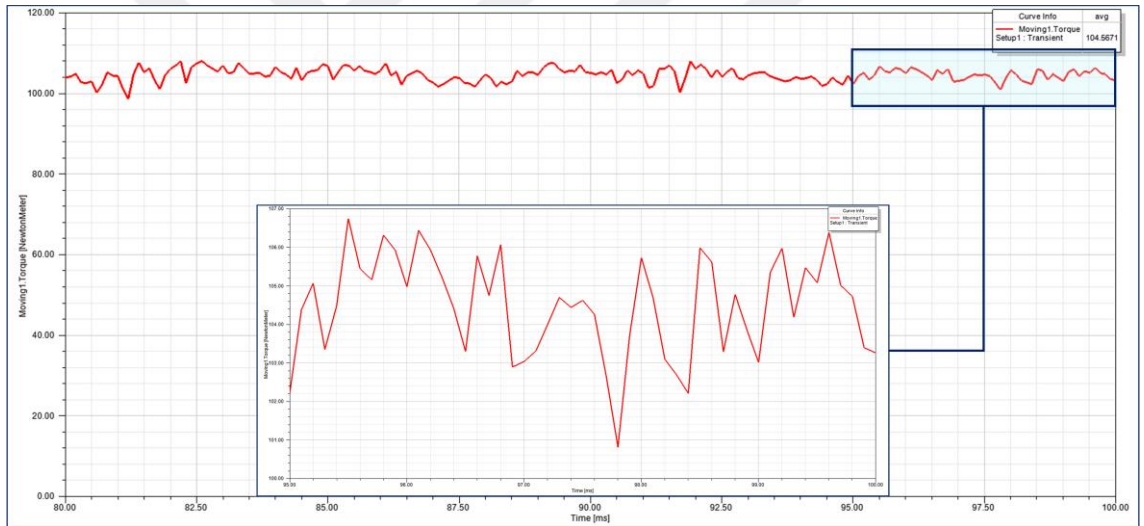
Şekil B. 20 34 oluklu rotoruna 15° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



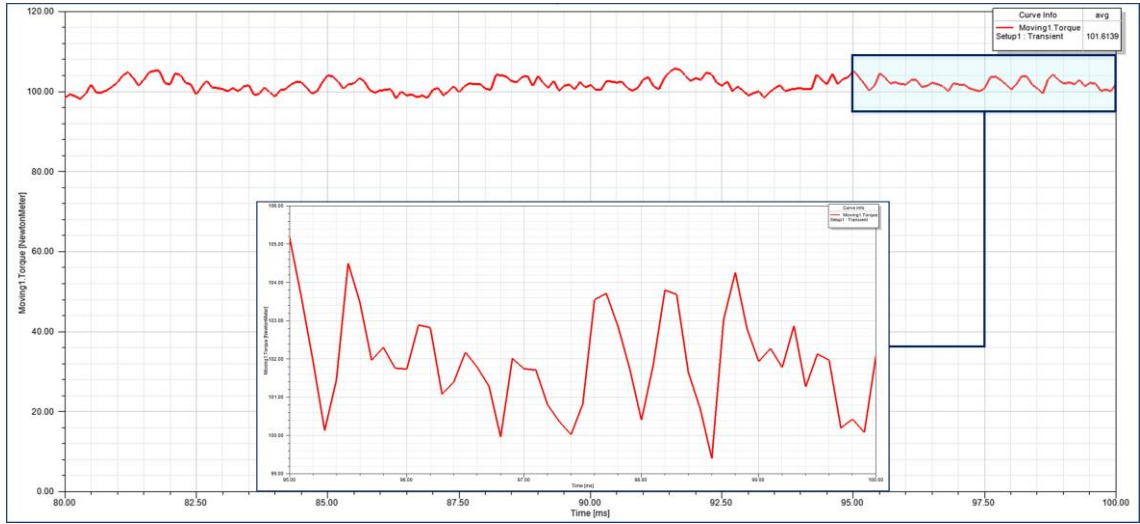
Şekil B. 21 34 oluklu rotoruna 20° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



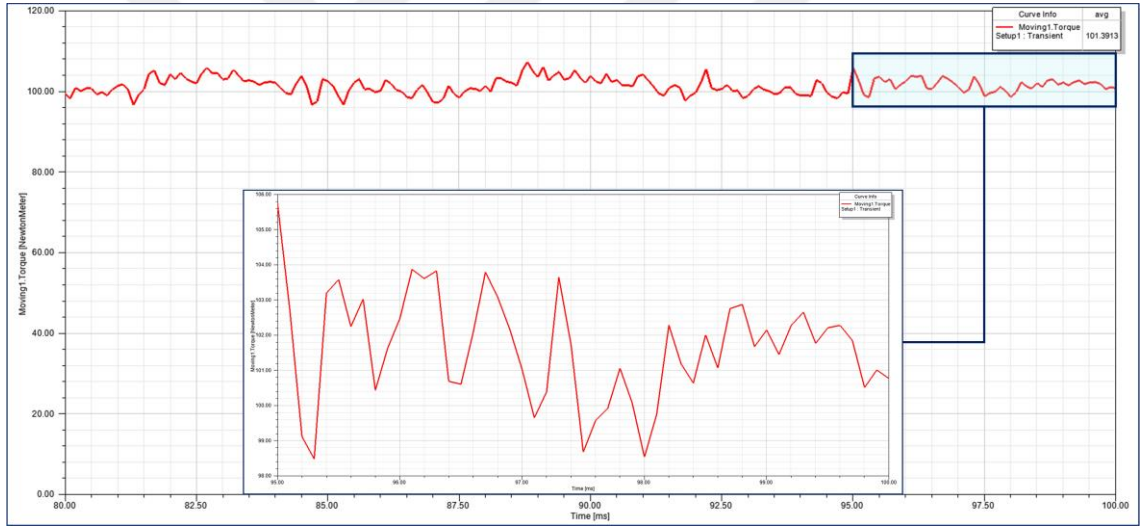
Şekil B. 22 34 oluklu rotoruna $21,17^\circ$ kaykık açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



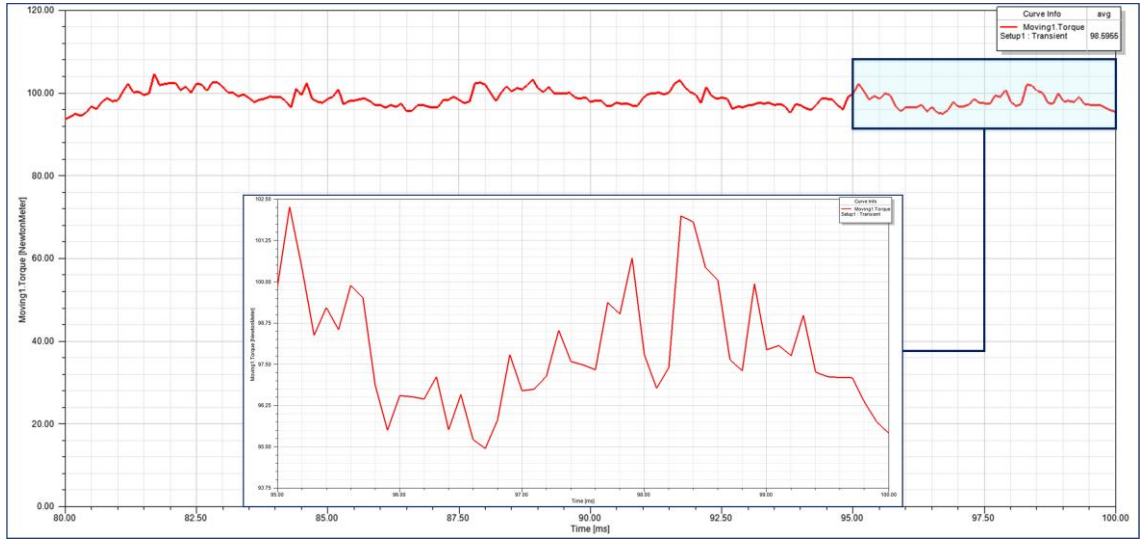
Şekil B. 23 38 oluklu rotoruna kaykık açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi



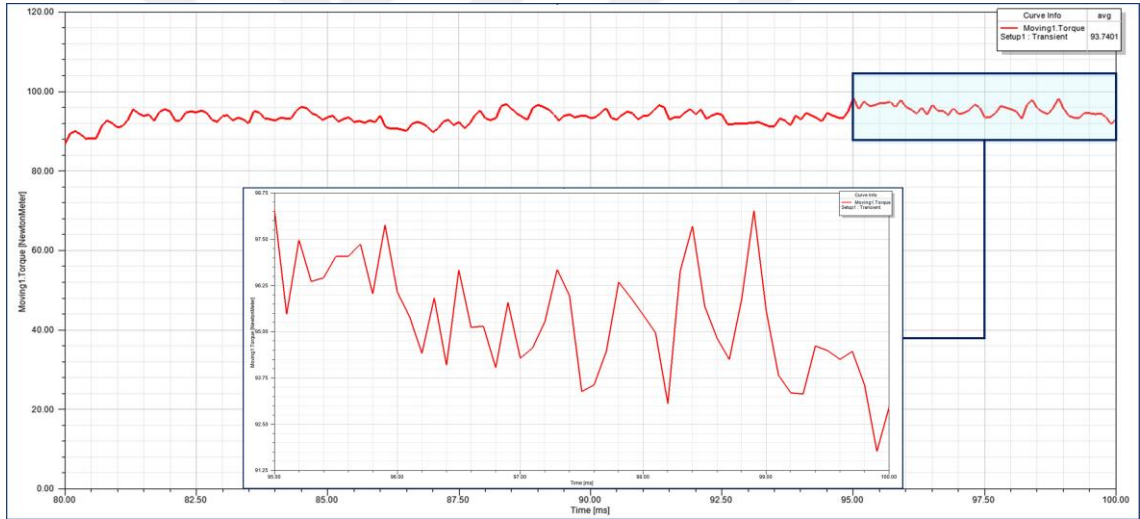
Şekil B. 24 38 oluklu rotoruna 9,47° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



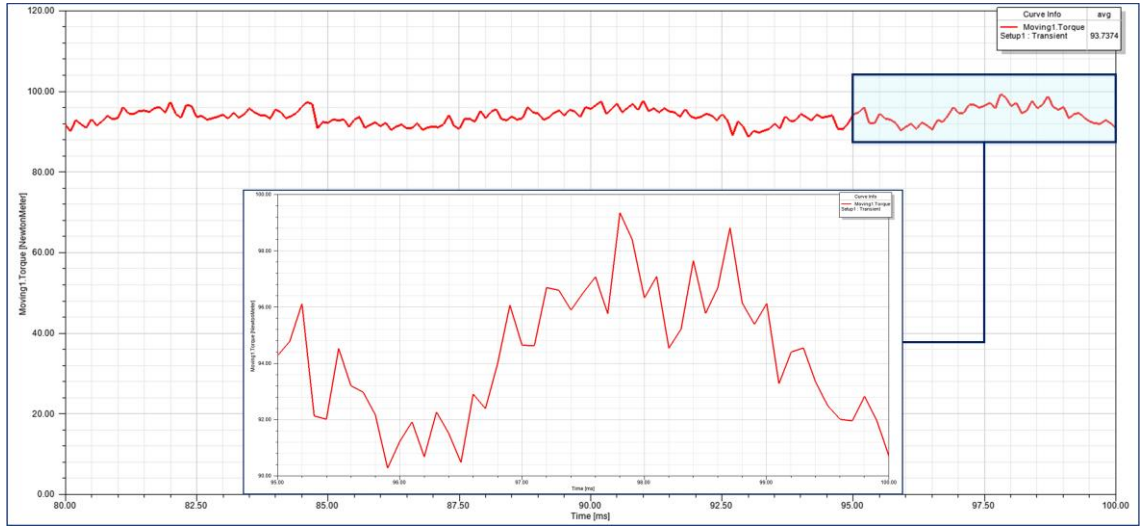
Şekil B. 25 38 oluklu rotoruna 10° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



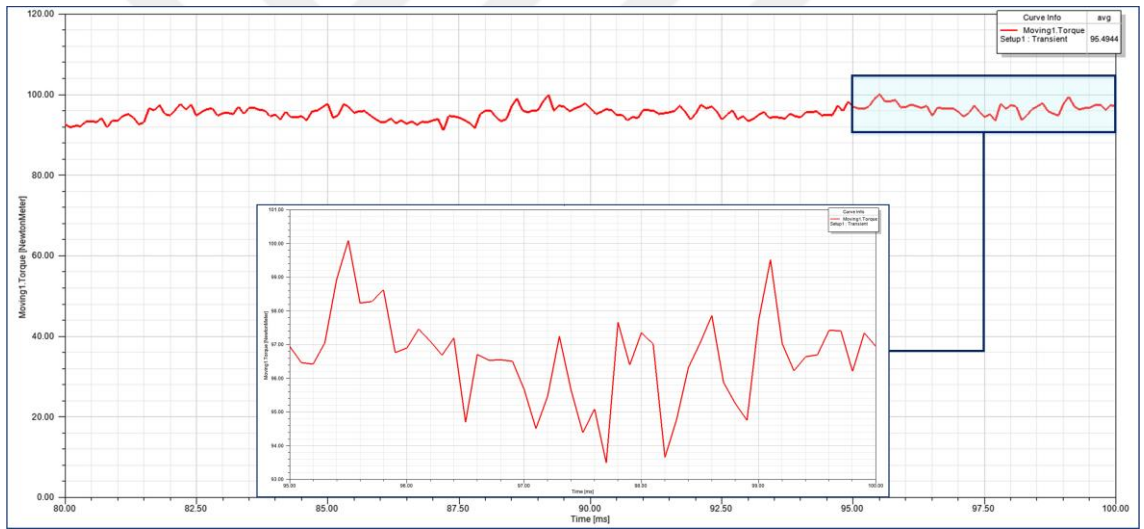
Şekil B. 26 38 oluklu rotoruna 15° kaykık açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



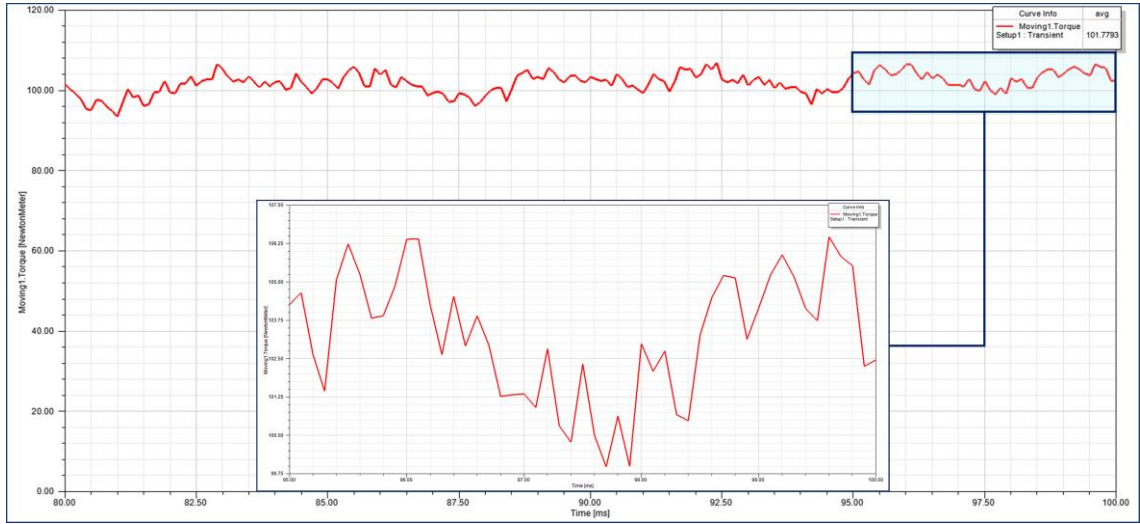
Şekil B. 27 38 oluklu rotoruna 18,95° kaykık açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



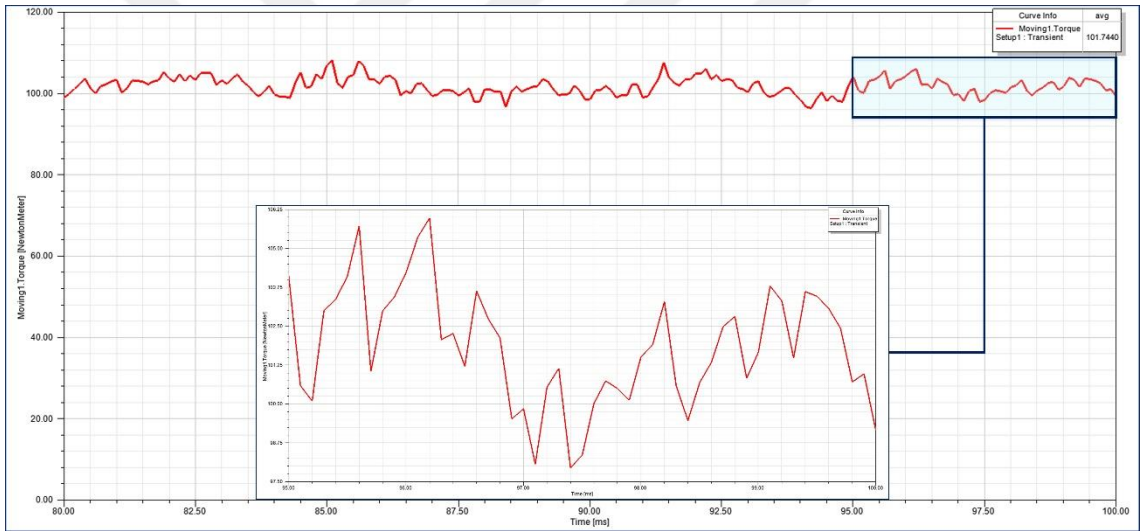
Şekil B. 28 38 oluklu rotoruna 20° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



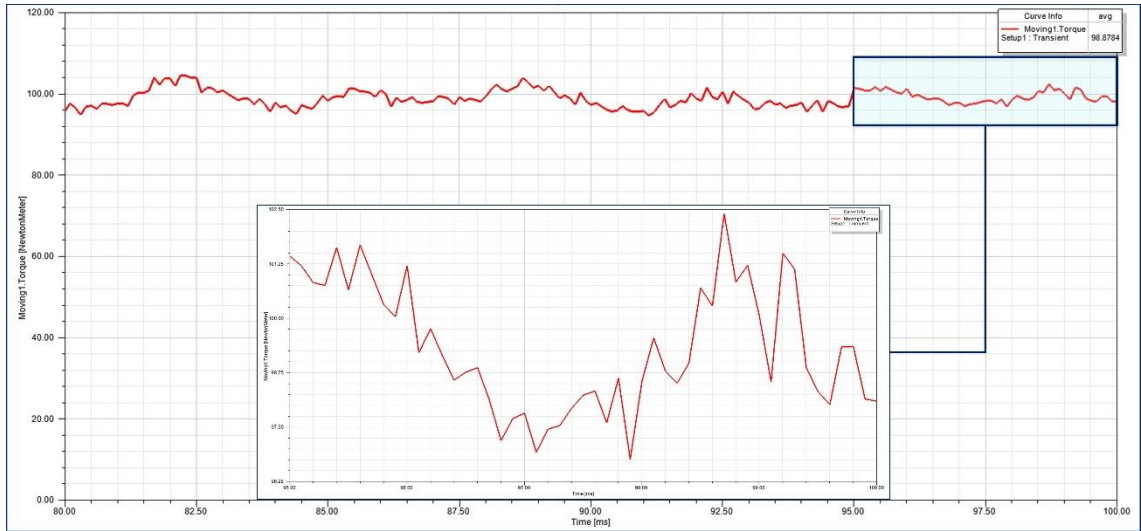
Şekil B. 29 40 oluklu rotoruna kaykısı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi



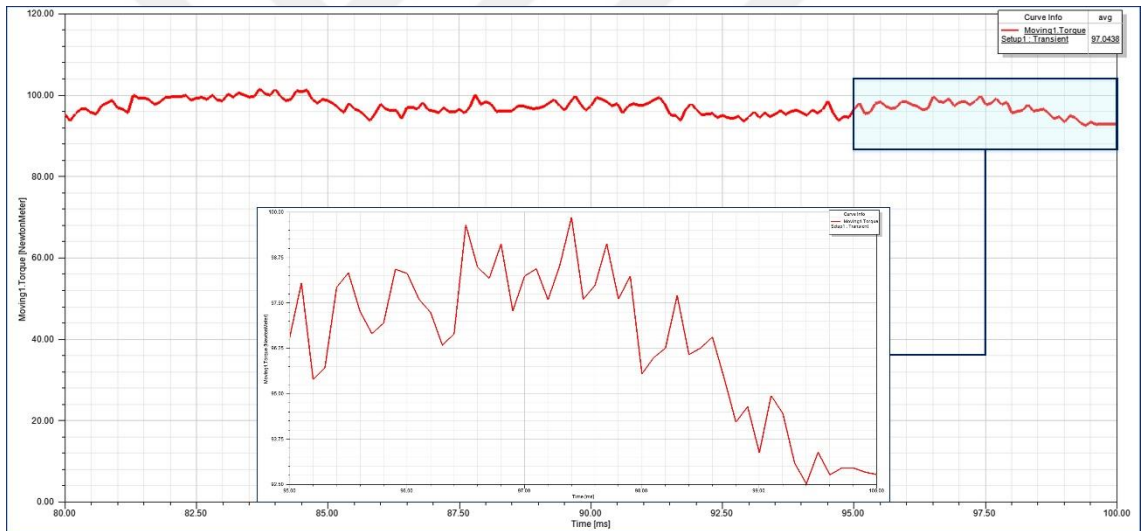
Şekil B. 30 40 oluklu rotoruna 9° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



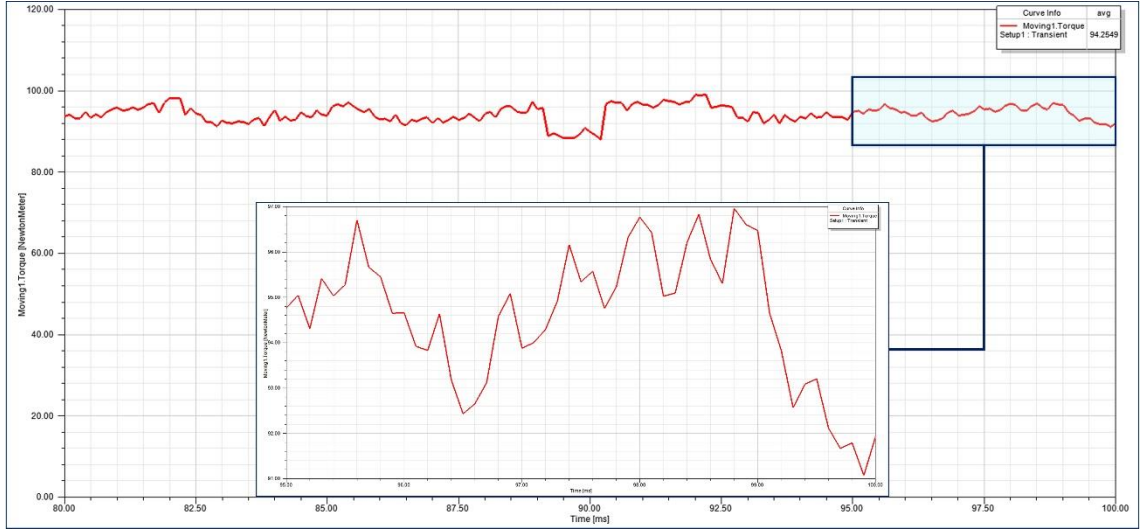
Şekil B. 31 40 oluklu rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



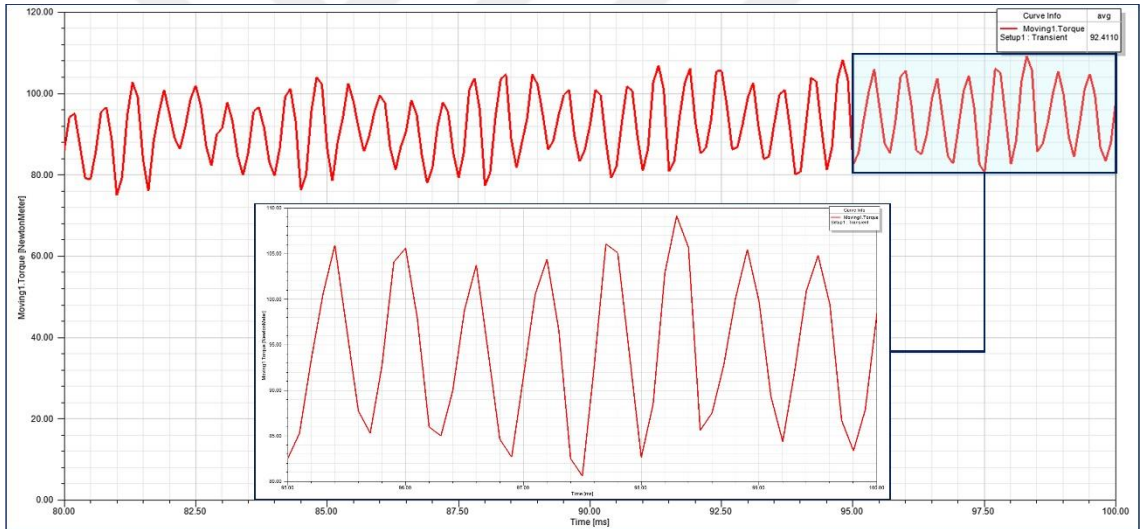
Şekil B. 32 40 oluklu rotoruna 15° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



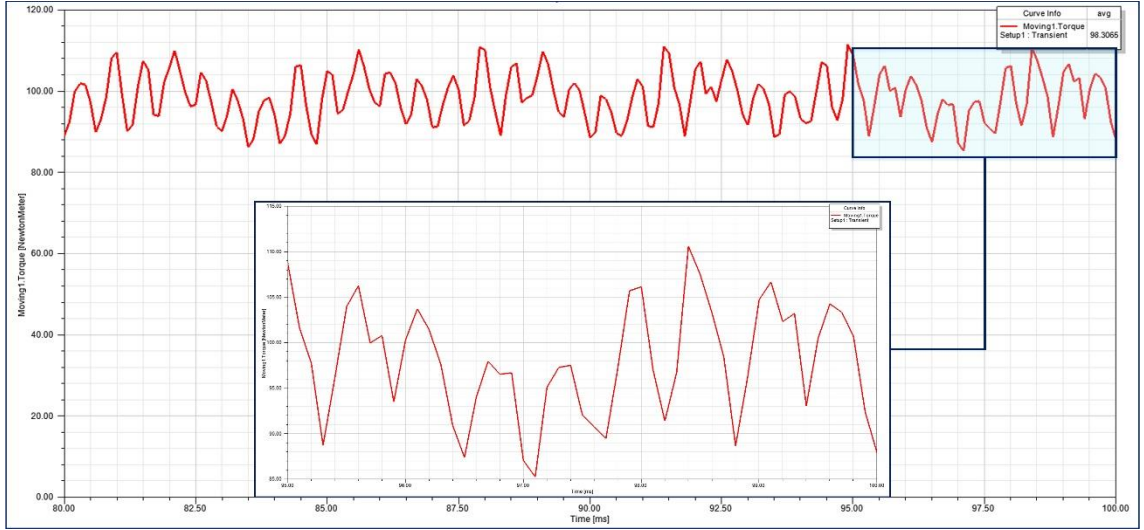
Şekil B. 33 40 oluklu rotoruna 18° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



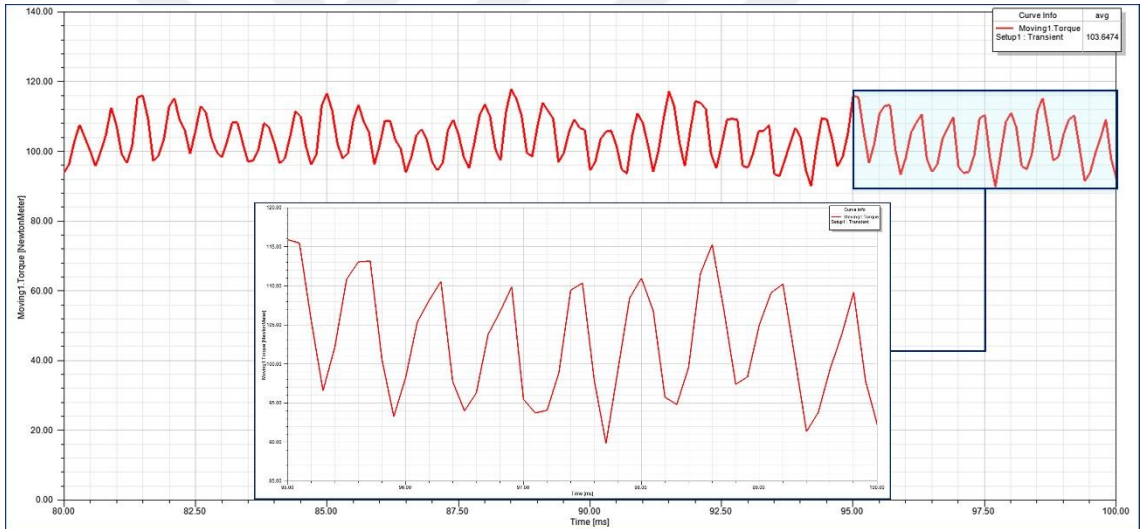
Şekil B. 34 40 oluklu rotoruna 20° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



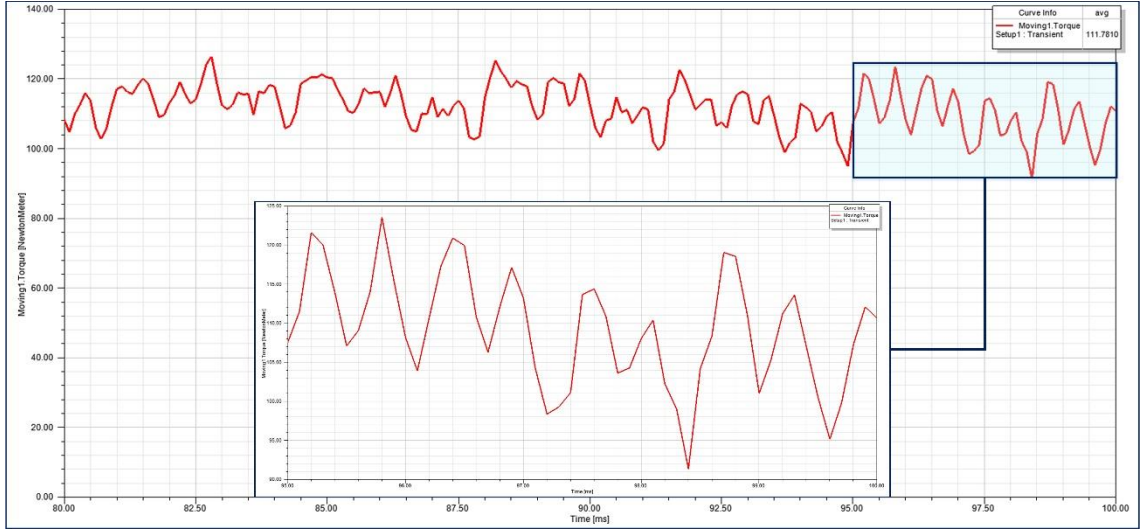
Şekil B. 35 42 oluklu rotoruna kaykısı açısı uygulanmamış modele ait moment değişimi



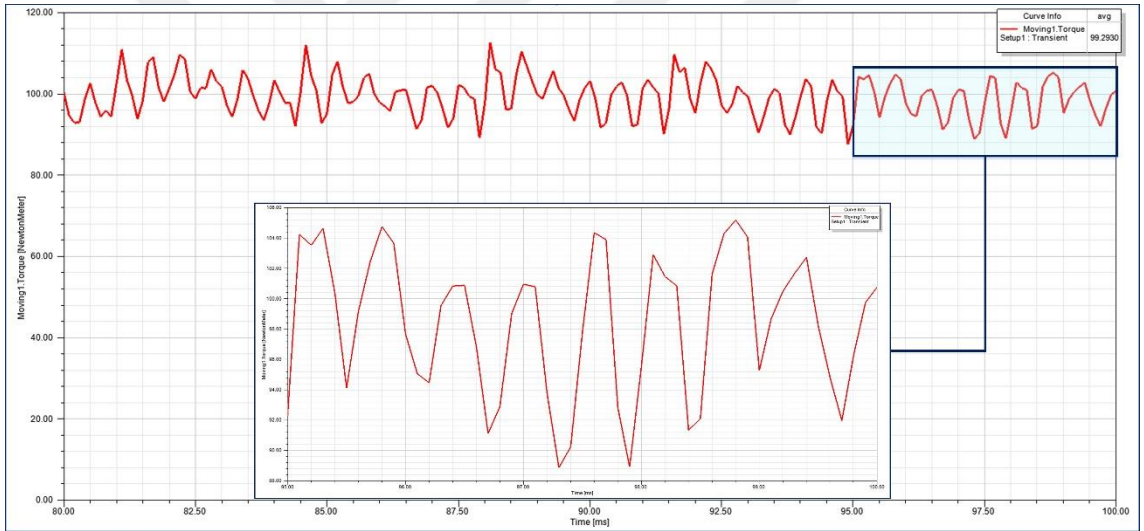
Şekil B. 36 42 oluklu rotoruna $8,57^\circ$ kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



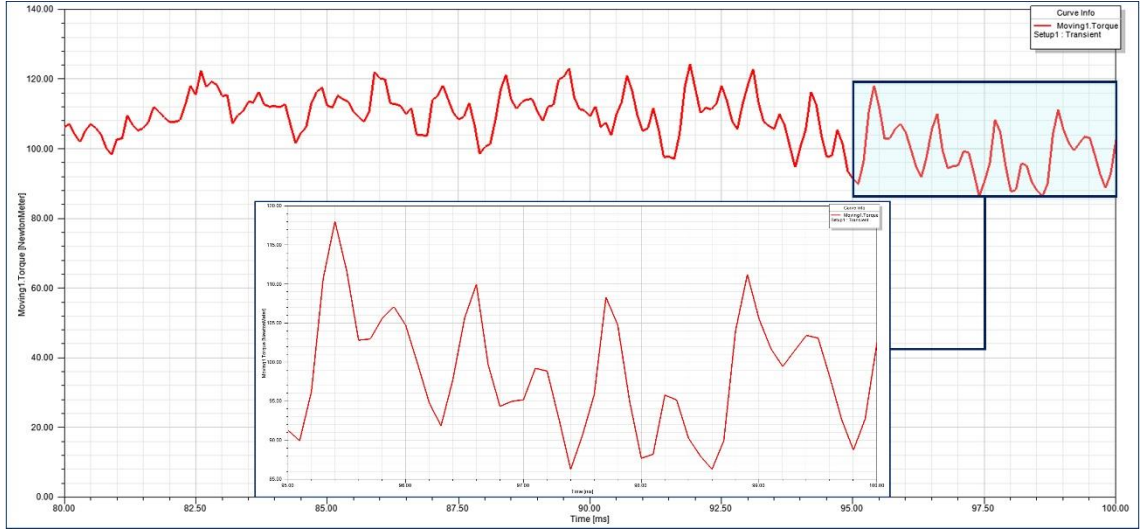
Şekil B. 37 42 oluklu rotoruna 10° kaykı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



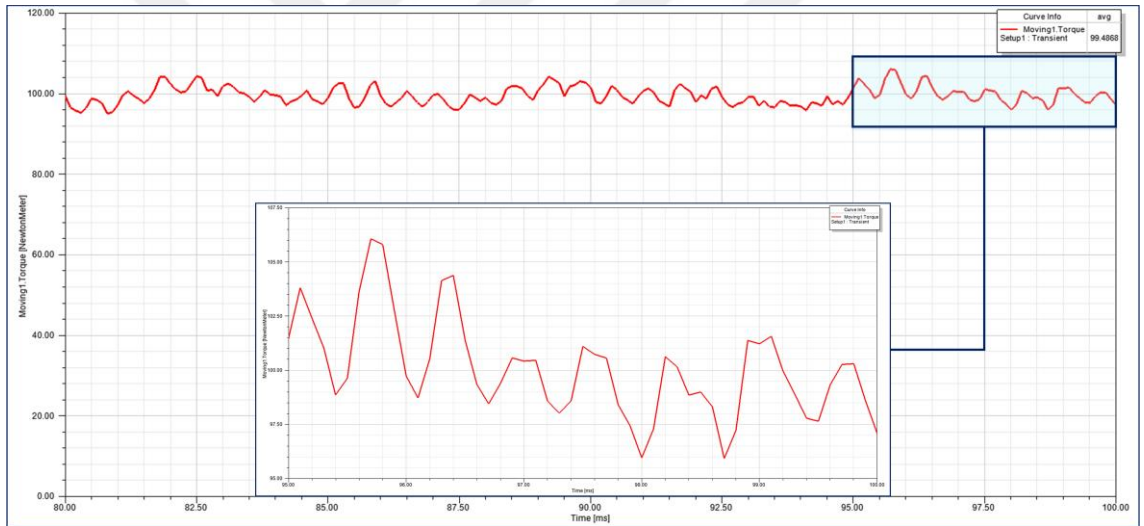
Şekil B. 38 42 oluklu rotoruna 15° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



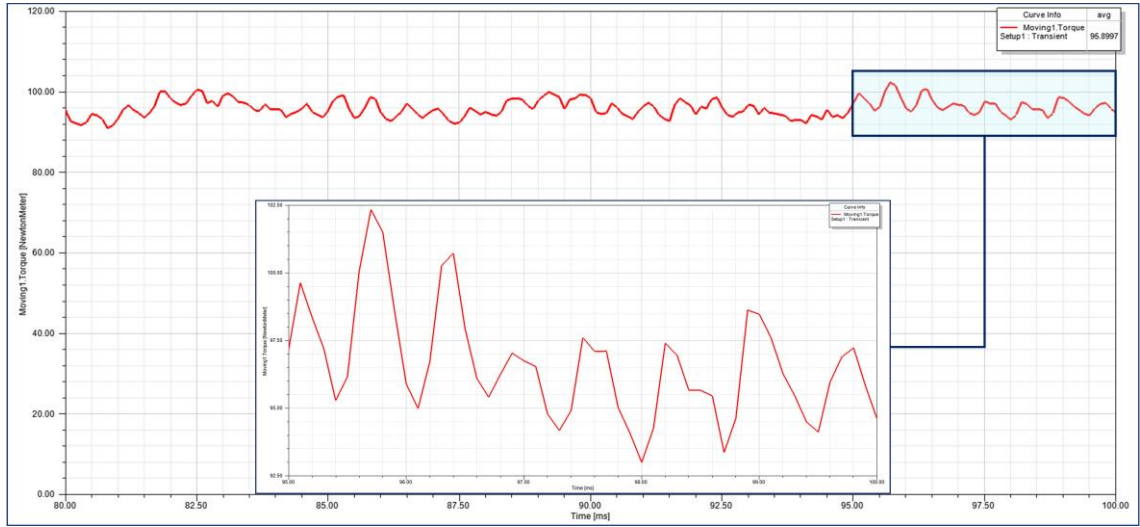
Şekil B. 39 42 oluklu rotoruna $17,14^\circ$ kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



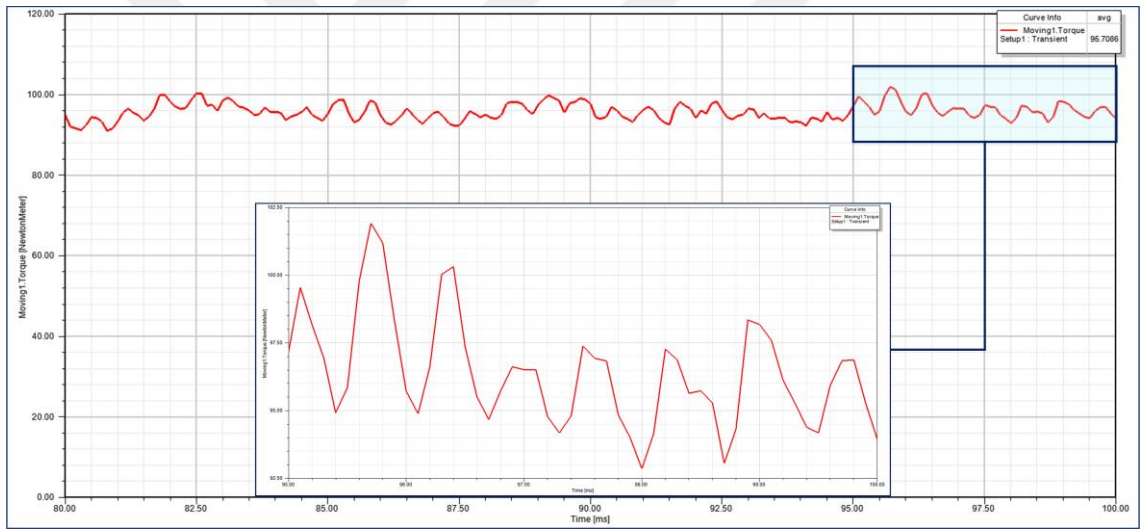
Şekil B. 40 42 oluklu rotoruna 20° kaykısı açısı uygulanmış modele ait moment değişimi



Şekil B. 41 Stator malzemesi olarak YMK, rotor malzemesi olarak çelik kullanılmış EAAM'e ait moment değişimi



Şekil B. 42 Stator malzemesi olarak çelik, rotor malzemesi olarak YMK kullanılmış EAAM'e ait moment değişimi



Şekil B. 43 Hem stator hem rotor malzemesi olarak YMK kullanılmış EAAM'e ait moment değişimi

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: fatmakeskinarabul@gmail.com

Makale

1. Keskin Arabul F. , Şenol İ. , Öner Y, “Performance Analysis of Axial-Flux Induction Motor with Skewed Rotor,” *Energies*, cilt.13, ss.4991, 2020.