

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

# **YARIKLI NÜVE TASARIMI İLE ASENKRON MOTOR PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

## **DOKTORA TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Y. Müh. Asım Gökhan YETGİN**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**  
**Tez Danışmanları : Yrd. Doç. Dr. Mustafa TURAN**

**Temmuz 2010**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

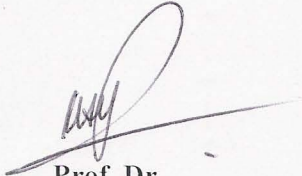
YARIKLI NÜVE TASARIMI İLE ASENKRON MOTOR  
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

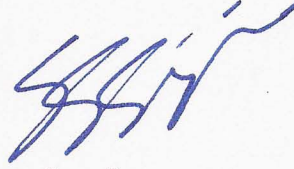
Elektrik-Elektronik Y. Müh. Asım Gökhan YETGİN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK – ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ

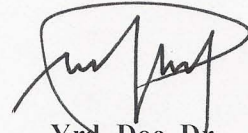
Bu tez 21 / 07 / 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



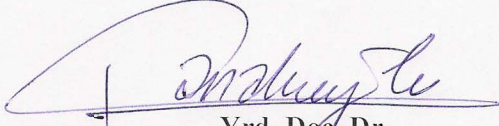
Prof. Dr.  
Mehmet Ali YALÇIN  
Jüri Başkanı



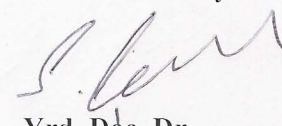
Doç. Dr.  
Sırrı Sunay GÜRLEYÜK  
Üye



Yrd. Doç. Dr.  
Mustafa TURAN  
Üye



Yrd. Doç. Dr.  
Ali İhsan ÇANAKOĞLU  
Üye



Yrd. Doç. Dr.  
Sabri ÇAMUR  
Üye

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında desteğini, fikirlerini, anlayışını esirgemeyen doktora tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa TURAN' a; yüksek lisans çalışmamdan bu yana desteğini yanımda hissettiğim Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali İhsan ÇANAKOĞLU' na teşekkür ederim.

Hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Osman Kazım YETGİN ve İsmail ULUDAĞ' a; annem Sıdika YETGİN ve Nezahat ULUDAĞ' a ve hayatıma girdiği günden beri her türlü konuda bana yardımcı olan, fedakârlıkta bulunan eşim Emsal ULUDAĞ YETGİN' e; kardeşim Hakan ve eşi Seda YETGİN' e teşekkür ederim.

Ayrıca mesai arkadaşlarım ile Elektrik Mühendisi Barış ERODABAŞI arkadaşşıma ve ELSANAS A.Ş. (Emtaş-Ankara) Motor Fabrikası yetkililerine teşekkür ediyorum.

Bu doktora tezi Sakarya Üniversitesi' nin 2006–50–02–061 numaralı araştırma projesi tarafından desteklenmiştir.

Asım Gökhan YETGİN

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xviii
SUMMARY.....	xix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	8
BÖLÜM 2.	
ASENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER VE TASARIM AŞAMALARI.....	12
2.1. Asenkron Motor Performansına Etki Eden Faktörler.....	12
2.2. Asenkron Motor Tasarım Aşamaları.....	15
2.2.1. Çıkış katsayısının genel kavramı.....	15
2.2.2. Verim kontrolü.....	18
2.2.3. Stator oluk hesabı.....	19
2.2.4. Rotor oluk hesabı.....	20
2.3. Kaçak Reaktansların Belirlenmesi ve Hesaplanması.....	21
2.3.1. Mıknatıslanma reaktansının hesabı.....	23
2.3.2. Primer ve sekonder oluk kaçak reaktansların hesabı.....	23
2.3.3. Zikzak kaçak reaktansın hesabı.....	24
2.4. Kayıpların Sınıflandırılması ve Hesaplanması.....	25
2.4.1. Stator ve rotor bakır kayıpları.....	25

2.4.2. Demir kayıpları.....	25
2.4.3. İlave yük kayıpları.....	27
2.4.4. Sürtünme ve vantilasyon kayıpları.....	27
2.5. Verim Standartları ve Sınıflandırılması.....	27
BÖLÜM 3.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ASENKRON MOTOR MODELİ....	31
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	32
3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi analiz işlemleri.....	33
3.2. Asenkron Motor Modeli.....	37
3.2.1. Asenkron motor empedansı.....	37
3.2.2. Kayma frekansına bağlı endüktans.....	38
3.2.3. Akımın fonksiyonu olarak moment.....	39
BÖLÜM 4.	
REFERANS MOTORUN TASARIMI.....	41
4.1. Karşılaştırmada Kullanılacak Orijinal Motor ve Özellikleri.....	41
4.2. Referans Motorun Tasarımı.....	50
BÖLÜM 5.	
ÖNERİLEN YARIKLI MOTOR MODELLERİ VE ANALİZ SONUÇLARI.....	63
5.1. Optimum Yarık Genişliğinin Belirlenmesi ve Yarık Genişliğinin Motor Performansına Etkisi.....	67
5.2. Optimum Yarık Derinliğinin Belirlenmesi ve Yarık Derinliğinin Motor Performansına Etkisi.....	75
5.3 Referans Motor ve Optimum Yarık Derinliği - Genişliğine Sahip Motor Modellerinin Karşılaştırması.....	79
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR.....	93

EK A.....	99
EK B.....	100
EK C.....	101
EK D.....	102
EK E.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	110

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\Delta_e$	:Eleman alanı
$\alpha$	:Eleman şekil fonksiyonu
$\alpha_i$	:Dişlerdeki manyetik doyma katsayısına bağlı şekil faktörü
$\Phi$	:Kutup başına akı değeri
$\Lambda$	:Paket boyunun kutup adımına oranı
$\lambda_{1,2}$	:Stator ve rotor oluk permeans değerleri
$\lambda_z$	:Zikzak permeans değeri
$\mu$	:Manyetik geçirgenlik
$\mu_0$	:Boşluğun manyetik geçirgenliği
$\sigma_{tan}$	:Rotor tanjant kuvveti
$\tau$	:Kutup adımı
$\tau_r$	:Rotor oluk adımı
$\tau_s$	:Stator oluk adımı
$\tau_z$	:Rotor zaman sabiti
$\eta$	:Verim
$\omega$	:Uygulanan gerilimin açısal hızı
$\omega_r$	:Rotorun mekanik açısal hızı
$\omega_s$	:Kayma açısal hızı
$A$	:Manyetik vektör potansiyeli
$A_1$	:Spesifik stator akımı yüklenme değeri
$A_i$	:i. düğümün vektör potansiyelini
$B$	:Manyetik akı yoğunluğu
$B_{cr}$	:Rotor boyunduruk akı yoğunluğu
$B_{cs}$	:Stator boyunduruk akı yoğunluğu
$B_g$	:Hava aralığı akı yoğunluğu
$B_{p1}, B_{p2}$	:Carter katsayısına bağlı olarak değişen katsayılar
$B_{tr}$	:Rotor diş akı yoğunluğu

$B_{ts}$	:Stator dış akı yoğunluğu
$b_{or}$	:Rotor oluk ağız açıklığı
$b_{os}$	:Stator oluk ağız açıklığı
$b_{s1}$	:Stator oluk alt genişliği
$b_{s2}$	:Stator oluk üst genişliği
$b_{tr}$	:Rotor dış genişliği
$b_{ts}$	:Stator dış genişliği
$\cos\phi$	:Güç faktörü
$C_0$	:Hacim kullanma faktörü
$d_1$	:Rotor oluk üst genişliği
$d_2$	:Rotor oluk alt genişliği
$D$	:Düğüm sayısı
$D_{is}$	:Stator iç çapı
$D_{is}^2L$	:Çıkış katsayısı
$D_{out}$	:Stator dış çapı
$d_{mil}$	:Mil çapı
$E_1$	:Elektromotor kuvveti
$f_1$	:Frekans
$G_{t1}$	:Stator dış ağırlığı
$G_{t2}$	:Rotor dış ağırlığı
$G_{y1}$	:Stator boyunduruk ağırlığı
$G$	:Hava aralığı uzunluğu
$H$	:Manyetik alan şiddeti
$h_{cr}$	:Rotor boyunduruk yüksekliği
$h_{cs}$	:Stator boyunduruk yüksekliği
$h_{or}$	:Rotor oluk ağız yüksekliği
$h_{os}$	:Stator oluk ağız yüksekliği
$h_r$	:Rotor oluk yüksekliği
$h_s$	:Stator oluk yüksekliği
$I$	:Bobin akımı
$I_1$	:Stator akımı
$I_2$	:Statora indirgenmiş rotor akımı
$I_\mu$	:Mıknatıslanma akımı



$I_n$	:Nominal akım
$J$	:Akım yoğunluğu vektörü
$K_1, K_2$	:Bobin adım kısılmasına bağlı katsayılar
$K_c$	:Carter katsayısı
$K_{fe}$	:Paketleme faktörü
$K_f$	:Şekil faktörü
$K_{p1}, K_{p2}$	:Stator ve rotor diş akı yoğunluklarına bağlı olarak değişen katsayılar
$K_t, K_y$	:Makine konstrüksiyon katsayısı
$K_{w1}$	:Sargı katsayısı
$k_i$	:Doyma faktörü
$L$	:Endüktans
$L_p$	:Paket boyu
$L_1, L_2$	:Stator ve rotor endüktansı
$M$	:Ortak endüktans
$m$	:Faz sayısı
$mmk$	:Manyetomotor kuvveti
$N$	:Eleman sayısı
$N_r$	:Rotor oluk sayısı
$N_s$	:Stator oluk sayısı
$n_r$	:Rotor devir sayısı
$n_s$	:Senkron devir sayısı
$p_{10}$	:Malzeme kayıp güç değeri
$P_{cu1}$	:Stator bakır kaybı
$P_{cu2}$	:Rotor bakır kaybı
$P_ç$	:Çıkış gücü
$P_{fe}$	:Demir kayıpları
$P_g$	:Giriş gücü
$P_i$	:Statordan rotora aktarılan iç güç veya hava aralığı gücü
$P_{kayıp}$	:Toplam kayıplar
$P_n$	:Nominal güç
$P_{ilave}$	:İlave yük kayıpları
$P_{sv}$	:Sürtünme vantilasyon kaybı
$p$	:Kutup sayısı

$p_{pul}$	:Pulzasyon kayıpları
$p_{t1}$	:Stator dış kaybı
$p_{y1}$	:Stator boyunduruk kayıpları
$q$	:Faz ve kutup başına oluk sayısı
$R_1$	:Stator direnci
$R_2$	:Statora indirgenmiş rotor direnci
$S_g$	:Hava aralığı görünür gücü
$T$	:Moment
$T_{en}$	:Endüklenen moment
$U_1$	:Nominal gerilim
$V_1$	:Faz gerilimi
$W_1$	:Faz başına sarım sayısı
$X_1$	:Stator kaçak reaktansı
$X_2$	:Statora indirgenmiş rotor kaçak reaktansı
$x$	:Malzemeye göre değişen malzeme katsayısı
$X_k$	:Kısa devre reaktansı
$X_m$	:Mıknatıslanma reaktansı
$Z_1$	:Giriş empedansı
$B_{kz}$	:Bakınız
$BS$	:İngiltere standartları
$CEMEP$	:Avrupa elektrik makinaları ve güç elektroniği imalatçıları komitesi
$DIN$	:Alman standartlar enstitüsü
$EFF$	:Verim
$IE$	:Uluslar arası verim
$EV$	:Enerji verimli
$FEMM$	:Sonlu elemanlar yöntemini kullanan manyetik analiz yazılımı
$GA$	:Genetik algoritma
$hp$	:Beygir gücü
$IEC$	:Uluslar arası elektrik komitesi
$IEEE$	:Elektrik-elektronik mühendisleri enstitüsü
$JEC$	:Japon elektromekanik komitesi
$NEMA$	:Amerikan / ulusal elektrikli araç imalatçıları birliği
$OM$	:Orijinal motor

O.M.\_T\_Y:Orijinal motorun hem statorunda hem de rotorunda yarık olması durumu

RM :Referans motor

R.M.\_T\_Y:Referans motorun hem statorunda hem de rotorunda yarık olması durumu

SEY :Sonlu elemanlar yöntemi

SM :Standart motor

TS :Türk standartları

VDE :Alman elektrik-elektronik ve enformatik mühendisleri odası

YSA :Yapay sinir ağları

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Stator oluk geometrisi.....	19
Şekil 2.2.	Rotor oluk geometrisi.....	20
Şekil 2.3.	Asenkron motorun kaçak akı yolları.....	22
Şekil 2.4.	Stator ve rotor zikzak kaçak akıları .....	24
Şekil 2.5.	C.E.M.E.P.' e göre motorların verim sınıfları.....	29
Şekil 2.6.	I.E.C. 60034–34' e göre motorların verim sınıfları.....	30
Şekil 3.1.	F.E.M.M. programında problemin tanımlanması ve malzeme özelliklerinin girilmesi.....	35
Şekil 3.2.	Ağ yapısının oluşturulması.....	36
Şekil 3.3.	Hava aralığındaki ağ yapısı.....	36
Şekil 3.4.	Asenkron motorun bir faz F.E.M.M. eşdeğer devresi.....	37
Şekil 4.1.	Orijinal motor modelinin 2 boyutlu kesit görünüşü.....	43
Şekil 4.2.	Orijinal motor modelinin detaylı gösterimi.....	43
Şekil 4.3.	Orijinal motorun F.E.M.M. modeli.....	44
Şekil 4.4.	Orijinal motor modelinin alan dağılımı.....	45
Şekil 4.5.	15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modeli (O.M._T_Y) ve detaylı gösterimi.....	46
Şekil 4.6.	15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı.....	47
Şekil 4.7.	Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment eğrileri.....	48
Şekil 4.8.	Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin verim eğrileri.....	49
Şekil 4.9.	Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment değerleri.....	49

Şekil 4.10.	Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarı genişliğine sahip motor modellerinin verim değerleri.....	50
Şekil 4.11.	Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarı genişliğine sahip motor modellerinin moment ve verim bağıl fark değerleri.....	50
Şekil 4.12.	Yeni tasarlanan +4mm' lik motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	52
Şekil 4.13.	Orijinal ve +4mm' lik motor modellerinin oluk yapılarının detaylı gösterimi.....	52
Şekil 4.14.	+4mm motor modelinin alan dağılımı.....	53
Şekil 4.15.	Orijinal ve +4mm motor modellerinin mil üzerindeki akı yoğunluğu dağılımları.....	54
Şekil 4.16.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin yol alma momenti değerleri.....	54
Şekil 4.17.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin nominal moment değerleri.....	55
Şekil 4.18.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin devrilme momenti değerleri.....	55
Şekil 4.19.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin verim değerleri.....	56
Şekil 4.20.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin bağıl yol alma momenti değişimleri.....	56
Şekil 4.21.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinde bağıl nominal moment değişimleri.....	57
Şekil 4.22.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modelleri için devrilme momenti bağıl değişimleri.....	57
Şekil 4.23.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerindeki bağıl verim değişimleri.....	58
Şekil 4.24.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin devrilme noktası civarındaki devir sayısı-moment eğrileri...	58
Şekil 4.25.	Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin nominal hız civarındaki devir sayısı-verim eğrileri.....	59

Şekil 4.26.	Orijinal ve +4mm motor modellerinin devir sayısı-verim eğrileri.....	59
Şekil 5.1.	15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modeli.....	65
Şekil 5.2.	15 mm yarık derinliği ve 1.5 mm yarık genişliğindeki motor modeli.....	65
Şekil 5.3.	7.5 mm yarık derinliği ve 1 mm yarık genişliğindeki motor modeli.....	66
Şekil 5.4.	23 mm yarık derinliği ve 0.15 mm yarık genişliğindeki motor modeli.....	66
Şekil 5.5.	15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı.....	67
Şekil 5.6.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-moment eğrileri.....	69
Şekil 5.7.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-verim eğrileri.....	69
Şekil 5.8.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin devir sayısı-verim eğrilerinin detaylı gösterimi.....	70
Şekil 5.9.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin yol alma momenti değerleri.....	70
Şekil 5.10.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin nominal moment değerleri.....	71
Şekil 5.11.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin devrilme momenti değerleri .....	71
Şekil 5.12.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin verim değerleri.....	72
Şekil 5.13.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin bağıl yol alma momenti değişimleri.....	73
Şekil 5.14.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin bağıl nominal moment değişimleri.....	73
Şekil 5.15.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin bağıl devrilme momenti değişimleri.....	74

Şekil 5.16.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin bağıl verim değişimleri.....	74
Şekil 5.17.	0.1 mm yarık genişliğinde farklı yarık derinliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-moment eğrilerinin detaylı gösterimi.....	76
Şekil 5.18.	0.1 mm yarık genişliğinde farklı yarık derinliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-verim eğrilerinin detaylı gösterimi.....	76
Şekil 5.19.	Farklı yarık derinliği ve genişliğindeki motor modelleri için verim grafiği.....	78
Şekil 5.20.	Farklı yarık derinliği ve genişliğindeki motor modelleri için nominal moment grafiği.....	79
Şekil 5.21.	Referans motor modelinde oluşan enine ve zikzak akılar.....	80
Şekil 5.22.	15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinde oluşan enine ve zikzak akılar.....	80
Şekil 5.23.	7.5 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinde oluşan enine ve zikzak akılar.....	81
Şekil 5.24.	Manyetik akı yoğunluğu değerlerinin belirlenmesi için stator ve rotor diş ile boyunduruk noktaları.....	85
Şekil 5.25.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin devir sayısı-moment eğrileri.....	87
Şekil 5.26.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin devir sayısı-verim eğrileri.....	87
Şekil 5.27.	Referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment değerleri.....	88
Şekil 5.28.	Referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin verim değerleri.....	88
Şekil 5.29.	Referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment ve verim bağıl fark değerleri.....	89
Şekil C.1.	B-H eğrisi.....	101
Şekil D.1.	15 mm yarık derinliği 0.25 mm yarık genişliğindeki orijinal motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	102

Şekil D.2.	15 mm yarık derinliği 0.5 mm yarık genişliğindeki orijinal motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	103
Şekil D.3.	Yeni tasarlanan +2mm' lik motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	103
Şekil D.4.	Yeni tasarlanan +5mm' lik motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	104
Şekil D.5.	15 mm yarık derinliği 0.25 mm yarık genişliğindeki motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	104
Şekil D.6.	13.125 mm yarık derinliği 0.5 mm yarık genişliğindeki motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	105
Şekil D.7.	18.75 mm yarık derinliği 2.5 mm yarık genişliğindeki motor modelinin 2 boyutlu kesiti.....	105
Şekil E.1.	15 mm yarık derinliği 0.25 mm yarık genişliğindeki orijinal motor modelinin alan dağılımı.....	106
Şekil E.2.	15 mm yarık derinliği 0.5 mm yarık genişliğindeki orijinal motor modelinin alan dağılımı.....	107
Şekil E.3.	Yeni tasarlanan +2mm motor modelinin alan dağılımı.....	107
Şekil E.4.	Yeni tasarlanan +5mm motor modelinin alan dağılımı.....	108
Şekil E.5.	15 mm yarık derinliği 1 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı.....	108
Şekil E.6.	15 mm yarık derinliği 1.5 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı.....	109
Şekil E.7.	13.125 mm yarık derinliği 0.15 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı.....	109



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	En çok kullanılan motor verim standartları.....	28
Tablo 2.2.	C.E.M.E.P. 'e göre verim sınıfları ve verim değerleri.....	29
Tablo 4.1.	Orijinal motorun etiket değerleri.....	42
Tablo 4.2.	Orijinal motorun geometrik bilgileri.....	42
Tablo 4.3.	Orijinal motorun oluk geometri değerleri.....	42
Tablo 4.4.	Orijinal motor modelinin nominal çalışma noktasındaki değerleri.....	45
Tablo 4.5.	Orijinal ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin stator ve rotor dişlerindeki manyetik akı yoğunluk değerleri.....	47
Tablo 4.6.	+4mm motor modelinin diş genişliği ve boyunduruk yüksekliği sonuçları.....	51
Tablo 4.7.	Orijinal ve stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin verim ve bağıl fark değerleri.....	60
Tablo 4.8.	Orijinal ve stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin moment ve bağıl fark değerleri.....	60
Tablo 4.9.	Orijinal ve +4mm motor modellerinin nominal çalışma noktasındaki değerleri ve bağıl fark değerleri.....	61
Tablo 4.10.	Orijinal ve +4mm motor modellerinin kayıp güç ve bağıl fark değerleri.....	61
Tablo 4.11.	Orijinal ve +4mm motor modellerinin nüve ağırlık ve bağıl fark değerleri.....	62
Tablo 5.1.	Oluşturulan farklı yarık derinliğinde ve genişliğindeki motor modelleri.....	64
Tablo 5.2.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için elde edilen verim ve bağıl fark değerleri.....	68

Tablo 5.3.	15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için elde edilen moment ve bağıl fark değerleri.....	68
Tablo 5.4.	0.1 mm yarık genişliğinde farklı yarık derinliklerindeki motor modelleri için elde edilen verim ve bağıl fark değerleri.....	75
Tablo 5.5.	Farklı yarık derinliği ve genişliğinde elde edilen verim değerleri.....	77
Tablo 5.6.	Farklı yarık derinliği ve genişliğinde elde edilen nominal moment değerleri.....	78
Tablo 5.7.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modelleri için permeans ve bağıl fark değerleri.....	81
Tablo 5.8.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modelleri için stator ve rotor endüktans ve bağıl fark değerleri.....	82
Tablo 5.9.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin faydalı akı ve bağıl fark değerleri.....	82
Tablo 5.10.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin mıknatıslanma reaktansı ve bağıl fark değerleri.....	83
Tablo 5.11.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin nominal çalışma ve bağıl fark değerleri.....	83
Tablo 5.12.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin kayıp güç ve bağıl fark değerleri.....	84
Tablo 5.13.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin stator ve rotor diş ile boyunduruk kısımlarında meydana gelen manyetik akı yoğunluk değerleri...	86
Tablo 5.14.	Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin nüve ağırlık ve bağıl fark değerleri.....	86

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Asenkron Motorda Performans Analizi, Yarıklı Stator, Yarıklı Rotor

Asenkron motorlar endüstride yaygın bir şekilde kullanılmalarından dolayı birçok ülkenin enerji tüketiminde birinci sırada yer almaktadır. Özellikle son yıllarda asenkron motorlarda enerji tasarrufunun ön plana çıktığı araştırmalar sayesinde yapılabilecek ufak puanlı bir verim artışı bile küresel enerji tasarrufunda önemli bir yer tutacaktır. Bu bağlamda, bu çalışmada asenkron motorun performansını artırabilmek amacıyla yeni bir nüve tasarımı önerilmiştir.

Önerilen yeni tasarımlarda stator ve rotor dişlerinin ortasına yarıklar uygulanmıştır. Oluşturulan yarıklı modellerde yarıkların derinliği ve genişliği Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak F.E.M.M. yazılımı ile optimize edilmiştir.

Elde edilen en iyi yarıkların derinliği ve genişliğindeki örnek motor modeli üzerinde yapılan performans analizlerinde, asenkron motor veriminin % 1.869 oranında arttığı görülmüştür. Ayrıca, yeni tasarıma ilişkin diğer parametrelerde de iyileşmeler gözlenmiştir.

# **PERFORMANCE IMPROVEMENT OF INDUCTION MOTOR WITH SLITTED CORE DESIGN**

## **SUMMARY**

Key Words: Induction Motor, Finite Element Method, Performance Analysis of Induction Motor, Slitted Stator, Slitted Rotor

Induction motors, due to the extensive use in industrial applications in many countries, it is a dominant factor in terms of energy consumption. Specially in recent years, many studies have been realized to achieve higher energy savings in induction motors. Thus, even if a small percentage increase in efficiency would result in a huge amount of energy savings in a global scale.

In this work, a new design for the core is proposed to increase the induction motor performance. In the proposed design, slits are inserted between the stator and the rotor teeth. In the slitted models proposed, the slit depth and width are optimized using Finite Element Method in FEMM software.

The performance analyses made on the sample motor models having the most optimized slit depth and width parameters have resulted in a 1.869% increase in efficiency. In addition, some improvements have been observed in the other motor parameters in our new design.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Asenkron motorlar geçmişten günümüze kadar her yönden büyük bir aşama kaydetmiştir. Tesla, alternatif akım makinalarının çalışma prensibi döner manyetik alanı bularak iki fazlı akımda çalışan alternatif akım motorunun patentini almıştır.

Bu ilkel halinden bugünkü en yaygın motor türüne geçişi AEG baş elektrikçisi Dolivo-Dobrowolsky sağlamıştır. Sanayide kullanılan ilk asenkron motor ise 1889 yılında hizmete sunulmuştur [1].

Asenkron motorlar sanayide en çok kullanılan motor olması sebebiyle dinamik ve statik alanda birçok araştırma konusuna malzeme kaynağı teşkil etmiştir ve asenkron motorların geliştirilmesi için halen bu çalışmalar devam etmektedir.

Özellikle son yıllarda enerji tasarrufunun ön plana çıktığı araştırma konularında asenkron motorun performansını artırmak amacıyla birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemleri 4 ana başlık altında toplamak mümkündür.

- Tasarım programları kullanarak, stator ve rotor oluk geometrileri üzerindeki çalışmalar ile performansın iyileştirilmesi
- Sonlu elemanlar yöntemi (S.E.Y.), yapay sinir ağları (Y.S.A.), genetik algoritma (G.A.) vb. yöntemler kullanarak optimizasyon tekniği ile performansın iyileştirilmesi
- Kullanılan malzemelerin geliştirilmesi ile performansın iyileştirilmesi
- Manyetik bariyer, ayıraç ve yarıç kullanılarak performansın iyileştirilmesi

Asenkron motorun performansının iyileştirilmesine yönelik yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

**Tasarım Programları Kullanarak, Stator ve Rotor Oluk Geometrileri Üzerindeki Çalışmalar ile Performansın İyileştirilmesi:** Boglietti ve arkadaşları çalışmalarında geometrik yaklaşımlar ile bir asenkron motorun nasıl tasarlanacağını açıklamışlardır. Yaptıkları çalışmada ilk önce motorun nominal değerleri, akı ve akım yoğunluğu değerleri ve geometrik özelliklerini belirlemişlerdir. Daha sonra rotor dış çapı, rotor uzunluğu, rotor oluk geometri boyutları ve rotor oluk alanı gibi parametreleri hesaplamışlardır. Hava aralığı akı değerini belirledikten sonra stator faz sargılarının değerleri, nominal akım değeri ve stator oluk geometri parametrelerini belirlemişlerdir. Tasarım aşamasının tamamlanmasından sonra motorun eşdeğer devre parametrelerini ve elektromekanik performansını değerlendirmişlerdir. Eğer bulunan değerler hedeflenen değerleri tutmuyorsa  $\lambda$  (paket boyunun kutup adımına oranı) ifadesini değiştirerek tekrarlama yöntemi ile hedeflenen değerlere ulaşıncaya kadar tasarım aşamaları tekrar etmelidir sonucuna ulaşmışlardır [2].

Smolleck asenkron makinanın çalışmasını, eşdeğer devre parametrelerinin nasıl elde edileceğini ve performans analizlerinin nasıl yapılacağını hem deneysel hem de teorik olarak adım adım belirtmiştir. Çalışmada asenkron makinanın boşta çalışma ve kısa devre deneylerinden elde edilen sonuçlara göre eşdeğer devre parametrelerinin elde edilmesini ve daha sonra elde edilen parametreleri kullanarak moment, güç faktörü ve verim gibi performans analizlerinin nasıl değişeceğini göstermiştir [3].

Feyzi ve Kalankesh asenkron motorun stator ve rotor oluklarının optimizasyonunu gerçekleştirip motor performansını artırmayı amaçlamışlardır. Bunun için oluk yapılarının genişliği ve derinliği gibi parametreleri, kullandıkları programda tekrarlama metoduyla optimize etmişlerdir. Elde edilen yeni oluk yapısıyla toplam kayıpları azaltıp verimi yükseltmişlerdir [4].

Boglietti ve arkadaşları çalışmalarında stator nüve uzunluğunun motor verimine olan etkisini incelemek amacıyla güçleri 4 ve 7.5 kW olan 2 adet motor kullanmışlardır. MA 180 m-4 ve MA 180 l-4 tipindeki motor analizlerinde stator nüve uzunluğu büyük olan motorun veriminin büyük çıktığını göstermişlerdir [5].

Park ve arkadaşları çalışmalarında stator oluk geometri şeklini değiştirip demir ve stator bakır kayıplarını azaltmaya çalışmışlardır. Analizler için 2 boyutlu S.E.Y. kullanmışlardır. Stator oluk alanını % 12 artırarak stator demir ve bakır kayıplarını % 2.4 oranında azaltmışlardır [6].

Akbaba çalışmasında enerji verimli (E.V.) motorun ve standart motorun (S.M.) karşılaştırmasını yapmıştır. B-H eğrisi ve demir kaybı grafiklerini göstererek aralarındaki farklılıkları belirtmiştir. 200 hp (beygir gücü) lik S.M. ve E.V. motorların bütün tasarım parametrelerini tablo halinde gösterip, E.V. motorun % 5 daha iyi verim sağladığını belirtmiştir [7].

### **Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yapay Sinir Ağları, Genetik Algoritma vb. Yöntemler Kullanarak Optimizasyon Tekniği ile Performansın İyileştirilmesi:**

Hıyama ve Ikeda asenkron motorun tasarım parametrelerini üç katlı yapay sinir ağları modelini kullanarak hesaplamışlardır. Birinci katmanda motorun etiket değerlerini girdikten sonra akı değerini elde etmişlerdir. İkinci katmanda  $D_{is}^2 L_p$  (çıkış katsayısı) ve akı değerini kullanarak stator boyutlarını, üçüncü katmanda ise sarım sayıları ile ilgili parametreleri elde edip verim ve güç faktörü değerlerini bulmuşlardır [8].

Simon ve Monzon yaptıkları çalışmada asenkron motorun 5 farklı rotor tipi için performans değerlendirmesi yapmışlardır. Moment ve akım analizi için gerekli parametrelerin hesap edilmesi için G.A. ve S.E.Y. kullanmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri için Finite Element Method Magnetics (F.E.M.M.) programını kullanmışlardır. Çift kafesli, daire, yuvarlak, trapezoidal ve uzun trapezoidal tipinde olan rotor yapılarının moment ve akım grafiklerini elde etmişlerdir [9].

Raj ve arkadaşları yaptıkları çalışmada asenkron motorun verim optimizasyonu için kullanılan yöntemleri özetlemiş ve elde edilen simülasyon ve deneysel çalışmaları karşılaştırmışlardır. Optimizasyon tekniklerini, geleneksel optimizasyon teknikleri (İstatistiksel yöntem, Monte carlo yöntemi, Hook jeeves yöntemi), yapay zekaya dayalı optimizasyon teknikleri (Bulanık mantık, Y.S.A.) ve doğadan esinlenilmiş algoritmalara (G.A., Karınca koloni optimizasyonu) dayalı optimizasyon teknikleri

gibi 3 temel yöntem altında toplamışlardır. Ayrıca bu yöntemlerin dışında motorda kullanılan malzemelerin iyileştirilmesi ile de optimal tasarımın yapılabileceğini ve verimin optimize edilebileceğini belirtmişlerdir [10].

### **Kullanılan Malzemelerin Geliştirilmesi ile Performansın İyileştirilmesi:**

Tudarache ve Melcescu çalışmalarında asenkron makinanın verimini yükseltmek amacıyla hem S.E.Y. modelleri hem de deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında makina parametrelerinin S.E.Y. yardımı ile nasıl hesaplanacağını formüller ile belirtmişlerdir. Rotor sargılarında alüminyum ve bakır kullanılması durumunda kayma-moment grafiğinin değişimini çizdirmişlerdir. Bakır kullanılması durumunda yol alma momentinin daha düşük çıktığını fakat yük-verim grafiğinde ise alüminyum sargı kullanılması durumuna göre % 2.3 lük bir artışın olduğunu göstermişlerdir. Yol alma momentindeki % 20' lik kaybı düzeltmek amacıyla rotor oluk yapısını çift kafes şeklinde yaparak alüminyum sargılı modelin yol alma momentine yaklaştırmışlardır. Verim değerinin ise % 3.2 arttığını göstermişlerdir. Düşük kayıplı elektriksel çelik kullanılması durumunda verimin çift kafesli bakır sargılı yapıya göre % 2.3, alüminyum sargılı yapıya oranla % 5 arttığını göstermişlerdir. Ayrıca soğutma sisteminin küçültülmesiyle sürtünme-vantilasyon kayıplarının % 35 azaltılabileceğini ve verimin yükseltilebileceğini belirtmişlerdir [11].

Mecrow ve Jack çalışmalarında elektrik makinaları ve sürücü kısımlarında kayıpların azaltılıp verimin iyileştirilmesi için neler yapılabileceğini anlatmışlardır. Yeni manyetik malzemeler kullanarak daha az demir kaybı elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklara dayanabilen (>400 °C) yalıtımların yapılması, yeni tasarım yöntemlerinin denenmesi, anahtarlama hızlarının iyileştirilmesi, zeki kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, yeni fan, pompa ve kompresör gibi cihazların verimlerinin artırılması gibi verimin iyileştirilmesinde yapılabilecek yöntemleri belirtmişlerdir [12].

Monoharaun ve arkadaşları çalışmalarında dökme bakır rotorlu motor kullanarak motorun performans değişimlerini incelemişlerdir. Kullanılan bakır rotor yapısı ile alüminyum rotor yapısına göre bakır kayıplarının % 35.4 oranında azaltılabileceğini



ifade etmişlerdir. Bakır rotor yapısının ilk aşamada % 30 oranında daha pahalıya mal olacağını, fakat enerji tasarrufu söz konusu olduğunda fiyat artışının 7–8 katı kadar bir oranda fayda sağladığını belirtmişlerdir. Motordaki toplam kayıpların % 15 – 23 arasında azaltılabileceğini, rotor, nüve ve oluk tasarımları ile daha yüksek verim değerlerinin elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Nominal momentin daha yüksek fakat yol alma momentinin daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yol alma akımının da daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [13].

Aho ve arkadaşları çalışmalarında farklı som çelik rotorlu motor malzemelerinin motor performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Rotor yapısında yarıklar kullanarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yarıklı yapı ile rotor akı dağılımının daha iyi elde edildiğini, istenilen elektromanyetik performansa ulaşıldığını belirtmişlerdir. Fakat rotordaki mekanik dayanıklılığın azaldığını ve motorun maliyetinin yükseldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca modellerde kullanılan malzemelerin bağlı permeabilite değerlerini 50–8000 arasında değiştirerek elektromanyetik moment ve güç faktörü değişimini incelemişlerdir. Analizler sonucunda momentte ve güç faktöründe çok küçük miktarda değişme olduğunu belirlemişlerdir. Akı yoğunluğu değerinin 1.25 T ve üzerindeki değerlerinde moment değişiminin küçük miktarlarda olduğunu göstermişlerdir. Rotor nüve malzemelerinin elektriksel dirençlerinin karşılaştırmasında ise büyük farklılıklar ortaya çıktığını, aynı kayma değerinde elektriksel direnci küçük olan malzemelerin moment değerinin daha büyük çıktığını belirtmişlerdir. Güç faktöründe de aynı durum söz konusudur, fakat artan kayma değeri ile elektriksel direnci az olan malzemelerin güç faktörü değeri azalmıştır. Kullanılan 8 farklı nüve malzemesinde elektriksel direnci az olan malzemelerin rotor temel direnç kayıpları daha az çıkmıştır [14].

#### **Manyetik Bariyer, Ayıraç ve Yarık Kullanarak Performansın İyileştirilmesi:**

Aho ve arkadaşları çalışmalarında som çelik rotorlu rotor yapısına sahip bir asenkron motorun rotor yapısını elektriksel iletkenliği yüksek ilave bir tabaka ile kaplayarak oluşturdukları model ile rotorunda 28 yarık bulunan normal bir som çelik rotorlu asenkron motorun performansının karşılaştırmasını yapmışlardır. Rotor yapısına ilave edilen kaplama malzemesi direncinin büyük olmasının, rotor kayıplarını

azalttığını göstermişlerdir. Ayrıca tabakalı motorun, yarıklı motor yapısına göre hava aralığı akı yoğunluğu grafiğinin daha parazitsiz çıktığını belirtmişlerdir [15].

Kamper ve Volschenk çalışmalarında relüktans senkron motorun rotor yapısına manyetik bariyer ve ayıraç koyarak motorun performansının nasıl değişeceğini araştırmışlardır. Rotor manyetik bariyer derinliği arttıkça momentin azaldığı, güç faktörü değerinin küçük bir oranda değiştiğini belirtmişlerdir. İki manyetik bariyer arasındaki açıklığın genişliği 2 mm' den 0.25 mm' ye azaltıldığı takdirde momentin % 4, güç faktörünün ise % 4.3 oranında arttığını göstermişlerdir. Rotor ayıraç derinliğinin ise 14 mm' den 5 mm' ye düşmesinin % 77 oranında daha fazla rotor demiri kullanılması anlamına geldiğini ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada uygun manyetik bariyer ve ayıraç derinliği seçildiği takdirde momentin % 17.4 oranında artırılabilceğini belirtmişlerdir [16].

Aho ve Nerg çalışmalarında yarıklı bir yapıya sahip som çelik rotorlu asenkron motorun yarık derinliğinin performansa olan etkilerini incelemişlerdir. Yarıklı yapıya sahip rotorun daha iyi bir alan dağılımı verdiğini fakat rotorun mekanik dayanıklılığını azalttığını, ayrıca yarıklı motor yapısının analitik olarak çözümünün zor olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları modeller sonucunda yarık derinliği arttıkça elde edilen momentin arttığını, güç faktörü değerinde ise büyük bir oranda artış meydana geldiğini göstermişlerdir. Derinliği büyük olan yarıklı yapılarda rotorun mekanik kırılabilirliğinin arttığını, bunu önlemek için ise bir kısa bir uzun yarıklı yapının kullanılabilceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca yarık derinliğinin rotor yarıçapının yarısı kadar olması gerektiğini belirtmişlerdir [17].

Zaim çalışmasında yarıklı bir yapıya sahip som çelik rotorlu asenkron motorun yarık genişliği, derinliği ve sayısına göre motor performansının nasıl değişeceğini S.E.Y. ile hesaplamıştır. Yarık derinliği arttıkça belli bir değere kadar momentin arttığını daha sonra azaldığını göstermişlerdir. Ayrıca yarık genişliği arttıkça momentin azaldığını tespit etmiştir. Yarık sayısı arttıkça, daha dar yapıya sahip yarık durumlarında moment önce hızlı bir şekilde artıp daha sonra azalırken, daha geniş yapıdaki yarıklar için moment önce artıp daha sonra hızlı bir düşüş göstermektedir.

Ayrıca yapılan bu çalışma sonucunda yarık derinliği ve sayısının uygun seçilmesi ile rotor akı çizgilerinin rotorun iç kısımlarına kadar ilerlediklerini belirtmiştir [18].

Li ve arkadaşları çalışmalarında hibrid tahrik senkron makinasında meydana gelen endüvi reaksiyonunu önlemek amacıyla 3 farklı yöntem önermişlerdir. Bunlardan birincisi kutup yüzeyine dengeleyici mıknatıslar yerleştirilmesidir. Bu sayede moment değerinin % 7 civarında artırılabilceğini ifade etmişlerdir. Akı yoğunluğu değerinin ise 0.14 T artırılabilceğini belirtmişlerdir. İkinci yöntem olarak hava aralığı uzunluğunun ayarlanmasıdır. Burada amaç endüvi reaksiyonundan dolayı kutubun bir yüzeyi diğer yüzeyine göre daha fazla doyduğu için bu durumu düzeltmek amacıyla doyan kısımda hava aralığı uzunluğunun bir miktar büyütülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu işlem sonucunda hava aralığı akı dağılımı daha homojen bir hal alırken, moment değerinin de % 6 oranında arttığını ve daha düşük dalgalanma meydana geldiğini göstermişlerdir. Üçüncü yöntem ise yarık yerleştirmektir. Amaç som çelik rotorlu motorlarda girdap akımlarına engel olmak, akı yolunu daha uzun yaparak endüvi reaksiyonunun etkisini azaltmaktır. Yapılan bu üç yöntem ile endüvi reaksiyonunun azaltılabileceğini belirtmişlerdir [19].

Chan ve Hamid çalışmalarında S.E.Y. kullanarak anahtarlamalı relüktans motor modelini incelemişlerdir. Analizlerde F.E.M.M. yazılımını kullanmışlardır. Çalışmada motorun rotor yapısına değişik sayıda yarık açarak akım, moment ve manyetik akı yoğunluğu değişimlerini incelemişlerdir. Beş yarıklı motor modeli için hem akım hem de moment grafiklerinde tepesi düz bir dalga formu elde edildiğini ve çıkış gücünün % 16 oranında arttığını (akımın tepe değeri artmadan) belirtmişlerdir. Ayrıca yarık sayısı değiştirilerek rotordaki doymanın kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir [20].

Aho, Nerg ve Pyrhönen çalışmalarında som çelik rotorlu bir asenkron motorun rotor yapısına yarıklar ilave ederek manyetik momentin değişimini incelemişlerdir. Rotor yarık sayısının 28' den 36' ya çıkarılması durumunda elektromanyetik momentin % 6 oranında iyileştirilebileceğini, güç faktörü değerinin ise bir miktar artırılabilceğini göstermişlerdir. Ayrıca rotor yarık sayısının fazla olması durumunda yarıklar arasında doyma meydana geldiğini ve bununda elektromanyetik performansı

kötüleştirdiğini belirtmişlerdir. Yarık sayısı arttıkça rotor demir kayıplarının arttığını göstermişlerdir [21].

Zaim çalışmasında S.E.Y. kullanarak som çelik rotorlu asenkron makinanın performans değerlendirmesini yapmıştır. Bunun için değişik güçte ve değişik yarık sayısı, derinliği ve genişliğine sahip motorlar üzerinde modellemeler yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar ise, yarık genişliğinin artması düşük yarık sayısına sahip yapılarda, motorun momentini artırırken, yüksek yarık sayılarında momenti düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca yarık sayısını artırınca belli değere kadar momentin arttığı, daha sonra azaldığını göstermiştir. Yarık derinliği artırıldığında ise momentin önce arttığını daha sonra ise azaldığını belirtmiştir [22].

Nashiki ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada relüktans motorda oluşan moment salınımlarını azaltmak ve d eksenini yönünde manyetik akı oluşturmak için rotor yapısına yarıklar yerleştirmişlerdir. Motorun yarıklı yapıda rotor eğikliği ve eğik olmayan durumları için moment salınımlarını incelemişlerdir. Yarık sayısının az olması durumunda verimin yükselebileceği fakat moment salınımlarının artacağını belirtmişlerdir [23].

Anlaşılacağı üzere literatürde asenkron motorun performans iyileştirmesinde kullanılan pek çok yöntem geliştirilmekte ve farklı çalışmalar yürütülmektedir. Şu ana kadar yapılan literatür araştırmaları sonucunda anahtarlamalı relüktans motor, doğru akım motoru, senkron motor ve som çelik rotorlu asenkron motorun yarıklı yapı kullanılarak modellendiği tespit edilmiştir. Asenkron motorda ise bu tip bir çalışma şu ana kadar gözlemlenmemiştir.

### **1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Doğru akım motorlarında yük altında oluşan endüvi reaksiyonuna benzer bir şekilde, asenkron motorlarda da yüklü çalışmada rotorun tepkisi ile manyetik akı kavramasında sapmalar oluşmakta ve bunlar dışlarda doymalara, kaçak akıların ve harmonik akıların artmasına neden olmaktadır [24]. Bu primer etkilerin yanında toplam kayıplarda artış ve dolayısı ile verimde düşüş yaşanmaktadır. Tam yükte

oluşan bu kayıplar genel olarak ilave yük kayıpları (stray yük kayıpları) olarak adlandırılmıştır [25].

Bu tez çalışmasında, asenkron motorda rotor tepkisi ile manyetik akı azalmasını ve beraberinde performansı bozan kaçak akı, kayıp artışı-verim düşüşü gibi önemli etkileri daha yüksek kaliteli sac kullanmadan azaltmak için yeni bir dış geometrisi önerilmektedir. Önerilen geometrik tasarım ile rotor tepkisinin azalacağı ve çalışma performansın artacağı tahmin edilmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan asenkron motorlarda yapılacak ufak puanlı verim artışı bile, küresel enerji tasarrufunda önemli bir yer tutacaktır. Bu bağlamda çalışmanın enerji düzleminde kaçınılmaz olarak ekonomik getirileri de olacaktır.

Buradan yola çıkarak asenkron motorun stator ve rotor dış kısımlarına yarık uygulanması düşünülmüştür. Elde edilmek istenilen performans iyileştirmesi için yeni motor modelleri oluşturulacak ve S.E.Y. ile analizleri gerçekleştirilecektir. S.E.Y. analizlerinden elde edilen değerler kullanılarak asenkron motorun yazılan ilave programlar vasıtasıyla performans değerleri elde edilecektir. Ayrıca kullanılan orijinal motorun ve yeni tasarlanan motor modellerinin karşılaştırmaları yapılacaktır. Meydana gelen olumlu ve olumsuz noktalar belirtilecektir.

Tez çalışması süresince yürütülen analizler ise şöyledir:

- Manyetik alan dağılımlarının elde edilmesi ve doymaların değerlendirilmesi
- Kaçak akıların değerlendirilmesi
- Eşdeğer devre parametrelerinin değerlendirilmesi
- Yol alma, devrilme ve nominal momentlerin değerlendirilmesi
- Dış karakteristiğinin elde edilmesi
- Kayıp-verim değerlendirilmesi
- Giriş - çıkış güçleri ve güç faktörünün değerlendirilmesi
- Nüve ağırlıklarının değerlendirilmesi
- Tasarımın güçlüğü-kolaylığının değerlendirilmesi
- Ekonomik sonuçların değerlendirilmesi

gibi noktalarda analizler ve değerlendirmeler yapılacaktır.

Bu tez çalışmasından beklenen sonuçlar ise şöyledir:

- Manyetik akının tüm çalışma sahalarında daha etkin kullanımı: yer yer oluşan doymaların azaltılması, dişlerde akıların düzgün dağılımı, rotor tepkisi etkisinin azaltılması
- İlave kayıpların azaltılması
- Kayıp değerlerinde azalma: doymaların azalması ve demir kayıplarının azalması ile kayıp değerlerinde iyileşme
- Kaymanın küçülmesi: rotor bakır kayıplarının azalması
- Verimin iyileştirilmesi: kayıpların azalması sonucu verimin artması
- Nominal çalışma noktalarında performansın artması
- Kaçak reaktans değerlerinde iyileşme: devir sayısı - moment grafiğinde iyileşme

gibi noktalarda iyileştirmeler beklenmektedir.

Tezin organizasyonu içerisinde, Bölüm 2' de asenkron motorun tasarım aşamalarından bahsedilmiştir. Tasarım sırasında performansa etki eden parametreler hakkında bilgi verilmiştir. Motor kaçak reaktansları, kayıplar ve verim analizlerinin nasıl yapıldığı belirtilmiştir.

Bölüm 3' de sayısal analiz yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgi verilmiş ve asenkron motor modelinin S.E.Y. ile nasıl analiz edildiği ve nasıl çözüme ulaşıldığı anlatılmıştır.

Bölüm 4' de, önerilen tasarımın uygulanması için seçilmiş olan orijinal motor parametreleri verilmiş, ardından bu motora önerilen yarık yapısı uygulanmış ve orijinal tasarımın iyileştirilmesi gerektiği görülmüştür. Dış boyutlar değiştirilmeksizin, orijinal motor üzerinde yeni tasarımlar uygulanarak iyileştirmeler yapılmış ve çalışmanın bundan sonrasında referans olarak kullanılacak olan Referans Motor elde edilmiştir.

Bölüm 5' de ise referans motor modeline önerilen yarıklı yapılar uygulanmıştır. Oluşturulan yarıklı yapıdaki motor modellerinden en iyi performans değerlerini veren optimum yarık derinliği ve genişliğindeki motor modeli seçilerek referans motor ile karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca zikzak kaçak akıların değişimi, motor parametreleri, elde edilen kayıp güç değerleri ve nüve ağırlıkları vb. tablo ve grafikler halinde verilmiştir.

Bölüm 6' da ise elde edilen sonuçlar ve ileride yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler verilmiştir.

Tezin diğer kısımlarında ise modellemesi yapılan motorlara ait ekler ve analizlerde kullanılan diğer programların hesaplama kodları verilmiştir.

## **BÖLÜM 2. ASENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER VE TASARIM AŞAMALARI**

### **2.1. Asenkron Motor Performansına Etki Eden Faktörler**

Asenkron motorun performansını belirlemede birçok parametre etkin olarak rol oynar. Motor performansını belirleyen önemli parametreler moment değerleri, akım, güç faktörü, çıkış gücü, verim vb. olarak verilebilir. Bu parametrelerin iyileştirilmesi şüphesiz motor performansında da önemli artılar getirecektir. Motor performansını artırmak için aşağıdaki yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır.

- Daha kaliteli / daha küçük kayıplı nüve malzemesi kullanılması
- Optimum stator ve rotor tasarımı
- Optimum hava aralığı
- İç-dış çap değerlerinin optimum seçilmesi
- Kayıpların azaltılması
- Doymanın engellenmesi
- Kaçak reaktansların azaltılması, faydalı akının artırılması
- Harmoniklerin azaltılması
- Tasarım parametrelerinin optimizasyonu
- Eşdeğer devre parametrelerinin optimizasyonu

Makine verimini arttırmak için kullanılan malzemelerin iyileştirilmesine dayalı çalışmalar yürütülmekle beraber, öne çıkan çalışmaların çoğunda oluk geometrisine dayalı iyileştirme arayışları göze çarpmaktadır [26].

Asenkron motor performansını etkileyen önemli faktörlerin başında stator sargı parametreleri gelmektedir. Sargı parametreleri motorların çıkış güçlerini, verimlerini ve güç katsayılarını etkilemektedir. Sarım şekillerindeki farklılıklar; harmonik



etkileri, soğutma şartlarını ve sargı sıcaklığının sargı direncini artırması gibi sebeplerden dolayı bakır kayıpları, sargı çeşidine göre değişmektedir. Ayrıca sargı çeşidine göre de kaçak akıların değerleri değiştiği için güç faktörü değeri de değişmektedir [27].

Motor performansını etkileyen diğer bir faktör ise doymadır. Motorlarda doymanın fazla olması demir kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden motor tasarımı yapılırken stator ve rotor dişleri ile boyunduruk kısımlarında meydana gelebilecek doymaların önüne geçmek için oluk geometrilerinin optimum olarak tasarlanması gerekmektedir. Genellikle doymaların önüne geçebilmek için oluk kenarları birbirlerine paralel olarak yapılmaya çalışılmaktadır. Ayrıca endüstride son zamanlarda tasarlanan motorların stator ve rotor diş genişliklerinin oluk genişliği kadar yapıldığı görülmektedir.

Asenkron motorda diğer bir performans kriteri ise moment değerleridir. Yol alma, devrilme ve nominal momenti etkileyen bir çok parametre vardır. Açılma hızı, uygulanan gerilim, stator ve rotor dirençleri ( $R_1$ ,  $R_2$ ) ile kaçak reaktansları ( $X_1$ ,  $X_2$ ) moment değişimine etkisi olan parametrelerdir. Özellikle kaçak reaktansların değişimi motorun momentini fazlasıyla etkilemektedir. Bu yüzden bir motorun tasarımı yapılırken mümkün olduğu kadar kaçak reaktanslar minimum seviyede olacak şekilde tasarıma gidilmesi gerekmektedir. Motorun maksimum performans verebilmesi için mıknatıslandırmaya reaktansı ( $X_m$ )' in mümkün olduğunca büyük,  $X_1$  ve  $X_2$ ' nin ise olabildiğince küçük olması istenir. Kısa devre reaktansı ( $X_k$ ) makinanın maksimum momentinin bir ölçütü olduğundan, uygulamada tasarımcılar  $X_1+X_2$  reaktanslarını belirli bir değere sahip olacak şekilde makine boyutlarını ve sargılarını belirlerler ve sonra da  $X_m$  reaktansını olabildiğince büyük yapmaya çalışırlar. Ayrıca  $X_2$ ' nin büyümesi maksimum momenti azaltacaktır, dolayısıyla da makina performansı oldukça kötü bir şekilde etkilenmektedir.  $X_1$ ' in büyümesi durumunda ( $V_1$  sabit ise) akım küçülecek, bu da momentin çarpanı  $\Phi$ ' yi küçültecektir. Kaçak reaktansların motor performansına etkileri bu bölümün ilerleyen kısımlarında detaylı bir şekilde verilmiştir.

Motor tasarım parametreleri de asenkron motorun performansını oldukça fazla etkilemektedir. Özellikle iç-dış çap değerleri,  $\lambda$  değeri, paket boyu gibi parametreler tasarım ve performans üzerinde etkin olan parametrelerin başında gelmektedir.

Motor veriminin artırılması için önemli olan diğer bir nokta ise kayıpların azaltılmasıdır. Doymaların azaltılması ve yüksek kaliteli çelik saçların kullanılması ile demir kayıpları azaltılabilirken, sargı tasarımı ve iletkenlerin yapısını değiştirerek stator ve rotor bakır kayıplarını azaltmak mümkündür. Ayrıca sürtünme kayıpları, yüksek kaliteli mil yatağı kullanılarak ve iyi bir yağlama yapılarak, vantilasyon kayıpları ise, düşük kayıplı fanlar kullanılarak azaltılabilir. Asenkron motorda oluşan kayıpların detaylı anlatımı da bu bölümün ilerleyen kısımlarında verilecektir.

Bu tez çalışmasında yukarıda değinilen performans artırımı yöntemlerinin uygulanabilmesi amacı ile yeni bir nüve tasarımı geliştirilerek performans değerlendirilmesi yapılacaktır. Burada nüve tasarımı sırasında stator ve rotor oluk geometri şekilleri, hava aralığı uzunluğu ve stator dış çap ile mil çapı değerlerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan stator ve rotor dış genişlikleri ile boyunduruk yükseklikleri değiştirilerek yeni nüve modelleri oluşturulacaktır. Elde edilen yeni dış genişliklerinin ve boyunduruk yüksekliklerinin motor performansına etkileri araştırılacaktır. Oluşturulan bu yeni motor modellerinden en iyi performans ve verim değerini veren motor modeli seçilerek, stator ve rotor dişlerinin ortasına yarık uygulanarak performans değerlendirilmesi yapılacaktır. Bu yeni tasarımlarda dişlerde doymaların meydana gelip gelmediği, oluşan akı değerlerinin değişimi, oluşturulan modellerden hangisinin en iyi performans ve verim değerlerini verdiği vb. noktalar tablo ve grafikler ile açıklanacaktır.

Önerilen bu yeni modellerin gerçekleştirilebilmesi için stator ve rotor dış genişliklerinin ile boyunduruk yükseklik değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla asenkron motorun araştırılan parametrelerinin nasıl hesaplanacağı aşağıda kısaca anlatılmıştır.

## 2.2. Asenkron Motor Tasarım Aşamaları

Bir elektrik makinasının tasarlanabilmesi için etiket değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, daha önceden imal edilmiş motorlara ait grafiksel verilere, kullanılacak malzemelere ilişkin özelliklere ihtiyaç duyulacaktır. Tasarım için makinanın etiket değerlerinin yanında çalışma tipi, koruma sınıfı, yalıtım ve soğutma tipi gibi bilgilerin de verilmesi gerekebilir [28].

Günümüzde asenkron makineler, çok geniş uygulama alanlarının olması sebebiyle, kullanım amacı, montaj tipi ve makinadan beklenen performans kriterlerine göre standartlaştırılmışlardır. Bu sebeple asenkron motor tasarımında standartlara uygunluk açısından dikkate alınması gereken bazı önemli noktalar mevcuttur. Bunlardan bazıları, gövde yapısı, soğutma, yataklar, mil yapısı, manyetik nüvenin boyutları, sargı tipi ve yalıtımdır. Ayrıca tasarımcılar, tasarım esnasında bu standartlarda belirtilen değerlere uygunluğu sağlamaya çalışırken, uygun malzeme seçimi, boyutlar arasındaki uygunluk, imalattaki uygulama kolaylığı ve minimum maliyet gibi bazı faktörleri de göz önünde bulundururlar [29].

Ulusal ve uluslararası standartlarda (N.E.M.A., I.E.E.E., I.E.C., D.I.N., V.D.E., T.S. vb.) asenkron motorun tasarımında kullanılacak malzemeler (sac levha kalınlıkları, iletken çapları), performans kriterleri (verim, güç faktörü, akım vb.), yalıtım sınıfı için sıcaklık değerleri, gövde boyutları, mil yüksekliği, soğutma tipi ve koruma sınıfı gibi kriterler tanımlanmıştır. Bu kriterlerin bazıları tasarımcıyı sınırlamakla birlikte, yaygın olarak kabul görmüştür ve ekonomik olması açısından da uygun sonuçlar vermektedir.

### 2.2.1. Çıkış katsayısının genel kavramı

Bu kısımda orijinal motor ve yeni tasarlanan motorlar için gerekli tasarım aşamalarından bahsedilecektir.

Asenkron motorun tasarımında ilk aşama, motorun stator iç çapını belirleyecek olan çıkış katsayısının hesaplanmasıdır. Elektrik makinalarında  $D_{is}$  stator iç çapı ve  $L_p$  paket boyunu göstermek üzere, standart çıkış katsayısı  $D_{is}^2 L_p$ ' dir.

$D_{is}^2 L_p$  ile makina gücü ve performansı arasındaki ilişkiyi hesaplayabilmek için ilk önce hava aralığı görünür güç değeri hesaplanmalıdır.

$$S_g = 3E_1 I_n \quad (2.1)$$

Burada  $E_1$  faz başına hava aralığı elektromotor kuvvetini,  $I_n$  nominal akımı göstermektedir.  $E_1$  elektromotor kuvveti, hava aralığındaki kutup başına akı değerinin fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir [30].

$$E_1 = 4.44 f_1 K_f W_1 K_{w1} \phi \quad (2.2)$$

Eşitlikte  $f_1$  frekans,  $K_f$  1.02 ile 1.11 arasında değişen şekil faktörü,  $W_1$  faz başına sarım sayısı,  $K_{w1}$  sargı katsayısı,  $\Phi$  kutup başına akıyı ifade etmektedir.

Kutup başına akı ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\phi = \alpha_i \tau L_p B_g \quad (2.3)$$

Eşitlikte,  $\alpha_i$  dişlerdeki manyetik doyma katsayısına bağlı şekil faktörüdür.  $B_g$  ise hava aralığı akı yoğunluğu değeridir. Kutup adımı  $\tau$ ;

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2p} \quad (2.4)$$

şeklinde olup, senkron devir sayısı  $n_s = \frac{f_1 60}{p}$  ile hava aralığı görünür gücü ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenir [30].

$$S_g = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 D_{is}^2 L_p \frac{n_s}{60} A_1 B_g \quad (2.5)$$

$A_1$  değeri çevre akım yoğunluğu olup, stator akımı için bir yükleme değeri tanımlar ve aşağıdaki gibi verilir.

$$A_1 = \frac{6W_1 I_n}{\pi D_{is}} \quad (2.6)$$

Ayrıca hacim kullanma faktörü olarak adlandırılan  $C_o$  (Esson Sabiti) ise aşağıdaki gibi yazılabilir [30].

$$C_o = k_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 A_1 B_g = \frac{60 S_g}{D_{is}^2 L_p n_s} \quad (2.7)$$

Bununla birlikte  $C_o$  sabiti her makina için farklıdır. Çünkü  $A_1$  akım yükleme değeri ve hava aralığı akı yoğunluğu değerleri, makinanın momenti ve çift kutup sayısı değeri ile artar. Çıkış katsayısı değeri  $D_{is}^2 L_p$  aşağıdaki şekilde elde edilir [30].

$$D_{is}^2 L_p = \frac{1}{C_o} \frac{60}{n_s} \frac{K_e P_n}{\eta \cos \varphi} \quad (2.8)$$

$D_{is}^2 L_p$  çıkış sabiti aynı zamanda makinanın mil momenti ile doğru orantılıdır. Paket boyunun kutup adımına oranı standart bir aralıkta bulunmaktadır ve  $\lambda$  ile gösterilen bu oran aşağıdaki değerler arasındadır [30].

$$\lambda = \frac{L_p}{\tau} = \frac{2L_p p}{\pi D_{is}} \quad 0.6 < \lambda < 3.0 \quad (2.9)$$

Genel olarak uzun paket boyları, küçük stator iç çaplarının kullanılmasına izin verir ve böylece bobin başı uzunluklarının kısalması nedeniyle bakır kayıplarında bir azalmaya sebebiyet verir. Bununla birlikte eylemsizlik momenti azalır.  $\lambda'$  nın değeri

tasarımı oldukça fazla etkiler. Stator iç çapı eşitlik (2.10)' da verilen formül ile hesaplanabilir [30].

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2p}{\pi \lambda} \frac{1}{C_o} \frac{p}{f_1} \frac{K_e P_n}{\eta \cos \varphi}} \quad (2.10)$$

Bu bir standart tasarım formülüdür. Ancak bu değer makinanın toplam hacmini elde etmek için yeterli değildir. Bu yüzden çoğu tasarımda stator dış çap değeri  $D_{out}$  da standartlaştırılmıştır.  $D_{is}^2 L_p$  çıkış katsayısına benzer olarak stator dış çapı ile ilgili bir çıkış sabiti değeri de hesaplanabilir.

Elde edilen stator iç çap eşitliği indüklenen moment ifadesi cinsinden yazılırsa eşitlik (2.11) elde edilmiş olur [30]. Burada  $T_{en}$  indüklenen momenti,  $\sigma_{tan}$  rotor tanjant kuvvetini ifade etmektedir. Formülden de anlaşılacağı gibi stator iç çap değeri küçüldüğünde elde edilen moment değeri de küçülmektedir.

$$T_{en} = \frac{D_{is}^3 \pi^2 \lambda \sigma_{tan}}{4p} \quad (2.11)$$

### 2.2.2. Verim kontrolü

Tasarım aşamalarında kontrolü yapılan diğer bir önemli nokta ise verim parametresidir. Verim formülü ve toplam kayıp formülü eşitlik (2.12) ve (2.13)' de verilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{\zeta}}{P_g} = \frac{P_{\zeta}}{P_g + \sum P_{kayıp}} \quad (2.12)$$

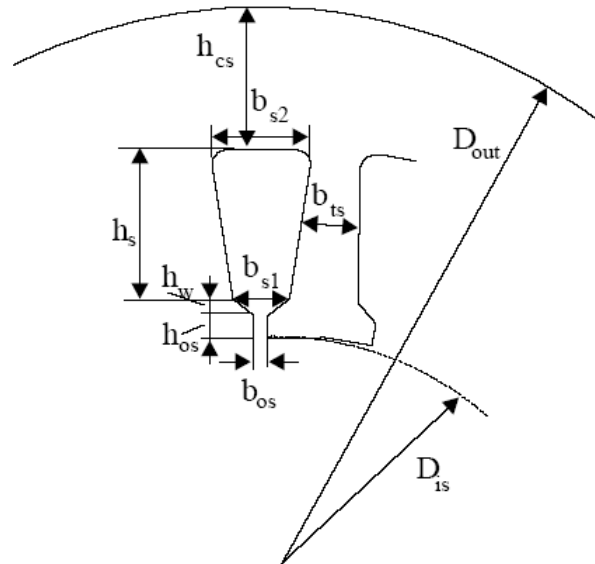
$$\sum P_{kayıp} = P_{fe} + P_{cu1} + P_{cu2} + P_{sv} + P_{ilave} \quad (2.13)$$

Burada  $P_{\zeta}$  çıkış gücünü,  $P_g$  giriş gücünü,  $\sum P_{kayıp}$  toplam kayıpları,  $P_{fe}$  demir kayıplarını,  $P_{cu1}$  ve  $P_{cu2}$  ise stator ve rotor bakır kayıplarını,  $P_{sv}$  sürtünme ve vantilasyon kayıplarını ifade etmektedir.

Tasarım sırasında elde edilen verim, hedeflenen verimden daha küçük olursa, stator iç çapı  $D_{is}$  daha büyük değer seçilerek tasarım yeniden gözden geçirilir [30]. Sonlu elemanlar yöntemi ile analizler sonucu elde edilen değerlerin kullanılması ile bulunan verim değerlerinin hesaplanması Ek A' da verilmiştir.

### 2.2.3. Stator oluk hesabı

Burada tasarım için ilgilenilen kısımlar olan stator boyunduruk yüksekliği ve akı değeri ile dış genişliklerinin formülleri verilmiştir. Modellerde kullanılan stator oluk geometrisi Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1. Stator oluk geometrisi [30]

Stator dış akı yoğunluğu  $B_{ts}$  ve hava aralığı akı yoğunluğu  $B_g$  ve stator oluk adımı  $\tau_s$  değerleri kullanılarak stator dış genişliği  $b_{ts}$  aşağıdaki gibi hesaplanabilir.  $K_{fe}$  paketleme faktörüdür.

$$b_{ts} = \frac{B_g \tau_s}{B_{ts} K_{fe}} \quad (2.14)$$

Stator boyunduruk yüksekliği  $h_{cs}$  ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

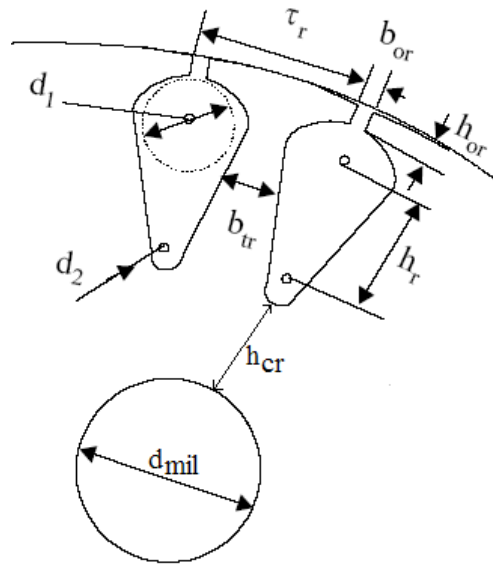
$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + 2(h_{os} + h_s))}{2} \quad (2.15)$$

Stator boyunduruk yüksekliği değeri bilindiğinden stator boyunduruk akı yoğunluğu  $B_{cs}$  eşitlik (2.16) ile bulunur.

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2L_p h_{cs}} \quad (2.16)$$

#### 2.2.4. Rotor oluk hesabı

Stator oluk tasarımında olduğu gibi rotor oluk geometrisi için de önemli parametreler olan diş genişliği ve boyunduruk yüksekliği formülleri verilmiştir. Şekil 2.2' de tanımlanmış parametreler temel alınarak rotor oluk boyutlandırması aşağıdaki gibi yapılır.



Şekil 2.2. Rotor oluk geometrisi [30]

Rotor diş akı yoğunluğu  $B_{tr}$  ve rotor oluk adımı  $\tau_r$  değerleri kullanılarak rotor diş genişliği  $b_{tr}$  bulunabilir.

$$b_{tr} = \frac{B_g \tau_r}{K_{fe} B_{tr}} \quad (2.17)$$



Rotor boyunduruk yükseklik değeri  $h_{cr}$  ise eşitlik (2.18) ile hesaplanır.

$$h_{cr} = \frac{D_{is} - 2(g + h_{or} + h_r) - d_{mil}}{2} \quad (2.18)$$

Rotor boyunduruk yükseklik değeri hesaplandıktan sonra rotor boyunduruğundaki akı yoğunluğu değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$B_{cr} = \frac{\phi}{2L_p h_{cr}} \quad (2.19)$$

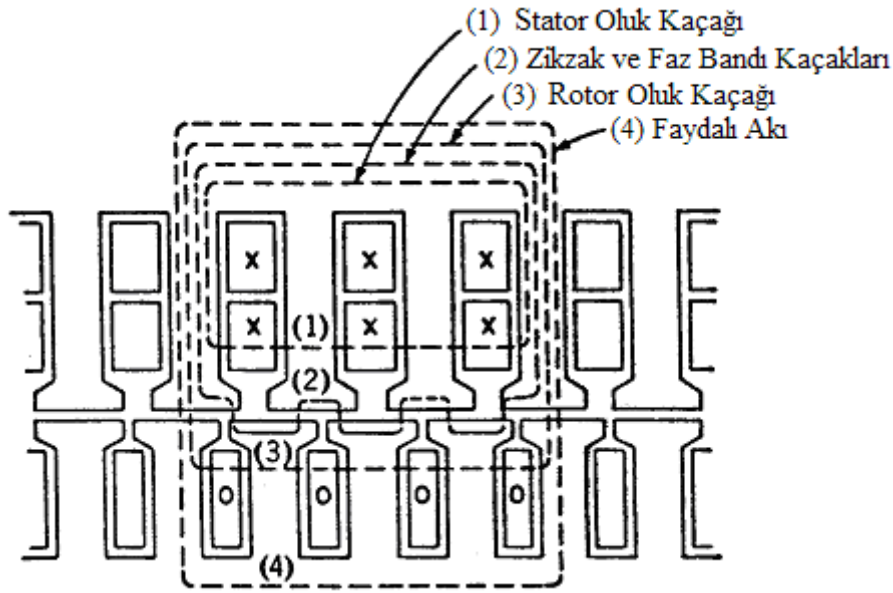
### 2.3. Kaçak Reaktansların Belirlenmesi ve Hesaplanması

Asenkron motorun eşdeğer devre modelinde  $X_1$ ,  $X_2$  ve  $X_m$  olmak üzere üç farklı reaktans mevcuttur.

Analiz açısından  $X_1+X_2$  kaçak reaktansı yedi farklı bileşene ayrılır [31].

- a) Stator oluk kaçak reaktansı
- b) Rotor oluk kaçak reaktansı
- c) Zikzak kaçak reaktansı
- d) Eğrilik kaçak reaktansı
- e) Faz bandı kaçak reaktansı
- f) Cephe bağlantısı kaçak reaktansı
- g) İlave kaçak reaktans

(c), (d), (e) şıkları hava aralığı kaçakları veya diferansiyel kaçak diye adlandırılıp hava aralığı harmoniklerinin neden olduğu kaçaklardır. (g) şıkkı ise dişlerdeki azalan sekonder akım dağılımlarının neden olduğu, tam hızda oluşan ilave reaktanstır. Şekil 2.3' de asenkron motorun stator, rotor ve hava aralığı kısımlarında meydana gelen kaçak akı yolları gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Asenkron motorun kaçak akı yolları [31]

Yüksüz durumda stator akımı küçük ve rotor akımı da pratik olarak sıfır kabul edilebileceğinden, tüm akılar hava aralığını geçerek stator ve rotor dişleri üzerinden manyetik devrelerini tamamlarlar (Şekil 2.3, 4. çizgi). Yük altında artan rotor akımının hava aralığında oluşturacağı zıt manyetomotor kuvveti (mmk) statorun ürettiği hava aralığı akısını azaltacak yödedir. Bu doğal olarak toplam akının ve endüklenen gerilimin azalmasına neden olur. Bunun sonucunda hattan daha fazla akım çekilir ve bozulan akı eski değerine döndürülür [32].

Statordaki yük akımı ve buna zıt olan rotor akımı, iki sargı arasındaki oluk ve diş başlarını atlayarak bir kaçak akı yörüngesinde akı akışı oluşturacak şekilde işbirliği yaparlar (Şekil 2.3 1, 2 ve 3 nolu çizgiler). Bu akılar sekonder akımı arttıkça hava aralığını geçen radyal akıların sapmasına ve rotora giden akı / toplam stator akımı oranının küçülmesine yol açar. Böylece, rotor yüklendikçe stator akısı devresini rotordan tamamlamak yerine hava aralığı yüzeyinde akmaya başlar ve bu akı yük arttıkça artar. Özel bir durum olan ani kısa devre durumunda ise, stator akısının tamamı devresini hava aralığı yüzeyinden tamamıyormuş gibi düşünülebilir [33].

Tez çalışmasında önerilen yarıklı yapıdaki yeni nüve tasarımları ile asenkron motorda meydana gelen zikzak kaçaklarının da (Şekil 2.3' de 2. çizgi) azaltılması hedeflenmiştir.

### 2.3.1. Mıknatıslanma reaktansının hesabı

Mıknatıslanma reaktansı  $X_m$ , boştaki gerilim ifadesinin mıknatıslanma akımına bölünmesiyle elde edilir.

$$X_m = \frac{E_1}{I_\mu} = 2mf_1\mu_0 D_{is} L_p \frac{W_1^2 K_{w1}^2}{k_i g p^2} \quad (2.20)$$

Eşitlikte,  $I_\mu$  mıknatıslanma akımını,  $m$  faz sayısını,  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliğini,  $k_i$  doyma faktörünü,  $g$  hava aralığı uzunluğunu ifade etmektedir.

### 2.3.2. Stator ve rotor oluk kaçak reaktansların hesabı

Olukta üretilen akının devresini aynı oluk üzerinden tamamlayan kısmının (Şekil 2.3 1. ve 3. akı yolları) neden olduğu endüktansa ilişkin reaktanstır. Stator ve rotor oluk kaçak reaktansı olarak iki kısımda incelenmektedir.

Şekil 2.1' de verilen stator oluk geometrisi için stator oluk permeans değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [34].

$$\lambda_1 = \frac{h_s - 1.1h_w}{b_{s2} + b_{s1}} \left[ \frac{b_{s2}^2}{(b_{s1} - b_{s2})^3} \left( \frac{1}{2} b_{s1}^2 + \frac{3}{2} b_{s2}^2 - 2b_{s2}b_{s1} + b_{s2}^2 \ln \left( \frac{b_{s1}}{b_{s2}} \right) \right) + \frac{3b_{s2} + b_{s1}}{4} \right] \quad (2.21)$$

$$+ \frac{0.1h_w}{-0.1b_{s1}} \ln \left( \frac{0.9b_{s1}}{b_{s1}} \right) + \frac{h_w}{(b_{os} - 0.9b_{s1})} \ln \left( \frac{b_{os}}{0.9b_{s1}} \right) + \frac{h_{os}}{b_{os}}$$

Şekil 2.2' de verilen rotor oluk geometrisi için rotor oluk permeans değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır [30].

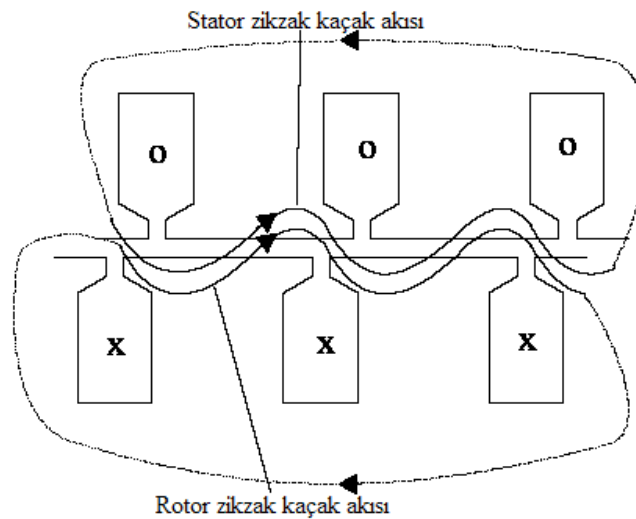
$$\lambda_2 = \frac{2h_r K_1}{3(d_1 + d_2)} + \left( \frac{h_{or}}{b_{or}} + \frac{0.1h_{or}}{d_1} - \frac{b_{or}}{2d_1} + 0.785 \right) K_2 \quad (2.22)$$

Eşitlik (2.21) ve (2.22)' de  $h_s$  ve  $h_r$  stator ve rotor oluk yüksekliklerini,  $h_{os}$  ve  $h_{or}$  stator ve rotor oluk ağız yüksekliklerini,  $b_{s1}$  ve  $b_{s2}$  stator oluk alt ve üst genişliklerini,  $b_{os}$  ve  $b_{or}$  stator ve rotor oluk ağız açıklıklarını,  $d_1$  ve  $d_2$  rotor oluk üst ve alt genişliklerini,  $K_1$  ve  $K_2$  bobin adım kısalmasına bağlı katsayıları ifade etmektedir.

Farklı oluk yapılarında değişen geometrik yapı neticesinde sadece  $\lambda_{1,2}$  değişeceğinden, her oluk tipinde  $\lambda_{1,2}$ ' ler ayrı ayrı verilir [35].

### 2.3.3. Zikzak kaçak reaktansın hesabı

Zikzak kaçak akısı, hava aralığının karşı kenarlarında bir diştten diğerine zikzak şeklinde geçer. Bu durum hava aralığı uzunluğuna ve diş uçlarının bağlı pozisyonlarına bağlıdır [36]. Şekil 2.4' de stator ve rotor zikzak akıların hareketi verilmiştir [30].



Şekil 2.4. Stator ve rotor zikzak kaçak akıları

Zikzak permeans ( $\lambda_z$ ) formülü eşitlik (2.23)' de verilmiştir [36].

$$\lambda_z = \frac{b_{ts} b_{tr} (b_{ts}^2 + b_{tr}^2)}{12 g \tau_s^2 \tau_r} \quad (2.23)$$

Stator ve rotor oluk permeans ile zikzak permeans değişimleri referans motor ve yarıkly yapıdaki motor modelleri için Bölüm 5' de verilecektir.

## 2.4. Kayıpların Sınıflandırılması ve Hesaplanması

Asenkron motorlar birçok ülkenin elektrik tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bunun için son zamanlarda motor kayıplarının belirlenmesi ve verimin iyileştirilmesi üretici firmaların öncelikli konuları arasında yer almaya başlamıştır.

Asenkron motorlarda kayıpların büyük bir kısmı stator sargılarında ve stator nüvesinde meydana gelir [37]. Asenkron motorda oluşan kayıpları, sabit kayıplar ve yük ile değişen kayıplar olarak iki ana bileşen altında inceleyebiliriz [38]. Sabit kayıplar; demir, sürtünme ve vantilasyon kayıplarından meydana gelirken, yük ile değişen kayıplar ise, stator ve rotor bakır kayıpları ile ilave yük kayıplarından oluşur [39].

### 2.4.1. Stator ve rotor bakır kayıpları

Stator ve rotor bakır kayıpları eşitlik (2.24) ve (2.25) ile hesaplanabilir. Burada  $I_1$  stator akımını,  $I_2$  statora indirgenmiş rotor akımını,  $R_1$  stator direncini,  $R_2$  statora indirgenmiş rotor direncini,  $P_{cu1}$  ve  $P_{cu2}$  sırasıyla stator ve rotor bakır kayıplarını ifade etmektedir.

$$P_{cu1} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.24)$$

$$P_{cu2} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.25)$$

### 2.4.2. Demir kayıpları

Demir kayıpları nüvede meydana gelir ve akı yoğunluğu, frekans ve ağırlığın bir fonksiyonudur.

Stator diş kayıpları  $p_{t1}$  eşitlik (2.26) ile bulunur.

$$p_{t1} \approx K_t p_{10} \left( \frac{f_1}{50} \right)^{1.3} B_{ts}^x G_{t1} \quad (2.26)$$

Burada  $p_{10}$ , 50 Hz ve 1.5 T' deki W/kg cinsinden kayıp değeri,  $K_t$ , 1.6 ile 1.8 arasında olup makine konstrüksiyonu için katsayı,  $G_{t1}$  ise stator dişlerinin ağırlığını ifade etmektedir.  $x$  malzemeye göre değişim gösteren malzeme katsayıdır ve bu katsayı çeşitli kaynaklarda farklı değerler ile gösterilmiştir [30, 40].

Benzer yolla stator boyunduruk kayıpları  $p_{y1}$  bulunur.

$$p_{y1} = K_y p_{10} \left( \frac{f_1}{50} \right)^{1.3} B_{cs}^x G_{y1} \quad (2.27)$$

$K_y$ , 1.6 ile 1.9 arasında olup makine konstrüksiyonu için katsayı,  $G_{y1}$  ise stator boyunduruk ağırlığıdır.

Stator ve rotor dişlerinde meydana gelen pulzasyon kayıpları ise eşitlik (2.28) ile elde edilir [30].

$$p_{pul} \approx 0.510^{-4} \left[ \left( N_r \frac{f_1}{p} K_{p1} B_{p1} \right)^2 G_{t1} + \left( N_s \frac{f_1}{p} K_{p2} B_{p2} \right)^2 G_{t2} \right] \quad (2.28)$$

Burada  $K_{p1}$  ve  $K_{p2}$  sırasıyla stator ve rotor diş akı yoğunluklarına bağlı olarak değişen katsayılardır.  $B_{p1}$  ve  $B_{p2}$  Carter katsayısı  $K_c$ ' ye bağlı olarak değişen katsayılardır.  $G_{t2}$  ise rotor dişlerinin ağırlığını ifade etmektedir.

Toplam demir kayıpları  $P_{fe}$  ise aşağıdaki eşitlik yardımı ile elde edilir.

$$P_{fe} = p_{y1} + p_{t1} + p_{pul} \quad (2.29)$$

### 2.4.3. İlave yük kayıpları

İlave yük kayıpları, şu ana kadar pek çok çalışmanın konusunu oluşturmuş olmasına rağmen hala kesin bir şekilde anlaşılammıştır [41]. İlave yük kayıpları, bütün kayıplar hesaplandıktan sonra motor giriş gücünden çıkartılarak hesap edilebilir [42].

$$P_{ilave} = P_g - (P_{\zeta} + P_{fe} + P_{cu1} + P_{cu2} + P_{sv}) \quad (2.30)$$

Literatürde ilave yük kayıplarının değerleri ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir. Richter, Kostenko ve Pietrovsky ilave yük kayıplarını giriş gücü değerinin % 0.5' i alınarak hesaplanması gerektiğini ifade ederken, Nürnberg kitabında çıkış gücünün % 0.5' i alınarak hesaplanmasının yapılması gerektiğini belirtmiştir. Alger ise giriş gücü değerinin % 0.5 ile % 3' ü arasında değişen yaklaşım ile hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir [43]. Bu tez çalışmasında ise bütün kayıplar hesap edildikten sonra giriş gücünden çıkartılarak ilave yük kayıpları elde edilmiştir.

### 2.4.4. Sürtünme ve vantilasyon kayıpları

Sürtünme ve vantilasyon kayıpları motordaki hava hareketlerinden ve rulmanlardaki sürtünmeden meydana gelir ve motorun hızına ve büyüklüğüne bağlı olarak değişir.

## 2.5. Verim Standartları ve Sınıflandırılması

Motor veriminin ölçülmesinde farklı yöntemler mevcut olup bu yöntemler uluslar arası standartlar tarafından belirlenmektedir. Tablo 2.1' de en çok kullanılan verim hesaplama standartları verilmiştir [44].

Tablo 2.1. En çok kullanılan motor verim standartları

Ülke	Açıklama	Standart Numarası
ABD	Elektrik-Elektronik Mühendisleri Enstitüsü	I.E.E.E. 112-B
ABD	Elektrik-Elektronik Mühendisleri Enstitüsü	C50.20 (IEEE 112 tabanlı)
Kanada	Kanada Standartları Kurumu	C-390
Uluslararası	Uluslararası Elektrik Komitesi	I.E.C. 34-2
Japonya	Japon Elektromekanik Komitesi	J.E.C. 37
İngiltere	İngiltere Standartları	B.S.-269
Türkiye	Türk Standartları	T.S.-3067

Motor veriminin hesaplanmasında görüldüğü üzere her ülke kendi standardını oluşturmuştur. Fakat en çok kullanılan yöntemlerden birincisi direkt yöntem (I.E.E.E. 112-B) olarak bilinen çıkış gücünün giriş gücüne bölünmesiyle verim değerinin belirlenmesidir. İkinci yöntem ise endirekt yöntem (I.E.C. 60034-2) olan kayıpların hesaplanmasıyla verimin bulunmasıdır.

Elektrik motorları 90 kW' a kadar genel olarak 3 temel verimlilik sınıfında üretilmekte ve değerlendirilmektedir. Avrupa elektrik makinaları ve güç elektroniği imalatçıları komitesi (C.E.M.E.P.)' e göre verim sınıfları aşağıdaki gibidir [45].

EFF1 sınıfı= En verimli motorlar

EFF2 sınıfı= Orta verimli motorlar

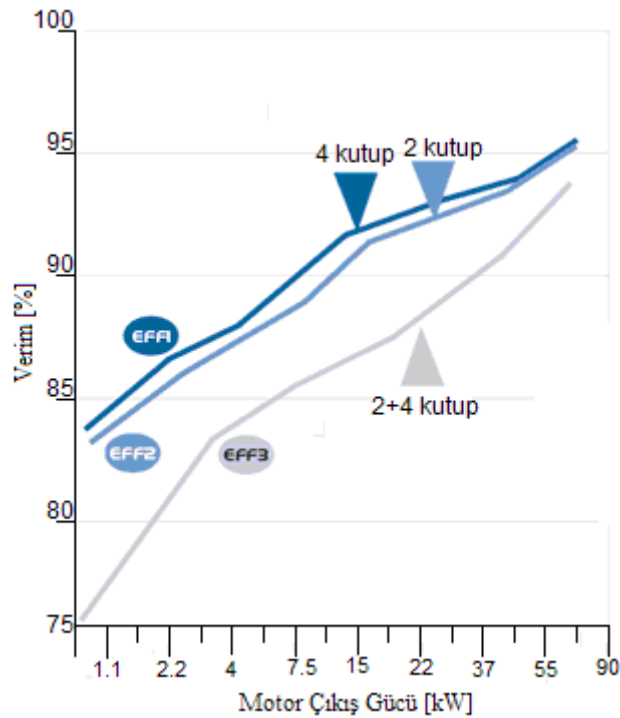
EFF3 sınıfı= En verimsiz motorlar

C.E.M.E.P.' e göre verim sınıfları, motorların çıkış güçlerine ve kutup sayılarına göre Tablo 2.2' de verilmiştir. Bu tablo 3 fazlı sincap kafesli asenkron motorlar için geçerlidir. Şekil 2.5' te ise 90 kW' a kadar olan motorların kutup sayılarına göre verim sınıfları grafiksel olarak verilmiştir.



Tablo 2.2. C.E.M.E.P.'e göre verim sınıfları ve verim değerleri [45].

Çıkış Gücü [kW]	2 Kutuplu Motorlar			4 Kutuplu Motorlar		
	EFF1	EFF2	EFF3	EFF1	EFF2	EFF3
1.1	$\geq 82.8$	$\geq 76.2$	$< 76.2$	$\geq 83.8$	$\geq 76.2$	$< 76.2$
1.5	$\geq 84.1$	$\geq 78.5$	$< 78.5$	$\geq 85.0$	$\geq 78.5$	$< 78.5$
2.2	$\geq 85.6$	$\geq 81.0$	$< 81.0$	$\geq 86.4$	$\geq 81.0$	$< 81.0$
3	$\geq 86.7$	$\geq 82.6$	$< 82.6$	$\geq 87.4$	$\geq 82.6$	$< 82.6$
4	$\geq 87.6$	$\geq 84.2$	$< 84.2$	$\geq 88.3$	$\geq 84.2$	$< 84.2$
5.5	$\geq 88.6$	$\geq 85.7$	$< 85.7$	$\geq 89.2$	$\geq 85.7$	$< 85.7$
7.5	$\geq 89.5$	$\geq 87.0$	$< 87.0$	$\geq 90.1$	$\geq 87.0$	$< 87.0$
11	$\geq 90.5$	$\geq 88.4$	$< 88.4$	$\geq 91.0$	$\geq 88.4$	$< 88.4$
15	$\geq 91.3$	$\geq 89.4$	$< 89.4$	$\geq 91.8$	$\geq 89.4$	$< 89.4$
18.5	$\geq 91.8$	$\geq 90.0$	$< 90.0$	$\geq 92.2$	$\geq 90.0$	$< 90.0$
22	$\geq 92.2$	$\geq 90.5$	$< 90.5$	$\geq 92.6$	$\geq 90.5$	$< 90.5$
30	$\geq 92.9$	$\geq 91.4$	$< 91.4$	$\geq 93.2$	$\geq 91.4$	$< 91.4$
37	$\geq 93.3$	$\geq 92.0$	$< 92.0$	$\geq 93.6$	$\geq 92.0$	$< 92.0$
45	$\geq 93.7$	$\geq 92.5$	$< 92.5$	$\geq 93.9$	$\geq 92.5$	$< 92.5$
55	$\geq 94.0$	$\geq 93.0$	$< 93.0$	$\geq 94.2$	$\geq 93.0$	$< 93.0$
75	$\geq 94.6$	$\geq 93.6$	$< 93.6$	$\geq 94.7$	$\geq 93.6$	$< 93.6$
90	$\geq 95.0$	$\geq 93.9$	$< 93.9$	$\geq 95.0$	$\geq 93.9$	$< 93.9$



Şekil 2.5. C.E.M.E.P.'e göre motorların verim sınıfları [46]

I.E.C. 60034–34 uluslar arası verim standardı üç fazlı ve sincap kafesli asenkron motorlar için yeni bir verim standardı oluşturmuştur. Bu verim standardında motor çıkış gücü 90 kW' a kadar değil 375 kW' a kadar belirlenmiştir. Uluslar arası verim standardı sınıfları ise şu şekildedir [47]:

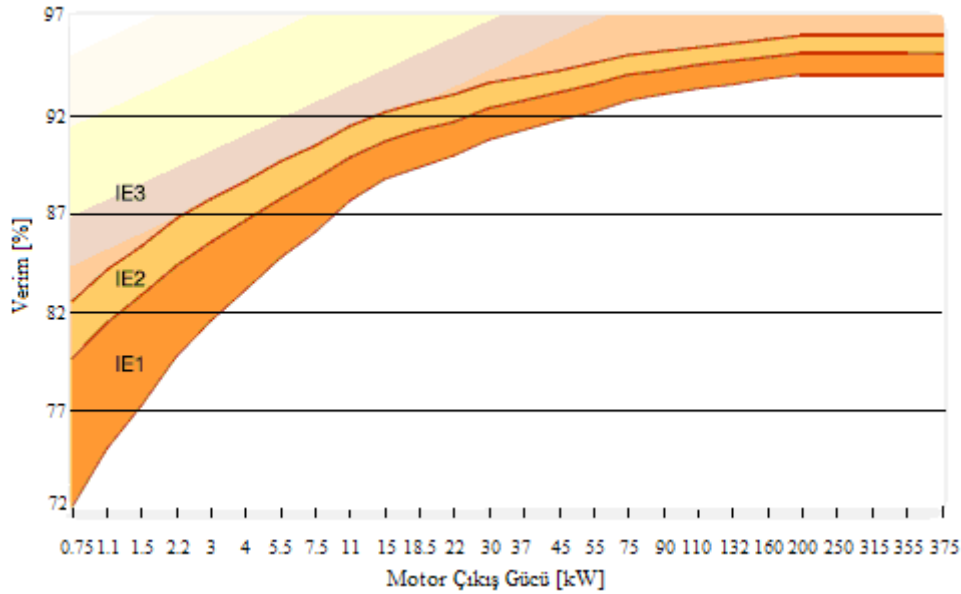
IE1= Standart verimli motorlar

IE2= Yüksek verimli motorlar

IE3= Premium verimli motorlar

IE4= Süper Premium verimli motorlar

Şekil 2.6' da I.E.C. 60034–34 standardına göre 375 kW motor çıkış gücüne kadar olan motorların verim sınıflarının grafiği 50 Hz ve 4 kutuplu motorlar için verilmiştir. IE4 verim sınıfının IE3' ün üst kısmında yer aldığı fakat ticari olarak daha hayata geçirilmediği ifade edilmektedir [47].



Şekil 2.6. I.E.C. 60034–34' e göre motorların verim sınıfları

Görüldüğü gibi asenkron motorların verimini yükseltmek mümkündür. Tez çalışmasında kullanılan motorun verim sınıfı Tablo 2.2' ye göre EFF3 yani en verimsiz motor olarak gözükmektedir. I.E.C. 60034–34 standardına göre ise IE1 standart verimli motor sınıfının da altında kalmaktadır.

## **BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ASENKRON MOTOR MODELİ**

Bu bölümde asenkron motorun sonlu elemanlar yöntemi ile nasıl analiz edileceği, elde edilmek istenilen performans bilgilerine ve grafiklerine nasıl ulaşılabileceği anlatılacaktır. Analizler için F.E.M.M. (Finite Element Method Magnetics) paket programı kullanılacaktır. Programa motor bilgilerinin girilmesi, ağ yapılandırması, analiz işlemleri, performans değerlerinin (moment, akım, verim vb.) elde edilmesi incelenmektedir.

Mühendislikte, tasarım ve analizde ilk aşama; ele alınan fiziksel sistemin aslına olabildiğince yakın, incelenecek sistem büyüklüklerinin duyarlı ve pratik olarak elde edebileceği bir matematiksel model oluşturmaktır. Özellikle bilgisayar destekli tasarım ve analizin son derece yaygın olarak kullanıldığı günümüzde kurulacak ya da seçilecek matematiksel modelin incelenen problemlere uyumu, değişik incelemelere uygulanabilirliği analizin başarısı açısından çok önemlidir. Doğal olarak, incelenen sistemin tüm fiziksel özelliklerini içeren, sistem cevaplarını aslına tamamen uygun olarak verebilecek bir matematiksel modelin kurulması, her sistem için mümkün değildir. Uygulamada karşılaşılan karmaşık, çok parametrelili sistem davranışlarının tümü kurulacak matematiksel modele yansıtılamaz. Genelde izlenen yol, modelin boyutları, bilgisayar yazılım ve donanım olanakları, sonuçların duyarlılık düzeyi gibi birçok unsur göz önüne alınarak, incelenen sistem büyüklüklerini etkilemeyecek ve analizin amaçlarını zedelemeyecek ölçüde varsayımlar yapmaktır [48].

Elektromanyetik problemlerde amaç, alan dağılımlarını belirleyerek buna bağlı olan diğer fiziki büyüklüklere ulaşmaktır. Tasarım aşamasında bu önemli bir noktadır. Elektrik motorlarının tasarımında ve iyileştirilmesinde de alan dağılımlarını hesaplamak veya bir şekilde ulaşılmak istenen büyüklükleri ölçmek gerekir. Ancak, modelin imalat safhasından sonra sonuç elde etmek, esnek bir tasarım yöntemi olmayacaktır. Zaman ve maliyet kaybına yol açacaktır. Motorun modeli kâğıt

üzerinde tasarlandığı anda gerekli hesapların ve ölçmelerin yapılabilmesi lazımdır. Bunun için analitik yöntemler kullanılabilir. Ancak geometri analitik çözümü bilinen tarzlara uymuyorsa veya karmaşıksa ki çoğu zaman böyledir, sayısal hesaplama yöntemlerinden faydalanılır [49]. Hangi yöntem ile çalışmanın uygun olacağına karar vermede, problem için en kısa sürede en doğru sonucu verme, kolay programlanabilme ve kolay kullanılabilme özellikleri etkilidir [50]. Elektromanyetik alan incelemelerinde en çok kullanılan sayısal yöntemler aşağıda verilmiştir [51].

- Sonlu Elemanlar Yöntemi
- Sonlu Farklar Yöntemi
- Sınır Elemanlar Yöntemi
- Yük Benzetim yöntemi
- Monte Carlo Yöntemi

### **3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi**

Son yıllarda sayısal yöntemlerin ve bilgisayarların gelişmesi ile elektrik makinalarındaki manyetik alanların hesaplanması için sonlu elemanlar yöntemini kullanmak pratik bir hale gelmiştir [52]. Yöntem ilk olarak 1940' lı yıllarda önerilmiş fakat 1950' li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Chari ve Silvester sonlu elemanlar yöntemini DC motor, SR motor ve asenkron motorların analizi gibi elektromanyetik problemlere uygulayan ilk kişilerdir. 1970' den sonraki yıllarda sonlu elemanlar yöntemi AC ve DC jeneratörlere, transformatörlere, solenoid ve aktuatörlere uygulanmıştır [53].

S.E.Y.' in hem karmaşık fiziksel şekilleri kolay modellemesinden hem de lineer olmayan malzemelerin tanımlanmasına izin vermesinden dolayı elektrik motorlarının analizinde en çok tercih edilen sayısal yöntemdir [54, 55]. S.E.Y. elektrik mühendisliğinin çeşitli alanlarında kullanılmaya başlandığından itibaren asenkron makinaların analizine yönelik uygulamalarda başlamıştır. Brauer çeşitli çalışmalarında bir ve üç fazlı asenkron makinaların SEY ile modellenmesinin nasıl yapılacağını ayrıntıları ile vermiştir [56, 57, 58, 59]. Williamson ve Robinson

asenكرون makinaların S.E.Y. ile analizinde geliştirdikleri yöntemler ile hesaplama maliyetini oldukça düşürmüşlerdir [54, 60].

S.E.Y. ile yapılan analizlerde ilk modeller stator ve rotorun ayrı ayrı ele alınmasına dayanmaktadır. Stator ve rotorun ayrı ayrı ele alınması maliyeti düşürmekle birlikte hava aralığında meydana gelen akı yoğunluklarının tanımlanmasının güçlüğüne ortaya çıkartmaktaydı. Daha sonraları bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle stator ve rotorun birlikte modellenmesi kolaylaşmıştır. Bu modellemelerde hava aralığının da modellenmesi sebebiyle endüktansların hesaplanması kolaylaşmıştır [61].

Saraiva ve arkadaşları F.E.M.M. simülasyonu ve deneysel çalışma karşılaştırmasında, hata payını % 0.065 olarak bulmuşlardır [62]. Geometrik çizimlerin ve malzeme tanımlamalarının düzgün yapılması halinde oluşturulan modellerin deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla örtüşeceği görülmektedir.

### 3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi analiz işlemleri

Asenkron motorun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizlerinin nasıl gerçekleştirildiği aşağıda verilmiştir.

Elektromanyetik problemlerde, Maxwell eşitliklerinin çoğunlukla kullanıldığı bir gerçektir. Program tarafından çözülen manyetostatik problemleri zamandan bağımsız alanlarda tanımlanmalıdır. Bu tanımlamada, manyetik alan şiddeti (H) ve manyetik akı yoğunluğu (B) aşağıdaki şartları sağlamalıdır [63].

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J \\ \nabla \cdot B &= 0\end{aligned}\tag{3.1}$$

Tanımlanan alanda, B ile H arasındaki ilişki, farklı her malzeme için şu şekilde olmaktadır.

$$B = \mu H\tag{3.2}$$

(3.2) eşitliğinde  $\mu$  ifadesi ortamın manyetik geçirgenliğidir. Kullanılan malzeme lineer olmayan malzeme ise (alnico mıknatıs veya döküm demir) ortamın manyetik geçirgenliği direkt olarak B' nin bir fonksiyonu olur [63].

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.3)$$

Aynı zamanda F.E.M.M. programı, (3.1) ve (3.2) eşitliklerinin oluşturduğu manyetik alanda, manyetik vektör potansiyeli (A) araştırması da yapar. Manyetik akı yoğunluğu da manyetik vektör potansiyeli cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$B = \nabla \times A \quad (3.4)$$

(3.1) eşitliği şu şekilde yazabilir [63]. İfade de J akım yoğunluğu vektörüdür.

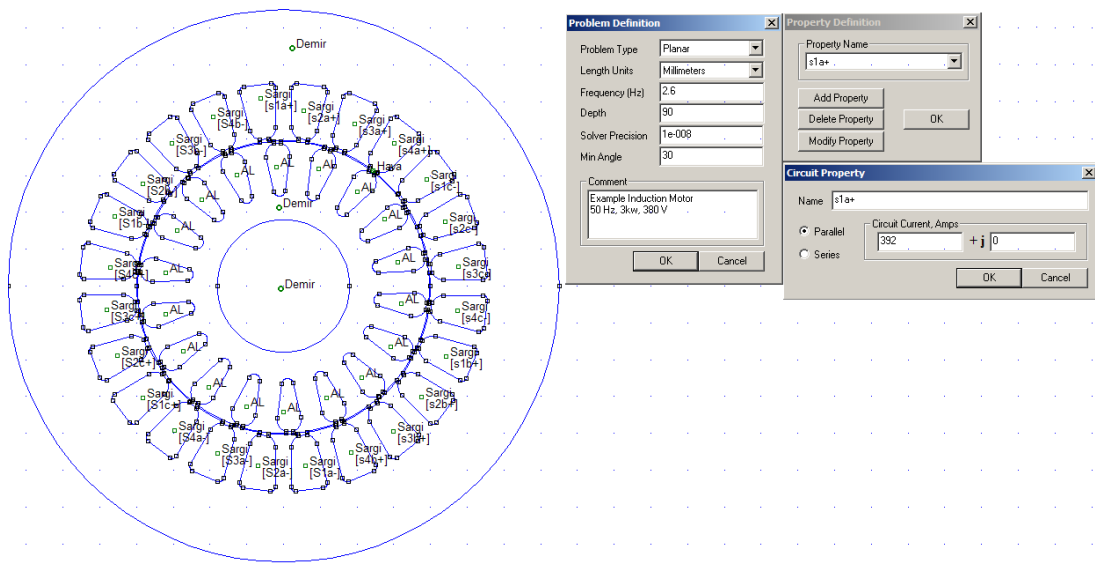
$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \Rightarrow J = -\frac{1}{\mu} \nabla^2 A \quad (3.5)$$

F.E.M.M. programı, lineer olmayan 'B-H' karakteristiği içeren manyetostatik problemlerinin çözümü için, eşitlik (3.5)' i kullanır.

Programın, A değerini içeren bir eşitlikten faydalanarak çalışmasının sebebi ise, manyetik olarak hemen hemen tüm şartları sağlayabilen bir eşitlik olmasıdır. Eğer A değeri bulunursa, A' nın diferansiyelinin alınması ile B ve H bulunabilir.

Diferansiyel denklemlerin ilgi alanlarının genişlemesi ve olayın karmaşıklaşması ile birlikte kapalı formdaki çözümlere ulaşılması, basit geometriler dışında, zorlaşmıştır. Bu durumda sonlu elemanlar yöntemi devreye girer. Sonlu elemanlar yöntemi, çözüm yapılan bölgeyi çok sayıda parçalara ayırır (küçük üçgenler veya dörtgenler) ve çözüm bölgesinde bu küçük bölgelerin dışında manyetik vektör potansiyeli için gerçek çözümü basit bir fonksiyonla tanımlar. Eğer yeterince küçük parça kullanılırsa, istenen manyetik vektör potansiyeli değerine o kadar yaklaşmış olunur [64].

Asenkron motorun F.E.M.M. programında analizinin yapılması için programın kullanıcı ara yüzünde, model geometrisinin oluşturulması veya Autocad programı veya benzeri bir program yardımı ile çizilen modelin F.E.M.M. programında açılıp malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Malzemenin adı, B-H karakteristiği, rölatif permabilitesi (manyetik geçirgenliği) gibi değerler girilir. Rotor olukları içindeki alüminyum malzemenin özellikleri, hava aralığının ve stator sargılarının özellikleri de belirlenir. Problemin tanımlanması ve sargıların belirlenmesi ile ilgili grafik Şekil 3.1’ de verilmiştir.



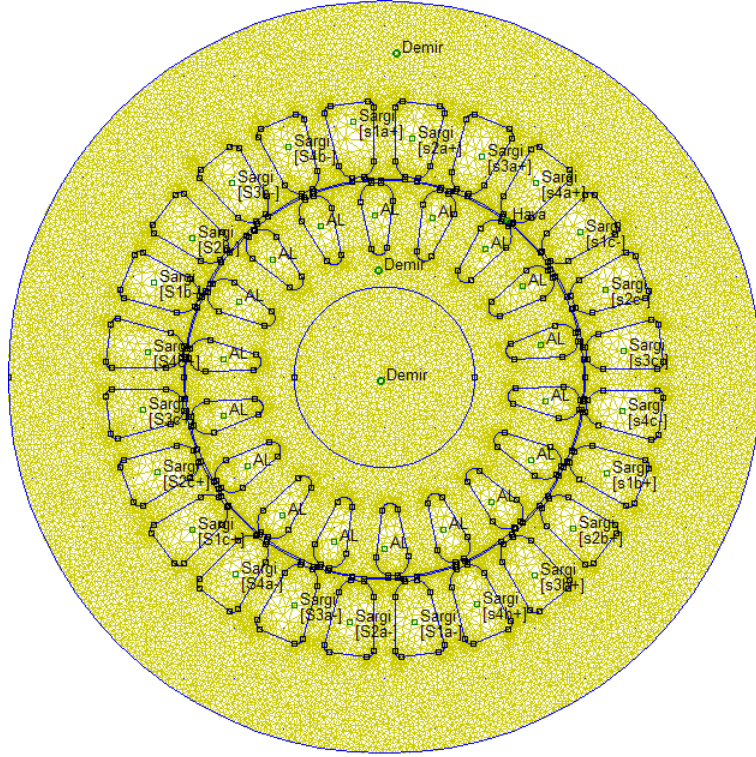
Şekil 3.1. F.E.M.M. programında problemin tanımlanması ve malzeme özelliklerinin girilmesi

Malzeme özellikleri belirlendikten sonra, sınır şartlarının belirlenmesi gerekir. Oluşturulan modellerin çözümünde kullanılacak sınır şartı sıfır olarak tanımlanır. Bunun sebebi manyetik akının sınır dışına çıkmasını engellemektir.

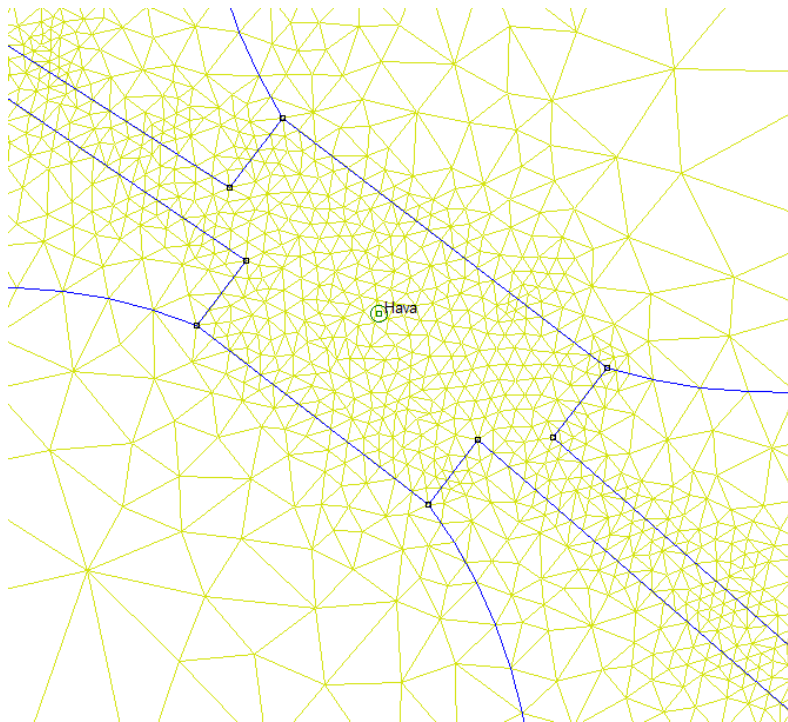
$$A = 0 \quad (3.6)$$

Gerekli olan problem tanımlamaları, malzeme bilgileri ve sınır şartları girildikten sonra program analiz için hazır hale getirilmiş demektir. Bu kısımdan sonra program çalıştırılarak analizler gerçekleştirilebilir. Şekil 3.2’ de oluşturulan ağ yapısı verilmiştir. Ağ yapısındaki üçgen elemanların sayısı ne kadar fazla olursa işlem sonucunun doğruluğu da o kadar artar. Bu yüzden hava aralığı kısmında oluşturulan ağ yapısındaki üçgen elemanların sayısı diğer kısımlardaki üçgen eleman sayısına

göre üç katı daha fazla seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3' de hava aralığında oluşturulan ağ yapısının detayı gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Ağ yapısının oluşturulması

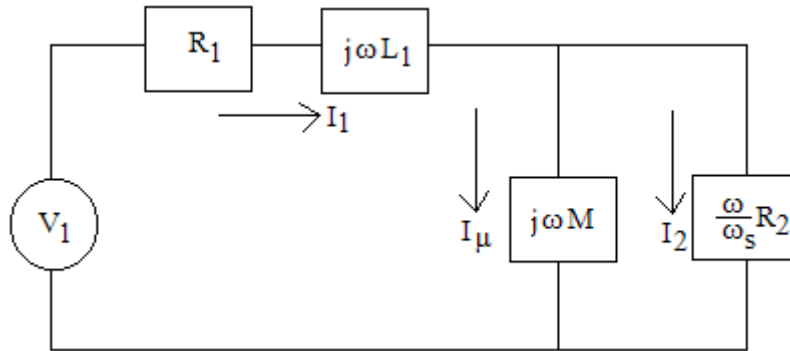


Şekil 3.3. Hava aralığındaki ağ yapısı



### 3.2. Asenkron Motor Modeli

S.E.Y. ile asenkron makinanın performans bilgilerini tayin edebilmek için ilk önce uygun bir eşdeğer devre modeli ortaya konulmalıdır. Asenkron motorun bir faz F.E.M.M. eşdeğer devresi Şekil 3.4' de verilmiştir [65].



Şekil 3.4. Asenkron motorun bir faz F.E.M.M. eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devrede bütün kaçak endüktanslar stator tarafındaki  $L_1$  endüktansında toplanmıştır. Stator ile rotorun kuplajı ve rotor akımları  $M$  endüktansında tanımlanmıştır.  $\omega$  uygulanan gerilimin açısal hızını,  $\omega_s$  kayma açısal hızı göstermektedir. Makina çift kutup sayısına sahipse,  $\omega_r$  rotorun mekanik açısal hızını göstermek üzere,  $\omega_s$  aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\omega_s = \omega - p\omega_r \quad (3.7)$$

Bu devre modelinden yola çıkılarak faz akımı, faz gerilimi  $V_1$  ve moment  $T$  arasındaki ilişkiler ortaya çıkartılabilir.

#### 3.2.1. Asenkron motor empedansı

Model olarak alınan eşdeğer devreye göre bir fazın giriş empedansı aşağıdaki şekilde hesaplanır [65].

$$Z_1 = R_1 + j\omega \left( L_1 + M \left( \frac{1}{1 + j\tau_z \omega_s} \right) \right) \quad (3.8)$$

Burada  $\tau_z$  rotor zaman sabitidir.

### 3.2.2. Kayma frekansına bağlı endüktans

Belirli bir kayma frekansında bir faz için akı halkası değeri,

$$\phi = \left( L_l + M \left( \frac{1}{1 + j\tau_z \omega_s} \right) \right) I_1 \quad (3.9)$$

olarak yazılır. Bu ifadeyi akıma bölerek kayma frekansına bağlı olarak endüktans değeri elde edilir. Reel ve imajiner bileşenlerini ayırarak kayma frekansına bağlı endüktans aşağıdaki gibi hesaplanır [65].

$$L(\omega_s) = \left( L_l + \frac{M}{1 + (\tau_z \omega_s)^2} \right) - j \left( \frac{\tau_z \omega_s M}{1 + (\tau_z \omega_s)^2} \right) \quad (3.10)$$

Kayma frekansına bağlı olan bu endüktans ifadesi motor parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan ifadelerin başında gelmektedir.

Teknik olarak bir sargının endüktansı o bobini halkalayan akı değeriyle ilişkilidir. Sargının endüktansı bobinde depolanan enerji değerinin eşdeğer bir endüktansla depolanan enerjiye eşitlenmesiyle bulunabilir [66].

$$\frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \int JAdV \quad (3.11)$$

İki boyutlu bir sistemde endüktans ifadesi,

$$L = \frac{1}{I^2} \iint JAdxdy \quad (3.12)$$

olarak belirlenir. Son yazılan ifadenin S.E.Y. eşitliği aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$L = \frac{1}{I^2} \sum_{e=1}^N \sum_{i=1}^D A_i \iint \alpha_i dx dy \quad (3.13)$$

I bobindeki akım, N eleman sayısını, D düğüm sayısını,  $A_i$  i. düğümün vektör potansiyelini,  $\alpha$  ise eleman şekil fonksiyonunu ifade etmektedir. Eşitlik (3.13) ifadesinin sonlu eleman terimleriyle yazılımı aşağıdaki şekildedir.

$$L = \frac{1}{3I^2} \sum_{e=1}^N \int \Delta_e \int_{i=1}^D A_i \quad (3.14)$$

$\Delta_e$  eleman alanıdır. İfadelerde hesaplamaya katılacak elemanlar sadece bobini modelleyen elemanlardır [66].

F.E.M.M. programında endüktans hesabı seçilen bölgedeki toplam akı halkası prensibine dayandığından endüktans birimi  $HA^2$  olarak verilir. 3 kW'lık makina için kayma frekansının 0–3 Hz aralığında 0.25 Hz artımlarıyla elde edilmiştir.

### 3.2.3. Akımın fonksiyonu olarak moment

Moment, devre modelinden direkt olarak elde edilebilir. Bunun için statordan rotora aktarılan iç güç veya hava aralığı gücü ifadesinden yararlanılır. İç güç, rotordaki rotor bakır kayıpları ve mekanik güç olarak ikiye ayrılır [65].

$$P_i = 3 \left( \frac{\omega - \omega_s}{\omega} \right) R_2 |I_2|^2 + 3R_2 |I_2|^2 \quad (3.15)$$

Burada birinci terim mekanik gücü, ikinci terim ise rotor kayıplarını ifade etmektedir. Mekanik güç ifadesi mekanik hız cinsinden yazılırsa;

$$P_\zeta = 3 \left( \frac{p\omega_r}{\omega_s} \right) R_2 |I_2|^2 = T\omega_r \quad (3.16)$$

ifadesi elde edilir. Moment formülünü elde etmek için her iki taraf  $\omega_r$ 'ye bölünürse;

$$T = 3 \left( \frac{pR_2}{\omega_s} \right) |I_2|^2 \quad (3.17)$$

ifadesi elde edilir. Gerekli akım dönüşümleri yapıldıktan sonra hesaplamalarda kullanılan moment formülü aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$T = 3pMI_1^2 \left( \frac{\tau_z \omega_s}{1 + (\tau_z \omega_s)^2} \right) \quad (3.18)$$

Moment ifadesi elde edildikten sonra gerekli parametreler kullanılarak asenkron motorun güç faktörü, reaktif güç, görünür güç ve verim değerleri elde edilir. Elde edilen bu parametreler yardımıyla istenilen grafikler (moment, güç faktörü, verim vb.) çizdirilir. F.E.M.M. programından elde edilen sonuçlar, yazılan Matlab programı yardımı ile performans grafiklerinin çizdirilmesi için gerekli olan parametreler hesaplanır. Kullanılan Matlab yazılımı Ek B' de verilmiştir.

Bu tezde önerilen tasarımlar, bu bölümde anlatılan yöntem ve yazılımlar ile modellenmiş olup, ilgili modellemeler 4. ve 5. bölümlerde verilmiştir.

## **BÖLÜM 4. REFERANS MOTORUN TASARIMI**

Bu bölümde orijinal motor (O.M.) ile yeni tasarlanacak olan motor modelleri tanıtılacaktır. Motor modellerinin her biri ayrı ayrı ele alınarak, 2 boyutlu kesitleri verilip aralarındaki farklar belirtilecektir. Referans motor modelinin oluşturulma aşamaları ve modellerden elde edilen sonuçlar da yine bu bölümde verilecektir.

Tez çalışmasının ilk aşamasında orijinal motor modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada önerilen yarık nüve modelleri orijinal motora uygulanmıştır. Yapılan F.E.M.M. analizleri sonucunda yarık uygulanan orijinal motorun stator ve rotor dişleri ile rotor boyunduruk kısımlarında doymaların meydana geldiği görülmüştür. Bunun neticesinde yarık yapıdaki motor modellerinden elde edilen performans değerleri orijinal motora göre daha kötü çıkmıştır. Oluşan doymaların önüne geçebilmek ve istenilen performans değerlerini elde edebilmek amacıyla orijinal motorun stator iç çapı değiştirilerek yeni tasarımlara gidilmiştir. Burada amaç iç çapı artırarak stator ve rotor oluk geometrilerinde herhangi bir değişiklik yapmadan stator ve rotor diş genişlik değerleri ile rotor boyunduruk yükseklik değerini büyütüp bu kısımlarda meydana gelen doymaların önüne geçmektir. Bu doğrultuda stator iç çapı farklı 6 adet (dişlerde yarık olmayan) yeni tasarım modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde stator iç çapı 4 mm artırılmış motor modelinin orijinal motora göre en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir.

### **4.1. Karşılaştırmada Kullanılacak Orijinal Motor ve Özellikleri**

Karşılaştırmalarda kullanılacak olan orijinal motorun etiket değerleri Tablo 4.1' de, geometrik yapı ve diğer bilgileri Tablo 4.2' de, stator ve rotor oluk geometri değerleri ise Tablo 4.3' de verilmiştir. Motora ait diğer bilgiler (B-H eğrisi, sac bilgileri, sargı değerleri) Ek C' de verilmiştir.

Tablo 4.1. Orijinal motorun etiket değerleri

Motor Parametreleri	Sembol	Değer
Nominal Güç [kW]	$P_n$	3
Nominal Gerilim [V]	$U_1$	380
Nominal Akım [A]	$I_n$	6.63
Bağlantı Şekli		Yıldız
Frekans [Hz]	$f_1$	50
Faz Sayısı	$m$	3
G Faktörü	$\cos\phi$	0.88
Verim [%]	$\eta$	78
Rotor Devir Sayısı [d/d]	$n_r$	2844

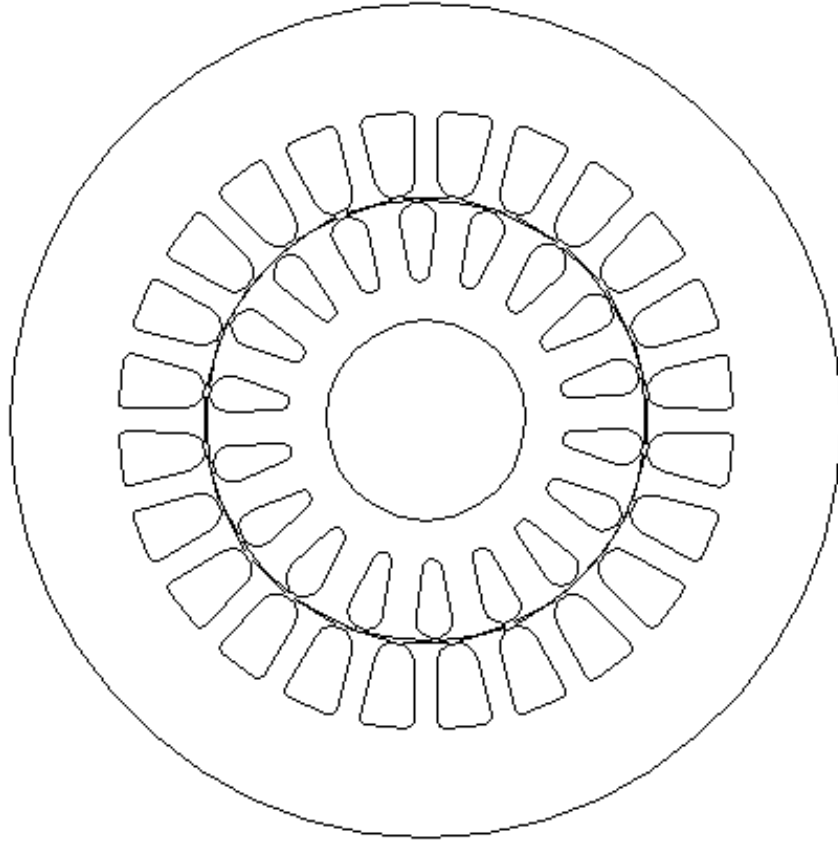
Tablo 4.2. Orijinal motorun geometrik bilgileri

Motor Parametreleri	Sembol	Değer
Stator Oluk Sayısı	$N_s$	24
Rotor Oluk Sayısı	$N_r$	18
Mil apı [mm]	$d_{mil}$	36
Kutup Sayısı	$p$	1
Faz ve Kutup Başına Oluk Sayısı	$q$	4
Paket Boyu/Kutup Adamı	$\lambda$	0.95
Stator Oluk Geometrisi		Trapezoidal
Rotor Oluk Geometrisi		Damla

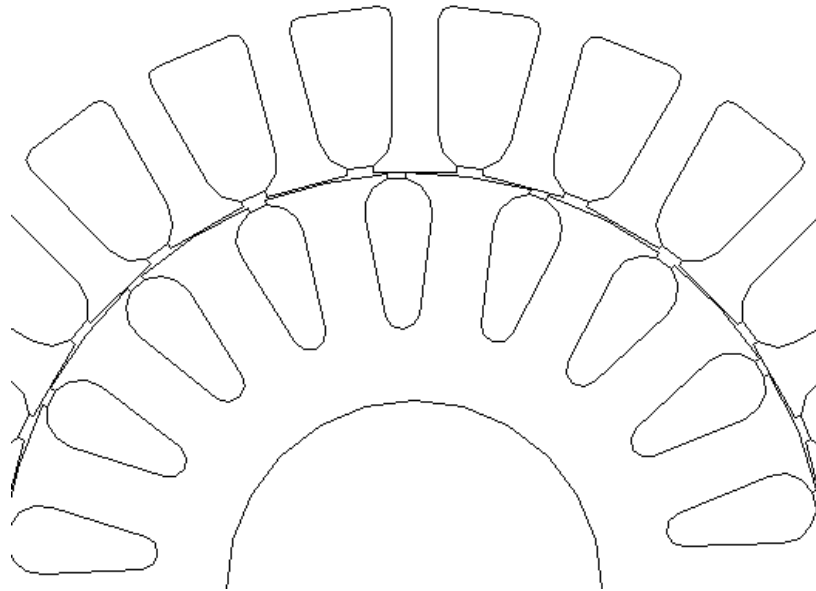
Tablo 4.3. Orijinal motorun oluk geometri değerleri

Motor Parametreleri	Sembol	Değer [mm]
Stator Diş Genişliği	$b_{ts}$	4.36
Stator Oluk Alt Genişliği	$b_{s1}$	6.96
Stator Oluk st Genişliği	$b_{s2}$	9.78
Stator Oluk Yüksekliği	$h_s$	14.86
Stator Boyunduruk Yüksekliği	$h_{cs}$	19.5
Rotor Oluk Ağız Açıklığı	$b_{or}$	1.51
Rotor Diş Genişliği	$b_{tr}$	5.97
Rotor Oluk st Genişliği	$d_1$	6.56
Rotor Oluk Alt Genişliği	$d_2$	3.22
Rotor Oluk Yüksekliği	$h_r$	14.41
Rotor Boyunduruk Yüksekliği	$h_{cr}$	6.81

Orijinal motor modelinin Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3' deki değerleri kullanılarak Autocad programında çizimi gerçekleştirilmiştir. Orijinal motorun 2 boyutlu kesiti Şekil 4.1' de, oluk geometrilerinin daha detaylı gösterimi ise Şekil 4.2' de verilmiştir.

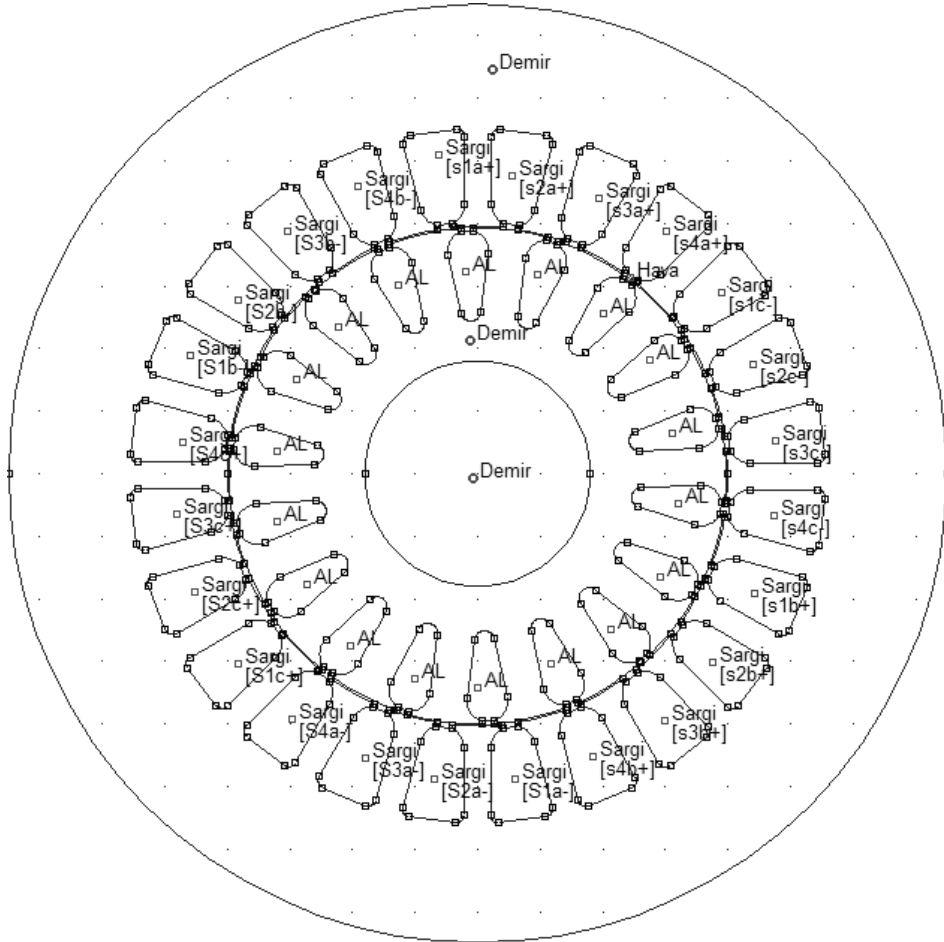


Şekil 4.1. Orijinal motor modelinin 2 boyutlu kesit görünüşü



Şekil 4.2. Orijinal motor modelinin detaylı gösterimi

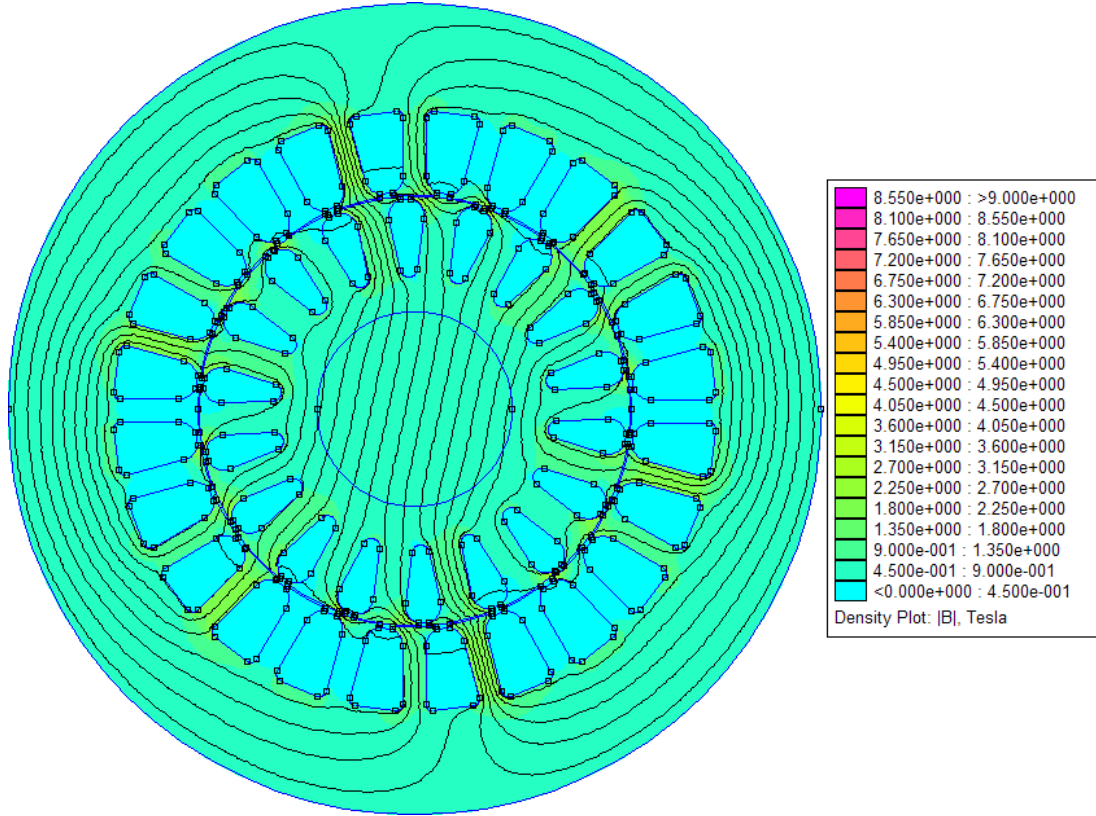
Autocad programında çizimi gerçekleştirilen motor modeli F.E.M.M. programına aktarılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3’ de F.E.M.M. programında motor özelliklerinin girilmesiyle elde edilen orijinal motorun kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.3. Orijinal motorun F.E.M.M. modeli

Analizler sonucu orijinal motor için F.E.M.M. programından elde edilen alan dağılımı Şekil 4.4’ de verilmiştir. Alan dağılımı motorun nominal kayma değerinde elde edilmiştir.





Şekil 4.4. Orijinal motor modelinin alan dağılımı

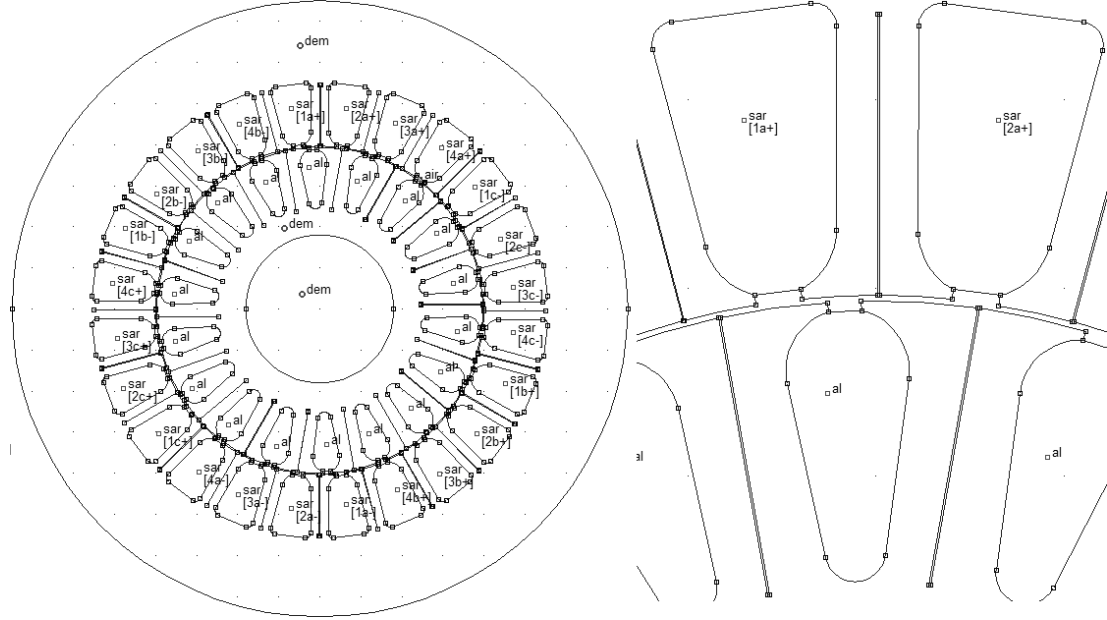
Tablo 4.4' de orijinal motor modelinin analizler sonucu elde edilen nominal çalışma noktasındaki güç, verim, akım, güç faktörü ve moment değerleri verilmiştir. Tablo 4.4' de verilen nominal çalışma noktasındaki değerlerin Tablo 4.1' de verilen orijinal motorun etiket değerleri ile uyduğu görülmektedir.

Tablo 4.4. Orijinal motor modelinin nominal çalışma noktasındaki değerleri

Motor Parametreleri	Orijinal Motor
Giriş Gücü [W]	3850.3
Çıkış Gücü [W]	2999.2
Verim [%]	77.890
Nominal Akım [A]	6.673
Güç Faktörü	0.874
Nominal Moment [N.m]	10.129

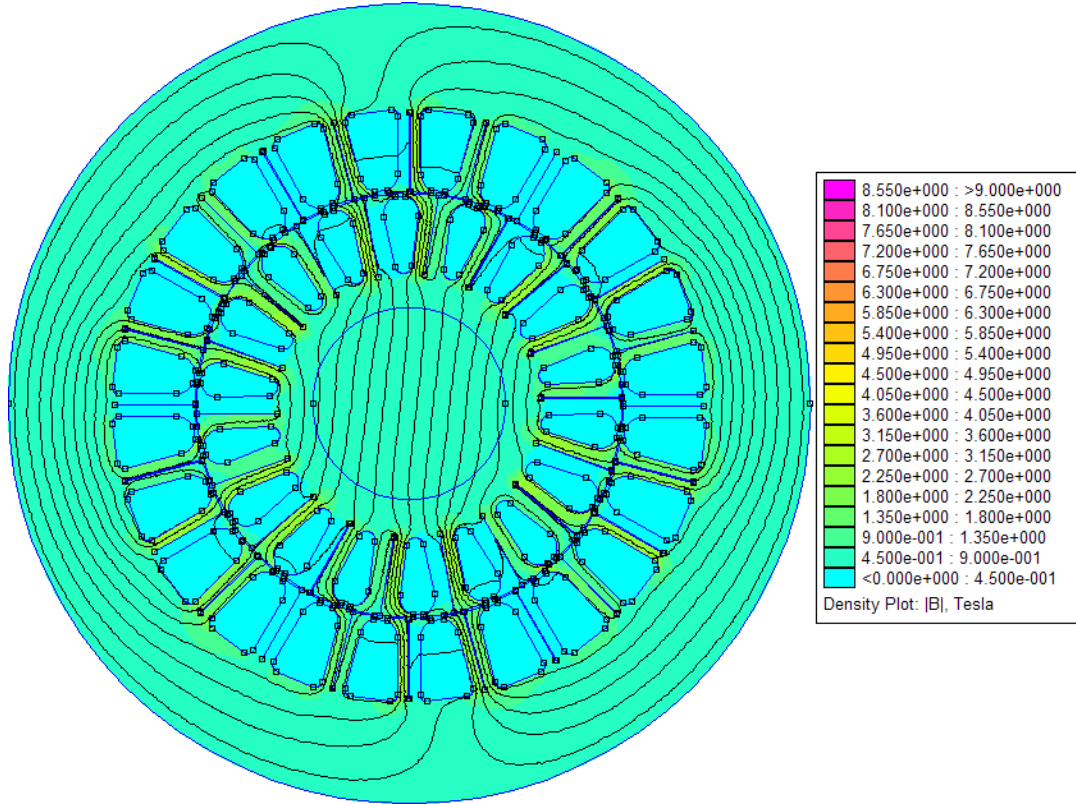
Bu aşamadan sonra orijinal motor modeline önerilen nüve tasarımları uygulanmıştır. Stator ve rotor dişlerinin ortasına çeşitli yükseklik ve genişlik değerlerinde yarıklar uygulanmıştır. Şekil 4.5' de orijinal motor modelinin hem statoruna hem de rotoruna yarıklar uygulanmış durum gösterilmiştir. Yarıkların derinliği 15 mm, yarıkların genişliği ise 0.1

mm' dir. Orijinal motora uygulanan diğ er yarıklı yapıdaki modeller ise Ek D' de verilmiştir.



Şekil 4.5. 15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modeli (O.M.\_T\_Y) ve detaylı gösterimi

Şekil 4.6' da yarık derinliği 15 mm ve yarık genişliği 0.1 mm olan motor modeli için alan dağılımı verilmiştir. Alan dağılımı nominal kayma değerinde çizdirilmiştir. Diğ er yarık derinliği ve genişliğindeki motor modellerinin alan dağılımları ise Ek E' de verilmiştir.



Şekil 4.6. 15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı

Orijinal motor modelinin hem stator ve hem de rotor kısmında yarık olması durumunda dişlerde doymaların fazla olduğu tespit edilmiştir. Özellikle yarık genişliği fazla olan modellerde doymalar sebebiyle performansın daha fazla kötüleştiği görülmektedir.

Orijinal motor ve yarık derinliği 15 mm yarık genişliği 0.1 mm olan motor modelleri için stator ve rotor dişlerindeki manyetik akı yoğunluk değerleri Tablo 4.5' de verilmiştir.

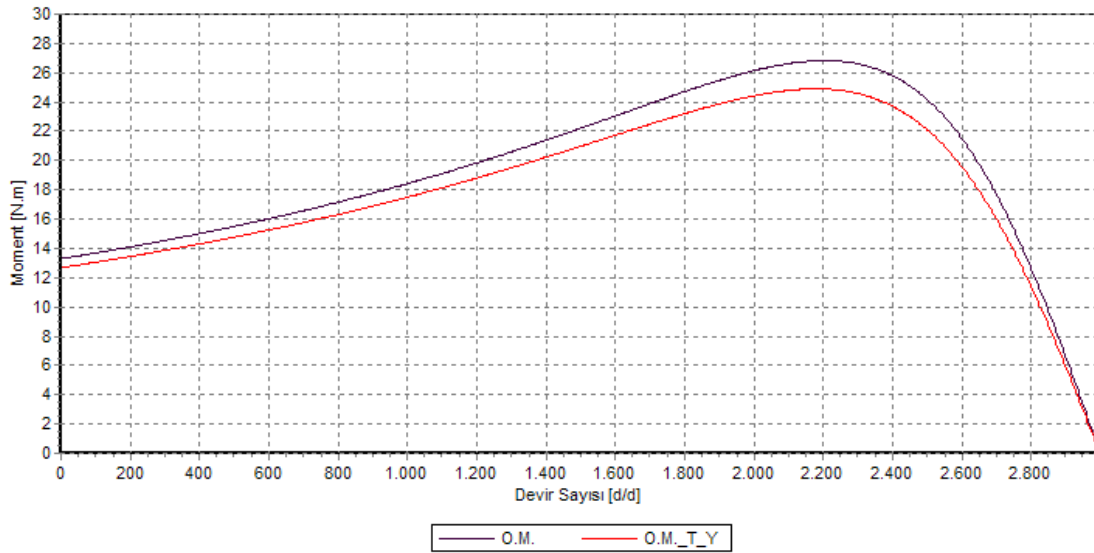
Tablo 4.5. Orijinal ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin stator ve rotor dişlerindeki manyetik akı yoğunluk değerleri

Motor Parametreleri	Orijinal Motor [T]	15 mm Derinlik 0.1 mm Yarık Genişliğine Sahip Motor [T]	Bağlı Fark [%]
Stator Diş Akı Yoğunluğu	1.93	2.26	17.098
Rotor Diş Akı Yoğunluğu	2.20	2.47	12.272

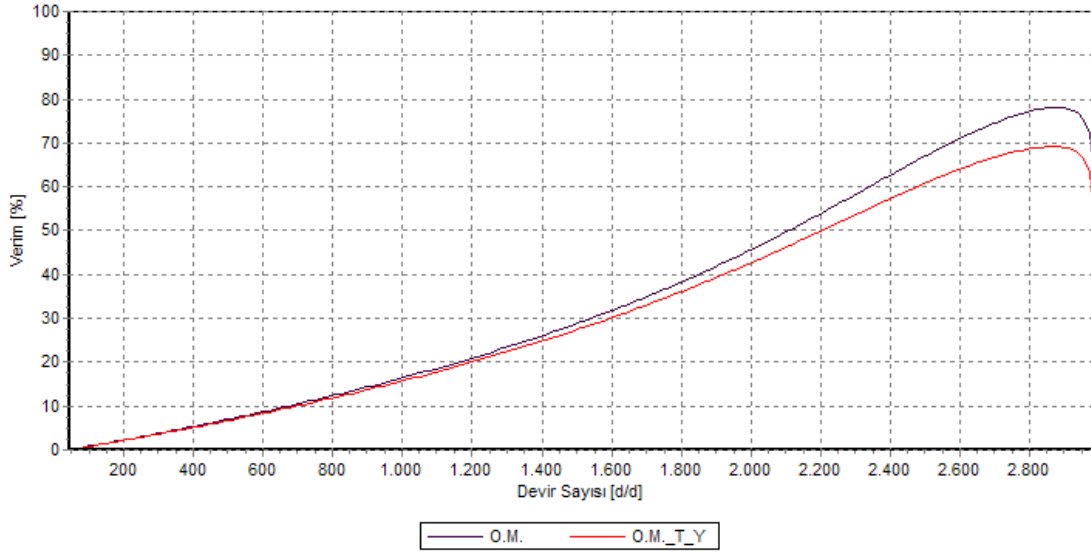
Tablo 4.5 ve Şekil 4.4 ile 4.6 incelendiğinde 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motorun stator ve rotor dişlerine yarık uygulanması durumunda diş

genişlik değerlerinin azalmasına bağlı olarak dişlerde doymaların arttığı görülmektedir. Bu artış stator dişlerinde % 17.098 iken rotor dişlerinde ise % 12.272 oranındadır. Bu durum stator ve rotor diş kayıplarının artmasına ve performansın kötüleşmesine sebep olmaktadır.

Şekil 4.7 ve 4.8’ de orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin devir sayısı-moment ve devir sayısı-verim eğrileri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde yarıklı yapıdaki motor modelinden elde edilen değerlerin orijinal motor modeline göre daha kötü bir performansa sahip olduğu görülmektedir.

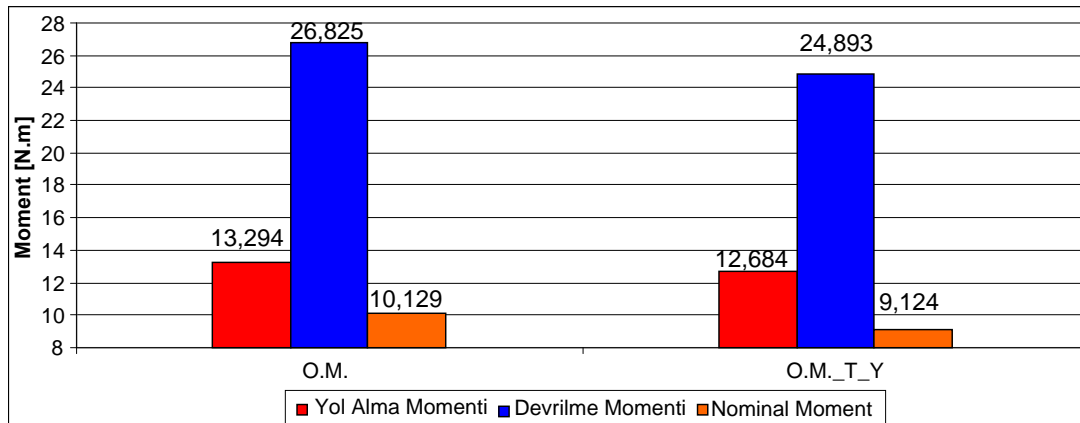


Şekil 4.7. Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment eğrileri

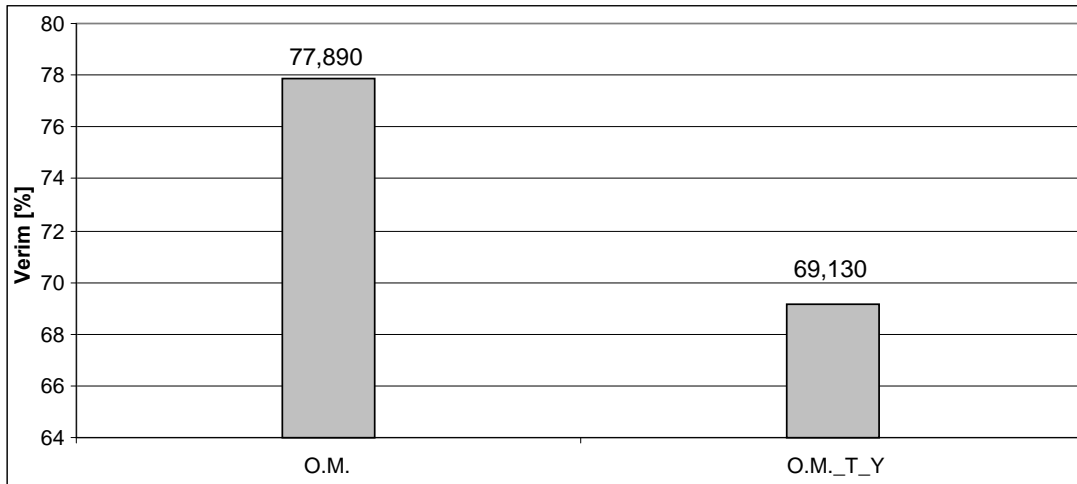


Şekil 4.8. Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin verim eğrileri

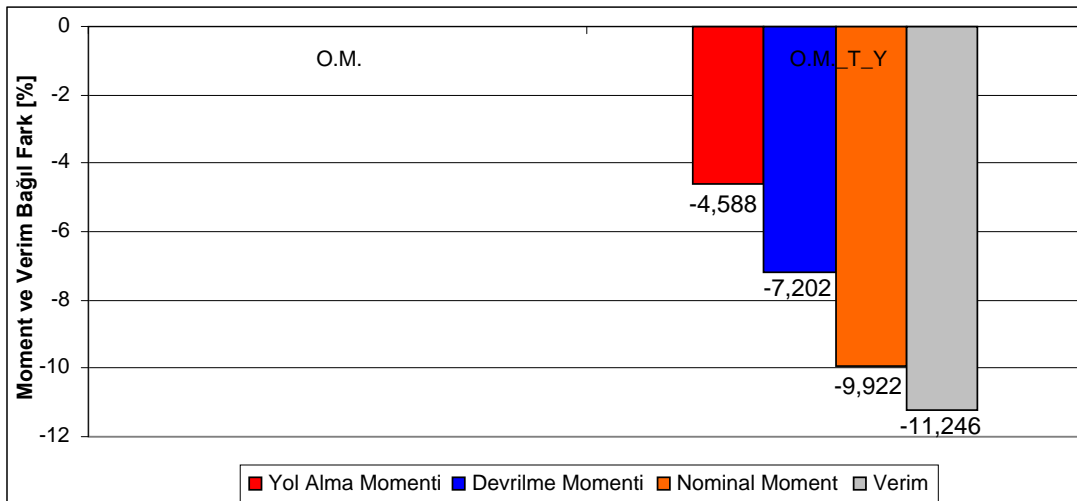
Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11’ de orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motorun sırasıyla moment, verim ve bağıl fark değerleri sırasıyla verilmiştir. Elde edilen her üç moment içinde hem statorunda hem de rotorunda yarık bulunan motorun, orijinal motordan daha kötü sonuçlar verdiği görülmektedir. Aynı şekilde elde edilen verim değerinin dişlerdeki manyetik akı yoğunluğu değerinin artmasına bağlı olarak % 11.246 oranında azalma gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.9. Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment değerleri



Şekil 4.10. Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin verim değerleri



Şekil 4.11. Orijinal motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment ve verim bağlı fark değerleri

## 4.2. Referans Motorun Tasarımı

Orijinal motor ve yarıklı yapıdaki motor modellerinden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında motorun bu tasarımlar ile istenilen performans değerlerine ulaşamayacağı görülmektedir. Bu nedenle orijinal motor modeli üzerinde değişiklik yapma ihtiyacı doğmuştur. Orijinal motorun stator iç çapı artırılarak yeni motor modelleri oluşturulmuştur. Burada amaç stator iç çapını artırarak stator ve rotor dış genişliklerini artırmak ve dişlerde meydana gelen doymaların önüne geçmektir. Ayrıca stator iç çapının en uygun değerde seçilmesi ile uygulanacak yarıklı yapıdaki

modellerde tekrardan doyma oluşmasının önüne geçilmesi ve performans artırımı amaçlanmaktadır.

Bu doğrultuda orijinal motorun stator iç çapı 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm ve 6 mm artırılarak 6 yeni model oluşturulmuştur. Tasarımı yeniden yapılan motorların stator ve rotor oluk geometrilerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Dış çap, mil çapı, hava aralığı uzunluğu ve paket boyu gibi değerler de sabit tutulmuştur. Ayrıca oluşturulan yeni modellerde stator ve rotor dişlerinde herhangi bir yarık kullanılmamıştır.

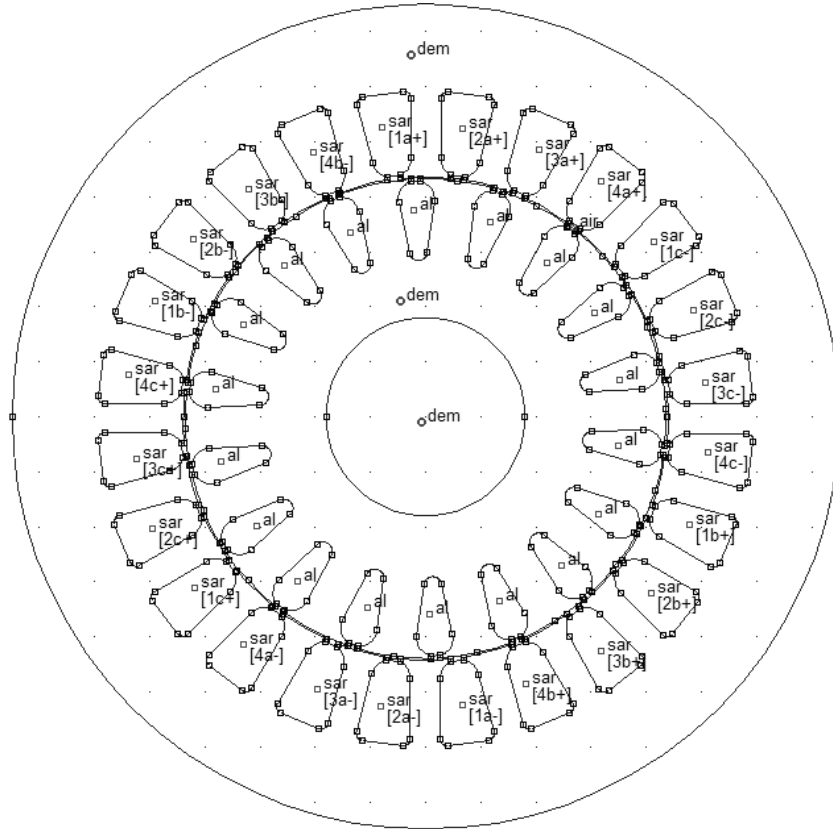
Yapılan analizler sonucunda en iyi performans değerlerini veren motor modeli stator iç çapı 4 mm artırılmış olan motor modeli olarak tespit edilmiştir. Bu yüzden stator iç çapı 4 mm artırılmış olan motor modelinin sonuçları detaylıca; diğer modellerin (+1mm, +2mm, +3mm, +5mm ve +6mm) sonuçları ise sadece grafik ve tablolar ile verilecektir.

Stator iç çapının değiştirilmesi ile stator ve rotor dış genişlikleri ile boyunduruk yükseklik değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu parametrelerin değişim miktarları +4mm' lik motor modeli için Tablo 4.6' da verilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere stator iç çapı artırıldıkça stator ve rotor dış genişlikleri orijinal motora göre sırasıyla % 19.259 ve % 23.450 oranlarında artarken, stator boyunduruk yüksekliğinde % 20.512 azalma, rotor boyunduruk yüksekliğinde ise % 58.737 oranında artma meydana gelmektedir.

Tablo 4.6. +4mm motor modelinin dış genişliği ve boyunduruk yüksekliği sonuçları

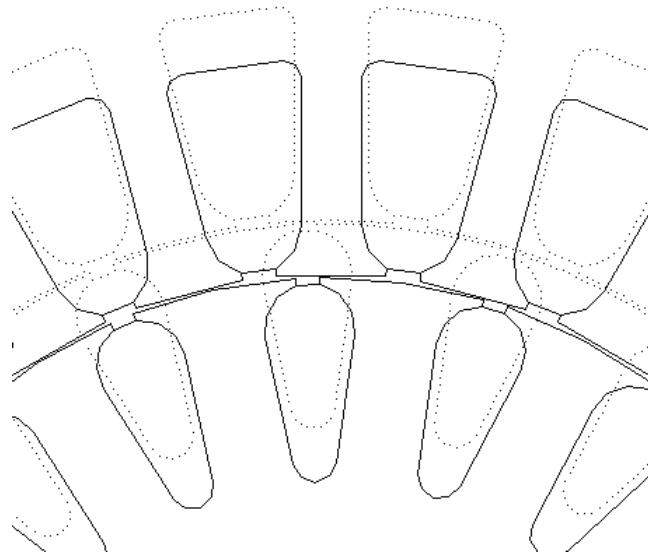
Motor Parametreleri	Sembol	Orijinal Motor [mm]	+4mm Motor [mm]	Bağlı Fark [%]
Stator Dış Genişliği	$b_{ts}$	4.36	5.40	19.259
Stator Boyunduruk Yüksekliği	$h_{cs}$	19.50	15.50	-20.512
Rotor Dış Genişliği	$b_{tr}$	5.97	7.37	23.450
Rotor Boyunduruk Yüksekliği	$h_{cr}$	6.81	10.81	58.737

Stator iç çapı 4 mm artırılan motor modelinin kesiti Şekil 4.12' de verilmiştir. Diğer stator iç çapı artırılmış motor modellerinin kesit şekilleri Ek D' de verilmiştir.



Şekil 4.12. Yeni tasarlanan +4mm' lik motor modelinin 2 boyutlu kesiti

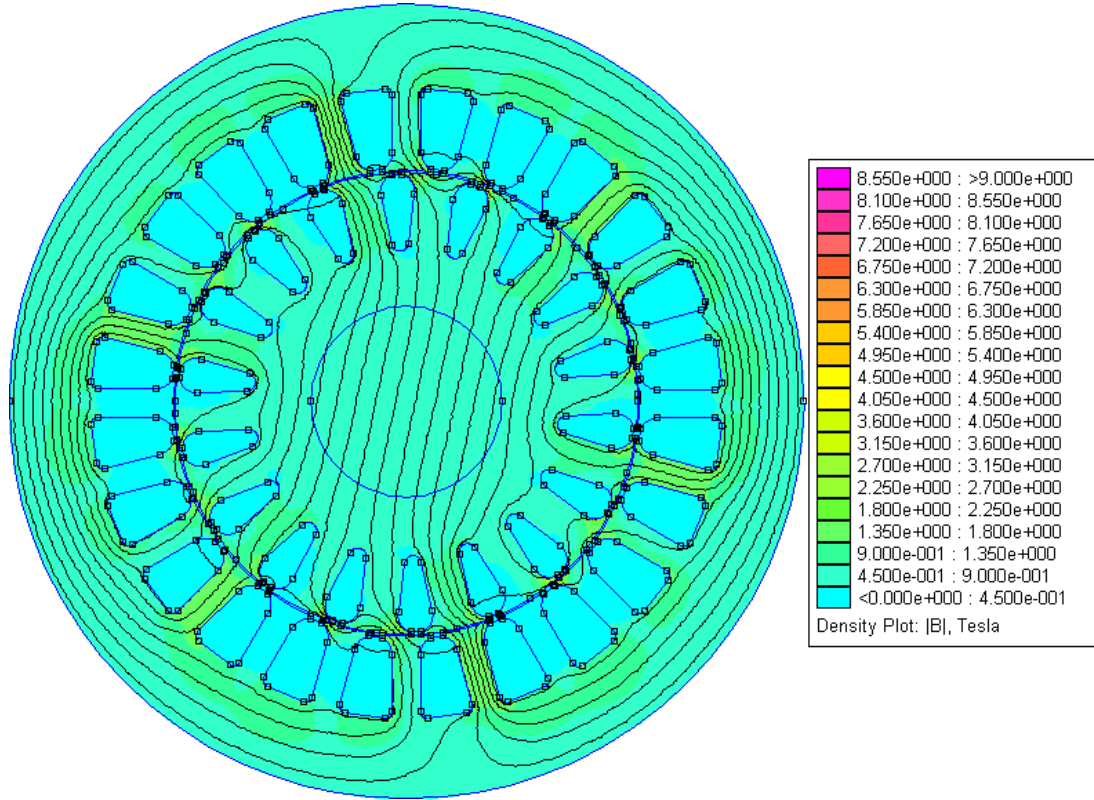
Şekil 4.13' de orijinal motor ve +4mm' lik motorların stator ve rotor dişlerinde meydana gelen farklılıkları görebilmek amacıyla oluk yapılarının detaylı çizimleri verilmiştir. Burada düz çizgiler orijinal motor modelini, noktalı çizgiler +4mm' lik motor modelini göstermektedir.



Şekil 4.13. Orijinal ve +4mm' lik motor modellerinin oluk yapılarının detaylı gösterimi



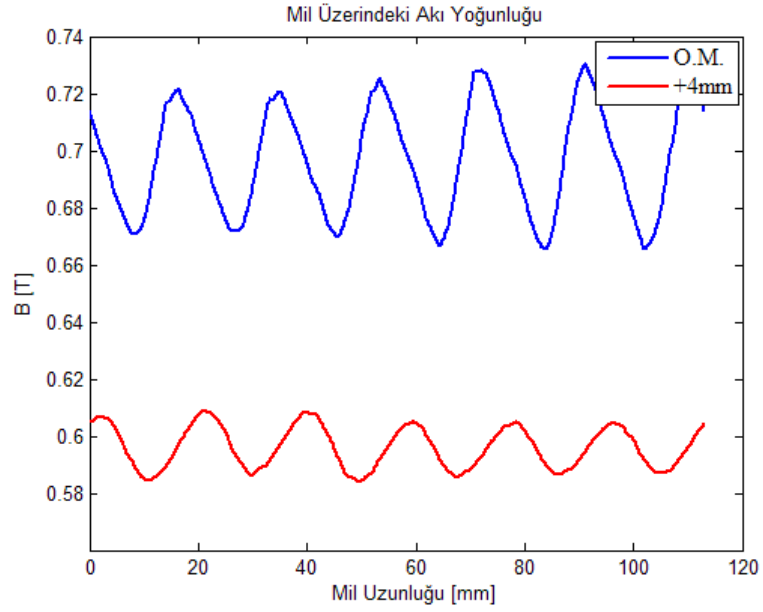
Şekil 4.14’ de +4mm motor modelinin manyetik alan dağılım grafiği verilmiştir. Alan dağılımı nominal kayma değerinde elde edilmiştir. Diğer stator iç çapı artırılmış motor modellerinin alan dağılımları ise Ek E’ de verilmiştir.



Şekil 4.14. +4mm motor modelinin alan dağılımı

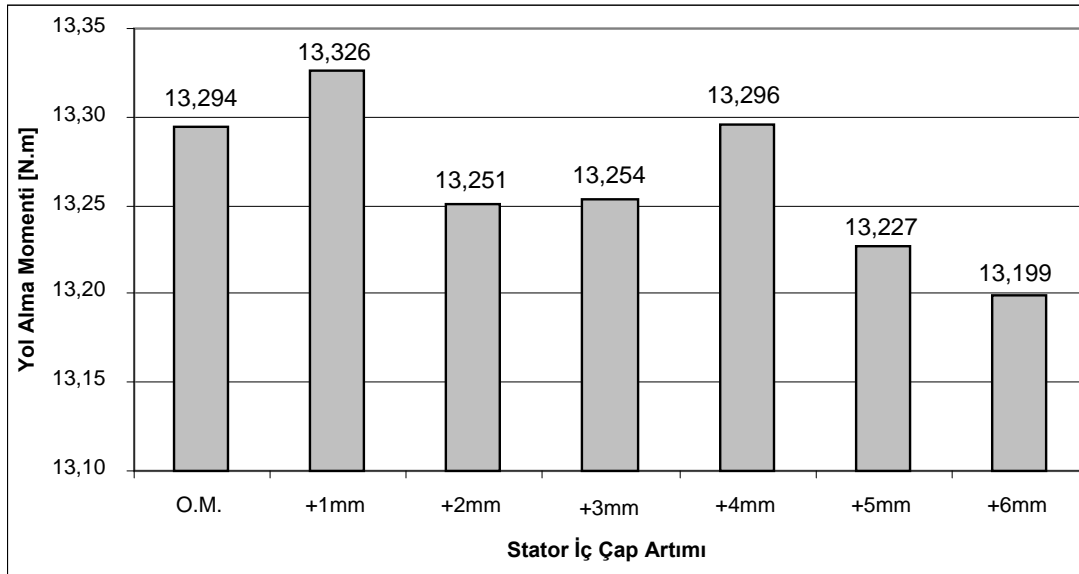
+4mm motor modelinde dış genişliği arttığı için stator dışlarındaki doymalar orijinal motora göre azalmakta; fakat stator boyunduruk yüksekliği küçüldüğü için, bu kısımlardaki doyma miktarı orijinal motora göre bir miktar artış göstermektedir. Benzetimler bu artışın performansı etkilemediğini tam tersine stator boyunduruk ağırlığında belli bir miktarda azalma meydana gelmiş olmasından dolayı stator boyunduruk kayıplarında önemli bir oranda azalmaya neden olduğunu göstermiştir.

Şekil 4.15’ de görüldüğü gibi +4mm motorun rotor boyunduruk yüksekliği arttığı için mil üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun orijinal motora göre azaldığı görülmektedir. Orijinal motor modelinde mil üzerindeki manyetik akı yoğunluğu ortalama 0.7 T iken, +4mm motor modelinde bu değer 0.6 T civarında elde edilmiştir.

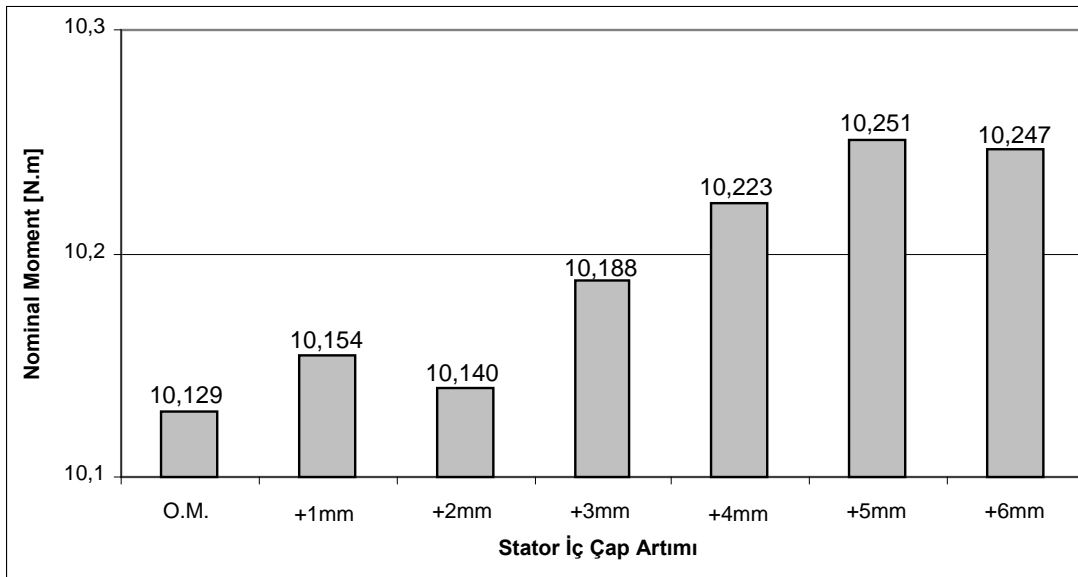


Şekil 4.15. Orijinal ve +4mm motor modellerinin mil üzerindeki akı yoğunluğu dağılımları

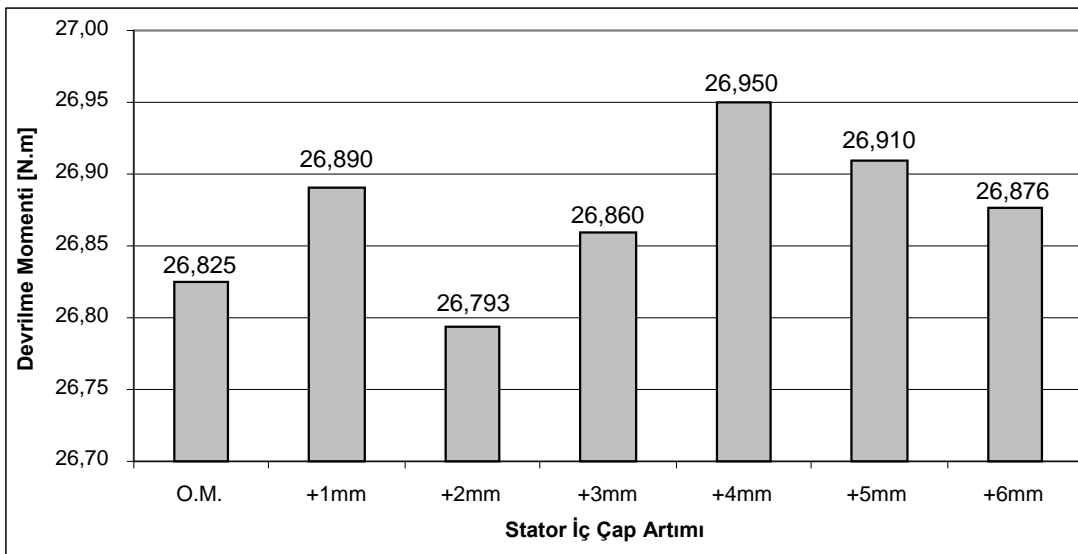
Şekil 4.16 – Şekil 4.19’ da, tasarlanan bütün motor modellerine ilişkin; yol alma momenti, devrilme momenti, nominal moment ve verim grafikleri verilmiştir.



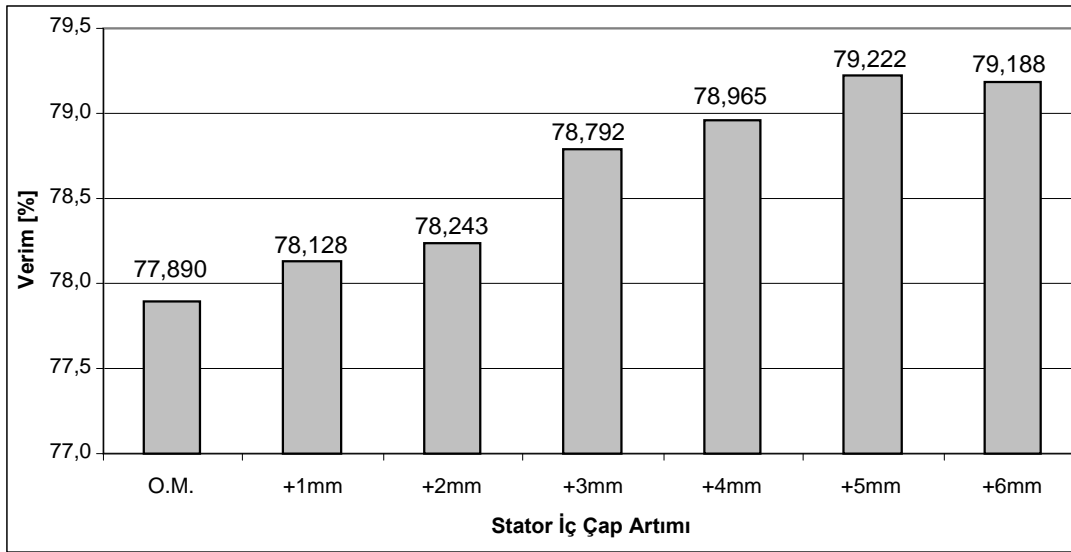
Şekil 4.16. Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin yol alma momenti değerleri



Şekil 4.17. Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin nominal moment değerleri



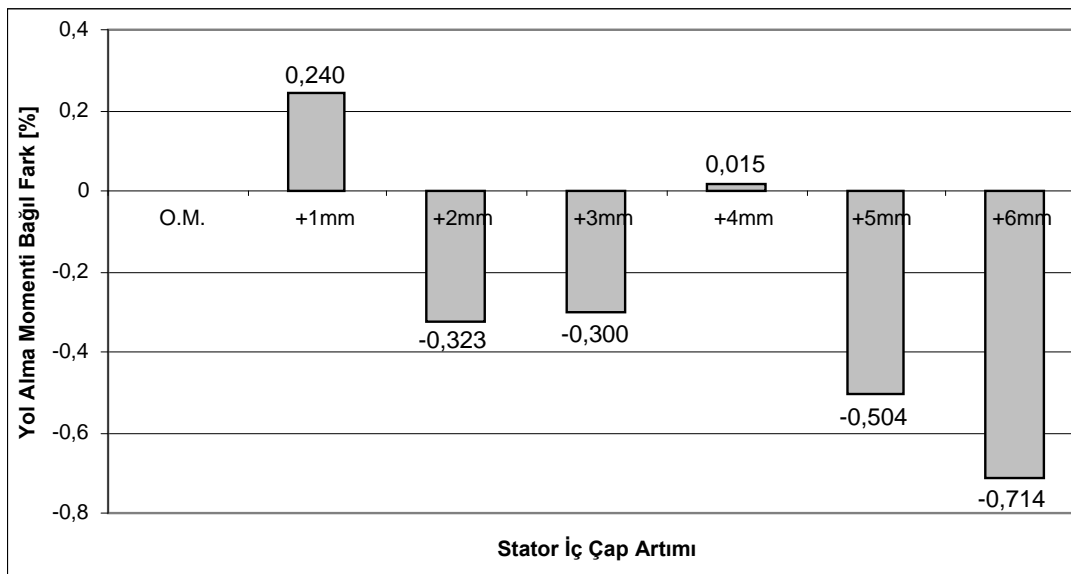
Şekil 4.18. Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin devrilme momenti değerleri



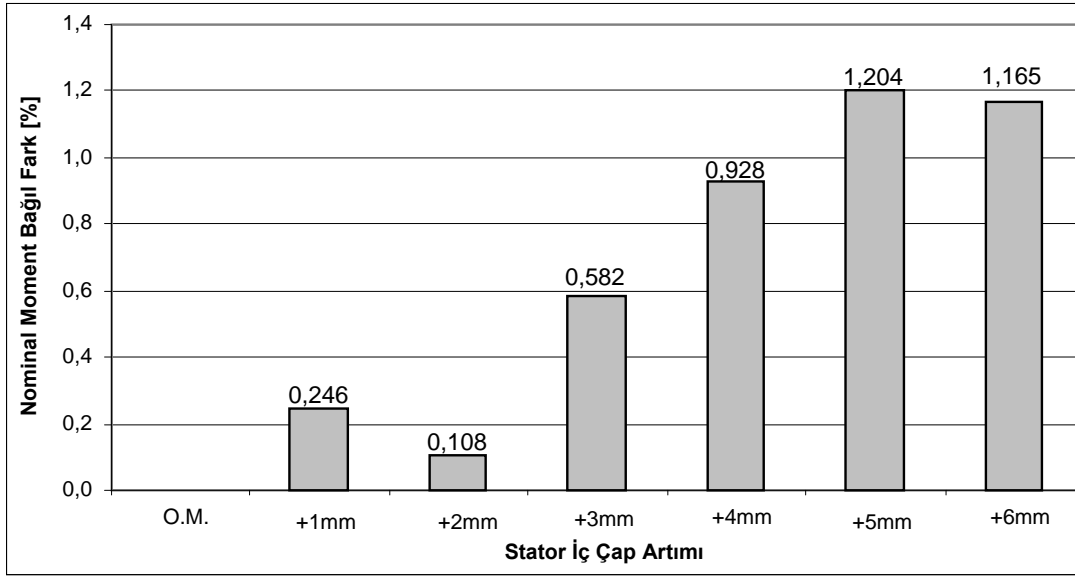
Şekil 4.19. Stator iç çapı değiştirilen yarısız motor modellerinin verim değerleri

Şekiller incelendiğinde verim değerinin stator iç çapı artırıldığı sürece belli bir iç çap değerine kadar arttığı görülmektedir. Burada en yüksek verim değeri +5mm motor modelinden elde edilmiş, bu iç çap değerinden sonra verim değerinde bir azalma görülmüştür. Elde edilen nominal moment değerlerinde de yaklaşık olarak aynı grafik elde edilmiştir.

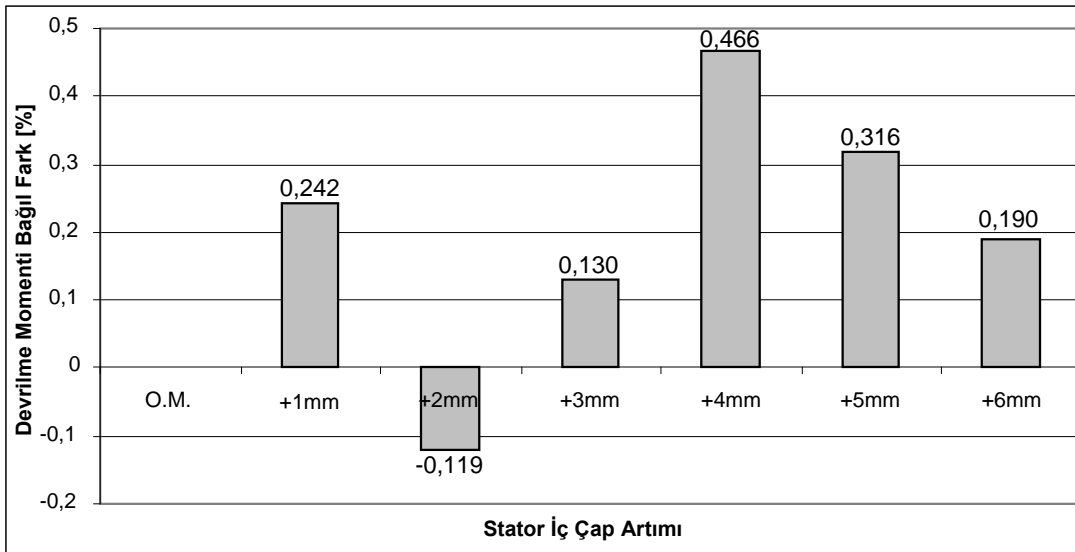
Tasarımlara ilişkin yol alma momenti, nominal moment ve devrilme momenti ile verim sonuçlarındaki bağıl değişimler ise Şekil 4.20 – 4.23’ de verilmiştir.



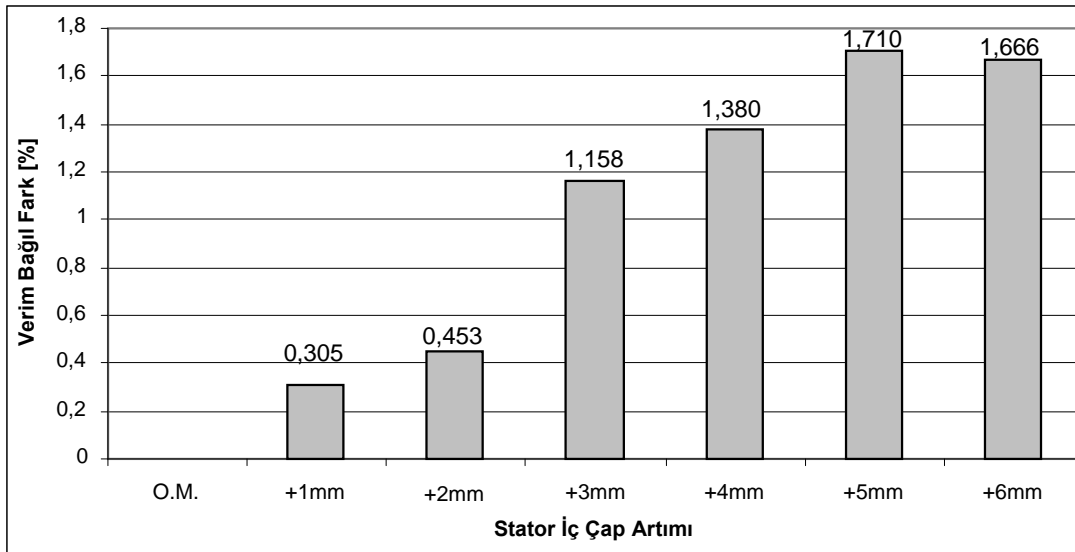
Şekil 4.20. Stator iç çapı değiştirilen yarısız motor modellerinin bağıl yol alma momenti değişimleri



Şekil 4.21. Stator iç çapı değiştirilen yarısız motor modellerinde bağıl nominal moment değişimleri

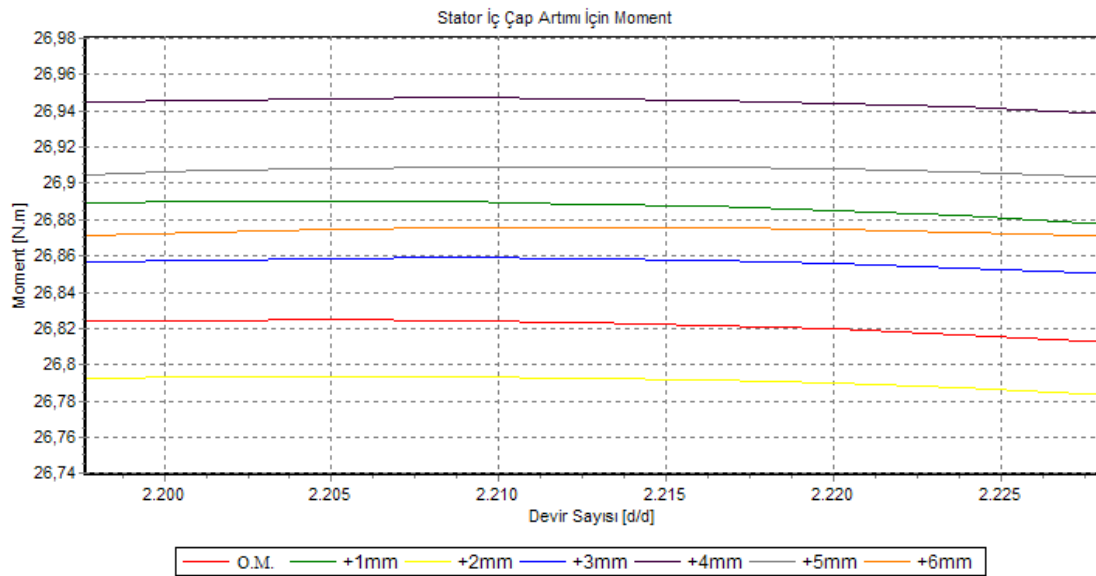


Şekil 4.22. Stator iç çapı değiştirilen yarısız motor modelleri için devrilme momenti bağıl değişimleri



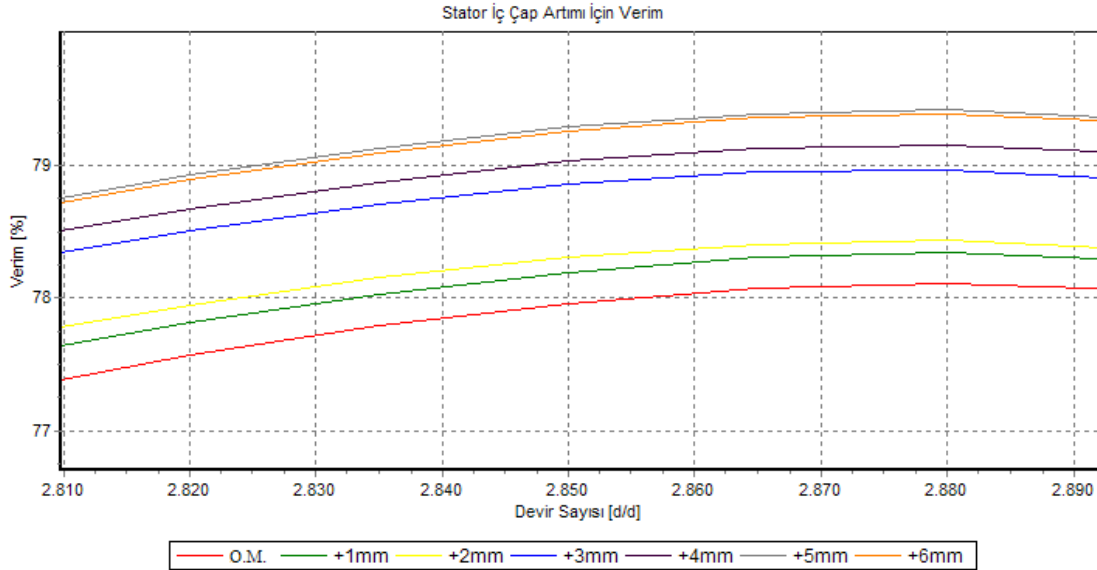
Şekil 4.23. Stator iç çapı değiştirilen yarısız motor modellerindeki bağıl verim değişimleri

Benzetimi yapılan tasarımlara ilişkin devir sayısı-moment değişimlerinin devrilme noktası civarındaki yakınlştırılmış görüntüsü Şekil 4.24' de verilmiştir.



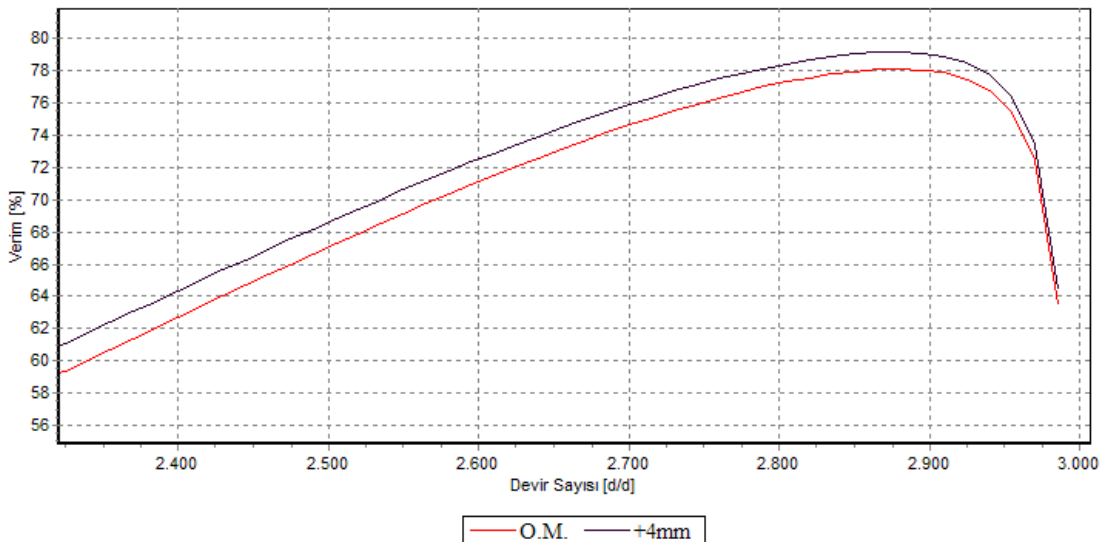
Şekil 4.24. Stator iç çapı değiştirilen yarısız motor modellerinin devrilme noktası civarındaki devir sayısı-moment eğrileri

Benzetimi yapılan tasarımlara ilişkin verim değişimlerinin, nominal hız civarındaki yakınlaştırılmış görüntüsü ise Şekil 4.25’ de verilmiştir.



Şekil 4.25. Stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin nominal hız civarındaki devir sayısı-verim eğrileri

Şekil 4.26’ da ise sadece orijinal ve +4mm motor modellerinin devir sayısı-verim eğrilerinin detaylı gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.26. Orijinal ve +4mm motor modellerinin devir sayısı-verim eğrileri

Tablo 4.7’ de orijinal motor modelinin ve stator iç çapı değiştirilen altı motor modelinin verim değerleri ve orijinal motor modeli referans alınarak hesaplanan

bağıl fark değerleri verilmiştir. Tablo 4.8’ de ise moment değerleri ve yine orijinal motor modeli referans alınarak bulunan bağıl fark değerleri verilmiştir. Elde edilen bu değerler, F.E.M.M. programından alınan analiz sonuçlarının Ek A’ da verilen Delphi ve Ek B’ de verilen Matlab kodları yardımı ile bulunmuştur.

Tablo 4.7. Orijinal ve stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin verim ve bağıl fark değerleri

Motor Modeli	Verim [%]	Bağıl Fark [%]
O.M.	77.890	
+1mm	78.128	0.305
+2mm	78.243	0.453
+3mm	78.792	1.158
+4mm	78.965	1.380
+5mm	79.222	1.710
+6mm	79.188	1.666

Tablo 4.8. Orijinal ve stator iç çapı değiştirilen yarıksız motor modellerinin moment ve bağıl fark değerleri

Motor Modeli	Yol Alma Momenti [N.m]	Bağıl Fark [%]	Devrilme Momenti [N.m]	Bağıl Fark [%]	Nominal Moment [N.m]	Bağıl Fark [%]
O.M.	13.294		26.825		10.129	
+1mm	13.326	0.240	26.890	0.242	10.154	0.246
+2mm	13.251	-0.323	26.793	-0.119	10.140	0.108
+3mm	13.254	-0.300	26.860	0.130	10.188	0.582
+4mm	13.296	0.015	26.950	0.465	10.223	0.928
+5mm	13.227	-0.503	26.910	0.316	10.251	1.204
+6mm	13.199	-0.714	26.876	0.190	10.247	1.164

Stator iç çapının artırılması ile motor performansının ve verimin arttığı görülmektedir. Stator iç çapı +5mm olan motor modelinde verim en yüksek değerde iken +6mm motor modelinde verim değerinin azalma gösterdiği görülmektedir. İç çap arttıkça stator ve rotor dış genişlik değerlerinin genişlemesine bağlı olarak bu kısımlardaki doymalar azalmıştır. Burada dikkat edilecek husus +5mm ve +6mm motor modelleri için bazı performanslarda (nominal moment, verim) iyileşme meydana gelirken, bazılarında (yol alma momenti, devrilme momenti, reaktif güç, nominal akım) ise performans kötüleşmektedir. Ayrıca stator boyunduruk kısmında diğer motor modellerine göre daha fazla doymalar meydana gelmektedir. Yarıklı tasarımları denemeden önce, orijinal motorun iyileştirilmesi açısından farklı stator iç



çapları için yapılan bu ön tasarımlar, tüm performans göstergeleri dikkate alındığında ve boyunduruk kısmında meydana gelen doymalardan etkilenmemek için +4mm olan motor modelinin bundan sonra yapılacak modellemelerde kullanılabilen en uygun motor modeli olduğu görülmüştür.

Tablo 4.9’ da orijinal ve +4mm motor modellerinin nominal çalışma noktasındaki değerleri ve orijinal motor modeline göre bağıl fark değerleri verilmiştir. Elde edilen bu değerler F.E.M.M. programı analizleri sonucunda bulunmuştur.

Tablo 4.9. Orijinal ve +4mm motor modellerinin nominal çalışma noktasındaki değerleri ve bağıl fark değerleri

<b>Motor Parametreleri</b>	<b>Orijinal Motor</b>	<b>+4mm Motor</b>	<b>Bağıl Fark [%]</b>
Giriş Gücü [W]	3850.3	3837.6	-0.329
Çıkış Gücü [W]	2999.2	3030.0	1.026
Verim [%]	77.890	78.965	1.380
Nominal Akım [A]	6.673	6.645	-0.419
Güç Faktörü	0.874	0.875	0.114
Nominal Moment [N.m]	10.129	10.223	0.928

Elde edilen sonuçlara göre stator iç çapı 4 mm artırılan motor modeli hem nominal moment hem de verim değerlerinde orijinal motor modeline göre sırasıyla % 0.928 ve % 1.380 oranlarında bir artış göstermiştir.

Tablo 4.10’ da ise orijinal ve +4mm motor modellerinin kayıp güç ve orijinal motor modeline göre bağıl fark değerleri verilmiştir.

Tablo 4.10. Orijinal ve +4mm motor modellerinin kayıp güç ve bağıl fark değerleri

<b>Motor Parametreleri</b>	<b>Orijinal Motor [W]</b>	<b>+4mm Motor [W]</b>	<b>Bağıl Fark [%]</b>
Stator Bakır Kayıpları	165.006	164.388	-0.375
Rotor Bakır Kayıpları	164.513	162.834	-1.023
Stator Dış Kayıpları	106.735	95.507	-10.519
Stator Boyunduruk Kayıpları	286.417	260.776	-8.952
Rotor Dış Kayıpları	2.901	1.903	-34.401
Pulzasyon Kayıpları	5.272	3.766	28.566
İlave Yük Kayıpları	30.156	28.426	-5.736
Sürtünme-Vantilasyon Kayıpları	90	90	-----
Toplam Kayıplar	851.0	807.6	-5.099

Tablo 4.11’ de orijinal ve +4mm motor modellerinden elde edilen nüve ağırlık değerleri ve bağıl fark değerleri verilmiştir.

Tablo 4.11. Orijinal ve +4mm motor modellerinin nüve ağırlık ve bağıl fark değerleri

<b>Motor Parametreleri</b>	<b>Orijinal Motor [Kg]</b>	<b>+4mm Motor [Kg]</b>	<b>Bağıl Fark [%]</b>
Stator Diş Ağırlığı	1.8563	2.2990	23.848
Stator Boyunduruk Ağırlığı	8.2887	6.7904	-18.076
Rotor Diş Ağırlığı	2.1558	2.6545	23.132
Toplam Ağırlık	12.3008	11.7439	-4.527

Stator boyunduruk yüksekliğinin azalmasına bağlı olarak stator boyunduruk ağırlığı % 18.076 oranında azalmıştır. Bu nedenle stator boyunduruk kayıpları % 8.952 oranında azalmıştır. Rotor boyunduruk yüksekliğinin artmış olmasına rağmen, rotor boyunduruk kayıpları frekansın küçük olması sebebiyle fazla değişim göstermemiştir. Stator diş ağırlığı, diş genişliğinin artmasından dolayı % 23.848 oranında artmış, fakat +4mm motorun dişlerinde meydana gelen doymaların azalmasına bağlı olarak stator diş kayıpları % 10.519 azalmıştır. Toplam kayıplarda ise +4mm motor modeli, orijinal motor modeline göre % 5.099 oranında bir azalma göstermiştir. Stator ve rotor bakır kayıplarında ise oluk ve sargı yapısı ile ilgili herhangi bir değişiklik yapılmadığı için bu kayıplarda fazla bir değişim meydana gelmemiştir.

Bu bölümde iyileştirme ve üzerinde yeni tasarımlar deneme amaçlı ele alınan orijinal motorun tasarımının tekrardan gözden geçirilmesi gerekmiş ve tüm performans göstergeleri dikkate alındığında, 4 mm stator iç çapı artırılan motor modelinin en uygun olduğu görülmüştür. Bölüm 5’ de verilecek olan modellerde +4mm motor modeli referans motor (R.M.) olarak adlandırılacak ve önerilen yarıklı motor modellerinde +4mm motor modeli kullanılacaktır.

## **BÖLÜM 5. ÖNERİLEN YARIKLI MOTOR MODELLERİ VE ANALİZ SONUÇLARI**

Bu kısımda yarıklı yapıya sahip motor modellerinin kesitleri ve elde edilen sonuçlar verilecektir. Bölüm 4' de anlatılan sebeplerden dolayı +4mm' lik motor modeli seçilerek bundan sonra yapılacak analizlerde referans motor (R.M.) adı kullanılarak karşılaştırmalar gerçekleştirilecektir. Ayrıca yarık derinliğinin ve yarık genişliğinin motor performansına nasıl etki ettiği, yarık derinliğinin ve genişliğinin minimum ve maksimum değerlerinin neler olduğu belirtilecektir. Referans motor modeli ve en iyi performans değerlerini veren yarıklı motor karşılaştırılacaktır. Her iki motor modelinden elde edilen nominal noktadaki işletme değerleri, kayıp güç değerleri, performans grafikleri yine bu bölümde verilecektir.

Asenkron motorda rotor tepkisi ile manyetik akı azalmasını ve beraberinde performansı bozan kaçak akı, kayıp artışı-verim düşüşü gibi önemli etkileri daha yüksek kaliteli sac kullanmadan azaltmak için yeni bir diş geometrisi önerilmektedir. Önerilen geometrik tasarım ile rotor tepkisinin azalacağı, faydalı akının artacağı ve çalışma performansın iyileşeceği tahmin edilmektedir.

Bu bölümde anlatılan modellerin hem stator hem de rotor kısımlarına yarık uygulanmıştır. Oluşturulan modellerde yarık derinliği 6.25 mm, 7.5 mm, 11.25 mm, 13.125 mm, 15 mm, 16.875 mm, 18.75 mm, 19.6 mm, 21 mm ve 23 mm olarak belirlenmiştir. Yarık genişliği ise 0.09 mm, 0.1 mm, 0.15 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm arasında değişen modeller yapılmıştır.

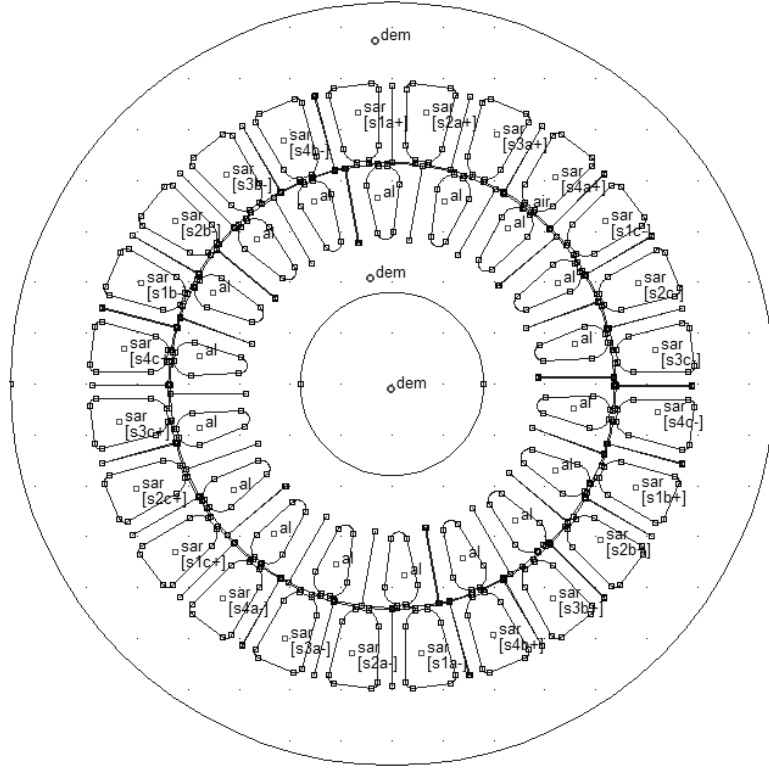
Ayrı ayrı her bir yarık derinliği için bütün yarık genişliklerinde modeller oluşturulmuştur. Burada amaç hangi yarık derinliği ve yarık genişliğinde motor performansının en iyi değerlerde olduğunu tespit etmektir. Bu doğrultuda oluşturulan 56 farklı tasarım üzerinden yapılan optimizasyon çalışması Tablo 5.1' de verilmiştir. Modellemesi yapılan farklı yarık genişliği ve derinliğindeki motor modelleri x işareti

ile belirtilmiştir. Oluşturulan motor modellerinde yarıklar referans motora uygulanmıştır.

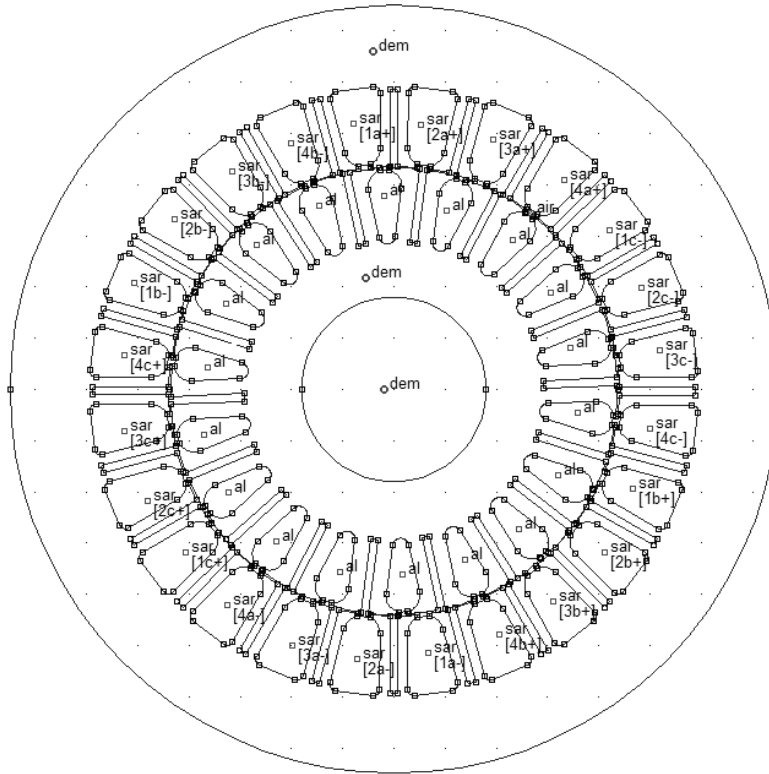
Tablo 5.1. Oluşturulan farklı yarık derinliğinde ve genişliğindeki motor modelleri

Yarık Genişliği [mm]	Yarık Derinliği [mm]									
	6.25	7.5	11.25	13.125	15	16.875	18.75	19.6	21	23
0.09		x	x	x	x	x	x			
0.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
0.15	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
0.25		x	x	x	x	x	x			
0.5		x	x	x	x	x	x			
1		x	x	x	x	x	x			
1.5		x	x	x	x	x	x			
2.5		x	x	x	x	x	x			

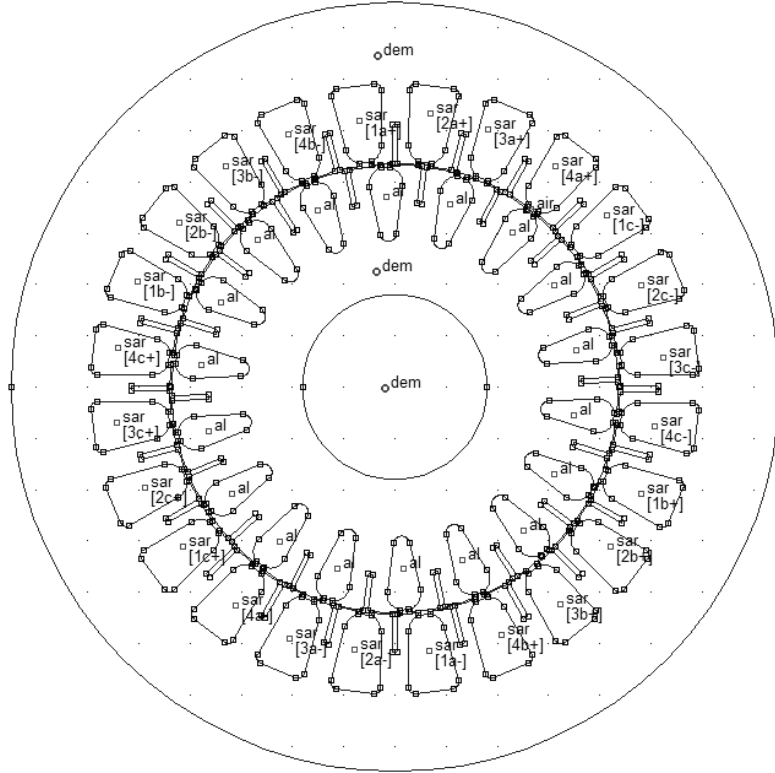
Oluşturulan yarıklı yapıdaki modellerden Şekil 5.1' de 15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modeli; Şekil 5.2' de yarık derinliği 15 mm ve yarık genişliği 1.5 mm olan modelin kesiti; Şekil 5.3' de 7.5 mm yarık derinliği ve 1 mm yarık genişliğine sahip motor modelinin kesiti; Şekil 5.4' de ise yarık derinliği 23 mm ve yarık genişliği 0.15 mm olan motor modelinin kesit şekli verilmiştir. Diğer motor modellerinin kesit şekilleri Ek D' de verilmiştir.



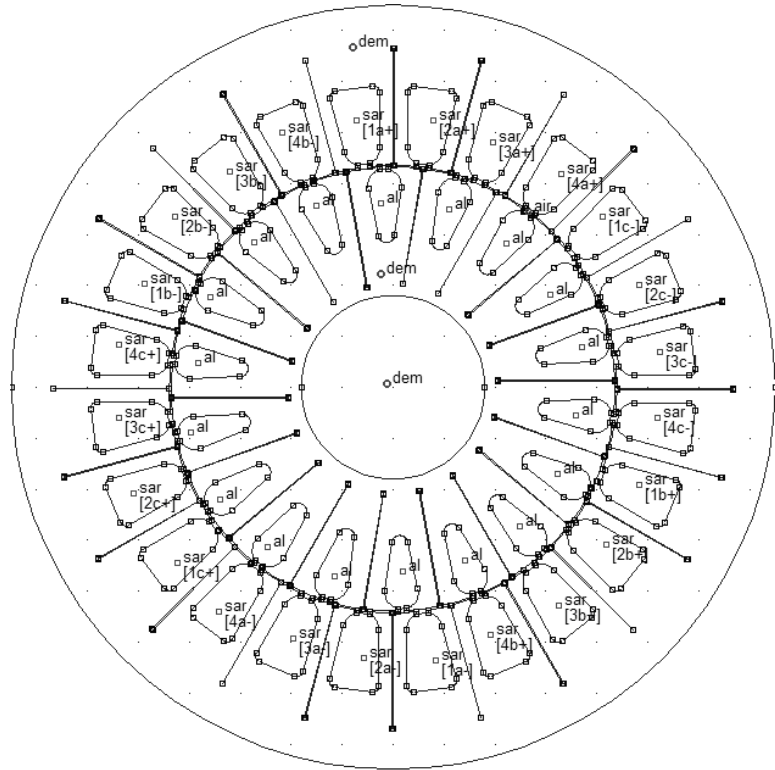
Şekil 5.1. 15 mm yarıkların derinliği ve 0.1 mm yarıkların genişliğindeki motor modeli



Şekil 5.2. 15 mm yarıkların derinliği ve 1.5 mm yarıkların genişliğindeki motor modeli



Şekil 5.3. 7.5 mm yarıık derinliği ve 1 mm yarıık genişliğindeki motor modeli

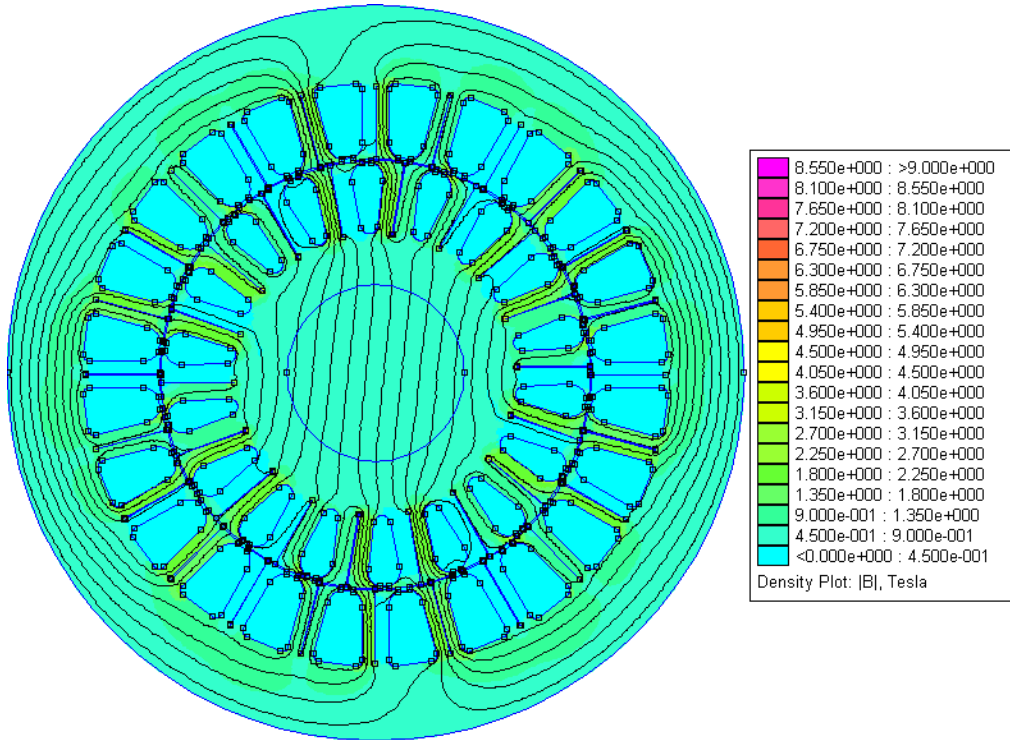


Şekil 5.4. 23 mm yarıık derinliği ve 0.15 mm yarıık genişliğindeki motor modeli

### 5.1. Optimum Yarık Genişliğinin Belirlenmesi ve Yarık Genişliğinin Motor Performansına Etkisi

Bu kısımda optimum yarık genişliğinin tespit edilebilmesi amacıyla analizler yapılmıştır. Yarık genişlik değerleri 0.09 mm, 0.1 mm, 0.15 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm olarak belirlenmiştir. Değişik yarık derinliğine sahip motor modellerine yukarıda belirtilen yarık genişlikleri uygulanmış ve optimum yarık genişliğinin hangi değerde olması halinde motor performansının iyileşeceği araştırılmıştır. Bu doğrultuda yarık derinliği 15 mm seçilerek değişik yarık genişliklerinde motor performansının değişimi incelenmiştir.

Şekil 5.5' de, Şekil 5.1' de kesit görüntüsü verilen yarık derinliği 15 mm ve yarık genişliği 0.1 mm olan motor modelinin alan dağılımı verilmiştir. Alan dağılımı nominal kayma değerinde çizdirilmiştir. Diğer yarık derinliği ve genişliğindeki motor modellerinin alan dağılımları ise Ek E' de verilmiştir.



Şekil 5.5. 15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı

Şekil 5.5 ve Ek E' de verilen alan dağılımları incelendiğinde yarık genişliği arttıkça dişlerde meydana gelen doymaların arttığı tespit edilmiştir. Özellikle yarık genişliği değerinin 0.25 mm ve daha büyük olması durumunda doymaların performansı büyük oranda etkileyecek kadar arttığı belirlenmiştir. Bu durum Tablo 5.2 ve 5.3' de açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5.2 ve 5.3' de 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için verim ve moment değerleri ile referans motor modeline göre bağıl fark değerleri verilmiştir. Bu değerler, F.E.M.M. programından alınan verilerin Ek A ve Ek B' de verilen yazılımların kullanılması ile elde edilmiştir.

Tablo 5.2. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için elde edilen verim ve bağıl fark değerleri

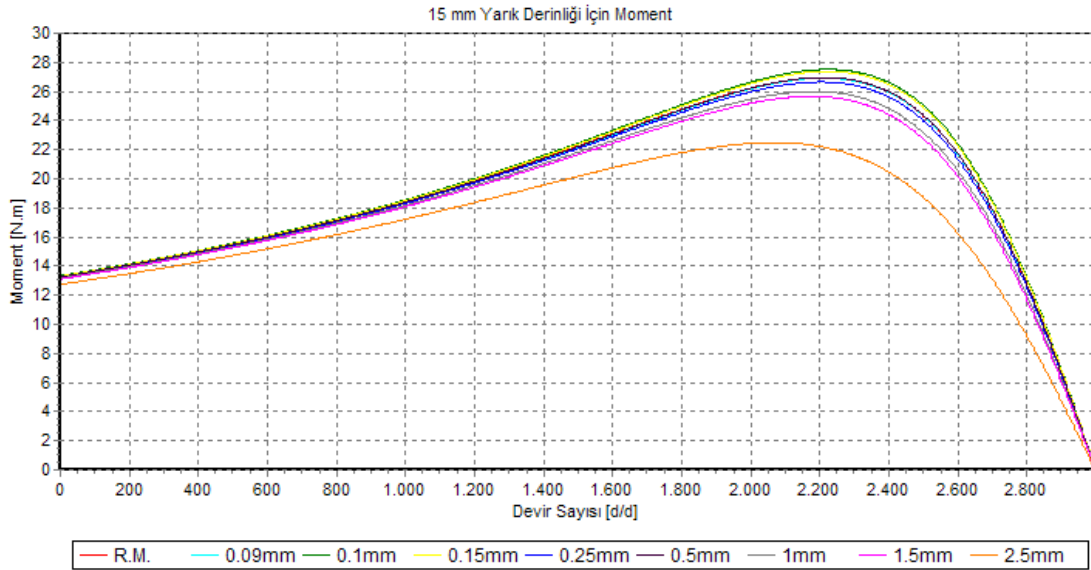
Motor Modeli	Verim [%]	Bağıl Fark [%]
R.M.	78.965	
0.09mm	78.218	-0.945
0.1mm	80.441	1.869
0.15mm	79.814	1.075
0.25mm	76.786	-2.758
0.5mm	78.269	-0.881
1mm	73.254	-7.232
1.5mm	71.662	-9.248
2.5mm	55.890	-29.221

Tablo 5.3. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için elde edilen moment ve bağıl fark değerleri

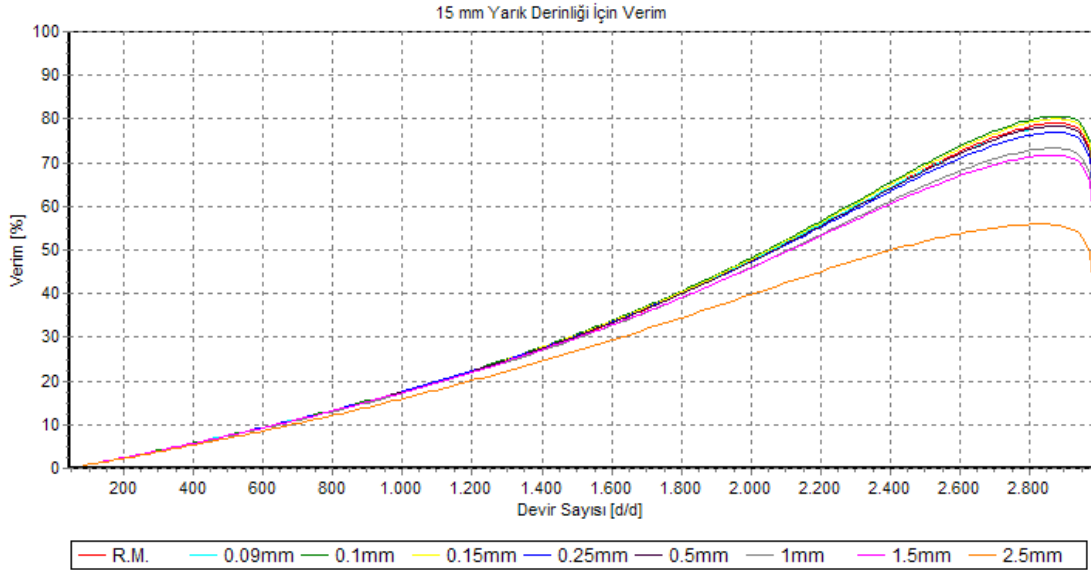
Motor Modeli	Yol Alma Momenti [N.m]	Bağıl Fark [%]	Devrilme Momenti [N.m]	Bağıl Fark [%]	Nominal Moment [N.m]	Bağıl Fark [%]
R.M.	13.296		26.950		10.223	
0.09mm	13.244	-0.391	26.915	-0.129	10.241	0.176
0.1mm	13.341	0.338	27.512	2.085	10.632	4.000
0.15mm	13.305	0.067	27.376	1.580	10.555	3.247
0.25mm	13.220	-0.571	26.653	-1.102	10.055	-1.643
0.5mm	13.263	-0.248	26.963	0.048	10.262	0.381
1mm	13.166	-0.977	26.006	-3.502	9.597	-6.123
1.5mm	13.114	-1.368	25.657	-4.797	9.372	-8.324
2.5mm	12.751	-4.098	22.488	-16.556	7.317	-28.426



Şekil 5.6 ve 5.7’ de 15 mm yarık derinliği için farklı yarık genişliklerinde elde edilen devir sayısı-moment ve devir sayısı-verim eğrileri verilmiştir.

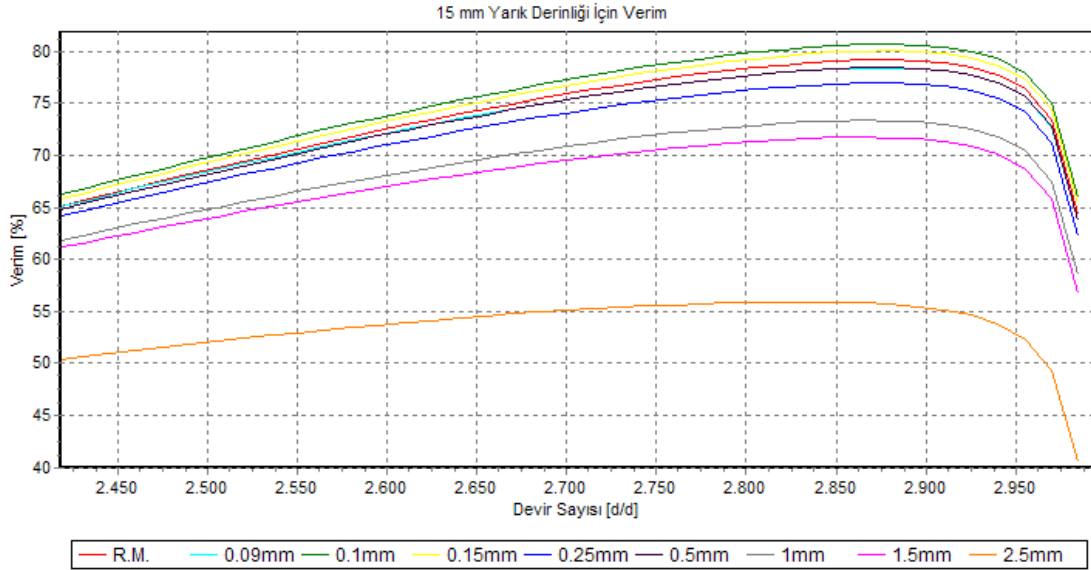


Şekil 5.6. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-moment eğrileri



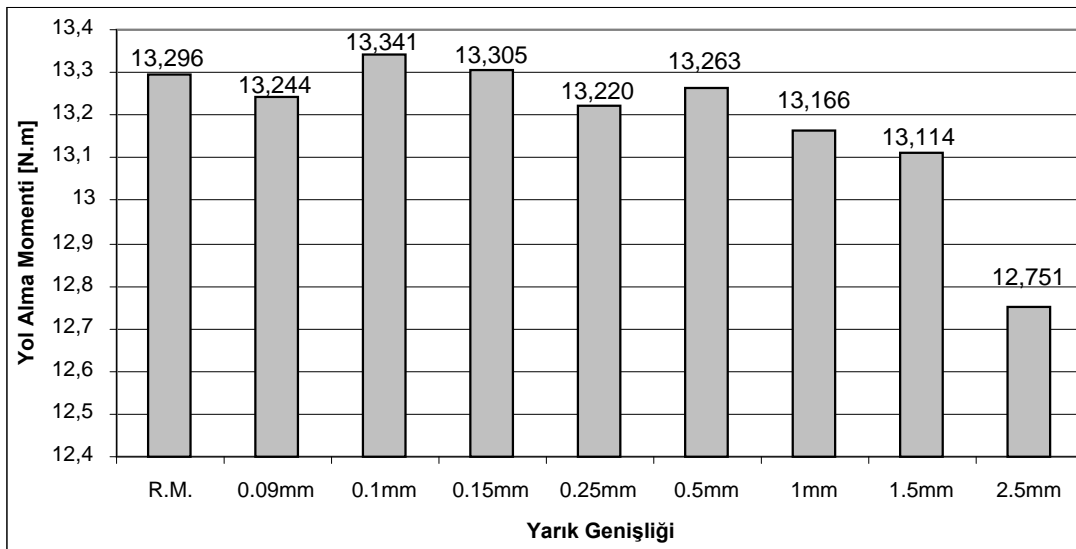
Şekil 5.7. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-verim eğrileri

Şekil 5.8’ de 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliğindeki motor modellerinin devir sayısı-verim eğrilerinin detaylı gösterimi verilmiştir.

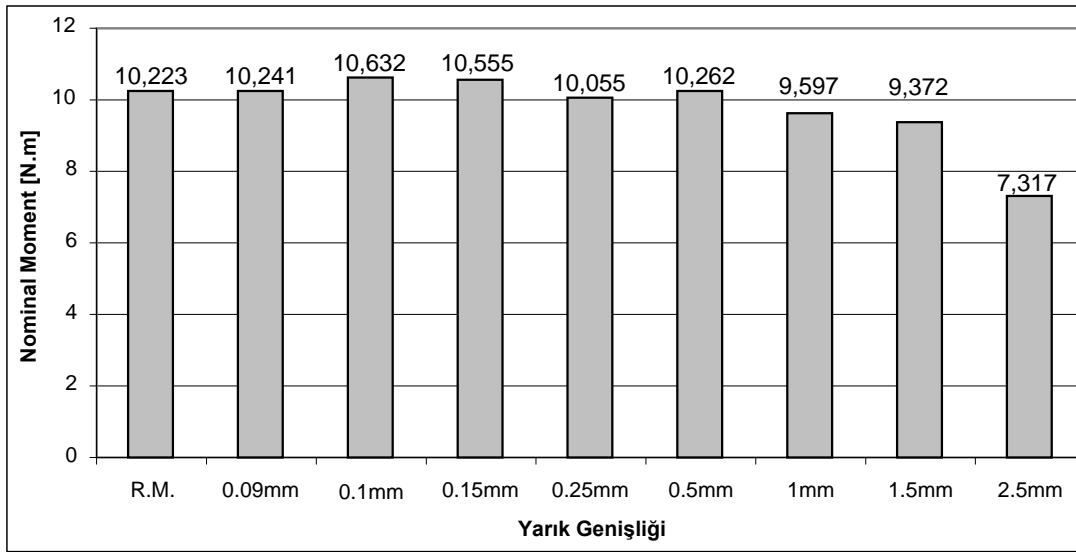


Şekil 5.8. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin devir sayısı-verim eğrilerinin detaylı gösterimi

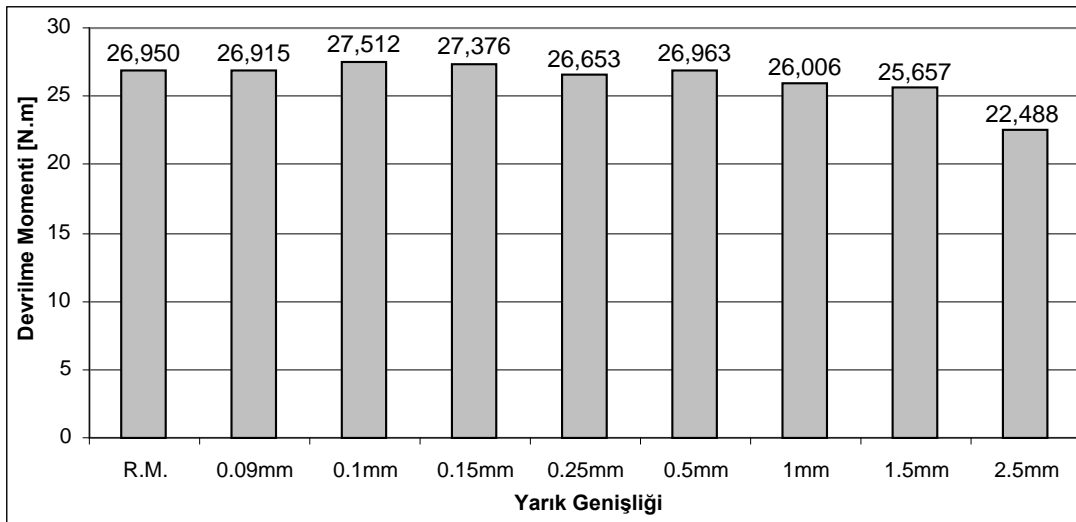
Şekil 5.9–5.12 arasında 15 mm yarık derinliğine sahip motor modelleri için farklı yarık genişlik değerlerine bağlı olarak çizdirilen moment ve verim grafikleri verilmiştir.



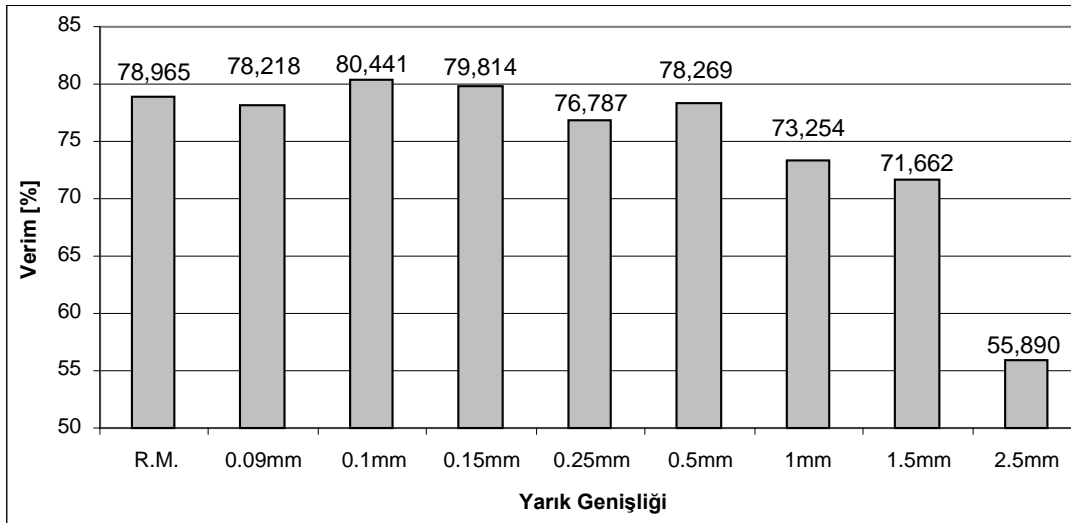
Şekil 5.9. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin yol alma momentleri değerleri



Şekil 5.10. 15 mm yarıkların derinliğinde farklı yarıkların genişliklerindeki motor modellerinin nominal moment değerleri



Şekil 5.11. 15 mm yarıkların derinliğinde farklı yarıkların genişliklerindeki motor modellerinin devrilme momenti değerleri

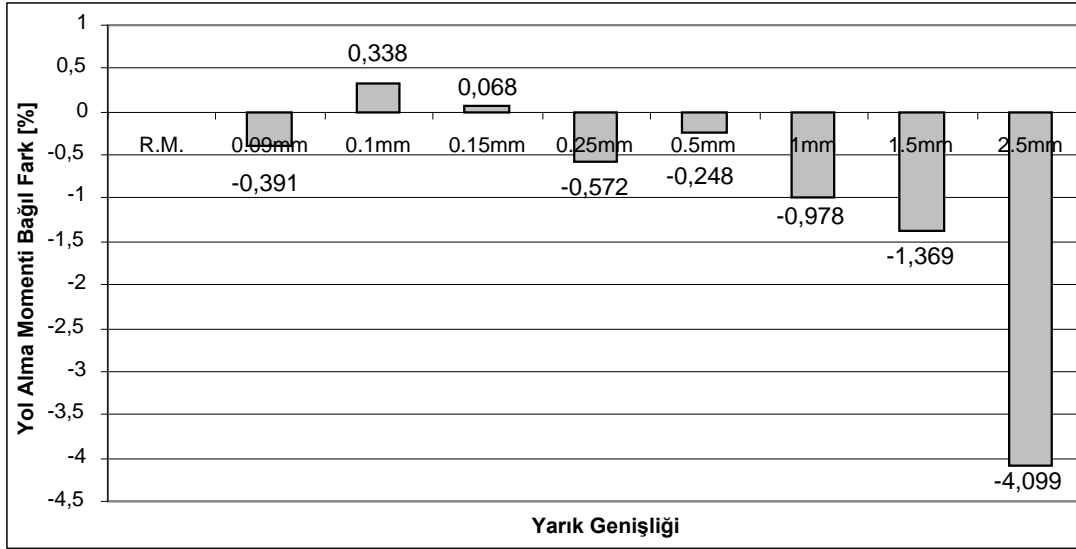


Şekil 5.12. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin verim değerleri

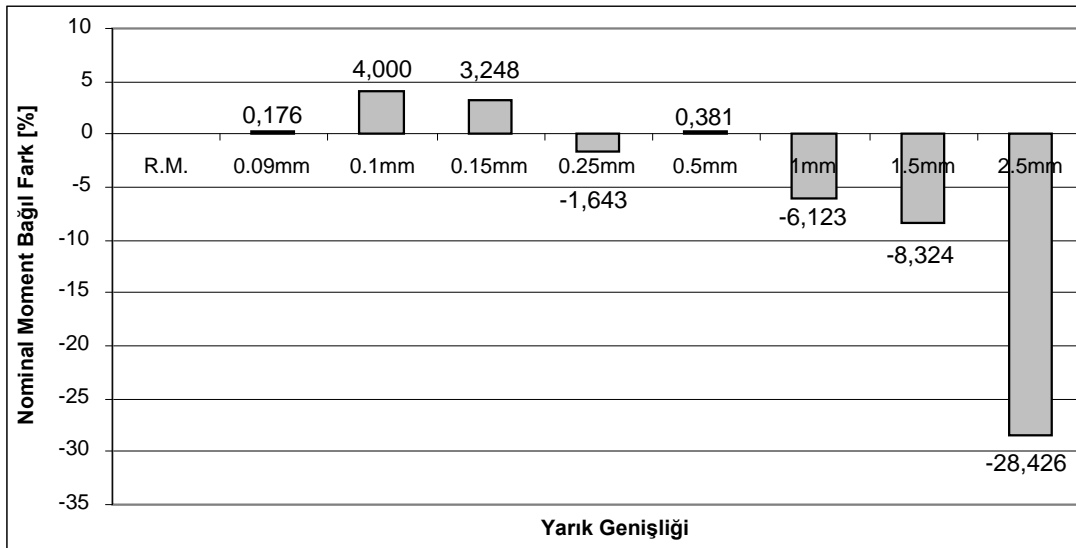
Şekiller incelendiğinde 0.1 mm ve 0.15 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinde yol alma, devrilme ve nominal moment değerlerinde artma meydana gelirken diğer motor modellerinde azalma görülmektedir.

Verim değerinde ise yine 0.1mm ve 0.15mm motor modellerinden elde edilen değerler referans motor modeline göre daha büyüktür. Fakat en iyi performans değerleri 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modelinden elde edilmiştir. Yarık genişliği arttıkça dişlerdeki manyetik akı yoğunluğu miktarının artmasına bağlı olarak elde edilen moment ve verim değerlerinin azaldığı görülmektedir.

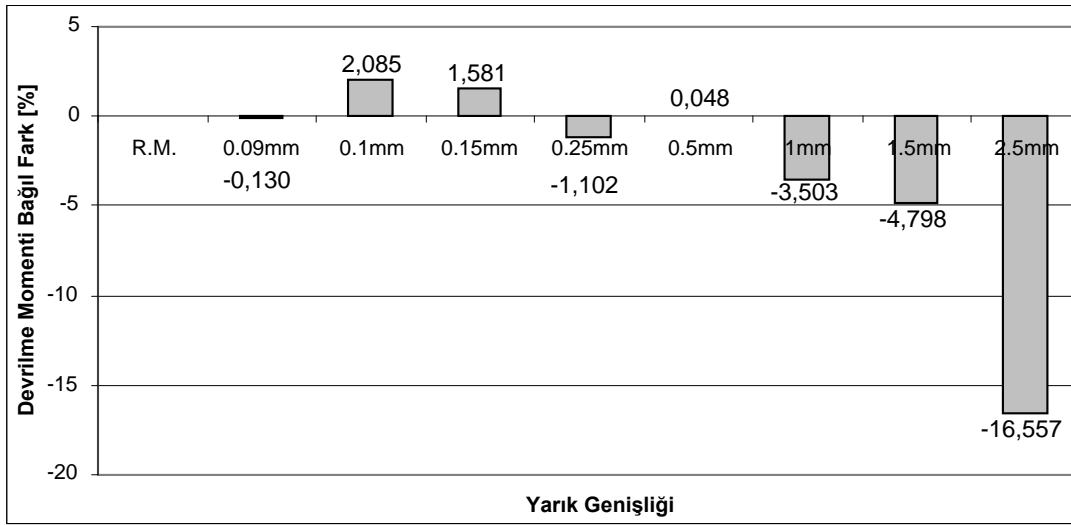
Yukarıda farklı yarıklar genişliklerinde moment ve verim grafikleri verilen motor modellerinin referans motor modeline göre bağıl değişim grafikleri Şekil 5.13–5.16 arasında verilmiştir.



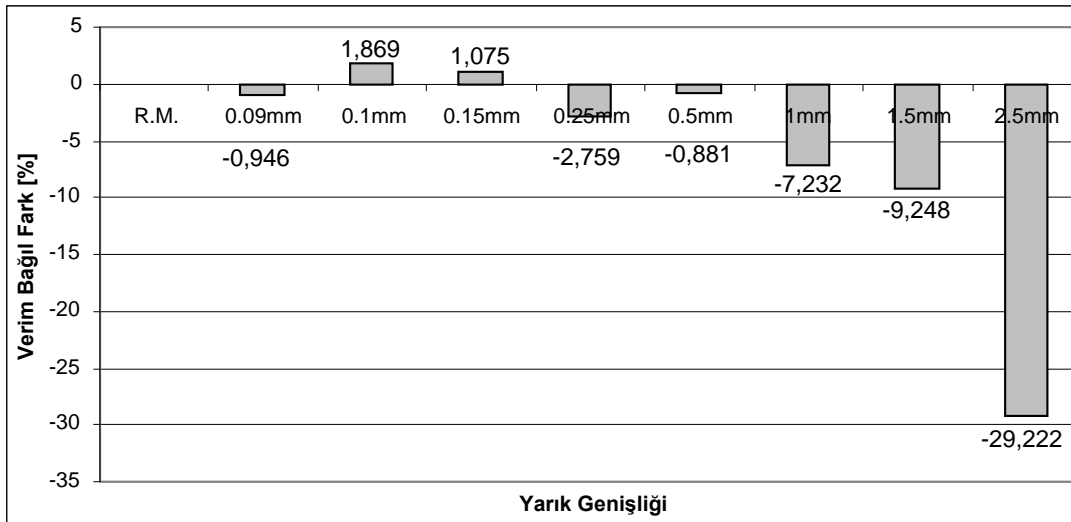
Şekil 5.13. 15 mm yarıklar derinliğinde farklı yarıklar genişliklerindeki motor modellerinin bağıl yol alma momentleri değişimleri



Şekil 5.14. 15 mm yarıklar derinliğinde farklı yarıklar genişliklerindeki motor modellerinin bağıl nominal moment değişimleri



Şekil 5.15. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin bağlı devrilme momenti değişimleri



Şekil 5.16. 15 mm yarık derinliğinde farklı yarık genişliklerindeki motor modellerinin bağlı verim değişimleri

Yapılan analizler sonucunda 0.09 mm yarık genişliğinden elde edilen performans değerlerinin en iyi performans değerlerini veren 0.1 mm yarık genişliğinden elde edilen değerlere göre daha kötü sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Yarık genişliği 0.25 mm ve daha büyük yarık genişliğine sahip motor modellerinden elde edilen sonuçların da referans motordan elde edilen değerlere göre daha kötü olduğu tespit edilmiştir. Yarık genişliği arttıkça dişlerde doymalar meydana gelmiş bunun sonucu olarak da elde edilen performans değerlerinde kötüleşme gözlemlenmiştir. Bu

bulguların yola çıkarak optimum yarık genişliği değeri 0.1 mm olduğu tespit edilmiştir.

## 5.2. Optimum Yarık Derinliğinin Belirlenmesi ve Yarık Derinliğinin Motor Performansına Etkisi

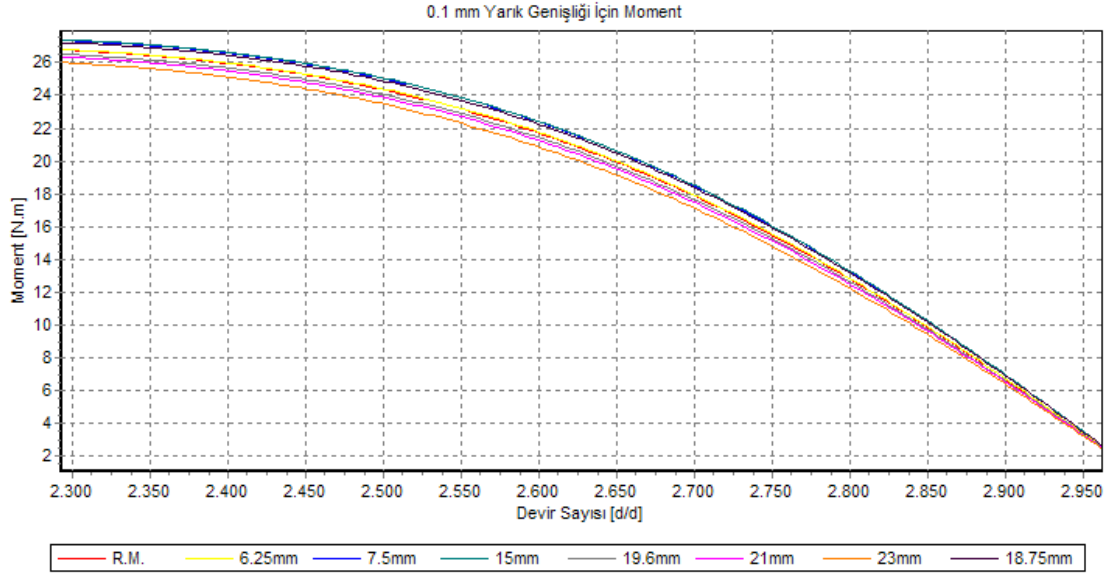
Optimum yarık derinliğinin belirlenmesi için bütün analizler boyunca yarık genişliği 0.1 mm seçilmiştir. Yarık derinliğinin belirlenmesi için 6.25 mm, 7.5 mm, 11.25 mm, 13.125 mm, 15 mm, 16.875 mm, 18.75 mm, 19.6 mm, 21 mm ve 23 mm yarık derinliğine sahip modeller oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.4' de 0.1 mm yarık genişliğinde farklı yarık derinliklerindeki motor modelleri için verim ve referans motor modeline göre bağıl fark değerleri verilmiştir.

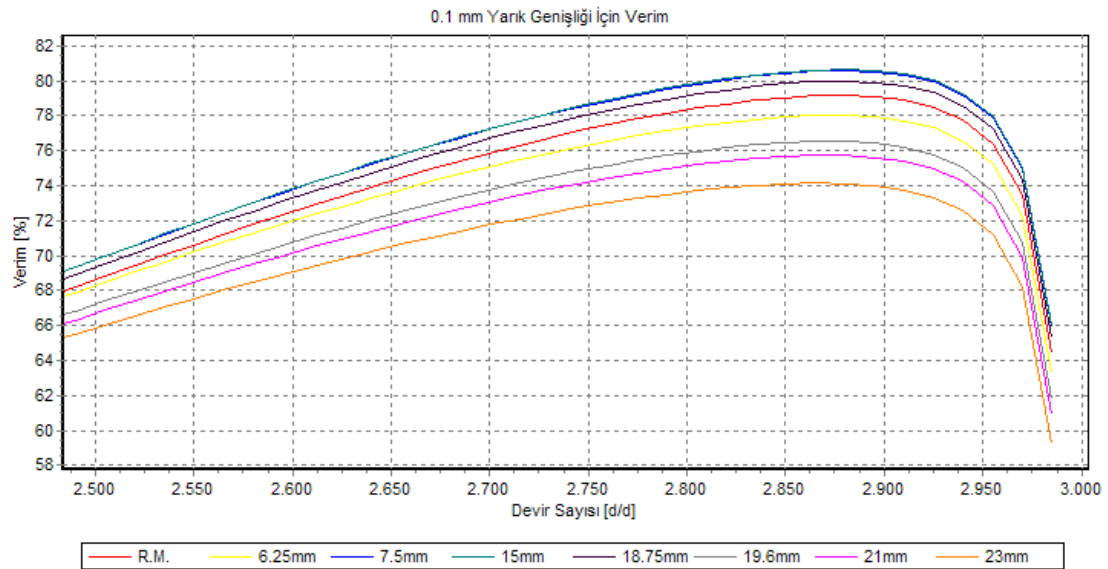
Tablo 5.4. 0.1 mm yarık genişliğinde farklı yarık derinliklerindeki motor modelleri için elde edilen verim ve bağıl fark değerleri

Motor Modelleri	Verim [%]	Bağıl Fark [%]
R.M.	78.965	
6.25mm	77.871	-1.385
7.5mm	80,366	1.774
11.25mm	80,315	1.709
13.125mm	80,296	1.685
15mm	80.441	1.869
16.875mm	79,955	1.253
18.75mm	79,767	1.015
19.6mm	76.394	-3.255
21mm	75.618	-4.238
23mm	74.053	-6.220

Şekil 5.17 ve 5.18’ de 0.1 mm yarık genişliği için değişik yarık derinliklerinde elde edilen devir sayısı-moment ve devir sayısı-verim eğrilerinin detaylı gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.17. 0.1 mm yarık genişliğinde farklı yarık derinliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-moment eğrilerinin detaylı gösterimi



Şekil 5.18. 0.1 mm yarık genişliğinde farklı yarık derinliklerindeki motor modelleri için devir sayısı-verim eğrilerinin detaylı gösterimi

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde minimum yarık derinliğinin 7.5 mm, maksimum yarık derinliğinin ise 16.875 mm olması gerektiği tespit edilmiştir. Burada 7.5 mm, 11.25 mm, 13.125 mm ve 15 mm yarık derinliğine sahip motor modellerinin diğer



motor modellerine göre performanslarının daha iyi olduğu görülmektedir. Fakat 15 mm yarık derinliğine sahip motor modeli en iyi performans değerlerini vermektedir.

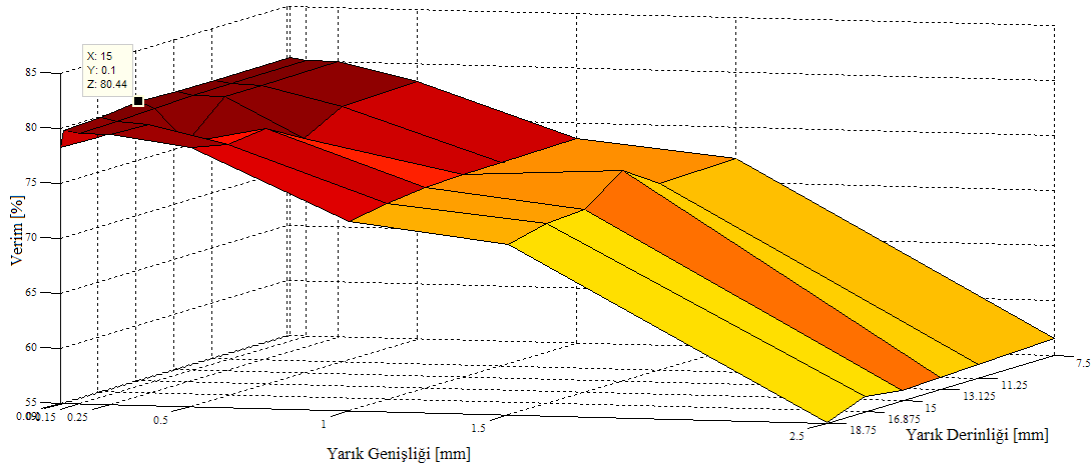
Stator ve rotor oluk yükseklik değerleri göz önüne alındığında hem stator hem de rotor için uygun yarık derinliğinin oluk yükseklik değerleri civarında olması gerektiği tespit edilmiştir. Yarık derinliği oluk yükseklik değerlerinden küçük seçilen modellerde akı çizgilerinin yarıkların etrafından devrelerini tamamladıkları gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.23). Yarık derinliği yüksek olan modellerde ise yarık stator ve rotor boyunduruk kısımlarının içine doğru girdiği için bu kısımlarda doymalara sebep olduğu belirlenmiştir.

Önerilen yarıklı motorda yarık optimizasyonu için üretilmiş 48 farklı motor modeline ilişkin sonuçlar Tablo 5.5 ve 5.6 ile Şekil 5.19 ve 5.20’ de verilmiştir. Bu sonuçlar, araştırılan parametrenin en iyi değerini kolayca göstermektedir. Tablo 5.5’ de yapılan incelemede elde edilen verim değerleri verilmiştir.

Tablo 5.5. Farklı yarık derinliği ve genişliğinde elde edilen verim değerleri

Yarık Genişliği [mm]	Yarık Derinliği [mm]					
	7.5	11.25	13.125	15	16.875	18.75
	Verimler [%]					
0.09	78.195	78.330	78.245	78.218	78.130	78.210
0.1	80.366	80.315	80.296	80.441	79.955	79.767
0.15	80.121	80.034	79.992	79.814	79.677	79.568
0.25	80.029	79.973	79.950	76.786	79.425	79.537
0.5	78.424	78.248	76.348	78.269	77.800	78.550
1	73.596	73.486	73.406	73.254	72.840	72.185
1.5	72.155	71.932	74.140	71.662	71.330	70.518
2.5	56.533	56.229	56.054	55.890	56.395	55.000

Oluşturulan yarıklı yapıdaki motor modellerinden elde edilen verim grafikleri yarık derinliğine ve yarık genişliğine bağlı olarak Şekil 5.19’ da verilmiştir.



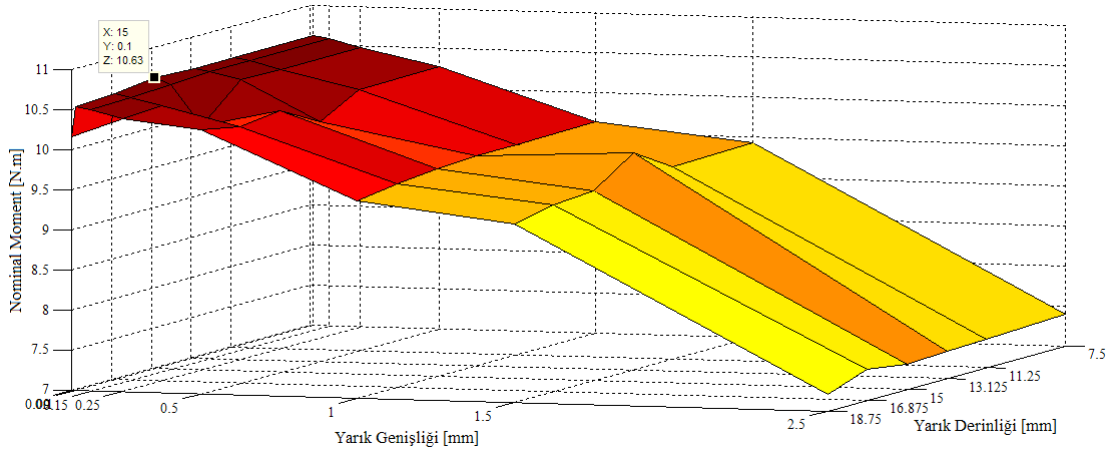
Şekil 5.19. Farklı yarık derinliği ve genişliğindeki motor modelleri için verim grafiği

Tablo 5.6' da incelemesi yapılan farklı yarık derinliğine ve genişliğine sahip yarıklı motor modellerinden elde edilen nominal moment değerleri verilmiştir.

Tablo 5.6. Farklı yarık derinliği ve genişliğinde elde edilen nominal moment değerleri

Yarık Genişliği [mm]	Yarık Derinliği [mm]					
	7.5	11.25	13.125	15	16.875	18.75
	Nominal Moment [N.m]					
0.09	10.115	10.058	10.217	10.241	10.208	10.166
0.1	10.617	10.618	10.612	10.632	10.569	10.538
0.15	10.588	10.581	10.575	10.555	10.531	10.504
0.25	10.487	10.483	10.485	10.055	10.434	10.404
0.5	10.274	10.254	9.996	10.262	10.198	10.299
1	9.635	9.625	9.617	9.597	9.543	9.457
1.5	9.430	9.403	9.707	9.372	9.327	9.221
2.5	7.395	7.358	7.337	7.317	7.381	7.201

Oluşturulan yarıklı yapıdaki motor modellerinden elde edilen nominal moment grafikleri yarık derinliğine ve yarık genişliğine bağlı olarak Şekil 5.20' de verilmiştir.



Şekil 5.20. Farklı yarığ derinliği ve genişliğindeki motor modelleri için nominal moment grafiği

Yapılan 48 farklı modelden elde edilen 3 boyutlu grafikler incelendiğinde yarığ derinliği 15 mm, yarığ genişliği 0.1 mm olan motor modelinin en iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Yarığ genişliği ve derinliği arttıkça elde edilen verim ve nominal moment değerlerinin azaldığı görülmektedir.

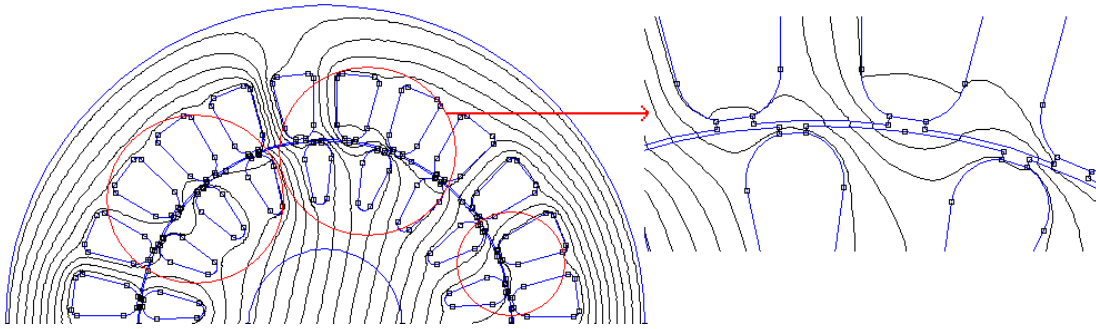
Bu aşamadan sonra en iyi performans değerlerini veren 15 mm yarığ derinliği ve 0.1 mm yarığ genişliğine sahip motor modeli (R.M.\_T\_Y) ile referans motor modelinin diğer performans bilgileri karşılaştırmalı olarak verilecektir. Önerilen yarıklı tasarımın olumlu ve olumsuz yönleri belirtilecektir. Elde edilen nominal noktadaki performans değerleri, kayıp güç, nüve ağırlıkları, zikzak akıların değişimi, faydalı akının değişimi ve motor parametreleri gibi noktalar karşılaştırılacaktır.

### 5.3. Referans Motor ve Optimum Yarığ Derinliği - Genişliğine Sahip Motor Modellerinin Karşılaştırması

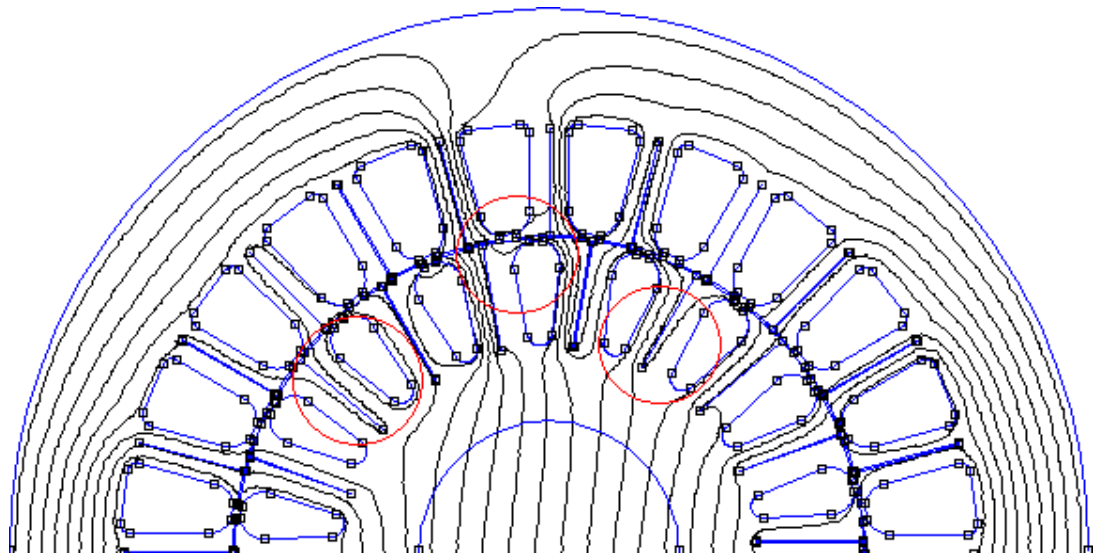
Oluşturulan motor modellerinin dış kısımlarına yarığ yerleştirilmesi durumunda statordan rotora geçen manyetik akı çizgilerinin hava aralığından veya stator ve rotor sargılarının üzerinden devresini tamamlamak yerine direkt olarak rotor nüve kısmına doğru ilerlediği gözükmemektedir. Buradan yola çıkarak hava aralığında oluşan zikzak akıların ve enine akı çizgilerinin azaldığı sonucuna varılabilir. Bu durumun detaylı grafikleri Şekil 5.21–5.23’ de verilmiştir. Yarığ derinliğinin az olması durumunda ise akıların yarığ çevresinden devrelerini tamamladıkları tespit edilmiştir. Bunun

sonucunda da, uygun olmayan yarık derinliği kullanılması halinde beklenen zikzak akı azalması gerçekleşmemektedir (Bkz. Şekil 5.23).

Şekil 5.21 – 5.23 arasında stator ve rotor dişlerine yerleştirilen yarıkların zikzak akı (Bkz. Şekil 2.3 2. akı yolu) ile enine akı çizgilerini (Bkz. Şekil 2.3 1. ve 3. akı yolları) düzelttiğini gösteren grafikler verilmiştir. Şekil 5.21' de referans motor modelinde oluşan zikzak akılar ile stator ve rotor sargılarının üstünden devresini tamamlayan enine akılar görülmektedir. Şekil 5.22' de ise 15 mm yarık derinliği ve 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modelinin bu akıların bir kısmını düzelttiği görülmektedir.

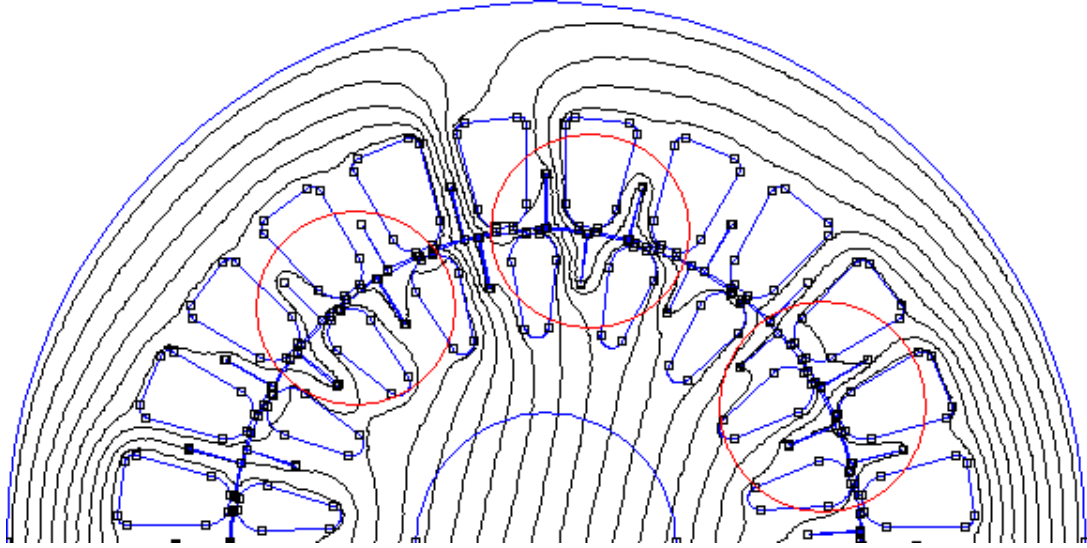


Şekil 5.21. Referans motor modelinde oluşan enine ve zikzak akılar



Şekil 5.22. 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinde oluşan enine ve zikzak akılar

Şekil 5.23' de yarık derinliğinin stator ve rotor oluk yükseklik değerlerinden küçük seçilmesi durumunda meydana gelen enine ve zikzak akılar gösterilmiştir.



Şekil 5.23. 7.5 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğindeki motor modelinde oluşan enine ve zikzak akılar

Bölüm 2' de verilen (2.21), (2.22) ve (2.23) eşitliklerinin kullanılması ile elde edilen stator ve rotor oluk ile zikzak permeans değerleri referans motor ve 15 mm yarık derinliği 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modelleri için Tablo 5.7' de verilmiştir.

Tablo 5.7. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modelleri için permeans ve bağıl fark değerleri

Motor Parametreleri	Referans Motor [Wb/A.T]	15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıklı Motor [Wb/A.T]	Bağıl Fark [%]
Stator Oluk Permeansı	0.4748	0.4748	----
Rotor Oluk Permeansı	0.8055	0.8055	----
Zikzak Permeans	0.5095	0.4783	-6.123

Stator ve rotor sargı yapısında ve oluk geometrilerinde herhangi bir değişiklik yapılmadığı için stator ve rotor oluk permeans değerleri değişmemiştir. Zikzak permeans değeri ise 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modeli için Şekil 5.22' de görüldüğü üzere hava aralığında bulunan zikzak kaçak akıların azaltılması sebebiyle % 6.123 azalmıştır.

Tablo 5.8. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modelleri için stator ve rotor endüktans ve bağıl fark değerleri

Motor Parametreleri	Referans Motor [H]	15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıklı Motor [H]	Bağıl Fark [%]
Stator ve rotor endüktansı ( $L_1+L_2$ )	0.001016	0.000991	-2.460

Tablo 5.8’ de referans ve 15 mm yarık derinliği 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin stator ve rotor endüktans değerlerinin toplamı verilmiştir. Elde edilen kaçak endüktans değeri zikzak kaçak akıların azaltılmasına bağlı olarak % 2.46 oranında bir azalma göstermiştir.

Tablo 5.9’ da referans ve 15 mm yarık derinliği 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin hava aralığı, rotor dişleri ve rotor boyunduruk kısımlarında meydana gelen faydalı akı ve referans motor modeline göre bağıl fark değerleri verilmiştir.

Tablo 5.9. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin faydalı akı ve bağıl fark değerleri

Motor Parametreleri	Koordinatlar [mm] (x,y)	Referans Motor	15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıklı Motor	Bağıl Fark [%]
		Faydalı Akı [Wb]		
Rotor Boyunduruk	-4.2, 22.1	0.000934937	0.000954496	2.092
Rotor Boyunduruk	-21.7, 10.6	0.000973707	0.000976006	0.236
Rotor Diş Ortası	32.9, 12.3	0.001229049	0.001307770	6.405
Rotor Diş Kenarı	-16.9, 30.7	0.001363618	0.001392062	2.085
Hava Aralığı	4.28, 43.28	0.001275455	0.001293198	1.391
Rotor Dibi	-27.6, 32.9	0.001355180	0.001369690	1.070
Rotor Dibi	31.4, -30.1	0.001315208	0.001328529	1.012

Çeşitli koordinat noktalarında elde edilen faydalı akı (Bkz. Şekil 2.3 4. akı yolu) değerlerine göre yarıklı yapıdaki motor modelinde meydana gelen faydalı akı değerleri referans motor modeline göre ortalama olarak % 2.041 oranında bir artış göstermektedir. Yarıklı yapıdaki motor modelinde zikzak akıların % 6.123 oranında

azaltılması ile hava aralığından rotor kısmına geçen akı çizgilerinin sayısında bir artışın meydana gelmiş olması faydalı akının artmasında rol oynamıştır.

Tablo 5.10’ da referans ve 15 mm yarık derinliği 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin mıknatıslanma reaktansı ve referans motor modeline göre bağıl fark değerleri verilmiştir.

Tablo 5.10. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin mıknatıslanma reaktansı ve bağıl fark değerleri

Motor Modeli	$X_m$ [H]	Bağıl Fark [%]
R.M.	0.4353455	
15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıklı Motor	0.4543495	4.365

Tablodan anlaşılacağı üzere yarıklı yapıdaki motor modelinin faydalı akı değerinin artmasına bağlı olarak mıknatıslanma reaktans değeri referans motor modeline göre % 4.365 oranında artış göstermiştir. Bunun sonucunda eşitlik (3.19)’ a göre elde edilen moment değerinin akının dolayısıyla mıknatıslanma reaktansının bir fonksiyonu olması sebebiyle arttığı görülmektedir.

Tablo 5.11’ de referans motor ve 15 mm yarık derinliği, 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin nominal çalışma ve bağıl fark değerleri verilmiştir.

Tablo 5.11. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin nominal çalışma ve bağıl fark değerleri

Motor Parametreleri	Referans Motor	15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıklı Motor	Bağıl Fark [%]
Giriş Gücü [W]	3837.6	3840.3	0.070
Çıkış Gücü [W]	3030	3089	1.947
Verim [%]	78.965	80.441	1.869
Nominal Akım [A]	6.645	6.613	-0.481
Güç Faktörü	0.875	0.880	0.571
Nominal Moment [N.m]	10.223	10.632	4.000

Bu tablodan yarıklı yapıdaki motor modelinden elde edilen verim, çıkış gücü ve güç faktörü değerlerinin arttığı görülmektedir. Yarıklı motor modeli için elde edilen nominal moment referans motorun moment değerine göre % 4 oranında artış

göstermiş, buna bağlı olarak da çıkış gücü değeri artmıştır. Çıkış gücü değerinin % 1.947 oranında artması ile verim değeri % 1.869 oranında artış göstermiştir. Akım değerinde ise elde edilen empedans değerinin artmasına bağlı olarak % 0.481 oranında bir azalma söz konusu olmuştur. Giriş gücü değeri ise bir miktar artış göstermiştir.

Tablo 5.12' de ise elde edilen tüm kayıp güç ve bağıl fark değerleri, referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıkli motor modelleri için verilmiştir.

Tablo 5.12. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıkli motor modellerinin kayıp güç ve bağıl fark değerleri

Motor Parametreleri	Referans Motor [W]	15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıkli Motor [W]	Bağıl Fark [%]
Stator Bakır Kayıpları	164.388	162.052	-1.417
Rotor Bakır Kayıpları	162.834	160.458	-1.456
Stator Diş Kayıpları	95.507	68.611	-28.161
Stator Boyunduruk Kayıpları	260.776	246.088	-5.632
Rotor Diş Kayıpları	1.903	1.761	-7.368
Pulzasyon Kayıpları	3.766	3.714	-1.380
İlave Yük Kayıpları	28.426	18.595	-34.584
Sürtünme-Vantilasyon Kayıpları	90	90	-----
Toplam Kayıplar	807.6	751.3	-6.971

Sürtünme ve vantilasyon kayıpları her iki modelde de eşit alınmıştır. Modellemelerde sargılar açısından herhangi bir değişiklik yapılmadığı için stator ve rotor bakır kayıplarında fazla bir değişiklik meydana gelmemiştir. Akımdan kaynaklanan küçük bir miktarda azalma söz konusudur.

Yarıkli motor için elde edilen stator diş kayıp değeri referans motor modeline göre % 28.161 oranında bir azalma göstermiştir. Bunun sebeplerinden birincisi stator diş ağırlığında meydana gelen % 1.870 oranındaki azalmadır. İkinci sebep ise stator dişlerinden rotor kısmına geçen akı çizgilerinin sayısının artmasına ve bu kısımlarda elde edilen manyetik akı yoğunluk değerlerindeki azalmalar olarak açıklanabilir.

Stator boyunduruk kayıplarında ise yarıkli yapıdaki motor ile referans motor aynı ağırlık değerine sahip olmasına rağmen yarıkli yapıdaki motordan elde edilen

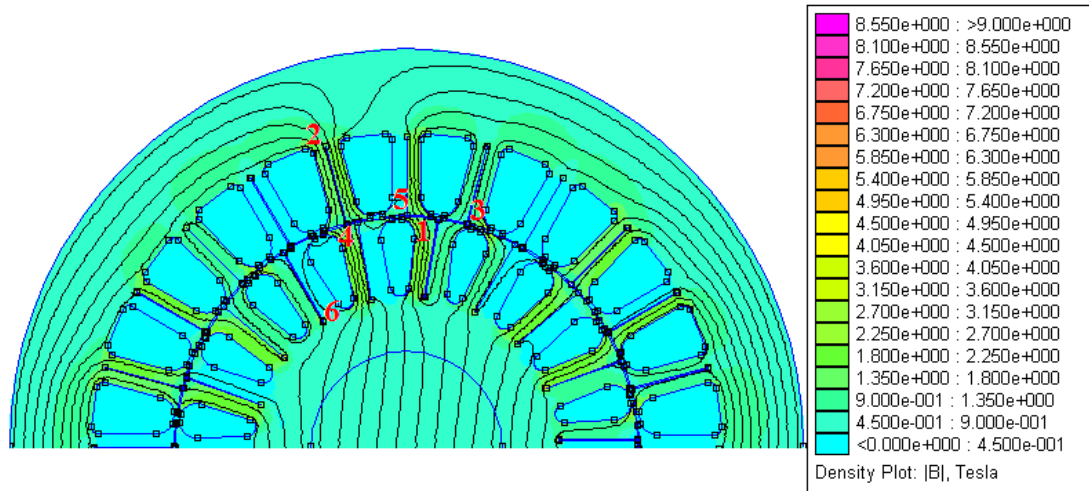


manyetik akı yoğunluk değerlerinde bir miktar azalma söz konusu olmuştur. Bu durum stator boyunduruk kayıplarının % 5.632 oranında azalmasını sağlamıştır.

Rotorda oluşan frekansın küçük olması sebebiyle rotor diş kayıpları ufak değerlerde çıkmıştır. Ayrıca burada dikkati çekilecek diğer bir husus da ilave yük kayıplarında meydana gelen azalmadır. Toplam kayıplarda referans motor modeline göre, yarıklı yapıdaki motor modeli için % 6.971 oranında bir kazanç sağlandığı görülmektedir.

Verim değerinde ise kayıpların azaltılmasına bağlı olarak 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modelinde referans motor modeline göre % 1.869 oranında bir iyileşme söz konusu olmuştur. Bu kayıp tablosu göz önünde bulundurulduğunda elde edilmek istenen hedeflere ulaşıldığı görülmektedir.

Stator ve rotor dişleri ile boyunduruk kısımlarında meydana gelen manyetik akı yoğunluklarının Şekil 5.24' de gösterilen noktalarda elde edilen değerleri referans ve yarıklı yapıdaki motor modelleri için Tablo 5.12' de verilmiştir.



Şekil 5.24. Manyetik akı yoğunluğu değerlerinin belirlenmesi için stator ve rotor diş ile boyunduruk noktaları

Tablo 5.13. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıkli motor modellerinin stator ve rotor diş ile boyunduruk kısımlarında meydana gelen manyetik akı yoğunluk değerleri

Noktalar	Koordinatlar [mm] x,y	Referans Motor [T]	15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıkli Motor [T]	Bağlı Fark [%]
1	3.9, 41.9	1.37567	1.31426	-4.439
2	-17.94, 56.29	2.23826	2.15681	-3.638
3	14.7, 41.6	2.31346	2.29108	-0.967
4	-14.65, 40.31	1.74266	1.69845	-2.536
5	-0.5, 44.1	1.28409	0.77348	-39.763
6	-11.99, 25.96	0.98742	0.92347	-6.476

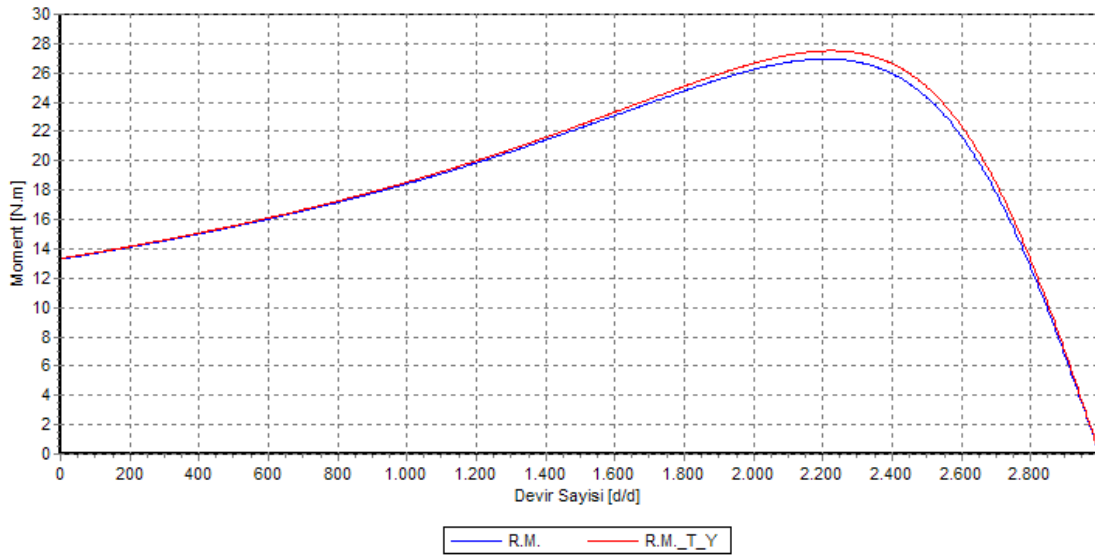
Tablo 5.14' de stator ve rotor diş ile stator boyunduruk ağırlıkları ve referans motor modeline göre bağlı fark değerleri verilmiştir.

Tablo 5.14. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıkli motor modellerinin nüve ağırlık ve bağlı fark değerleri

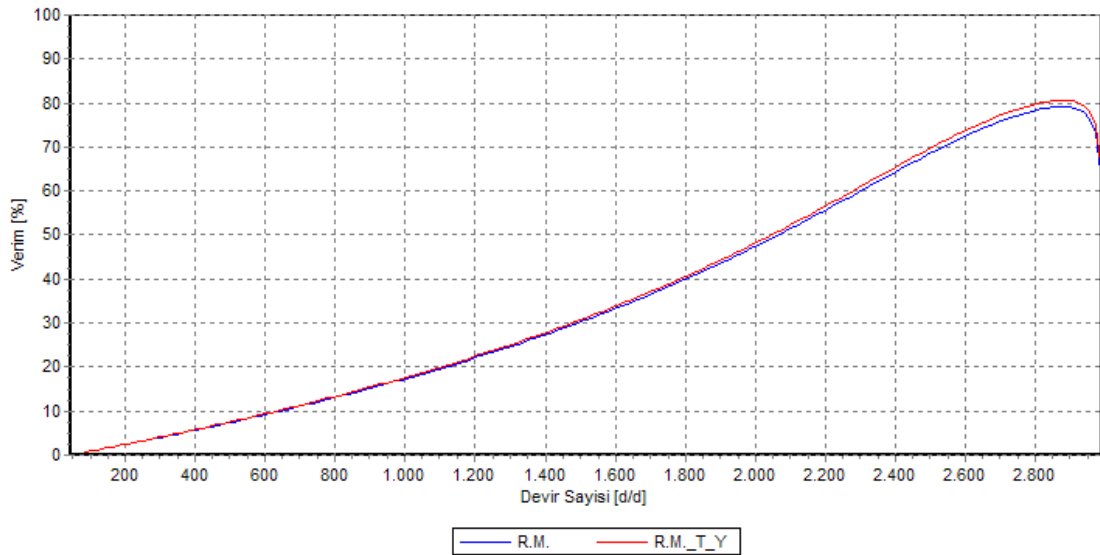
Motor Parametreleri	Referans Motor [Kg]	15 mm Derinlik 0.1 mm Genişliğe Sahip Yarıkli Motor [Kg]	Bağlı Fark [%]
Stator Diş Ağırlığı	2.2990	2.2560	-1.870
Stator Boyunduruk Ağırlığı	6.7904	6.7904	----
Rotor Diş Ağırlığı	2.6545	2.6185	-1.356
Toplam Ağırlık	11.7439	11.6649	-0.672

Yarıkli motor modeli için stator ve rotor diş ağırlıkları sırasıyla % 1.870 ve % 1.356 oranlarında azalmıştır. Stator boyunduruk ağırlığı, stator boyunduruk kısmında yarık bulunmaması sebebiyle değişmemiştir. Toplam ağırlık yarıkli motor modelinde % 0.672 oranında azalma göstermiştir.

Şekil 5.25 ve 5.26' da referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip yarıkli motor modellerinin devir sayısı-moment ve devir sayısı-verim eğrileri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde yarıkli yapıdaki motor modelinden elde edilen değerlerin referans motor modeline göre daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir.

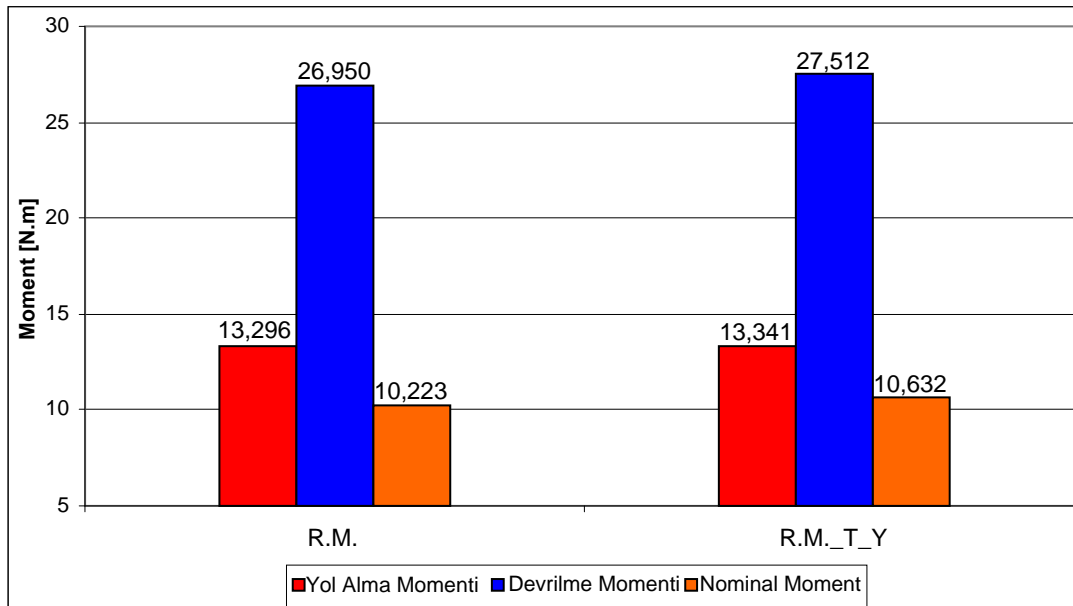


Şekil 5.25. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin devir sayısı-moment eğrileri

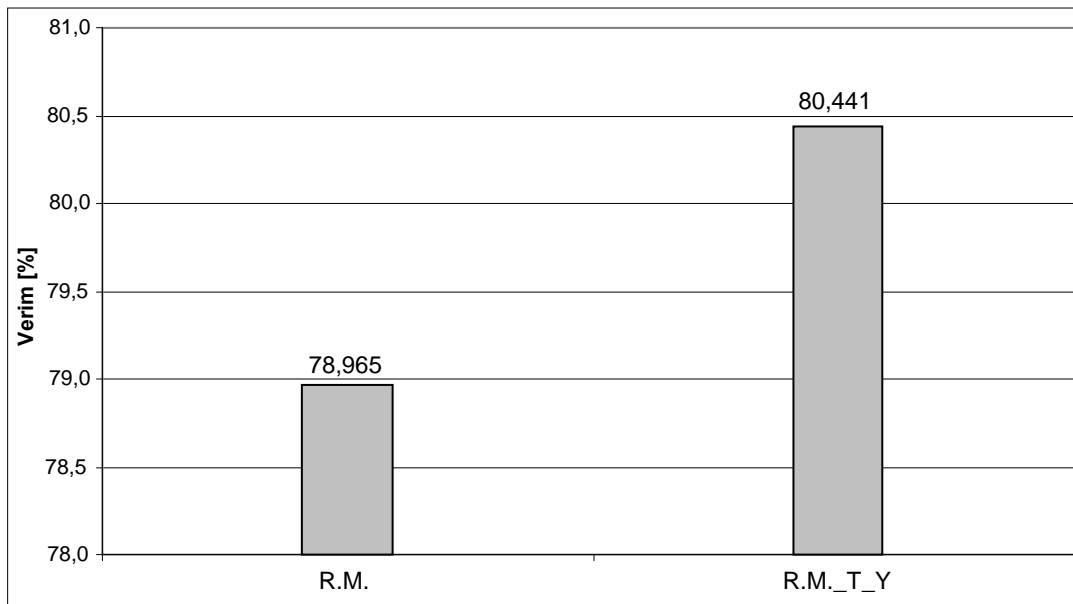


Şekil 5.26. Referans ve 15 mm derinlik 0.1 mm genişliğe sahip yarıklı motor modellerinin devir sayısı-verim eğrileri

Şekil 5.27 ve 5.28' de referans motor ve 15 mm yarık derinliği 0.1 mm yarık genişliğine sahip motorun (R.M.\_T\_Y) moment ve verim değerleri sırasıyla verilmiştir.

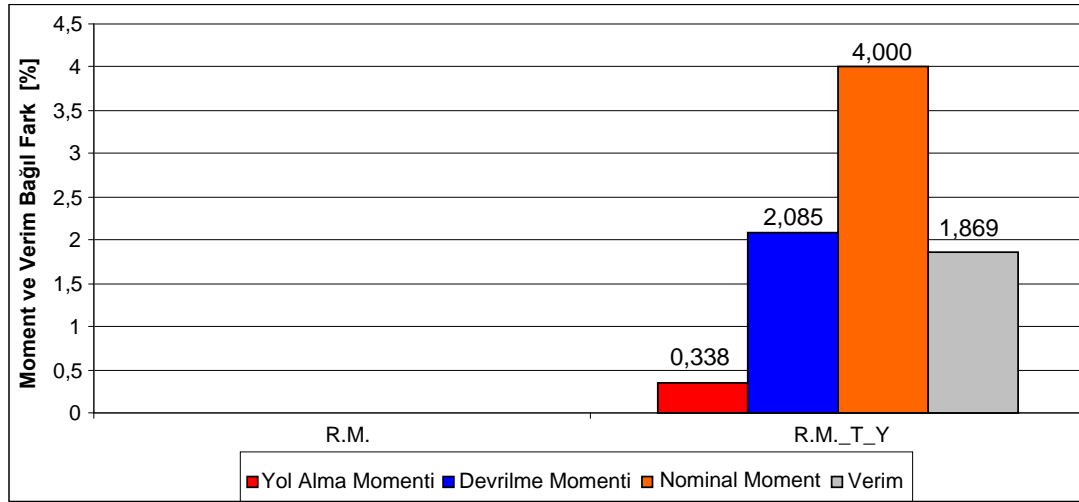


Şekil 5.27. Referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment değerleri



Şekil 5.28. Referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin verim değerleri

Şekil 5.29’ da referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motorun (R.M.\_T\_Y) moment ve verim değerlerinin referans motor modeline göre bağıl fark değerleri verilmiştir.



Şekil 5.29. Referans motor ve 15 mm derinlik 0.1 mm yarık genişliğine sahip motor modellerinin moment ve verim bağıl fark değerleri

Elde edilen yol alma, devrilme ve nominal moment değerleri yarıklı yapıdaki motorun, referans motora göre sırasıyla % 0.338, % 2.085 ve % 4 daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Elde edilen verim değerinde ise % 1.869 oranında artış meydana gelmiştir.

## **BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Asenkron motorda manyetik akı yollarını düzeltmek, kayıpları azaltarak verimi arttırmak ve diğer performans parametrelerinde elde edilebilecek iyileştirmeleri araştırmak üzere yapılan bu tez çalışmasında, standart asenkron motor tasarımında yeni düzenlemeler yaparak, yarıklı diş yapısı önerilmiş ve önerilen tasarımlar endüstri standardı 3 kW' lık bir asenkron motor üzerinde yeni tasarımlar simule ederek sınanmıştır.

Yeni tasarımın, seçilen 3 kW' lık standart asenkron motora uygulanması aşamasında, makinenin çeşitli noktalarında doyma sorunları ile karşılaşmış ve orijinal motora ilişkin tasarımın optimal olmadığı ve yeni tasarımda önerilen yarıkların uygulanması için üzerinde bazı iyileştirmeler yapılması ihtiyacı görülmüştür. Bu nedenle, öncelikle, seçilen orijinal motor, çerçeve boyutları değiştirilmeden optimize edilerek, tez içerisinde referans motor diye anılan yeni standart tasarım elde edilmiştir. Tezin devamında ise, elde edilmiş referans motor ile aynı boyutlara sahip ve önerilen tasarımları içeren yeniden yapılandırılmış motor modelleri; manyetik akı yönleri ve dağılımı, kaçak akılar, mıknatıslama akısı, çeşitli çalışma noktalarına ilişkin moment değerleri, demir ve bakır kayıpları, güç faktörü ve hız gibi performans parametreleri açısından karşılaştırmalı bir şekilde analiz edilmiştir. Önerilen tasarımların iyileştirilmesi için 56 farklı yarık kombinasyonu, sonlu elemanlar yöntemi kullanan F.E.M.M. yazılım paketi ile simule edilmiş ve sürekli hal performans sonuçları değerlendirilmiştir.

Kavramsal tasarım önerileri yanında 3 kW' lık örnek motor üzerinde yürütülen çalışmalar ve elde edilen özel çözümler, olumlu ve olumsuz sonuçlar aşağıda verilmiştir.

3 kW'lık referans motor ile optimize edilmiş önerilen tasarım üzerinde yapılan değerlendirme sonuçları:

Önerilen yarıklar zikzak akı yollarına relüktans teşkil etmiş, ilgili permeans değerinde % 6.123'lük azalmalar elde edilmiştir. Bunun sonucunda stator ve rotor endüktans değerlerinde % 2.460 azalma elde edilmiştir.

Akı koşullanması ve yeni yönlendirmeler nedeniyle nüve üzerindeki akı yoğunluklarında daha iyi bir dağılım elde edilmiştir. Akı yoğunlukları açısından bakıldığında, elde edilen noktasal ölçümlerden, referans motora göre daha az zorlanma olduğunu göstermiştir.

Hava aralığındaki kaçak akıların azalması sonucunda, statorda üretilen akı yeniden yönlenerak faydalı akıda % 2.041 oranında artma elde edilmiştir.

Faydalı akıdaki artma, özellikle devrilme ve nominal momentte sırasıyla % 2.085 ve % 4 artış sağlamış, nominal çalışma noktasında güç faktöründe % 0.571 iyileşme elde edilmiştir.

Motorun nominal kaymasında görülen azalma, nominal momentte artış ile sonuçlanmıştır. Bunun sonucunda da rotor bakır kayıplarında % 1.456 azalma sağlanılmıştır.

Yeni tasarımda, gerek akı koşullanması sonucunda elde edilen lokal akı yoğunluğu azalmaları ve gerekse demir hacmindeki azalma sonucunda % 11.542 oranında demir kayıplarında azalma elde edilmiştir.

Gerek demir ve gerekse bakır kayıplarındaki azalmalar sonucunda, motordaki toplam kayıplar azalmış ve nominal çalışma noktası için verimde % 1.869 oranında iyileşme elde edilmiştir.

Bunun yanında güç faktöründeki % 0.571 oranındaki iyileşme sonucunda, az da olsa makinenin çektiği reaktif güçte azalma görülmüştür.

Performans parametrelerinde yukarıda belirtilen iyileştirmelere neden olan; önerilen yarıklı motor tasarımında, dişlere açılan yarık derinliğinin en iyi değerinin oluk derinliği civarında gerçekleştiği gözlenilmiştir.

Bu tez çalışması Sakarya Üniversitesi 2006–50–02–061 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir. Fakat ilgili bütçenin yeni tasarımın gerçekleşmesi ve deneysel çalışmaların yapılabilmesi için yeterli olmadığından, benzetim sonuçları ile elde edilen iyileştirmeler deneysel olarak gösterilememiştir. Çalışmanın bundan sonraki süreçlerinde yeni kaynaklar bulunarak önerilen tasarımların gerçek makine üzerinde uygulanması düşünülmektedir.

Önerilen yarıklı tasarımda, gerek kaçak reaktansların ve gerekse rotor ağırlığındaki azalmadan dolayı dinamik performansta iyileşme olacağı söylenilebilir. Bu öngörü ileride yapılacak deneysel çalışmalar ile incelenebilecektir. Bundan sonraki çalışmalarda ayrıca; farklı güçlerde ve farklı oluk geometrilerine sahip motorlar üzerinde modellemeler ve uygulamalar yapılarak optimum yarık genişliği ve derinliği genelleştirilebilir; önerilen yarık geometrisi motor modellerinin sadece stator veya sadece rotor nüvesine uygulanarak analizler gerçekleştirilebilir; ısınma, titreşim, ses ve kırılgenlık analizleri yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] ÇETİN, İ., Asenkron makina problemleri (Çözümlü), 1. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi, ss 192, 1993.
- [2] BOGLIETTI, A., CAVAGNINO, A., LAZZARI, M., Geometrical approach to induction motor design, The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp 149-156, Nov. 5–8, 2007.
- [3] HOWARD, A., S., Modeling and analysis of the induction machine: a computational/experimental approach, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp 482–485, May, 1990.
- [4] FEYZI, M., R., KALANKESH, H., V., Optimization of induction motor design by using the finite element method, Electrical and Computer Engineering Canadian Conference, Vol. 2, pp 845–850, 13–16 May, 2001.
- [5] BOGLIETTI, A., CAVAGNINO, A., FERRARIS, L., LAZZARI, M., LUPARIA, G., Induction motor efficiency improvements with low additional production costs, power electronics, Machines And Drives (PEMD2004) Second International Conference, Vol. 2, pp 775–780, 31 March–2 April, 2004.
- [6] PARK S., B., LEE, H., B., HAHN, S., Y., Stator slot shape design of induction motors for iron loss reduction, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 3, No. 3, pp 2004–2007, May, 1995.
- [7] AKBABA, M., Energy conservation by using energy efficient electric motors, Applied Energy 64, pp 149–158, 1999.
- [8] HIYAMA, T., IKEDA, M., ANN based designing system for industrial induction motors, Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, pp 2819-2824, 26-29 August, 2004.
- [9] SIMON, L., MONZON, J., M., The finite element method for parametric identification of a three phase induction machine with genetic algorithms, 11 th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering (11CHLIE), pp 5, July, 2009.

- [10] RAJ, C., T., SRIVASTAVA, S., P., AGARWAL, P., Energy efficient control of three-phase induction motor - a review, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp 61–70, April, 2009.
- [11] TUDORACHE, T., MELCESCU, L., FEM optimal design of energy efficient induction machines, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp 58–64, 2009.
- [12] MECROW, B., C., JACK, A., G., Efficiency trends in electric machines and drives, *Energy Policy* 36, pp 4336–4341, 2008.
- [13] MANOHARAN, S., DEVARAJAN, N., DEIVASAHAYAM, S., M., RANGANATHAN, G., Review on efficiency improvement in squirrel cage induction motor by using DCR technology, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 60, No. 4, pp 227–236, 2009.
- [14] AHO, T., SIHVO, V., NERG, J., PYRHONEN, J., Rotor materials for medium-speed solid-rotor induction motors, *IEEE*, pp 525-530, 2007.
- [15] AHO, T., NERG, J., PYRHONEN, J., Analyzing the effect of the rotor coating on the rotor losses of medium-speed solid-rotor induction motor, *SPEEDAM 2006 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp 7-11, 2006.
- [16] KARNPER, M., J., VOLSCHENK, A., F., Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on  $L_d$  and  $L_q$ , inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 141, No. 4, pp 213–220, July, 1994.
- [17] AHO, T., NERG, J., PYRHONEN, J., Influence of rotor slit depth on the performance of the solid rotor induction motor, *Energy Efficiency in Motor Driven Systems Conference Proceedings*, Vol. 1, pp 81–89, 5–8 Sep, 2005.
- [18] ZAIM, M., E., Application of a non linear complex finite element method to the design of solid rotor reluctance machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp 3592–3595, Sep, 1998.
- [19] LI, L., FOGGIA, A., LÉBOUC, K., A., MIPO, J., C., KOBYLANSKY, L., Some armature reaction compensation methods numerical design of experiments and optimization for a hybrid excitation machine, *International Electric Machines and Drives Conference IEEE IEMDC2009*, pp 7, 3-6 may 2009.
- [20] CHAN, S., HAMID, M., N., Finite element study on a two-phase switched reluctance motor with split rotor poles, *Power Electronics and Drives Systems PEDS 2005 International Conference*, pp 1156-1160, 28-01 Nov-Dec, 2005.

- [21] AHO, T., NERG, J., PYRHONEN, J., The effect of the number of rotor slits on the performance characteristics of medium-speed solid rotor induction motor, Power Electronics, Machines and Drives the 3rd IET International Conference, pp 515-519, 2006,
- [22] ZAIM, M., E., Non-linear models for the design of solid rotor induction machines, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3. pp 1310–1313, May, 1999.
- [23] NASHIKI, M., SATAKE, A., KAWAI, Y., YOKOCHI, T., OKUMA, S., A new flux-barrier-type reluctance motor with a slit rotor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 6, pp 1199–1206, December, 1999.
- [24] RENIER, B., HAMEYER, K., BELMANS, R., Comparison of standart for determining efficiency of three phase induction motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp 512–517, September, 1999.
- [25] ....., Energy efficient motors, ACII-GBC Publication, March 2002.
- [26] SERTELLER, N., F., Kafesli Asenkron makinalarda zaman harmonik etkilerinin oluk tasarımı ile azaltılmasına katkılar, Doktora, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000, ss 167, İstanbul, 2000.
- [27] COŞKUN, İ., KORKMAZ, Y., Şebekeden beslenen üç fazlı asenkron motor sargı yapısının motor performansına etkileri, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 22, No 4, ss 927-932, 2007.
- [28] KOCABAŞ, A., D., Asenkron makinalarda uzay harmoniklerinin etkilerini azaltmaya katkılar, Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004, ss 124, İstanbul, 2004.
- [29] DESHPANDE, M., V., “Design and testing of electrical machines”, Second edition, Y. P. Chopra for A. H. Wheeler & Co. Ltd., pp 618, 1990.
- [30] BOLDEA, I., NASAR, S., A., The induction machine handbook, CRC Pres LLC, Washington, D.C., pp 133–159, 2002.
- [31] ALGER, P., L., The nature of polyphase induction machines, Wiley, Newyork, pp 397, 1951.
- [32] TURAN, M., Asenkron makinanın geliştirilmiş uzay harmonik modelinde harmonik reaktans ve momentlerin hesabı, Yüksek Lisans, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996, ss 97, Sakarya, 1996.
- [33] İKİZLİ, O., Elektrik makinalarında dağılma, kayıplar ve ısınmanın hesapları, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 1962.
- [34] KIRAYOĞLU, H., Oluk kaçak reaktanslarının hesabı, Bitirme Ödevi, Sakarya Üniversitesi, ss 64, 1995.

- [35] VICKERS, H., The induction motor, Pitman, London, 1953.
- [36] GÜRDAL, O., Elektrik makinalarının tasarımı, Atlas Yayın Dağıtım, 1. Baskı, İstanbul, s 97-158, 2001.
- [37] YETGİN, A., G., ÇANAKOĞLU, A., İ., Asenkron motorlarda stator nüve uzunluğunun verime etkisi ve optimum uzunluğun seçilmesi, II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, ss 570–577, 16–17–18 Mayıs, 2004.
- [38] ....., Energy efficient motors, ACII-GBC Publication, March 2002.
- [39] PATEL, J., D., K., Energy efficient motors design & manufacturing aspect, Jyoti Ltd., Vadodara, Newsletter, 6-8, August 2003.
- [40] MERGEN, A., F., ZORLU, S., Elektrik makineleri II, Asenkron makineler, Birsen Yayınevi Ltd. Şti., ss 256, İstanbul, 2005.
- [41] JIMOH, A., A., FINDLAY, R., D., POLOUJADOFF, M., Stray losses in induction machines: part I defination, origin and measurement, IEEE Trans. on Power Apparants and Systems, Vol. 104, No. 6, pp 1500–1505, June, 1985.
- [42] RENIER, B., HAMEYER, K., BELMANS, R., Comparison of standart for determining efficiency of three phase induction motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp 512–517, September, 1999.
- [43] ROY, P., V., SLAETS, B., BELMANS, R., Induction motor efficiency: a number of with many meanings, [http://www.leonardo.energy.org/webfm\\_send/2637](http://www.leonardo.energy.org/webfm_send/2637), 02.11.2009.
- [44] CORINO, S., ROMERO, E., MANTILLA, L., F., How the efficiency of induction motor is measured, International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'08), pp 5, 12-15 March, 2008.
- [45] ....., Enerji verimliliği kapsamında sanayide yüksek verimli elektrik motorlarının kullanılması, [www.eosb.org.tr/assets/yukverimlimotorlar.pdf](http://www.eosb.org.tr/assets/yukverimlimotorlar.pdf), ss 4, 2010.
- [46] ....., Motor efficiency labelling scheme, [www.brookcrompton.com/pdf-files/2219e\\_efflabelling\\_v1.pdf](http://www.brookcrompton.com/pdf-files/2219e_efflabelling_v1.pdf), Issue 1, pp 8, 2002.
- [47] ....., IEC 60034-30 Standard on efficiency classes for low voltage ac motors, Technical Note, ABB, pp 2, 2009.
- [48] BAYRAKTAR, U., Üç fazlı asenkron motor deneylerinin eğitim amaçlı benzetimi, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005, ss 105, Ankara, Aralık 2005.

- [49] SELÇUK, A., H., Lineer asenkron motorlarda uç etkilerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Doktora, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003, ss 108, Elazığ, 2003.
- [50] ÜMÜTLÜ, E., Doğru akım motorlarının sonlu elemanlar metodu ile analizi, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998, ss 81, Ankara, 1998.
- [51] TÜRK BAY, H., Asenkron motorların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ve tasarımı, Yüksek Lisans, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997, ss 58, Elazığ, 1997.
- [52] HO, S., L., FU, W., N., Review and future application of finite element methods in induction motors, Electric Machines and Power Systems, pp 111-125, 1998.
- [53] BRAUER, J., R., Finite element analysis of single phase and polyphase induction motors, The MacNeal-Schwendler Corporation, Conference Record of IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Philadelphia, PA, October, 1981.
- [54] WILLIAMSON, S., LIM, L., H., ROBINSON, J., M., Finite element models for cage induction motor analysis, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 26, No. 6, pp 1007–1017, 1990.
- [55] ERGENE, L., T., SALON, S., AKIYAMA, J., Y., Calculation of the bar resistance and leakage inductance in a solid-rotor induction motors with a one slot model, 14th Compumag Conference, Saratoga Springs, New York, July, 2003.
- [56] BRAUER, J., R., Finite element analysis of selenoids, transformers, generators, and motors, The MacNeal-Schwendler Corporation, Record of Cleveland Electronics Conference, IEEE No.78CH, pp 1300-1303, 1978.
- [57] BRAUER, J., R., Finite element analysis of single phase and polyphase induction motors, The MacNeal-Schwendler Corporation, Conference Record of IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Philadelphia, PA, October, 1981.
- [58] BRAUER, J., R., Finite element calculations of synchronous, universal and induction motor performance, The MacNeal-Schwendler Corporation, Presented at Motorcon Conference Proceeding, 1982.
- [59] BRAUER, J., R., Finite element software aids motor design, The MacNeal-Schwendler Corporation, Presented at the Small Motor Manufacturers Assn., Tenth Annual Meeting Tampa, Florida, 1985.

- [60] ROBINSON, J., M., Finite element calculation of equivalent circuit parameters for induction motors, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology London, University of London, November, p 194, 1983.
- [61] YETGİN, A., G., Üç fazlı asenkron makina tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, Yüksek Lisans, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004, ss 139, Kütahya, 2004.
- [62] SARAIVA, E., CHAVES, M., L., R., CAMACHO, J., R., Three-phase transformer representation using FEMM, and a methodology for air gap calculation, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, p 6, 2008.
- [63] MEEKER, D., Finite element method magnetics, User' s Manuel, Version 4.0, pp 112, 2006.
- [64] TEZCAN, M., M., ÇANAKOĞLU, A., İ., Asenkron motorlarda kırık rotor barı arızalarının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, 5. Uluslar arası İleri teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), ss 24-29, 13-15 Mayıs, Karabük, 2009.
- [65] MEEKER, D., Induction motor example, p 13, 2004.
- [66] ÇANAKOĞLU, A., İ., ŞENOL, İ., BEKİROĞLU, D., V., Analytical and numerical calculation of inductance of aplunger-type magnet, Eleco99 International Conference on Elc-Elt. Eng., pp 455-458, 1-5 December, Bursa, 1999.

## EKLER

### EK A. DELPHİ' DE YAZILAN VERİM HESABI KODLARI

```
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
npts:=200;

for i:=npts downto 1 do
kayma[i]:=0.005*i;
for i:=1 to npts do

begin
akim0[i]:=0; powfak0[i]:=0; ps0[i]:=0; eff0[i]:=0; ttd0[i]:=0; nmdev[i]:=0;
end;

for i:=1 to npts do
begin
nmdev[i]:=(1-kayma[i])*ns;
T0:=3*p*m0*akim*akim*(kayma[i]*x0/(1+sqr(kayma[i]*x0)));
ws:=2*pi*ns/60;
v1comt:=cplx(v1,0);
rscomt:=cplx(rs,0);
xscom0:=cplx(0,xs0);
rsxscom0:=cadd(rscomt,xscom0);
z0comt:=cadd(rsxscom0,(cdiv(cplx(0,m0),cadd(1,cplx(0,kayma[i]*x0))));
i10:=cdiv(v1comt,z0comt);
akim0[i]:=sqrt(sqr(i10.Re)+sqr(i10.Im));
powfak0[i]:=cos(Arg(i10));
acom0:=cplx(0,kayma[i]*x0);
ccom0:=cadd(1,acom0);
dcom0:=cdiv(acom0,ccom0);
I2com0:=cmul(dcom0,akim);
I2akim0[i]:=sqrt(sqr(I2com0.Re)+sqr(I2com0.Im));
tpin0[i]:=3*v1*akim0[i]*powfak0[i];
ttd0[i]:=3*sqr(I2akim0[i])*rrsn/kayma[i];
ppo0:=ttd0[i]*(1-kayma[i])-pfiw;
if ppo0<0 then break else ps0[i]:=ppo0;
eff0[i]:=100*ps0[i]/tpin0[i];
Series25.AddXY(nmdev[i],eff0[i]);
end.
```

## EK B. MATLAB PROGRAMI İLE S.E.Y. PARAMETRELERİNİN ANALİZ KODLARI

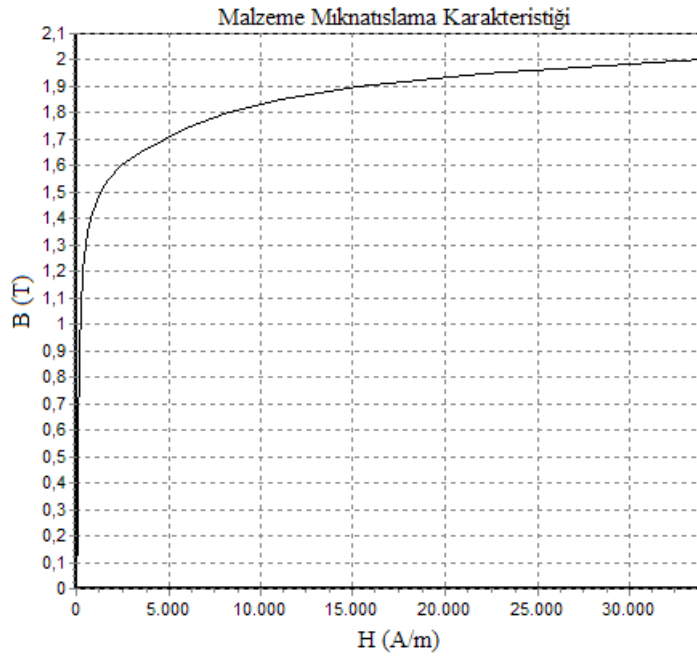
```
a=[0.25      17.859451195540 -23.5247696973105
    0.5       6.7743657550649 -15.6941034872007
    0.75      3.8550065117521 -11.1643154562866
    1         2.7374962155284 -8.58408354505133
    1.25      2.1993255529889 -6.95597111387472
    1.5       1.8992752279822 -5.84363057198066
    1.75      1.7141888553546 -5.03806065722788
    2         1.5912545295828 -4.428593945260785
    2.25      1.5048752332287 -3.951663903344409
    2.5       1.4414534506071 -3.568329895519062
    2.75      1.3932296174687 -3.253474912296276
    3         1.3555116500211 -2.99020285971222];
```

```
f=a(:,1);
lr=a(:,2);
li=a(:,3);
w=2*pi*f;
w2=w.*w;
w3=w2.*li;
k=[w,w3];
ans=inv(transpose(k)*k)*transpose(k)*(-li);
t=sqrt(ans(2))
m=ans(1)/t
x1=w.*t;
x2=x1.*x1;
x3=x2+1;
x4=eye(12)*m;
x5=m./x3;
son=lr-x5;
```



## EK C. MOTOR B-H EĞRİSİ, SAC VE SARGI ÖZELLİKLERİ

### Ek C.1. Motor B-H Eğrisi



Şekil C.1. B-H eğrisi [61]

### Ek C.2. Motor Sac Özellikleri

200-50A olarak adlandırılan soğuk haddeli elektriksel çelik sac - tavlanmamış.

Sac kalınlığı: 0.5 mm

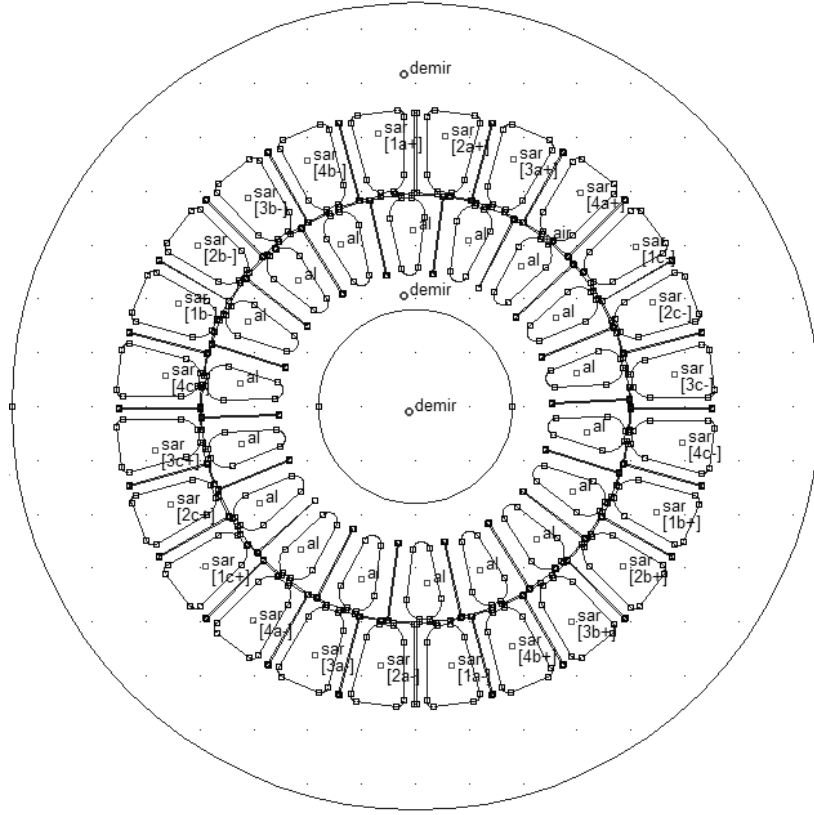
### Ek C.3. Motor Bobinaj Bilgileri

3 faz, 2 kutup, tam kalıp

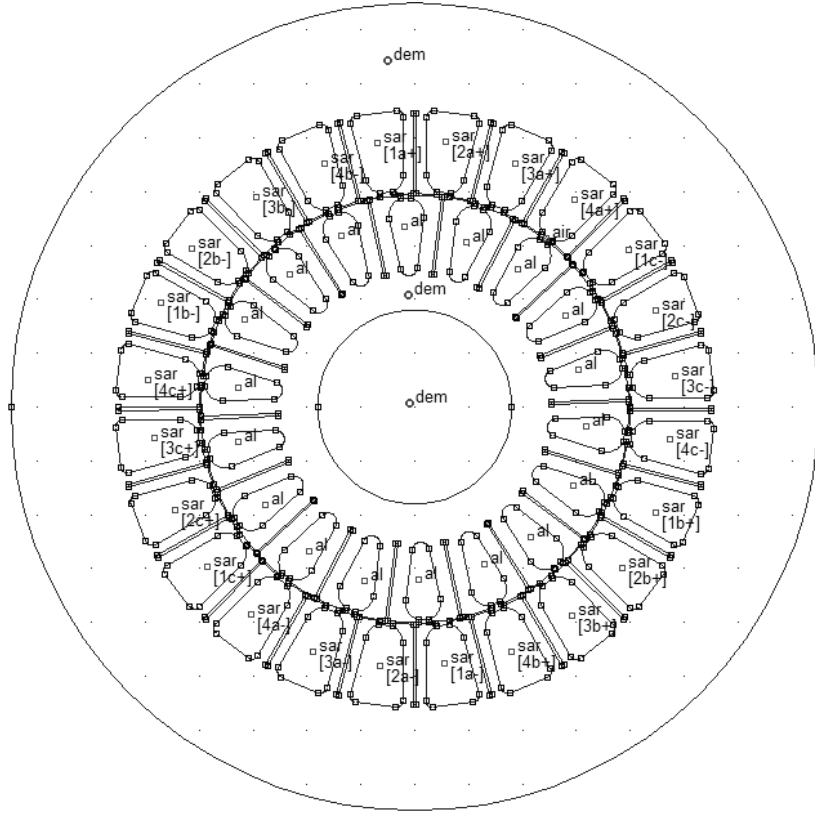
Adım: 1-11

Bağlantı: Seri

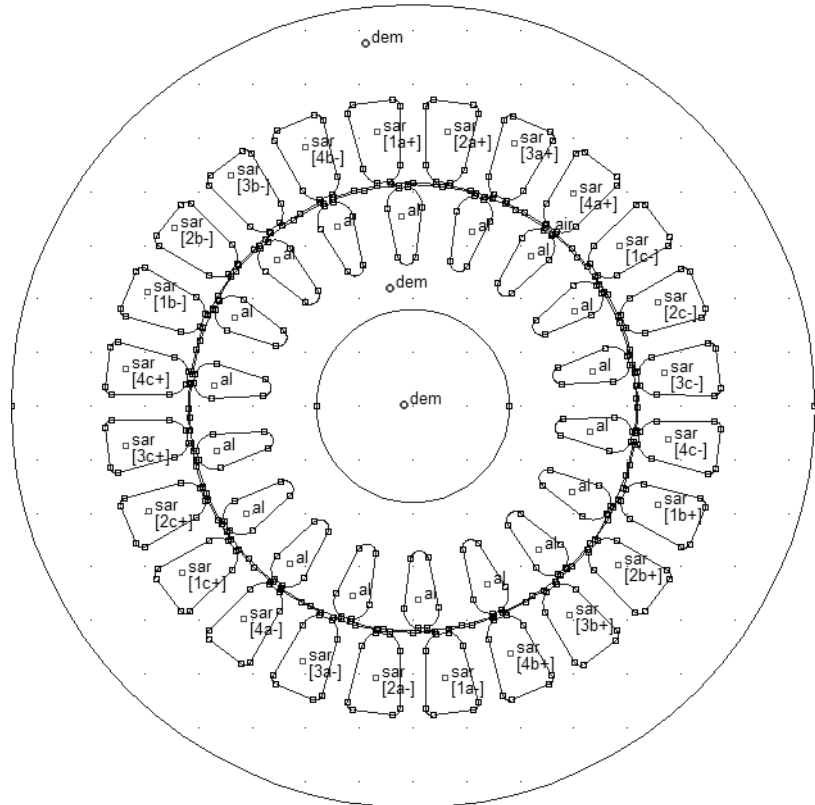
Sarım Sayısı: 42

**EK D. MODELLEMESİ YAPILAN DİĞER MOTORLARIN KESİTLERİ**

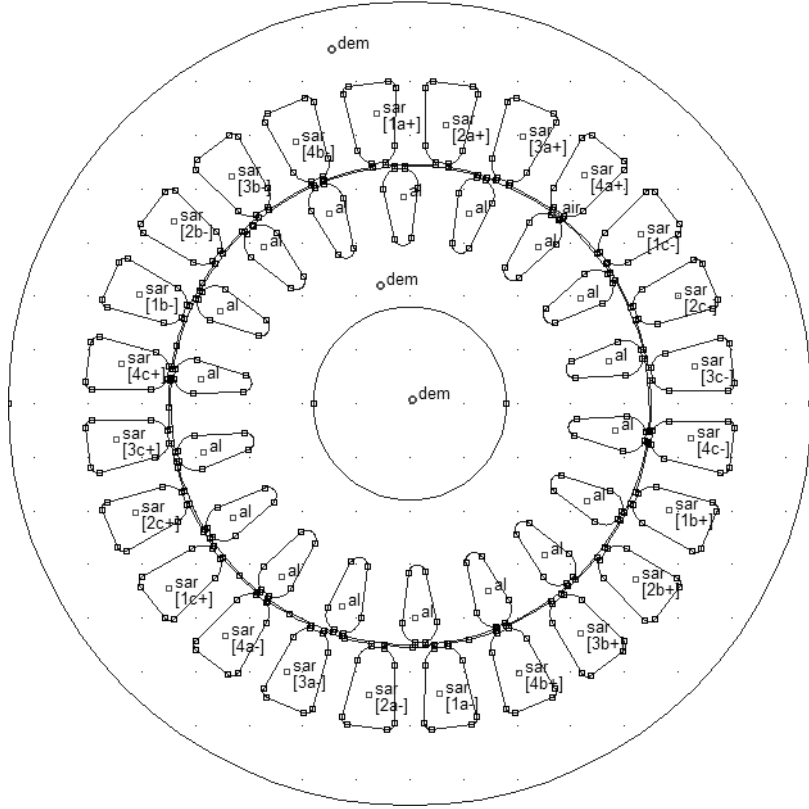
Şekil D.1. 15 mm yarıç derinliği 0.25 mm yarıç genişliğindeki orijinal motor modelinin 2 boyutlu kesiti



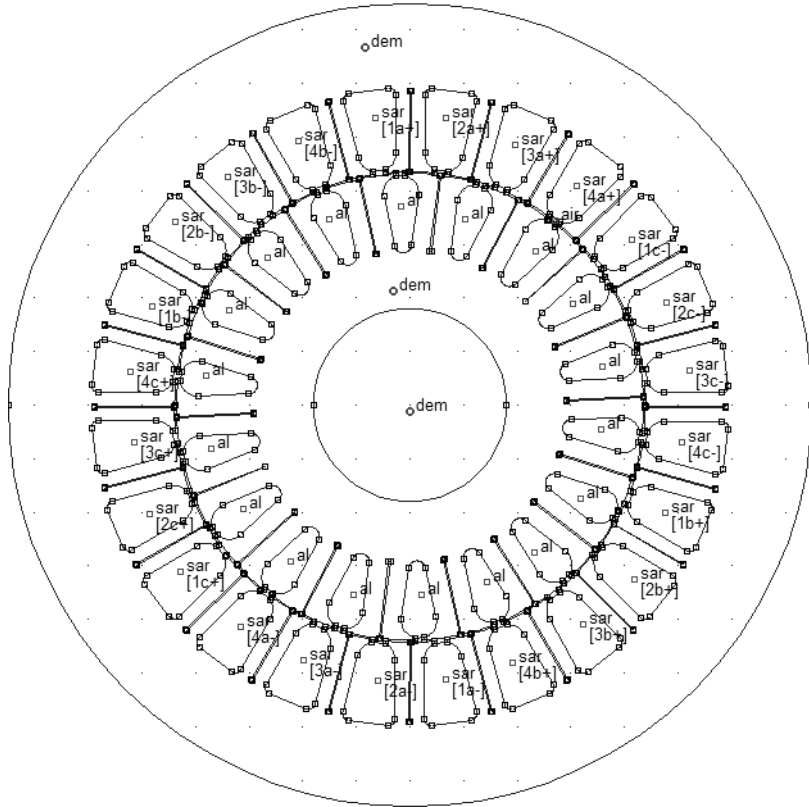
Şekil D.2. 15 mm yarıık derinliği 0.5 mm yarıık genişliğindeki orijinal motor modelinin 2 boyutlu kesiti



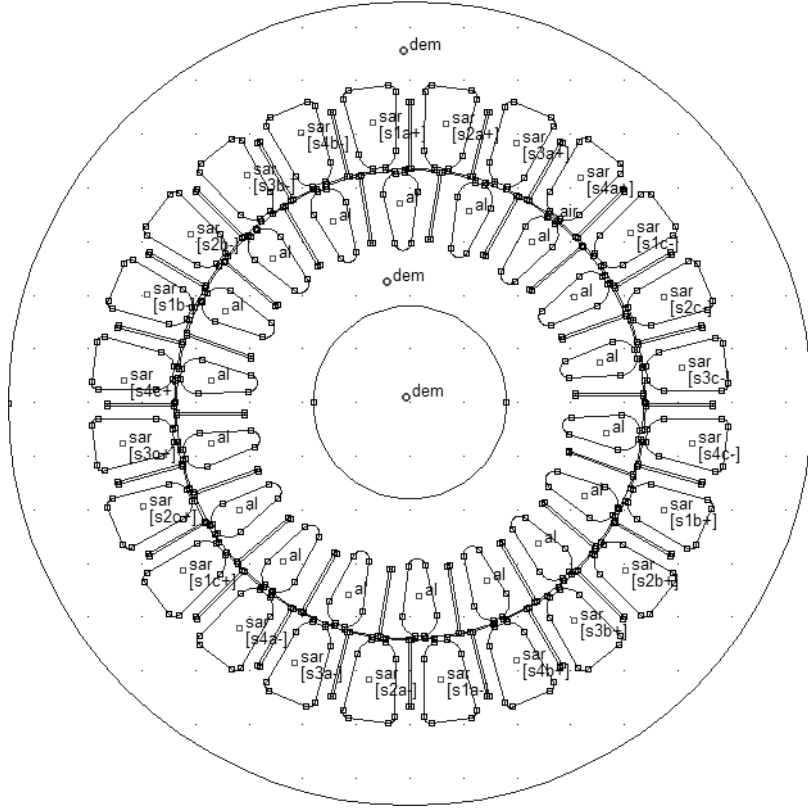
Şekil D.3. Yeni tasarlanan +2mm' lik motor modelinin 2 boyutlu kesiti



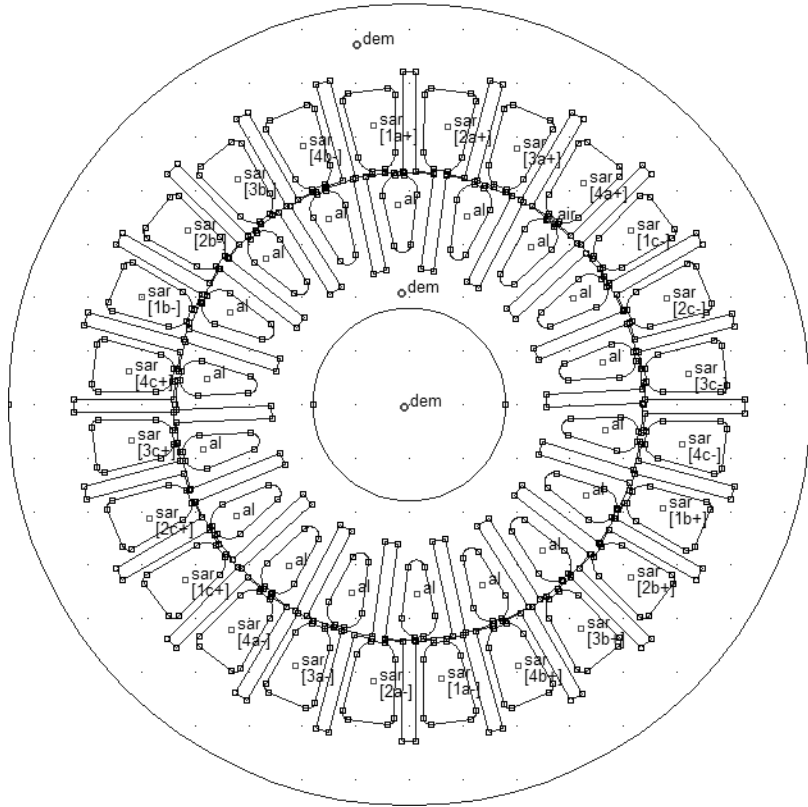
Şekil D.4. Yeni tasarlanan +5mm' lik motor modelinin 2 boyutlu kesiti



Şekil D.5. 15 mm yarıık derinliği 0.25 mm yarıık genişliğindeki motor modelinin 2 boyutlu kesiti

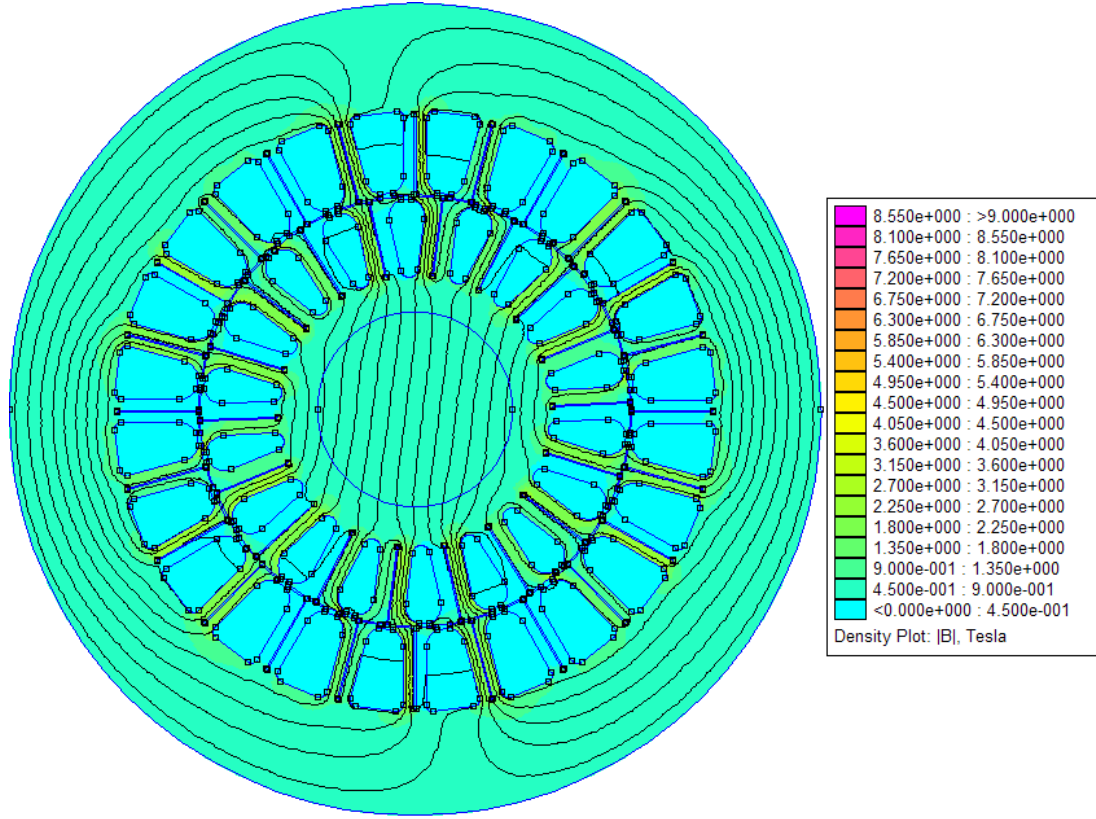


Şekil D.6. 13.125 mm yarık derinliği 0.5 mm yarık genişliğindeki motor modelinin 2 boyutlu kesiti

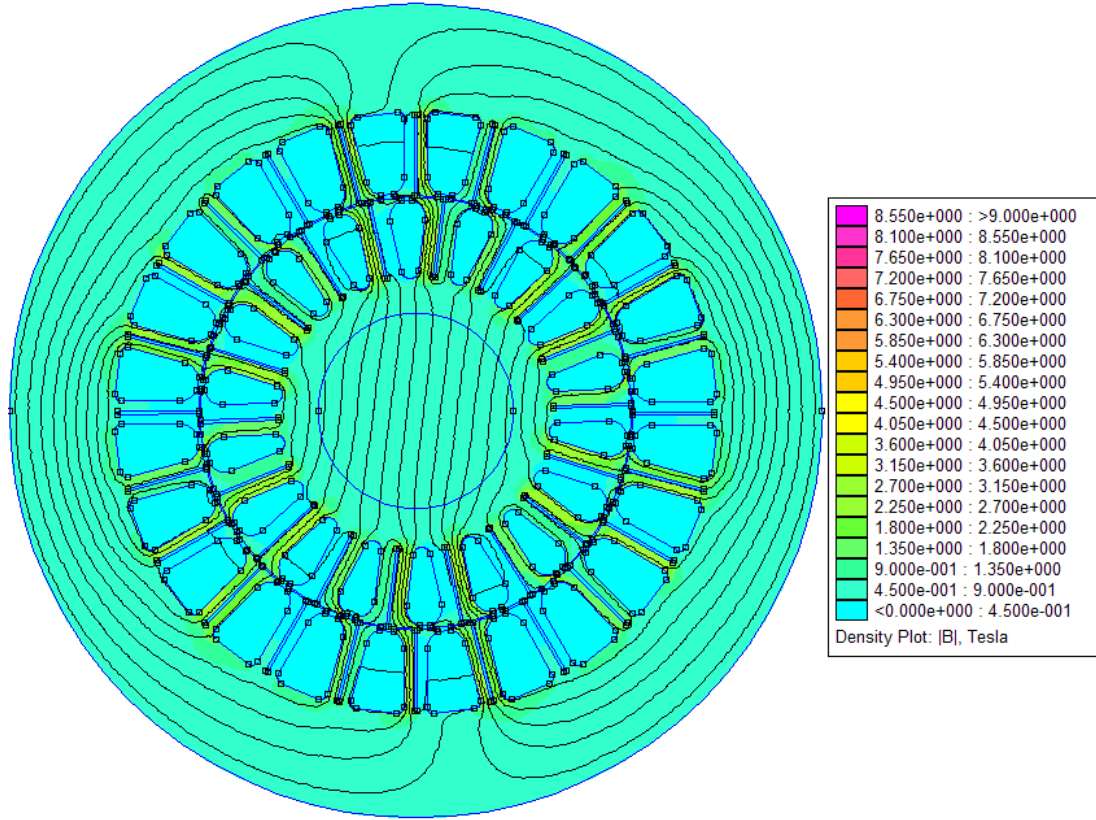


Şekil D.7. 18.75 mm yarık derinliği 2.5 mm yarık genişliğindeki motor modelinin 2 boyutlu kesiti

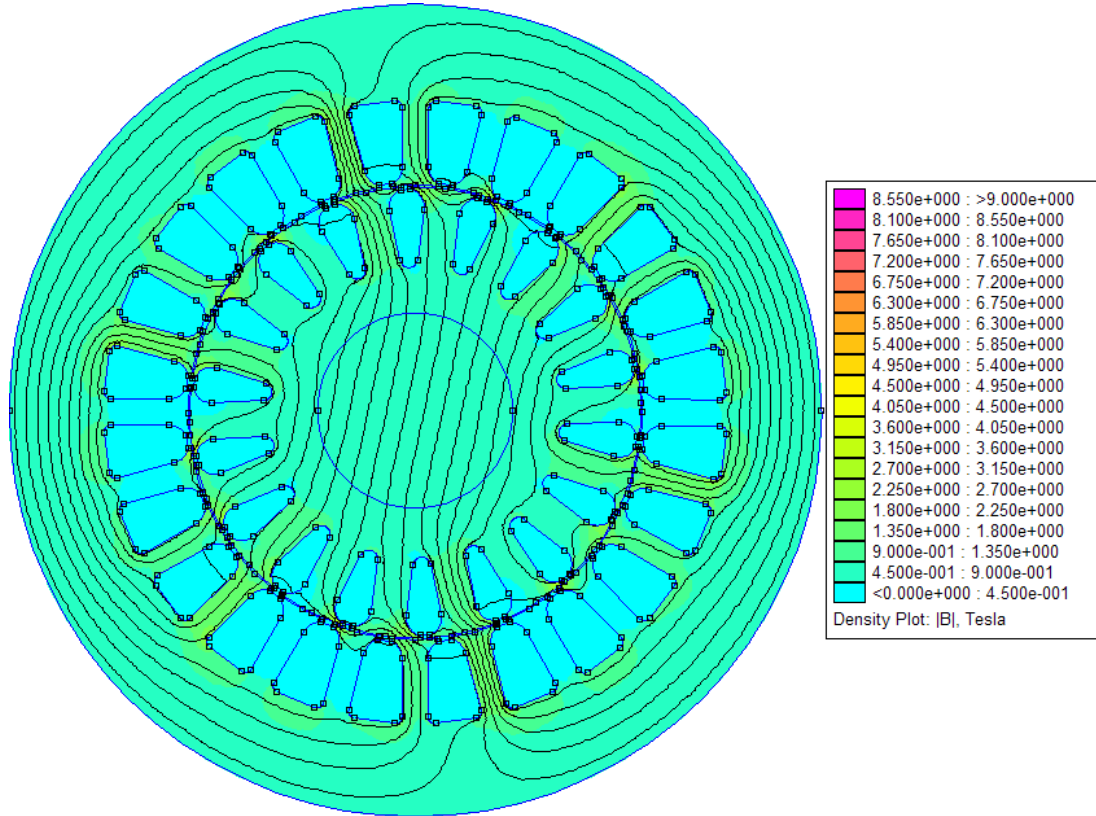
## EK E. MODELLEMESİ YAPILAN DİĞER MOTORLARIN ANALİZ SONUÇLARI



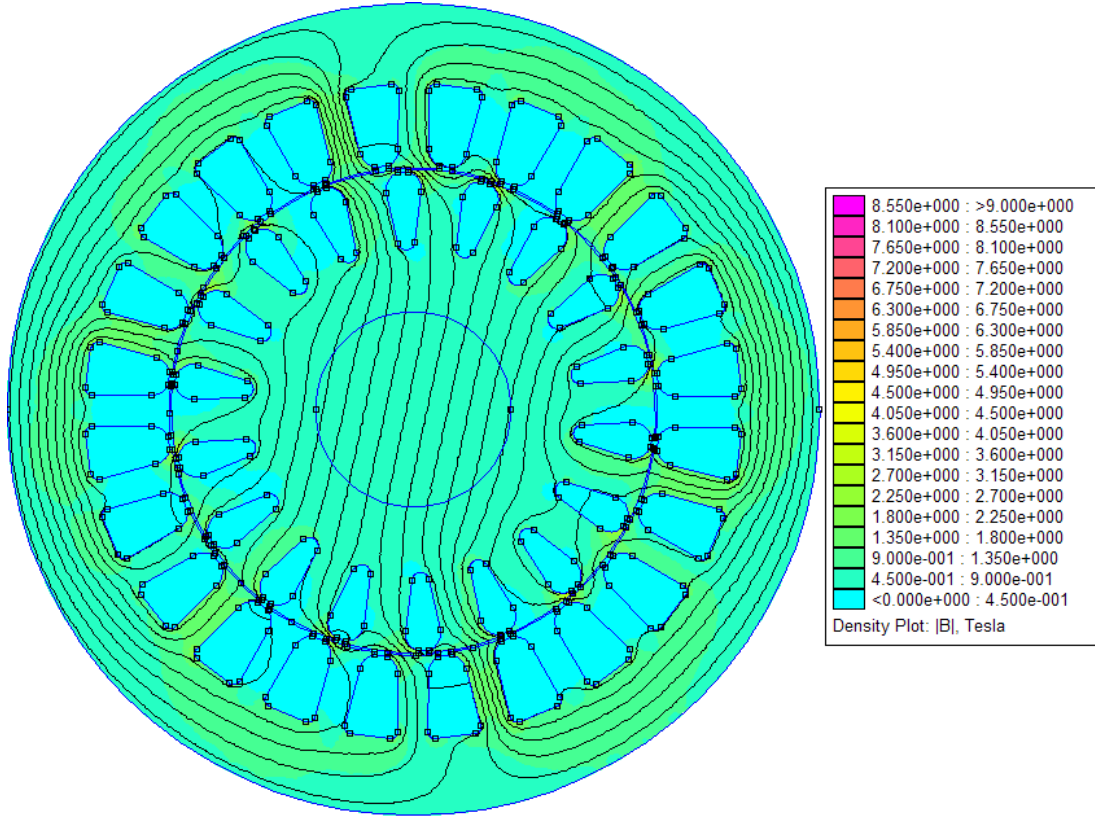
Şekil E.1. 15 mm yarıç derinliği 0.25 mm yarıç genişliğindeki orijinal motor modelinin alan dağılımı



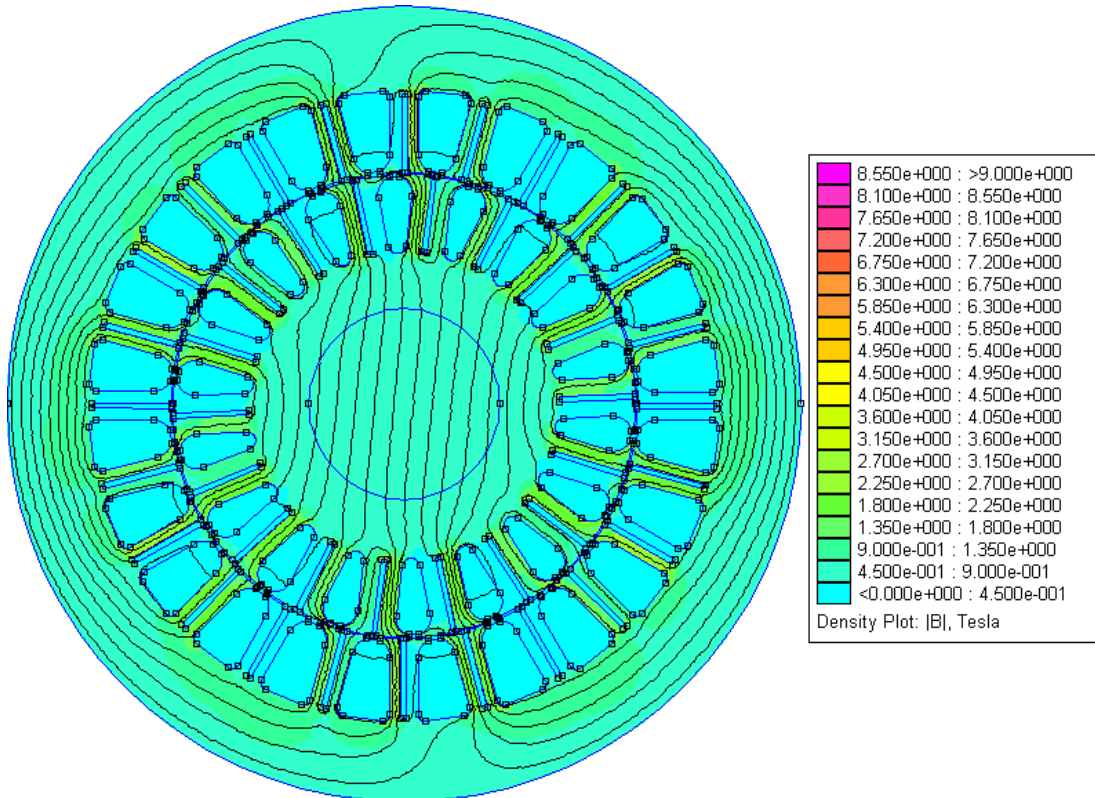
Şekil E.2. 15 mm yarık derinliği 0.5 mm yarık genişliğindeki orijinal motor modelinin alan dağılımı



Şekil E.3. Yeni tasarlanan +2mm motor modelinin alan dağılımı

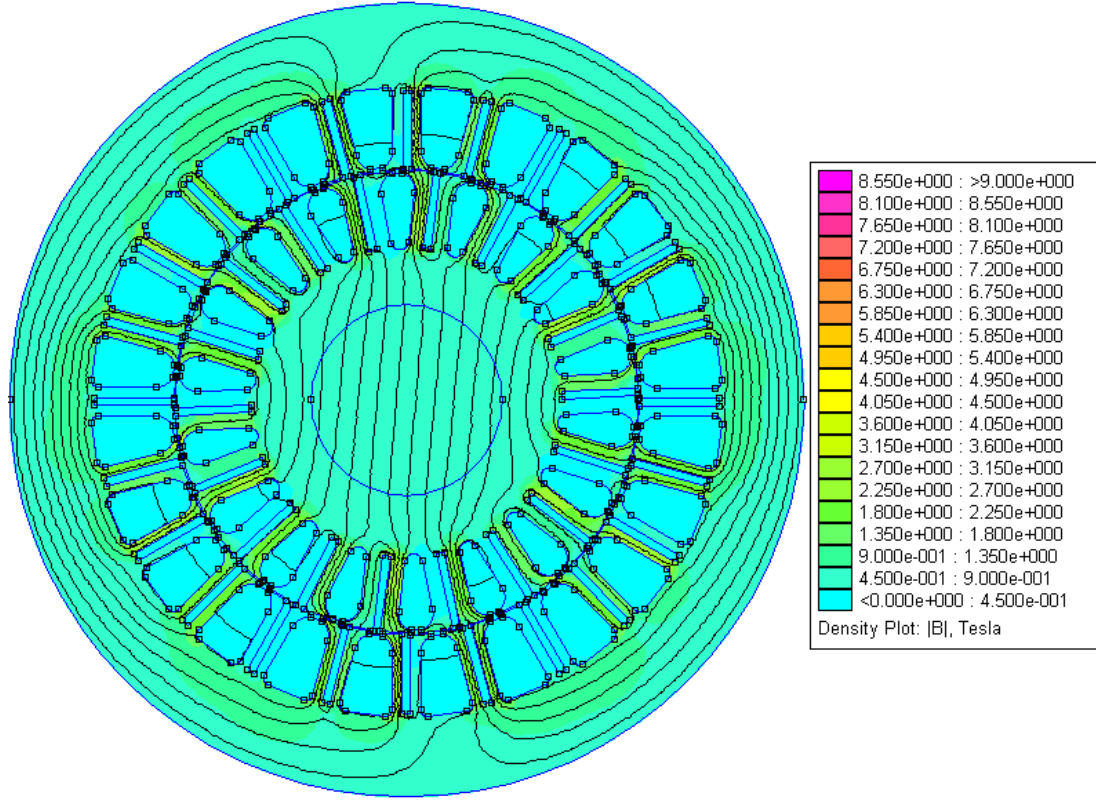


Şekil E.4. Yeni tasarlanan +5mm motor modelinin alan dağılımı

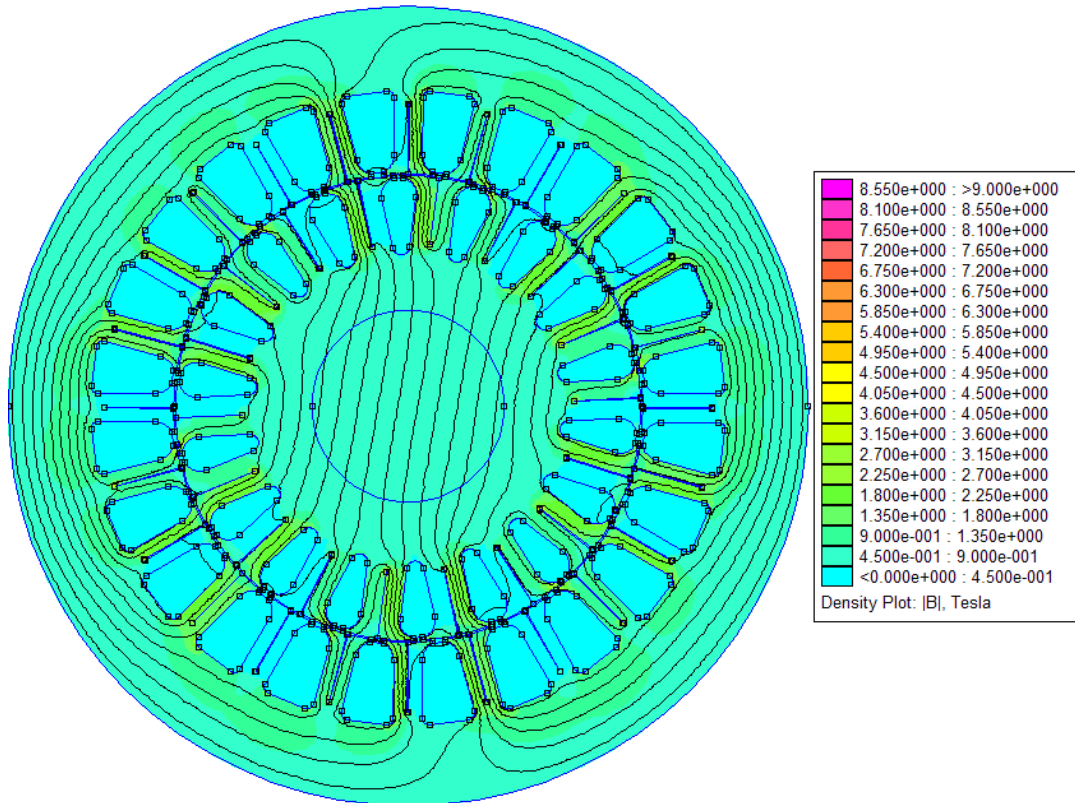


Şekil E.5. 15 mm yarık derinliği 1 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı





Şekil E.6. 15 mm yarık derinliği 1.5 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı



Şekil E.7. 13.125 mm yarık derinliği 0.15 mm yarık genişliğindeki motor modelinin alan dağılımı

## ÖZGEÇMİŞ

Asım Gökhan YETGİN 1979 yılında Kütahya’ da doğdu. İlkokulu Cumhuriyet İlkokulu’ nda, ortaokulu Atatürk Lisesi’ nde, liseyi Kütahya Lisesi’ nde tamamladı. 1997 yılında Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’ nde başladığı lisans eğitimini 2001 yılında tamamladı ve aynı yıl Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında yüksek lisans eğitimine başladı. 2004 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü’ nde doktora eğitimine başladı.

2001 yılında Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Makinaları Anabilim Dalı’ nda araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen Sakarya Üniversitesi’ nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.