

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MAKİNALARDA UZAY HARMONİKLERİNİ VE ETKİLERİNİ
AZALTMAYA YÖNELİK YÖNTEMLERİN SONLU ELEMANLAR İLE
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmethan HANEDAR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MAKİNALARDA UZAY HARMONİKLERİNİ VE ETKİLERİNİ
AZALTMAYA YÖNELİK YÖNTEMLERİN SONLU ELEMANLAR İLE
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İsmethan HANEDAR
(504171026)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Derya Ahmet KOCABAŞ

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **504171026** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İsmethan HANEDAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ASENKRON MAKİNALARDA UZAY HARMONİKLERİNİ VE ETKİLERİNİ AZALTMAYA YÖNELİK YÖNTEMLERİN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üy. Derya Ahmet KOCABAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ KIRIŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Haziran 2020
Savunma Tarihi : 28 Temmuz 2020





Aileme ve arkadaşlarıma,



ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteğini ve bilgisini asla esirgemeyen tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üy. Derya Ahmet KOCABAŞ hocama sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Lisans eğitimimden itibaren benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve sürekli yanımda olan sayın Dr. Mehmet Onur GÜLBAHÇE hocama teşekkürlerimi sunarım. Tez yazım döneminde maddi ve manevi olarak beni destekleyen Araş. Gör. Halil İbrahim ÜÇKOL'a, Araş. Gör. Ali ÖZAN'a ve diğer tüm İTÜ Elektrik Mühendisliği Araştırma Görevlilerine çok teşekkür ederim.

Sevgi ve hoşgörü ile bana sürekli destek olan çok değerli annem Serap HANEDAR'a, babam Hüseyin HANEDAR'a ve ablam Merve HANEDAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Haziran 2020

İsmethan Hanedar
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. ASENKRON MOTOR.....	7
2.1 Çalışma Prensibi.....	7
2.2 Eşdeğer Devre Parametreleri.....	10
2.3 Sargı Faktörü	12
2.3.1 Dağılıma Faktörü	12
2.3.2 Kirişlenme Faktörü	13
3. UZAY HARMONİKLERİ	15
4. FARKLI TİP SARGILARIN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ	21
4.1 Klasik Sargılı Asenkron Motor	21
4.1.1 Manyetik analizi.....	25
4.1.2 Sargı faktörü.....	27
4.1.3 Uzay harmonikleri.....	30
4.2 12/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı Asenkron Motor	31
4.2.1 Manyetik analizi.....	31
4.2.2 Sargı faktörü.....	35
4.2.3 Uzay harmonikleri.....	37
4.3 13/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı Asenkron Motor	39
4.3.1 Manyetik analizi.....	39
4.3.2 Sargı faktörü.....	43
4.3.3 Uzay harmonikleri.....	45
4.4 İç İç Geçmiş Sargılı Asenkron Motor	47
4.4.1 Manyetik analizi.....	48
4.4.2 Sargı faktörü.....	51
4.4.3 Uzay harmonikleri.....	53
4.5 12/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı Asenkron Motor	54
4.5.1 Manyetik analizi.....	56
4.5.2 Sargı faktörü.....	58
4.5.3 Uzay harmonikleri.....	60
4.6 13/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı Asenkron Motor	61

4.6.1 Manyetik analizi.....	61
4.6.2 Sargı faktörü.....	65
4.6.3 Uzay harmonikleri.....	67
4.7 10/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı Asenkron Motor	69
4.7.1 Manyetik analizi.....	70
4.7.2 Sargı faktörü.....	73
4.7.3 Uzay harmonikleri.....	75
4.8 Basamaklı Sargılı Asenkron Motor	76
4.8.1 Manyetik analizi.....	78
4.8.2 Sargı faktörü.....	80
4.8.3 Uzay harmonikleri.....	82
4.9 Oluk Konumları ve Sarım Sayısı Optimize Edilmiş Asenkron Motor.....	84
4.9.1 Manyetik analizi.....	84
4.9.2 Sargı faktörü.....	88
4.9.3 Uzay harmonikleri.....	90
5. ANALİZLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	93
5.1 Manyetik Analizlerin Karşılaştırılması	93
5.2 Sargı Faktörlerinin Karşılaştırılması	95
5.3 Uzay Harmoniklerinin Karşılaştırılması.....	98
6. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ	109

KISALTMALAR

MMK	: Manyetomotor Kuvvet
SEY	: Sonlu Elemanlar Analizi
THB	: Toplam Harmonik Bozunum





SEMBOLLER

p	: Kutup çifti sayısı
m	: Faz sayısı
ω	: Açısal frekans
t	: Zaman
n_s	: Senkron hız
f_1	: Faz yükü
n_r	: Rotor hızı
s	: Kayma
Q_s	: Stator oluk sayısı
q	: Bir faz ve bir kutup altında kalan oluk sayısı
γ_{geo}	: Geometrik açı
γ_e	: Elektriksel açı
k_w	: Sargı faktörü
k_d	: Dağılma faktörü
k_p	: Kirişlenme faktörü
β	: Kirişlenme açısı
R_s	: Stator sargı direnci
X_s	: Stator kaçak reaktansı
R_{fe}	: Demir direnci
X_m	: Mıknatıslanma reaktansı
R_r	: Stator indirgenmiş rotor direnci
X_r	: Stator indirgenmiş rotor kaçak reaktansı
ω_r	: Açısal rotor hızı
e	: Uzay harmoniği mertebesi
E	: Endüklenen gerilim
F	: Ampersarım
Φ	: Manyetik akı
P_n	: Nominal güç
V_n	: Nominal gerilim
η	: Verim

$\cos\phi$	: Güç faktörü
D_i	: Stator dış çapı
D_1	: Rotor dış çapı
g	: Hava aralığı uzunluğu
L	: Uzunluk



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Asenkron makinanın çalışma durumuna göre kayma ile ilişkisi.....	9
Çizelge 3.1 : Uzay harmoniklerinin statora göre hızları [11].	16
Çizelge 3.2 : 3 fazın $\omega t=0$ anındaki akım değerleri.	18
Çizelge 4.1 : Klasik sargılı motorun plaka değerleri.	21
Çizelge 4.2 : Klasik sargılı motorun temel büyüklükleri.	22
Çizelge 4.3 : Motorda kullanılan malzemeler.....	22
Çizelge 4.4 : Klasik sargılı asenkron motorun iletken matrisi.....	23
Çizelge 4.5 : Klasik sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	28
Çizelge 4.6 : Klasik sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.	30
Çizelge 4.7 : 12/15 oranında kırılenmiş sargının iletken matrisi.	32
Çizelge 4.8 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	36
Çizelge 4.9 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.	38
Çizelge 4.10 : 13/15 oranında kırılenmiş sargının iletken matrisi.	40
Çizelge 4.11 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	44
Çizelge 4.12 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.	46
Çizelge 4.13 : İç içe geçmiş sargının iletken matrisi.	47
Çizelge 4.14 : İç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.....	51
Çizelge 4.15 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.....	53
Çizelge 4.16 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.	54
Çizelge 4.17 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	58
Çizelge 4.18 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.	61
Çizelge 4.19 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.	62
Çizelge 4.20 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	66
Çizelge 4.21 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.	68
Çizelge 4.22 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.	69
Çizelge 4.23 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	73
Çizelge 4.24 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.	76
Çizelge 4.25 : Basamaklı sargının iletken matrisi.	77

Çizelge 4.26 : Basamaklı sargılı asenkron motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	81
Çizelge 4.27 : Basamaklı sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.	83
Çizelge 4.28 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargının iletken matrisi.	85
Çizelge 4.29 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.	89
Çizelge 4.30 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun uzay harmonik değerleri.....	91
Çizelge 5.1 : Analiz edilen motorların moment, dalgalılık ve verim değerleri.	93
Çizelge 5.2 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için sargı faktörleri.	96
Çizelge 5.3 : Analiz edilen motorların THB değerleri.....	99
Çizelge 5.4 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için uzay harmonik değerleri.	100
Çizelge 5.5 : Analiz edilen asenkron motorların temel bileşene göre oranlanmış ilk 61 harmonik için uzay harmonik değerleri.	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : $2p=2$ kutuplu motorun sargı yerleşimi.	7
Şekil 2.2 : Asenkron motorun eşdeğer devresi.	10
Şekil 2.3 : Asenkron motor moment-hız eğrisi [24].	11
Şekil 2.4 : $q=5$ için bobinlerde endüklenen gerilimlerin vektörel gösterimi [25].	13
Şekil 3.1 : Klasik sargı yapısında bir faz alan şeklinin 1 A için genel görünümü [11].	15
Şekil 3.2 : Uzun harmoniklerinin etkilerini içeren eşdeğer devre [11].	17
Şekil 3.3 : (a) R fazının, (b) S fazının, (c) T fazının ve (d) toplam ampersarım dalga şekli.	19
Şekil 4.1 : M27_24G manyetik malzemesinin B-H eğrisi.	22
Şekil 4.2 : Steel_1010 mil malzemesinin B-H eğrisi.	22
Şekil 4.3 : Klasik sargılı motorun modeli.	25
Şekil 4.4 : Klasik sargılı motorun ağ yapısı.	25
Şekil 4.5 : Klasik sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	26
Şekil 4.6 : Klasik sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	26
Şekil 4.7 : Klasik sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	27
Şekil 4.8 : Klasik sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	30
Şekil 4.9 : Klasik sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.	31
Şekil 4.10 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun modeli.	33
Şekil 4.11 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun ağ yapısı.	34
Şekil 4.12 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	34
Şekil 4.13 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	35
Şekil 4.14 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	35
Şekil 4.15 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	38
Şekil 4.16 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı. ...	39
Şekil 4.17 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun modeli.	41
Şekil 4.18 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun ağ yapısı.	42
Şekil 4.19 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	42
Şekil 4.20 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	43
Şekil 4.21 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	43
Şekil 4.22 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	45
Şekil 4.23 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı. ...	46

Şekil 4.24 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun modeli.	49
Şekil 4.25 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun ağ yapısı.	49
Şekil 4.26 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	50
Şekil 4.27 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	50
Şekil 4.28 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	51
Şekil 4.29 : İç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	53
Şekil 4.30 : İç içe geçmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.	54
Şekil 4.31 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun modeli.	56
Şekil 4.32 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ağ yapısı.	56
Şekil 4.33 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	57
Şekil 4.34 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	57
Şekil 4.35 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	58
Şekil 4.36 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	60
Şekil 4.37 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.	60
Şekil 4.38 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun modeli.	63
Şekil 4.39 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ağ yapısı.	64
Şekil 4.40 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	64
Şekil 4.41 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	65
Şekil 4.42 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	65
Şekil 4.43 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	67
Şekil 4.44 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.	68
Şekil 4.45 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun modeli.	71
Şekil 4.46 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ağ yapısı.	71
Şekil 4.47 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	72
Şekil 4.48 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	72
Şekil 4.49 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	73
Şekil 4.50 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	75
Şekil 4.51 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.	75
Şekil 4.52 : Basamaklı sargılı motorun modeli.	78
Şekil 4.53 : Basamaklı sargılı motorun ağ yapısı.	79
Şekil 4.54 : Basamaklı sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	79
Şekil 4.55 : Basamaklı sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.	80
Şekil 4.56 : Basamaklı sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.	80

Şekil 4.57 : Basamaklı sargılı asenkron motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	83
Şekil 4.58 : Basamaklı sargılı asenkron motorun uzay harmonik dağılımı.	84
Şekil 4.59 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun modeli.	86
Şekil 4.60 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun ağ yapısı.	87
Şekil 4.61 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	87
Şekil 4.62 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun manyetik akı çizgileri.....	88
Şekil 4.63 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun moment-zaman eğrisi.....	88
Şekil 4.64 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.	91
Şekil 4.65 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun uzay harmonik dağılımı.	92
Şekil 5.1 : Analiz edilen motorların moment-zaman eğrisi.	94
Şekil 5.2 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için sargı faktörleri dağılımı.	97
Şekil 5.3 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için uzay harmoniklerinin dağılımı.	101
Şekil 5.4 : Analiz edilen asenkron motorların temel bileşene göre oranlanmış uzay harmoniklerinin yüzdesel dağılımı.	103



ASENKRON MAKİNALARDA UZAY HARMONİKLERİNİ VE ETKİLERİNİ AZALTMAYA YÖNELİK YÖNTEMLERİN SONLU ELEMENLAR İLE ANALİZİ

ÖZET

Günümüzde azalan fosil kaynakları ve çevre kirliliği gibi nedenlerle enerji verimliliği önemli bir konu haline gelmiştir. Üretilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmı asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Bu sebeple endüstride çok yaygın bir şekilde kullanılan asenkron motorların performansının geliştirilmesi önemli bir araştırma konusu olmuştur.

Asenkron motorun performansını etkileyen önemli parametrelerden birisi de harmoniklerdir. Bu harmoniklerden birisi olan zaman harmoniği güç elektroniği alanındaki gelişmeler ile etkileri oldukça azaltılmıştır. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte yeni nesil elektrik motoru sürücüleri harmoniği azaltılmış saf sinüse yakın bir akım ile asenkron motoru besleyerek zaman harmoniklerinin genliklerini azaltarak motor performansına olan negatif etkilerini de azaltmak mümkün olmuştur.

Uzay harmonikleri sargının stator uzayına sinüzoidal bir şekilde dağıtılamamasından dolayı oluşur. Manyetomotor kuvvet dağılımı basamaklı bir yapıya sahip olmasından ötürü harmonik bileşenleri vardır. Asenkron motorlar saf sinüzoidal bir gerilim ile beslenseler dahi ampersarım dalga şekli harmonikli bir yapıya sahiptir. Oluk konumlarına, sarım sayısına ve sargının akım değerine bağlı olarak değiştiği için hem zamana hem de geometriye bağlı olarak değişirler.

Asenkron makinanın yapısı gereği oluşan ampersarım dalga şeklinin simetrik olmasından dolayı tek katsayılı uzay harmonikleri oluşurken çift katsayılı harmonikler oluşmaz. 3 fazlı bir asenkron motorda 3 ve 3'ün katı olan uzay harmonikleri döner bir manyetik alan oluşturmadığı için dikkate alınmaz. Bu nedenle negatif etkisi en yüksek olan uzay harmonikleri 5. ve 7. harmoniklerdir. Uzay harmonikleri asenkron motorda moment titreşimi, ek kayıplar ve kalkış sırasında vuruntulu çalışma gibi etkileri vardır.

Uzay harmoniklerinin etkisi azaltmak için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin çoğunda sargı yapısını modifiye edilerek uzay harmonikleri elimine edilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte oluk konumlarını ve oluk boyutlarını optimize ederek uzay harmoniklerini azaltan çalışmalar da mevcuttur.

Bu tez kapsamında literatürde bulunan ve uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş 8 farklı sargı tipi incelenmiştir. Bu incelenen sargı tipleri 12/15 ve 13/15 oranında kırılenmiş sargı modeli, iç içe geçmiş sargı modeli, 12/15, 13/15 ve 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargı modeli, basamaklı sargı modeli ve oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelidir. Bu sargı tiplerini karşılaştırmak için klasik sargılı bir asenkron motor referans olarak seçilmiştir.

Referans motor olarak 3 fazlı, 90 kW, 2 kutuplu ve 60 oluklu bir asenkron motor seçilmiştir. Belirlenen uzay harmoniğini azaltan 8 farklı sargı modeli referans motora

uygulanarak tasarımları yapılmıştır. Bu sırada karşılaştırılmanın makul olması için sargı modeli haricinde motorun stator dış çapı, stator iç çapı ve uzunluğu gibi temel büyüklükleri sabit kalmıştır. Stator oluk yapısı ise sargı modelinin yapısı gereği gerekmedikçe değiştirilmemiştir. Rotor dış çapı, iç çapı, oluk sayısı, oluk alanları bütün tasarımlarda aynı kalmıştır. Tasarlanan motorlar ANSYS Maxwell programı kullanılarak sabit güç altında sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda her bir motorun verimi, manyetik akı yoğunluğu dağılımı, manyetik akı çizgileri, hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni ve motorun moment eğrisi elde edilmiştir. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılarak uzay harmoniklerinin değerleri ve toplam harmonik bozumları hesaplanmıştır. Kompleks sargı faktörü yöntemi kullanılarak incelenen sargıların uzay harmoniklerine ait sargı faktörleri hesaplanmıştır.

İncelenen uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş 8 farklı sargı modeline sahip asenkron motor ile referans motor analiz edilmiştir. Analiz sonucu her bir motorun hava aralığı akı yoğunluğunun radyal bileşeni elde edilip ilk 61 harmonik için Fourier serisine açılmıştır. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun teğetsel bileşenini dikkate almak için moment dalgalılığı incelenmiştir. Kompleks sargı faktörü yöntemi ile tasarlanan bütün motorların sargı faktörleri ilk 61 harmonik için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiş ve yorumlanmıştır. Motorda etkisi en yüksek olan 5. ve 7. uzay harmoniklerinin en çok baskılandığı sargı tipleri belirtilmiştir. Böylelikle farklı sargı tiplerinin motorun uzay harmoniklerine, sargı faktörüne, moment dalgalılığına ve verime olan etkisi karşılaştırılmalı olarak incelenmiş olup literatüre katkıda bulunmuştur.

.

ANALYSIS OF METHODS TO REDUCE SPACE HARMONICS AND ITS EFFECTS IN ASYNCHRONOUS MACHINES WITH FINITE ELEMENTS

SUMMARY

Nowadays, energy efficiency has become an important issue due to decreasing fossil resources and environmental pollution. Most of the electrical energy produced is consumed by asynchronous motors. For this reason, improving the performance of asynchronous motors, which are widely used in the industry, has been an important research topic.

One of the important parameters that affect the performance of the asynchronous motor is harmonics. Time harmonics, one of these harmonics, has been significantly reduced with the developments in the field of power electronics. With the advances in semiconductor technology, new generation electric motor drivers have been able to reduce the negative effects of the time harmonics on motor performance by feeding the asynchronous motor with a current close to the pure sinus with reduced harmonics, reducing the amplitudes of the time harmonics.

Space harmonic occurs because the winding cannot be distributed to the stator space in a sinusoidal way. Since the magnetomotor force distribution has a step structure, it has harmonic components. Asynchronous motors have a harmonic structure with an ampere-turn waveform even if they are fed with a pure sinusoidal voltage. They vary depending on both time and geometry, as they vary depending on the slot locations and the current value of the winding.

Due to the structure of the asynchronous machine, since the ampere-turn waveform is symmetrical, single coefficient space harmonics occur while double coefficient harmonics do not occur. In a 3-phase asynchronous motor, space harmonics with the coefficient of 3 and 3 times are not taken into account, as they do not create a rotating magnetic field. Therefore, the harmonics with the greatest negative influence are the 5th and 7th harmonics. Space harmonics have effects such as torque vibration, additional losses and knock-on operation during starting.

Many methods have been developed to reduce the effect of space harmonics. In most of these methods, space harmonics are tried to be eliminated by modifying the winding structure. However, there are also studies that reduce space harmonics by optimizing slot positions and slot dimensions.

Within the scope of this thesis, 8 different types of windings developed to reduce space harmonics in the literature are examined. These inspected winding types are ratio of 12/15 and 13/15 chorded winding model, interspersed winding model, ratio of 12/15, 13/15 and 10/15 chorded interspersed winding model, graded winding and winding model with optimized slot positions and number of turns. To compare these winding types, a classic winding asynchronous motor is selected as reference motor.

As the reference motor, a 3-phase, 90 kW, 2-pole and 60-slots asynchronous motor was chosen. 8 different winding models that reduce the space harmonics are applied

to the reference motor and designed. In the meantime, except for the winding model, the basic dimensions of the motor such as the stator outer diameter, stator inner diameter and length remained constant in order to be reasonable to compare. The stator slot structure has not been changed unless necessary due to the structure of the winding model. Rotor outer diameter, inner diameter, slot number, slot areas remained the same in all designs. The designed motors were analyzed by using ANSYS Maxwell program under the constant power by using the finite element method. As a result of the finite element analysis, efficiency, the magnetic flux density distribution, magnetic flux lines, the radial component of the air gap magnetic flux density and the motor's torque curve of each motor are obtained. By applying Fourier series expansion to the air gap magnetic flux density, the values of space harmonics are calculated. The winding factors of the space harmonics of the each winding examined were calculated using the complex winding factor method.

Asynchronous motor with 8 different winding models developed to reduce the space harmonics was analyzed with the reference motor. As a result of the analysis, the radial component of the air gap flux density of each motor was obtained and calculated by the Fourier series for the first 61 harmonics. Torque ripple was investigated to take into account the tangential component of the air gap magnetic flux density. The winding factors of all motors designed by the complex winding factor method were calculated for the first 61 harmonics. The results obtained are given comparatively and interpreted. The types of windings in which the 5th and 7th space harmonics that have the highest impact on the motor are most reduced are specified. Thus, the effects of different winding types on the motor's space harmonics, winding factor, torque ripple and efficiency were examined comparatively and contributed to the literature.

1. GİRİŞ

Sanayinin gelişmesiyle birlikte birçok alanda faydalanılan elektrik motorlarına olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Asenkron motorlar kolay üretim, maliyet ve bakım gibi avantajlarıyla endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Üretilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmını tüketen asenkron motorların performansının iyileştirilmesi enerji verimliliği bakımından oldukça önem teşkil etmektedir.

Harmonikler, asenkron motorun performansını olumsuz yönde etkileyen etkenlerden birisidir. Besleme geriliminin sinüs formundan uzaklaşmasıyla oluşan zaman harmonikleri motor performansını azaltmaktadır. Gelişen güç elektroniği uygulamaları ile birlikte, yeni nesil motor sürücülerini saf sinüs formuna çok yakın bir gerilim ile motoru besleyerek zaman harmoniklerinin derecesini ötelerler. Bu sayede zaman harmoniklerinin oluşturdukları olumsuz etkiler azaltılmaktadır.

Asenkron motorlar saf sinüs formunda bir gerilim ile beslenseler dahi sargının motor uzayına sinüzoidal bir şekilde dağıtılamamasından dolayı uzay harmonikleri oluşur. Motorun geometrik yapısından dolayı bu harmoniklerin oluşması engellenemez fakat etkileri bastırılabilir. Faz sargıları statorda bulunan oluklara dağıtılmasıyla elde edilen manyetomotor kuvveti (MMK) dağılımı basamaklı bir yapıya sahiptir. MMK dalga şekli yapısı gereği simetrik olduğundan çift katsayılı harmonikleri içermez. 3 fazlı bir asenkron motorda 3 ve 3'ün katı olan uzay harmonikleri bir döner manyetik alan oluşturmadıkları için dikkate alınmazlar. Oluşan uzay harmonikleri k bir tamsayı olmak üzere $6k \pm 1$ şeklinde ifade edilir. Bu harmoniklerden derecesi en düşük olan 5. ve 7. uzay harmonikleri motorda etkisi en yüksek olan harmoniklerdir.

Uzay harmoniklerinin makinada moment titreşimi, ilave kayıplar, manyetik ses ve kalkış sırasında vuruntulu çalışma gibi negatif etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle uzay harmoniklerini azaltmak motor performansının iyileştirilmesini sağlamaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Uzay harmoniklerini azaltmak için literatürde birçok yöntem belirtilmiştir. Ancak bu yöntemlerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmamıştır. Bu tez çalışması kapsamında, literatürde bulunan uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş 8 farklı sargı yapısı karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bu sargı yapılarını karşılaştırmak için klasik sargılı, 3 fazlı, 90 kW gücünde, 2 kutuplu ve 60 oluklu bir asenkron motor referans olarak seçilmiştir. Belirlenen 8 farklı sargı modeli referans motora uygunlanmış olup bu sırada referans motorun stator dış çap, iç çap ve uzunluk gibi temel büyüklükleri değiştirilmemiştir. Stator olukları sargı yapısı gereği gerekmedikçe sabit kalmıştır. Rotor tasarımı bütün modellerde değiştirilmeksizin aynı kalmıştır. Tasarlanan farklı sargı tipine sahip asenkron motorlar ANSYS Maxwell programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile sabit güç altında analiz edilmiştir. Motorların her birinin kompleks sargı faktörleri ilk 61 harmonik için hesaplanmıştır. Analiz sonucu elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni Fourier serisine açılarak ilk 61 harmonik için uzay harmonikleri hesaplanmıştır. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun teğetsel bileşenini dikkate almak için moment dalgalılığı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile birlikte uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş 8 farklı sargı modeline sahip asenkron motorun ve klasik sargılı asenkron motorun sonuçları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Literatürde bulunan ama performanslarının birbirleriyle karşılaştırılmadığı sargı modelleri bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Uzay harmoniklerinin varlığı çok uzun zamandır bilinmektedir. Literatürde uzay harmonikleri azaltmaya, harmoniklerinin analizine ve yorumlanmasına yönelik bir çok çalışma mevcuttur.

B. Hague tarafından 1917 yılında yapılan çalışmada çok fazlı sargıların MMK dağılımını matematiksel olarak modellenmiş ve farklı sargı tipleri için uzay harmoniklerini analiz etmiştir [1].

1922 yılında K. L. Hansen yapmış olduğu çalışmada uzay harmoniklerinin oluşturduğu döner manyetik alanların motorda endükledikleri momentler ile ilgili

alışmalar yapmıştır. 5. ve 7. uzay harmoniklerinin oluşturduğu momentlerin motordaki etkisini incelemiştir [2].

R. F. Burbidge, 1958 yılında yaptığı çalışmasında bir veya çok fazlı sargıların uzay harmoniklerini hesaplamak için yeni ve daha hızlı bir yöntem geliştirmiştir [3].

I. R. Smith ve J. M. Layton 1963 yılında yaptıkları çalışmalarında MMK dalga formunun harmoniklerini azaltmak için yeni bir sargı modeli geliştirmişlerdir. Bu sargı modeli çift tabakalı olup oluklardaki sarım sayıları sabit değildir. Oluklardaki sarım sayılarını uzay harmonikleri elimine edecek şekilde optimize etmişlerdir. Geliştirdikleri yeni sargı modelinin analizi sonucu uzay harmoniklerinin etkisinin azaldığını gözlemlemişlerdir [4]. Sarım sayısı optimize edilmiş olan bu sargı modeli basamaklı bir yapıda olup tez kapsamında incelenen sargı modellerinden birini oluşturmaktadır.

B. J. Chalmers tarafından 1964 yılında yapılan çalışmada yeni bir sargı modelinin analizi yapılmıştır. İ içe geçmiş (interspersed) sargı olarak adlandırılan bu sargı yapısı, bir faz ve bir kutup altında bulunan olukların başındaki ve sonundaki olukların komşu olduğu diğer faza ait oluklarla yer değiştirilmesi ile elde edilir. İ içe geçmiş sargının tek tabakalı ve çift tabakalı kirişlenmiş olarak analizlerini yapılmıştır [5]. İ içe geçmiş sargı modeli bu tez kapsamında incelenen sargı modellerinden biridir.

A. Hughes tarafından 1970 yılında yapılan çalışmada MMK dağılımını sinus formuna yakınlılaştırmak için bir faz bandında bulunan sargıların bir kısmını yıldız bir kısmının da üçgen bağlantı şekline getirerek incelemeler yapılmıştır. Bir faz ve bir kutup altında bulunan oluk sayılarının farklı değerlerinde analizler yapılmış olup oluk sayısının artmasıyla daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür [6].

1983 yılında H. R. Fudeh ve C. M. Ong tarafından yapılan çalışmada MMK dalga formuna ait harmonikleri de dikkate alarak asenkron motorun dinamik modelini geliştirmişlerdir [7].

J. Stepina 1987 yılında yapmış olduğu çalışmasında asimetrik sargıların sargı faktörlerini ve uzay harmoniklerini hesaplamak için bir yöntem geliştirmiştir. Oluk konumlarını, iletken dağılımını ve faz akımlarını matris formuna getirerek motorun kompleks sargı faktörünü ve uzay harmoniklerini hesaplamıştır [8].

1998 yılında J. Y. Chen ve C. Z. Chen yaptıkları çalışmada alternatif akım makinaları için yeni bir sargı modeli ortaya koymuşlardır. Tek tabakalı olan bu sargı kendi içinde

yıldız-üçgen karışık bağlanarak uzay harmonikleri azaltılmıştır. 2 farklı prototip ile motor deneysel olarak analiz edilmiş ve geleneksel sargılı motora göre avantajları belirtilmiştir [9].

D. A. Kocabaş 2005 yılında yaptığı çalışmasında alternatif akım makinalarında uzay harmoniklerinin etkileri azaltmak için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde statorda bulunan olukların konumunu ve oluklardaki sarım sayısını Newton-Raphson yöntemi ile optimize ederek uzay harmoniklerini azaltmıştır [10,11]. Bu yöntem ile 3 fazlı, 36 oluklu ve 2 kutuplu bir asenkron motor tasarlamış ve SEY ile analiz ederek klasik sargılı motor ile karşılaştırmıştır [12]. E. Soydan 2017 yılında bu yöntemi kullanılarak 3 fazlı, 2 kutuplu ve 60 oluklu, O. K. Öztürk ise 48 oluklu asenkron motor tasarlamış ve SEY ile analiz etmiştir [13,14]. Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş bu yöntem tezde incelenen sargı modellerinden birini oluşturmaktadır.

2006 yılında M. Centner ve R. Hanitsch tarafından yapılan çalışmada mıknatıslı makinalarda uzay harmoniklerini optimize eden bir yöntem sunmuşlardır. Sarım sayısını değiştirmeden oluk yapısını değiştirerek uzay harmoniklerini azaltmışlardır [15].

A. Tassarolo ve arkadaşları tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada 3 fazlı asenkron motorlarda hava aralığı uzay harmoniğini azaltmak için yeni bir sargı tipi sunmuşlardır. Çift tabakalı olan bu sargı modelinde eşit sarımlı olmayan bobinler kullanılarak SEY ile analiz etmişlerdir [16].

2012 yılında M. Skalka ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada asenkron motorlarda MMK dalga formunun harmoniklerini sargı yapısını değiştirmeden azaltmışlardır. Oluk ağız genişliğini optimize ederek uzay harmoniklerinin etkileri düşürülmüştür [17].

K. Tsujikawa ve arkadaşları tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada kesirli oluklu sargıların ürettiği uzay harmoniklerini azaltmak için yeni bir sargı modeli önerilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizi ve deneysel analiz sonucu düşük dereceli uzay harmoniklerinin azaldığı gösterilmiştir [18].

Asgharpour-Alamdari ve arkadaşları 2017 yılında yaptığı çalışmalarda MMK dağılımının harmonikleri azaltmak için 3 tabakalı sargı modeli geliştirmiş ve uygulamalı olarak analiz etmişlerdir [19].

2019 yılında N. Tang ve I. Brown tarafından yapılan çalışmada elektrik makinası sargılarında aile olgusundan bahsedilmiştir. Aynı aile grubuna ait olan harmoniklerin derecesi arttıkça genliklerin ters oranda azaldığından ve aynı aile grubuna ait olan harmoniklerin sargı faktörlerinin hepsinin aynı olduğundan bahsedilmiştir. Aile olgusu ile motorda yapılan değişikliklerin MMK harmoniklerine olan etkisinin öngörülebilir olduğu söylenmiştir. Bu yöntem ile 5. ve 7. uzay harmoniklerini azaltmak için sargı yapısı modellenmiş ve analiz edilmiştir [20].

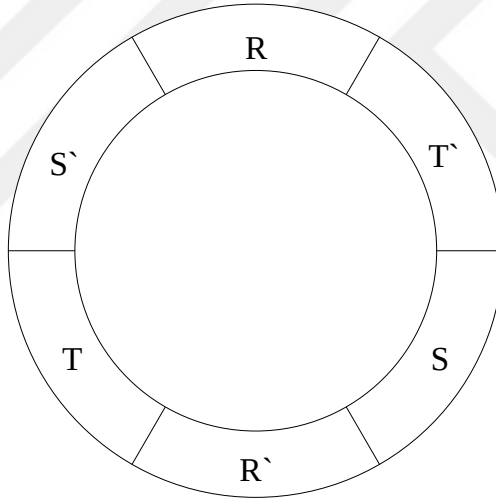




2. ASENKRON MOTOR

2.1 Çalışma Prensipleri

Genellikle 3 fazlı olarak üretilen asenkron motorlar bir alternatif akım makinasıdır. Duran kısım olan statorda 3 fazlı sargılar bulunur. Bu sargılar aralarında geometrik olarak 120° olacak şekilde stator oluklarına dağıtılır. 3 fazlı bir gerilim kaynağından beslenildiğinde makinanın hava aralığında döner bir manyetik alan oluşur. Şekil 2.1’de her bir faza ait olan bobinler R, S, T ile gösterilmiş olup, dönüş iletkenleri ise R', S', T' ile gösterilmiştir [21,22].



Şekil 2.1 : 2p=2 kutuplu motorun sargı yerleşimi.

R, S, T ile gösterilen faz sargılarının her birinin N adet sarımı olduğu düşünülürse her faz için sarım sayısı konuma (θ) bağlı olarak ifadesi sırasıyla denklem 2.1, 2.2 ve 2.3’te gösterilmiştir.

$$N_R(\theta) = N \sin(\theta) \quad (2.1)$$

$$N_S(\theta) = N \sin(\theta - 120^\circ) \quad (2.2)$$

$$N_T(\theta) = N \sin(\theta - 240^\circ) \quad (2.3)$$

R, S, T fazları 3 fazlı aralarında 120° olan gerilimle beslendiği için bu fazlardan akan akımlar arasında da 120° fark olacaktır. Bu nedenle I_m akımın maksimum değeri ve açısal frekansı ω ise i_R , i_S ve i_T faz akımlarının zamana (t) bağlı olarak sırasıyla ifadesi denklem 2.4, 2.5 ve 2.6'da gösterilmiştir.

$$i_R(t) = I_m \cos \omega t \quad (2.4)$$

$$i_S(t) = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.5)$$

$$i_T(t) = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.6)$$

Bir fazın ürettiği ampersarım o fazın akımı ve sarım sayısının çarpılması ile elde edilir. Motorda üretilen toplam ampersarım ise her fazın ürettiği ampersarımın toplanmasıyla elde edilir.

$$F_\Sigma(\theta, t) = F_R(\theta, t) + F_S(\theta, t) + F_T(\theta, t) \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de $F_\Sigma(\theta, t)$ toplam ampersarım fonksiyonu, $F_R(\theta, t)$, $F_S(\theta, t)$, $F_T(\theta, t)$ ise sırasıyla R, S, T fazlarının ürettiği ampersarım fonksiyonlarıdır. Denklem 2.7'deki fazların sarım sayısı ve akım eşitlikleri yerine yazılarak toplam ampersarım fonksiyonu denklem 2.8'deki gibi elde edilir.

$$F_\Sigma(\theta, t) = \frac{3}{2} N I_m \sin(\theta - \omega t) \quad (2.8)$$

Denklem 2.9'da toplam ampersarım fonksiyonu fazörel olarak ifade edilmiştir.

$$F_\Sigma = \frac{3}{2} N I_m e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9 incelendiği zaman genliği sabit olan yönü ise zamanla değişen bir alanı ifade eder ve böylece motorda döner bir manyetik alan elde edilmiş olur. Bu döner alanın dönüş hızına senkron hız (n_s) denir. Denklem 2.10'da görüldüğü gibi senkron hızın ifadesi kutup çifti sayısına (p) ve besleme geriliminin frekansına (f_1) bağlıdır.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.10)$$

Elde edilen bu döner alan rotorda bulunan iletken üzerinde Faraday yasası gereğince bir gerilim endükler. Bu sayede kısa devre edilmiş olan rotor iletkenlerinden bir akım akmaya başlar. Lorentz kuvvet yasasına göre manyetik alan içerisinde bulunan bir iletken den akım akması sonucu o iletkene bir kuvvet etki eder. Bu üretilen kuvvet ile asenkron motorun dönmesi sağlanır [23].

Asenkron motorun dönüş hızı senkron hız değerine ulaşamaz. Bunun nedeni ise asenkron motorun endükleme prensibi ile çalışmasıdır. Eğer ki motor hızı senkron hızı çıkarsa rotorda herhangi bir manyetik akı değişimi olmayacağı için rotor iletkenlerinde gerilim endüklenmez ve kuvvet oluşmaz. Bu yüzden rotorun hızı (n_r) senkron hızdan daha düşük olmak zorundadır. Senkron hız ve rotorun hızının arasındaki farkın senkron hıza oranına kayma (s) denir ve denklem 2.11’de gösterilmiştir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.11)$$

Asenkron makinanın çalışma durumuna göre kayma ile olan ilişkileri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Asenkron makinanın çalışma durumuna göre kayma ile ilişkisi.

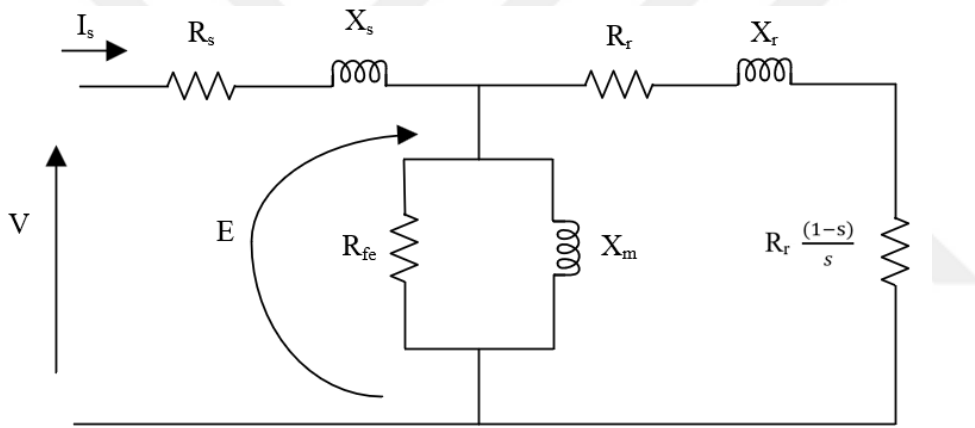
n_r	Kayma	Çalışma Durumu
$n_r > n_s$	$s < 0$	Generatör
$n_r = n_s$	$s = 0$	Teorik Boşta
$0 < n_r < n_s$	$0 < s < 1$	Motor
$n_r = 0$	$s = 1$	Kısa Devre
$n_r < 0$	$s > 1$	Fren

Rotor hızının senkron hızdan büyük olduğu durumda yani generatör çalışma durumunda mekanik enerji elektriksel enerjiye, motor çalışma durumunda ise elektriksel enerji mekanik enerjiye dönüştürülür. Rotor hızının sıfır olduğu durumda yani makina kalkış yaparkenki çalışma durumuna kısa devre çalışma durumu

denir. Makina yüklenmediği zaman rotor hızı teorik olarak senkron hıza eşit sayılabilir, bu çalışma durumuna ise boşa çalışma denir. Makinanın dönüş yönüne ters bir yönde moment üretildiği yani makinanın frenlendiği çalışma durumuna ise fren çalışma denir.

2.2 Eşdeğer Devre Parametreleri

Asenkron motorun bütün fazlarını içeren eşdeğer devresi karmaşık bir yapıya sahiptir. Motorun fazları simetrik olup aralarında sadece elektriksel açı farkı olduğundan bir faz eşdeğer devre üzerinden hesap yapmak işlem kolaylığı sağlamaktadır. Stator ve rotor arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp sadece manyetik olarak bağlıdır. Asenkron motorun eşdeğer devresini elde edebilmek için indirgeme işlemi yapılması gerekmektedir ve genellikle rotor devresi statora devresine indirgenir.



Şekil 2.2 : Asenkron motorun eşdeğer devresi.

Şekil 2.2'deki bir faz eşdeğer devresinde faz-nötr besleme gerilimi V ve faz akımı I_s ile gösterilmiştir. Stator sargısının direnci R_s ve kaçak reaktansı X_s ile temsil edilmiştir. R_{fe} direnci ise motorun demir kayıplarını modellemektedir. X_m mıknatıslanma reaktansı motor içindeki faydalı akıyı temsil etmektedir. R_r direnci ve X_r reaktansı sırasıyla statora indirgenmiş rotor direnci ve kaçak reaktansıdır. $R_r(1-s)/s$ ile gösterilen direnç ise motorun mekanik çıkışını modellemektedir. Kayma ile değişen bu direncin üzerinde harcanan güç motorun çıkış gücünü temsil etmektedir. Denklem 2.12'de faz sayısı m olmak üzere eşdeğer devre parametrelerine bağlı olarak çıkış gücünün (P_{ϕ}) hesabı verilmiştir.

$$P_{\varsigma} = m \cdot \frac{E^2}{R_r^2 + X_r^2} \cdot R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (2.12)$$

Motorun momenti, çıkış gücünü motorun açısal hızına (ω_r) bölerek hesaplanır.

Motorun açısal hızı ile devir hızı arasındaki bağıntı denklem 2.13'te verilmiştir.

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \quad (2.13)$$

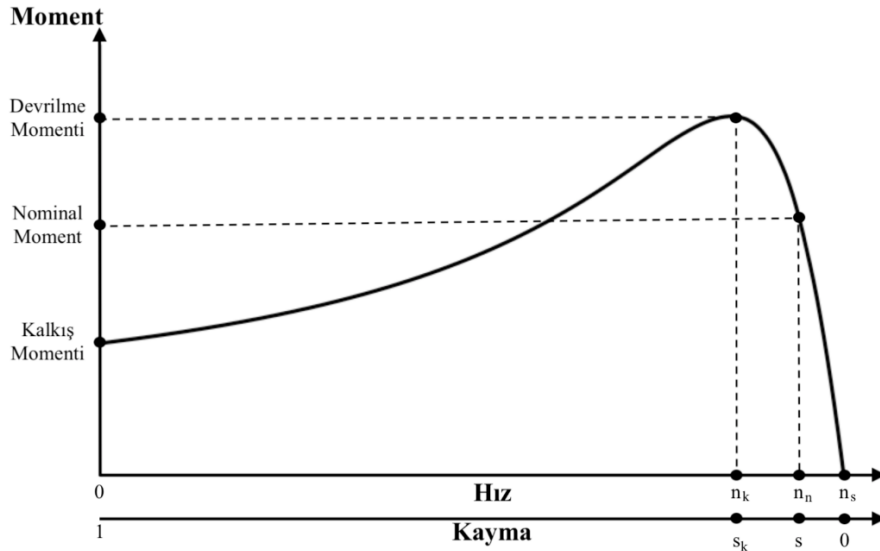
Denklem 2.14'de motorun ürettiği moment ifade verilmiştir.

$$M = \frac{P_{\varsigma}}{\omega_r} \quad (2.14)$$

Bu ifadede gerekli sadeleştirmeler yapılarak denklem 2.15'deki halini alır.

$$M = \frac{m \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{E^2}{R_r^2 + X_r^2} \cdot \frac{R_r}{s} \quad (2.15)$$

Moment denkleminde anlaşılabacağı gibi motorun ürettiği moment kayma dolayısıyla hız ile değişmektedir. Şekil 2.3'te momentin hız ve kayma ile ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2.3 : Asenkron motor moment-hız eğrisi [24].

Motor hızının sıfır olduğu, kaymanın ise bir yani ilk harekete başladığı andaki ürettiği momente kalkış moment denir. Ürettiği maksimum momente ise devrilme moment, bu moment değerindeki hıza devrilme hızı ve kaymaya da devrilme kayması denir.

Asenkron motor devrilme momentinden daha büyük bir moment ile yüklenirse motor devrilerek durmaya doğru gider.

2.3 Sargı Faktörü

Statorda bulunan olukların arasındaki geometrik açı (γ_{geo}), toplam oluk sayısı Q_s olmak üzere denklem 2.16'da gösterilmiştir.

$$\gamma_{geo} = \frac{360^\circ}{Q_s} \quad (2.16)$$

Oluklar arasında bulunan elektriksel açı (γ_e) ise geometrik açı ile beraber motorun kutup sayısı ile de ilişkilidir. Denklem 2.17'de elektriksel açı ile geometrik açı arasındaki bağıntı verilmiştir.

$$\gamma_e = p \cdot \gamma_{geo} \quad (2.17)$$

Bir faz ve bir kutup altında bulunan oluk sayısı (q) denklem 2.18'de gösterilmiştir.

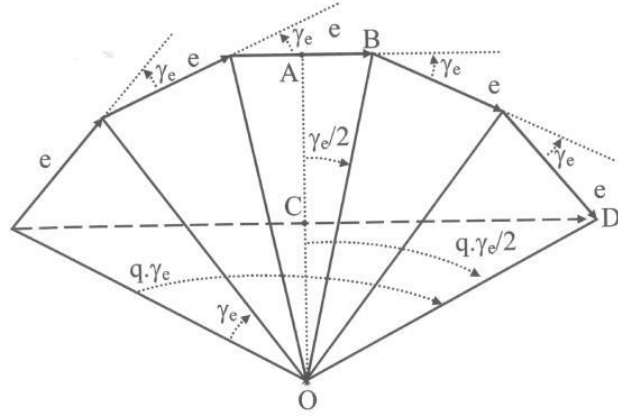
$$q = \frac{Q_s}{2pm} \quad (2.18)$$

Oluklar statora aralarında belirli açı ile yerleştirildikleri için bu oluklarda bulunan bobinlerde endüklenen gerilimler arasında elektriksel açı kadar faz farkı olmaktadır. Endüklenen gerilimler vektörel olarak farklı değerlere sahip olduğu için, skaler toplamaları vektörel toplamından daha büyük bir değere sahiptir. Vektörel toplamaların skaler toplamalarına oranına sargı faktörü (k_w) denir ve 0 ile 1 arasında değer alır. Sargı faktörünü oluşturan iki unsur bulunmaktadır. Bunlar dağılma faktörü (k_d) ve kırılganlık faktörü (k_p) olup sargı faktörü bu ikisinin çarpımına eşittir.

$$k_w = k_d \cdot k_p \quad (2.19)$$

2.3.1 Dağılma Faktörü

Bir faz ve bir kutup altında bulunan oluklara dağıtılmış bobinlerde endüklenen gerilimlerin vektörel toplamının skaler toplamına oranına dağılma faktörü denir.



Şekil 2.4 : $q=5$ için bobinlerde endüklenen gerilimlerin vektörel gösterimi [25].

Şekil 2.4’de 5 bobinde endüklenen gerilimler ve toplam endüklenen gerilim gösterilmiştir. Endüklenen gerilimlerin vektörel toplamının skaler toplamına oranı gerekli matematiksel eşitlikler yapıldığında denklem 2.20’deki halini alır.

$$k_d = \frac{\sin(q\gamma_e / 2)}{q \sin(\gamma_e / 2)} \quad (2.20)$$

2.3.2 Kirişlenme Faktörü

Bobin adımının kutup adımına eşit olduğu durumlarda bir bobinin yanları arasında endüklenen gerilimler arasında 180° açı farkı oluşur ve skaler olarak toplanır. Bobin adımının kutup adımından farklı olduğu durumlarda ise sargı kirişlenmiş olur. Bobinin kirişlenme açısı β olmak üzere kirişlenme faktörü denklem 2.21’de belirtilmiştir.

$$k_p = \cos(\beta / 2) \quad (2.21)$$

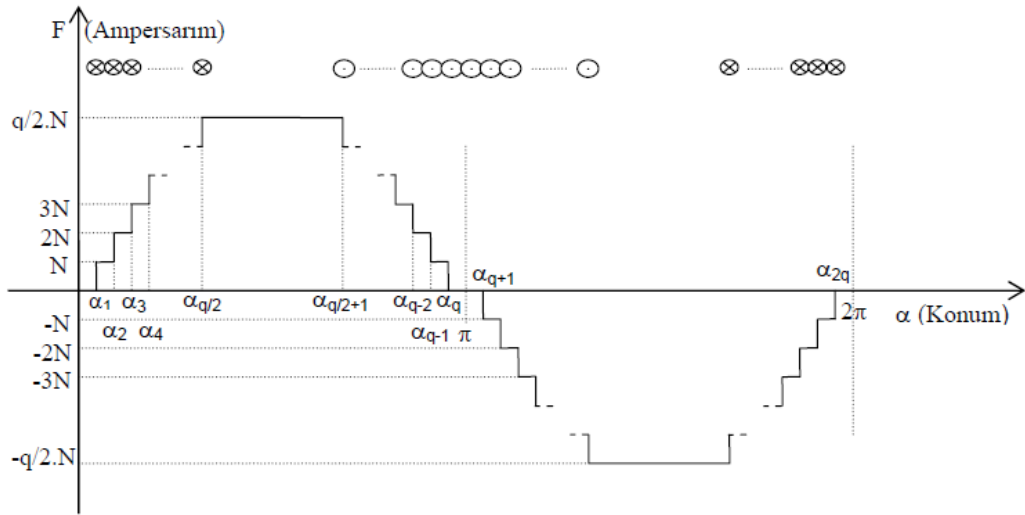
Kirişleme açısına bağlı olarak belirli uzay harmonikleri elimine edilir. Fakat sargıyı kirişlemek sargı faktörünü azaltır. Elimine edilmek istenen uzay harmoniği mertebesi e olmak üzere uygulanması gereken kirişlenme açısı denklem 2.22’deki formül yardımıyla hesaplanır.

$$\cos(e\beta / 2) = 0 \quad (2.22)$$



3. UZAY HARMONİKLERİ

Asenkron motorlar saf sinüzoidal gerilim ile beslenseler dahi, sargının oluklara sinüzoidal dağıtılamamasından dolayı ampersarım dalga şekli saf sinüs formunda değildir. Harmonikli bir yapıda bulunan ampersarım dalga şekli, oluk konumuna ve oluktan geçen akımın değerine bağlıdır. Bu nedenle uzay harmonikleri olarak adlandırılan bu harmonikler hem konuma hem de zamana bağlı olarak değişmektedirler. Şekil 3.1’de bir faza ait ampersarım dalga şekli verilmiştir.



Şekil 3.1 : Klasik sargı yapısında bir faz alan şeklinin 1A için genel görünümü [11].

Oluşan dalga şekli simetrik olduğundan çift harmonikler oluşmaz. 3 ve 3’ün katı olan harmonikler ise döner manyetik alan oluşturmaları için gerilim endüklemeler ve bu yüzden dikkate alınmazlar. Motorda etkisi en yüksek olan uzay harmonikleri 5. ve 7. harmoniklerdir. Motorda oluşan uzay harmonikleri k bir tamsayı olmak üzere $6k \pm 1$ kuralına uyarlar. $6k-1$ mertebeli uzay harmonikleri temel bileşene göre ters yönde dönerler. $6k+1$ mertebeli uzay harmonikleri ise temel bileşenle aynı yönde dönerler. Uzay harmoniklerinin oluşturdukları döner manyetik alanların hızları birbirinden farklıdır ve senkron hız ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Bu durum uzay harmonik mertebesi arttıkça kutup sayısının da artması şeklinde düşünülebilir [11]. Uzay harmoniklerinin senkron hız ve kayma ifadesi denklem 3.1 ve 3.2’deki gibi hesaplanır.

$$n_{se} = \pm \frac{n_s}{e} \quad (3.1)$$

$$s_e = \frac{\mp n_s / (6k \mp 1) - n_s (1-s)}{\mp n_s / (6k \mp 1)} = 1 \mp e \pm s.e \quad (3.2)$$

Denklem 3.1 ve denklem 3.2’de verilen ifadelerde eksi işareti harmoniklerin döner alanının temel bileşeninkine göre ters yönde, pozitif olanların ise temel bileşenle aynı yönde olduğu anlamına gelmektedir [11]. Çizelge 3.1’de uzay harmoniklerinin statora göre hızları verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Uzay harmoniklerinin statora göre hızları [11].

Uzay Harmoniği Derecesi	Kutup Çifti Sayısı	Harmoniğin Statora Göre Hızı	Senkron Hızda Dönen Rotora Göre Hızı
1	p	n_s	0
5	5p	$-n_s / 5$	$-6n_s / 5$
7	7p	$n_s / 7$	$-6n_s / 7$
11	11p	$-n_s / 11$	$-12n_s / 11$
13	13p	$n_s / 13$	$-12n_s / 13$
$6k \pm 1$	$(6k \pm 1)p$	$\pm n_s / (6k \pm 1)$	$-6k.n_s / 6k \pm 1$

Oluşan uzay harmoniklerinin frekansı temel frekans ile aynıdır. Sonsuz sayıda oluşan bu harmoniklerin frekansları aynı olduğu için endükledikleri gerilimlerin de frekansları aynıdır. Bu sayede şekil 3.2’de gösterildiği gibi uzay harmoniklerinin etkilerini içeren statoru ortak tek bir eşdeğer devre modeli ile modellenebilir. Bu eşdeğer devre modelinde harmoniğin mertebesi değiştikçe devre parametreleri de buna bağlı olarak değişmektedir. Denklem 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7’de 1 numaralı indisler temel bileşene ait parametreleri gösterirken, e indisleri ise uzay harmoniğine ait parametreleri göstermektedir. Endüklenen gerilim ifadesi E , manyetik akı yoğunluğu B ve manyetik akı ϕ olarak adlandırılmıştır.

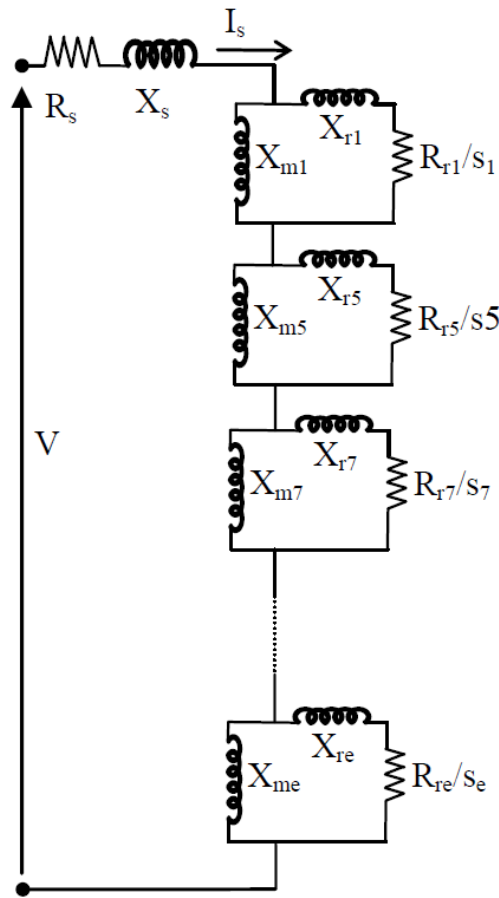
$$\frac{E_1}{E_e} = \frac{k_{w1}}{k_{we}} \cdot \frac{\phi_1}{\phi_e} \quad (3.3)$$

$$\frac{F_1}{F_e} = \frac{k_{w1}}{k_{we}} \cdot e = \frac{B_1}{B_e} \quad (3.4)$$

$$\frac{\phi_1}{\phi_e} = \frac{B_1}{B_e} \cdot e \quad (3.5)$$

$$\frac{\phi_1}{\phi_e} = \frac{k_{w1}}{k_{we}} \cdot e^2 \quad (3.6)$$

$$\frac{X_{m1}}{X_{me}} = \left(\frac{k_{w1}}{k_{we}} \right)^2 \cdot e^2 \quad (3.7)$$



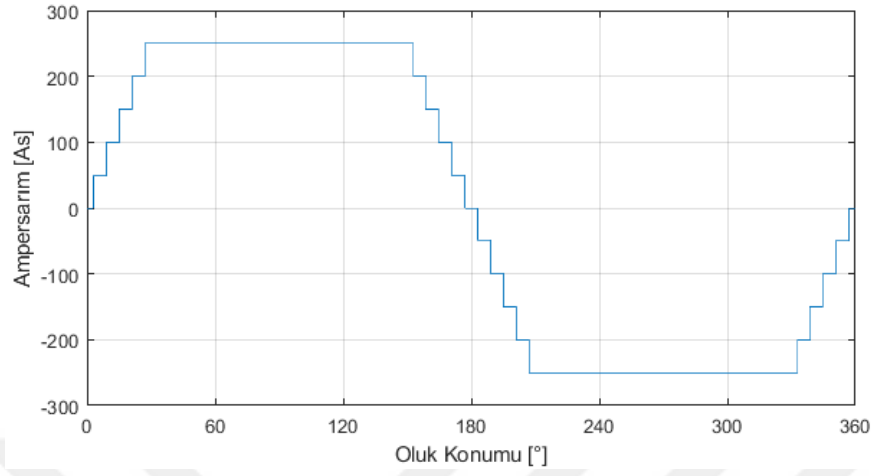
Şekil 3.2 : Uzak harmoniklerinin etkilerini içeren eşdeğer devre [11].

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi uzak harmoniklerinin her biri motorda moment üretmektedir. Uzak harmoniklerinin ürettiği momentler motorda vuruntulu çalışma, moment titreşimi, gürültü ve ek kayıplara neden olur.

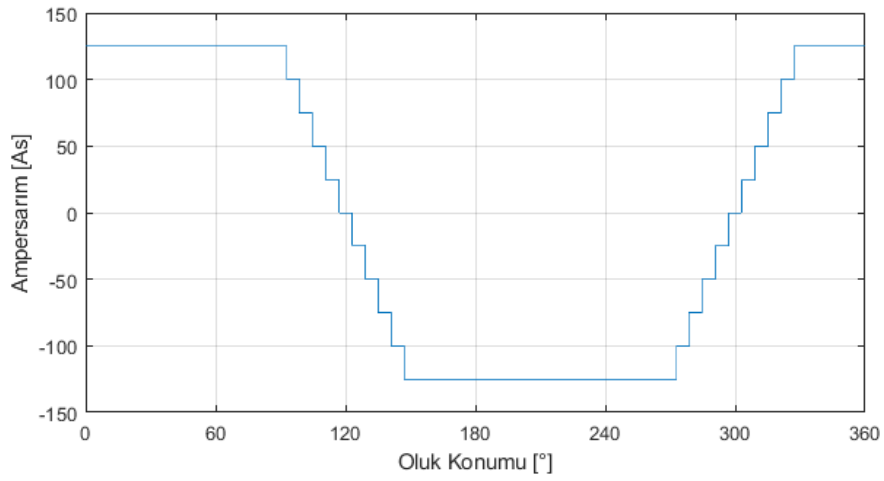
3 fazlı 60 oluklu 2 kutuplu bir asenkron motora ait her fazın ve toplam ampersarım dalga şekli şekil 3.3’te verilmiştir. Faz ve kutup başına 10 oluk düşmekte ve her olukta 5 sarım bulunmaktadır. 3 fazın anlık akım değerleri $\omega t = 0$ için çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : 3 fazın $\omega t=0$ anındaki akım değerleri.

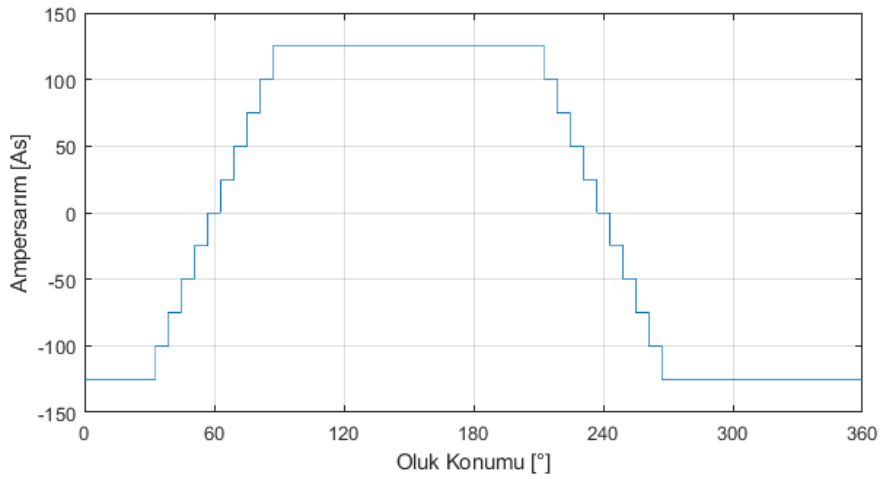
ωt	i_R	i_S	i_T
0	5A	-2.5A	-2.5A



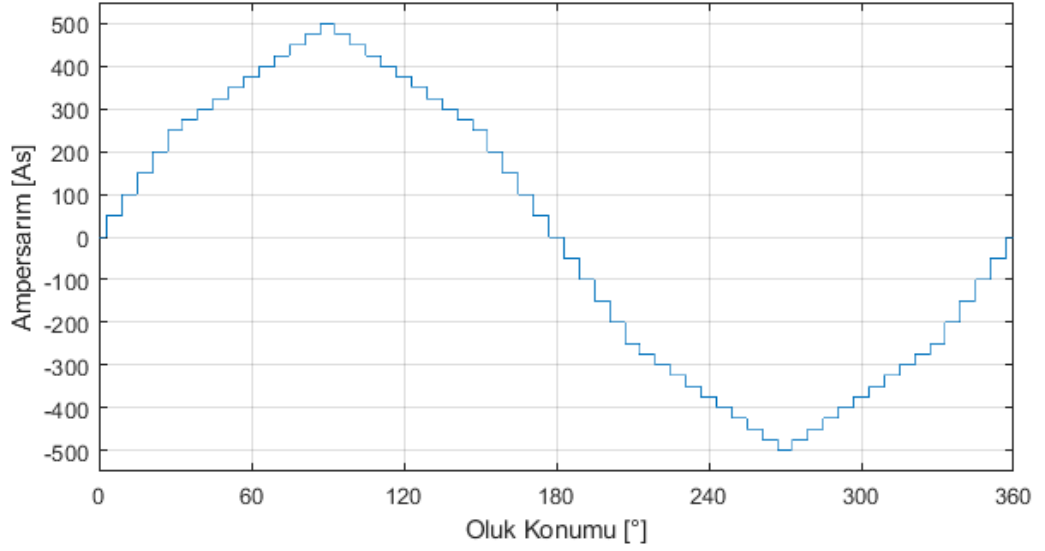
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.3 : (a)R fazının, (b)S fazının, (c)T fazının ve (d) toplam ampersarım dalga şekli.

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi toplam ampersarım dalga şekli sinüs dalga şeklinden farklıdır. Fourier serisi açılımı yapılarak bu dalga şeklinin harmonikleri hesaplanabilir. Fourier serisi periyodik olan fonksiyonların sinüs ve kosinüs toplamalarıyla ifade edilmesini sağlar. Denklem 3.8'de Fourier serisinin genel ifadesi, denklem 3.9, 3.10 ve 3.11'de Fourier serisi açılımında kullanılan katsayıların ifadesi verilmiştir.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (3.8)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.9)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (3.10)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3.11)$$



4. FARKLI TİP SARGILARIN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ

Bu bölümde literatürde bulunan ve uzay harmoniklerini azaltmak için kullanılan 8 farklı sargı tipine sahip asenkron motorlar anlatılmıştır. Bu farklı tipteki sargıları analiz etmek için öncelikle klasik sargılı bir 3 fazlı asenkron motor referans olarak seçilmiş ve SEY ile analiz edilmiştir. Farklı tipteki sargı yapıları klasik yapıdaki asenkron motora uygulanmıştır. Bu sırada motorun stator ve rotor çapları, oluk sayıları, uzunluğu ve manyetik malzemesi değiştirilmemiştir. Stator oluk boyutları ise sargının tasarımını sebebiyle gerekmedikçe değiştirilmemiştir. Her bir motorun sargı faktörü hesaplanıp sabit güç altında SEY ile analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda her bir motorun hava aralığı MMK dağılımı ve akı yoğunluğu elde edilmiştir. Hava aralığı MMK dağılımlarının Fourier serisi açılımı yapılarak uzay harmonikleri hesaplanmıştır.

4.1 Klasik Sargılı Asenkron Motor

Referans olarak seçilen klasik sargılı 3 fazlı asenkron motorun nominal değerleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Klasik sargılı motorun plaka değerleri.

Açıklama	Sembol	Değer	Birim
Nominal Gücü	P_n	90	kW
Nominal Gerilimi	V_n	400	V
Nominal Frekansı	f_1	50	Hz
Kutup Sayısı	$2p$	2	-
Senkron Hız	n_s	3000	dev/dak
Rotor Hızı	n_r	2980	dev/dak
Kayma	s	%0.667	-
Güç Faktörü	$\cos \varphi$	0.92	-
Verim	η	%95.8	-

Referans motor Ansys RMxpert programı kullanılarak tasarlanmıştır. Çizelge 4.2’de referans motorun temel büyüklükleri verilmiştir. Bu değerler ve malzemeler diğer tüm sargı tipleri için sabit tutulmuştur.

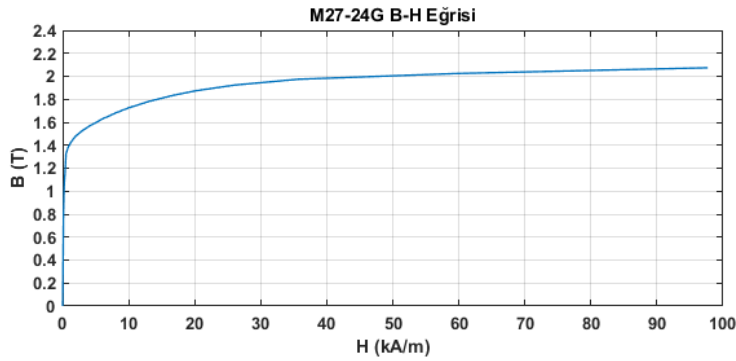
Çizelge 4.2 : Klasik sargılı motorun temel büyüklükleri.

Açıklama	Sembol	Değer	Birim
Stator Dış Çapı	D_i	402	mm
Rotor Dış Çapı	D_1	240	mm
Rotor İç Çapı	D_2	95	mm
Hava Aralığı	g	1.15	mm
Uzunluk	L	330	mm
Stator Oluk Sayısı	Q_s	60	-
Rotor Oluk Sayısı	Q_r	40	-

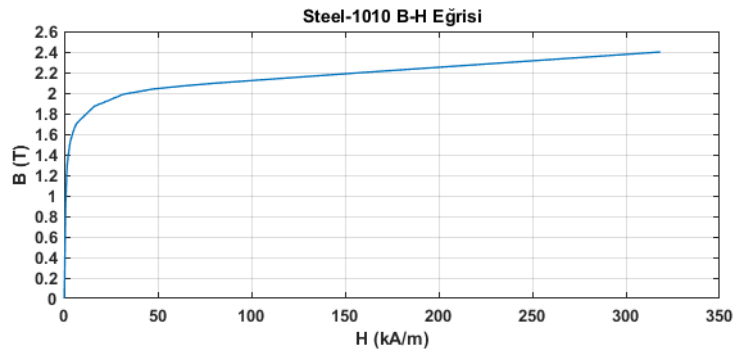
Tasarım sırasında kullanılan malzemelerin listesi çizelge 4.2’de verilmiştir. Stator ve rotor manyetik malzemesinin B-H eğrisi şekil 4.1’de, mil malzemesinin B-H eğrisi ise şekil 4.2’de verilmiştir. Rotor yapısı bütün tasarımlarda değiştirilmemiş olup çift kafesli yapıda ve 1 oluk kaykısı bulunmaktadır.

Çizelge 4.3 : Motorda kullanılan malzemeler.

Açıklama	Sembol
Stator Sargısı	Bakır
Rotor Barları	Dökme Alüminyum
Manyetik Malzeme	M27_24G
Mil Malzemesi	Steel_1010



Şekil 4.1 : M27_24G manyetik malzemesinin B-H eğrisi.



Şekil 4.2 : Steel_1010 mil malzemesinin B-H eğrisi.

60 oluklu ve 2 kutuplu motorun faz ve kutup başına düşen oluk sayısı denklem 4.1’de hesaplanmıştır. Denklem 4.2’de motorun geometrik açısı hesaplanmıştır. Motorun kutup çifti sayısı 1 olduğu için geometrik açı ve elektriksel açı birbirine eşittir.

$$q = \frac{60}{2 \times 3} = 10 \quad (4.1)$$

$$\gamma_{geo} = \frac{360^\circ}{60} = 60^\circ \quad (4.2)$$

Referans motorun sargısı tek tabakalı olup faz başına 80 sarım bulunmaktadır. Dolayısıyla her bir olukta 8 sarım bulunmaktadır. İletken matrisi, statorda bulunan olukların konumu ve bu oluklardaki fazlara ait sarım sayısını gösterir. Akımının referansına göre iletkenler pozitif ve negatif değerler alır. Klasik sargılı motora ait iletken matrisi çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Klasik sargılı asenkron motorun iletken matrisi.

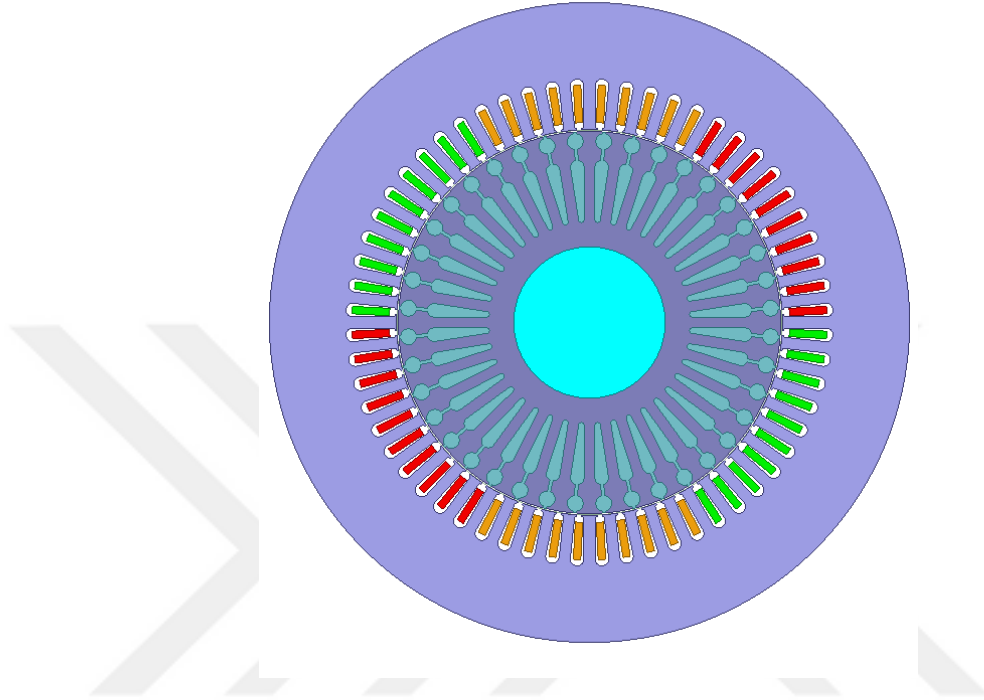
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
3	8	0	0
9	8	0	0
15	8	0	0
21	8	0	0
27	8	0	0
33	0	0	-8
39	0	0	-8
45	0	0	-8
51	0	0	-8
57	0	0	-8
63	0	0	-8
69	0	0	-8
75	0	0	-8
81	0	0	-8
87	0	0	-8
93	0	8	0
99	0	8	0
105	0	8	0
111	0	8	0
117	0	8	0
123	0	8	0
129	0	8	0
135	0	8	0

Çizelge 4.4 (devam) : Klasik sargılı asenkron motorun iletken matrisi.

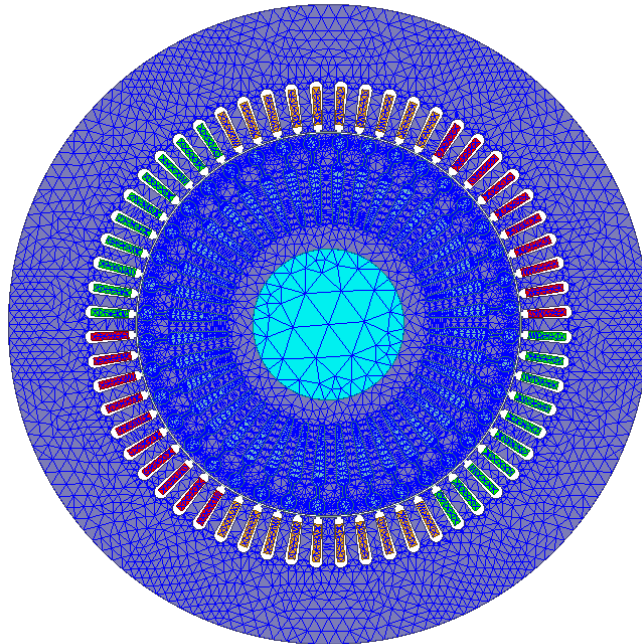
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
141	0	8	0
147	0	8	0
153	-8	0	0
159	-8	0	0
165	-8	0	0
171	-8	0	0
177	-8	0	0
183	-8	0	0
189	-8	0	0
195	-8	0	0
201	-8	0	0
207	-8	0	0
213	0	0	8
219	0	0	8
225	0	0	8
231	0	0	8
237	0	0	8
243	0	0	8
249	0	0	8
255	0	0	8
261	0	0	8
267	0	0	8
273	0	-8	0
279	0	-8	0
285	0	-8	0
291	0	-8	0
297	0	-8	0
303	0	-8	0
309	0	-8	0
315	0	-8	0
321	0	-8	0
327	0	-8	0
333	8	0	0
339	8	0	0
345	8	0	0
351	8	0	0
357	8	0	0

4.1.1 Manyetik analizi

Klasik sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell programı kullanılarak SEY ile analiz edilmiştir. Motorun modeli şekil 4.3'te ve analiz sırasında kullanılan ağ yapısı ise şekil 4.4'te verilmiştir.

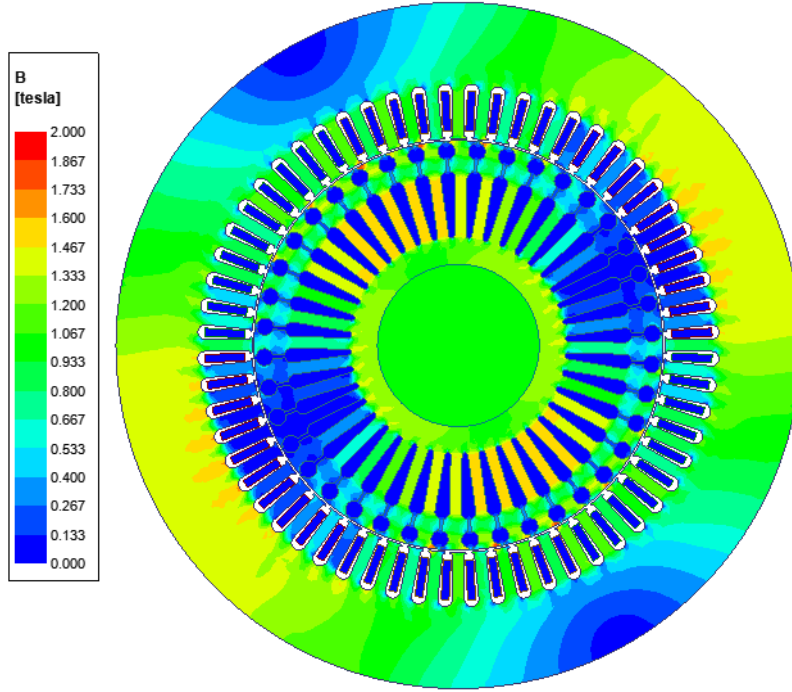


Şekil 4.3 : Klasik sargılı motorun modeli.

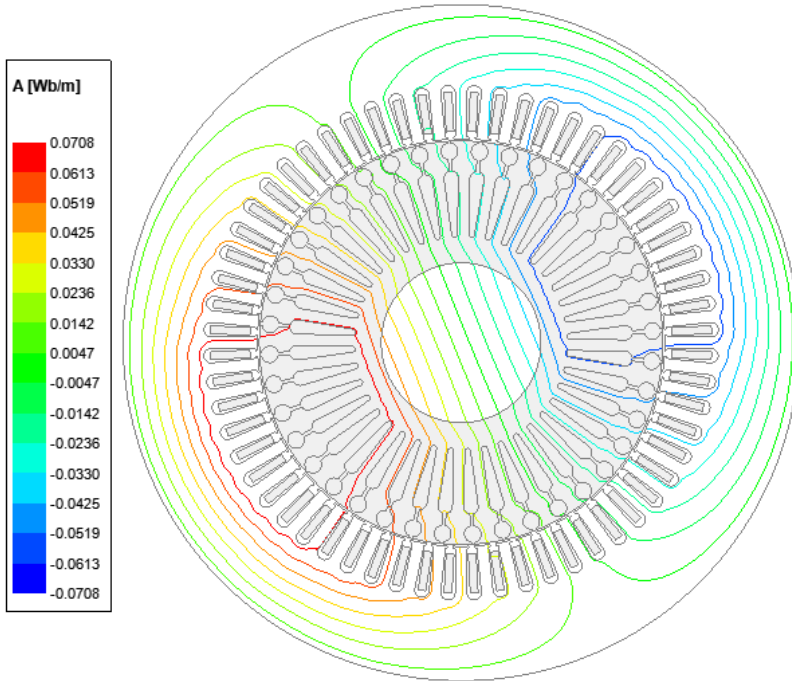


Şekil 4.4 : Klasik sargılı motorun ağ yapısı.

Şekil 4.5'te motorun manyetik alan yoğunluğu dağılımı ve şekil 4.6'da manyetik akı çizgileri verilmiştir. En yoğun manyetik akı yoğunluğu rotor oluklarının uç kısımlarında oluşmaktadır ve yaklaşık 1.9 T değerindedir.

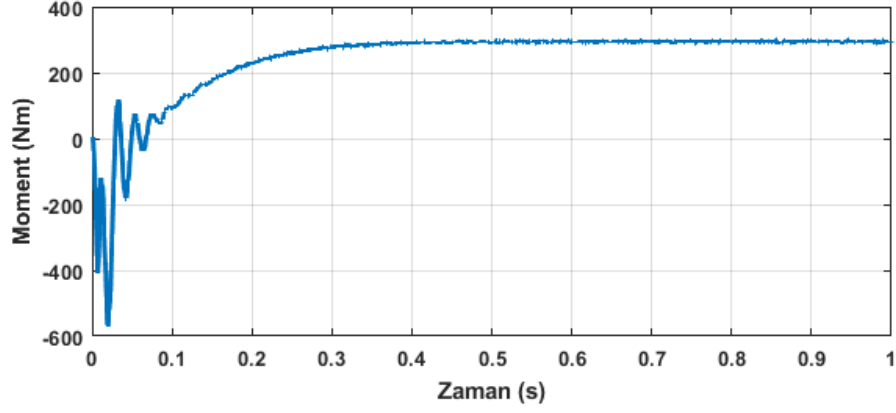


Şekil 4.5 : Klasik sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.6 : Klasik sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Motorun moment-zaman eğrisi şekil 4.7’de verilmiştir ve 294.12 Nm değerine yakınsamaktadır.



Şekil 4.7 : Klasik sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.1.2 Sargı faktörü

Sargı faktörü sargının kalitesini belirleyen önemli bir değerdir ve endüklenen gerilim ile doğrudan ilişkilidir. Uzun harmonikler gerilim endükledikleri için sargı faktörleri vardır ve değerleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle sargı faktörleri uzun harmoniklerinin analizi için önemli bir parametredir. Bu sargı faktörlerini hesaplamak için oluk konumları kompleks büyüklük olarak ifade eden $[r]$ matrisi oluşturulur. $[r]$ matrisinin satır sayısı oluk sayısına, sütun sayısı ise hesaplanmak istenen harmonik sayısına eşittir ve denklem 4.3’te ifade edilmiştir.

$$[r] = \begin{bmatrix} r_{1a} & r_{1b} & r_{1c} & \dots \\ r_{2a} & r_{2b} & r_{2c} & \dots \\ r_{3a} & r_{3b} & r_{3c} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ea} & r_{eb} & r_{ec} & \ddots \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$[r]$ matrisinin iletken matrisi $[z]$ ile çarpılmasıyla $[S]$ matrisi elde edilir. $[S]$ matrisinin ifadesi denklem 4.4 ve denklem 4.5’te gösterilmiştir. $[S]$ matrisi her fazın uzun harmoniklerine ait kompleks etkin iletken sayılarını ifade eder. $[S]$ matrisinin her fazın toplam sarım sayısına (z_{top}) bölünmesiyle kompleks sargı faktörü hesaplanır ve denklem 4.6 ve denklem 4.7’de belirtilmiştir [26].

$$[S]=[r]x[z]=[[S_R][S_S][S_T]] \quad (4.4)$$

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{1R} & S_{1S} & S_{1T} \\ S_{2R} & S_{2S} & S_{2T} \\ S_{3R} & S_{3S} & S_{3T} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{eR} & S_{eS} & S_{eT} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} Z_{topR} &= Z_{aR} + Z_{bR} + Z_{cR} + \dots \\ Z_{topS} &= Z_{aS} + Z_{bS} + Z_{cS} + \dots \\ Z_{topT} &= Z_{aT} + Z_{bT} + Z_{cT} + \dots \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$[k_w]=\begin{bmatrix} \frac{[S_R]}{Z_{topR}} & \frac{[S_S]}{Z_{topS}} & \frac{[S_T]}{Z_{topT}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Referans motorun ilk 61 uzay harmoniği için kompleks sargı faktörleri hesaplanmış olup çizelge 4.5'te verilmiştir. Sargı simetrik olduğu için tüm fazların sargı faktörleri aynıdır. Çift dereceli uzay harmonikleri oluşmadıkları için bunlara ait sargı faktörleri sıfırdır.

Çizelge 4.5 : Klasik sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

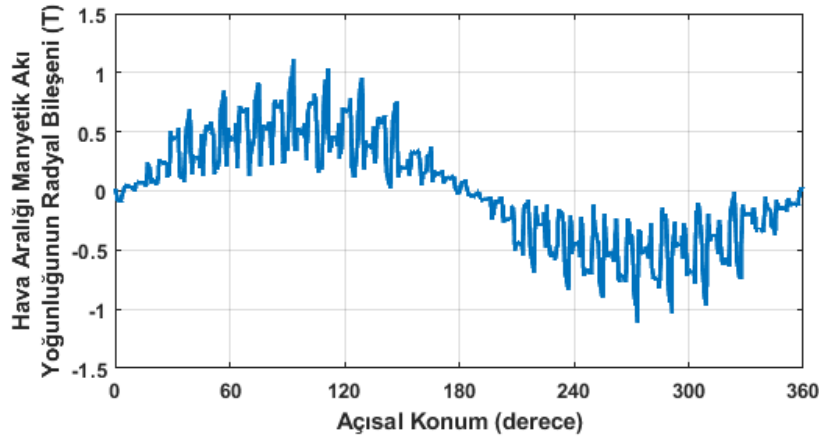
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
1	0.9554	0.9554	0.9554
2	0	0	0
3	0.6392	0.6392	0.6392
4	0	0	0
5	0.1932	0.1932	0.1932
6	0	0	0
7	0.1395	0.1395	0.1395
8	0	0	0
9	0.2203	0.2203	0.2203
10	0	0	0
11	0.0918	0.0918	0.0918
12	0	0	0
13	0.0795	0.0795	0.0795
14	0	0	0
15	0.1414	0.1414	0.1414
16	0	0	0
17	0.0643	0.0643	0.0643

Çizelge 4.5: Klasik sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
18	0	0	0
19	0.0596	0.0596	0.0596
20	0	0	0
21	0.1122	0.1122	0.1122
22	0	0	0
23	0.0536	0.0536	0.0536
24	0	0	0
25	0.0518	0.0518	0.0518
26	0	0	0
27	0.1012	0.1012	0.1012
28	0	0	0
29	0.0501	0.0501	0.0501
30	0	0	0
31	0.0501	0.0501	0.0501
32	0	0	0
33	0.1012	0.1012	0.1012
34	0	0	0
35	0.0518	0.0518	0.0518
36	0	0	0
37	0.0536	0.0536	0.0536
38	0	0	0
39	0.1122	0.1122	0.1122
40	0	0	0
41	0.0596	0.0596	0.0596
42	0	0	0
43	0.0643	0.0643	0.0643
44	0	0	0
45	0.1414	0.1414	0.1414
46	0	0	0
47	0.0795	0.0795	0.0795
48	0	0	0
49	0.0918	0.0918	0.0918
50	0	0	0
51	0.2203	0.2203	0.2203
52	0	0	0
53	0.1395	0.1395	0.1395
54	0	0	0
55	0.1932	0.1932	0.1932
56	0	0	0
57	0.6392	0.6392	0.6392
58	0	0	0
59	0.9554	0.9554	0.9554
60	0	0	0
61	0.9554	0.9554	0.9554

4.1.3 Uzay harmonikleri

Referans motorun elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni şekil 4.8’de verilmiştir.

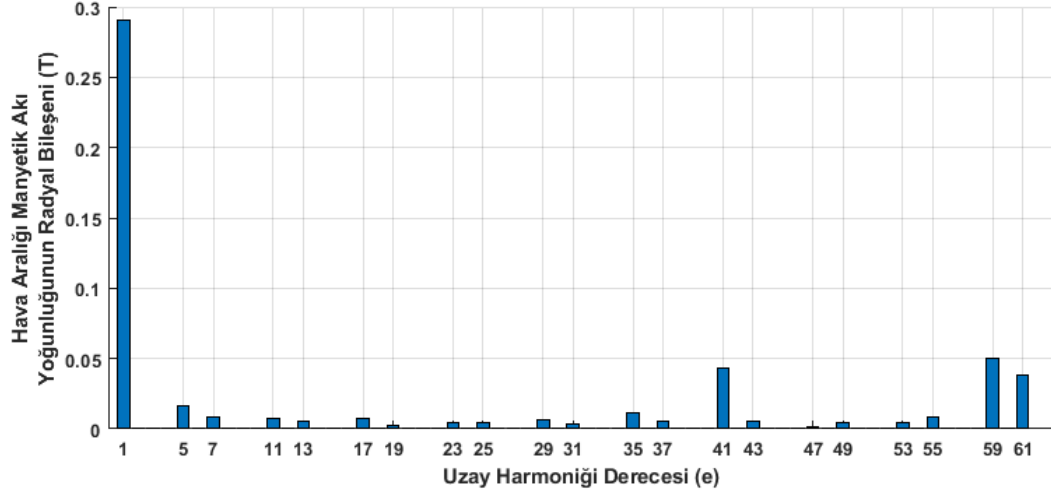


Şekil 4.8 : Klasik sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun Fourier serisine açılarak uzay harmonikleri elde edilmiştir. Çizelge 4.6’da hesaplanan uzay harmonikleri ilk 61 harmonik için verilmiştir. Şekil 4.9’da uzay harmoniklerinin harmonik dağılımı verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Klasik sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.29068
5	0.01609
7	0.00840
11	0.00718
13	0.00543
17	0.00786
19	0.00203
23	0.00446
25	0.00437
29	0.00632
31	0.00325
35	0.01129
37	0.00562
41	0.04327
43	0.00553
47	0.00103
49	0.00398
53	0.00463
55	0.00834
59	0.05039
61	0.03812



Şekil 4.9 : Klasik sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.

4.2 12/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı Asenkron Motor

Referans motor çift tabakalı sargı yapısına getirilmiştir. Etkisi motorda oldukça yüksek olan 5. uzay harmoniğini elimine etmek için sargı kirişlenmiştir. Kirişlenme miktarı (β) denklem 4.8’de hesaplanmıştır.

$$\beta = \frac{180^\circ}{5} = 36^\circ \quad (4.8)$$

Denklem 4.8’de görüldüğü sargı 36° kirişlenmelidir. Elektriksel açı 6° olduğu için toplamda sargı 6 oluk kadar kirişlenmelidir. Bu sırada motorun diğer büyüklüklerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Çizelge 4.7’de 12/15 oranında kirişlenmiş olan sargının iletken matrisi verilmiştir.

4.2.1 Manyetik analizi

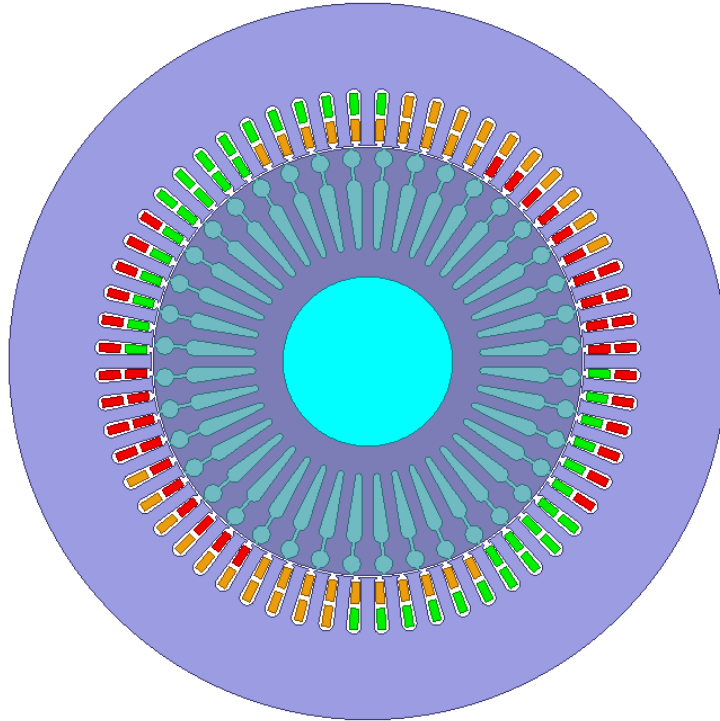
Tasarlanan 12/15 oranında kirişlenmiş sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell program kullanılarak SEY ile analiz edilmiştir. Motor modeli Şekil 4.10’da verilmiştir. Faz sargılarının konumu ve kirişlenme miktarı daha iyi anlaşılabilmesi için her faz sargısı farklı bir renkle gösterilmiştir. 12/15 oranında kirişlenmiş sargılı motorun SEY ile analizi sırasında kullanılan ağ yapısı Şekil 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : 12/15 oranında kırılganlaşmış sargının iletken matrisi.

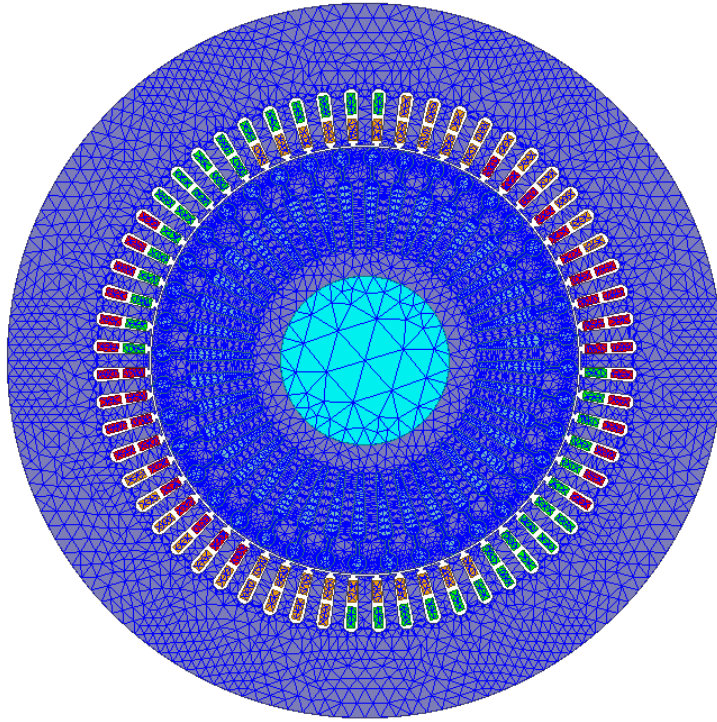
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [Z]		
	R	S	T
3	8	0	0
9	8	0	0
15	4	0	-4
21	4	0	-4
27	4	0	-4
33	4	0	-4
39	4	0	-4
45	4	0	-4
51	0	0	-8
57	0	0	-8
63	0	0	-8
69	0	0	-8
75	0	4	-4
81	0	4	-4
87	0	4	-4
93	0	4	-4
99	0	4	-4
105	0	4	-4
111	0	8	0
117	0	8	0
123	0	8	0
129	0	8	0
135	-4	4	0
141	-4	4	0
147	-4	4	0
153	-4	4	0
159	-4	4	0
165	-4	4	0
171	-8	0	0
177	-8	0	0
183	-8	0	0
189	-8	0	0
195	-4	0	4
201	-4	0	4
207	-4	0	4
213	-4	0	4
219	-4	0	4
225	-4	0	4
231	0	0	8
237	0	0	8
243	0	0	8
249	0	0	8
255	0	-4	4

Çizelge 4.7 (devam) : 12/15 oranında kırışlenmiş sargının iletken matrisi.

Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
261	0	-4	4
267	0	-4	4
273	0	-4	4
279	0	-4	4
285	0	-4	4
291	0	-8	0
297	0	-8	0
303	0	-8	0
309	0	-8	0
315	4	-4	0
321	4	-4	0
327	4	-4	0
333	4	-4	0
339	4	-4	0
345	4	-4	0
351	8	0	0
357	8	0	0

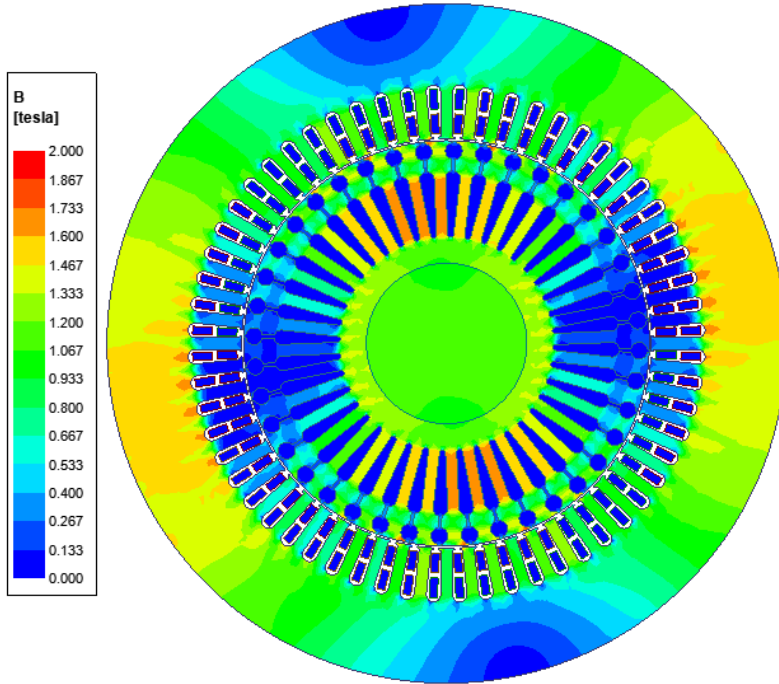


Şekil 4.10 : 12/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun modeli.

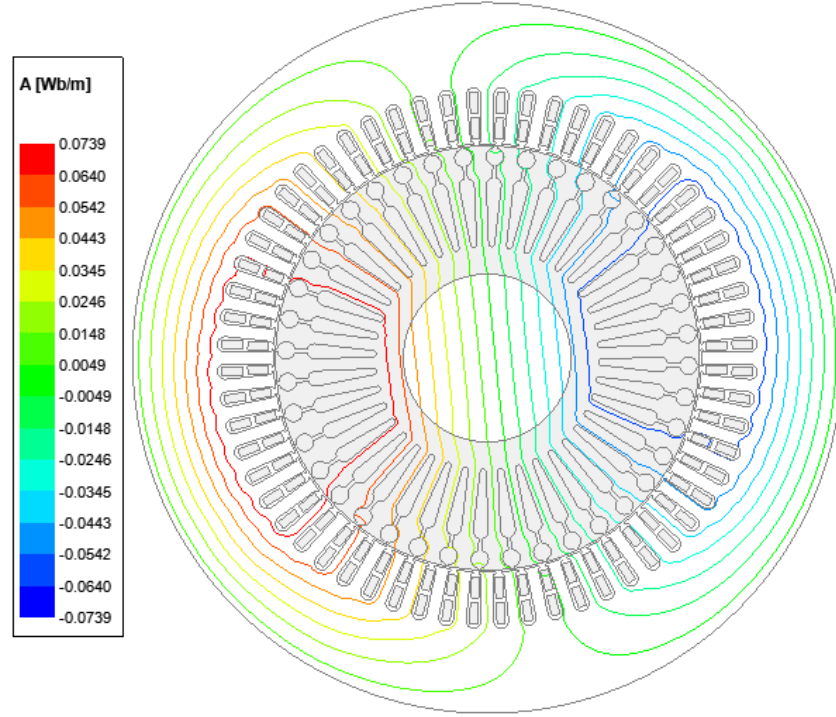


Şekil 4.11 : 12/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun ağı yapısı.

12/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.12’de verilmiştir. Rotor olukların üst kısmında yaklaşık 1.8 T değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.13’de motorun manyetik akı çizgileri gösterilmiştir.

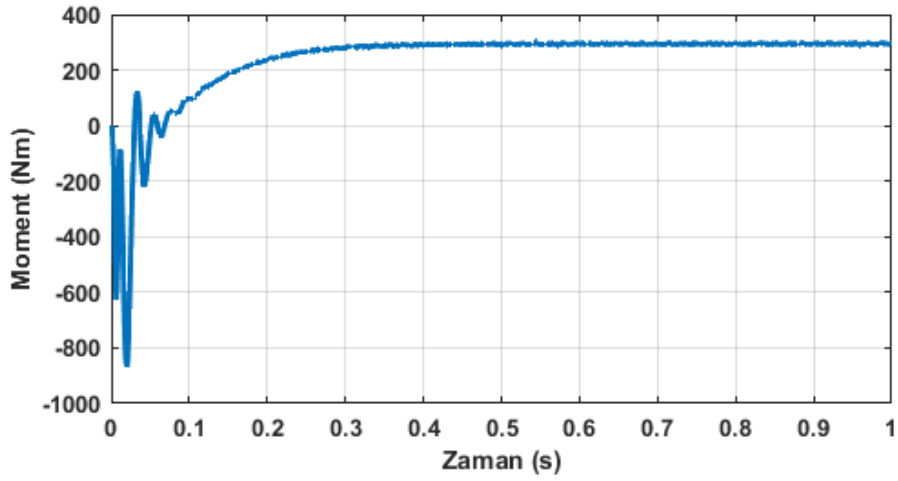


Şekil 4.12 : 12/15 oranında kırışlenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.13 : 12/15 oranında kırışlenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Ortalama 294.98 Nm moment değerine sahip olan motorun moment-zaman eğrisi şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.14 : 12/15 oranında kırışlenmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.2.2 Sargı faktörü

12/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun sargı faktörleri kompleks yöntemle hesaplanmıştır. Çizelge 4.8’de ilk 61 harmonik için kompleks sargı faktörleri her faz

için verilmiştir. 3 faz sargısı simetrik yerleştirildiği için her faz için sargı faktörleri aynı değere sahiptir.

Çizelge 4.8 : 12/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

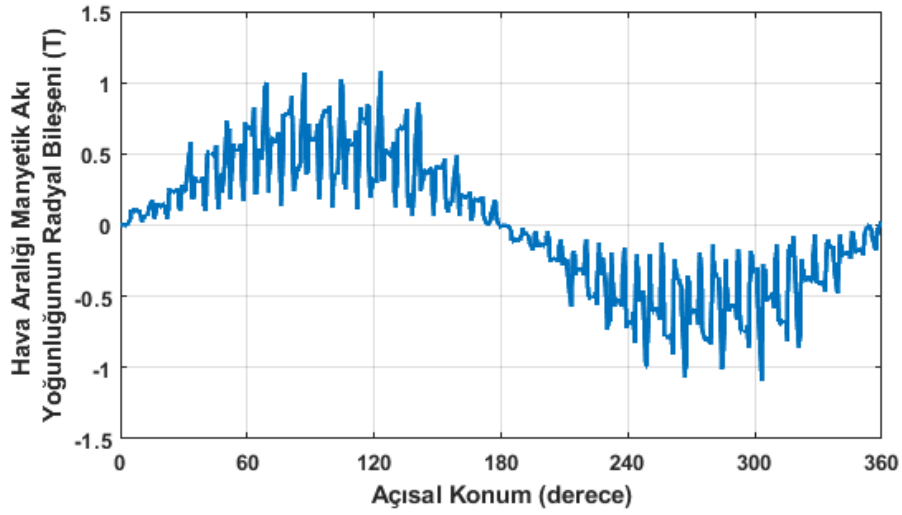
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
1	0.9086	0.9086	0.9086
2	0	0	0
3	0.3757	0.3757	0.3757
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0.0820	0.0820	0.0820
8	0	0	0
9	0.2095	0.2095	0.2095
10	0	0	0
11	0.0873	0.0873	0.0873
12	0	0	0
13	0.0467	0.0467	0.0467
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0.0378	0.0378	0.0378
18	0	0	0
19	0.0567	0.0567	0.0567
20	0	0	0
21	0.1067	0.1067	0.1067
22	0	0	0
23	0.0315	0.0315	0.0315
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0.0595	0.0595	0.0595
28	0	0	0
29	0.0476	0.0476	0.0476
30	0	0	0
31	0.0476	0.0476	0.0476
32	0	0	0
33	0.0595	0.0595	0.0595
34	0	0	0

Çizelge 4.8: 12/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebe (e)	k_w		
	R	S	T
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0.0315	0.0315	0.0315
38	0	0	0
39	0.1067	0.1067	0.1067
40	0	0	0
41	0.0567	0.0567	0.0567
42	0	0	0
43	0.0378	0.0378	0.0378
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0.0467	0.0467	0.0467
48	0	0	0
49	0.0873	0.0873	0.0873
50	0	0	0
51	0.2095	0.2095	0.2095
52	0	0	0
53	0.0820	0.0820	0.0820
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0.3757	0.3757	0.3757
58	0	0	0
59	0.9086	0.9086	0.9086
60	0	0	0
61	0.9086	0.9086	0.9086

4.2.3 Uzay harmonikleri

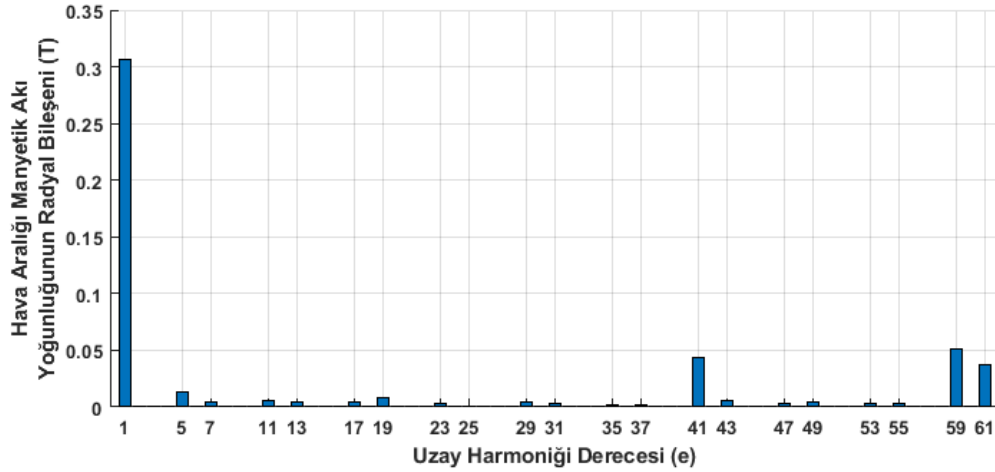
Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu şekil 4.15'te verilmiştir. Elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dalga şekli Fourier serisine açılmasıyla uzay harmonikleri elde edilmiştir. Uzay harmonikleri ilk 61 harmonik için hesaplanmış olup çizelge 4.9'da değerleri ve şekil 4.16'da harmonik dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.15 : 12/15 oranında kırıışlenmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Çizelge 4.9 : 12/15 oranında kırıışlenmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.306156
5	0.012974
7	0.004360
11	0.006219
13	0.003827
17	0.004645
19	0.008157
23	0.003662
25	0.000982
29	0.003872
31	0.002537
35	0.001406
37	0.001666
41	0.043823
43	0.005969
47	0.002942
49	0.004489
53	0.003262
55	0.002815
59	0.051375
61	0.037266



Şekil 4.16 : 12/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.

4.3 13/15 Oranında Kırışlenmiş Sargılı Asenkron Motor

Motora etkisi en yüksek harmoniklerden olan 7. uzay harmoniği elimine etmek için sargı kırışlenmiştir. Kırışlenme miktarı (β) denklem 4.9'da 25.71° hesaplanmıştır.

$$\beta = \frac{180^\circ}{7} = 25.71^\circ \quad (4.9)$$

Kırışlenme miktarı 4.29 oluğa denk gelmektedir. Mekanik olarak bunun mümkün olmamasından dolayı sargı 4 oluk kırışlenmiştir. Çizelge 4.10'da 13/15 oranında kırışlenmiş sargının iletken matrisi verilmiştir.

4.3.1 Manyetik analizi

Referans motor olan tek tabakalı asenkron motor çift tabakalı hale getirilip 13/15 oranında kırışlenmiştir. Oluklardaki sargı dağılımları ise Çizelge 4.10'da verilen değerler doğrultusunda ANSYS Maxwell programında modellenmiş ve SEY ile analiz edilmiştir.

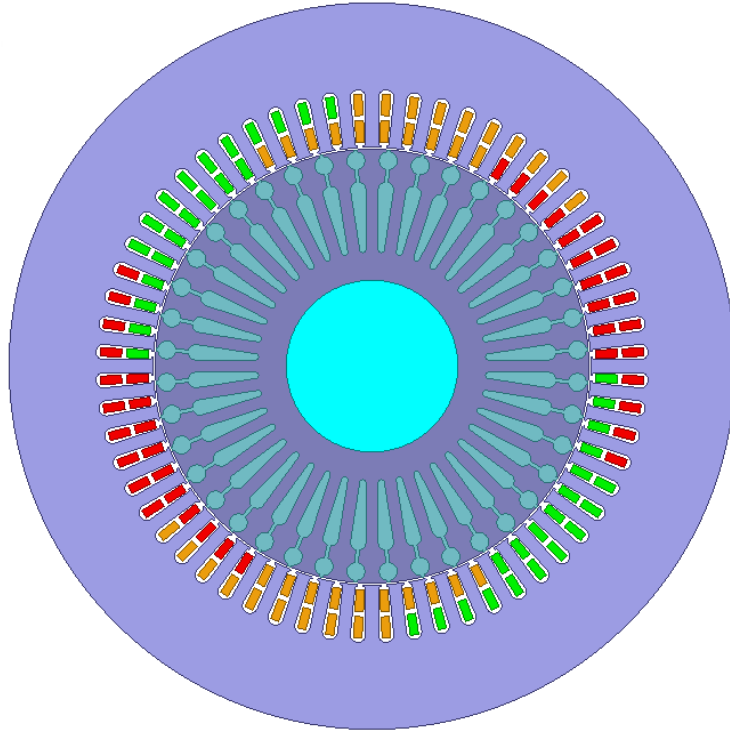
13/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun modeli şekil 4.17'de verilmiştir. Her faz sargısı bir renk ile ifade edilmiştir böylelikle sargı yerleşimi rahatça görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi sırasında kullanılan ağ yapısı şekil 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.10 : 13/15 oranında kırılenmiş sargının iletken matrisi.

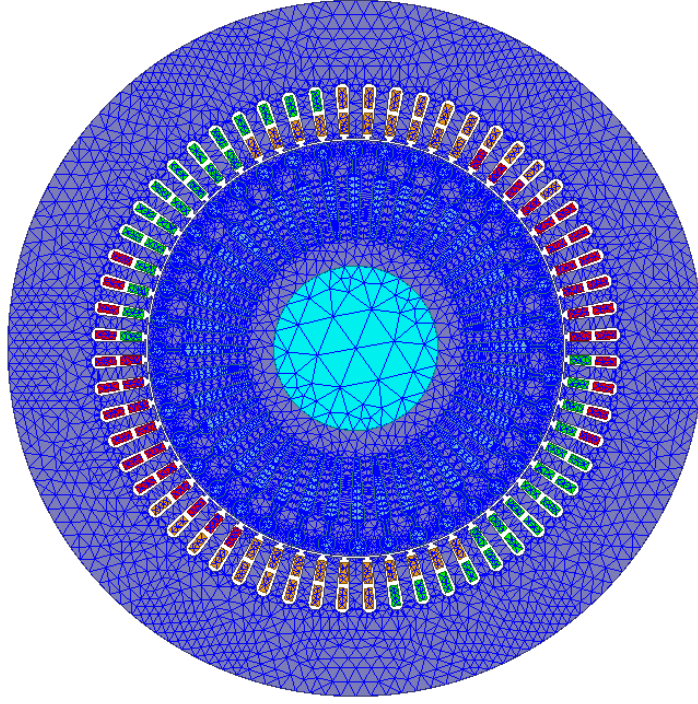
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [Z]		
	R	S	T
3	8	0	0
9	8	0	0
15	8	0	0
21	4	0	-4
27	4	0	-4
33	4	0	-4
39	4	0	-4
45	0	0	-8
51	0	0	-8
57	0	0	-8
63	0	0	-8
69	0	0	-8
75	0	0	-8
81	0	4	-4
87	0	4	-4
93	0	4	-4
99	0	4	-4
105	0	8	0
111	0	8	0
117	0	8	0
123	0	8	0
129	0	8	0
135	0	8	0
141	-4	4	0
147	-4	4	0
153	-4	4	0
159	-4	4	0
165	-8	0	0
171	-8	0	0
177	-8	0	0
183	-8	0	0
189	-8	0	0
195	-8	0	0
201	-4	0	4
207	-4	0	4
213	-4	0	4
219	-4	0	4
225	0	0	8
231	0	0	8
237	0	0	8
243	0	0	8
249	0	0	8
255	0	0	8

Çizelge 4.10 (devam) : 13/15 oranında kırışlenmiş sargının iletken matrisi.

Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [Z]		
	R	S	T
261	0	-4	4
267	0	-4	4
273	0	-4	4
279	0	-4	4
285	0	-8	0
291	0	-8	0
297	0	-8	0
303	0	-8	0
309	0	-8	0
315	0	-8	0
321	4	-4	0
327	4	-4	0
333	4	-4	0
339	4	-4	0
345	8	0	0
351	8	0	0
357	8	0	0

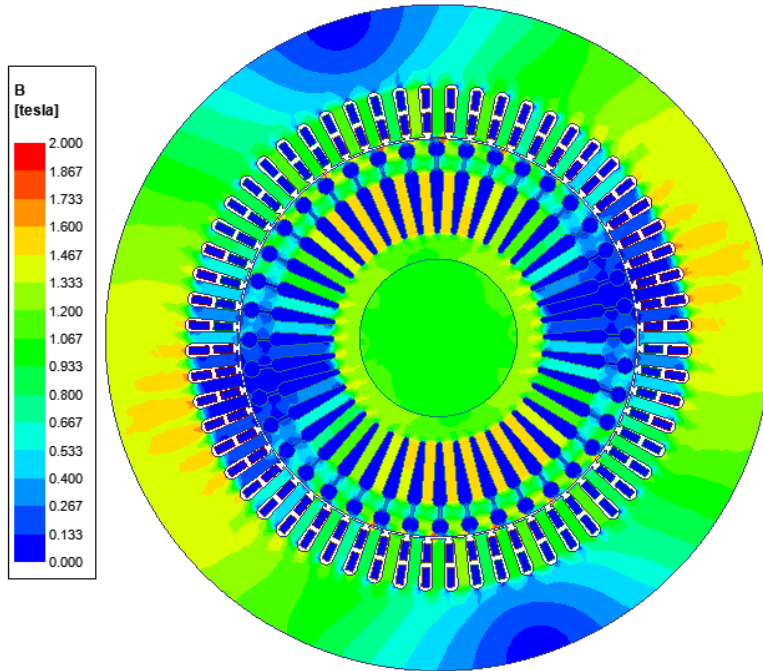


Şekil 4.17 : 13/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun modeli.

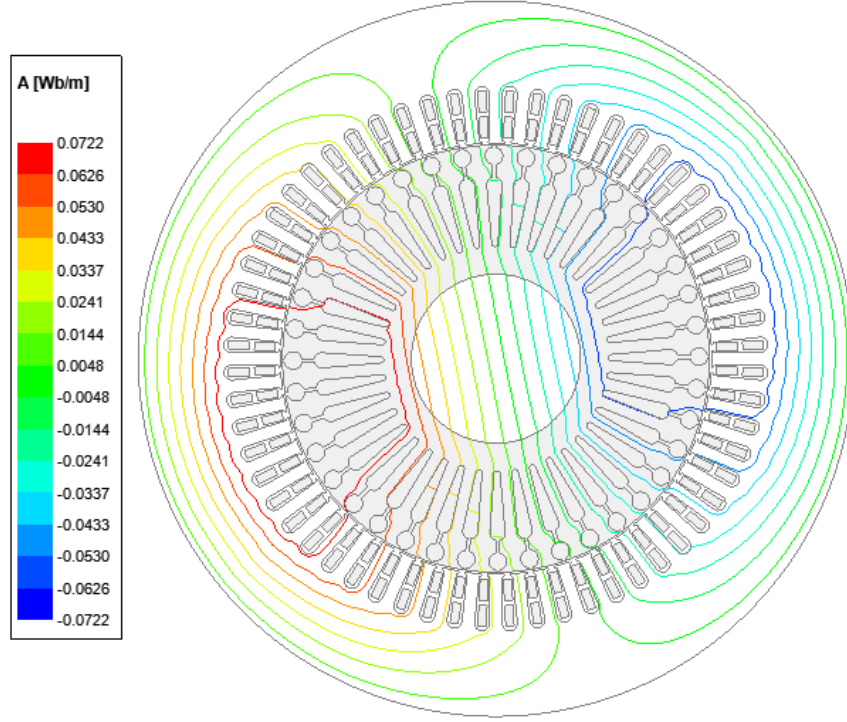


Şekil 4.18 : 13/15 oranında kirişlenmiş sargılı motorun ağ yapısı.

13/15 oranında kirişlenmiş sargılı motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.19’da verilmiştir. Şekil 4.20’de motorun manyetik akı çizgileri verilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu rotor olukların uç kısmında yaklaşık 1.9 T değerine ulaşmaktadır.

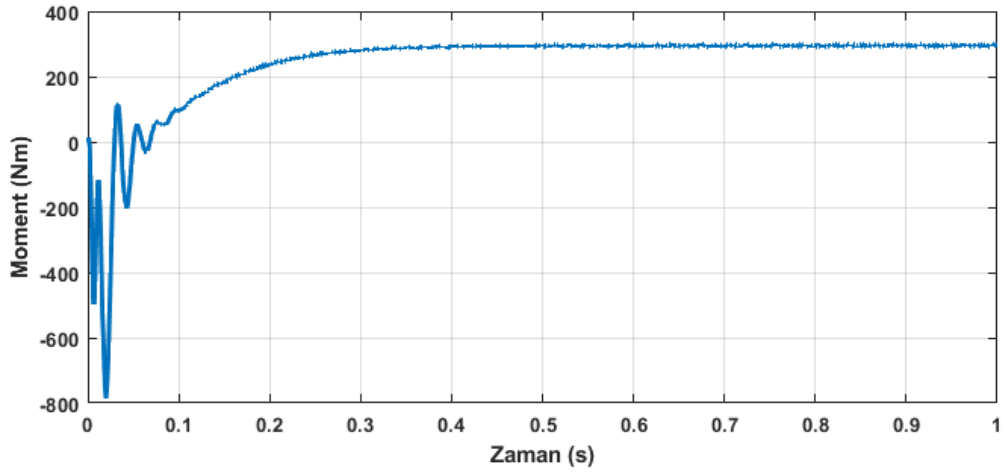


Şekil 4.19 : 13/15 oranında kirişlenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.20 : 12/15 oranında kırışlenmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Analiz sonucu motorun ortalama momentı 295.31 olup motorun moment-zaman eğrisi şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 : 13/15 oranında kırışlenmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.3.2 Sargı faktörü

Kompleks sargı faktörü ile 13/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun sargı faktörleri hesaplanmıştır. İlk 61 harmonik için kompleks sargı faktörleri her faz için çizelge

4.11’de verilmiştir. 3 faz sargısı simetrik yerleştirildiği için her faz için sargı faktörleri aynı değere sahiptir.

Çizelge 4.11 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

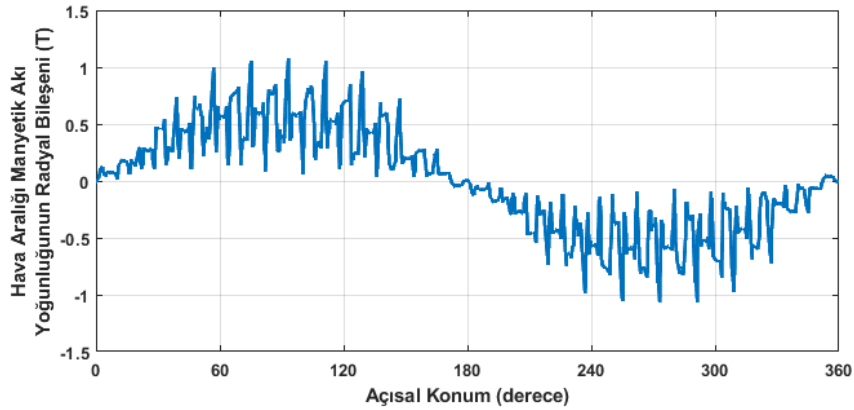
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
1	0.9345	0.9345	0.9345
2	0	0	0
3	0.5172	0.5172	0.5172
4	0	0	0
5	0.0966	0.0966	0.0966
6	0	0	0
7	0.0146	0.0146	0.0146
8	0	0	0
9	0.0681	0.0681	0.0681
10	0	0	0
11	0.0614	0.0614	0.0614
12	0	0	0
13	0.0726	0.0726	0.0726
14	0	0	0
15	0.1414	0.1414	0.1414
16	0	0	0
17	0.0588	0.0588	0.0588
18	0	0	0
19	0.0399	0.0399	0.0399
20	0	0	0
21	0.0347	0.0347	0.0347
22	0	0	0
23	0.0056	0.0056	0.0056
24	0	0	0
25	0.0259	0.0259	0.0259
26	0	0	0
27	0.0819	0.0819	0.0819
28	0	0	0
29	0.0490	0.0490	0.0490
30	0	0	0
31	0.0490	0.0490	0.0490
32	0	0	0
33	0.0819	0.0819	0.0819
34	0	0	0
35	0.0259	0.0259	0.0259
36	0	0	0

Çizelge 4.11: 13/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebe (e)	k_w		
	R	S	T
37	0.0056	0.0056	0.0056
38	0	0	0
39	0.0347	0.0347	0.0347
40	0	0	0
41	0.0567	0.0567	0.0567
42	0	0	0
43	0.0588	0.0588	0.0588
44	0	0	0
45	0.1414	0.1414	0.1414
46	0	0	0
47	0.0726	0.0726	0.0726
48	0	0	0
49	0.0614	0.0614	0.0614
50	0	0	0
51	0.0681	0.0681	0.0681
52	0	0	0
53	0.0146	0.0146	0.0146
54	0	0	0
55	0.0966	0.0966	0.0966
56	0	0	0
57	0.5172	0.5172	0.5172
58	0	0	0
59	0.9345	0.9345	0.9345
60	0	0	0
61	0.9345	0.9345	0.9345

4.3.3 Uzay harmonikleri

SEY sonucu elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu şekil 4.15’te verilmiştir.

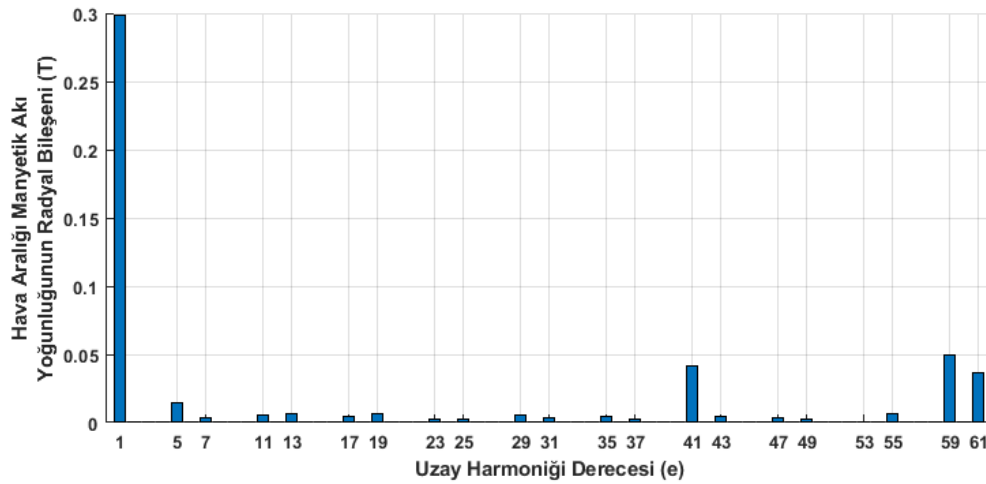


Şekil 4.22 : 13/15 oranında kırışlenmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılarak ilk 61 harmonik değeri hesaplanmıştır. Çizelge 4.12’de hesaplan harmoniklerin değerleri ve şekil 4.23’te harmonik dağılımı verilmiştir.

Çizelge 4.12 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.298007
5	0.014416
7	0.003284
11	0.005029
13	0.006181
17	0.004626
19	0.006564
23	0.002027
25	0.002292
29	0.005176
31	0.003669
35	0.004411
37	0.002930
41	0.041974
43	0.004907
47	0.003437
49	0.002308
53	0.000482
55	0.006005
59	0.049255
61	0.036255



Şekil 4.23 : 13/15 oranında kırılenmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.

4.4 İç İçe Geçmiş Sargılı Asenkron Motor

B. J. Chalmers tarafından 1964 yılında literatüre katılmış olan iç içe geçmiş sargı modeli referans motora uygulanmıştır. İç içe geçmiş sargı modeli bir faz ve bir kutup altında bulunan oluklardaki sargıların başındaki ve sonundaki sargılar komşu oldukları diğer faz sargıları ile yerlerinin değiştirilmesi ile elde edilmiştir [5]. Elde edilen iç içe geçmiş sargı modelinin iletken matrisi çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13 : İç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

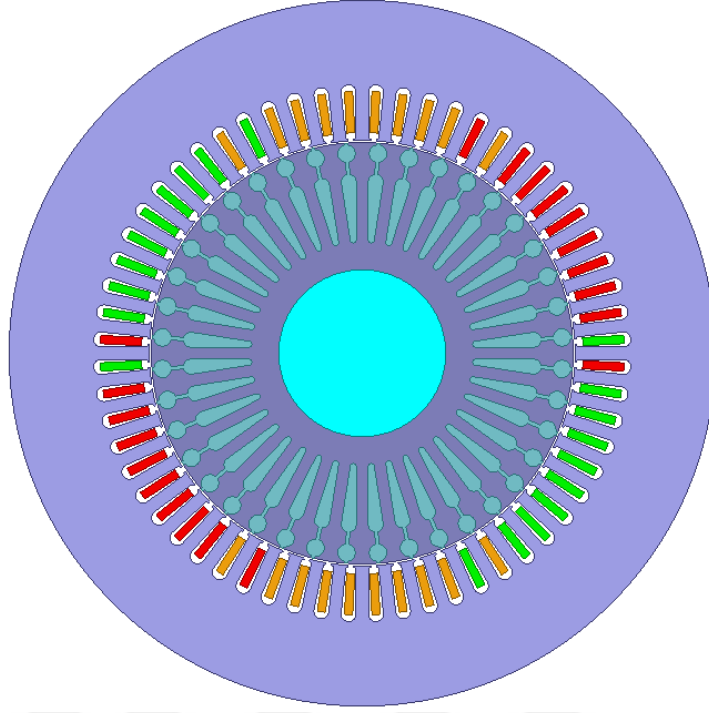
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
3	8	0	0
9	8	0	0
15	8	0	0
21	8	0	0
27	0	0	-8
33	8	0	0
39	0	0	-8
45	0	0	-8
51	0	0	-8
57	0	0	-8
63	0	0	-8
69	0	0	-8
75	0	0	-8
81	0	0	-8
87	0	8	0
93	0	0	-8
99	0	8	0
105	0	8	0
111	0	8	0
117	0	8	0
123	0	8	0
129	0	8	0
135	0	8	0
141	0	8	0
147	-8	0	0
153	0	8	0
159	-8	0	0
165	-8	0	0
171	-8	0	0
177	-8	0	0

Çizelge 4.13: İç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

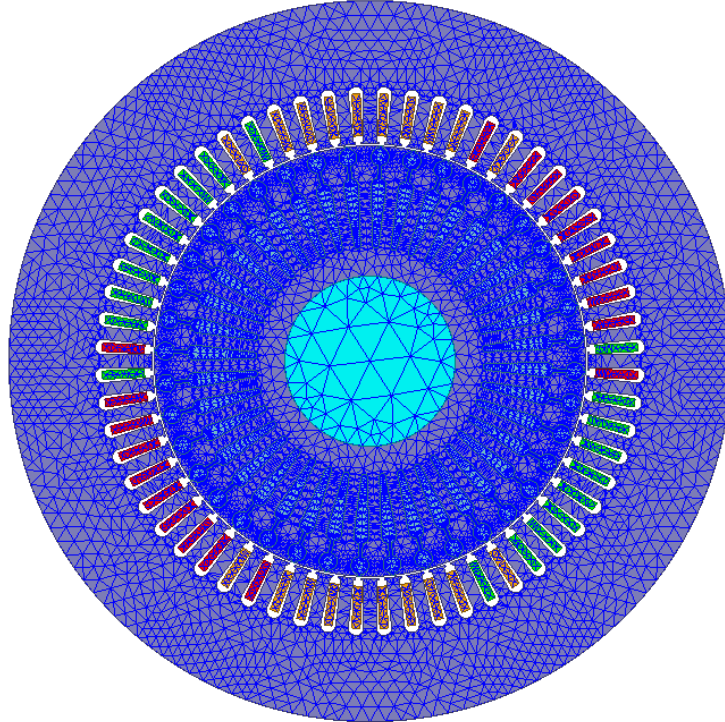
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
183	-8	0	0
189	-8	0	0
195	-8	0	0
201	-8	0	0
207	0	0	8
213	-8	0	0
219	0	0	8
225	0	0	8
231	0	0	8
237	0	0	8
243	0	0	8
249	0	0	8
255	0	0	8
261	0	0	8
267	0	-8	0
273	0	0	8
279	0	-8	0
285	0	-8	0
291	0	-8	0
297	0	-8	0
303	0	-8	0
309	0	-8	0
315	0	-8	0
321	0	-8	0
327	8	0	0
333	0	-8	0
339	8	0	0
345	8	0	0
351	8	0	0
357	8	0	0

4.4.1 Manyetik analizi

İletken dağılımı doğrultusunda modellenen iç içe geçmiş sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell program kullanılarak SEY ile analiz edilmiştir. Oluşturan motor modeli şekil 4.24'te gösterilmiştir. Her faz sargısının ayrı bir renk ile gösterildiği modelde bir faz ve bir kutup altındaki olukların başındaki ve sonundaki sargıların diğer faz sargıları ile yer değiştiği görülmektedir. Şekil 4.25'te ise motorun sonlu elemanlar analizi sırasında kullanılan ağ yapısı verilmiştir.

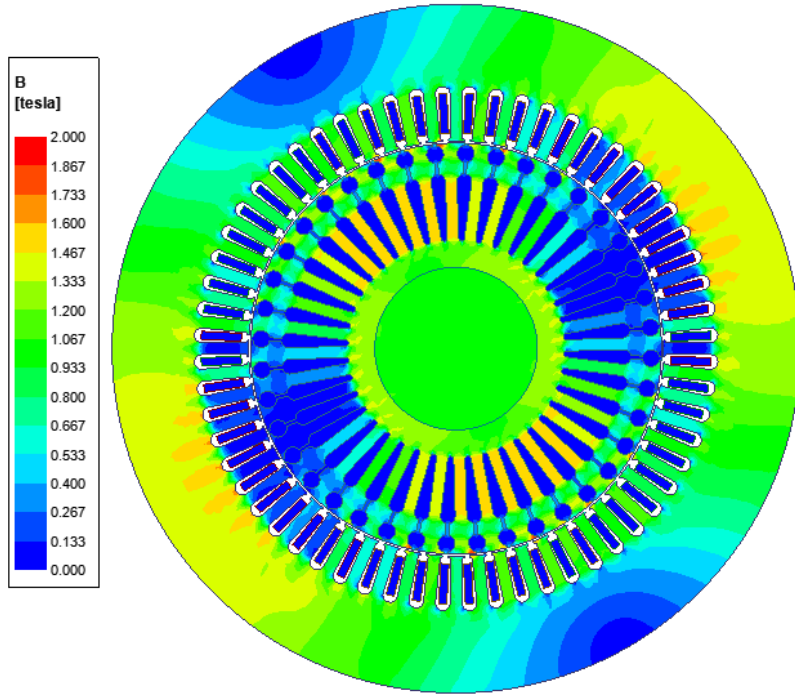


Şekil 4.24 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun modeli.

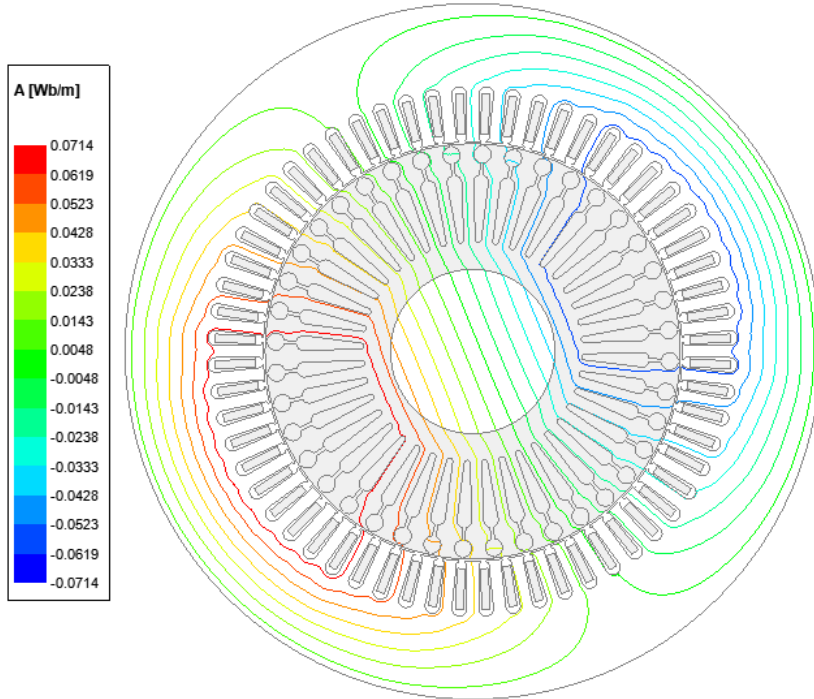


Şekil 4.25 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun ağ yapısı.

Şekil 4.26’da serpilmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve şekil 4.27’de manyetik akı çizgileri verilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu en yüksek 1.9 T değerine rotor oluklarının üst kısmında ulaşmaktadır.

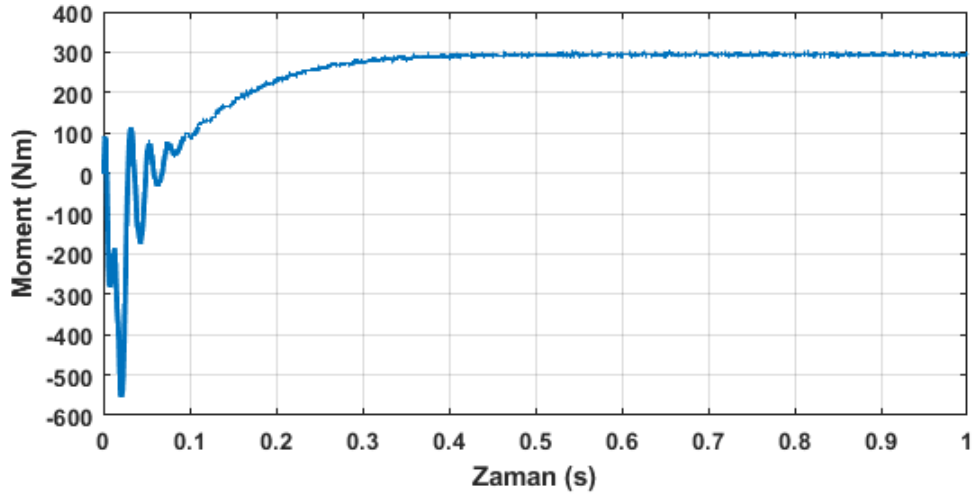


Şekil 4.26 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.27 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Analiz sonucu elde edilen moment eğrisi 294.4 Nm değerine yakınsamakta olup şekil 4.28’de moment-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.28 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.4.2 Sargı faktörü

İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun kompleks sargı faktörleri hesaplanıp çizelge 4.14'te ilk 61 uzay harmoniği için değerleri verilmiştir. Sargı simetrik bir yapıya sahip olduğu için her fazın sargı faktörü aynı değere sahiptir.

Çizelge 4.14 : İç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

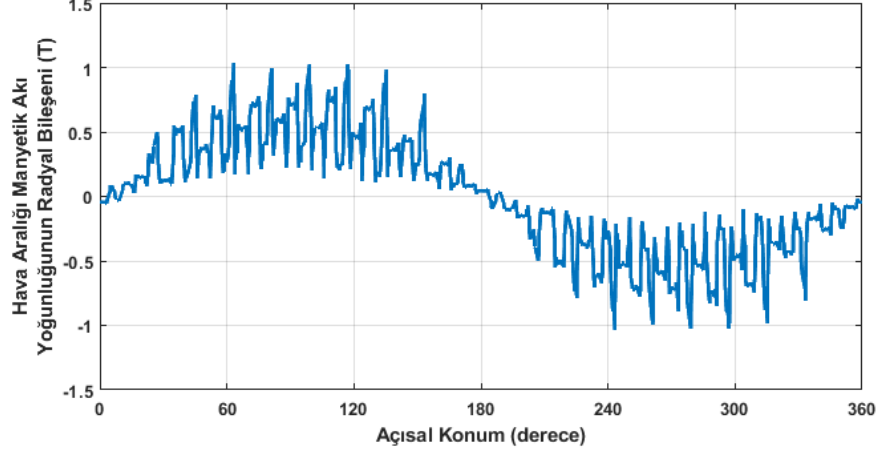
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
1	0.9449	0.9449	0.9449
2	0	0	0
3	0.5767	0.5767	0.5767
4	0	0	0
5	0.1414	0.1414	0.1414
6	0	0	0
7	0.0678	0.0678	0.0678
8	0	0	0
9	0.0387	0.0387	0.0387
10	0	0	0
11	0.0171	0.0171	0.0171
12	0	0	0
13	0.0464	0.0464	0.0464
14	0	0	0
15	0.1414	0.1414	0.1414
16	0	0	0
17	0.0911	0.0911	0.0911

Çizelge 4.14: İç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
18	0	0	0
19	0.1081	0.1081	0.1081
20	0	0	0
21	0.2442	0.2442	0.2442
22	0	0	0
23	0.1332	0.1332	0.1332
24	0	0	0
25	0.1414	0.1414	0.1414
26	0	0	0
27	0.2938	0.2938	0.2938
28	0	0	0
29	0.1497	0.1497	0.1497
30	0	0	0
31	0.1497	0.1497	0.1497
32	0	0	0
33	0.2938	0.2938	0.2938
34	0	0	0
35	0.1414	0.1414	0.1414
36	0	0	0
37	0.1332	0.1332	0.1332
38	0	0	0
39	0.2442	0.2442	0.2442
40	0	0	0
41	0.1081	0.1081	0.1081
42	0	0	0
43	0.0911	0.0911	0.0911
44	0	0	0
45	0.1414	0.1414	0.1414
46	0	0	0
47	0.0464	0.0464	0.0464
48	0	0	0
49	0.0171	0.0171	0.0171
50	0	0	0
51	0.0387	0.0387	0.0387
52	0	0	0
53	0.0678	0.0678	0.0678
54	0	0	0
55	0.1414	0.1414	0.1414
56	0	0	0
57	0.5767	0.5767	0.5767
58	0	0	0
59	0.9449	0.9449	0.9449
60	0	0	0
61	0.9449	0.9449	0.9449

4.4.3 Uzay harmonikleri

Analiz sonucu elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni şekil 4.29’da verilmiştir.

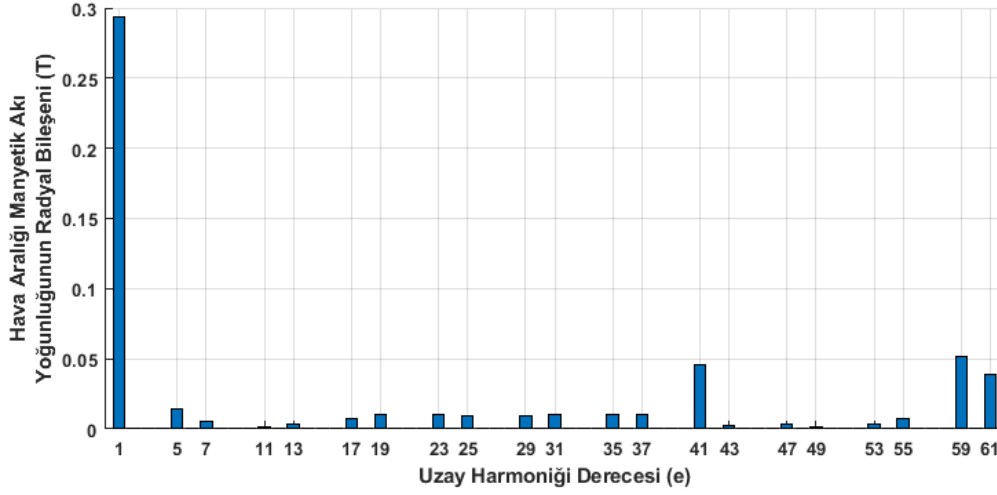


Şekil 4.29 : İç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun dalga şekli Fourier serisine açılarak uzay harmonikleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.15’te ilk 61 harmonik için değerleri ve şekil 4.30’da harmonik dağılımı verilmiştir.

Çizelge 4.15 : İç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.29390
5	0.01473
7	0.00517
11	0.00163
13	0.00361
17	0.00709
19	0.01002
23	0.01010
25	0.00983
29	0.00935
31	0.00991
35	0.00999
37	0.01032
41	0.04532
43	0.00258
47	0.00312
49	0.00100
53	0.00310
55	0.00695
59	0.05171
61	0.03880



Şekil 4.30 : İç içe geçmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.

4.5 12/15 Oranında Kirişlenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı Asenkron Motor

İç içe geçmiş sargı yapısı çift tabakalı hale getirilerek 5. uzay harmoniğini elimine etmek için kirişlenmiştir. Kirişlenme miktarı denklem 4.8’de 6 oluk hesaplanmıştır ve motorun diğer temel büyüklüklerinde bir değişiklik yapılmamıştır. Çizelge 4.16’da 12/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi verilmiştir.

Çizelge 4.16 : 12/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

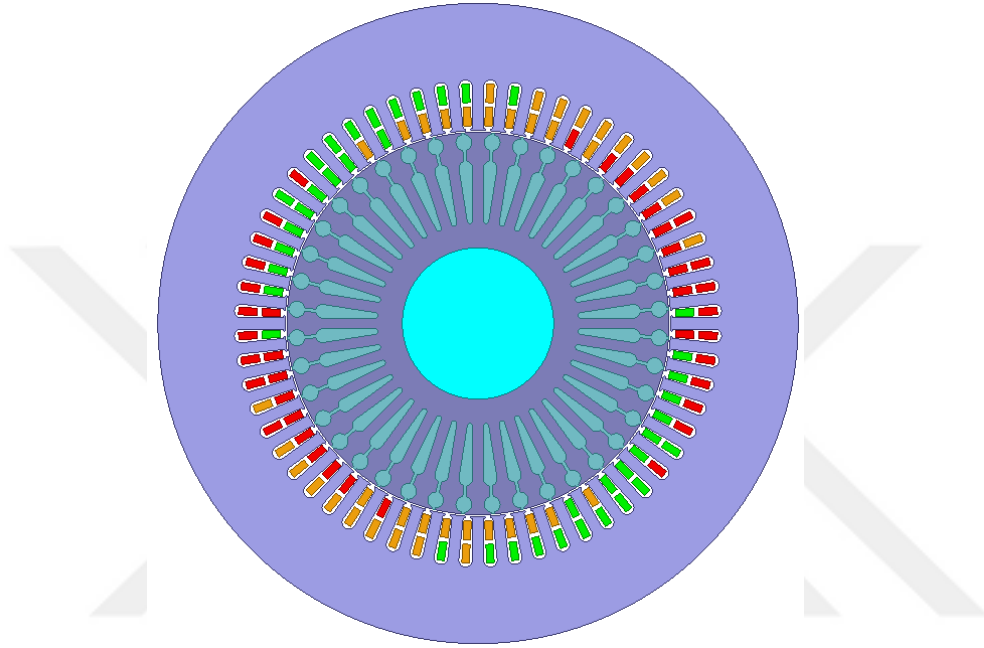
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
3	8	0	0
9	4	0	-4
15	8	0	0
21	4	0	-4
27	4	0	-4
33	4	0	-4
39	4	0	-4
45	0	0	-8
51	4	0	-4
57	0	0	-8
63	0	0	-8
69	0	4	-4
75	0	0	-8
81	0	4	-4
87	0	4	-4
93	0	4	-4

Çizelge 4.16: 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

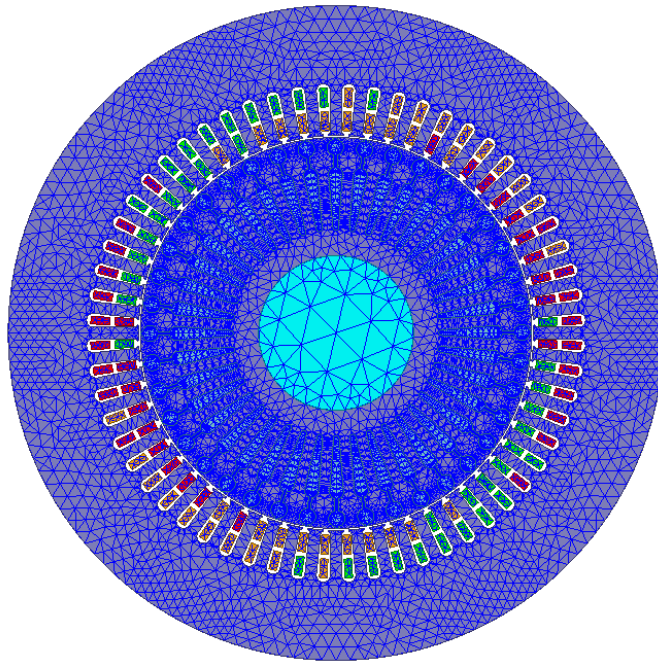
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
99	0	4	-4
105	0	8	0
111	0	4	-4
117	0	8	0
123	0	8	0
129	-4	4	0
135	0	8	0
141	-4	4	0
147	-4	4	0
153	-4	4	0
159	-4	4	0
165	-8	0	0
171	-4	4	0
177	-8	0	0
183	-8	0	0
189	-4	0	4
195	-8	0	0
201	-4	0	4
207	-4	0	4
213	-4	0	4
219	-4	0	4
225	0	0	8
231	-4	0	4
237	0	0	8
243	0	0	8
249	0	-4	4
255	0	0	8
261	0	-4	4
267	0	-4	4
273	0	-4	4
279	0	-4	4
285	0	-8	0
291	0	-4	4
297	0	-8	0
303	0	-8	0
309	4	-4	0
315	0	-8	0
321	4	-4	0
327	4	-4	0
333	4	-4	0
339	4	-4	0
345	8	0	0
351	4	-4	0
357	8	0	0

4.5.1 Manyetik analizi

Tasarlanan 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell program kullanılarak SEY ile analiz edilmiştir. Şekil 4.31’de tasarlanan motor modeli ve şekil 4.32’de analiz sırasında kullanılan ağ yapısı verilmiştir. Motor modelinde sargı yerleşimi daha iyi anlaşılabilmesi için faz sargıları farklı renklerle gösterilmiştir.

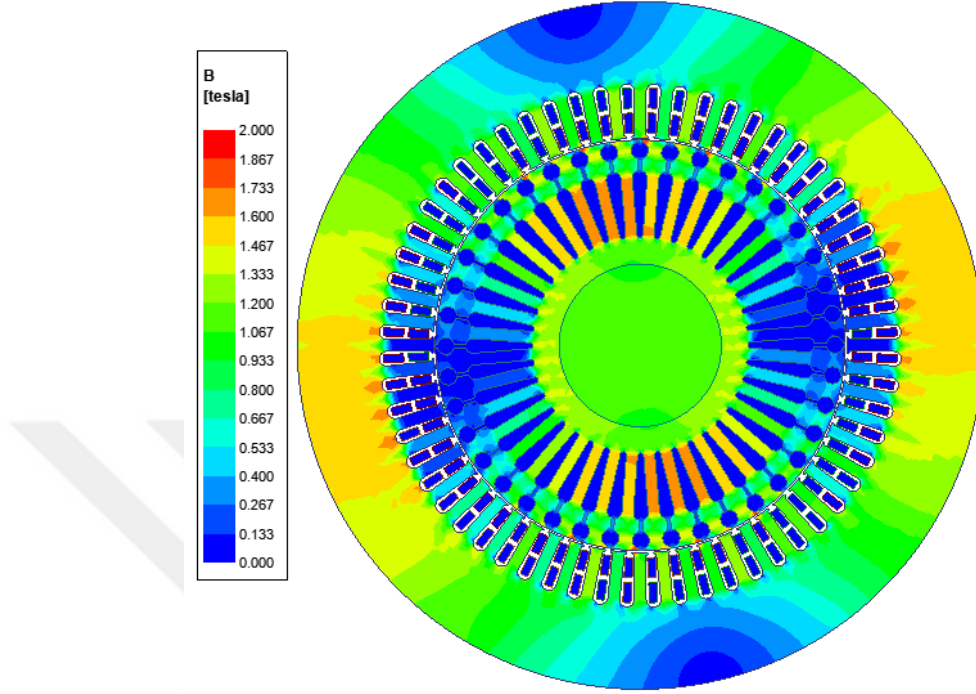


Şekil 4.31 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun modeli.

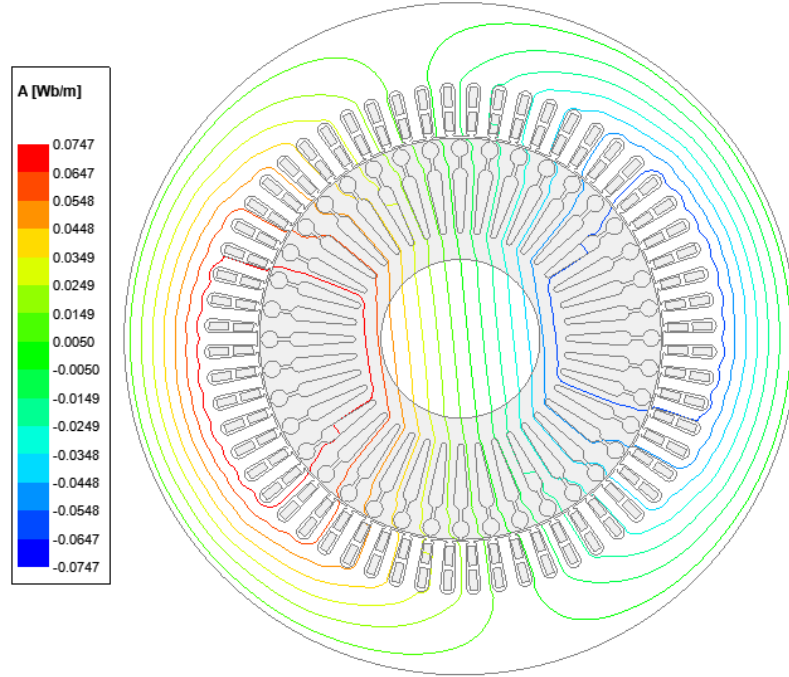


Şekil 4.32 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ağ yapısı.

12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.33'te ve manyetik akı çizgileri şekil 4.34'te verilmiştir. Rotor olukların üst kısmında manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 1.9 T değerine ulaşmaktadır.

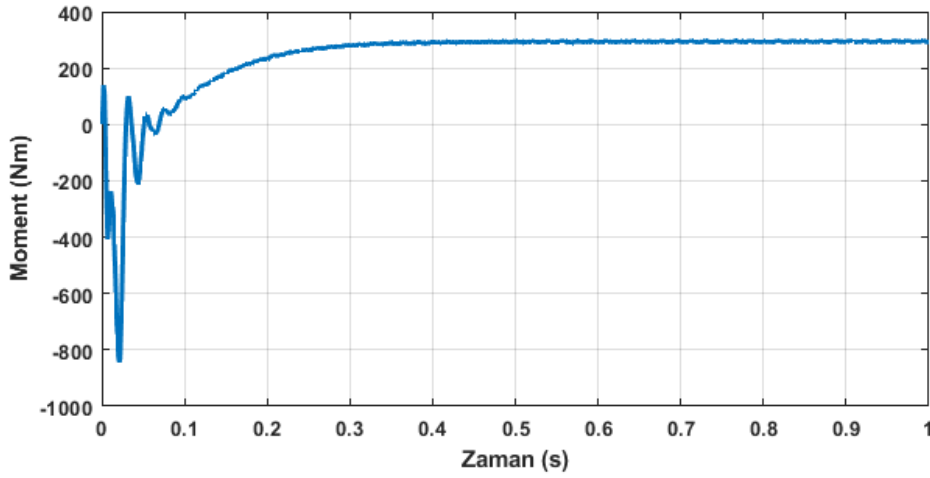


Şekil 4.33 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.34 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Analiz sonucu elde edilen moment eğrisi 294.84 Nm değerine yakınsamakta olup şekil 4.35’te moment-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.35 : 12/15 oranında kırılganlaşmış iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.5.2 Sargı faktörü

12/15 oranında kırılganlaşmış sargılı motorun sargı faktörleri kompleks yöntemle hesaplanmış olup ilk 61 harmonik için sargı faktörleri çizelge 4.17’de verilmiştir. 3 faz sargısı simetrik yerleştirildiği için her faz için sargı faktörleri aynı değere sahiptir.

Çizelge 4.17 : 12/15 oranında kırılganlaşmış iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

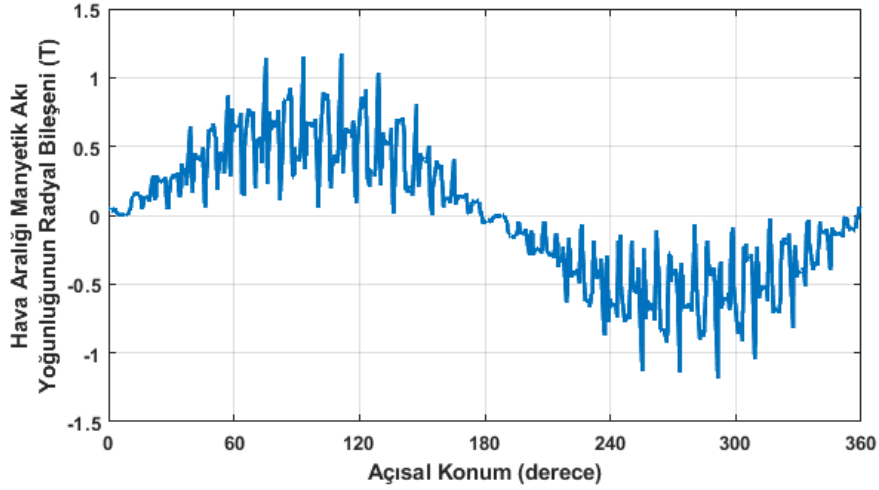
Uzay Harmoniği Mertebe (e)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
1	0.8987	0.8987	0.8987
2	0	0	0
3	0.339	0.339	0.339
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0.0399	0.0399	0.0399
8	0	0	0
9	0.0368	0.0368	0.0368
10	0	0	0
11	0.0163	0.0163	0.0163
12	0	0	0
13	0.0273	0.0273	0.0273
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0.0535	0.0535	0.0535

Çizelge 4.17: 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
18	0	0	0
19	0.1028	0.1028	0.1028
20	0	0	0
21	0.2322	0.2322	0.2322
22	0	0	0
23	0.0783	0.0783	0.0783
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0.1727	0.1727	0.1727
28	0	0	0
29	0.1423	0.1423	0.1423
30	0	0	0
31	0.1423	0.1423	0.1423
32	0	0	0
33	0.1727	0.1727	0.1727
34	0	0	0
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0.0783	0.0783	0.0783
38	0	0	0
39	0.2322	0.2322	0.2322
40	0	0	0
41	0.1028	0.1028	0.1028
42	0	0	0
43	0.0535	0.0535	0.0535
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0.0273	0.0273	0.0273
48	0	0	0
49	0.0163	0.0163	0.0163
50	0	0	0
51	0.0368	0.0368	0.0368
52	0	0	0
53	0.0399	0.0399	0.0399
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0.339	0.339	0.339
58	0	0	0
59	0.8987	0.8987	0.8987
60	0	0	0
61	0.8987	0.8987	0.8987

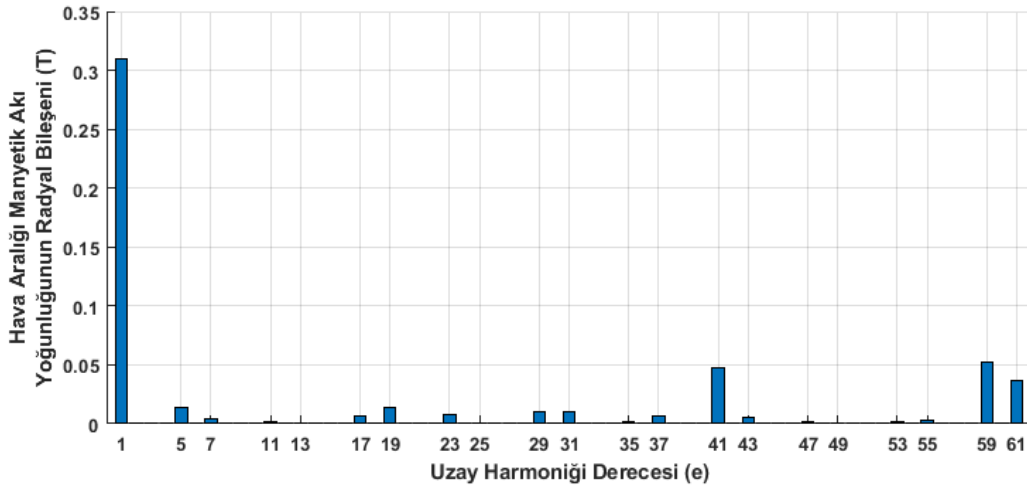
4.5.3 Uzak harmonikler

12/15 oranında kırışlenmiş i içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu analiz sonucu elde edilmiştir ve şekil 4.36’da dalga şekli verilmiştir.



şekil 4.36 : 12/15 oranında kırışlenmiş i içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılıp ilk 61 harmonik için hesaplanmıştır. Çizelge 4.18’de hesaplanan harmonik değerleri ve şekil 4.37’de harmonik dağılımı verilmiştir.



şekil 4.37 : 12/15 oranında kırışlenmiş i içe geçmiş sargılı motorun uzak harmonik dağılımı.

Çizelge 4.18 : 12/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.30915
5	0.01381
7	0.00447
11	0.00199
13	0.00112
17	0.00621
19	0.01404
23	0.00724
25	0.00085
29	0.01030
31	0.00989
35	0.00191
37	0.00620
41	0.04694
43	0.00496
47	0.00194
49	0.00110
53	0.00187
55	0.00309
59	0.05182
61	0.03629

4.6 13/15 Oranında Kırılenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı Asenkron Motor

İç içe geçmiş sargı yapısı çift tabakalı hale getirilerek 7. uzay harmoniğini elimine etmek için kırılenmiştir. 7. uzay harmoniğini baskılamak için gerekli kırılenme miktarı denklem 4.9'da 25.71° olarak hesaplanmıştır. Kırılenme miktarı 4.29 oluğa denk gelmekte olup mekanik olarak bu oranda kırılemek mümkün olmadığı için 4 oluk kırılenmiştir. Motorun diğer temel büyüklükleri değiştirilmemiştir. Çizelge 4.19'da 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun iletken matrisi verilmiştir.

4.6.1 Manyetik analizi

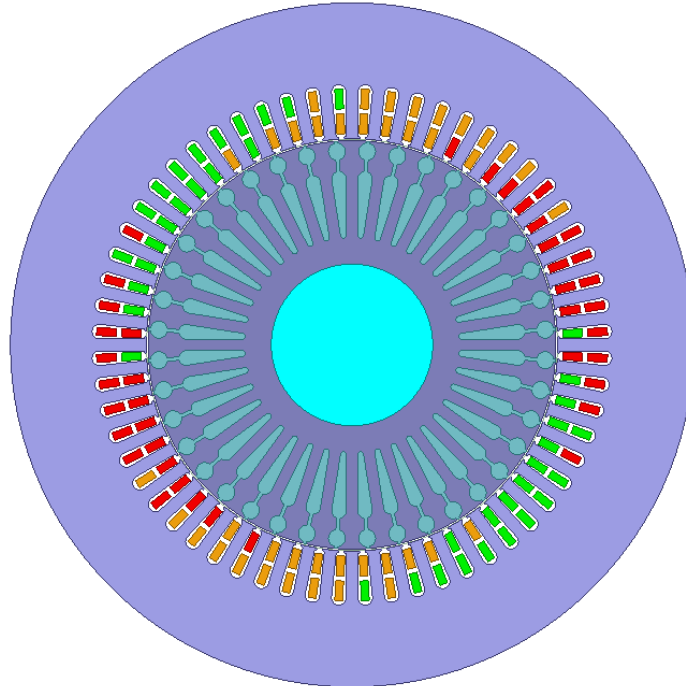
13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell program kullanılarak tasarlanmış ve SEY ile analiz edilmiştir. Şekil 4.38'de tasarlanan motor modeli ve şekil 4.39'da analiz sırasında kullanılan ağ yapısı verilmiştir.

Çizelge 4.19 : 13/15 oranında kırılganlaşmış iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

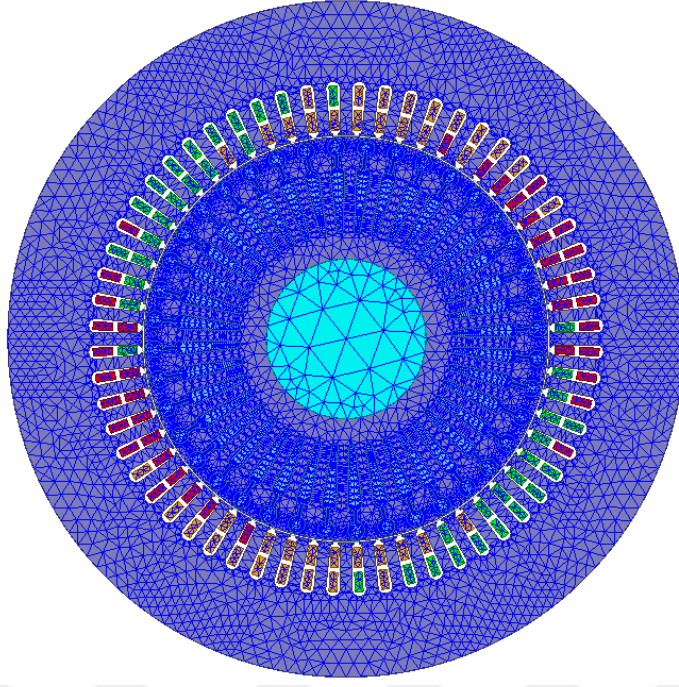
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [Z]		
	R	S	T
3	8	0	0
9	8	0	0
15	4	0	-4
21	8	0	0
27	4	0	-4
33	4	0	-4
39	0	0	-8
45	4	0	-4
51	0	0	-8
57	0	0	-8
63	0	0	-8
69	0	0	-8
75	0	4	-4
81	0	0	-8
87	0	4	-4
93	0	4	-4
99	0	8	0
105	0	4	-4
111	0	8	0
117	0	8	0
123	0	8	0
129	0	8	0
135	-4	4	0
141	0	8	0
147	-4	4	0
153	-4	4	0
159	-8	0	0
165	-4	4	0
171	-8	0	0
177	-8	0	0
183	-8	0	0
189	-8	0	0
195	-4	0	4
201	-8	0	0
207	-4	0	4
213	-4	0	4
219	0	0	8
225	-4	0	4
231	0	0	8
237	0	0	8
243	0	0	8

Çizelge 4.19: 13/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
249	0	0	8
255	0	-4	4
261	0	0	8
267	0	-4	4
273	0	-4	4
279	0	-8	0
285	0	-4	4
291	0	-8	0
297	0	-8	0
303	0	-8	0
309	0	-8	0
315	4	-4	0
321	0	-8	0
327	4	-4	0
333	4	-4	0
339	8	0	0
345	4	-4	0
351	8	0	0
357	8	0	0

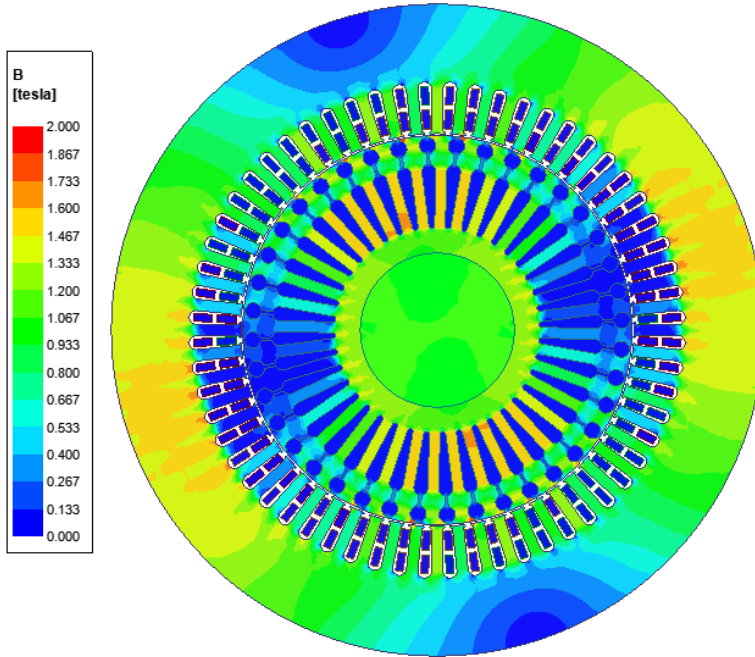


Şekil 4.38 : 13/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun modeli.

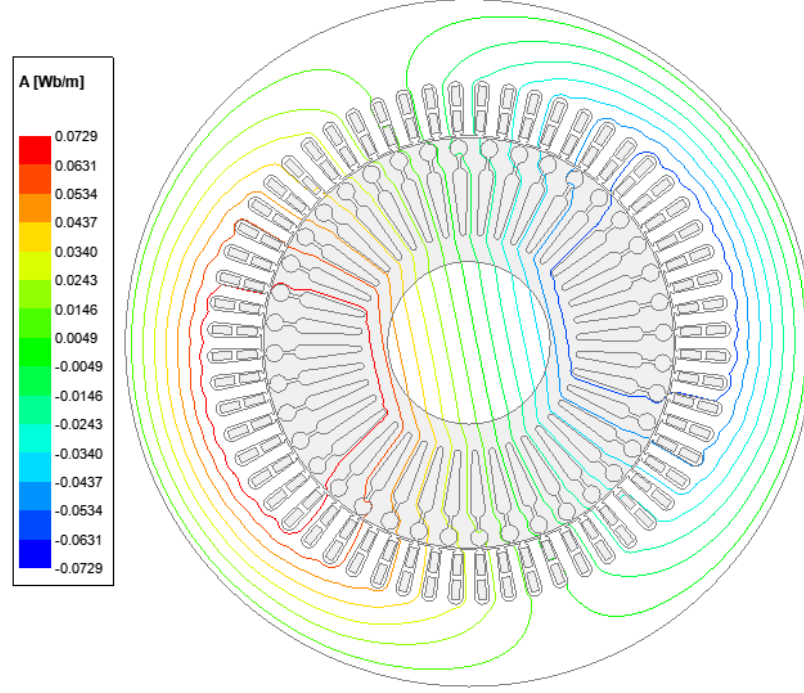


Şekil 4.39 : 13/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ağ yapısı.

Analiz sonucu motorda manyetik akı yoğunluğunun en yüksek olduğu yer rotor oluklarının uç kısmı olduğu görülmüştür ve yaklaşık 1.9 T değerindedir. Şekil 4.40'ta motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve şekil 4.41'te manyetik akı çizgileri verilmiştir.

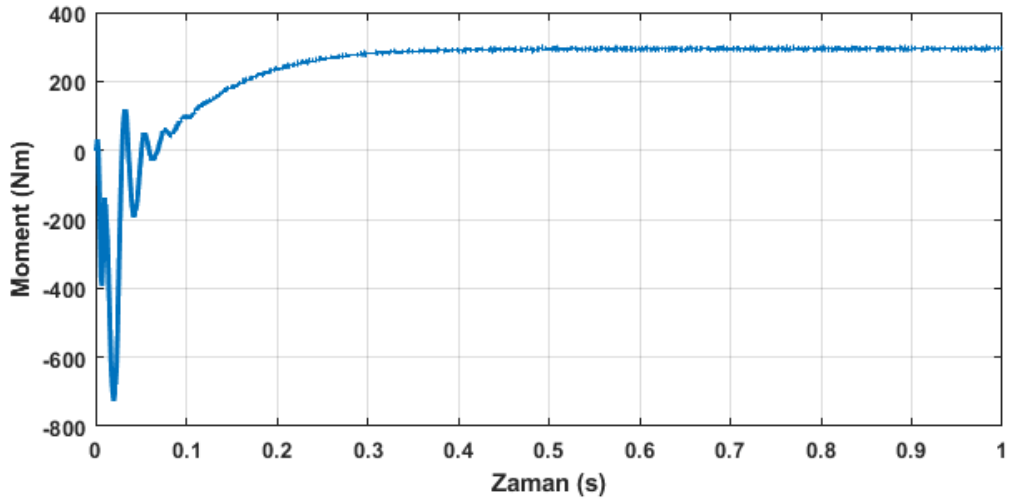


Şekil 4.40 : 13/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.41 : 13/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Şekil 4.42’de motorun analiz sonucu elde edilen momen-zaman eğrisi verilmiştir ve moment değeri 294.89 Nm değerine yakınsamaktadır.



Şekil 4.42 : 13/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.6.2 Sargı faktörü

Sargı faktörü ilk 61 harmonik için kompleks sargı faktörü yöntemi ile hesaplanmıştır. Çizelge 4.20’de her fazın ilk 61 harmonik için sargı faktörleri verilmiştir. Fazlar simetrik dağıtıldığı için her fazın harmoniklerinin sargı faktörü birbiri ile aynıdır.

Çizelge 4.20 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

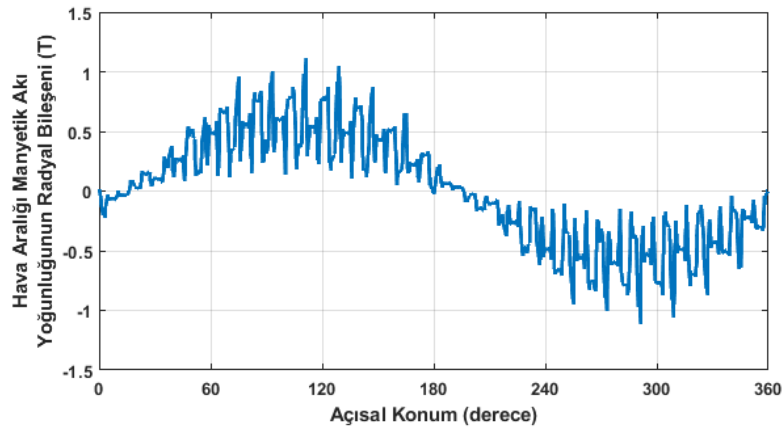
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
1	0.9243	0.9243	0.9243
2	0	0	0
3	0.4665	0.4665	0.4665
4	0	0	0
5	0.0707	0.0707	0.0707
6	0	0	0
7	0.0071	0.0071	0.0071
8	0	0	0
9	0.012	0.012	0.012
10	0	0	0
11	0.0115	0.0115	0.0115
12	0	0	0
13	0.0424	0.0424	0.0424
14	0	0	0
15	0.1414	0.1414	0.1414
16	0	0	0
17	0.0832	0.0832	0.0832
18	0	0	0
19	0.0723	0.0723	0.0723
20	0	0	0
21	0.0755	0.0755	0.0755
22	0	0	0
23	0.0139	0.0139	0.0139
24	0	0	0
25	0.0707	0.0707	0.0707
26	0	0	0
27	0.2377	0.2377	0.2377
28	0	0	0
29	0.1464	0.1464	0.1464
30	0	0	0
31	0.1464	0.1464	0.1464
32	0	0	0
33	0.2377	0.2377	0.2377
34	0	0	0
35	0.0707	0.0707	0.0707
36	0	0	0
37	0.0139	0.0139	0.0139
38	0	0	0

Çizelge 4.20: 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
39	0.0755	0.0755	0.0755
40	0	0	0
41	0.0723	0.0723	0.0723
42	0	0	0
43	0.0832	0.0832	0.0832
44	0	0	0
45	0.1414	0.1414	0.1414
46	0	0	0
47	0.0424	0.0424	0.0424
48	0	0	0
49	0.0115	0.0115	0.0115
50	0	0	0
51	0.012	0.012	0.012
52	0	0	0
53	0.0071	0.0071	0.0071
54	0	0	0
55	0.0707	0.0707	0.0707
56	0	0	0
57	0.4665	0.4665	0.4665
58	0	0	0
59	0.9243	0.9243	0.9243
60	0	0	0
61	0.9243	0.9243	0.9243

4.6.3 Uzay harmonikleri

13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu analiz sonucu elde edilmiştir ve şekil 4.43'te dalga şekli verilmiştir.

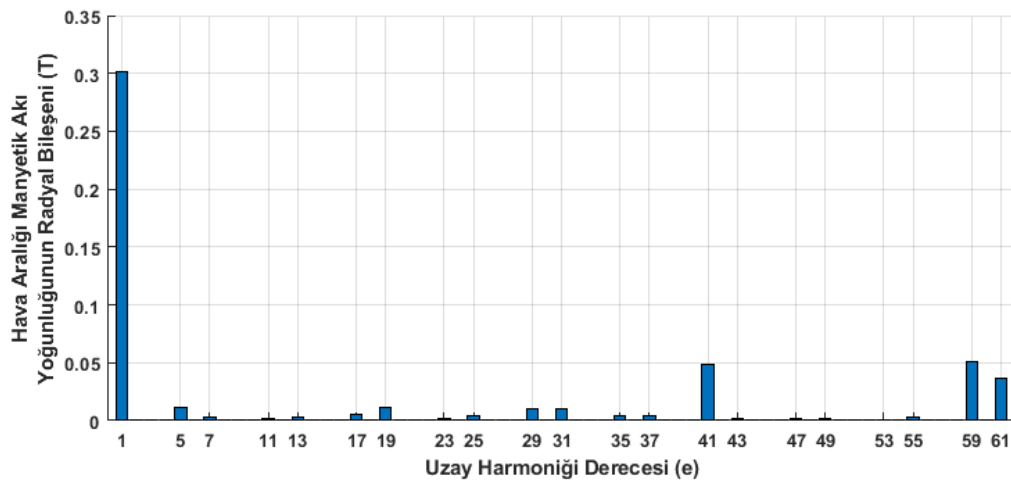


Şekil 4.43 : 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılarak uzay harmonikleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.21’de elde edilen ilk 61 harmonik için değerleri ve şekil 4.44’te harmonik dağılımı verilmiştir.

Çizelge 4.21 : 13/15 oranında kirlenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.30088
5	0.01178
7	0.00242
11	0.00150
13	0.00315
17	0.00528
19	0.01148
23	0.00160
25	0.00478
29	0.01030
31	0.00991
35	0.00472
37	0.00438
41	0.04883
43	0.00193
47	0.00176
49	0.00143
53	0.00044
55	0.00266
59	0.05063
61	0.03679



Şekil 4.44 : 13/15 oranında kirlenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.

4.7 10/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı Asenkron Motor

B. J. Chalmers yaptığı çalışmada iç içe geçmiş sargının 2/3 oranında kirişlenmesinin uzay harmonikleri bakımından faydalı olduğundan bahsetmiştir [5]. Bu sargı yapısını elde edebilmek için iç içe geçmiş sargı yapısı çift tabakalı hale getirilip 10 oluk kirişlenmiştir. Çizelge 4.22’de 10/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi verilmiştir. Motorun sargı yapısı hariç diğer büyüklüklerinde bir değişiklik yapılmamıştır.

Çizelge 4.22 : 10/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

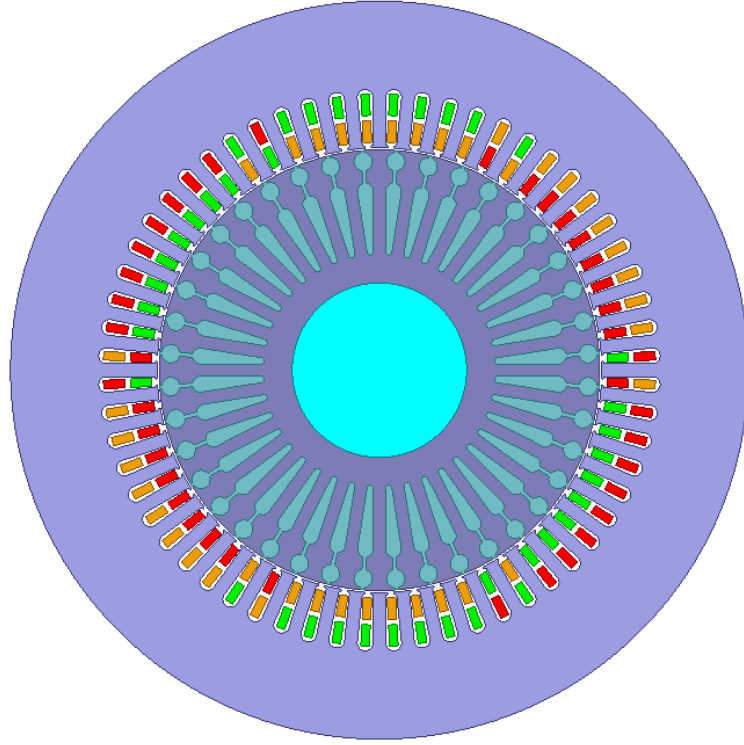
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [Z]		
	R	S	T
3	4	-4	0
9	4	0	-4
15	4	0	-4
21	4	0	-4
27	4	0	-4
33	4	0	-4
39	4	0	-4
45	4	0	-4
51	4	0	-4
57	0	4	-4
63	4	0	-4
69	0	4	-4
75	0	4	-4
81	0	4	-4
87	0	4	-4
93	0	4	-4
99	0	4	-4
105	0	4	-4
111	0	4	-4
117	-4	4	0
123	0	4	-4
129	-4	4	0
135	-4	4	0
141	-4	4	0
147	-4	4	0
153	-4	4	0
159	-4	4	0
165	-4	4	0
171	-4	4	0
177	-4	0	4
183	-4	4	0
189	-4	0	4
195	-4	0	4
201	-4	0	4

Çizelge 4.22: 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargının iletken matrisi.

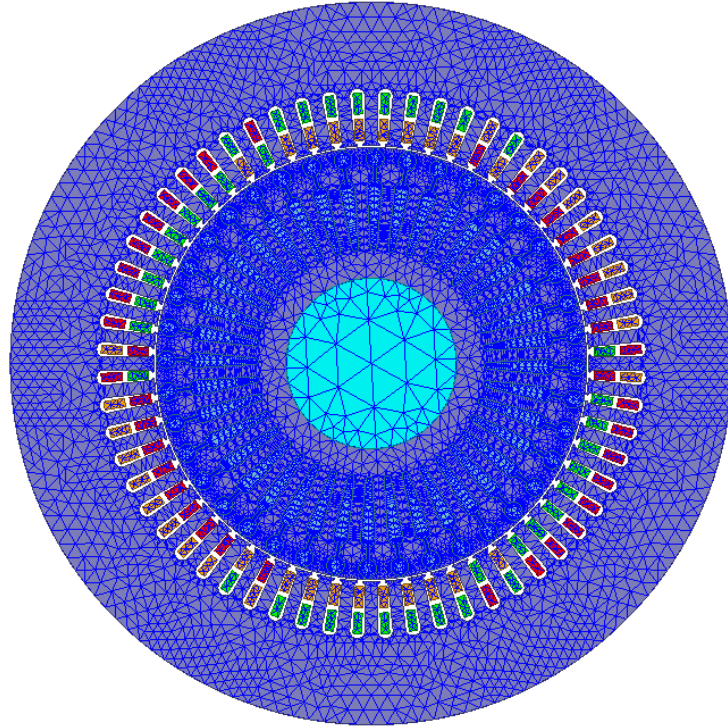
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
207	-4	0	4
213	-4	0	4
219	-4	0	4
225	-4	0	4
231	-4	0	4
237	0	-4	4
243	-4	0	4
249	0	-4	4
255	0	-4	4
261	0	-4	4
267	0	-4	4
273	0	-4	4
279	0	-4	4
285	0	-4	4
291	0	-4	4
297	4	-4	0
303	0	-4	4
309	4	-4	0
315	4	-4	0
321	4	-4	0
327	4	-4	0
333	4	-4	0
339	4	-4	0
345	4	-4	0
351	4	-4	0
357	4	0	-4

4.7.1 Manyetik analizi

10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell programında tasarlanarak SEY ile analiz edilmiştir. Şekil 4.45'te tasarlanan motorun modeli verilmiştir. Motor modelinde sargı yerleşimi daha iyi anlaşılabilmesi için faz sargıları farklı renkler ile gösterilmiştir. Şekil 4.46'da analiz sırasında kullanılan ağ yapısı verilmiştir.

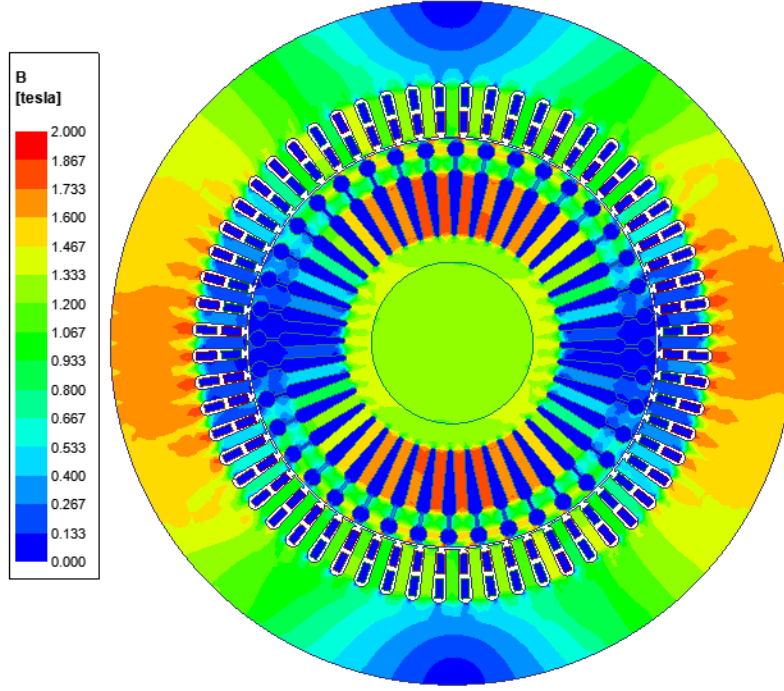


Şekil 4.45 : 10/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun modeli.

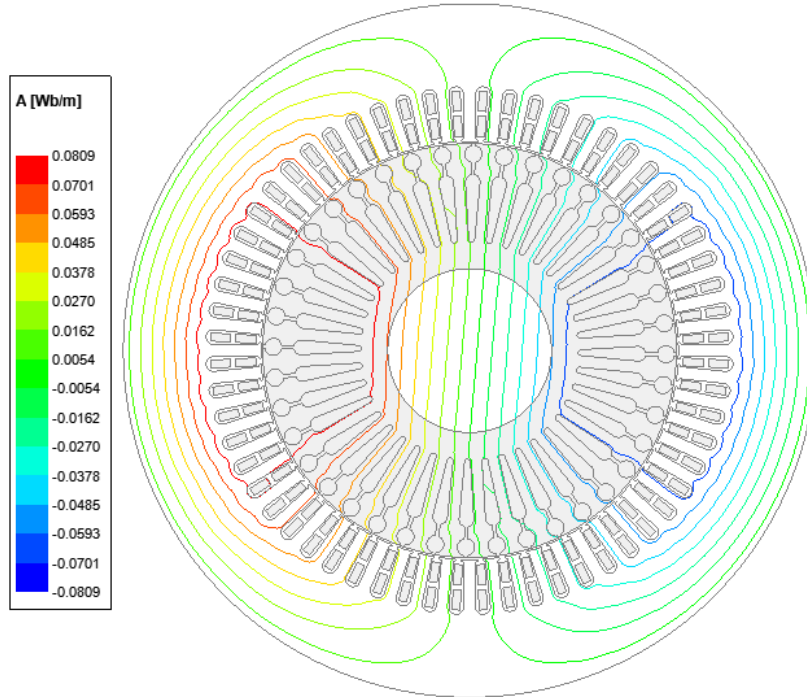


Şekil 4.46 : 10/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ağ yapısı.

Rotor olukların üst kısmında manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 2 T değerine ulaşmaktadır. 10/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.47’de ve manyetik akı çizgileri şekil 4.48’de verilmiştir.

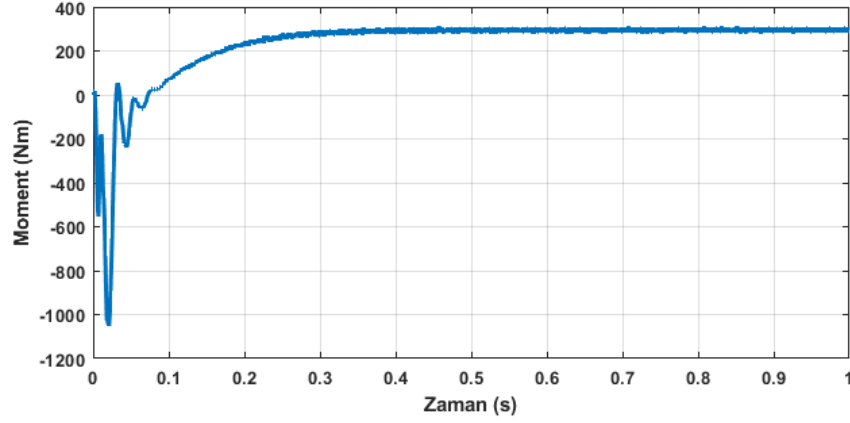


Şekil 4.47 : 10/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.48 : 10/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Analiz sonucu elde edilen moment eğrisi 295.68 Nm değerine yakınsamakta olup şekil 4.49’da moment-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.49 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.7.2 Sargı faktörü

10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun sargı faktörü kompleks yöntem ile hesaplanmıştır. Çizelge 4.23'te ilk 61 uzay harmoniği için sargı faktörleri verilmiştir. 3 faz sargısı simetrik yerleştirildiği için her faz için sargı faktörleri aynı değere sahiptir.

Çizelge 4.23 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

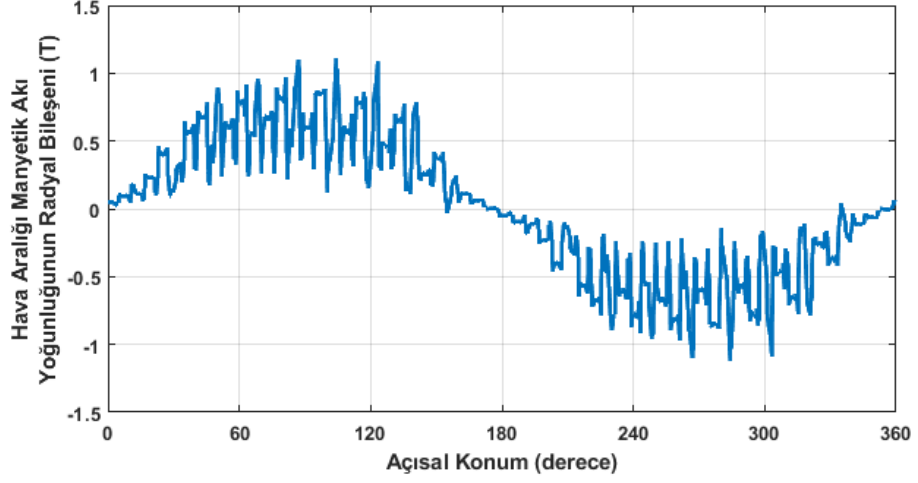
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
1	0.8183	0.8183	0.8183
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0.1225	0.1225	0.1225
6	0	0	0
7	0.0588	0.0588	0.0588
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0.0148	0.0148	0.0148
12	0	0	0
13	0.0402	0.0402	0.0402
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0.0789	0.0789	0.0789

Çizelge 4.23: 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebeşi (e)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
18	0	0	0
19	0.0936	0.0936	0.0936
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0.1153	0.1153	0.1153
24	0	0	0
25	0.1225	0.1225	0.1225
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0.1296	0.1296	0.1296
30	0	0	0
31	0.1296	0.1296	0.1296
32	0	0	0
33	0	0	0
34	0	0	0
35	0.1225	0.1225	0.1225
36	0	0	0
37	0.1153	0.1153	0.1153
38	0	0	0
39	0	0	0
40	0	0	0
41	0.0936	0.0936	0.0936
42	0	0	0
43	0.0789	0.0789	0.0789
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0.0402	0.0402	0.0402
48	0	0	0
49	0.0148	0.0148	0.0148
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0.0588	0.0588	0.0588
54	0	0	0
55	0.1225	0.1225	0.1225
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0.8183	0.8183	0.8183
60	0	0	0
61	0.8183	0.8183	0.8183

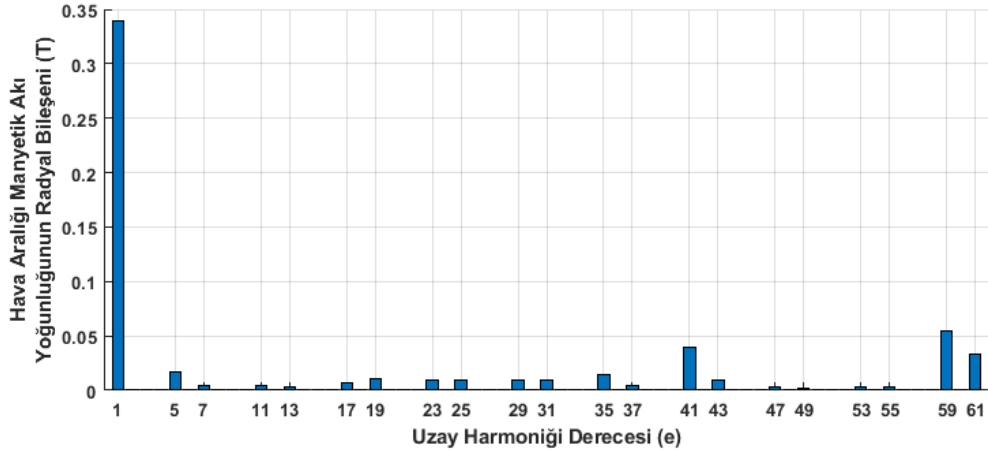
4.7.3 Uzay harmonikleri

Analiz sonucu 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir. Şekil 4.50’de manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşenin dalga şekli verilmiştir.



Şekil 4.50 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılarak uzay harmonikleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.18’de ilk 61 harmonik için hesaplanan harmonik değerleri ve şekil 4.37’de harmonik dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.51 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı motorun uzay harmonik dağılımı.

Çizelge 4.24 : 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.33909
5	0.01726
7	0.00492
11	0.00394
13	0.00319
17	0.00701
19	0.01081
23	0.00962
25	0.00969
29	0.00974
31	0.00947
35	0.01450
37	0.00391
41	0.03894
43	0.00974
47	0.00326
49	0.00165
53	0.00293
55	0.00332
59	0.05432
61	0.03382

4.8 Basamaklı Sargılı Asenkron Motor

I. R. Smith tarafından literatüre kazandırılan sargı modelinde oluklarda bulunan sarım sayıları uzay harmoniklerini azaltmak için optimize edilmiştir ve oluklarda bulunan sarım sayıları eşit değildir [4]. Bu sargı modeli çift tabakalı olup referans motora uygulanmıştır. Bu modelde bir faz ve bir kutup altında 20 oluk bulunmaktadır ve 120° elektriksel açı yer kaplamaktadır. Oluklardaki sarım sayısını hesaplamak için 20 oluğun tam ortası referans eksen olarak seçilir. Olukların referans eksene olan elektriksel açısı θ olmak üzere sarım sayıları denklem 4.10'daki gibi hesaplanır. Çizelge 4.25'te motorun iletken matrisi verilmiştir. Motorun oluk yapısı ve diğer temel büyüklükleri değiştirilmemiştir.

$$n(\theta) = N \sin(60^\circ - |\theta|) \quad (4.10)$$

Çizelge 4.25 : Basamaklı sargının iletken matrisi.

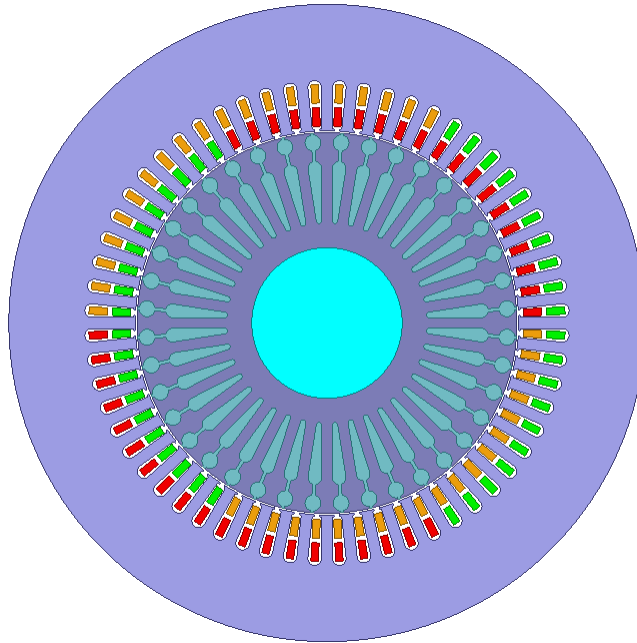
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [Z]		
	R	S	T
3	7	0	-1
9	6	0	-1
15	6	0	-2
21	5	0	-3
27	4	0	-4
33	4	0	-4
39	3	0	-5
45	2	0	-6
51	1	0	-6
57	1	0	-7
63	0	1	-7
69	0	1	-6
75	0	2	-6
81	0	3	-5
87	0	4	-4
93	0	4	-4
99	0	5	-3
105	0	6	-2
111	0	6	-1
117	0	7	-1
123	-1	7	0
129	-1	6	0
135	-2	6	0
141	-3	5	0
147	-4	4	0
153	-4	4	0
159	-5	3	0
165	-6	2	0
171	-6	1	0
177	-7	1	0
183	-7	0	1
189	-6	0	1
195	-6	0	2
201	-5	0	3
207	-4	0	4
213	-4	0	4
219	-3	0	5
225	-2	0	6
231	-1	0	6
237	-1	0	7
243	0	-1	7
249	0	-1	6
255	0	-2	6

Çizelge 4.25: Basamaklı sargının iletken matrisi.

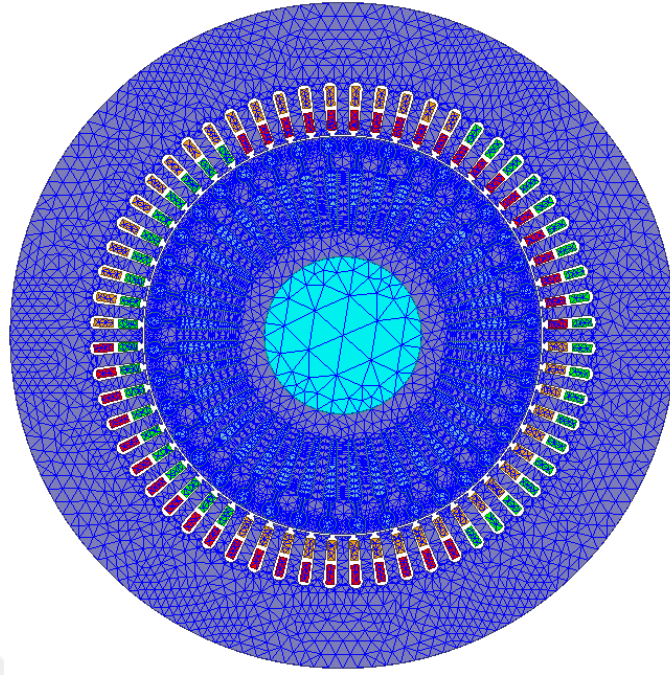
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
261	0	-3	5
267	0	-4	4
273	0	-4	4
279	0	-5	3
285	0	-6	2
291	0	-6	1
297	0	-7	1
303	1	-7	0
309	1	-6	0
315	2	-6	0
321	3	-5	0
327	4	-4	0
333	4	-4	0
339	5	-3	0
345	6	-2	0
351	6	-1	0
357	7	-1	0

4.8.1 Manyetik analizi

Basamaklı sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell programı ile tasarlanarak SEY ile analiz edilmiştir. Şekil 4.52’de tasarlanan motor modeli ve şekil 4.53’te analiz sırasında kullanılan ağ yapısı verilmiştir. Motor modelinde sargı yerleşimi daha iyi anlaşılabilmesi için faz sargıları farklı renklerle gösterilmiştir.

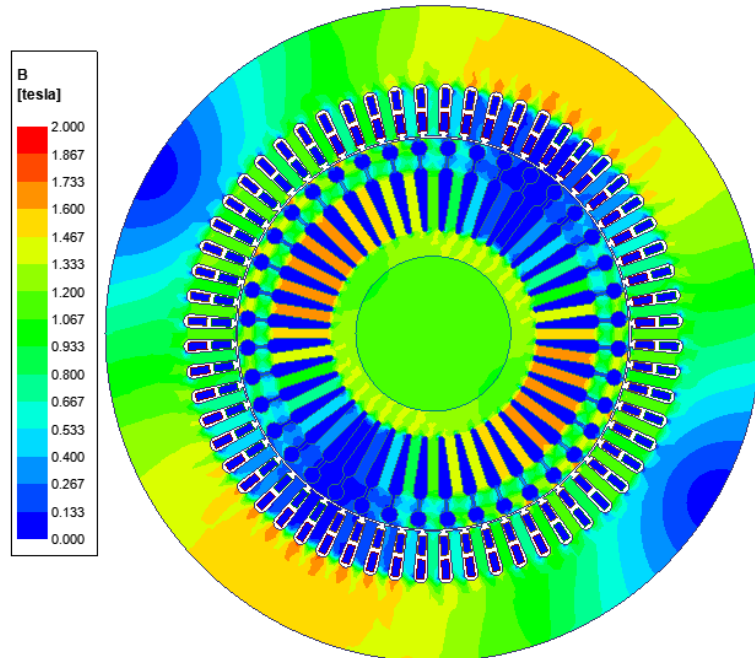


Şekil 4.52 : Basamaklı sargılı motorun modeli.

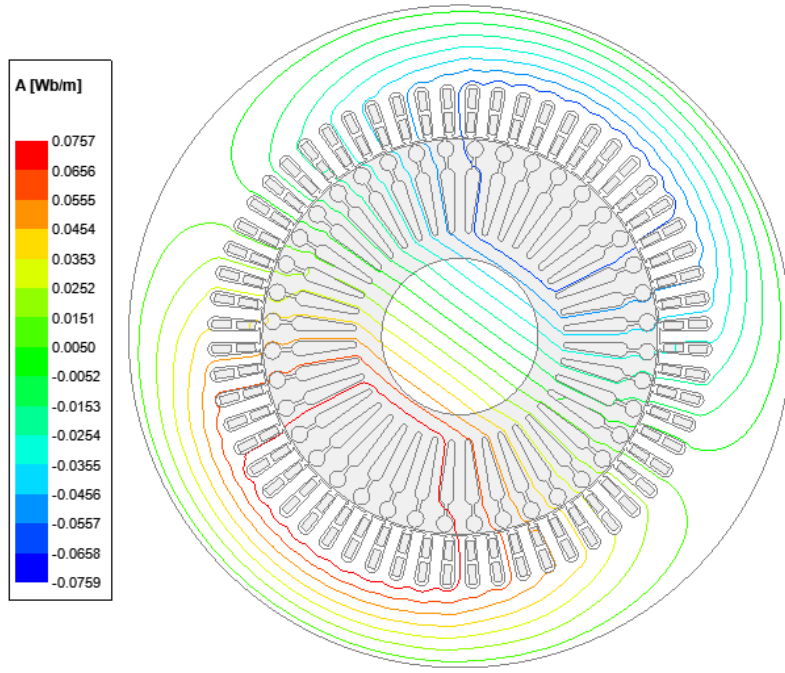


Şekil 4.53 : Basamaklı sargılı motorun ağ yapısı.

Basamaklı sargılı motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.54’de ve manyetik akı çizgileri şekil 4.55’te verilmiştir. Rotor olukların üst kısmında manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 1.9 T değerine ulaşmaktadır.

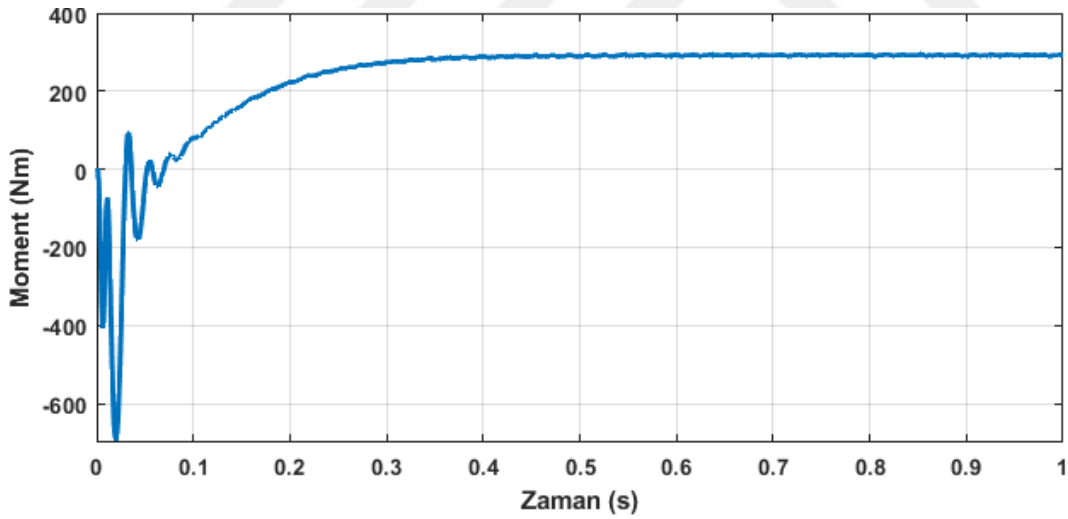


Şekil 4.54 : Basamaklı sargılı asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.55 : Basamaklı sargılı asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Analiz sonucu elde edilen moment eğrisi 291.95 Nm değerine yakınsamakta olup şekil 4.56’da moment-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.56 : Basamaklı sargılı asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.8.2 Sargı faktörü

Basamaklı sargılı asenkron motorun sargı faktörü kompleks yöntem ile hesaplanmıştır. Çizelge 4.26’da ilk 61 uzay harmoniği için sargı faktörleri verilmiştir. 3 faz sargısı simetrik yerleştirildiği için her faz için sargı faktörleri aynı değere sahiptir.

Çizelge 4.26 : Basamaklı sargılı asenkron motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

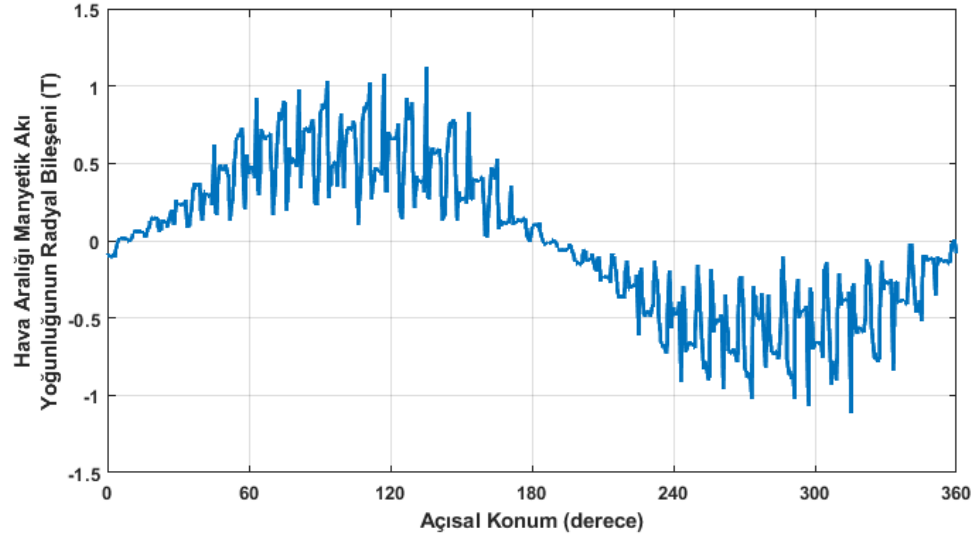
Uzay harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
1	0.9039	0.9039	0.9039
2	0	0	0
3	0.3689	0.3689	0.3689
4	0	0	0
5	0.0196	0.0196	0.0196
6	0	0	0
7	0.0209	0.0209	0.0209
8	0	0	0
9	0.0308	0.0308	0.0308
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0.0122	0.0122	0.0122
14	0	0	0
15	0.013	0.013	0.013
16	0	0	0
17	0.0128	0.0128	0.0128
18	0	0	0
19	0.0436	0.0436	0.0436
20	0	0	0
21	0.0138	0.0138	0.0138
22	0	0	0
23	0.0083	0.0083	0.0083
24	0	0	0
25	0.0311	0.0311	0.0311
26	0	0	0
27	0.0058	0.0058	0.0058
28	0	0	0
29	0.0167	0.0167	0.0167
30	0	0	0
31	0.0167	0.0167	0.0167
32	0	0	0
33	0.0058	0.0058	0.0058
34	0	0	0
35	0.0311	0.0311	0.0311
36	0	0	0
37	0.0083	0.0083	0.0083
38	0	0	0

Çizelge 4.26: Basamaklı sargılı asenkron motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebe (e)	k_w		
	R	S	T
39	0.0138	0.0138	0.0138
40	0	0	0
41	0.0436	0.0436	0.0436
42	0	0	0
43	0.0128	0.0128	0.0128
44	0	0	0
45	0.013	0.013	0.013
46	0	0	0
47	0.0122	0.0122	0.0122
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0.0308	0.0308	0.0308
52	0	0	0
53	0.0209	0.0209	0.0209
54	0	0	0
55	0.0196	0.0196	0.0196
56	0	0	0
57	0.3689	0.3689	0.3689
58	0	0	0
59	0.9039	0.9039	0.9039
60	0	0	0
61	0.9039	0.9039	0.9039

4.8.3 Uzay harmonikleri

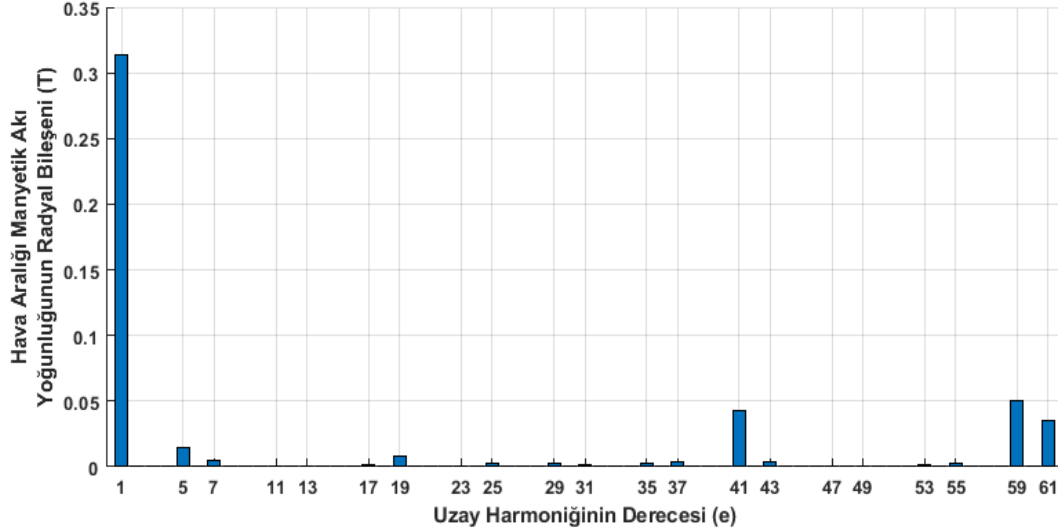
Basamaklı sargılı edilmiş asenkron motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu SEY ile elde edilmiştir. Şekil 4.57’de manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeninin dalga şekli verilmiştir. Elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılarak uzay harmonikleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.27’de ilk 61 harmonik için hesaplanan harmonik değerleri ve şekil 4.58’de harmonik dağılımı verilmiştir



Şekil 4.57 : Basamaklı sargılı asenkron motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Çizelge 4.27 : Basamaklı sargılı asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.31410
5	0.01509
7	0.00519
11	0.00053
13	0.00071
17	0.00192
19	0.00818
23	0.00057
25	0.00241
29	0.00218
31	0.00183
35	0.00274
37	0.00326
41	0.04308
43	0.00414
47	0.00105
49	0.00059
53	0.00156
55	0.00299
59	0.05082
61	0.03567



Şekil 4.58 : Basamaklı sargılı asenkron motorun uzay harmonik dağılımı.

4.9 Oluk Konumları ve Sarım Sayısı Optimize Edilmiş Asenkron Motor

D.A Kocabaş'ın 2005 yılında yaptığı çalışmada oluk konumlarını ve sarım sayılarını Newton Raphson iterasyon yöntemi ile optimize ederek uzay harmoniklerini azaltan bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem ile var olan ilk (q-1) uzay harmoniği baskılamıştır [10,11]. Bu yöntem referans motora uygulanmış ve yöntemin yapısı gereği stator oluklarının yapısı değişmiştir. Çizelge 4.28'te yeni tasarlanan motorun oluk konumları iletken matrisi verilmiştir. Oluklarda bulunan sarım sayısı değiştiği için oluk şekilleri de değişmiştir fakat bunun haricinde motor geometrisinde bir değişiklik yapılmamış, stator dış çapı, rotor dış çapı, uzunluk gibi temel büyüklükleri değiştirilmemiştir.

4.9.1 Manyetik analizi

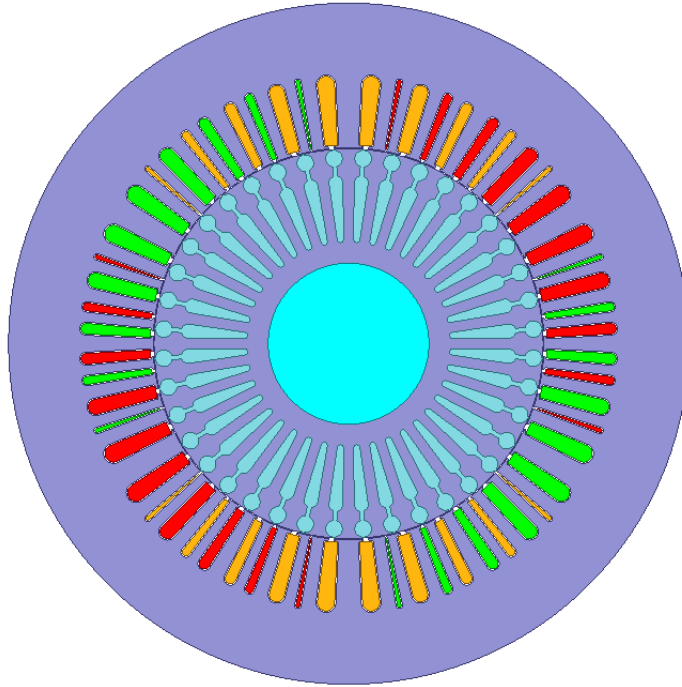
Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motor ANSYS Maxwell program ile tasarlanarak SEY ile analiz edilmiştir. Şekil 4.59'da tasarlanan motor modeli verilmiştir. Motor modelinde sargı yerleşimi daha iyi anlaşılabilmesi için faz sargıları farklı renkler ile gösterilmiştir. Şekil 4.60'ta analiz sırasında kullanılan ağ yapısı verilmiştir.

Çizelge 4.28 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargının iletken matrisi.

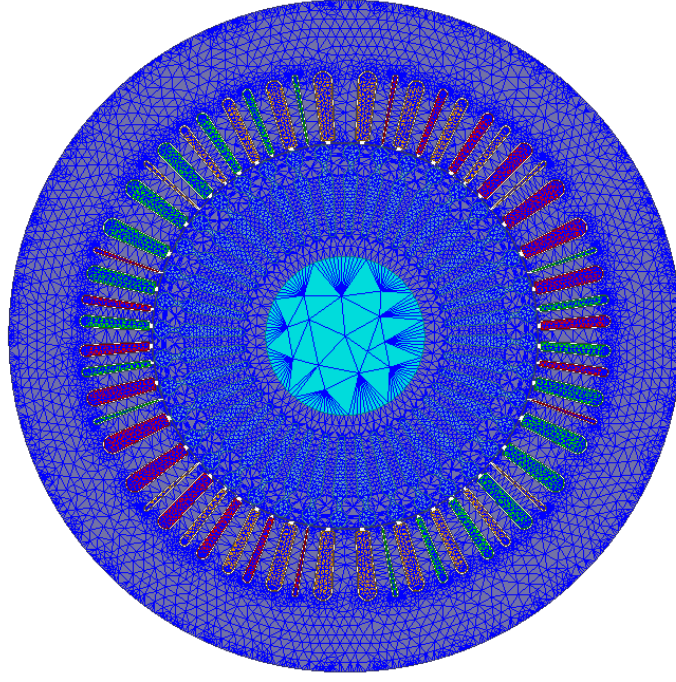
Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [Z]		
	R	S	T
5	12	0	0
11	0	0	-3
16	11	0	0
22	0	0	-6
27	8	0	0
33	0	0	-8
38	6	0	0
44	0	0	-11
49	3	0	0
55	0	0	-12
65	0	0	-12
71	0	3	0
76	0	0	-11
82	0	6	0
87	0	0	-8
93	0	8	0
98	0	0	-6
104	0	11	0
109	0	0	-3
115	0	12	0
125	0	12	0
131	-3	0	0
136	0	11	0
142	-6	0	0
147	0	8	0
153	-8	0	0
158	0	6	0
164	-11	0	0
169	0	3	0
175	-12	0	0
185	-12	0	0
191	0	0	3
196	-11	0	0
202	0	0	6
207	-8	0	0
213	0	0	8
218	-6	0	0
224	0	0	11
229	-3	0	0
235	0	0	12
245	0	0	12
251	0	-3	0
256	0	0	11
262	0	-6	0
267	0	0	8

Çizelge 4.28: Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargının iletken matrisi.

Oluk Konumu (°)	İletken Matrisi [z]		
	R	S	T
273	0	-8	0
278	0	0	6
284	0	-11	0
289	0	0	3
295	0	-12	0
305	0	-12	0
311	3	0	0
316	0	-11	0
322	6	0	0
327	0	-8	0
333	8	0	0
338	0	-6	0
344	11	0	0
349	0	-3	0
355	12	0	0

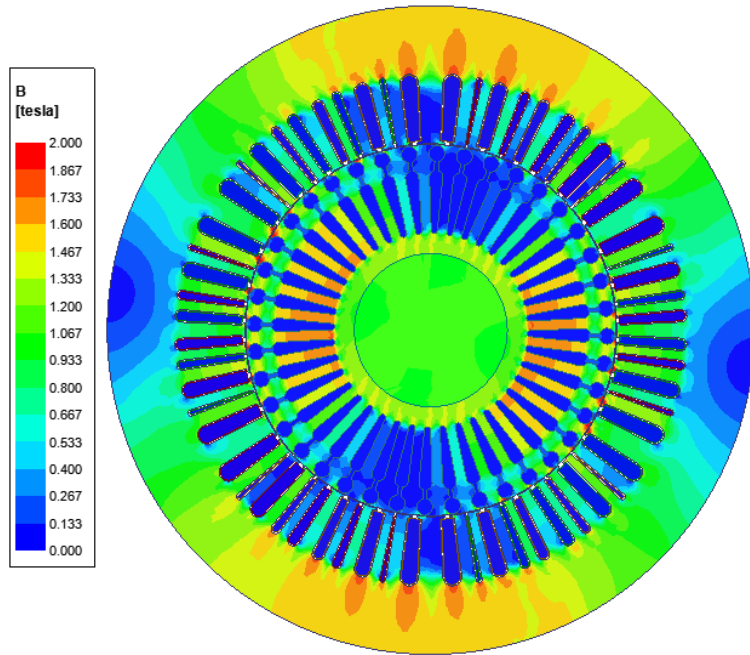


Şekil 4.59 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun modeli.

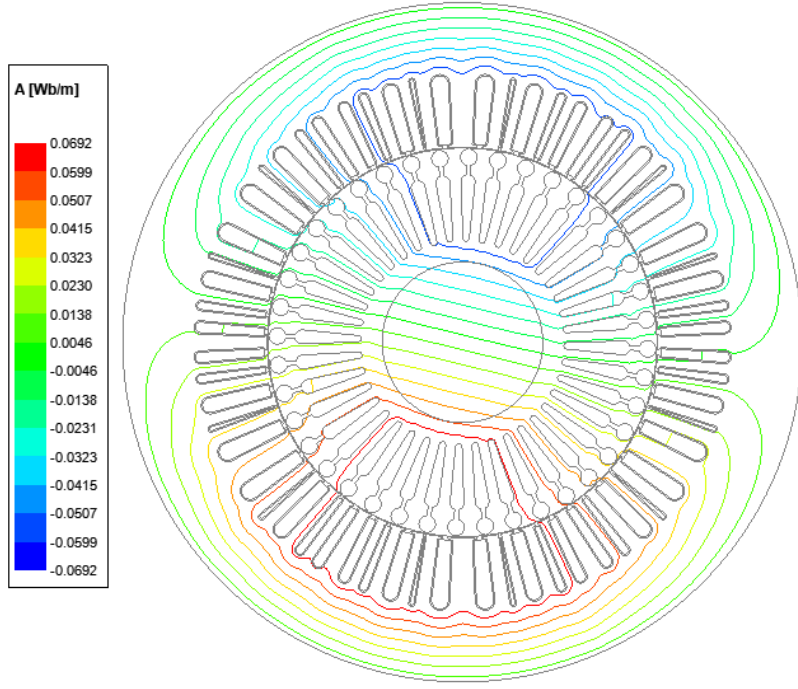


Şekil 4.60 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun ağ yapısı.

Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.61’de ve manyetik akı çizgileri şekil 4.62’de verilmiştir. Rotor olukların üst kısmında manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 1.93 T değerine ulaşmaktadır.

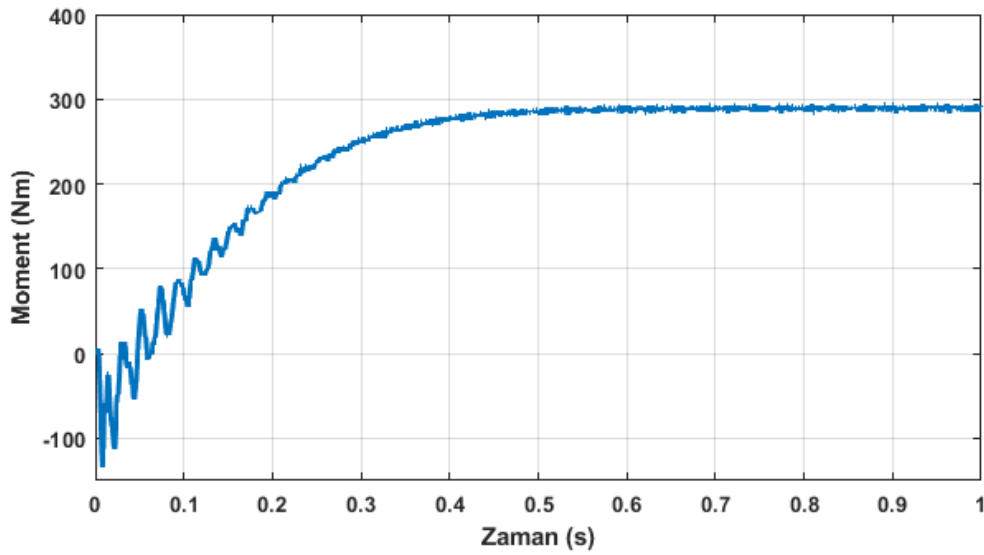


Şekil 4.61 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 4.62 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun manyetik akı çizgileri.

Analiz sonucu elde edilen moment eğrisi 289.64 Nm değerine yakınsamakta olup şekil 4.63'te moment-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.63 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun moment-zaman eğrisi.

4.9.2 Sargı faktörü

Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun sargı faktörü kompleks yöntem ile hesaplanmıştır. Çizelge 4.29'da ilk 61 uzay harmoniği için sargı

faktörleri verilmiştir. 3 faz sargısı simetrik yerleştirildiği için her faz için sargı faktörleri aynı değere sahiptir.

Çizelge 4.29 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

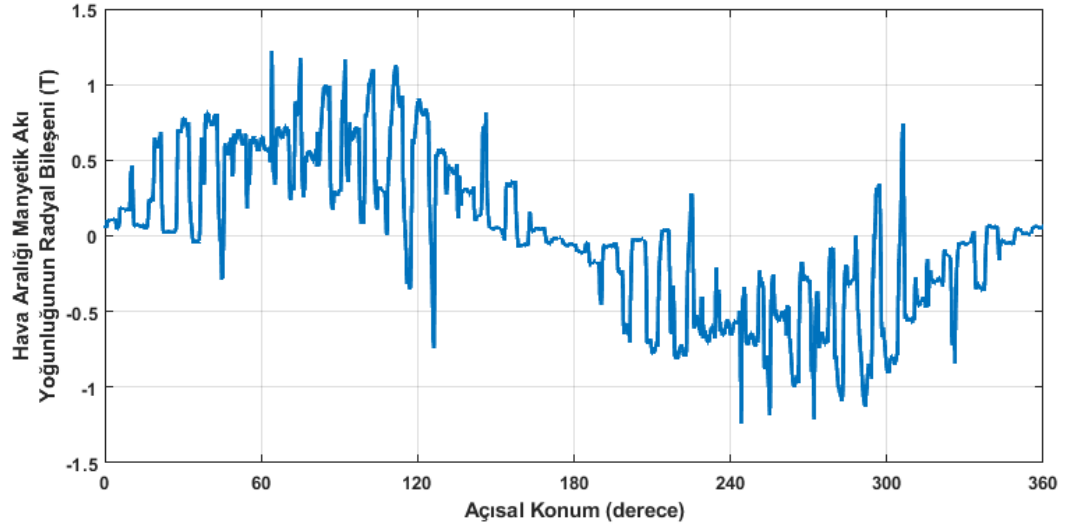
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
1	0.9088	0.9088	0.9088
2	0	0	0
3	0.3812	0.3812	0.3812
4	0	0	0
5	0.0012	0.0012	0.0012
6	0	0	0
7	0.0065	0.0065	0.0065
8	0	0	0
9	0.0532	0.0532	0.0532
10	0	0	0
11	0.007	0.007	0.007
12	0	0	0
13	0.0135	0.0135	0.0135
14	0	0	0
15	0.0241	0.0241	0.0241
16	0	0	0
17	0.0165	0.0165	0.0165
18	0	0	0
19	0.0351	0.0351	0.0351
20	0	0	0
21	0.0738	0.0738	0.0738
22	0	0	0
23	0.0306	0.0306	0.0306
24	0	0	0
25	0.0222	0.0222	0.0222
26	0	0	0
27	0.1245	0.1245	0.1245
28	0	0	0
29	0.0115	0.0115	0.0115
30	0	0	0
31	0.5671	0.5671	0.5671
32	0	0	0
33	0.9804	0.9804	0.9804
34	0	0	0
35	0.7435	0.7435	0.7435
36	0	0	0

Çizelge 4.29: Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun ilk 61 harmoniğe ait kompleks sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	k_w		
	R	S	T
37	0.2394	0.2394	0.2394
38	0	0	0
39	0.0557	0.0557	0.0557
40	0	0	0
41	0.1092	0.1092	0.1092
42	0	0	0
43	0.0817	0.0817	0.0817
44	0	0	0
45	0.0255	0.0255	0.0255
46	0	0	0
47	0.0508	0.0508	0.0508
48	0	0	0
49	0.063	0.063	0.063
50	0	0	0
51	0.057	0.057	0.057
52	0	0	0
53	0.1054	0.1054	0.1054
54	0	0	0
55	0.1143	0.1143	0.1143
56	0	0	0
57	0.0695	0.0695	0.0695
58	0	0	0
59	0.1547	0.1547	0.1547
60	0	0	0
61	0.2362	0.2362	0.2362

4.9.3 Uzay harmonikleri

Analiz sonucu oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir. Şekil 4.64'te manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeninin dalga şekli verilmiştir. Elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılarak uzay harmonikleri hesaplanmıştır.

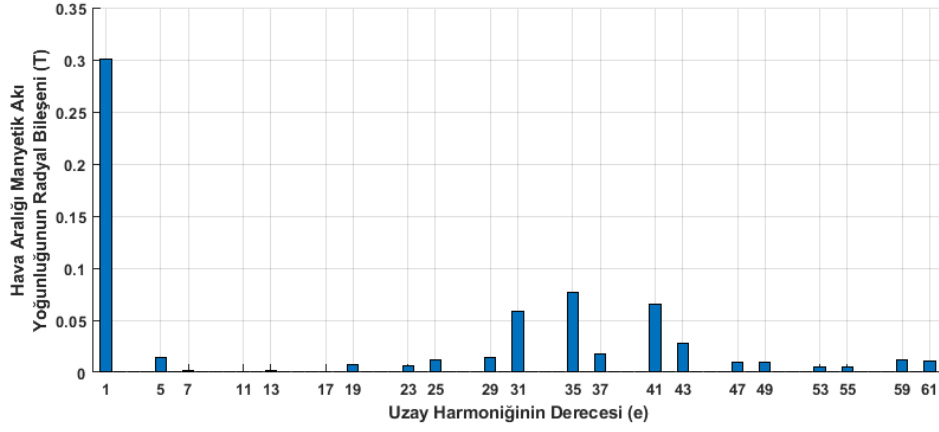


Şekil 4.64 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.

Çizelge 4.30’da ilk 61 harmonik için hesaplanan harmonik değerleri ve şekil 4.65’te harmonik dağılımı verilmiştir.

Çizelge 4.30 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun uzay harmonik değerleri.

e	Tesla (T)
1	0.30077
5	0.01398
7	0.00195
11	0.00104
13	0.00188
17	0.00096
19	0.00737
23	0.00576
25	0.01174
29	0.01463
31	0.05902
35	0.07653
37	0.01795
41	0.06491
43	0.02766
47	0.00992
49	0.00993
53	0.00511
55	0.00554
59	0.01177
61	0.01078



Şekil 4.65 : Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş asenkron motorun uzay harmonik dağılımı.



5. ANALİZLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

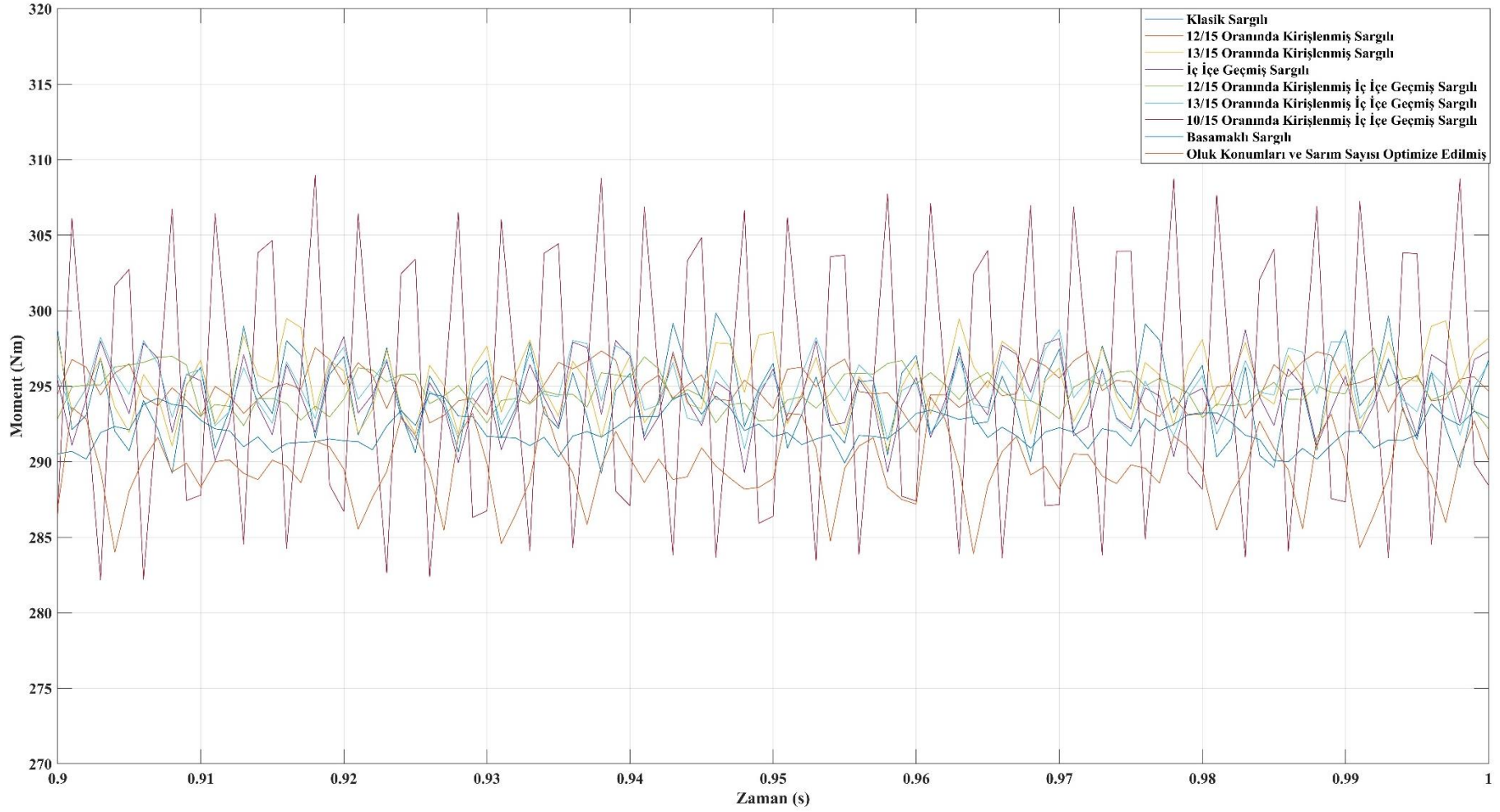
Bu bölümde analizleri yapılmış olan olan klasik sargılı asenkron motor ve uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş 8 farklı sargı tipine sahip asenkron motorların sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

5.1 Manyetik Analizlerin Karşılaştırılması

Her bir motorun manyetik analizleri sabit güç altında ANSYS Maxwell programı kullanılarak SEY ile yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen moment, moment dalgalılığı ve verim değerleri çizelge 5.1’de ve moment eğrileri ise şekil 5.1’de verilmiştir. Moment dalgalılığı incelendiği zaman 10/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargı modelinde oldukça yükseldiği gözlenmiştir. Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı türünde moment dalgalılığı referans motora oldukça yakın diğer sargı türlerinde ise azaldığı görülmüştür. Verim değerleri, referans motor olan klasik sargılı motorun verim değeri birim değer alınarak verilmiştir. Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modeli hariç diğer sargı tiplerinin hepsinde verim artışı gözlenmiştir.

Çizelge 5.1 : Analiz edilen motorların moment, dalgalılık ve verim değerleri.

Sargı Tipleri	Moment (Nm)	Moment Dalgalılığı (Nm)	Verim (p.u.)
Klasik Sargılı	294.12	10.01	1.0000
12/15 Oranında Kırılenmiş Sargılı	294.98	5.35	1.0041
13/15 Oranında Kırılenmiş Sargılı	295.40	8.75	1.0048
İç İçe Geçmiş Sargılı	294.40	9.42	1.0016
12/15 Oranında Kırılenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı	294.84	5.34	1.0046
13/15 Oranında Kırılenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı	294.89	7.33	1.0045
10/15 Oranında Kırılenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı	295.68	25.29	1.0023
Basamaklı Sargılı	291.95	3.92	1.0023
Oluk Konumları ve Sarım Sayısı Optimize Edilmiş	289.65	10.37	0.9982



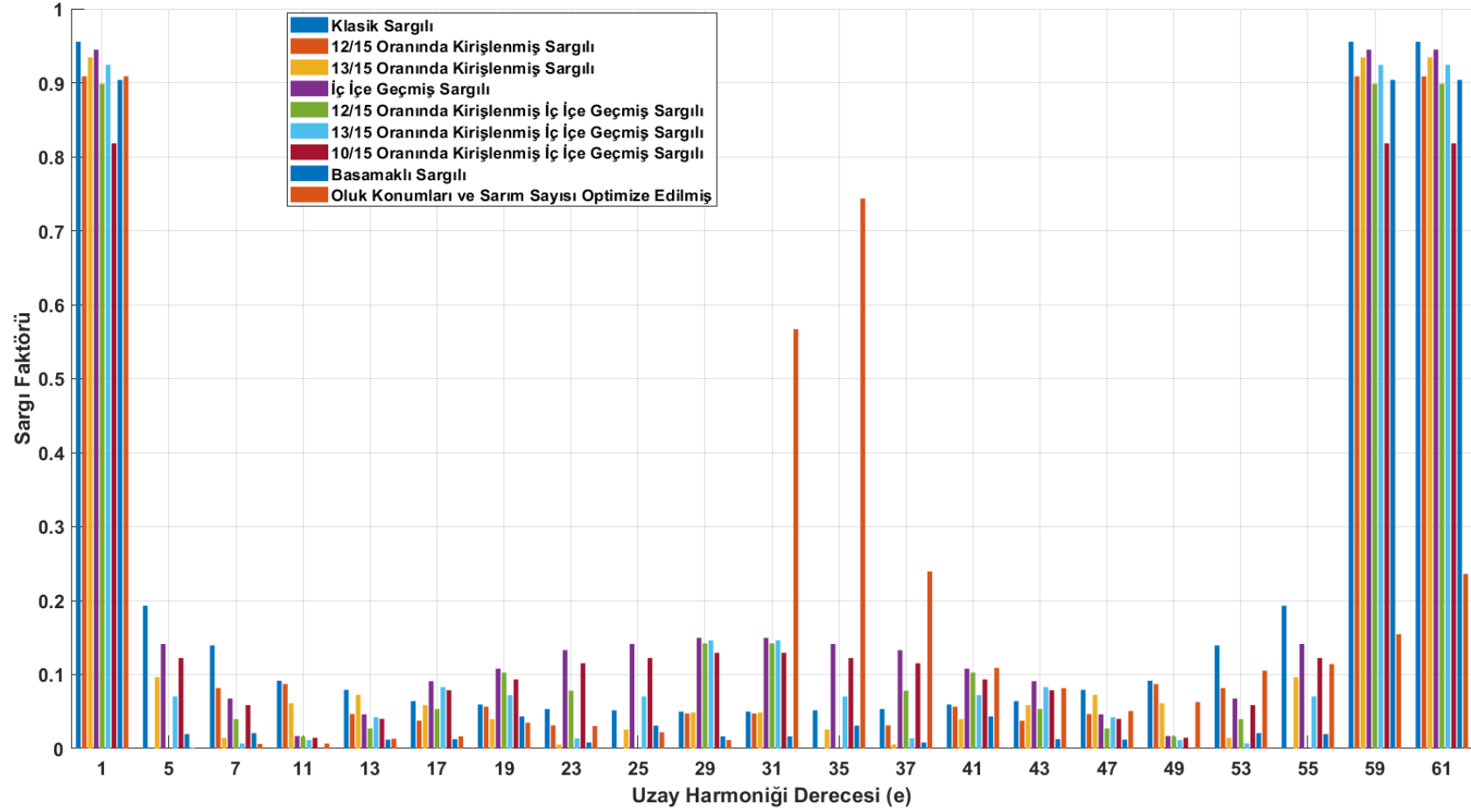
Şekil 5.1 : Analiz edilen motorların moment-zaman eğrisi.

5.2 Sargı Faktörlerinin Karşılaştırılması

9 farklı sargı tipine sahip asenkron motorların ilk 61 uzay harmoniği için sargı faktörü değerleri çizelge 5.2’de ve sargı faktörü dağılımı şekil 5.2’de verilmiştir. 9 farklı sargı tipine sahip asenkron motorların sargı faktörü incelendiği zaman temel bileşene ait sargı faktörü klasik sargılı motorda en yüksek değere sahiptir. Uzay harmoniklerini azaltmak için yapılan diğer sargı modellerin hepsinde temel bileşene ait sargı faktörü azalmıştır. Klasik sargı yapısı tek tabakalı ve kırışlenmemiş olduğundan dolayı kırışlenme faktörü 1’dir. Kırışlenmiş yapıda bulunan sargı modellerinde kırışlenme faktörü 1’den küçük bir değer aldığı için temel bileşene ait sargı faktörü azalmıştır. Kırışlenme miktarının yüksek olduğu sargılarda temel bileşene ait sargı faktörü de daha yüksek oranda azalmıştır. Temel bileşenin sargı faktörüne en yakın olan sargı tipi iç içe geçmiş sargı modelidir. 5. uzay harmoniğini elimine etmek için kırışlenmiş sargı modeli olan 12/15 oranında kırışlenmiş ve 12/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargı modellerinde 5 ve 5’in katı olan uzay harmoniklerine ait sargı faktörü sıfıra eşittir. 7. uzay harmoniğini elimine etmek için kırışlenmiş sargı modeli olan 13/15 oranında kırışlenmiş ve 13/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargı modellerinde kırışlenme miktarı tam oluk sayısına denk gelmediği için 7 ve 7’nin katı olan uzay harmoniklerine ait sargı faktörü sıfıra eşit değildir fakat oldukça azalmıştır. Temel bileşene ait sargı faktörünün en düşük olduğu durum ise kırışlenme miktarının en yüksek olduğu 10/15 oranında kırışlenmiş iç içe geçmiş sargı modelidir. Oluk konumları ve sarım sayıları optimize edilmiş sargı modelinde (q-1) kadar harmoniğin etkisi azaltılmıştır ve ilk 9 harmoniğe ait sargı faktörü klasik sargıya göre oldukça azalmıştır. Oluk harmonikleri olarak adlandırılan oluk sayısının bir eksiği ve bir fazlası olan harmoniklerde sargı faktörü, oluk konumları ve sarım sayıları optimize edilmiş sargı modeli hariç olmak üzere temel bileşenle aynıdır.

Çizelge 5.2 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için sargı faktörleri.

Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	Sargı Faktörü								Oluk Konumları ve Sarım Sayısı Optimize Edilmiş
	Klasik Sargılı	12/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı	13/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı	İç İç Geçmiş Sargılı	12/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	13/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	10/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	Basamaklı Sargılı	
1	0.9554	0.9086	0.9345	0.9449	0.8987	0.9243	0.8183	0.9039	0.9088
5	0.1932	0.0000	0.0966	0.1414	0.0000	0.0707	0.1225	0.0196	0.0012
7	0.1395	0.0820	0.0146	0.0678	0.0399	0.0071	0.0588	0.0209	0.0065
11	0.0918	0.0873	0.0614	0.0171	0.0163	0.0115	0.0148	0.0000	0.0070
13	0.0795	0.0467	0.0726	0.0464	0.0273	0.0424	0.0402	0.0122	0.0135
17	0.0643	0.0378	0.0588	0.0911	0.0535	0.0832	0.0789	0.0128	0.0165
19	0.0596	0.0567	0.0399	0.1081	0.1028	0.0723	0.0936	0.0436	0.0351
23	0.0536	0.0315	0.0056	0.1332	0.0783	0.0139	0.1153	0.0083	0.0306
25	0.0518	0.0000	0.0259	0.1414	0.0000	0.0707	0.1225	0.0311	0.0222
29	0.0501	0.0476	0.0490	0.1497	0.1423	0.1464	0.1296	0.0167	0.0115
31	0.0501	0.0476	0.0490	0.1497	0.1423	0.1464	0.1296	0.0167	0.5671
35	0.0518	0.0000	0.0259	0.1414	0.0000	0.0707	0.1225	0.0311	0.7435
37	0.0536	0.0315	0.0056	0.1332	0.0783	0.0139	0.1153	0.0083	0.2394
41	0.0596	0.0567	0.0399	0.1081	0.1028	0.0723	0.0936	0.0436	0.1092
43	0.0643	0.0378	0.0588	0.0911	0.0535	0.0832	0.0789	0.0128	0.0817
47	0.0795	0.0467	0.0726	0.0464	0.0273	0.0424	0.0402	0.0122	0.0508
49	0.0918	0.0873	0.0614	0.0171	0.0163	0.0115	0.0148	0.0000	0.0630
53	0.1395	0.0820	0.0146	0.0678	0.0399	0.0071	0.0588	0.0209	0.1054
55	0.1932	0.0000	0.0966	0.1414	0.0000	0.0707	0.1225	0.0196	0.1143
59	0.9554	0.9086	0.9345	0.9449	0.8987	0.9243	0.8183	0.9039	0.1547
61	0.9554	0.9086	0.9345	0.9449	0.8987	0.9243	0.8183	0.9039	0.2362



Şekil 5.2 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için sargı faktörleri dağılımı.

5.3 Uzak Harmoniklerinin Karşılaştırılması

9 farklı sargı tipine sahip asenkron motorların ilk 61 uzak harmoniği için değeri çizelge 5.4'te ve uzak harmonik dağılımı şekil 5.3'te verilmiştir. Uzak harmoniğini azaltmak için yapılan sargı modellerinin hepsinde temel bileşen değeri incelendiği zaman klasik motora göre az da olsa yükselmiştir. Bu farklı tipteki sargı modellerinin uzak harmoniklerini kıyaslamak için her sargının harmonikleri kendi temel bileşenine göre yüzdesel olarak oranlanmıştır ve çizelge 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.4'te bu oranlanmış olan uzak harmoniği değeri temel bileşen çıkartılarak 61. harmoniğe kadar verilmiştir.

Motorda etkisi oldukça yüksek olan 5. ve 7. uzak harmonikleri incelendiği zaman uzak harmoniğini azaltmak için yapılan bütün sargı modellerinde klasik sargılı yapıya göre azaldığı görülmektedir. 5. uzak harmoniğinin en düşük olduğu sargı tipi 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargı modeli olduğu görülmektedir. Bu değere en yakın olan bir diğer sargı tipi ise 12/15 oranında kırılenmiş sargı yapısıdır. 7. uzak harmoniği incelendiği zaman en düşük değere oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelinde ulaşıldığı görülmektedir. 13/15 oranında kırılenmiş sargı ve 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargı yapılarında da 7. uzak harmoniğinin oldukça azaldığı görülmektedir. Kırılenmiş sargı tiplerinin 5. ve 7. uzak harmoniklerini azaltmada oldukça etkili olduğu söylenebilir.

Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelinde (q-1) kadar harmoniğin elimine edildiğinden bahsedilmiştir. Bu sargı modelinin harmonik değeri incelendiği zaman ilk 9 harmonik oldukça baskılandığı görülmektedir. 59. ve 61. uzak harmoniği olan oluk harmoniklerinin değeri tüm motorlarda yaklaşık % 10 mertebesinde iken oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelinde bu değeri % 3.58 kadardır.

Bütün sargı tiplerinde temel bileşen ve oluk harmonikleri haricinde 41. uzak harmoniğinin değeri diğer harmoniklerden oldukça yüksek olduğu görülmektedir. 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargı modeli 41. uzak harmoniğinin diğer sargı modellerine göre en düşük değere sahip olduğu görülmektedir.

Analiz edilen motorların ilk 17 ve ilk 61 harmonik için toplam harmonik bozunumu (THB) hesaplanmıştır. Uzak harmonik derecesi artmasıyla harmoniğin motorda olan etkisi azalacağı için düşük harmoniklerin değeri çok daha önemlidir. Çizelge 5.3'te

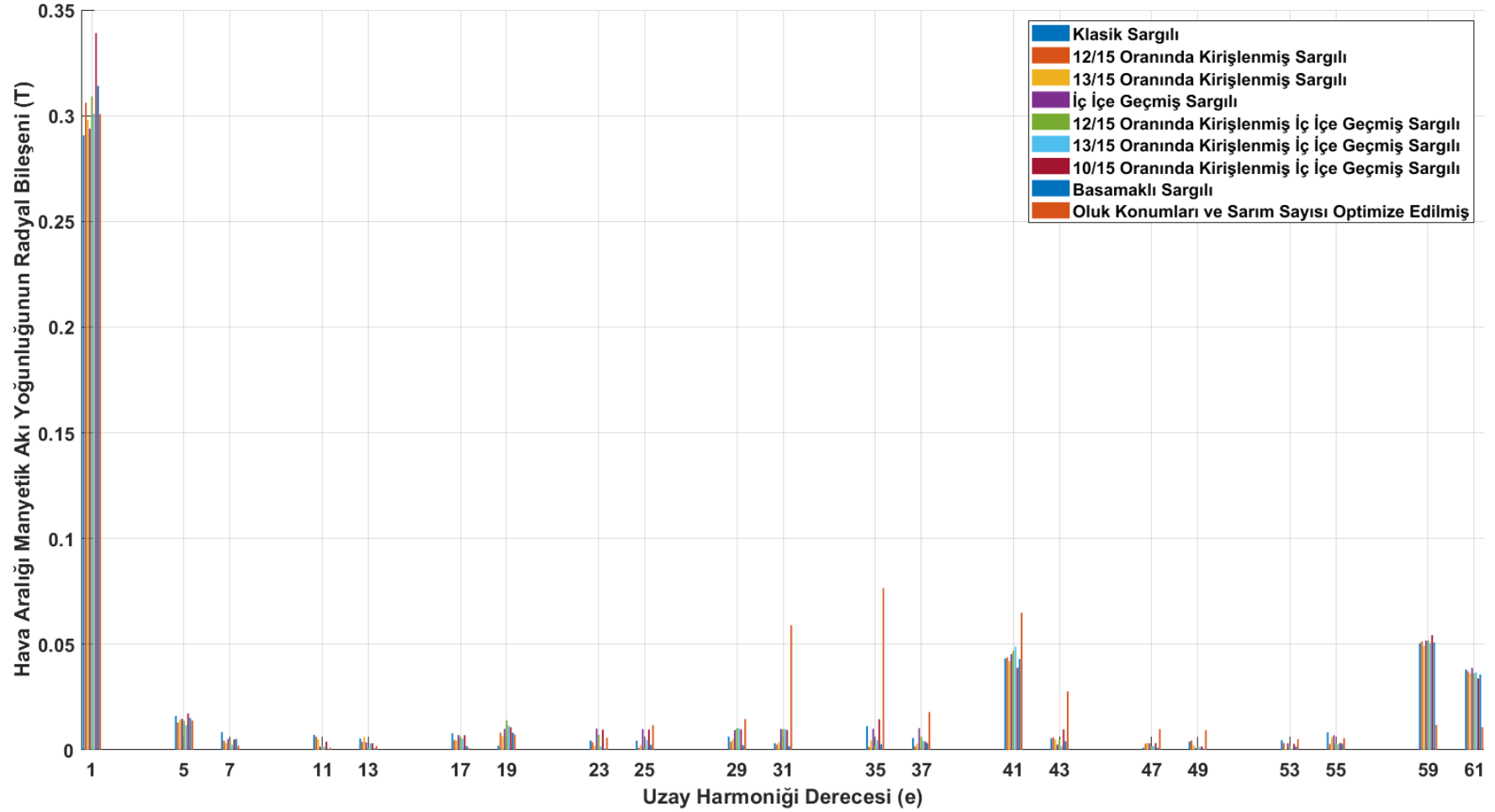
analiz edilen motorların THB değerleri verilmiştir. İlk 17 harmonik için çizelge 5.3 incelendiği zaman bütün sargı modellerinde klasik sargılı yapıya göre THB’u azalmıştır. 13/15 oranında kırılenmiş iç içe geçmiş sargılı ve oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş motorların ilk 17 harmonik için en düşük THB’a sahip olduğu görülmektedir. İlk 61 harmonik için THB incelendiği zaman oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modellerinde THB’u oldukça yükselmiştir.

Çizelge 5.3 : Analiz edilen motorların THB değerleri.

Sargı Tipleri	İlk 17 Harmonik için THB (%)	İlk 61 Harmonik için THB (%)
Klasik Sargılı	7.48	28.22
12/15 Oranında Kırılenmiş Sargılı	5.29	26.13
13/15 Oranında Kırılenmiş Sargılı	5.85	26.00
İç İçe Geçmiş Sargılı	5.99	29.09
12/15 Oranında Kırılenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı	5.16	27.06
13/15 Oranında Kırılenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı	4.52	27.62
10/15 Oranında Kırılenmiş İç İçe Geçmiş Sargılı	5.88	24.41
Basamaklı Sargılı	5.12	24.86
Oluk Konumları ve Sarım Sayısı Optimize Edilmiş	4.76	41.77

Çizelge 5.4 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için uzay harmonik değerleri.

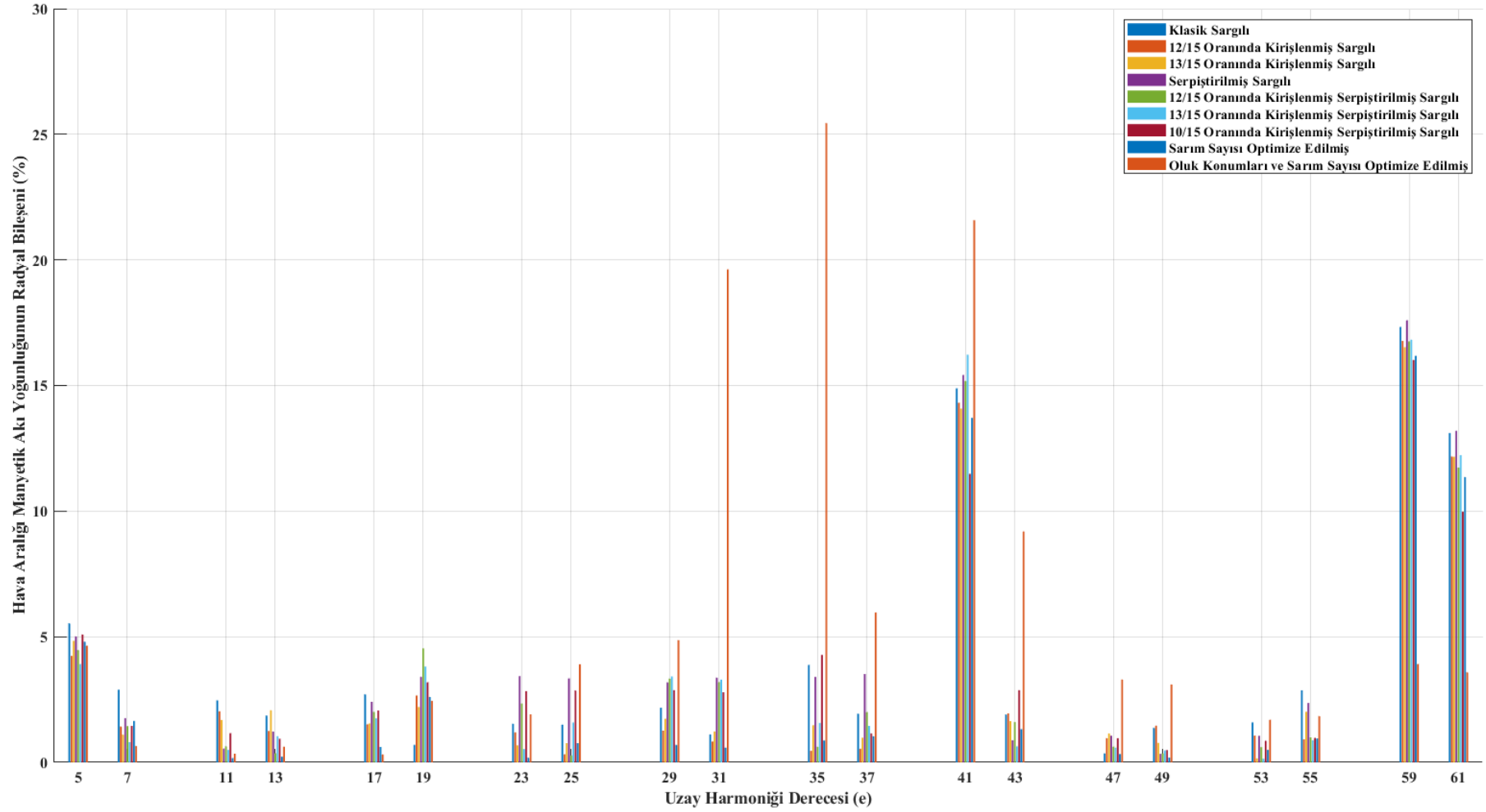
Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	Uzay Harmonik Değerleri (T)								Oluk Konumları ve Sarımlar Sayısı Optimize Edilmiş
	Klasik Sargılı	12/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı	13/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı	İç İç Geçmiş Sargılı	12/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	13/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	10/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	Basamaklı Sargılı	
1	0.29068	0.30616	0.29801	0.29390	0.30915	0.30088	0.33909	0.31410	0.30077
5	0.01609	0.01297	0.01442	0.01473	0.01381	0.01178	0.01726	0.01509	0.01398
7	0.00840	0.00436	0.00328	0.00517	0.00447	0.00242	0.00492	0.00519	0.00195
11	0.00718	0.00622	0.00503	0.00163	0.00199	0.00150	0.00394	0.00053	0.00104
13	0.00543	0.00383	0.00618	0.00361	0.00112	0.00315	0.00319	0.00071	0.00188
17	0.00786	0.00464	0.00463	0.00709	0.00621	0.00528	0.00701	0.00192	0.00096
19	0.00203	0.00816	0.00656	0.01002	0.01404	0.01148	0.01081	0.00818	0.00737
23	0.00446	0.00366	0.00203	0.01010	0.00724	0.00160	0.00962	0.00057	0.00576
25	0.00437	0.00098	0.00229	0.00983	0.00085	0.00478	0.00969	0.00241	0.01174
29	0.00632	0.00387	0.00518	0.00935	0.01030	0.01030	0.00974	0.00218	0.01463
31	0.00325	0.00254	0.00367	0.00991	0.00989	0.00991	0.00947	0.00183	0.05902
35	0.01129	0.00141	0.00441	0.00999	0.00191	0.00472	0.01450	0.00274	0.07653
37	0.00562	0.00167	0.00293	0.01032	0.00620	0.00438	0.00391	0.00326	0.01795
41	0.04327	0.04382	0.04197	0.04532	0.04694	0.04883	0.03894	0.04308	0.06491
43	0.00553	0.00597	0.00491	0.00258	0.00496	0.00193	0.00974	0.00414	0.02766
47	0.00103	0.00294	0.00344	0.00312	0.00194	0.00176	0.00326	0.00105	0.00992
49	0.00398	0.00449	0.00231	0.00100	0.00110	0.00143	0.00165	0.00059	0.00933
53	0.00463	0.00326	0.00048	0.00310	0.00187	0.00044	0.00293	0.00156	0.00511
55	0.00834	0.00282	0.00600	0.00695	0.00309	0.00266	0.00332	0.00299	0.00554
59	0.05039	0.05137	0.04926	0.05171	0.05182	0.05063	0.05432	0.05082	0.01177
61	0.03812	0.03727	0.03625	0.03880	0.03629	0.03679	0.03382	0.03567	0.01078



Şekil 5.3 : Analiz edilen asenkron motorların ilk 61 harmonik için uzay harmoniklerinin dağılımı.

Çizelge 5.5 : Analiz edilen asenkron motorların temel bileşene göre oranlanmış ilk 61 harmonik için uzay harmonik değerleri.

Uzay Harmoniği Mertebesi (e)	Uzay Harmonikleri (%)								Oluk Konumları ve Sarım Sayısı Optimize Edilmiş
	Klasik Sargılı	12/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı	13/15 Oranında Kirişlenmiş Sargılı	İç İç Geçmiş Sargılı	12/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	13/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	10/15 Oranında Kirişlenmiş İç İç Geçmiş Sargılı	Basamaklı Sargılı	
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	5.54	4.24	4.84	5.01	4.47	3.92	5.09	4.80	4.65
7	2.89	1.42	1.10	1.76	1.45	0.80	1.45	1.65	0.65
11	2.47	2.03	1.69	0.55	0.64	0.50	1.16	0.17	0.35
13	1.87	1.25	2.07	1.23	0.36	1.05	0.94	0.22	0.63
17	2.70	1.52	1.55	2.41	2.01	1.75	2.07	0.61	0.32
19	0.70	2.66	2.20	3.41	4.54	3.82	3.19	2.60	2.45
23	1.53	1.20	0.68	3.44	2.34	0.53	2.84	0.18	1.92
25	1.50	0.32	0.77	3.34	0.28	1.59	2.86	0.77	3.90
29	2.17	1.26	1.74	3.18	3.33	3.42	2.87	0.69	4.86
31	1.12	0.83	1.23	3.37	3.20	3.30	2.79	0.58	19.62
35	3.88	0.46	1.48	3.40	0.62	1.57	4.28	0.87	25.44
37	1.93	0.54	0.98	3.51	2.01	1.46	1.15	1.04	5.97
41	14.89	14.31	14.09	15.42	15.18	16.23	11.48	13.71	21.58
43	1.90	1.95	1.65	0.88	1.60	0.64	2.87	1.32	9.19
47	0.35	0.96	1.15	1.06	0.63	0.58	0.96	0.33	3.30
49	1.37	1.47	0.77	0.34	0.36	0.47	0.49	0.19	3.10
53	1.59	1.07	0.16	1.06	0.61	0.15	0.86	0.50	1.70
55	2.87	0.92	2.01	2.37	1.00	0.88	0.98	0.95	1.84
59	17.33	16.78	16.53	17.60	16.76	16.83	16.02	16.18	3.91
61	13.11	12.17	12.17	13.20	11.74	12.23	9.97	11.36	3.58



Şekil 5.4 : Analiz edilen asenkron motorların temel bileşene göre oranlanmış uzay harmoniklerinin yüzdesel dağılımı.



6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında asenkron motorun çalışma prensibi, sargı faktörü ve uzay harmonikleri detaylıca anlatılmıştır. Uzay harmoniklerini ve olumsuz etkilerini azaltmak için geliştirilmiş olan 8 farklı sargı yöntemi açıklanmıştır. Bu sargı tiplerini kıyaslamak için referans bir asenkron motor seçilmiştir. 3 fazlı, 90 kW gücünde, 2 kutuplu, klasik sargılı ve statorunda 60 oluk bulunan bir asenkron motor referans olarak seçilmiştir. Uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş olan 8 farklı sargı tipi referans motora uygulanmıştır. Bu işlem sırasında referans motorun stator dış çapı, rotor dış çapı, hava aralığı, uzunluğu gibi temel büyüklükleri değiştirilmemiştir. Fazların sarım sayısı sargı modelinin yapısı gereği gerekmedikçe değiştirilmemiş referans motor ile aynı kalmıştır. Stator oluk boyutları ise sadece oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelinde değiştirilmiş olup diğer 7 farklı sargı tipinde aynı kalmıştır.

Referans olarak seçilen klasik sargılı ve uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş olan 8 farklı sargılı asenkron motor ANSYS Maxwell programı kullanılarak SEY ile analiz edilmiştir. Toplamda 9 farklı asenkron motor 90 kW sabit güç altında analiz edilmiştir. Analiz sonucu her bir motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı, manyetik akı çizgileri, moment eğrisi ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu Fourier serisine açılarak ilk 61 uzay harmoniği için değerleri hesaplanmıştır. Referans motor ile birlikte uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş olan 8 farklı sargı modellerinin herbirinin iletken matrisi elde edilmiş ve kompleks sargı faktörü yöntemiyle ilk 61 uzay harmoniği için sargı faktörleri hesaplanmıştır.

Analiz edilen asenkron motorların momentleri, moment dalgalılıkları, verimleri, THB'ları, sargı faktörleri ve uzay harmonikleri karşılaştırılarak verilmiştir. Uzay harmoniklerini azaltmak için geliştirilmiş olan 8 farklı sargı modellerinin hepsinde temel bileşene ait sargı faktörünün klasik sargılı modele göre azaldığı görülmüştür. Fakat bununla beraber uzay harmoniklerine ait sargı faktörleri de büyük ölçüde azalmıştır. 5. uzay harmoniğini elimine etmek için kırılganlaşmış olan 12/15 oranında

kirişlenmiş sargı ve 12/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargı modellerinin 5. uzay harmoniğine ait sargı faktörleri sıfır olduğu gözlemlenmiştir. 7. uzay harmoniğini elimine etmek için kirişlenmiş olan 13/15 oranında kirişlenmiş sargı ve 13/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargı modellerinde, kirişlenme açısı tam oluk sayısına denk gelmediği için 7. uzay harmoniğine ait sargı faktörleri sıfır değerine inmemiştir. 7. uzay harmoniğine ait sargı faktörünün en düşük olduğu durum oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelinde olduğu görülmüştür. Oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı dışında diğer tüm sargılarda oluk harmoniklerinin sargı faktörü temel bileşeninki ile aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Moment dalgalılığı, 10/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargı ve oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelleri hariç diğer sargı modellerinde azalmıştır. Motorların verimlerinde çok fazla bir değişiklik olmazken, oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelinde bir miktar azalmıştır.

Motora olumsuz etkisi en yüksek olan 5. ve 7. uzay harmonikleri bütün sargı modellerinde klasik sargılı motora göre azalmıştır. 5. uzay harmoniğinin en çok baskılandığı sargı yapısı 13/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargı modeli ve 7. uzay harmoniğinin en çok baskılandığı sargı yapısı ise oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş sargı modelinin olduğu görülmüştür. Oluk harmoniklerine ait sargı faktörlerinin çoğu sargı tipinde yüksek olması nedeniyle oluk harmoniklerinin değerinin yüksek olduğu görülmektedir. İlk 17 harmonik için THB değerleri tüm uzay harmoniğini azaltmak için geliştirilmiş sargı tiplerinde azalmıştır. 13/15 oranında kirişlenmiş iç içe geçmiş sargılı ve oluk konumları ve sarım sayısı optimize edilmiş motorların ilk 17 harmonik için THB değerleri oldukça azalmıştır.

Sonuç olarak literatürde bulunan ve uzay harmoniklerini ve etkilerini azaltmak için geliştirilmiş 8 farklı sargı modeli incelenmiştir. Daha önce aralarında bir karşılaştırma yapılmamış olan bu sargı modelleri klasik sargı yapısıyla birlikte karşılaştırılmıştır. Seçilen sabit bir güç değeri için bütün yöntemler tek bir kriter altında birbirleri ile karşılaştırılmış ve elde edilen karşılaştırılmalı sonuçlar ile literatüre katkı sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Hague, B.** (1917). The mathematical treatment of the magnetomotive force of armature windings, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 55 (268), 489–514.
- [2] **Hansen, K. L.** (1922). Torque components due to space harmonics in induction motors, *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, 41 (12), 928–932.
- [3] **Burbidge, R. F.** (1958). A rapid method of analysing the m.m.f. wave of a single or polyphase winding, *Proceedings of the IEE Part C: Monographs*, 105 (7), 307.
- [4] **Smith, R. ve Layton, J. M.** (1963). Harmonic elimination in polyphase machines by graded windings, *Proc. IEE*, 110 (9), 1640–1648.
- [5] **Chalmers, B. J.** (1964). A . C . machine windings with reduced harmonic content, *Proc. IEE*, 111 (11), 1859–1863.
- [6] **Hughes, A.** (1970). New 3-phase winding of low m.m.f.-harmonic content, *Proc. IEE*, 117 (8), 1657–1666.
- [7] **Fudeh, H. R. ve Ong, C. M.** (1983). Modeling and Analysis of Induction Machines Containing Space Harmonics, Part I: Modeling and Transformation, *IEEE Power Engineering Review*, PER-3 (8), 41–42.
- [8] **Stepina, J.** (1987). Matrix analysis of space harmonics of asymmetrical stator windings, *IEE Proceedings B: Electric Power Applications*, 134 (4), 207–210.
- [9] **Chen, J. Y. ve Chen, C. Z.** (1998). Investigation of a new AC electrical machine winding, *IEE Proceedings B: Electric Power Applications*, 145 (2), 125–132.
- [10] **Kocabaş, D. A. ve Mergen, A. F.** (2008). A novel method to reduce the effects of space harmonics in alternating current machines, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 692–697.
- [11] **Kocabaş, D. A.** (2005). Asenkron makinalarda uzay harmoniklerinin etkilerini azaltmaya katkılar, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [12] **Kocabaş, D. A.** (2009). Novel Winding and Core Design for Maximum Reduction of Harmonic Magnetomotive Force in AC Motors, 45 (2), 735–746.
- [13] **Soydan, E.** (2017). 60 oluklu asenkron motorlarda uzay harmoniklerinin etkilerinin azaltılması ve işletme başarımının artırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [14] **Öztürk, O. K.** (2017). 48 oluklu asenkron motorlarda uzay harmoniklerinin etkilerinin azaltılması ve işletme başarımının tespiti, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [15] **Centner, M., Hanitsch, R., ve Factors, A. W.** (2006). Fractional slot-winding with asymmetrical stator-slot layout, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.*, 108–110.
- [16] **Tessarolo, A., Mezzarobba, M., ve Contin, A.** (2010). A Stator Winding Design with Unequally-Sized Coils for Adjusting Air-Gap Space Harmonic Content of Induction Machines,.
- [17] **Skalka, M., Ondrusek, C., Kurfurst, J., ve Cipin, R.** (2012). Harmonic Reduction in Induction Machine Using Slot Wedges Optimization, *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 1252–1255.
- [18] **Tsujikawa, K. et al.** (2012). Special winding to reduce space flux harmonics caused by fractional-slot, *ICEMS 2012 - Proceedings: 15th International Conference on Electrical Machines and Systems*, (3), 2–4.
- [19] **Asgharpour-alamdari, H., Alinejad-beromi, Y., ve Yaghobi, H.** (2017). Improvement of induction motor operation using a new winding scheme for reduction of the magnetomotive force distortion, *IET Electr. Power Appl.*, 12 (3), 323–331.
- [20] **Tang, N. ve Brown, I. P.** (2019). Family Phenomenon in Electric Machine Winding MMF Space Harmonics : Attribution and Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 55 (5), 1–10.
- [21] **Boduroğlu T.** (1994), *Elektrik Makinaları Dersleri, Cilt 2, Kısım 3, Asenkron Makinaların Hesap ve Konstrüksiyonu*, Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş.
- [22] **Boldea, I. ve Nasar, S.A.** (2002). *The induction machine handbook*, CRC Press.
- [23] **Mergen, A. F. ve Zorlu S.** (2009). *Elektrik makinalarında II asenkron makineler*, Birsen Yayınevi.
- [24] **Lordoğlu, A.** (2019). Elektrikli araçlar için asenkron makinelerde rotor oluk geometrilerinin uzay harmonik ve işletme başarımı üzerine etkilerinin tespitine katkılar48 oluklu asenkron motorlarda uzay harmoniklerinin etkilerinin azaltılması ve işletme başarımının tespiti, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [25] **Mergen, A. F. ve Kocabaş, D. A.** (2007). *Elektrik makinalarında sargılar*, Birsen Yayınevi.
- [26] **Kocabaş, D.A. ve Mergen, A.F.** (2001). Çok fazlı asimetrik sargılarda uzay harmoniklerinin ve sargı faktörünün matlab destekli analizi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : İsmethan Hanedar
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.09.1994, Üsküdar/İstanbul
E-posta : hanedarismethan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.