

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**1 MW GÜCÜNDEKİ SABİT MIKNATISLI SENKRON
GENERATÖRÜN TASARIMI VE ANALİZİ**

FURKAN KESKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi M. Kubilay EKER (Tez Danışmanı)
Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ
Dr. Öğr. Üyesi Cemil KÖZKURT

BALIKESİR, OCAK - 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**1 MW Gücündeki Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörün Tasarımı ve Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Furkan KESKİN

ÖZET

**1 MW GÜCÜNDEKİ SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜN
TASARIMI VE ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FURKAN KESKİN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR.ÖĞR. ÜYESİ MEHMET KUBİLAY EKER)
BALIKESİR, OCAK - 2023**

Hızla artan dünya nüfusunun bir sonucu olarak artan enerji ihtiyacı, yakın geçmişe kadar sadece fosil yakıt kullanımı ile karşılanmıştır. Bu yakıtların çevreye verdiği zararlara ek olarak fosil yakıt rezervlerinin azalması ve artan fiyatlar yeni enerji kaynaklarının kullanımına gidilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde oldukça yüksek öneme sahip olan rüzgar enerjisi çözümü, tükenmeyen ve potansiyeli yüksek bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada rüzgar türbinlerinde kullanılmak amacıyla doğrudan sürürlü radyal akılı, çıkık kutuplu, sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı, modellenmesi ve analizi üzerinde çalışılmıştır. Tasarlanan generatör; değişken devirlerde yüksek verimli, dişli kutusundan bağımsız, yüksek güçlü, üretim ve bakım kolaylığı göz önüne alındığında rüzgar türbinleri için avantajlı bir çözüm niteliğindedir.

Çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri ve rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör teknolojileri özetlenmiştir. Ardından analitik tasarım hesaplamaları yapılarak generatörün ana boyutları üzerine çalışılmış ve generatörün elektromanyetik model giriş verileri belirlenmiştir. Sonrasında sonlu elemanlar yöntemi tabanlı yazılım aracılığı ile generatörün modellenmesi yapılmış ve bununla birlikte generatörün elektromanyetik davranışları ortaya konulmuştur. Generatör üretiminde kullanılacak malzemenin analiz esnasında doyma gitme durumu incelenmiş ve analiz verilerine göre ısınma karakteristiği üzerine çalışılmıştır. Elde edilen tasarım verileri ile rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere; yüksek verimli, sabit ve değişken devire adapte olabilen, yüksek güçlü generatör tasarımı, uygulamaya aktarılmaya hazır bir model olarak gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Sabit mıknatıslı senkron generatör, doğrudan sürürlü generatör, elektromanyetik tasarım, rüzgar türbini generatörü.

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF 1 MW PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR

MSC THESIS

FURKAN KESKIN

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. MEHMET KUBILAY EKER)

BALIKESİR, JANUARY - 2023

As a result of the rapidly increasing world population, the increasing energy need has been met only with the use of fossil fuels until recently. In addition to the damage these fuels cause to the environment, the decrease in fossil fuel reserves and the increasing prices have made it mandatory to resort to new energy sources. In this context, the wind energy solution, which stands out compared to the other renewable energy sources, in terms of importance, has been evaluated as an option that is non-consumable and has high potential.

This study will look into the design, modeling, and analysis of a synchronous generator with direct drive radial flux, a salient pole, and the permanent magnet to be used in wind turbines. The design of the generator bears the characteristics of an advantageous solution for wind turbines, considering its high efficiency at variable speeds, independence from the gearbox, high power, and ease of production and maintenance.

This study aims to summarize the renewable energy sources, wind energy, wind turbines, and generator technologies used in the wind turbine, followed by the study of the main dimensions of the generator through analytical design calculations, in addition to determining the electromagnetic model input data of the generator. The study then will move on to create the modeling of the generator by way of the software based on the finite element method and ultimately, the electromagnetic behavior of the generator will be revealed. The saturation state of the material to be used in the production of the generator will be examined during the analysis and the heating characteristics of the material will be delved into in line with the analysis data. Using the design data obtained, a high-powered generator that is highly efficient and can be adapted to the constant and variable speed, enabling it to be used in wind turbines, will have been realized as a ready-to-use model.

KEYWORDS: Permanent magnet synchronous generator, direct drive generator, elektromagnetic design, wind turbine generator

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	3
1.2 Rüzgar Enerjisine Genel Bakış	6
1.3 Küresel Rüzgar Enerjisi Durumu	8
1.4 Ülkemizde Rüzgar Enerjisi Durumu	12
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR TEKNOLOJİLERİ	15
2.1 Rüzgar Enerjisinin Evrimi	15
2.2 Rüzgar Türbinleri Hakkında	17
2.3 DC Generatör Teknolojisi	24
2.4 Asenkron Generatör Teknolojisi	25
2.4.1 Çift Beslemeli Asenkron Generatörler	26
2.4.2 Sincap Kafesli Asenkron Generatörler	27
2.5 Senkron Generatör Teknolojisi	28
2.5.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler	29
2.5.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler	31
2.6 Tezin Özgün Değeri ve Amacı	33
3. MATERYAL YÖNTEM	35
3.1 Analitik Yöntem İle Ön Tasarım	35
3.2 Ansys Maxwell Yazılımı İle Elektromanyetik Tasarım	60
3.2.1 Ansys Maxwell Yazılımı	60
3.2.2 Ansys Maxwell İle Çözüm Aşamaları	61
3.2.3 Ansys Maxwell Rmxprt Aracı	63
3.2.3.1 Makine Tipi Seçim Ekranı	63
3.2.3.2 Proje Yöneticisi Penceresi	64
3.2.3.3 Makine Özellik Kontrol Penceresi	65
3.2.3.4 Stator Özellik Penceresi	66
3.2.3.5 Rotor Özellik Penceresi	69
3.2.3.6 Mil Özellik Penceresi	71
3.2.3.7 Analiz Penceresi	72
3.2.3.8 Çözüm Verileri	73
4. SMSG MODELİNİN ELEKTROMANYETİK TASARIMI	76

4.1 Rmxprt Modülü İle Ön Tasarımı	76
4.1.1 Genel Makine Parametreleri	76
4.1.2 Stator Parametreleri.....	77
4.1.3 Oyuk Boyutlandırma Parametreleri	77
4.1.4 Sarım Parametreleri.....	78
4.1.5 Rotor Boyutlandırma Parametreleri	79
4.1.6 Kutup Parametreleri	79
4.1.7 Analiz Kurulum Parametreleri	79
4.1.8 Analiz Çözüm Verileri	80
4.1.9 Analiz Çözüm Eğrileri	81
4.1.10 Tasarımın Değişken Devir Eğrileri.....	83
4.2 2B ve 3B Elektromanyetik Tasarım.....	85
4.2.1 Alan Haritaları ve Analiz Çözüm Eğrileri	87
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	106
6. KAYNAKLAR	108
EKLER	117
EK A: Rmxprt tasarım sonuç verileri.....	117
EK B: Sarım yerleşimi.....	121
EK C: Generatörün 3B görseli.....	122
ÖZGEÇMİŞ	123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Dünya genelinde elektrik üretiminin kaynaklara göre payları [3].....	3
Şekil 1.2: Yenilenebilir enerji kaynakları [4].....	4
Şekil 1.3: Yenilenebilir enerji kaynaklarının dönüşüm adımları [7].	5
Şekil 1.4: Dünyada yenilenebilir enerji üretimi [8].	6
Şekil 1.5: Rüzgar kurulu gücünün yıllara göre gelişimi [22].....	9
Şekil 1.6: Ülkelerin türbin üretimindeki payları [35].....	9
Şekil 1.7: Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin kurulum tablosu [46].....	13
Şekil 1.8: Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin illere göre dağılımı [46].	13
Şekil 2.1: Modern rüzgar türbini yapısı [23].....	18
Şekil 2.2: YERT modeli (a), DERT modeli (b) [30].....	22
Şekil 2.3: Rüzgar türbin sistemlerinin genel blok şeması.	23
Şekil 2.4: DC generatör modeli [49].....	24
Şekil 2.5: DC generatör blok şeması [48].	24
Şekil 2.6: ÇBAG modeli (a), SKAG modeli (b) [53, 54].	26
Şekil 2.7: Çift beslemeli asenkron generatör blok şeması [56].....	27
Şekil 2.8: Sincap kafesli asenkron generatör blok şeması [59].....	28
Şekil 2.9: ASSG (a), SMSG (b) [61].	29
Şekil 2.10: Alan sargılı senkron generatör blok şeması [55].	30
Şekil 2.11: Sabit mıknatıslı senkron generatör blok şeması [55].....	32
Şekil 3.1: Hedef makine parametreleri.....	36
Şekil 3.2: Analitik tasarım işlem akış şeması.	37
Şekil 3.3: Mıknatısın karakteristik eğrisi.	39
Şekil 3.4: Manyetik çeliğe ait B-H eğrisi.....	41
Şekil 3.5: Makine kesit görseli ve ana boyutlandırma parametreleri.....	43
Şekil 3.6: Makinanın faydalı boyut parametreleri.....	44
Şekil 3.7: Hava aralığındaki akı yoğunluğu [75].	53
Şekil 3.8: Manyetik çeliğe (M530-50A) ait Hd ve Hed alan şiddetleri.	54
Şekil 3.9: Bir oyuk aralığı boyunca stator oyuğunun akı diagramı [78].....	55
Şekil 3.10: Bir oyuk aralığı boyunca akı yoğunluğu dağılımı [78].....	55
Şekil 3.11: C katsayısının boyunduruktaki maksimum akı yoğunluğuyla değişimi [75]..	57
Şekil 3.12: Ansys Maxwell teknoloji disiplinleri [81].	60
Şekil 3.13: Ansys Maxwell çözüm aşamaları.	62
Şekil 3.14: Uyarlanabilir çözüm ağı akış şeması.	62
Şekil 3.15: Uyarlanabilir çözüm ağı akış şeması.	64
Şekil 3.16: Proje yönetici arayüzü.	65
Şekil 3.17: Makine özellik penceresi.	65
Şekil 3.18: Kullanılabilir devre modelleri, (a) Üç faz bağlantı-Y3, (b) Döngü tipi bağlantı-L3, (c) Üç faz yıldız bağlantı-S3, (d) İki faz çapraz bağlantı-C3, (e) Dört faz döngü bağlantı-L4, (f) Dört faz yıldız bağlantı-S4.....	66
Şekil 3.19: Stator özellik penceresi.....	66
Şekil 3.20: Kullanılabilir oyuk modelleri, (a) Tip 1 oyuk modeli, (b) Tip 2 oyuk modeli, (c) Tip 3 oyuk modeli, (d) Tip 4 oyuk modeli, (e) Tip 5 oyuk modeli, (f) Tip 6 oyuk modeli.	67
Şekil 3.21: (a) Oyuk özellikleri penceresi, (b) Oyuk modeli.	67
Şekil 3.22: (a) Sarım özellikleri penceresi, (b) Sargı çeşitleri.	68

Şekil 3.23: (a) Yalıtım ve sonlandırma pencersi, (b) Oyuk ve oyuk yalıtımları.....	68
Şekil 3.24: Bobin sarım sonu modeli [83].	69
Şekil 3.25: Rotor özellikleri penceresi.	70
Şekil 3.26: Kullanılabilir kutup modelleri, (a) Tip 1 kutup modeli, (b) Tip 2 kutup modeli, (c) Tip 3 kutup modeli, (d) Tip 4 kutup modeli, (e) Tip 5 kutup modeli.	70
Şekil 3.27: (a) Kutup özellikleri penceresi, (b) Mıknatıs kayıklığı [85].	71
Şekil 3.28: Mıknatısların rotor yüzeyinde kapladığı alan, (a) Kaplama oranı 1, (b) Kaplama oranı 0,8.	71
Şekil 3.29: Mil özellik penceresi.....	72
Şekil 3.30: Makine özet arayüzü.....	72
Şekil 3.31: Genel makine parametre penceresi.	73
Şekil 3.32: Yüksüz çalışma performans verileri.	73
Şekil 3.33: RMXprt tasarım sayfası tam yük verisi.	74
Şekil 3.34: Hava aralığı akı yoğunluğu grafiği.	75
Şekil 3.35: İndüklenen voltaj grafiği.....	75
Şekil 4.1: Stator ve bobin yerleşimi yarım görünüm.	78
Şekil 4.2: Elektriksel açığa göre tutma torku.	81
Şekil 4.3: Hava aralığındaki akı yoğunluğu.....	82
Şekil 4.4: Yük altında sargı gerilimleri.	82
Şekil 4.5: Yük altında sargı akımları.....	83
Şekil 4.6: Değişken devire göre çıkış gücü.....	83
Şekil 4.7: Değişken devire göre hat voltajları.....	84
Şekil 4.8: Değişken devire göre armatür akım yoğunluğu.....	85
Şekil 4.9: Değişken devire göre generatör verimi.....	85
Şekil 4.10: Generatörün 2B çözüm ağı haritası.	86
Şekil 4.11: Generatörün dilimli 2B enine kesit görseli.	87
Şekil 4.12: Generatörün 2B tam model görseli.....	87
Şekil 4.13: Generatörün anma yükündeki akı çizgi haritası.	88
Şekil 4.14: Generatörün anma yükündeki manyetik akı yoğunluğu.	89
Şekil 4.15: Anma yükündeki tork grafiği.....	90
Şekil 4.16: Anma yükündeki faz akım grafiği.	90
Şekil 4.17: Anma yükündeki indüklenen faz gerilim grafiği.....	91
Şekil 4.18: Anma yükündeki indüklenen hat gerilim grafiği.....	91
Şekil 4.19: Anma yükünde güç çıkış grafiği.....	92
Şekil 4.20: Anma yükündeki çekirdek kaybı grafiği.	92
Şekil 4.21: Anma yükündeki anlık çekirdek kaybı haritası.	93
Şekil 4.22: Anma yükündeki eddy akım kayıpları.....	93
Şekil 4.23: Anma yükündeki histeresiz kayıpları.	94
Şekil 4.24: (a) Nominal yükteki manyetik akı yoğunluğu, (b) Kısa devre halindeki manyetik akı yoğunluğu, (c) Boştaki manyetik akı yoğunluğu.....	95
Şekil 4.25: Boşta çalışma durumundaki faz akım grafiği.	96
Şekil 4.26: Boşta çalışma durumundaki indüklenen faz gerilim grafiği.....	96
Şekil 4.27: Generatörün dilimli 3B görseli.	97
Şekil 4.28: (a) Nominal yükte harekete başlama anındaki manyetik akı yoğunluğu, (b) Nominal yükte 0,01 saniye sonraki manyetik akı yoğunluğu, (c) Nominal yükte 0,02 saniye sonraki manyetik akı yoğunluğu, (d) Nominal yükte 0,06 saniye sonraki manyetik akı yoğunluğu.....	98
Şekil 4.29: (a) Nominal yükte harekete başlama anındaki akı çizgi yolları, (b) Nominal yükte 0,01 saniye sonraki akı çizgi yolları.	99

Şekil 4.30: Nominal yükte 0,02 saniye sonraki akı çizgi yolları (a), Nominal yükte 0,01 saniye sonraki akı çizgi yolları (b).....	100
Şekil 4.31: 3B Analizde anma yükündeki tork grafiği.....	101
Şekil 4.32: 3B Analizde anma yükündeki faz akım grafiği.	101
Şekil 4.33: 3B Analizde anma yükünde indüklenen faz gerilim grafiği.	102
Şekil 4.34: 3B Analizde anma yükünde indüklenen hat gerilim grafiği.	102
Şekil 4.35: 3B Analizde anma yükünde güç çıkış grafiği.....	103
Şekil B.1: Sarımların stator oyuklarına yerleşimi.	121
Şekil C.2: Generatörün patlatılmış resmi.....	122

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Türkiye'nin enerji kaynaklarına göre santral sayısı ve kurulu güç verisi [2].....	2
Tablo 1.2: Global türbin üreticileri ve pazar katkıları [36].	10
Tablo 1.3: Türkiye rüzgar enerji potansiyeli [45].....	12
Tablo 2.1: Generatör teknolojilerinin karşılaştırma tablosu [9].	32
Tablo 3.1: Manyetik çeliğe ait B-H verisi [73].....	40
Tablo 3.2: Önemli iletken malzemelerin özellik tablosu [73].	41
Tablo 3.3: Makine tasarımı için giriş verileri.	42
Tablo 3.4: Bazı makine tiplerinde izin verilen teğetsel gerilme değerleri [76].	45
Tablo 3.5: Standart makine tiplerinde izin verilen akı yoğunlukları [75].	48
Tablo 3.6: Maxwell denklemleri [82].	61
Tablo 4.1: Analitik hesaplama sonucu boyut parametreleri.	76
Tablo 4.2: Genel makine verileri.	77
Tablo 4.3: Stator verileri.....	77
Tablo 4.4: Oyuk verileri.	78
Tablo 4.5: Sarım verileri.....	78
Tablo 4.6: Rotor verileri.	79
Tablo 4.7: Kutup verileri.	79
Tablo 4.8: Analiz verileri.....	80
Tablo 4.9: Bazı önemli analiz çıkış verileri.....	80
Tablo 4.10: (a) Farklı frekans değerlerinde A fazında indüklenen gerilim, (b) Farklı frekans değerlerinde B fazında indüklenen gerilim, (c) Farklı frekans değerlerinde C fazında indüklenen gerilim.....	104
Tablo A.1: Rmxprt tasarım verileri.....	116

KISALTMA LİSTESİ

TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
MW	: Mega-Watt
GW	: Giga-Watt
WEC	: Dünya Enerji Konseyi
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
GWEC	: Küresel Rüzgar Enerji Konseyi
DERT	: Dikey Eksenli Rüzgar Türbini
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini
SM	: Sabit Mıknatıs
SMSG	: Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör
CFC	: Kloroflorokarbon
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
REPA	: Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
ASSG	: Alan Sargılı Senkron Generatör
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
RMXPRT	: Döner Makinalar Uzmanı Tasarım Aracı
NdFeB	: Neodyum Mıknatıs (Neodyum-Demir-Boron)
KOKS	: Kesirli Oyuk Konsantrik Sarım
SMSM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Makina
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
ASSM	: Hızı Ayarlanabilir Senkron Makine
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
STD	: Standart
THD	: Toplam Harmonik Bozulma

SEMBOL LİSTESİ

P	: Kutup çifti sayısı
δ	: Hava aralığı uzunluğu (m)
δ_g	: Düzeltilmiş hava aralığı uzunluğu (m)
k_w	: Sargı faktörü
B_r	: Mıknatısın artık akı yoğunluğu (T)
H_c	: Mıknatısın koersivitesi (kA/m)
σ_{Ftan}	: Teğetsel gerilme
T	: Tork (Nm)
P	: Generatör çıkış gücü (W)
η	: Generatör verimi
ns	: Generatörün saniyedeki devir sayısı
V_r	: Rotor hacmi (m ³)
l	: Makine paket boyu uzunluğu (m)
Dr	: Mıknatıs dahil rotor çapının uzunluğu (m)
X	: Makine oranı
Ds	: Stator iç çap uzunluğu (m)
Q	: Stator oyuk sayısı
m	: Generatör faz sayısı
q	: Oyuk sayısının faz ve kutup başına oranı
τ_u	: Stator oyuk adımı (m)
τ_p	: Stator kutup adımı (m)
B_{1peak}	: Hava aralığı akı yoğunluğu (T)
a_{PM}	: Mıknatısın efektif bağlı genişliği
B_{max}	: Mıknatısın dikdörtgen alanlı akı yoğunluğu (T)
U_{hat}	: Generatör hat gerilimi (V)
E_{PM}	: Mıknatıs tarafından indüklenen gerilim (V)
a	: Stator sargılarındaki paralel kol sayısı
N	: Faz başına seri bağlı bobin sarım sayısı
Z_Q	: Bir oyuktaki iletken sayısı
Z_{Qy}	: Bir oyuktaki iletken sayısının düzeltilmiş hali
N	: Faz başına seri bağlı bobin sarım sayısı
N_y	: Yuvarlatılmış faz başına seri bağlı bobin sarım sayısı
B_{dapp}	: Oyuk dış akı yoğunluğu (T)
bd	: Oyuk dış genişliği (mm)
k_{FE}	: Stator nüvesinin paketlenme faktörü
U_{sph}	: Stator faz gerilimi (V)
I_s	: Stator akımı (A)
S_{cs}	: Oyukta bulunan iletken alanı (mm ²)
J_s	: Stator iletkeninin akım yoğunluğu (A/mm ²)
W_s	: Oyuk genişliği (mm)
W_c	: İletken genişliği (mm)
W_{ins}	: Oyuk yalıtım malzemelerinin genişliği (mm)
W_{cyuv}	: Yuvarlatılmış iletken genişliği (mm)
H_c	: İletken kalınlığı (mm)
H_{cyuv}	: Yuvarlatılmış iletken kalınlığı (mm)
H_s	: Oyuk yüksekliği (mm)
H_{ins}	: Oyuk yalıtım malzemelerinin toplam kalınlığı (mm)

H_{ed}	: Oyuk dışlarındaki alan şiddeti (A/m)
H_d	: Oyuk dışlarındaki gerçek alan şiddeti (A/m)
U_{m,d}	: Oyuk dışlarındaki manyetik gerilim (A)
k_C	: Carter faktörü
κ	: Yuva açıklığı azaltma faktörü
δ_e	: Eşdeğer hava aralığı (mm)
U_{mδe}	: Hava aralığı manyetik gerilimi (A)
μ_o	: Boşluğun magnetik geçirgenliği (H/m)
φ_m	: Hava aralığındaki maksimum akı miktarı (Wb)
B_{ys}	: Stator boyunduruğunun maksimum akı yoğunluğu (T)
B_{yr}	: Rotor boyunduruğunun maksimum akı yoğunluğu (T)
H_{ys}	: Stator boyunduruk yüksekliği (m)
H_{yr}	: Rotor boyunduruk yüksekliği (m)
D_{ys}	: İdeal integrasyon yolunun çap uzunluğu (m)
τ_{ys}	: İdeal integrasyon yolunun stator kutup adımı (m)
c	: Boyunduruk manyetik gerilim hesabı için makine katsayısı
c_s	: Stator boyunduruğu için c makine katsayısı
c_r	: Rotor boyunduruğu için c makine katsayısı
H_{ymaxs}	: Maksimum stator boyunduruk akısındaki manyetik alan (A/m)
H_{ymaxr}	: Maksimum rotor boyunduruk akısındaki manyetik alan (A/m)
U_{mys}	: Stator boyunduruğundaki manyetik gerilim (A)
B_{PM}	: Mıknatıs akı yoğunluğu (T)
H_{PM}	: Mıknatıs kalınlığı (T)
D_{se}	: Stator dış çapı (m)
D_{ri}	: Maksimum rotor iç çapı (m)
D_{mil}	: Düzenlenmiş generatör mil çapı (mm)
THD_v	: Gerilimin toplam harmonik bozunumu

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgi birikim ve tecrübelerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen, değerli vaktini ayıran kıymetli sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kubilay EKER'e

Yüksek Lisans çalışmam boyunca bana destek olan ve beni cesaretlendiren Öğr. Gör. Batın DEMİRCAN'a ve ismini saymadığım tüm arkadaşlarıma,

Eğitim öğretim hayatımın başından itibaren Yüksek Lisans eğitimim süresince sevgisini hissettiğim, yaşadığım tüm zorluklarda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme; rahmetli anneannem Şehriban KUDİL, annem Deniz KESKİN ve babam Volkan KESKİN'e,

Lisansüstü eğitimim ile birlikte profesyonel iş hayatımda gerekli çalışmaların yapılması konularında her zaman destek olan İŞBİR Elektrik Sanayi A.Ş. Genel Müdürü Burhan ÖZGÜR'e, İŞBİR Elektrik Sanayi A.Ş. yöneticilerine ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür etmeyi borç bilirim.

Balıkesir, 2023

Furkan KESKİN

1. GİRİŞ

Tarihin başlangıcından itibaren insanoğlunun farklı formlarda ihtiyaçlarını karşılamak üzere ele aldığı enerji kavramı, mevcut durumda günlük hayatımızın olmazsa olmaz ihtiyaçları arasında yer almaktadır. Artan nüfus, sanayileşme ve yaşamımızın her yerinde olan dijital teknolojilerle birlikte artan enerji tüketimi için enerji üretimini olabildiğince çevreci ve ucuz bir şekilde gerçekleştirmemiz gerekmektedir. Hali hazırda enerji üretiminin büyük bir kısmında kullanılan fosil yakıtlar ve bu yakıtların yol açtığı kirliliğe ek olarak artan yakıt fiyatları ele alındığında enerji ihtiyacına etkin ve kalıcı çözümler bulmak enerji üretimi için öncelikli hale gelmiştir.

Bu bağlamda yakın zamanda Avrupa’da kendini gösteren enerji krizi dikkat çekmektedir. Rusya ile fikir ayrılığına düşen Avrupa ülkeleri doğal gaz ambargosu sonucunda enerji temininde zorluklar yaşamaktadırlar. Özellikle Almanya, Fransa, İspanya ve İtalya gibi ülkelerde enerji tasarruf tedbirleri alınmaya başlanmıştır. Kış aylarında kendini gösterecek ısınma ihtiyacı, hali hazırda etkisini gösteren sanayideki enerji açığıyla birleşince sıkı tedbirlerin uygulanmasını ve alternatif çözümlerin bulunmasını zorunlu hale getirmektedir. Örnek olarak Almanya’nın bir süredir hedeflediği enerji ihtiyaçlarının 2030 yılına kadar tamamen yenilenebilir enerji kaynaklardan karşılanmasına yönelme planları yaşanan krizden dolayı kötü etkilenmiştir.

Ülkemizi incelediğimizde ise Türkiye’de büyüyen nüfus ve gelişen ekonomik yapı ile doğru orantılı olarak enerji talebi de artmış durumdadır. 2000-2020 yılları arasında Türkiye’nin enerji talebindeki ortalama artışın %4,5 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Dünyada bu oranın ortalama %3 seviyelerinde olduğu bilinmektedir [1]. Artan enerji taleplerine paralel olarak yaşanan pandemi ve enerji kriziyle birlikte oluşan durum enerjiye olan ihtiyacı daha da artırmış durumdadır. Bu sebeple olası krizlerden etkilenmemek ve sürdürülebilir yaşamı mümkün kılmak için ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynakları çözüm olarak görülmekte ve bu alanda gerçekleştirilen yatırımlara ek olarak uygulanan yeni yatırımlar artmış durumdadır.

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından yayınlanan, 2022 Haziran ayı kurulu güç raporuna göre Türkiye bu yıl 101,51 GW’lık kurulu güce ulaşmıştır. Haziran ayında 208,9 MW’lık yenilenebilir enerji kurulumu yapılmış olup toplam 54,871 GW’lık

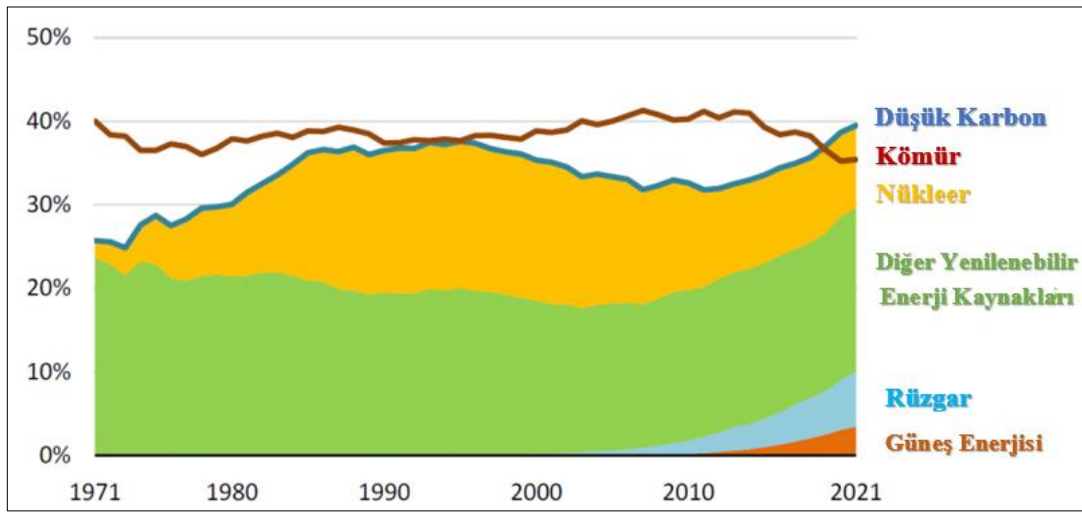
yenilenebilir enerji gücüne ulaşılmış durumdadır. Bu veriler ışığında yenilenebilir kaynaklar, toplam kurulu gücün %53,8'ini oluşturmaktadır. Rüzgar enerjisi, toplam kurulu gücün %10,8'ini oluştururken güneş enerjisi %8,35'ini oluşturmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından akarsu, jeotermal, biyokütle ve hidroelektrik santralleri toplam kurulu gücün %34,5'ini oluşturmaktadır. Fosil yakıtlar toplam kurulu gücün %46,2'sini oluşturmaktadır. Kurulu güçlerde en büyük büyük pay 25,285 GW ile doğal gaz yer alırken, ikinci sırada 23,275 GW ile barajlı hidroelektrik santralleri yer almaktadır. Tablo 1.1'de Türkiye'nin birincil enerji kaynaklarına göre santral sayıları ve kurulu güç verisi yer almaktadır [2].

Tablo 1.1: Türkiye'nin enerji kaynaklarına göre santral sayısı ve kurulu güç verisi [2].

Enerji Kaynakları	Santral Sayısı	Kurulu Güç (MW)
Rüzgar	356	10975,8
Güneş	8792	8479,1
Akarsu	608	8283,2
Jeotermal	63	1686,3
Biyokütle	381	1781,0
Barajlı Hidroelektrik	141	23275,2
Atık Isı	94	390,9
Doğalgaz	347	25285,0
Fuel Oil	9	251,9
Asfaltit Kömür	1	405
İthal Kömür	16	
Linyit	47	9713,8
LNG	1	2,0
Motorin	1	1,0
Nafta	1	4,7
Taşkömürü	4	840,8
Toplam	10862	101518,3

Tablo incelendiğinde, Türkiye her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelse de hâlâ enerjisinin büyük bir bölümünü geleneksel yöntemlerle karşılamaktadır. Nitekim insanlık yıllardır barınma, ulaşım, hayatlarını kolaylaştıran alet ve makineleri petrol, kömür doğal gaz gibi karbon yapılı fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Fosil yakıtların neden olduğu iklim değişimi her geçen gün dünyadaki doğal dengeyi bozmaya devam etmektedir. Ayrıca sürekli artan yakıt fiyatları da ülkeleri ekonomik açıdan yıpratmaktadır. Tüm bu sorunların çözümü olarak yenilenebilir ve verimli enerji teknolojilerini hayatımızın bir parçası haline

getirmemiz gerekmektedir. Nitekim Dünya Enerji Konseyi (WEC) raporuna göre 1971–2021 yılları arasında dünya genelinde elektrik üretiminin kaynaklara göre oranları paylaşılmıştır. Rapora göre karbon temelli fosil yakıt tüketiminin hâlâ yüksek seviyede olduğu, toplam üretimin yaklaşık %40'ını oluşturduğu ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artış göstererek güneş, rüzgar ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretimindeki rolünün 2021 yılı itibariyle %30 seviyelerine çıktığı belirtilmiştir. Dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre paylarını gösteren grafik Şekil 1.1'de yer almaktadır [3].



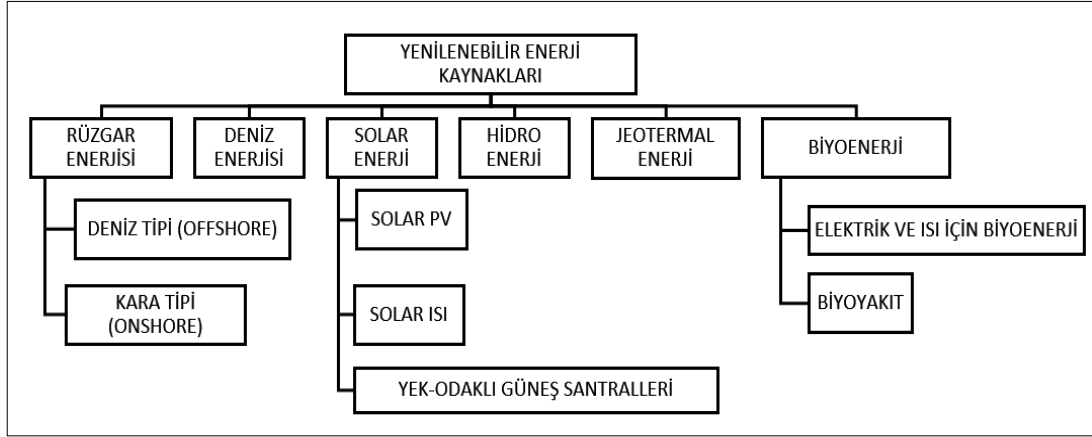
Şekil 1.1: Dünya genelinde elektrik üretiminin kaynaklara göre payları [3].

Şekil 1.1 incelendiğinde kaynakların kurulumları göz önüne alınarak önümüzdeki yıllarda, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki toplam üretimin, kömür kullanılan termik santrallerde üretilen enerjiyi geçeceği tahmin edilmektedir.

1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

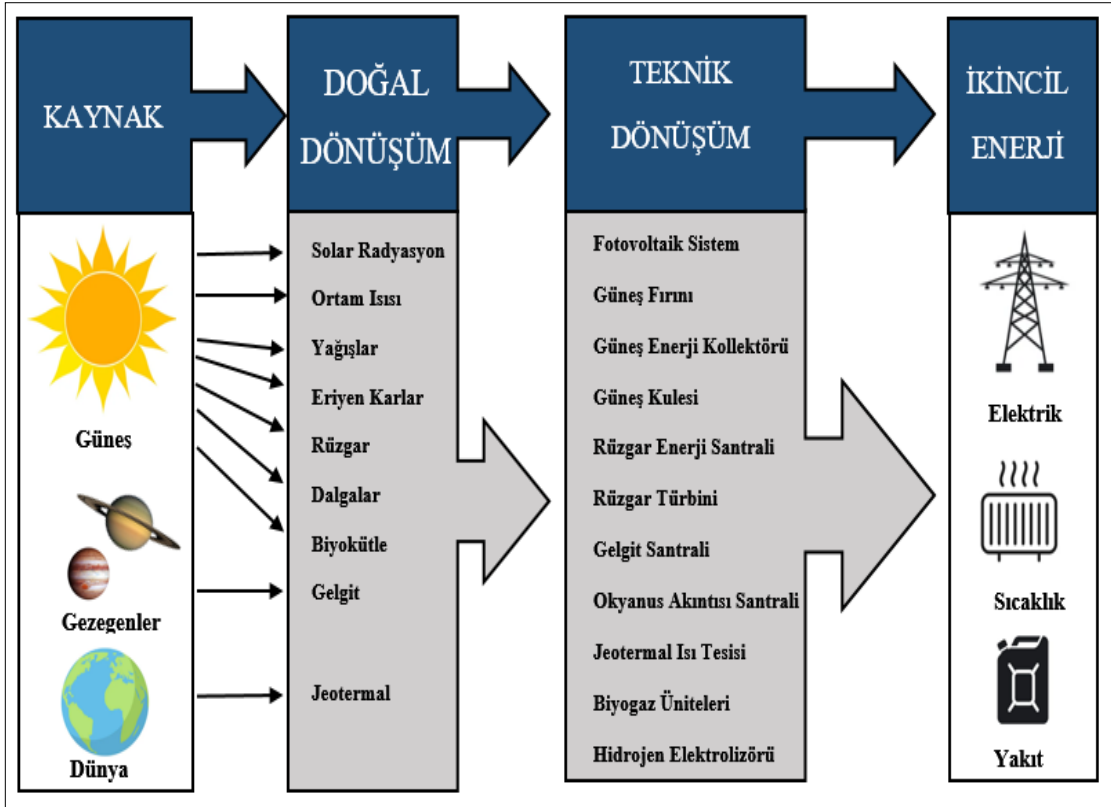
Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçler ile kendini yenileyebilen değişken ve tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. Doğa tarafından enerji akışının yenilenmesi ve dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Doğrudan güneş tarafından elde edilen; fotokimyasal, fotoelektrik ve termal enerjiler örnek gösterilebileceği gibi güneş tarafından dolaylı yoldan elde edilen enerjilere; rüzgar, hidroelektrik ve biyokütle enerjileri örnek gösterilebilir. Dünyanın farklı doğal mekanizmalarıyla devamlılığını sağlayan diğer enerji kaynakları ise; gelgit ve jeotermal enerjisidir. Şekil 1.2'de yenilenebilir enerji kaynaklarını özetleyen tablo

yer almaktadır [4]. Fosil yakıtların, kimyasal reaksiyonlara sokularak tüketilmesi sonucu enerji açığa çıkmaktadır ve bu tepkime türüne de geri dönüştürülemez tepkime denilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ise enerji tekrar tekrar enerji dönüşümüne katılarak sürekliliği sağlanabilmektedir [5]. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları kaynağı tükenmeyen sürdürülebilir ve doğa dostu enerji kaynakları olarak ifade edilmektedir.



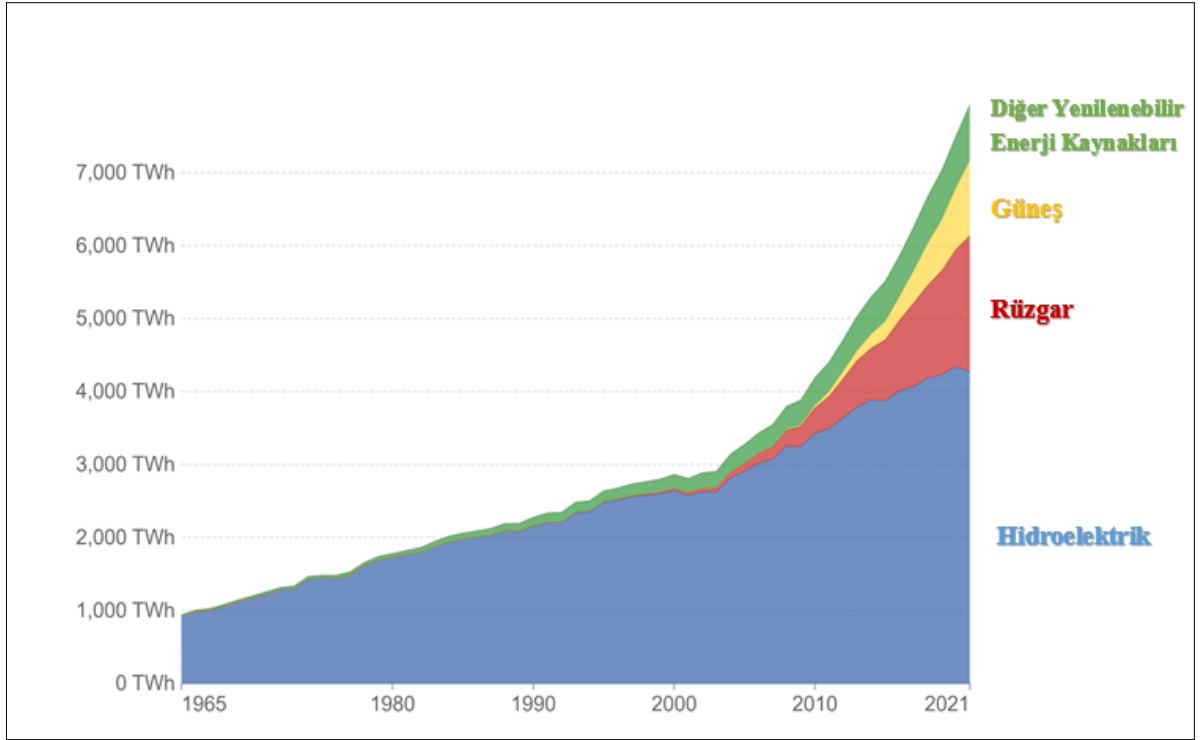
Şekil 1.2: Yenilenebilir enerji kaynakları [4].

Evrende hazır halde bulunan enerji kaynaklarına birincil enerji kaynakları, birinci enerji kaynaklarının form değiştirmesi sonucunda ikincil enerji kaynakları ortaya çıkmaktadır. Birincil enerji kaynaklarına; rüzgar, güneş, doğal gaz, kömür, petrol örnek verilebilir. İkincil enerji kaynaklarına ise elektrik, hava gazı, hidrojen ve benzin örnek gösterilebilmektedir. İkincil enerji kaynaklarının elde edilebilmesi için kimi zaman teknik prosesler gerekmektedir [6]. Şekil 1.3'te yer alan görselde yenilenebilir enerji kaynaklarının doğal etkilerinden, ikincil enerji dönüşüm yollarının elde edilmesini özetleyen tablo yer almaktadır. Güneş, Dünya ve diğer gezegenlerin etkileri doğal dönüşüm yoluyla faydalanılabilir hale gelmektedir. Artan mühendislik ve teknoloji sayesinde teknik dönüşüm prosesleri geliştirilmiş ve günlük hayatta faydalanabileceğimiz ikincil enerjilere bu yolla ulaşılmıştır. Doğal dönüşümlere; solar radyasyon, su dalgaları, gelgitler ve rüzgar örnek verilebilir. İkincil enerjilere ulaşabilmek için geliştirilen teknik adımlardan bazıları; fotovoltaiik paneller, gelgit santralleri, nehir santralleri ve rüzgar türbinleri örnek gösterilebilir.



Şekil 1.3: Yenilenebilir enerji kaynaklarının dönüşüm adımları [7].

Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının 1965–2021 yılları arasındaki üretim payları Şekil 1.3’de yer almaktadır. Hidroelektrik santrallerin uzun yıllardır kullanıldığı, 1965 yılında 1000 TWh’lik enerji talebini karşıladığı görülmektedir. Bu değer 2021 yılında 4000 TWh’in üzerindedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması 2000 yılının başlarına dayanmaktadır. Bu yıllarda güneş enerjisiyle üretilen enerji 1 TWh, rüzgar enerjisiyle 31 TWh, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji 185 TWh civarındadır. 2021 yılına bakıldığında güneş enerjisiyle üretilen enerji 1033 TWh, rüzgarla üretilen enerji 1862 TWh, diğer yenilenebilir enerji kaynakları 763 TWh’lik enerji talebini karşılamıştır [8].



Şekil 1.4: Dünyada yenilenebilir enerji üretimi [8].

Şekil 1.4’de verilen kaynaklar arasında rüzgar, yıllar içerisinde hidroelektrik enerjiden sonra en çok tercih edilen enerji konumuna gelmiştir. Gelişen teknoloji, uygulama alanları, enerji sürekliliği ve maliyet yönünden değerlendirildiğinde rüzgar enerjisinin avantajlı durumda olduğu söylenebilmektedir [9].

1.2 Rüzgar Enerjisine Genel Bakış

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi, küresel endüstride kritik rol oynayarak yıllar içinde önemli hale gelmiştir. Ülke politikaları, yatırım destekleri ve gelişen teknolojinin ivmelenmesine paralel olarak rüzgar endüstrisine yapılan yatırımlar da artmıştır. Özellikle sanayi devrimiyle birlikte artan makineleşme ve nüfus yoğunluğunun sebep olduğu enerji ihtiyacı, geleneksel yöntemlerle başka bir ifadeyle fosil yakıtlarla karşılanmaya çalışılmıştır. Fosil yakıtların tükenme tehlikesinin yanı sıra karbon emisyonunun katlanarak artması küresel ısınmayı tetikleyerek gelecek yaşamı tehlikeye sokmakta ve doğal dengeyi kötü etkilemektedir.

Fosil enerji kaynaklarının tüketiminin bir sonucu olarak ortaya çıkan kritik durumlar sonucunda ülkelerin iklim değişikliğiyle ilgili aldığı tedbirler onlarca yıl öncesine dayanmakta olup bu tedbir ve politikalar günümüzde hala devam etmektedir. Örneğin

Viyana Sözleşmesi 1985 yılında, Montreal Protokolü ise 1987 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu iki sözleşmenin temel amacı ozon tabakasına zarar veren gazların tüketimine karşı katı kurallar getirilerek azaltılmasını sağlamak, bazı gazların kullanımını ve emisyonunu yasaklamaktır. Özellikle CFC (Kloroflorokarbonlar) olarak bilinen sera gazı emisyonu sırasında ozon tabakasına ciddi zarar veren bu gaza ek olarak bazı halon bileşiklerinin tüketiminin ve kullanımını sınırlayan maddeler ve ek önlemler de yine bu sözleşmenin kapsamındadır [10].

Kyoto protokolü, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi içinde 11 Aralık 1997'de imzalanmış 16 Şubat 2005'te yürürlüğe girmiştir. Protokolün temelinde karbon salınımı sırasında açığa çıkan zararlı beş gaz türünü engellemek veya mümkün olduğunca bu gaz türlerinin kullanımını azaltmaya çalışmak yer almaktadır. Ayrıca alınan ek tedbirlerle karbon salınımının 1990 yılındaki haline düşürülmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ülkelere yapılacak yatırım ve prensipler için ödevler yüklenmiştir. Bu önlemlerin arasında fosil yakıt tüketiminin en alt seviyede tutulması, endüstride kullanılan taşıtlara yeni emisyon yönetmeliğinin getirilmesi, alternatif olarak seçilen enerji kaynaklarına yatırım yapılarak rüzgar ve güneş enerjilerinin kullanımının önünün açılması aktarılabılır [11].

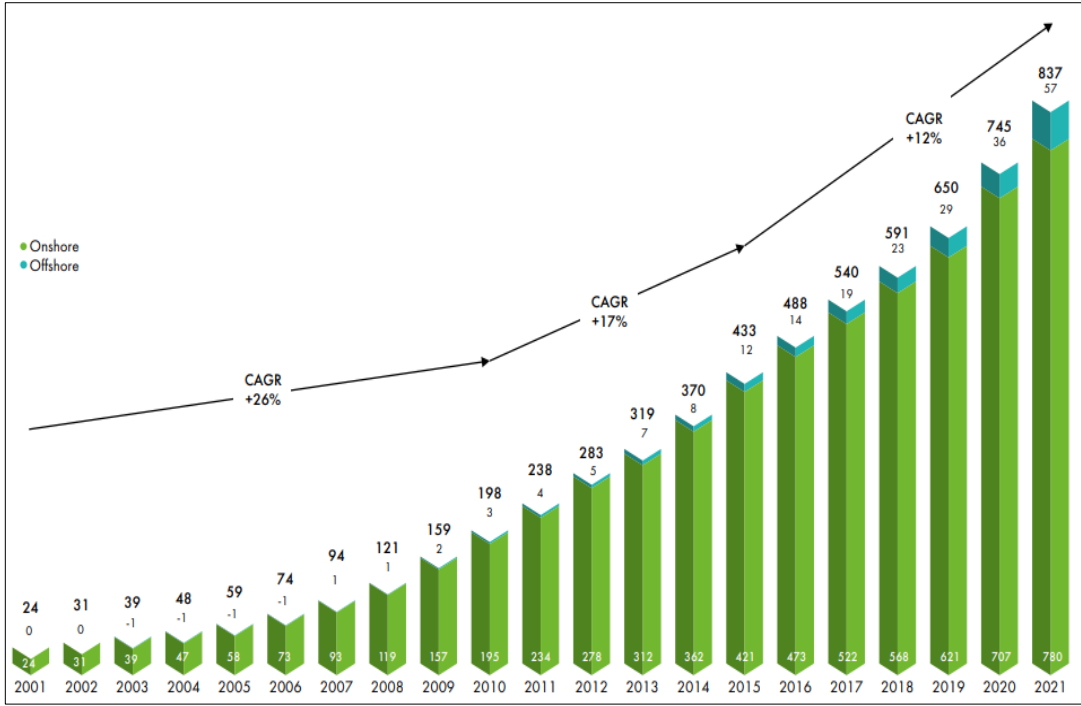
Paris İklim Anlaşması 4 Kasım 2016'da yürürlüğe girmiştir. Anlaşmanın temelinde yatan düşünce küresel ısınmaya doğrudan yol açan sera gazı emisyonlarını azaltmaktır. Fosil yakıt tüketiminden kaynaklı sera gazı yayılımı her yıl dünyamızın sıcaklığını artırmaktadır. Anlaşmanın ileri vadede amaçladığı hedef günümüzdeki sıcaklık artışının, sanayi döneminde olduğu gibi 2°C artışın aşağısında ve daha sıkı önlemler aracılığı ile 1,5°C artışın altında tutmaktır. Bu sıcaklık artışı seviyelerinde iklim değişikliği riskleri ve olumsuz etkilerinin yüksek ölçüde önlenebileceği kabul edilmiştir. Bu ve buna benzer politikaların ülkelerin özellikle rüzgar enerjisine yaptıkları yatırımlarda dayanışmalarını arttırarak ortak payda bilinçlerini güçlendirmiştir [12].

Özet olarak konulan tedbirler ve anlaşmalar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmemiz gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda son yıllarda hızla büyüyen rüzgar enerji piyasası dikkat çekmektedir. Büyük şirketler milyarlarca dolarlık yatırımları bu alana yapmakta ve enerji sektörüne dönüşümcü liderlik etmektedirler.

1.3 Küresel Rüzgar Enerjisi Durumu

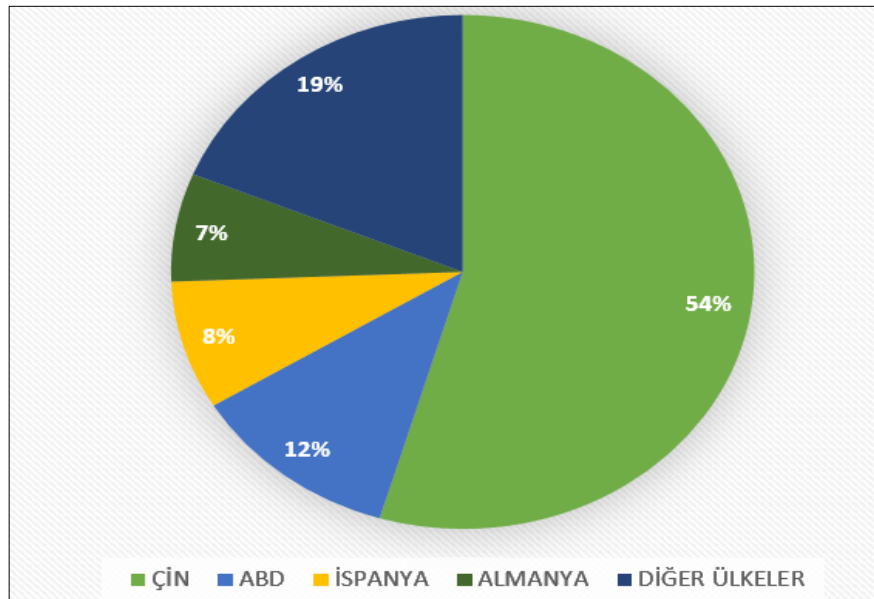
Rüzgar enerjisi alanında tarihteki en büyük ivme olarak kabul edilen dünya çapındaki rüzgar kurulu gücü yeni santrallerle birlikte 2020 yılında 95 GW'lık kuruluma ulaşmıştır. Onu takiben 2021 verilerine göre %12'lik bir büyümeyle 93.6 GW'lık kurulum yapılarak dünya genelinde kurulu güç 837 GW seviyelerine ulaşmıştır. Bu seviyelerde kurulu güç ile yılda 1,1 milyar tonun üzerinde sera gazı emisyonu önlenmiştir. Kurulu gücün %93,2'si kara tipi rüzgar santrali (on-shore), %6,8'i deniz tipi rüzgar santrallerinden (off-shore) oluşmaktadır. Kara tipi rüzgar türbinlerinde 2021 yılında 72,5 GW'lık kurulum yapılırken deniz tipi rüzgar türbini yatırımları üç kat artarak 21,1 GW seviyelerinde kurulum gerçekleştirilmiştir [13].

Kara tipi yatırımlarda en fazla kurulu güce sahip ülkelerden Çin ve ABD ilk iki sırada yer alırken Türkiye'nin de dâhil olduğu Avrupa kıtası içerisinde üçüncü sırada yer almaktadır. Ayrıca Türkiye 2021 verilerine göre kara tipi rüzgar santrali kurulumunun aynı yılda kurulan toplam kara tipi santrallerin %2'sini oluşturarak 1,45 GW'lık kurulu gücü devreye almıştır. Brezilya, Vietnam, Avustralya ve Hindistan'da 2021 yılında toplamda 9,42 GW'lık kurulum gerçekleştirilmiştir. Belçika, Hollanda, İngiltere, Almanya ve Portekiz'de de altyapı çalışmaları ve büyümeler devam etmektedir. Çin, deniz tipi rüzgar santrali yatırımlarıyla 2020 yılında kurulan toplam deniz tipi kurulumunun %50'sini oluşturarak 3 GW'lık kurulum gerçekleştirmiştir. Daha sonra 2021 yılında tarihi kurulum gerçekleştirerek, yeni kurulum gücünün %80'ini sağlayarak 16,88 GW'lık kurulum devreye almıştır. 2021 yılının diğer deniz tipi kurulumları ise İngiltere 2,32 GW, Vietnam 844 MW, Danimarka 633 MW, Hollanda 422 MW olmuştur [14]. GWEC 2022 yılı raporundan alınan verilere göre Şekil 1.5'te küresel rüzgar kurulu gücünün yıllara göre gelişimi yer almakta olup, son yirmi yılda kurulu gücün otuz katın üzerinde bir artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 1.5: Rüzgar kurulu gücünün yıllara göre gelişimi [14].

Ayrıca yine rapordan elde edilen veriler ışığında ülkelerin global türbin üretim piyasasındaki payları Şekil 1.6’da yer almaktadır. Çin %54’lük payla lider konumda yer alırken ABD %12’lik oranla ikinci konumda yer almakta olup onları İspanya, Almanya ve diğer ülkeler takip etmektedir.



Şekil 1.6: Ülkelerin türbin üretimindeki payları [15].

Önde gelen türbin üreticisi firmaların menşei, kullandıkları generatör teknolojisi ve pazar katkıları Tablo 1.2’de yer almaktadır.

Tablo 1.2: Global türbin üreticileri ve pazar katkıları [16].

Üretici	Ülke	Generatör Teknolojileri	Pazar Katkısı
Vestas	Danimarka	ÇBAG	14,8
Goldwind	Çin	SMSG	12,8
GE	ABD	SMSG ÇBAG	11,7
Envision Energy	Çin	SMSG ÇBAG	10
Siemens Gamesa	İspanya	ÇBAG	8,1
MingYang	Çin	ÇBAG	5,2
Sewind	Çin	SMSG ÇBAG	5,1
Nordex	Almanya	ÇBAG	4,8
Windey	Çin	SKAG	4,1
CRRC	Çin	SMSG ÇBAG	4
DEC	Çin	ASSG	3,9
CSIC	Çin	SMSG ÇBAG	3,8
SANY	Çin	ÇBAG	3,7
United Power	Çin	ÇBAG	2,0
Enercon	Almanya	ASSG	2,0
Diğer	-	-	4

Avrupa merkezli şirketlerin generatör teknolojisi olarak çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) tercih ettikleri, Çin firmalarının ise daha çok sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) teknolojisini kullandığı görülmektedir. Burada önemli konu Avrupa’da yıllar önce yapılan yatırımlar ve alt yapı teknolojilerinin birden değiştirilememesinden kaynaklanmaktadır. Asya kökenli şirketlerin daha çok SMSG yatırımlarına ağırlık verdiği görülmüştür.

Danimarka merkezli Vestas firması 1945 yılında kurulmuştur ve sektöründe lider türbin üreticisi firmaları arasında yer almaktadır. Firma, 2019 yılı itibariyle 66 binin üzerinde 100 GW kapasiteli türbinleri için 80 farklı ülkede kurulum gerçekleştirmiştir. ABD, İspanya,

Çin’inde aralarında bulunduğu 12 farklı ülkede üretim tesisi kurmuşlardır. Firmanın 25 binin üzerinde çalışanı bulunmaktadır [17].

Çin’in önde gelen firmalarından olan Goldwind ise 1998 yılında kurulmuş olup toplam kurulu gücü 86 GW’ın üzerinde 44 bin rüzgar türbininin kurulumunu 32 farklı ülkede gerçekleştirmiştir. Goldwind ayrıca sıfır karbon fikrini benimseyerek güç sistemlerini karbon salınımını minimum seviyede tutmak için entegre etmekte ve üretim bantlarını bu amaç için optimize eden çalışmalar sürdürmektedir [18].

ABD’de deniz tipi rüzgar santralleri için hükümet destekli programlar yürütmektedir. Bu bağlamda kıyı şeridi boyunca uygun görülen tüm yerlere rüzgar türbinleri kurulumu planlanmaktadır. ABD’nin 2030 yılı planına göre hayata geçecek rüzgar yatırımlarıyla birlikte 30 GW’lık açık deniz tipi rüzgar santrali yatırımı hedeflenmekte ve bu kurulumlarla birlikte karbon emisyonu 2005 yılına oranla %50 azaltılması beklenmektedir [19]. Avrupa’da ise 2021 yılında yaklaşık 25 GW’lık kara ve deniz rüzgar türbini kurulumu gerçekleştirilmiş olup 2030 hedefi olan yıllık 35 GW’lık kurulumun altında kalmıştır. Avrupa’nın 2030 yılına kadar hedeflediği 480 GW’lık rüzgar kurulu gücü için yavaşladığı görülmektedir. Ancak Almanya 2030 yılı hedeflerinden vazgeçmeyip, rüzgar santrallerinin kurulum izini ve prosedürlerinin kolaylaştırılması kapsamında paket yasalar düzenlemektedir. Almanya 2030 yılı hedeflerini gerçekleştirmesi halinde kara tipi kurulum gücünü iki katına çıkararak 115 GW’lık seviyeye gelmeyi planlamaktadır [20, 21]. Çin ise hedeflerine daha yakın olup, dünyadaki kurulu açık deniz tipi rüzgar gücünün yarısını karşılamakta olup, her yıl yaptığı yatırımlarla diğer ülkelere göre 5 kat daha fazla deniz türbini kurulumu gerçekleştirmektedir. Ek olarak Çin hükümeti 2021 yılında 25 GW’lık yüzen rüzgar türbini projelerine lisans vermiştir. Bu gelişmelerle birlikte Çin’in hali hazırda hakim olduğu deniz tipi türbin sistemlerinin kapsamını büyük ölçüde arttırmıştır [22]. Çin uzun vadeli hedefi olan 2060 yılına kadar karbon nötr hedefini gerçekleştirmek amacıyla rüzgar enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları için önemli yatırım politikaları düzenlemektedir [23]. Türkiye’nin ise henüz deniz tipi rüzgar santrali bulunmamakta olup Türkiye 2022 yılı GWEC raporuna göre deniz tipi rüzgar enerjisi potansiyeli en yüksek 4 ülkeden biri olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu rapora göre deniz yatırımlarının Türkiye’de uygulanabilir olduğu ve uluslararası finans destekçileriyle yol haritalarının oluşturulduğu belirtilmiştir. Türkiye 2030 yılına kadar 20 GW’ın üzerinde kurulu güce ulaşmayı hedeflemektedir [24].

1.4 Ülkemizde Rüzgar Enerjisi Durumu

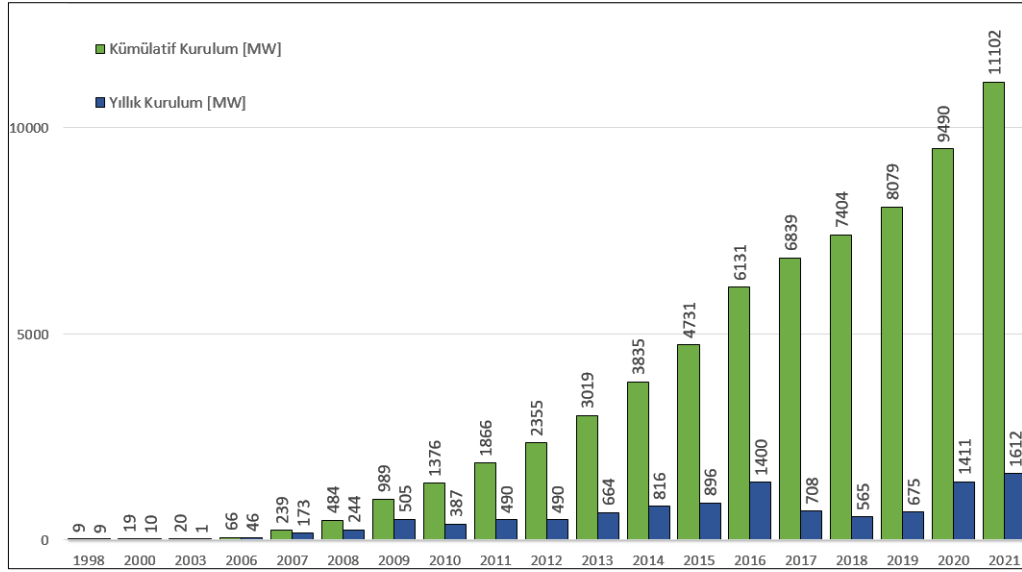
Ülkemizde hassas ölçekli rüzgar analizleri ve hava tahmin modelleri kullanılarak Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Hazırlanan modelde Türkiye'nin potansiyel güç haritası çıkarılmış olup rüzgar hızlarına göre sınıflandırılmıştır. Tablo 1.3'te yer alan tabloya göre kara tipi potansiyel güç kapasitesi 37,8 GW, deniz tipi potansiyel güç kapasitesi 10 GW civarında olmak üzere toplam güç kapasitesi 47,8 GW olarak hesaplanmıştır. Rüzgar enerji potansiyeli hesaplamaları Türkiye'nin yüz ölçümü alanının %1,30'unu kapsamaktadır [25].

Tablo 1.3: Türkiye rüzgar enerji potansiyeli [25].

Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (50 m) (m/s)	Güç Yoğunluğu (50 m) (W/m ²)	Kapasite (MW)
7.0 - 7.5	400 - 500	29259,36
7.5 - 8.0	500 - 600	12994,32
8.0 - 9.0	600 - 800	5399,92
> 9.0	> 800	195,84
		47849
	Toplam	Karasal:37836 Deniz:10013

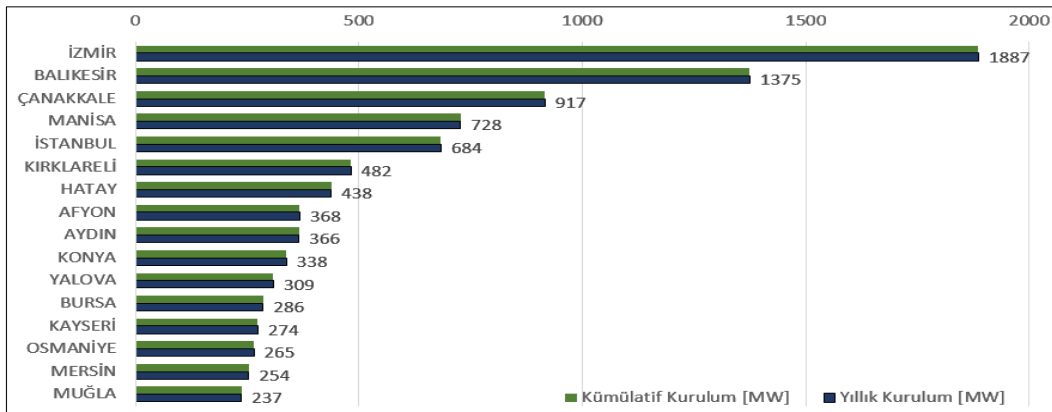
Ayrıca REPA çalışması sayesinde çeşitli yükseltilerde mevsimlik, yıllık ve hatta günlük rüzgar hız ortalamaları tespit edilerek Türkiye tematik haritalarına işlenmiştir. Bu sayede Türkiye'de yapılan rüzgar enerji potansiyelinin tespit çalışmaları yatırım ortamının iyileştirerek devlet mekanizmaları ve özel sektör destekli yeni projelerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır.

2021 yılı verilerine göre Türkiye'de yapılan çalışmalar sonucunda toplam kurulu güç 11,1 GW'lık seviyelere ulaşmış durumdadır. Şekil 1.7'de 1998 yılından bu yana Türkiye'nin rüzgar enerjisi santralleri kurulum tablosu yer almaktadır. 2007 yılında güzel bir ivme yakalanmış olup her yıl bir önceki sene kadar kurulum yapılmış olduğu görülmektedir. 2010 yılında ilk kez toplam kurulu güç GW seviyelerine ulaşmış olup onu takiben 2016 ve 2020 yıllarında 1,4 GW'lık büyük kurulumlar gerçekleştirilmiştir. 2021 yılında 1,6 GW'lık rekor bir rüzgar türbini kurulumu gerçekleştirilerek Türkiye'nin rüzgar enerji sektöründeki politikasının kararlı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 1.7: Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin kurulum tablosu [26].

Türkiye’de rüzgar enerji santrali işletmecisi 232 firma ve 129 yatırımcı firma bulunmaktadır. Ek olarak 273 santral ve 3983 faal türbin işletilmektedir. Türkiye 2021 yılı verilerine göre türbinlerden toplam elektrik tüketiminin ortalama %8,44’ünü karşılamakta ve her yıl bu oranı artırmaktadır. Şekil 1.8’de rüzgar enerji santrallerinin illere göre dağılımı görülmektedir. Rüzgar enerji potansiyeli olarak kıymetli bir coğrafi konumda olan ülkemizin potansiyel yatırım alanları Marmara, Ege ve Akdeniz bölgeleri örnek olarak gösterilebilir. Örneğin Ege bölgesinde bulunan İzmir ilinde 1,88 GW’lık kurulumla ulaşılmış olup ikinci en yüksek kurulumla sahip olan il 1,37 GW’lık kurulu güç ile ise Marmara bölgesinde bulunan Balıkesir’dir. Çanakkale, İstanbul, Manisa illerinde de yatırımlar ve çalışmalar sürekli olarak devam etmektedir. Nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bu illerde enerji tüketim alanlarının yakınında böyle bir potansiyele sahip olması önem teşkil etmektedir.



Şekil 1.8: Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin illere göre dağılımı [26].

Aktarılan tüm bu veriler ışığında Türkiye küresel ölçekte önem arz eden bir ülke konumuna gelmiş durumdadır. 2021 verileri dikkate alındığında Türkiye toplam rüzgar kurulu güç sıralamasında Avrupa’da 7. ve yine aynı yıl gerçekleşen güç artışı sıralamasında 4. sırada bulunmaktadır. Ayrıca Türkiye global ölçekte yapılan kurulu güç sıralamasında ilk 10 ülke arasında yer almaktadır. Bu nedenle Avrupa ülkeleri kendi rüzgar yatırımlarında kullanmak üzere ekipman tedariki ve ithalatçısı olarak Türkiye ile ticaret ortaklığına ve ticari ilişkilerin ilerletilmesinde işbirlikçi politikalar izlemektedir [27].

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR TEKNOLOJİLERİ

2.1 Rüzgar Enerjisinin Evrimi

Yeryüzüne düşen güneş ışınlarının farklı açılarda gelmesi ve bölgelere göre yükselti çeşitliliği, dünya yüzeyinde ısı farklılıkları oluşturmaktadır. Sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde alçak basınç merkezleri, nispeten daha soğuk bölgelerde yüksek basınç merkezleri oluşmaktadır. Yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine doğru hareket eden hava akımları rüzgar olarak adlandırılmaktadır [28].

İnsanlığın rüzgar enerjisinden faydalanmaya başlanması çok uzun yıllara dayanmaktadır. Tarihçilere göre yel değirmenleri modern ismiyle rüzgar türbinlerinin kullanılmaya başlaması 4 milenyum öncesine dayanıyor. Yakın geleceğe kadar rüzgar enerjisinden mekanik olarak yararlanılarak tarım, sulama ve ulaşım kullanılmıştır [29].

Rüzgar enerjisinden faydalanarak ilk kayda geçen bilim insanının 1'inci yüzyılda Heron olduğu bilinmektedir. Heron, su taşımak için çark şeklinde bir pompa mekanizması tasarlamış ve bunu hayata geçirmiştir [29].

Orta Asya'nın güney kıyılarına yakın bölgelerinde 8'inci yüzyılda rüzgar değirmenlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Rüzgar değirmenleri, bu dönemde tahıl öğütmek ve su pompalamak amacıyla kullanılmıştır [29].

Milattan sonra 1000'li yıllarda yel değirmenleri, Güney Avrupa ve Doğu Asya'nın bazı bölgelerinde deniz suyundan tuz elde etmek için kullanılmıştır. Aynı tarihlerde tahıl öğütmek amacıyla dikey yel değirmenlerinin kullanıldığı bilinmektedir [30].

Elektrik üretimi için kullanılan, ilk modern anlamdaki rüzgar türbini İskoçya'da 1887 yılının sonlarına doğru kurulmuştur. Profesör James Blyth tarafından tasarımı gerçekleştirilmiş olan rüzgar türbini dikey eksenli türbin yapısında ve yaklaşık 10 metre yükseklikte olup, akü şarj etmek ve aydınlatma amacıyla kullanılmıştır [31].

Danimarkalı mühendis olan Paul La Cour, 1891 yılında elektrik enerjisi sağlayan bir rüzgar türbini icat etmiştir. Türbin yapısında regülatör kullanarak, ilk kez sabit güç akış kontrolünü sağlamıştır [32]. La Cour, 1905 yılında Rüzgar Elektrik Mühendisleri Derneğini kurmuş, aynı sene çok kanatlı rüzgar türbinlerinin verimsiz ve yavaş olduğunu nispeten az kanatlı türbinlerin daha verimli olduğunu ortaya çıkarmıştır [33].

Fransız mühendis Georges Jean Marie Darrieus tarafından 1931 yılında, kendi ismini verdiği dikey eksenli rüzgar türbinini icat etmiştir. Turbin yapısında iki adet kıvrılmış kanat, iki tarafından rotora sabitlenmiş halde olup, rüzgar etkisinin dikey mil üzerinde oluşturduğu tork prensibiyle çalışmaktadır. Günümüzde halen kullanımının devam ettiği Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbinlerinin kullanım alanı yatay eksenliye kıyasla pek yaygın değildir [34].

Danimarkalı mühendis Johannes Juul, 1957 yılında günümüzde kullanılan modern üç bıçaklı yatay rüzgar türbin tasarımını gerçekleştirmiştir. Tasarlanan türbin 200 kW gücünde olup, verimli hava yönlendirmesi amacıyla kanatlara özel şekiller verilmiştir [35].

NASA, 1975 yılında rüzgar türbin geliştirmeleri için ar-ge çalışmaları başlatmıştır. Yapılan araştırmalar ışığında günümüzde kullanılan türbinlerin dayanımlı kule yapıları, türbin konum değiştirme mekanizmaları, kompozit malzeme seçimleri ve aerodinamik mühendisliklerinin gelişimlere öncülük edilmiştir. NASA tarafından yapılan araştırmalar ve tasarımlar türbinlerde yüksek güçlere ulaşılmasını mümkün kılmıştır [36].

1978 yılında rüzgar türbin teknoloji sektöründe öncü Danimarka merkezli Vestas şirketi kurulmuş ve aynı yıl 30kW gücünde ilk türbinlerinin üretimine başlamışlardır [35].

1990'lı yıllarda Danimarka'da ilk kez deniz tipi rüzgar türbinlerinden rüzgar çiftliği kurulmuştur [37].

1998 yılında Çin merkezli rüzgar türbin üreticisi Goldwind şirketi, devlet destekleme programı yardımıyla kurulmuş ve aynı yıl 600 kW gücünde iki türbin üretimine başlamışlardır. [35].

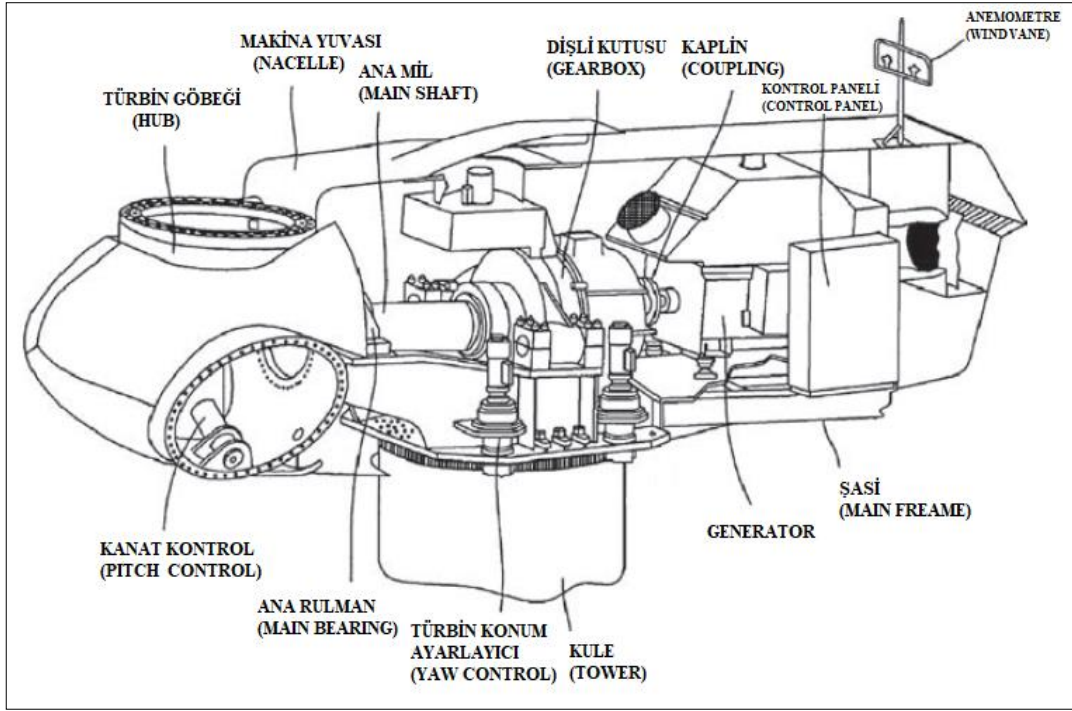
2000-2005 yılları arasında gelişmeleri takiben giderek artan kanat çapları rüzgar türbinlerinde dayanıklılığı önemli hale getirmiştir. Kule tasarımlarında özel metal gövdeler, çelik güçlendirmeler, kanatlarda daha dayanıklı ve hafif malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Bu yıllarda ABD ve İngiltere’de enerji tüketim yerlerine yakın yerlerde rüzgar çiftlik kurulumları artış göstermiştir. Dünya çapında rüzgar elektrik gücü 60 MW seviyelerine ulaşmıştır. Devletler bu yıllarda rüzgar yatırımlarını desteklemek ve ekonomilerini hareketlendirmek amacıyla mali destek programları açıklamış ve yasalar düzenlemiştir. Rüzgar türbini kanat çapları 2018 yılında 150 metreye kadar ulaşmış olup türbin güçleri 9,5 MW seviyelerine gelmiştir [38].

Japonya’da ilk kez yüzen rüzgar türbini kurulumu 2013 yılında gerçekleştirilmiştir. Darrieus ve Savonius tipi dikey rüzgar türbinlerinin kullanıldığı bu hibrit yapı sistem okyanus dalgası ve rüzgar enerjisini kullanarak elektrik üretmektedir [39].

Tüm bu ilerlemeler dikkate alındığında rüzgar enerjisinin kullanımı ve rüzgar türbin teknolojileri yıllar içerisinde büyük gelişmeler göstermiştir. Dünya, rüzgar enerjisi için gelecek uzun yıllar yüksek enerji potansiyeli barındırmaktadır. Küresel Rüzgar Enerji Konseyi (GWEC) raporuna göre mevcut büyüme oranlarına dayalı olarak global tahmini rüzgar kapasitesi 2030 yılında 1200 GW seviyelerine ulaşacağı ön görülmektedir. Bu yüzden ülkeler, dolayısıyla rüzgar türbin geliştiricileri yatırım ve ar-ge çalışmalarına yüksek bütçeler ayırmakta, çalışan sayılarını artırarak şirketlerini geliştirmektedirler [14].

2.2 Rüzgar Türbinleri Hakkında

Rüzgar türbinleri, rüzgar tarafından oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Modern rüzgar türbinleri elektrik üretimini verimli bir şekilde gerçekleştirmek, türbin sağlamlığını korumak için farklı bileşenlere ihtiyaç duymaktadır. Şekil 2.1’de temel bir yatay eksenli rüzgar türbini yapısı yer almaktadır. Rüzgar türbinleri; kule, makine yuvası, kanatlar, rotor, generatör, fren mekanizması, dişli kutusu, kanat kontrol mekanizması, türbin konum ayarlayıcısı, türbin kontrolcüsü ve anemometre gibi bileşenlerden oluşmaktadır [38].



Şekil 2.1: Modern rüzgar türbini yapısı [40].

Rotor bileşeni, türbin kanatları ve bu kanatları bir arada tutan türbin göbeği kısımlarından oluşmaktadır. Modern rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan rotor yapısı üç kanatlı ve rüzgara dik konumlandırılmaktadır. Tek kanatlı, iki kanatlı ve çok kanatlı rotor tasarımları geçmişte kullanılmıştır fakat daha düşük verimli olmaları nedeniyle pek tercih edilmemişlerdir [41]. Rotor mekanizması rüzgardan aerodinamik dönme momenti elde ederek mekanik enerjiye dönüştüren ana parçadır. Enerji dönüşümünde kilit rol oynayan rotor ve kanat yapıları, yüksek verim amacıyla hafif ve dayanıklı malzemelerden üretilmekte olup düşük dönme ataletine sahip olurlar. Kanat tasarımlarında genellikle fiberglas ve karbon ihtiva eden kompozit malzemeler kullanıldığı gibi küçük güçlerde çelik ve alüminyumda tercih edilebilmektedir. Kanatlarda tercih edilen malzemeler kadar kanat tasarımları da güç üretimi için çok önemli rol oynamaktadır. Kanatların orta bölümlerinde, kanatlara karakteristik şekil veren kanat profilleri (aerofoil) yer almaktadır. Bu profiller kanadın bir tarafının düz diğer tarafına kavisli bir yapıda olmasını sağlamaktadır. Rüzgarın kanatlara etki ettiği sırada hava akışı uzun kavisli yoldan geçerken hızlanır ve düşük basınç bölgesi oluştururken kısa düz yoldan geçen hava akışı yavaş olduğundan yüksek basınçta sahiptir. Hava akımı basıncın yüksek olduğu yerden alçak olduğu yöne doğru hareket ederek aerodinamik etki oluşturur ve bu kaldırma kuvveti sayesinde türbin kanatlarını dönme hareketini gerçekleştirir [42, 43].

Rüzgar türbinlerinde güç aktarma organı olarak görev alan bileşenlere mil, fren mekanizması, rulmanlar ve yardımcı bağlantı parçaları örnek gösterilebilir. Dişli kutusu, rotor hızının dişliler yardımıyla belirli oranlarda hızlandırarak generatör tarafına aktaran yardımcı parçadır. Rotor ve dişli kutusu arasında bulunan bağlantı parçası düşük hızlı mil olarak dişli kutusu ve generatör arasında bulunan bağlantı parçası ise yüksek hızlı mil olarak isimlendirilmektedir. Güç aktarma organlarına rüzgar enerjisinin karakteristiği gereği değişken ve yüksek güçler uygulanmakta olduğu için oldukça dayanıklı yapıdadırlar. Türbinlerde fren mekanizması türbin rotorunun durmasını sağlayarak acil durumlarda türbin güvenliğini sağlarlar. Yüksek rüzgar hızlarında uygulanan değişken yükler türbin yapısına zarar verebileceği için belirlenen limit değerlerin üstünde fren mekanizması, bir türbin kontrolcüsü yardımıyla aktif olur ve elektriksel ve mekanik olarak sistemi keser.

Rüzgar türbinlerinde yaygın olarak senkron ve asenkron yapıda bulunan generatörler tercih edilmektedir. Generatörlerin doğrudan ana şebekeyi ya da yardımcı şebekeleri beslediği uygulamalar bulunduğu gibi düşük güçlü ihtiyaçlarda harici akü banklarının beslediği uygulamalarda bulunmaktadır. Rüzgarın değişken yapısı nedeniyle generatörlerde üretilen elektrik enerjisinin dalgalı formda olması güç elektroniği sistemlerini gerekli hale getirmiştir. Buna ek olarak kullanıcıların rüzgar düzensizliğinden en az şekilde etkilenmesi için ihtiyaç duyulan güçten daha yüksek olacak şekilde olarak generatör tasarımı yapılmakta ve bu sayede rüzgar türbini ihtiyaç duyulan gücü sağlamaktadır. Rüzgar türbinlerinin değişken hızlarda çalışması verimlilik açısından bir hayli önem taşımaktadır. Yaygın olarak kullanılan senkron ve asenkron generatörlerin sabit devirde çalışma karakteristikleri gelişen güç elektroniği dönüştürücüleri yardımıyla değişken rüzgar hızlarında da verimli çözümleri mümkün kılmaktadır [41].

Makine yuvası temelde güç aktarma organlarını, generatörü, türbin kontrolcüsü ve güç elektroniği elemanlarını zararlı dış etkilere karşı koruma sağlayan dayanıklı kapalı bir yapıdır. Yerden yaklaşık 50 metre yükseklikte rüzgar hızı artarak türbinlerin çalışması için ideal koşul sağlanmakta olup daha fazla enerji yoğunluğu yakalanmaktadır. Bu nedenle kule adı verilen metal kafesli, çelik dayanıklı yapılarla türbinler yükseltilmektedir. Makine yuvası, kulenin üzerine bulunur ve iki bileşen arasında motorlarla hareket edebilen dişli yapısı, türbin konumunu değiştirerek rüzgardan maksimum verim alınmasında etkilidir. Türbin konum ayarlayıcısı, makine yuvasının üzerine konumlandırılmış anemometre (yel

ölçer) yardımıyla dönüş yönünü ve dönmesi gereken açıyı ayarlamaktadır. Kanatların türbin göbeğine bağlandığı kısımda benzer şekilde hareket edebilir yapıdadır [40].

Kanat kontrol mekanizması, rüzgar hızı azaldığında rotor hızını arttıracak şekilde anma devrinin üstünde zararlı sayılabilecek hızlarda rotor hızını azaltacak şekilde kanat açısını ayarlamaktadır. Generatör verileri ve sensör verilerinden alınan bilgilerin, yazılım tabanlı kontrolcüyle işlenmesi sonucunda kanat kontrol mekanizması kumanda edilmektedir [43].

Günümüzde çeşitli uygulamalar için farklı özelliklerde rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Türbinler; kurulum yerleri, türbin kapasitesi, kanat sayısı, generatör teknolojisi, dişli ihtiyacı, rüzgar yönüne göre rotor konumu, güç aktarım bileşenlerinin dizilim biçimi gibi özelliklerine göre sınıflandırılmaktadırlar [44].

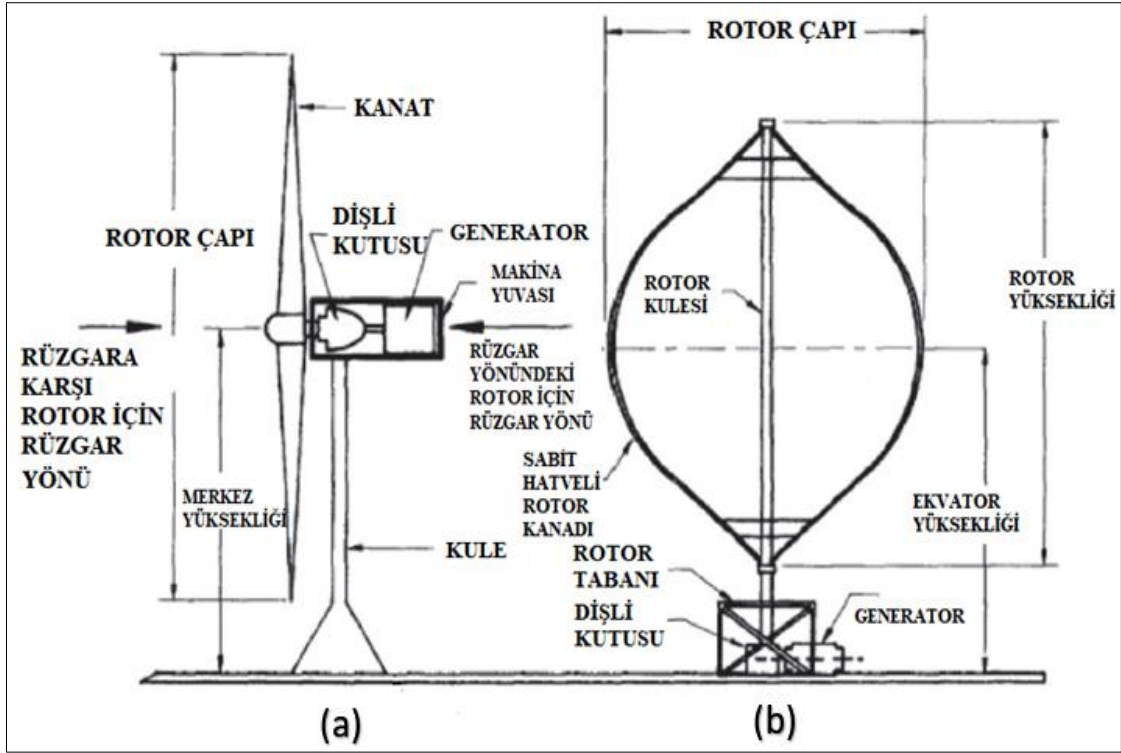
Rüzgar türbinleri kurulum yapılan yere göre kara tipi (onshore) veya deniz tipi (offshore) olarak sınıflandırılırlar. Günümüzde kara tipi rüzgar türbinlerinin sayısı, deniz tipilerine göre daha yaygındır. Kara tipi türbinlerin kurulumları kolay ve ucuz olduğundan daha fazla tercih edilmektedir. Deniz tipi türbin kurulumu yüksek maliyet ve daha fazla zaman gerektirmektedir. Buna karşın deniz tipi rüzgar türbini daha fazla rüzgar yoğunluğuna sahip olduğu için daha yüksek güç çıkışı vermektedirler. Ayrıca deniz kurulumlarında çevresel engeller daha az olduğundan kolaylıkla alan belirlenebilmektedir [40].

Rüzgarın kanatlara geliş yönü rotor kısmından ise rüzgara karşı (upwind) olarak, rüzgar rotor tarafından değil de arkadan geliyorsa rüzgar yönünde (downwind) rüzgar türbini olarak isimlendirilirler [41]. Rüzgara karşı konumlandırılan kanat tasarımlarında rüzgar akışı önce kanatlara geldiği için rüzgar akışı bozulmazken, rüzgar yönündeki tasarımlarda rüzgar önce makine yuvası ve kuleden geçerek kararsız bir hal aldıktan sonra kanatlara etki eder. Bu nedenle rüzgar yönünde tasarlanan türbinler dağılan ve değişken rüzgar akımı nedeniyle daha fiziksel zorlanmalara maruz kalmaktadırlar. Dağılan hava akışı nedeniyle aerodinamik kayıplar yaşan türbin, daha geniş kanat yapısına ihtiyaç duymakta olup daha gürültülü olarak çalışmaktadır. Bu nedenle modern rüzgar türbinlerinde rüzgarı karşıdan alan kanat yapısı tercih edilmektedir [40].

Rüzgar türbinleri rotor ekseninin konumuna göre; dikey eksenli rüzgar türbini (DERT), ve yatay eksenli rüzgar türbini (YERT) olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Dikey

eksenli türbinler, türbin konumunu ayarlayan herhangi bir kontrole sahip olmadıkları gibi kendiliğinden harekete geçemezler. Bu türbinler düşük rüzgar hızlarında çalışmakta olup boyları kısadır. Generatörler ve dişli kutuları zemine konumlandırıldığından bakımları kolaydır. Dikey eksenli rüzgar türbinleri, Darrieus ve Savonius tipi rüzgar türbinleri olmak üzere iki çok bilinen modele sahiptirler. Darrieus rüzgar türbinleri yapısı dikey yerleştirilmiş düz ya da kavisli iki veya üç kanatlardan oluşmaktadır [45]. Özel kanat yapıları sayesinde yüksek rüzgar hızlarında çalışabilen Darrieus rüzgar türbinleri başlatma kuvvetini rüzgar harici başka bir kaynaktan almak zorundadır [44]. Savonius rüzgar türbinleri dikey mil üzerine yerleştirilmiş iki veya üç adet kepçe yapısına benzeyen kanatçıklardan oluşmaktadır. Savonius rüzgar türbinleri, Darrieus rüzgar türbinlerinin aksine kanat profilleri sayesinde düşük rüzgar hızlarında kendiliğinden hareket sağlayabilmektedirler. Ancak kanat yapıları mile uygulanan torkun düşük kalmasına neden olmakta bu durum türbin performansını düşürmektedir [46].

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde ise kanatlar rüzgar yönüne dik olarak dönmektedirler. Bu türbinlerde kanat sayısı azaldıkça, rotor dönüş hızı artmaktadır. Modern rüzgar türbinleri üç kanatlı ve kendinden başlatma özelliği bulunmakta olup dikey eksenli türbinlere göre yüksek kule yapılarına sahiptirler [44]. Rotoru rüzgar yönüne doğru çeviren konum ayarlayıcı mekanizma bulunmakta olup kanatlar için aerodinamik yükleri azaltma, hız ve çıkış gücünü düzenleyici kanat hatve sistemi bulunmaktadır. Yatay rüzgar türbinleri hızlarına göre sabit devirli ve değişken devirli olarak sınıflandırılabilir. Sabit devirli tasarımlarda sadece nominal çalışma devrinde iyi performans sağlamakta olup, değişken devirli türbinlerde geniş bir devir aralığında makine yüksek verimde çalışabilmektedir. Değişken devirli rüzgar türbinleri düşük rüzgar hızlarında bile azami güç sağlamakta olup, düzensiz rüzgar hızı karakteristiğine daha uygundur. Şekil 1.6'da yatay eksenli rüzgar türbini ve dikey eksenli rüzgar türbin modellerinin gösterimi yer almaktadır [47].



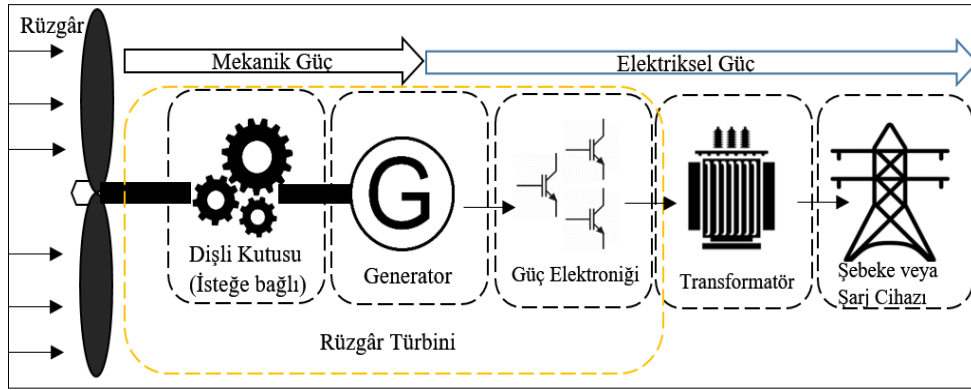
Şekil 2.2: YERT modeli (a), DERT modeli (b) [47].

Rüzgar türbinleri güç ihtiyaçlarına yönelik farklı rotor çaplarında tasarlandıkları için kule boyları da değişiklik göstermekte olup yüksek, orta, düşük ölçekli türbinler olarak sınıflandırılmaktadır. Türbin gücü 10-500 kW arasında küçük ölçekli, 500 kW-3 MW arasında orta ölçekli ve 3 MW ve üstü güçteki rüzgar türbinleri büyük ölçekli rüzgar türbini olarak adlandırılmaktadır [45].

Ayrıca rüzgar türbinleri kanat sayılarına göre tek kanat, çift kanat, üç kanat ve çok kanatlı olarak da sınıflandırılmaktadırlar. Başka bir sınıflandırma kriteri olarak generatörlerin nominal devir hızları kullanılmaktadır. Generatörler nominal devrine göre yüksek devir ve düşük devirli olarak ikiye ayrılmakta olup, rüzgar türbininde kullanılan generatörün anma devri yüksek tasarlanmış ise dişli kutusunun kullanılması gerekebilmektedir.

Türbinlerde dişli kutusu varlığı da bir diğer sınıflandırma kriteri olarak kabul edilmektedir. Dişli kutusuna ihtiyaç duyulmayan, doğrudan sürürlü, düşük devirli generatörlü türbin yapıları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrudan sürürlü olarak adlandırılan bu türbin yapılarında, türbin rotorunun hızıyla dönen tek mil bulunmakta olup doğrudan generatör rotoruna entegre olarak kullanılmaktadır [44].

Özetle rüzgar türbini uygulamalarında verimli bir yöntem kullanımı ile rüzgar enerjisinden sağlanan mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi hedeflenir. Tasarım ihtiyaçlarına göre farklı generatör hızları ve farklı generatör çıkış gerilimleri tercih edilmektedir. Ortak görüş olarak kabul gören özel bir generatör teknolojisi bulunmamaktadır. Kullanılan generatör teknolojilerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Uygulama alanlarına göre yaygın olarak kullanılan üç ana tipte rüzgar generatörü bulunmaktadır. Bu generatörler; doğru akım generatörü, alternatif akım senkron ve alternatif akım asenkron generatörlerdir. Bu generatör tipleri prensip olarak her biri değişken veya sabit hızlarda çalıştırılabilmektedirler. Rüzgar enerjisinin doğası gereği değişken yapıda olması, değişken hızlara adapte generatör ihtiyacı oluşturmuştur. Aksi halde sabit devir generatörlerinin kullanıldığı sistemlerin; dönen ve güç aktarımı yapan ekipmanlarının üzerinde yüksek fiziksel gerilmeler görülmektedir. Bu nedenle rüzgar türbini alt ekipmanlarının üzerine düşen gerilmeleri azaltmak, aerodinamik verimi arttırmak ve kalıcı olmayan tork davranışlarının etkilediği sistem kararlılığını korumak için rüzgar türbinlerini değişken devirlerde çalıştırmak gerekmektedir [48]. Rüzgar türbin sistemlerine ait genel bir blok şeması Şekil 2.3'te yer almaktadır.

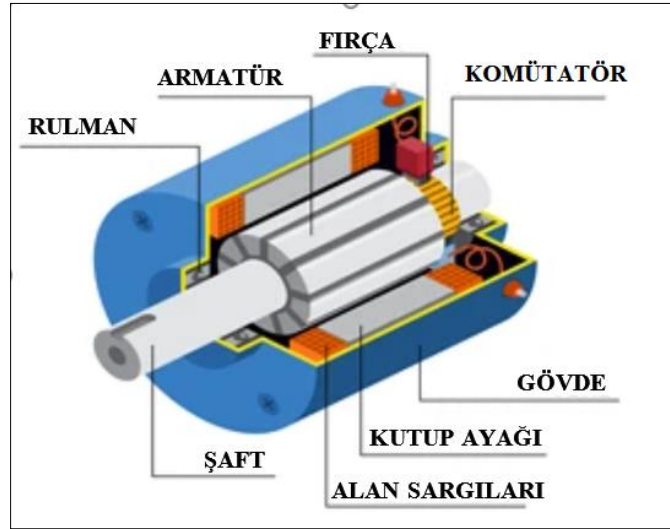


Şekil 2.3: Rüzgar türbin sistemlerinin genel blok şeması.

Burada mekanik enerji kaynağı rüzgar, türbin kanatlarını hareket ettirerek döner hareketi mil sayesinde eğer varsa dişli kutusuna aktarmaktadır. Generatör ise mekanik gücü elektriksel güce dönüştürerek güç elektroniği elemanları yardımıyla gerilim ve akım seviyelerini düzenlemektedir. Elektriksel güç son olarak transformator yardımıyla şarj cihazı veya şebekeye uygun hale getirilmektedir.

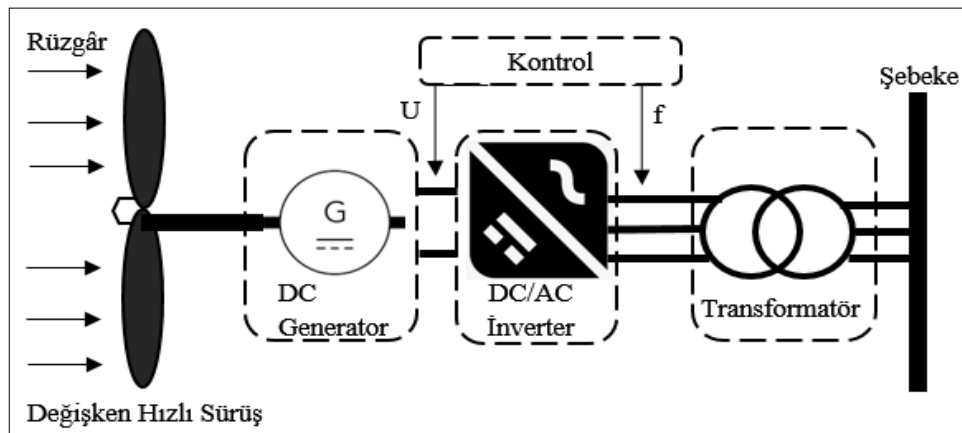
2.3 DC Generatör Teknolojisi

Geçmişte endüstri uygulamalarında kullanımı yaygın olan DC generatörlerin yapı itibariyle alan sargıları statorda, armatür yapıları rotorda bulunmaktadır. Üretilen alternatif akım, komütatör adı verilen yapı aracılığı ile doğru akıma dönüştürülmektedir. Fırça adı verilen diğer mekanik yapı ile de doğru akım dış devreye aktarılmaktadır. Şekil 2.4'te basit bir DC generatör modeli yer almaktadır.



Şekil 2.4: DC generatör modeli [49].

DC generatörler hız kontrol kabiliyetinin yüksek olması nedeniyle nadirde olsa düşük güçlü rüzgar türbini uygulamalarında kullanılmaktadır [50]. Şekil 2.5'te rüzgar türbini uygulamasında kullanılan örnek bir DC generatör blok şeması yer almaktadır.



Şekil 2.5: DC generatör blok şeması [48].

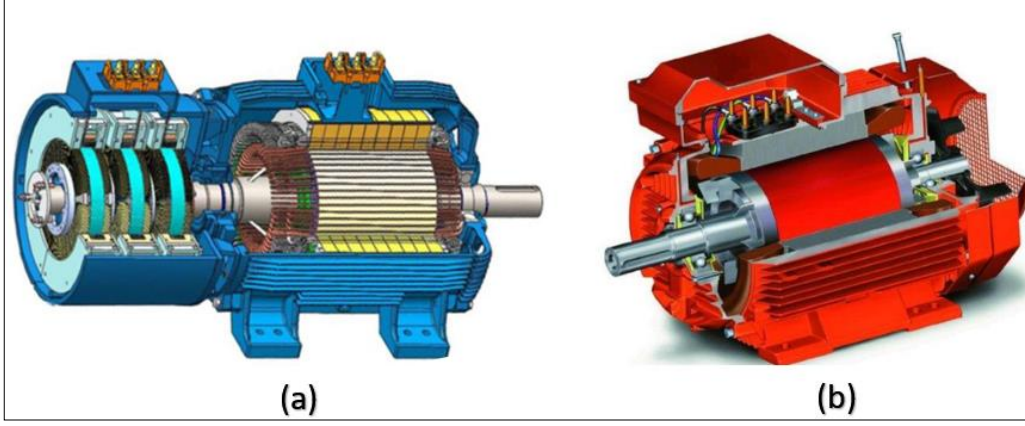
DC generatör çıkışında doğru akımı alternatif akıma dönüştüren bir çevirici ile aynı zamanda gerilim ve frekans kontrolü yapmaktadır. Transformator sayesinde gerilimi ayarlanan sistem şebekeye bağlantısı sağlanmaktadır [51]. Günümüzde gelişmeye devam eden yarı iletken teknolojisinin de etkisiyle düşük güçlü uygulamalar harici pek tercih edilmeyen DC generatörlerin yerini senkron ve asenkron generatörler almıştır [48].

2.4 Asenkron Generatör Teknolojisi

Asenkron makineler yapıları itibariyle stator oyuklarında üç fazlı sargı grubu fiziksel olarak dağıtılmış durumdadır. Bu sargılardan akım geçişi sağlanır ise dönen bir manyetik alan oluşmaktadır. Bir asenkron makinanın ana çalışma prensibi burada yatmaktadır [52]. Devamında rotor sarımlarında gerilim indükleyerek buradan bir akım akışı sağlanır ise rotorun etrafında da dönen bir manyetik alan oluşacak ve stator manyetik alanıyla etkileşime girerek etkileşim torku meydana gelecektir. Bu etki sonucunda rulman üzerine montajlanan rotorda dönme eylemi gerçekleşmektedir. Statorda oluşturulan dönen manyetik alanın hızı senkron hız olarak kabul edilir. Rotor dönme hızı senkron hızdan daha yavaştır ve bu iki hız arasındaki fark kayma olarak adlandırılır. Asenkron makinanın bu şekilde çalışmasına motor çalışma prensibi denilmektedir. Rotor, bu çalışma biçiminde doğası gereği senkron hızdan daha hızlı dönmemektedir. Eğer generatörün rotoru bir rüzgar türbinine bağlanıp senkron hızdan daha yüksek hızda döndürülürse rotorda ki akım yönü ve moment yönü ters dönecek ve makine generatör prensibinde çalışmaya başlayacaktır. Türbinden uygulanan mekanik gücü elektriksel güce çevirerek statora bağlanan yükü besleyebilecektir.

Asenkron generatörler mıknatıslanmaları için ihtiyaç duyduğu reaktif gücün bir şebeke veya harici bir kaynaktan sağlaması gerekmektedir. Şebekeye bağlı çalışma durumunda reaktif güç ihtiyacını şebekeden karşılayan generatör şebekeye aktif güç sağlamaktadır. Şebekenin bulunmadığı alternatif uygulamalarda ise generatörün mıknatıslanma için ihtiyaç duyduğu reaktif güç ihtiyacı kondansatörlerden karşılanmaktadır [52].

Rüzgar türbini uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen asenkron generatör teknolojisi başlıca, çift beslemeli asenkron generatörler ve sincap kafesli asenkron generatörler olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.6'da çift beslemeli asenkron generatör modeli ve sincap kafesli asenkron generatör modeli yer almaktadır.



Şekil 2.6: ÇBAG modeli (a), SKAG modeli (b) [53,54].

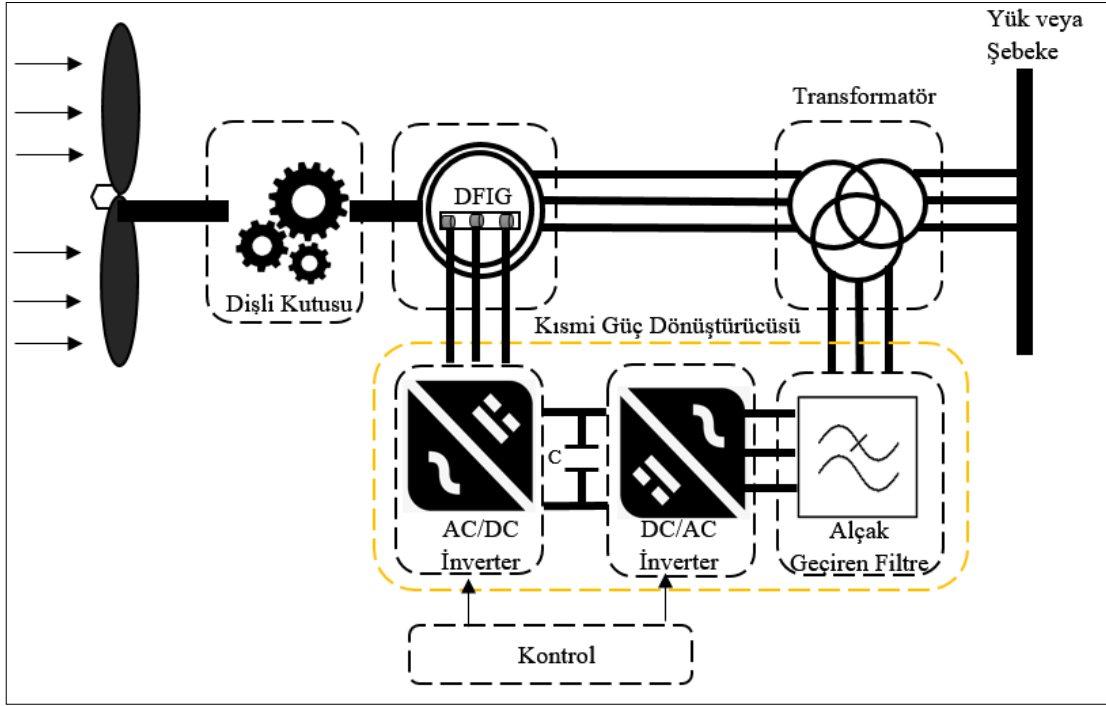
2.4.1 Çift Beslemeli Asenkron Generatörler

Çift devirli asenkron generatörler aynı zamanda rotoru alan sargılı generatörler olarak bilinmektedir. Bu generatörlerin statorları doğrudan şebekeye bağlı iken rotorları bilezik sistemiyle yan yana bağlanmış AC/DC/AC dönüştürücü sistemiyle şebekeye bağlantısı yapılmaktadır. Dönüştürücü sisteminin ortasında yer alan kondansatör yapısı DC bağlantı gerilimini kontrol etmektedir. Bu şekilde şebekeye iki farklı bağlantısı olan sistem çift beslemeli asenkron generatör olarak isimlendirilmektedir. Kaskad bağlı dönüştürücü sisteminde rotora yakın olan AC/DC dönüştürücü stator çıkışında üretilen aktif ve reaktif gücü kontrol etmektedir [55]. Şebeke tarafına yakın olan dönüştürücü ise DC bağlantı kısmını regüle etmektedir [51].

Çift beslemeli generatörün kullanıldığı rüzgar türbinlerinde rotor devri kanat hareketleri ve dönüştürücüler yardımıyla kontrol edilmektedir. Bu özelliği sayesinde değişken rüzgar hızı koşullarına adapte olarak enerji üretebilmektedirler. Ayrıca rotor alanı için gerekli olan güç makine nominal gücünün %25-%30'u arasındadır. Bu durum kullanılan dönüştürücülerin daha küçük seçilmesi gibi bir avantaj oluşturmaktadır. Fakat rotorun dönüştürücü bağlantısının gerçekleştirildiği bilezik yapısı genel sistem verimini düşürmekte olup, kaskad olarak kullanılan dönüştürücü sistemi ve dişli kutusu da hesaba katıldığında periyodik bakım gerektiren ve birden çok arıza noktalı sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır [55, 56].

Çift devirli senkron generatör sisteminde dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca kaskad bağlanmış dönüştürücü sistemi, DC hat kondansatörü ve bu sisteme seri bağlanan

alçak geçiren filtre yapısı kısmi güç dönüştürücüsü olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.7’de çift devirli asenkron generatör sisteminin blok şeması yer almaktadır.



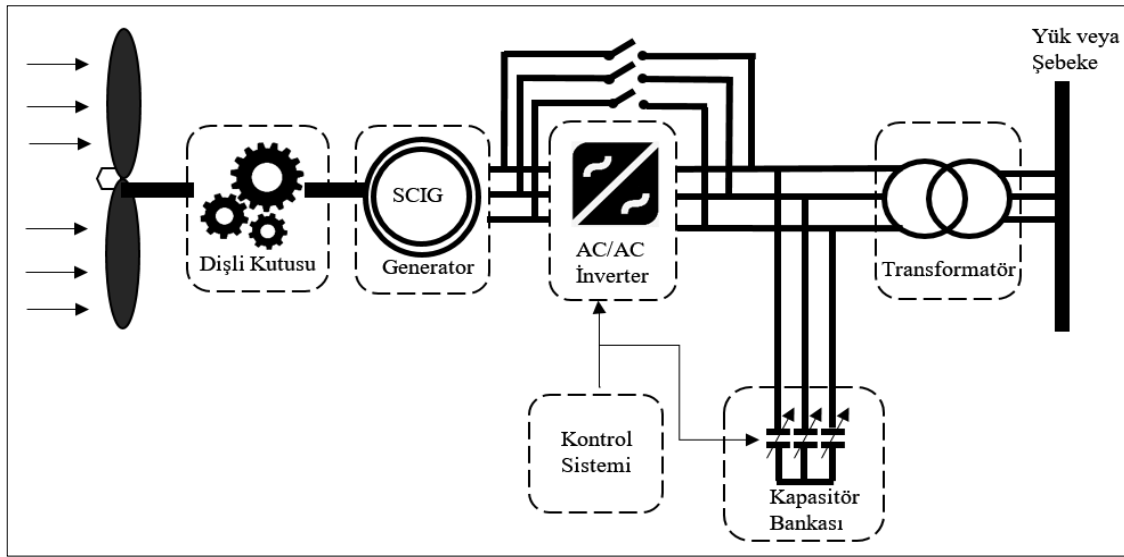
Şekil 2.7: Çift beslemeli asenkron generatör blok şeması [56].

2.4.2 Sincap Kafesli Asenkron Generatörler

Sincap kafesli asenkron generatörlerin rotor yapısı tel sargılar yerine alüminyum kafesten oluşur ve silisli saçların özel kalıplarla işlenerek çevrelerine oyuklar açılmaktadır. Bu oyuklara alüminyum çubuklar geçirilerek çubuk demetlerin sonları yine alüminyum halkalarla kısa devre edilmektedir. Generatör görsel olarak sincap kafesi yapısına benzediği için adını buradan almıştır. Kısa devre çubukları mile paralel gitmeyip belirli bir açıyla montajı yapılmaktadır. Bu kavisli çubuklar kalkınma torkunu artırarak manyetik gürültüyü minimum seviyeye indirmektedir. Bunun yanı sıra kısa devre halkaları oluşturulurken arka kısımlarına alüminyum döküm yapılarak kanatçıklar eklenmekte bu kanatçıklarda soğutma işlemini üstlenmektedir. Endüstride sıkça tercih edilen bu makine tipinin rotorunda sarım olmaması üretim kolaylığı sağlamakta olup fırça yapısı bulundurmadığı için güvenilir ve ekonomik bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Fakat sıcaklık, reaktif güç ihtiyacı ve rüzgar hızındaki değişimlerden etkilenmeleri en büyük dezavantajlarıdır [52, 57].

Sincap kafesli asenkron generatörler rotor hızının sabit olduğu durumlarda mantıklı bir çözüm olmaktadır. Bu nedenle rüzgar türbinlerinin kanat açlarına kontrol eden sistemler kullanılmaktadır. Kanat açıları mekanik gücü düzenleyerek elektriksel güce eşitlemeye çalışmaktadır. Rüzgar enerjisi mekanik enerji olarak statorda elektrik enerjisine dönüştürülmekte olup şebekeyi beslemektedir. Burada önemli nokta sistemin generatör olarak çalışabilmesi için rotor hızının senkron hızdan bir miktar yüksek olmasıdır. Rüzgar hızının düşük olduğu koşullarda kanatlar maksimum gücü verecek şekilde, yüksek hızlarda nominal gücü sağlayacak şekilde kontrol edilmektedir [58].

Şekil 2.8’de sincap kafesli asenkron generatörün blok şeması yer almaktadır. Burada asenkron makinanın reaktif güç ihtiyacı kapasitör bankasıyla kompanse edilmektedir. AC/AC dönüştürücüsü sisteme yumuşak bir başlangıç sağladığı gibi sistemin devir kontrol yeteneğini arttırmaktadır [59].



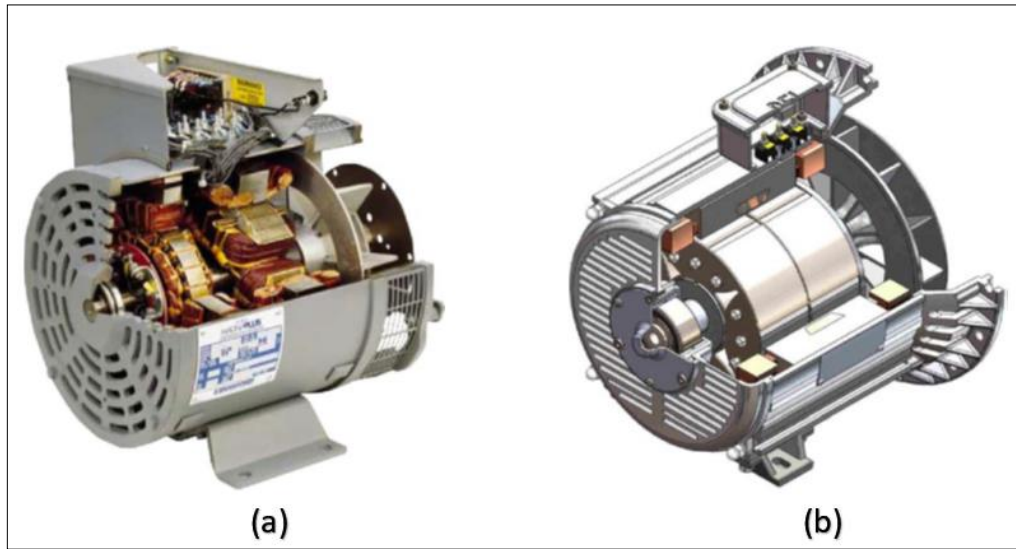
Şekil 2.8: Sincap kafesli asenkron generatör blok şeması [59].

2.5 Senkron Generatör Teknolojisi

Rüzgar türbin sistemlerinin geliştirilmesi aşamalarında ilk zamanlardan bu yana üç fazlı senkron makinelerin kullanılması için büyük çabalar sarf edilmiştir. Senkron generatörler genelde üç fazlı sargıların bulunduğu stator ve manyetik alanın oluşturulduğu rotordan meydana gelmektedir. Senkron generatörler ismini statordan akan akımın oluşturduğu dönen elektromanyetik alanın hızı ile rotorun oluşturduğu manyetik alan hızının aynı olması

presibinden almıştır. Rüzgar türbini tarafından tahrik edilen rotorun, oluşturulan sabit manyetik alanın stator sargılarını farklı açılarda kesmesi sonucunda gerilim indüklenir. Senkron generatörler sabit hızlarda çalıştırılmalıdır aksi halde generatörün senkronizasyonu kaybolacaktır [60].

Rotorda oluşturulan elektromanyetik alan, sargılardan akan doğru akımla oluşturuluyorsa alan sargılı senkron generatör (ASSG), sabit mıknatıslar tarafından sağlanıyorsa sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) olarak isimlendirilmektedir. Şekil 2.9’da alan sargılı senkron generatör resmi ve sabit mıknatıslı senkron generatör modeli yer almaktadır.



Şekil 2.9: ASSG (a), SMSG (b) [61].

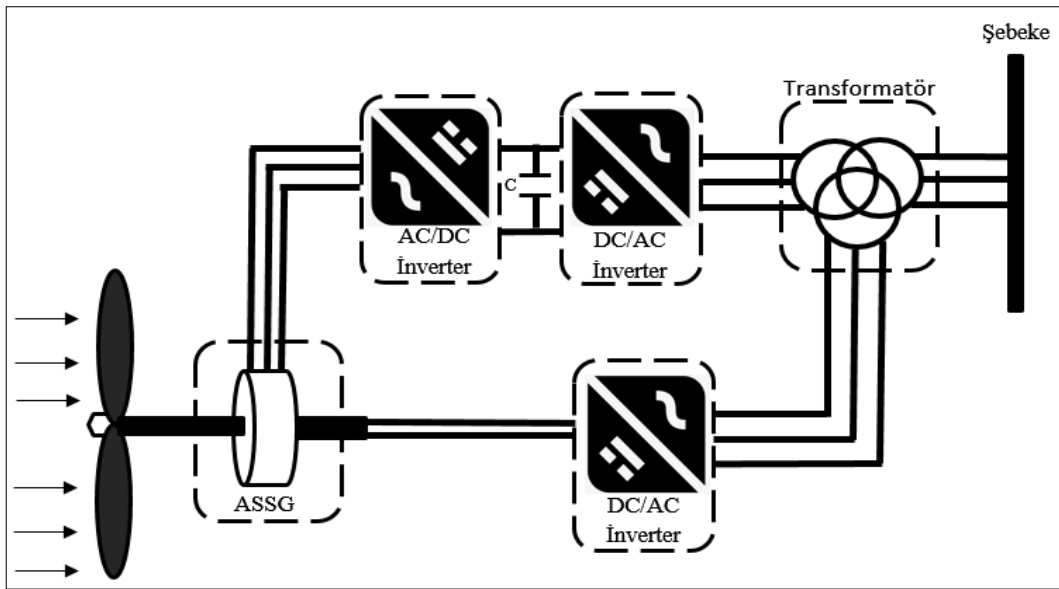
2.5.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler

Rotoru tel sargılardan oluşan bu generatör tipinde sabit manyetik alan bir DC kaynak tarafından oluşturulmaktadır. Bu uyartım harici bir dış devreden sağlanabildiği gibi kendinden uyartımlı sistemler de mevcuttur. Kendinden uyartımlı sistemlerde mil üzerine monte edilmiş uyartım rotor ve statoru ayrıca mil üzerinde diyotlu doğrultucu sistemi bulunmaktadır. Çoğunlukla şebeke bağlantılı olarak kullanılan rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde rotorun ihtiyaç duyduğu uyartım akımı şebekeden sağlanmaktadır. ASSG'nin en büyük avantajı uyartım akımıyla makinanın güç faktörüne müdahale edebilme kabiliyetidir. Asenkron makinalara göre kutup açıları daha dik olduğu için dişli kutusu

ihtiyacı bulunmamaktadır. Ayrıca ASSG'ler düşük hızlı uygulamalarda frekansı uygun seviyede tutmak için genellikle yüksek kutuplu yapıda tasarlanmaktadır [62].

Senkron generatörlerin mekanik sönümlenme kabiliyetlerini artırmak için güç aktarma elemanlarına esnek kaplinler ve yaylar eklenebilmektedir. Ayrıca rüzgar türbini uygulamalarında bu generatörler bileşenlerinin doğal rezonansı ve rastgele rüzgar hızı dalgalanmalarından kaynaklanan bozucu etkiler doğrudan şebekeye iletilmektedir. Güç şebekesine bağlantısı gerçekleştirilen generatörün frekansını şebeke frekansına senkronlamak için uygun güç dönüştürücüsü seçilmelidir [63].

Şekil 2.10'da ASSG blok şeması yer almaktadır. Stator çıkışında kaskad bağlanmış dört bölgeyi iki dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlantısı gerçekleştirilmiştir.



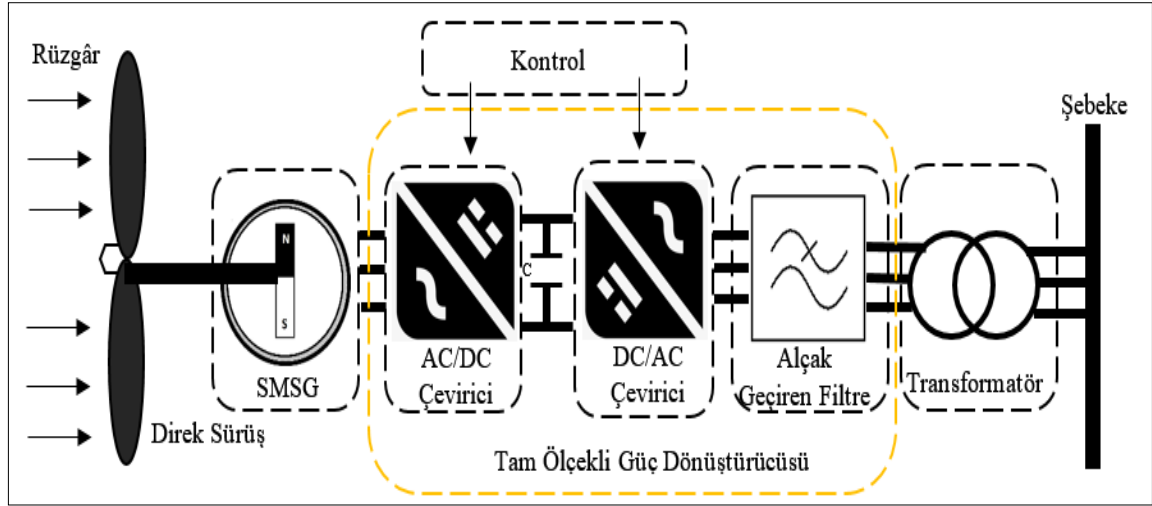
Şekil 2.10: Alan sargılı senkron generatör blok şeması [55].

Şemada dönüştürücü sisteminin ortasında yer alan kondansatör yapısı DC bağlantı gerilimini kontrol etmektedir. Statora yakın olan AC/DC dönüştürücü elektromanyetik moment kontrolünü gerçekleştirmektedir. Diğer dönüştürücü ise generatörün şebekeye sağladığı aktif ve reaktif gücü düzenlemektedir. Rotor bağlantısı bulunan dönüştürücü ise rotor sargılarında oluşturulan elektromanyetik alanı düzenlemekte olup aynı zamanda sistemin reaktif güç ihtiyacını dolayısıyla güç faktörü düzenlemesini yapmaktadır.

2.5.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler

Sabit mıknatıslı generatörlerde ihtiyaç duyulan manyetik alanı sağlamak için güçlü manyetik özelliğe sahip mıknatıs teknolojisi kullanılmaktadır. Bu mıknatıslar güçlü nadir toprak mıknatısları olarak adlandırılmakta olup, generatör rotorundaki manyetik alan kaynağı bu sabit mıknatıslardır. Rotor dönmeye başladığında manyetik alan statorda bulunan bobinleri farklı açılarda kesmekte ve bu bobinlerde bir gerilim indüklenmektedir. Stator bobinleri makinanın sabit kısmında bulunduğu için elektriksel güç dış devreye kolayca aktarılmakta fırça ve kayan bilezik yapılarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca sabit mıknatıslı senkron generatör kullanıcısının önemli bir avantajı SMSG'nin harici bir uyartım sistemine ihtiyaç duymayan sade bir yapıda olmasıdır. SMSG'ler çok az bakım gerektirmekte ve arıza durumuna düşmesi çok az görülmektedir [64]. SMSG teknolojisi yakın geçmişte yaygın olarak aküleri şarj etmek için kullanılan küçük güçlü generatörlerle birlikte kullanılmaktaydı. Fakat günümüzde ise SMSG teknolojisi deniz türbinleri gibi büyük güçlü uygulamalardan, çeşitli boylardaki kara tipi rüzgâr türbin uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır [65].

Şekil 2.11'de sabit mıknatıslı senkron generatör blok şeması yer almaktadır. Burada görüldüğü gibi generatör iki adet yan yana bağlanmış dönüştürücü ile şebekeden yalıtılmış durumdadır. Türbin gücünün tamamı bu elektronik devreyi takip ederek şebekeye iletilmektedir. Şebeke tarafına yakın olan dönüştürücü DC hat gerilimini kontrol ederken generatöre yakın olan ise generatörün aktif ve reaktif güç çıkışını düzenlemektedir. Elektronik devre SMSG ile şebeke arasında yalıtım görevi gördüğü için şebeke için bozucu etkileri çok düşük seviyelerdedir. Ayrıca elektronik güç devresinden alınan değerler ışığında türbin devri mekanik olarak kontrol edilerek rüzgar hızı dalgalanmalarından dolayı yaşanacak etkiler azaltılmaktadır. Elektronik güç devresinde görülen alçak geçiren filtre ve transformatör şebekeye verilen enerji kalitesini iyileştirmektedir [66]. Blok şemada görüldüğü gibi SMSG doğrudan tahrik edilmiştir. Sabit mıknatıslı türbinlerde dişli kutusu kullanımı ihtiyaca bağlı olup dişli kutusu olmayan sistemler oldukça yaygındır. Bu durum sistem mekanik dayanımını artırmakta, maliyeti aşağıya çekmekte ve bakım sürelerini de uzatmaktadır [67].



Şekil 2.11: Sabit mıknatıslı senkron generatör blok şeması [55].

Tablo 2.1’de çalışma yapısı yukarıda aktarılan ve rüzgar türbini uygulamalarında yaygın kullanılan beş generatör teknolojisinin karşılaştırma tablosu verilmiştir.

Tablo 2.1: Generatör teknolojilerinin karşılaştırma tablosu [68].

Açıklama	DCG	SKAG	ÇBAG	ASSG	SMSG
Generatör Yapısı İç Görünüş					
Avantaj	Frekans kontrolü gerektirmez	Basit ve ucuz tasarım	Çıkış gerilim frekansı kontrollüdür	Çıkış gerilim frekansı kontrollüdür	Basit tasarım. Harici uyartım gerektirmez
Dezavantaj	Fırça ve komütatör yapısı periyodik bakım gerektirir. Arıza kaynağı olabilirler	Frekans kontrol edilememektedir	Alan uyartımı için şebeke gerilimi gerekmektedir	Harici uyartım gerekmektedir. Fırça ve bilezik yapısı ihtiyacı dış uyartım tipinde gerekmektedir	Mıknatıslar basit tasarımlara göre daha maliyetlidir
Frekans Kontrolü	Çıkış gerilimi DC olduğu için kontrol gerektirmez	Kontrol edilmiyor	Sabit frekanslı alan uyartımıyla sağlanmakta	Senkron hızda çıkış geriliminin frekansı kontrol edilmektedir	Değişken hızlı uygulamalarda frekans kontrolü harici güç elektroniği devreleriyle sağlanıyor

Tablo 2.1 (devam)

Açıklama	DCG	SKAG	ÇBAG	ASSG	SMSG
Rotor Hızı	Değişken	Değişken	Değişken	Sabit	Değişken
Fırça veya Komütatör İhtiyacı	Var	Yok	Var	Harici uyarım tipinde gerekmektedir	Yok
Dış Gerilim Uyarım İhtiyacı	Yok	Yok	Var	Var	Yok

Gelişen güç elektroniği sistemleri ve artan mıknatıs teknolojileri göz önüne alındığında rüzgar türbin teknolojilerinde sabit mıknatıslı generatör tercihi parlak bir çözüm olarak kabul edilebilmektedir. Ayrıca generatörün harici uyarım gerektirmemesi dolayısıyla fırça ve bilezik yapısına gereksinim duyulmaması, periyodik bakım maliyetlerini düşürmekte ve arıza durumlarını minimum düzeyde tutmaktadır. Aynı şekilde SMSG'nin doğrudan sürüştü yapıya elverişli olması dişli kutusu ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Sabit devirli uygulamalarda seçilen senkron hızda yüksek verimde çalışabildiği gibi ihtiyaç durumuna göre seçilen güç elektroniği devreleriyle kolaylıkla değişken devir aralıklarına da adapte olabilmektedir.

2.6 Tezin Özgün Değeri ve Amacı

Yıllardır geleneksel yöntemlerle karşılamakta olduğumuz enerji ihtiyacımız yerini, artan teknoloji ve malzeme bilimi sayesinde sürdürülebilir, ekolojik ve ekonomik yöntemlere bırakmaya başlamıştır. Enerji ihtiyaçlarımızın karşılanması konusunda güçlü bir çözüm niteliğinde olan rüzgar türbinleri, dünyamız üzerinde yüksek enerji potansiyelinin barınması ve tükenmeyen bir kaynak özelliğinde olması, rüzgar türbin sistemlerinin yaygınlaşmasına ve sürekli olarak gelişimin sağlanmasına ortam hazırlamıştır.

Bu tezin amacı; doğrudan sürüştü rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere düşük devirli ve sabit mıknatıslı (SM) yapıda 1 MW gücünde senkron generatörün tasarımının gerçekleştirilmesidir. SM yapı sayesinde gerek elektrik gerekse mekanik kayıpların düşük tutulması ve bu sayede yüksek verimli bir generatör modelinin oluşturulması hedeflenmiştir. Dişli kutusu gerektirmeyen bu tasarım periyodik bakım zamanlarının seyrek tutulmasını sağlayarak dişli kutulu generatör yapılarına göre daha kararlı ve sade bir tasarımı mümkün kılınacaktır. Bununla birlikte sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) yapısının tercih edilmesi, değişken devirlerde yüksek verimlerin elde edilmesine ve doğrudan sürüştü rüzgar

türbininin gün içinde geleneksel dişli kutulu olarak kullanılan türbin generatörlerinden daha fazla devrede kalmasına ve daha çok enerji üretilmesine imkan sağlayacaktır.

Çalışmada hedeflenen bir diğer husus ise SMSG tasarım hesabını ve analiz adımlarını detaylı şekilde ortaya koyarak, yapılacak benzer çalışmalara kılavuz niteliği taşımaktır. Literatürde SMSG tasarımıyla ilgili çalışmalar mevcut olmakla beraber yüksek güçte doğrudan sürürlü generatör çalışmaları sınırlı sayıda bulunmaktadır. Bu çalışma ile birlikte yüksek güçlü türbin devrinde dönen generatör modelinin güç, verim, hat voltajı ve elektromanyetik karakteristiği ele alınacaktır.

Tasarım çalışmasında öncelikle hedef tasarım için başlangıç verileri belirlenecek ardından analitik hesaplamalar yardımıyla generatörün ana boyutlarının kestirimi yapılacaktır. Ön tasarıma hazır hale gelen model, analiz programı yardımıyla tekrar matematiksel modele uygunluğu test edilecektir. Gerekli düzenlemelerin ardından program yardımıyla 2B ve 3B tasarım modellenecek sonrasında sonlu elemanlar analiz yöntemiyle generatörün gerçeğe yakın davranışı elde edilecektir.

3. MATERYAL YÖNTEM

Sabit mıknatıslı generatör tasarımı için izlenen tasarım adımları ve yapılan işlemler temel olarak analitik tasarım metodu ve ardından Maxwell yazılımında sonlu elemanlar metodu olarak iki adımdan oluşmaktadır.

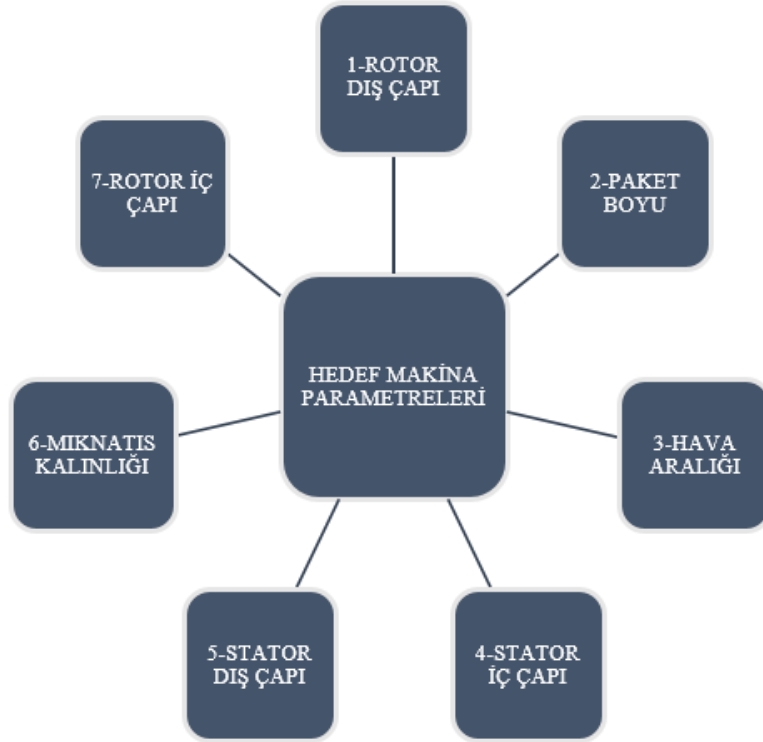
Analitik tasarım adımlarında, ilk olarak ihtiyaç duyulan elektriksel güç, makina verimi, gerilim, akım, makina türü vb. parametreler belirlenmiş ardından bu parametreler sonucunda elde edilen hesaplamalar kullanılarak makina boyutları yaklaşık olarak belirlenmiştir.

Maxwell yazılımının kullanıldığı sonlu elemanlar metoduna geçiş hazırlığında ise analitik tasarımdan elde edilen veriler yazılım içerisinde bulunan RMXprt modulünün kullanımı ile değerlendirilmiş ve bir ön tasarım bilgisi oluşturulmuştur. Bu doğrultuda ihtiyaç duyulan düzeltmeler (örnek olarak sarım sayısı, oyuk boyutları gibi) uygulanarak yazılımda 2B generatör modeli oluşturulmuş ve manyetik haritaların incelenmesi yapılmıştır.

Son olarak da oluşturulan 2B tasarımdan 3B tasarıma geçilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ağ yapısı (mesh) oluşturulmuş model üzerinde hesaplamalar yine Maxwell yazılımı aracılığı ile yapılmıştır. Nihai olarak kullanılan model üzerinde yapılan hesaplamalar doğrultusunda gerçek değere yakın olarak elde edilen tasarım çıktılarına ait 3B analizler, bu analizlere ait grafikler ve manyetik alan haritaları incelenerek harmonik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

3.1 Analitik Yöntem İle Ön Tasarım

Bu çalışmada, sabit mıknatıslı yüzey montajlı içsel rotorlu radyal akıllı üç fazlı senkron generatör yüksek güçlü ve yüksek verimli rüzgar türbin uygulamalarında kullanılmak amacıyla tasarlanmıştır. Analitik tasarımda elde edilmek istenen hedef makine parametreleri rotor dış çapı, paket boyu, hava aralığı, stator iç çapı, stator dış çapı, mıknatıs kalınlığı, rotor iç çapı olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1: Hedef makine parametreleri.

Çalışmaya analitik yöntem ile ön tasarım yapılarak başlanmış olup, işlem akış şeması Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Analitik hesaplama işlemlerine öncelikle güç, devir, frekans, verim, hat gerilimi, kullanılan mıknatıs çeşidi ve demir nüve değeri gibi başlangıç verileri belirlenerek başlanmıştır. Teğetsel gerilmenin belirlenmesinin ardından rotor hacmi ve çapı hesaplanmıştır. Sonrasında makinenin paket boyu belirlenmiş ve hava aralığı parametresi belirlendikten sonra stator iç çapı hesaplanmıştır. Sırasıyla oyuk sayısının seçilmesi, oyuk adımı hesabı ve kutup adım hesabı yapılmıştır. Hava aralığı akı yoğunluğu izin verilen makine parametrelerine göre Tablo 3.5’ten seçilmiştir. Mıknatıs akı yoğunluğu hesabı yapılmış ve ardından mıknatıs tarafından indüklenen gerilim değeri elde edilmiştir. Sargı faktörü hesabı yapılarak uygunluğu kontrol edilmiş ve ardından sarım verilerinin hesabı yapılmıştır. Oyuk dış genişliği hesaplanarak devam eden işlemlerde oyuk boyutlarına ulaşılmıştır. Oyuk dışının ve hava aralığının manyetik gerilmeleri hesaplanarak bu değer yardımıyla stator ve rotor boyunduruk yükseklikleri elde edilmiştir. Sonrasında mıknatıs kalınlığı hesaplanarak stator ve rotor boyutları bulunmuştur.



Şekil 3.2: Analitik tasarım işlem akış şeması.

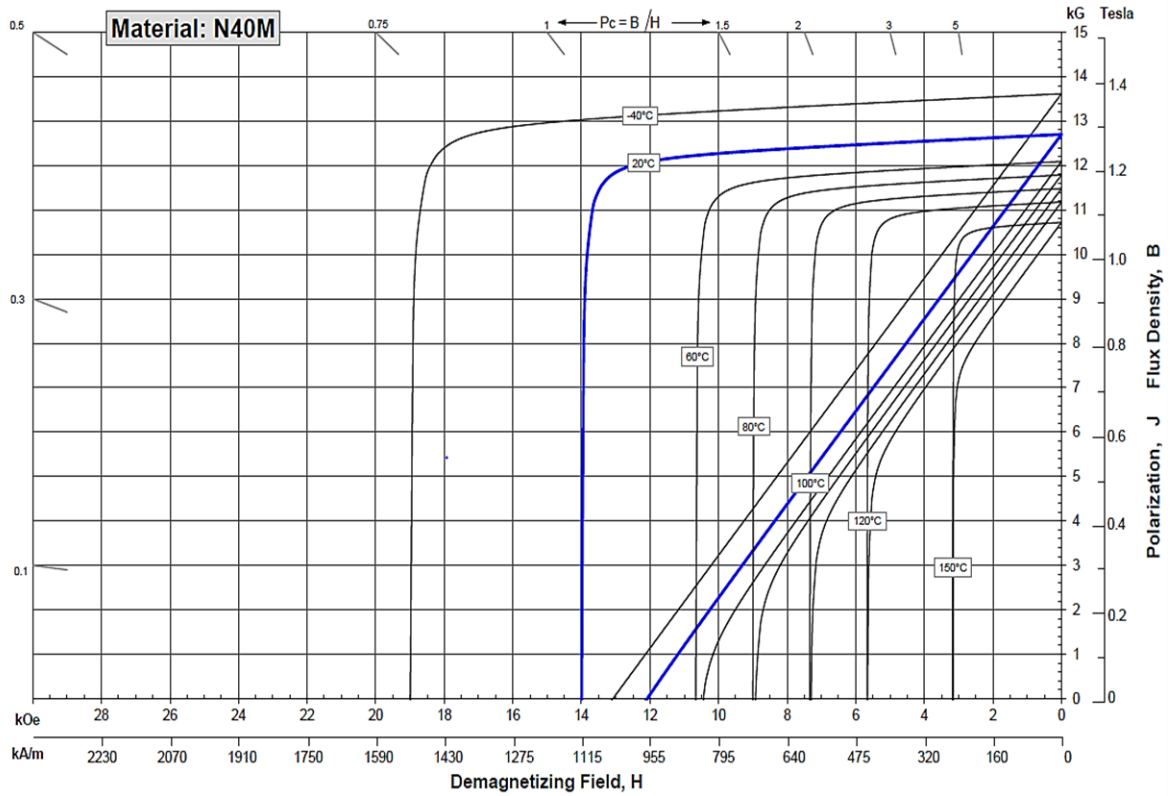
Rüzgar türbinlerinde kullanılan alan sargılı senkron generatör veya asenkron generatörlerin devir aralıkları 700 d/d ile 1800 d/d arasında değişmektedir. Fakat türbinlere ait mil ve kanat hızları incelendiğinde 15 d/d ile 70 d/d arasında olduğu görülmektedir. Bu durum geleneksel generatörleri sürmek için kanat sistemi ile generatör arasında vites kutusu ihtiyacı oluşturmaktadır. Vites kutusu kullanılan sistemlerde güç kaybı, gürültü, maliyet artışı, ve düzenli olarak bakım şartı gibi dezavantajları beraberinde getirmektedir. Alternatif çözüm olarak doğrudan şafta bağlı düşük devirli generatörler tercih edilebilir. Ancak düşük devirli generatörlerin geleneksel generatörlerden daha ağır ve daha büyük olacağı göz önünde bulundurularak, doğrudan sürüslü düşük hızlı generatörlerin tüm avantajlarından faydalanabilmek için aynı zamanda verimi en üst seviyede tutmak adına çok kutuplu yapı, ağırlığı azaltmak adına ise paket boyuna göre daha geniş çap tercih edilip ek olarak mıknatıs geometrisi, sarım sayısı, oyuk şekli gibi bir takım optimizasyon çözümlerini yapmak gerekmektedir [69].

Düşük devirli SM makine tasarımında kutup sayısı seçimi yapılırken sabit kurallar ve sınırlandırmalar bulunmamaktadır. Kutup sayısı ($2p$) belirleme işlemi; mıknatısın manyetik histeresis eğrisi (B-H eğrisi), eşdeğer hava aralığı uzunluğu (δ), birim hacim başına çıkış gücü (kW/m^3), sargı faktörü (k_w) ve makine ağırlığı dahil olmak üzere tüm bu verilerin en uygun şartı sağladığı duruma göre seçim yapılmalıdır [70].

Tüm bu parametreler göz önüne alındığında tasarımı yapılan makinenin devir sayısı direk sürüşe uygun olarak 60 d/d olarak belirlenmiştir. Generatörün kutup sayısı 100 seçilmiş olup, oyuk sayısı 120 olarak ön görülmüştür. Yapılan bu seçim sonucunda makine çıkış frekansının 50 Hz olması sağlanmıştır. Rüzgar türbin generatörü olarak tasarlanan makinenin hat gerilimi, modern rüzgar türbinlerini çoğunda olduğu gibi 690 V olarak belirlenmiştir.

Ayrıca kutup sayısının oluk sayısı oranı $5/6$ olmasına dikkat edilmiş olup bu sayede sargı faktörü değeri düzenlenmiş, böylece sarımlarda indüklenen gerilimin düzgün dağılması hedeflenmiştir. Burada Zhang tarafından çok kutuplu doğrudan sürüslü sabit mıknatıslı senkron generatör için yapılan makine performans incelemesinde $5/6$ kutup sayısının oyuk sayısına oranı korunarak 6 farklı makine için yapılan analiz dikkate alınmıştır [70].

Günümüzde bazı elektrik makinaları, sensör ve hoparlör gibi daha birçok uygulamada ilk tercih olarak nadir toprak elementi mıknatısları kullanılmaktadır. Bu çalışmada yüksek verimlilik, orta maliyet ve enerji yoğunluğu kalitesi ile neodyum-demir-boron (NdFeB) mıknatıs çeşidi olan N40M mıknatıs tipi tercih edilmiştir. Şekil 3.3’de mıknatısın farklı sıcaklık değerlerindeki demanyetizasyon eğrisi yer almaktadır. Seçilen mıknatısın 100°C çalışma sıcaklığına göre artık akı yoğunluğu “Br” 1,16 T, manyetik koersivitesi “Hc” 924 kA/m değerindedir.



Şekil 3.3: Mıknatısın karakteristik eğrisi [71].

Elektrik makina tasarımında önemli parametrelerden biri de, rotor ve stator materyali olarak kullanılacak manyetik çeliğin seçimidir. Kullanılacak manyetik malzemenin uygun olarak nitelendirilebilmesi için bazı özellikleri barındırması gerekmektedir. Çeliğin yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması, manyetik kutuplardan üretilen akının düzgün şekilde kılavuzlanmasını sağlayarak çelik üzerinden akmasını sağlamaktadır. Yüksek manyetik geçirgenlikli çelik, aynı zamanda elektromanyetik indüsiyon prensibine göre ihtiyaç duyulan değişken manyetik alanın, minimum uyarım akımıyla karşılanmasını sağlar. Değişken manyetik alana dik ekseninde görülen, değişen alanın bir sonucu olan eddy akım kayıplarının asgari düzeyde tutulması için çeliğin yüksek elektriksel dirençli seçilmesi gerekmektedir.

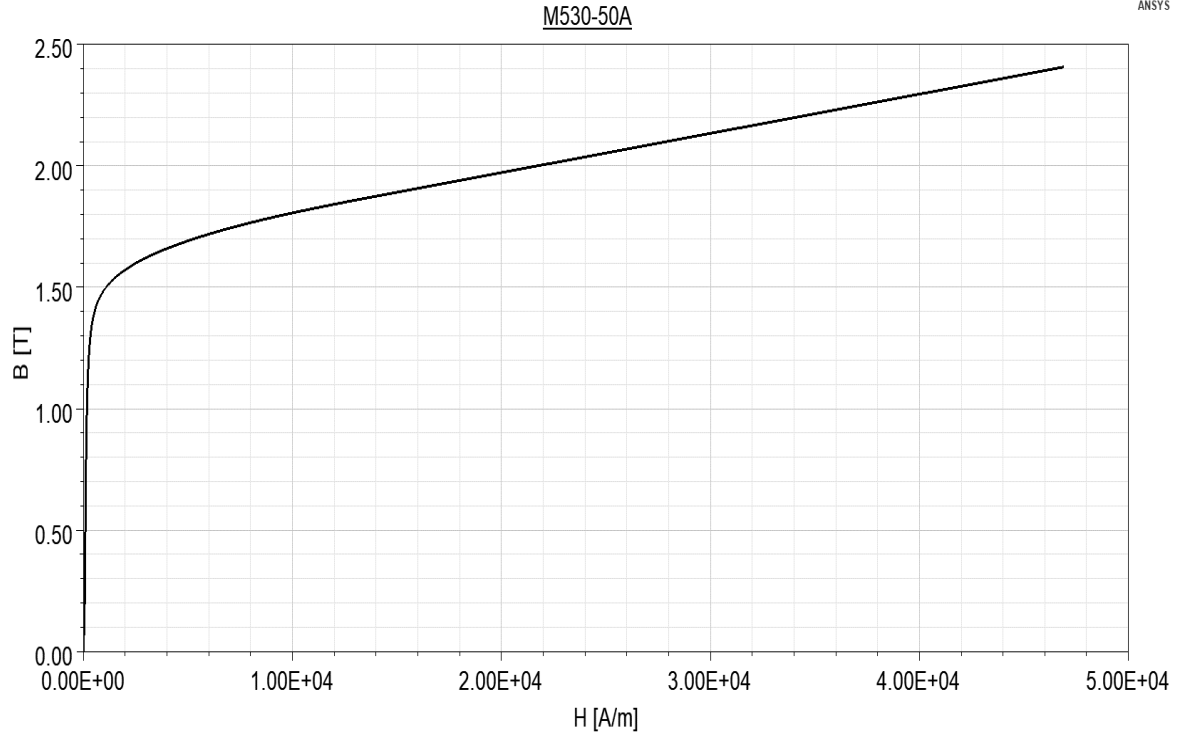
Eddy akımlarının düşürmenin diğer yolu, makine üretiminde çeliklerin laminasyonlu şekilde yapılarak bir taraflarının yalıtılmasıdır. Aynı şekilde değişken manyetik alan kaynaklı oluşan, manyetik malzemede oluşan histeresiz kayıplarını düşürmek için seçilen malzemenin histeresiz eğrisi dar olması gerekmektedir. Seçilen manyetik malzemenin, manyetik iletkenliğinin yüksek ve elektriksel yalıtımının yüksek olması için çeliğin içeriğinde yaklaşık %3 silikon bulunmalıdır [72].

Yukarıda belirtilen özellikler dikkate alınarak bu çalışmada tasarımı yapılan generatörün stator ve rotor saçlarında kullanılmak üzere M530-50A silisli sacı seçilmiştir. Bu malzemenin B-H eğrisini tanımlayan verileri Tablo 3.1’de yer almaktadır.

Tablo 3.1: Manyetik çeliğe ait B-H verisi [73].

Ölçüm Sırası	Bs (mT)	Hs (A/m)
1	100	50,7
2	200	69,4
3	300	81,6
4	400	92,4
5	500	102,9
6	600	113,4
7	700	124,3
8	800	136,9
9	900	153
10	1000	175,4
11	1100	207,5
12	1200	254,9
13	1300	331,7
14	1400	494,6
15	1500	955,4
16	1600	2304,8
17	1700	5091,9
18	1800	9438,9
19	1900	15637

Şekil 3.4’te M530-50A manyetik malzemesinin B-H eğrisi görülmektedir. Burada çeliğin yaklaşık 1,9 T’den sonra lineerlikten çıktığı yani manyetik alan şiddetinin artışıyla akı yoğunluğu artışının çok az olduğu görülmektedir. Yani uygulanan alan şiddetinin manyetik alanı değiştirme kabiliyeti oldukça düşmekte ve makina histerezis kayıpları artarak ısınmaya başlamaktadır. Bu nedenle manyetik akı yoğunluğu 2 T değerini olabildiğince geçmemelidir.



Şekil 3.4: Manyetik çeliğe ait B-H eğrisi.

Kullanılan elektriksel iletken malzemede bir hayli hayati öneme sahiptir. Bilinen maden ve metaller arasında gümüş en iyi iletkenidir. Onu bakır ve alüminyum takip etmektedir. Tablo 3.2’de bu malzemelerin özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.2: Önemli iletken malzemelerin özellik tablosu [73].

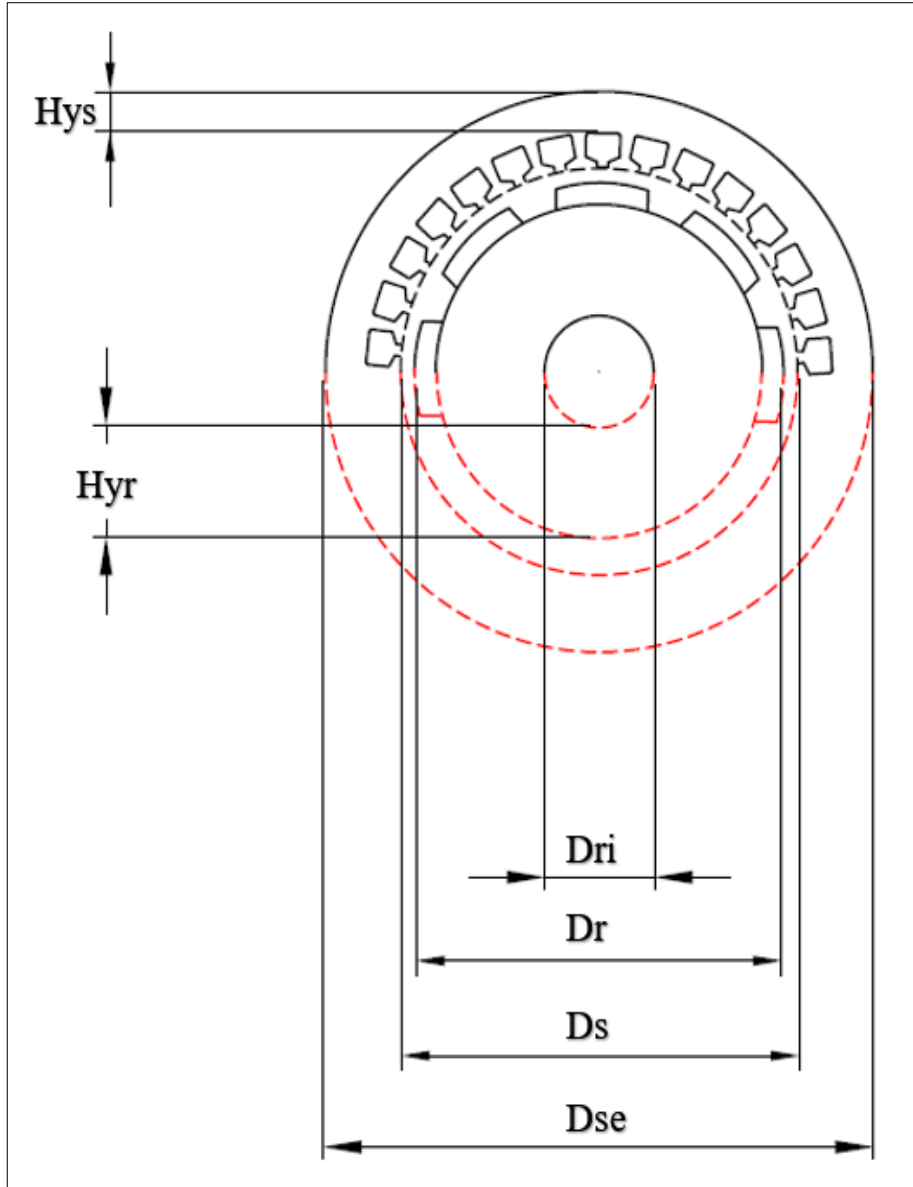
Özellik	Birim	Gümüş	Bakır	Aluminyum
Özdirenç	$\mu\Omega\text{-cm}$	1,46	1,777	2,826
İletkenlik	S	1,0	0,975	0,585
Ergime Isısı	kJ/mol	11,28	13,26	10,71
Maliyet	-	Çok yüksek	Orta	Düşük

Gümüş en iyi iletken olmasına karşın ısıl dayanımı düşük ve maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajları görülmektedir. Başta elektrik makinaları olmak üzere birçok endüstriyel uygulamada iletken malzemesi olarak yüksek ergime ısısı, düşük direnç, yüksek iletkenlik ve ortalama maliyet gibi nedenlerden dolayı bakır tercih edilmektedir. Bu doğrultuda tasarımı yapılan generatörün stator sargılarında da standart bakır tel tercih edilmiştir. Genel olarak tasarlanan makina giriş verileri Tablo 3.3’te özetlenmiştir.

Tablo 3.3: Makine tasarımı için giriş verileri.

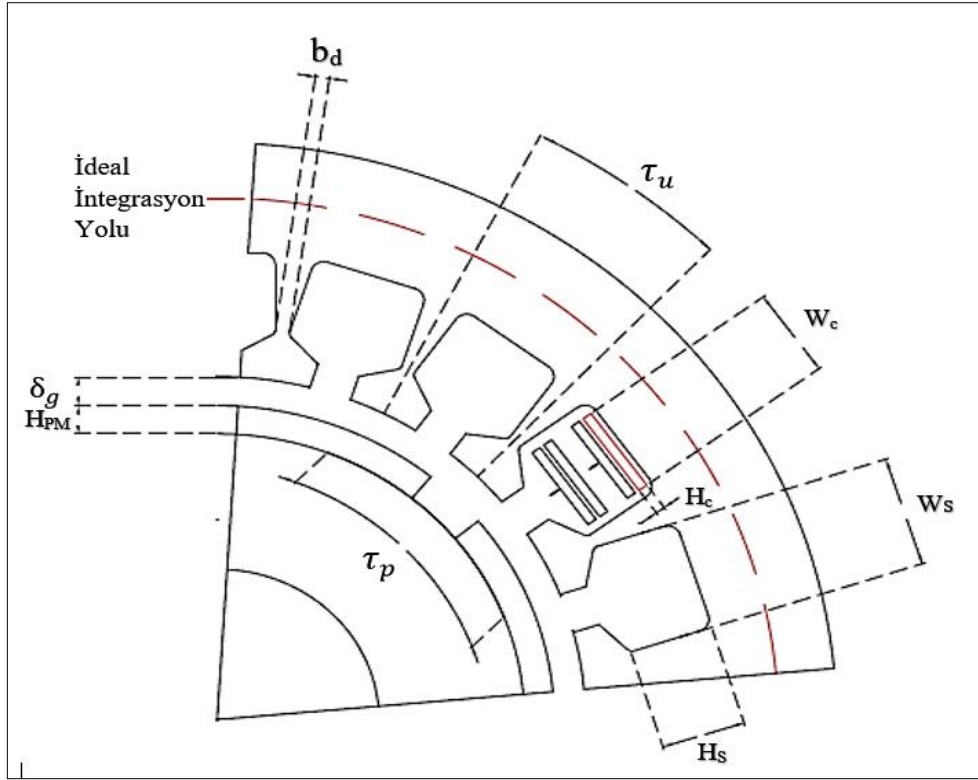
No	Tanım	Açıklama
1	Güç	1 MW
2	Faz sayısı	3 Faz
3	Devir	60 d/d
4	Oyuk sayısı	120
5	Kutup sayısı	100
6	Frekans	50 Hz
7	Hat gerilimi	690 V
8	İstenen minimum verim	0,95
9	Güç faktörü ($\cos\phi$)	1
10	Mıknatıs tipi	N40M Arnold Magnet
11	Manyetik materyal tipi	M530-50A
12	Stator ve rotor paketleme faktörü	0,97
13	İletken tipi	Bakır tel
14	Rotor konumu	İç rotorlu
15	Akı yönelimi	Radyal akılı

Bu bölümün devamında Şekil 3.5’te yer alan ve makine modeli üzerinde gösterilen makine ana boyutlandırma parametrelerinin hesaplanması yapılmıştır. Burada “ H_{ys} ” stator boyunduruk yüksekliğini, “ H_{yr} ” rotor boyunduruk yüksekliğini, “ D_{ri} ” rotor iç çapını bir diğer ifadeyle mil çapını, “ D_r ” sabit mıknatıs dahil rotor çapını, “ D_s ” stator iç çapını, “ D_{se} ” stator iç çapını ifade etmektedir.



Şekil 3.5: Makine kesit görseli ve ana boyutlandırma parametreleri.

Şekil 3.6'da ise makinanın diğer faydalı boyutlandırma parametreleri makine kesiti üzerinde gösterilmiş olup bu bölümün devamında hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 3.6: Makinanın faydalı boyut parametreleri.

Başlangıç verileri elde edildikten sonra SMSG için izin verilen teğetsel gerilme belirlenerek analitik tasarıma başlanmıştır.

Bir cismi kesit yüzeyi üzerinde çevirmeye, döndürmeye veya bölmeye yarayan kuvvetlerin etkisi teğetsel gerilme olarak ifade edilebilir [74]. Rotor üzerine etki eden tork, aynı zamanda rotor yüzeyinde teğetsel gerilme oluşturmaktadır. Makine tipine göre ana boyutların belirlenmesi ve soğutma için uygun teğetsel gerilme değerinin seçilmesi gerekmektedir. Yerel yerel akım yoğunluğu ve yerel akı yoğunluğu değerlerinin yüksek olması ısınmalara yol açabileceği için teğetsel gerilme değeri bu parametreler göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Teğetsel gerilmenin ortalama değeri; hava aralığındaki sinüzoidal akı yoğunluğunun tepe noktasının yüzeye paralel bileşeni ve sinüzoidal akım yoğunluğunun tepe değerininin ortalaması alınarak elde edilmektedir [75].

Tabloda yer alan doğrudan soğutma yöntemi generatörlerin soğutulmak istenen kısımlarının ceket yapısı gibi yardımcı bir klavuz yapı kullanılmasıyla sağlanmakta olup doğrudan soğutma yönteminde ise direk soğutulmak istenen yapılara soğutma kanallarının açılmasıyla gerçekleştirilmektedir [75]

Tablo 3.4: Bazı makine tiplerinde izin verilen teğetsel gerilme değerleri [76].

Teğetsel gerilme değerleri	Çıkık kutuplu senkron makineler veya SMSM	Silindirik kutuplu senkron makineler		
		Dolaylı soğutma		Doğrudan su soğutma
		Su	Hidrojen	
Minimum	21000	17000	51000	85000
Ortalama	33500	36000	65500	114500
Maksimum	48000	59500	81500	148500

Tablo 3.4'e göre kalıcı mıknatıslı çıkık kutuplu senkron makine için izin verilen minimum teğetsel gerilme değeri seçilmiş olup güç faktörü $\cos\phi = 1$ olarak kabul edilmiştir.

$$\sigma F_{tan} = 21000(\cos\phi) = 21000.(1) = 21000 \text{ [Pa]} \quad (3.1)$$

Rotor hacmi doğrudan generatörün ihtiyaç duyduğu tork değeri ile teğetsel gerilmenin bir fonksiyonudur. Öncelikle makinanın tork değeri hesaplanırsa;

$$T = \frac{P}{2\pi n_s} = \frac{1000000}{2.\pi.\left(\frac{60}{60}\right)} = 167531,519 \text{ [Nm]} \quad (3.2)$$

Burada “P” generatör gücünü, “ η ” istenen verimini, “ n_s ” generatörün saniyede dönüş hızını ifade etmektedir. Eşitlik 3.2’de hesaplanan tork ifadesi ve Eşitlik 3.1’de yer alan teğetsel gerilme ifadesi yardımıyla rotor hacmi “ V_r ” hesaplanırsa [75];

$$V_r = \frac{T}{2\sigma F_{tan}} = \frac{167531,519}{2.21000} = 3,988 \text{ [m}^3\text{]} \quad (3.3)$$

Stator ve rotor nüvesinin uzunluğu “ l ” paket boyu olarak isimlendirilir. Tasarlanan generatörde yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslar kullanılmıştır. Mıknatıs dahil rotor çapı “ D_r ” olarak ifade edilmektedir. Rotor çapı ve demir nüve uzunluğu oranı generatör kutup sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Paket boyunun rotor çapına oranı “X” makina oranı bulunursa [75];

$$X = \frac{l}{D_r} = \frac{\pi\sqrt{p}}{4p} = \frac{\pi\sqrt{50}}{4.50} = 0,111 \quad (3.4)$$

Mıknatıslar dahil rotor çapı hacim eşitliği kullanılarak bulunursa;

$$D_r = \sqrt[3]{\left(\frac{4V_r}{\pi X}\right)} = \sqrt[3]{\left(\frac{4.3.988}{\pi.0.111}\right)} = 3,576 \text{ [m]} \quad (3.5)$$

Bulunan rotor çapı Eşitlik 3.4'te yerine koyulursa nüve paket boyu uzunluğu;

$$l = X D_r = (0,111).(3,576) = 0,396 \text{ [m]} \quad (3.6)$$

Hava aralığı uzunluğu “ δ ” generatör gücüyle orantılı olarak artan bir parametredir. Sürekli mıknatıs yüzeyinden stator iç yüzeyine kadar olan hava aralığı hesaplanırsa [75];

$$\delta = \frac{0,18+0,006P^{(0,4)}}{1000} = \frac{0,18+0,006.1000000^{(0,4)}}{1000} = 1,687 \text{ [mm]} \quad (3.7)$$

Yüzey mıknatıslarının 1 mm destek bantlarına ihtiyaç duyduğu kabul edilirse, yeni hava aralığı;

$$\delta_g = \delta + 1 \times 10^{-3} = 1,687 + 1 \times 10^{-3} = 2,687 \text{ [mm]} \quad (3.8)$$

olarak elde edilir. Hesaplanmış olan rotor çapı ve hava aralığı Eşitlik 3.9'da yerine koyularak stator iç çapı “ D_s ” bulunmuştur.

$$D_s = D_r + 2 \delta_g = 3,578 + 2.(2,687 \times 10^{-3}) = 3,583 \text{ [m]} \quad (3.9)$$

Stator oyuk sayısı giriş verilerinde 120 olarak seçilmiştir. Oyuk sayısının “ Q ”, faz sayısı “ m ” ve kutup sayısı “ $2p$ ” olarak belirtildiğinde, oyuk sayısının faz kutup başına oranı “ q ” eşitliği yazılırsa [75];

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{120}{2.50.3} = 0,4 \quad (3.10)$$

Burada $q < 1$ den küçük değerde bulunduğu için kesirli oyuk konsantrik sarımlı (KOKS) makina olarak isimlendirilir. Makine tasarımının KOKS olarak seğilmesinin sağladığı avantajlar bulunmaktadır. Örneğin sargı bağlantılarını kısaltarak bakır tel tasarrufu sağladığı gibi joule kayıplarında bu sarım tekniğinde düşük olmaktadır. Aynı şekilde makinanın aktif uzunluğu bu sarım tekniğinde kısa olmakta ve bu sayede tutma torkunu düşük seviyelerde tutulmaktadır. Böylece KOKS makinanın üretim maliyetleri de düşük çıkmaktadır. KOKS'lu makine tasarımı, kutup-oyuk sayısı oranının en küçük ortak katları kullanılarak tasarım yapılabilmesi esnekliği sağlamaktadır [77].

Stator oyuklarının üzerine yerleştii dairesel uzunluk statorun iç çevresidir. Stator iç çevresinin oyuk sayısına oranı bize stator oyuk adımını (τ_u) verir [75].

$$\tau_u = \pi \frac{D_s}{Q} = \pi \cdot \frac{3,583}{120} = 0,093 \text{ [m]} \quad (3.11)$$

Kutup sayısının stator iç çevresine oranı stator kutup adımını (τ_p) olarak ifade edilir [75].

$$\tau_p = \pi \frac{D_s}{2p} = \pi \cdot \frac{3,583}{100} = 0,112 \text{ [m]} \quad (3.12)$$

Yapılan araştırmaya göre çıkık kutuplu senkron makinelerin temel frekans hava aralığı akı yoğunluğunun tepe değeri normalde 0,85 T ila 1,05 T arasında değişmektedir. Ayrıca stator boyunduruğu, oyuk dişi ve rotor boyunduruğu akı yoğunluklarının tavsiye edilen limitleri Tablo 3.5'te yer almaktadır [75]. Temel frekans hava aralığı akı yoğunluğu için Tablo 3.5 rehberliğinde seçim yapılır.

Tablo 3.5: Standart makine tiplerinde izin verilen akı yoğunlukları [75].

Açıklama	Akı Yoğunluğu			
	Asenkron Makineler	Çıkık Kutuplu Senkron Makineler	Silindirik Kutuplu Senkron Makineler	DC Makinalar
Hava Aralığı	0,7 – 0,90 T	0,85 – 1,05 T	0,8 – 1,05 T	0,6 – 1,1 T
Stator Boyunduruğu	1,4 – 1,7 T	1,0 – 1,5 T	1,1 – 1,5 T	1,1 – 1,5 T
Oyuk Dişi	1,4 – 2,1 T	1,6 – 2,0 T	1,5 – 2,0 T	1,6 – 2,0 T
Rotor Boyunduruğu	1 – 1,6 T	1,0 – 1,5 T	1,3 – 1,6 T	1,0 – 1,5 T

Bu çalışmada hava aralığı akı yoğunluğu;

$$B_{1peak} = 0,95 \text{ [T]} \quad (3.13)$$

olarak seçilmiştir. Mıknatısın rotor yüzeyinde doldurduğu alan (a_{PM}) mıknatısın efektif bağıl genişliği olarak ifade edilir. Bu oran doğrudan sinüzoidal akı yoğunluğu formuyla ilgilidir. Gömülü mıknatıslı rotor tiplerinde kutuplara şekil verilerek sinüzoidal akı yoğunluğu sağlanırken, çıkık kutuplu makinalarda efektif bağıl genişlik oranıyla bu durum sağlanmaktadır. Tam sinüzoidal durum için rotor yüzeyinde bu oran $2/\pi$ olarak kabul edilir. Ancak mıknatısların oluşturduğu akının yaklaşık %5 ila %8'i kaçak akı olarak kaybedilir. Ayrıca manyetik malzemenin doyma karakteristikleri göz önüne alındığında mıknatıs genişliği $2/\pi$ oranından daha geniş olması gerekir. Uygulamada, $a_{PM} = 0,85$ aşılmaz [75]. Tasarlanan makinede mıknatıs bağıl genişliği;

$$a_{PM} = 0,8 \quad (3.14)$$

olarak seçilmiştir. Mıknatısların oluşturduğu dikdörtgen alanlı akı yoğunluğu “Bmax” ile ifade edilir. Bu değer hava aralığında istenen akı yoğunluğu ve efektif mıknatıs genişliğinin bir fonksiyonudur. Tasarlanan makinede dikdörtgen akı yoğunluğunun maksimum değeri [75];

$$B_{max} = \frac{\pi B_{1peak}}{4 \sin\left(\frac{a_{PM}\pi}{2}\right)} = \frac{\pi \cdot (0,95)}{4 \cdot \sin\left(\frac{0,8\pi}{2}\right)} = 0,7845 \text{ [T]} \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Tablo 3.3’de yer alan makine giriş parametrelerinde hat gerilimi 690 V olarak belirlenmiştir. Kalıcı mıknatıs tarafından indüklenen gerilimin değeri;

$$E_{PM} = \frac{U_{hat}}{\sqrt{3}} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398,371 \text{ [V]} \quad (3.16)$$

olarak bulunur. Tasarlanan makinenin sargı faktörü doğrudan makinenin kalitesini ifade eden bir parametredir. Kalıcı mıknatıslı bir makine için sargı faktörü, aynı mıknatıs akısının sargılar tarafından gerilim indükleyebilme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Tasarlanan makine için temel frekans bileşeni için sargı faktörü hesaplanırsa [75];

$$k_{w(1)} = \frac{2 \cos\left(\frac{v\pi}{m2}\right) + 2}{4} = \frac{2 \cdot \cos\left(\frac{1\pi}{3.2}\right) + 2}{4} = 0,933 \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Yüksek güçlü makinelerde armatür sargılarında indüklenen akım yüksek olacağı için bakır tel kesiti de yüksek olur. Makinede sargılardan geçen akımı düşürmek ve dolayısıyla iletken kesitini düşük tutabilmek amacıyla sargılara paralel hat eklenir. Paralel kol sayısı tasarlanan makinede;

$$a = 2 \quad (3.18)$$

olarak seçilmiştir. Bir oyukta bulunan iletken sayısı paralel kol sayısı, faz sayısı, ve bir faz için seri bağlı bobin sayısı ile doğru orantılı oyuk sayısı ile ters orantılı bir parametredir. Bir faz sargısında bulunan seri bağlı bobin sarım sayısı [75];

$$N = \frac{\sqrt{2} E_{PM}}{\omega k_{w(1)} a_{PM} B_{max} \tau_p l} = \frac{\sqrt{2} \cdot (398,371)}{(2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot (0,933) \cdot (0,8) \cdot (0,7845) \cdot (0,112) \cdot (0,396)} = 69,05 \quad (3.19)$$

olarak bulunur. Bir oyuktaki iletken sayısı [72];

$$Z_Q = \frac{2amN}{Q} = \frac{2.2.3.(69,05)}{120} = 6,905 \quad (3.20)$$

olarak bulunur. Bir oyuktaki iletken sayısı çift katmanlı oyuk yapısı seçildiği için çift seçilmelidir. En yakın üst çift sayıya yuvarlanır ve yeni iletken sayısı 8 olarak belirlenmiştir.

$$Z_{Qy} = 8 \quad (3.21)$$

Buradan faz sargılarındaki seri bağlı bobin sayısı Eşitlik 3.22'deki yuvarlama işlemine göre yeniden hesaplanır.

$$N_y = \frac{Z_{Qy}Q}{2am} = \frac{8.120}{2.2.3} = 80 \quad (3.22)$$

Tablo 3.5'e göre çıkık kutuplu senkron makinaların stator diş akı yoğunluğu 1,6 T ile 2 T arasında olmalıdır. Stator diş akı yoğunluğu;

$$B_{dapp} = 1,6 \text{ [T]} \quad (3.23)$$

olarak seçilmiştir. Buradan stator oyuk diş genişliği [72];

$$bd = \frac{(l)(\tau_u)(B_{max})}{(k_{FE})(l)(B_{dapp})} = \frac{(0,396).(0,093).(0,7845)}{(0,97).(0,396).(1,6)} = 0,0470 \text{ [m]} \quad (3.24)$$

olarak bulunur. Burada “ k_{FE} ” olarak belirtilen parametre stator nüvesinin paketleme faktörü olup 0,97 olarak ön görülmüştür [75]. Paketleme faktörü bir üretim katsayısı olarak kabul edilebilir. Stator oyuk boyutlandırmasının temelinde oyuk genişliği ve oyuk yüksekliğinin tespiti yer almaktadır. Stator oyuk genişliği, kullanılan yalıtım malzemesi, oyukta kullanılacak iletken kesitinin ve sayısının bir fonksiyonudur.

Buradan stator faz gerilimi;

$$U_{\text{sph}} = \frac{V_{\text{hat}}}{\sqrt{3}} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398,37 \text{ [V]} \quad (3.25)$$

olarak bulunur. Stator akımı;

$$I_s = \frac{P}{m U_{\text{sph}} \cos \phi} = \frac{1000000}{(3).(398,37).(1)} = 836,74 \text{ [A]} \quad (3.26)$$

olarak bulunur. Buradan stator oyuğundaki iletkenin alanı;

$$S_{cs} = \frac{(I_s)}{(a)(I_s)} = \frac{836,74}{2.(4,5)} = 92,971 \text{ [mm}^2] \quad (3.27)$$

olarak bulunur. Burada yer alan “ J_s ” stator iletkeninin akım yoğunluğu olup yüksek güçlü makinalarda 4–8 A/mm² seçilebilmektedir. Fan soğutmalı veya sıvı soğutmalı alternatör tiplerinde akım yoğunluğu daha yüksek seçilebilmektedir. Tasarımda akım yoğunluğu 4,5 A/mm² seçilmiştir [75].

Stator oyuk genişliği (W_s) için Eşitlik 3.11’de stator oyuk adımı, Eşitlik 3.24’te dış genişliğinden yararlanılarak [72];

$$W_s = \tau_u - bd = 93,802 - 47 = 46,802 \text{ [mm]} \quad (3.28)$$

olarak bulunur. İletken genişliği [72];

$$W_c = W_s - W_{\text{ins}} = 46,802 - 6 = 40,802 \text{ [mm]} \quad (3.29)$$

olarak bulunur. Bulunan iletken genişliği en yakın tam sayıya yuvarlatılarak 41 olarak elde edilmiştir.

$$W_{cyuv} = 41 \text{ [mm]} \quad (3.30)$$

Oyuk içinde kullanılan ve yalıtkan malzemelerin yaklaşık genişliği “ W_{ins} ” olarak belirtilen parametre tasarımda 6 mm olarak alınmıştır [72].

Stator oyuğunda bulunan iletken kalınlığı;

$$H_c = \frac{S_{cs}}{W_c} = \frac{92,971}{41} = 2,267 \text{ [mm]} \quad (3.31)$$

$$H_{cyuv} = 3 \text{ [mm]} \quad (3.32)$$

olarak bulunur. Bulunan iletken kalınlığı en yakın üst tam sayıya yuvarlanmıştır. Eşitlik 3.30’da bulunan yeni iletken genişliğine göre düzeltilmiş oyuk genişliği;

$$W_s = W_{cyuv} + W_{ins} = 41 + 6 = 47 \text{ [mm]} \quad (3.33)$$

olarak bulunur. Yeni iletken kalınlığı ve iletken genişliğine göre düzeltilmiş akım yoğunluğu [72];

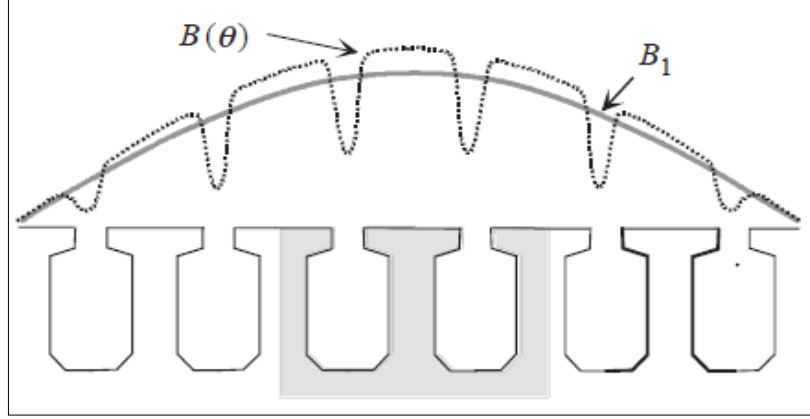
$$J_s = \frac{I_s}{W_{cyuv} \cdot H_{cyuv} \cdot 0,98 \cdot a} = \frac{836,74}{(41) \cdot (3) \cdot (0,98) \cdot (2)} = 3,47 \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (3.34)$$

Eşitlik 3.34’te iletken malzemenin yuvarlatılma katsayısı 0,98 kabul edilmiştir Oyuk yüksekliği hesaplanırsa [72];

$$H_s = Z_{Qy} H_{cyuv} + Z_{Qy} 2(0,5) + H_{ins} = (8) \cdot (3) + (8) \cdot (1) + 13 = 45 \text{ [mm]} \quad (3.35)$$

olarak bulunur. Eşitlikte “ H_{ins} ” kullanılan yalıtım malzemelerin toplam kalınlığı olup 13 mm olarak kabul edilmiştir. Ayrıca kullanılan her tel için yalıtım malzemesinin kalınlığı 0,5 mm olarak kabul edilmiştir [72]. Şekil 3.7’te oyuk yapısı ve hava boşluğundaki akı yoğunluğu gösterimi yer almaktadır. Oyuk dişlerinin manyetik voltajı, hava boşluğunun temel akı

yoğunluğunun tepe noktasında hesaplanır. Hava boşluğu akı yoğunluğunun tepe değerinde diş akısı oyuk aralığından geçer. Makine dişleri doymamışsa, neredeyse tüm akı dişler boyunca akarak oyuk ve oyuk yalıtımlarına kaçaklar olmaz [75].



Şekil 3.7: Hava aralığındaki akı yoğunluğu [75].

Diş akı yoğunluğu Eşitlik 3.23’de “ B_{dapp} ” 1,6 T olarak seçilmiştir. Şekil 3.8’de yer alan M530-50A materyaline ait B-H eğrisinden faydalanılarak dişlerdeki alan şiddeti;

$$H_{ed} = 2,54 \times 10^3 \text{ [A/m]} \quad (3.36)$$

olarak elde edilmiştir. Buradan dişlerdeki gerçek akı yoğunluğu [75];

$$B_d = B_{dapp} - \left(\frac{\tau_u}{(k_{FE})(bd)} - 1 \right) \mu_0 H_{ed} \quad (3.37)$$

$$B_d = 1,6 - \left(\frac{93.802}{(0.97)(47)} - 1 \right) \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot (2,54 \times 10^3) = 1,596 \text{ [T]} \quad (3.38)$$

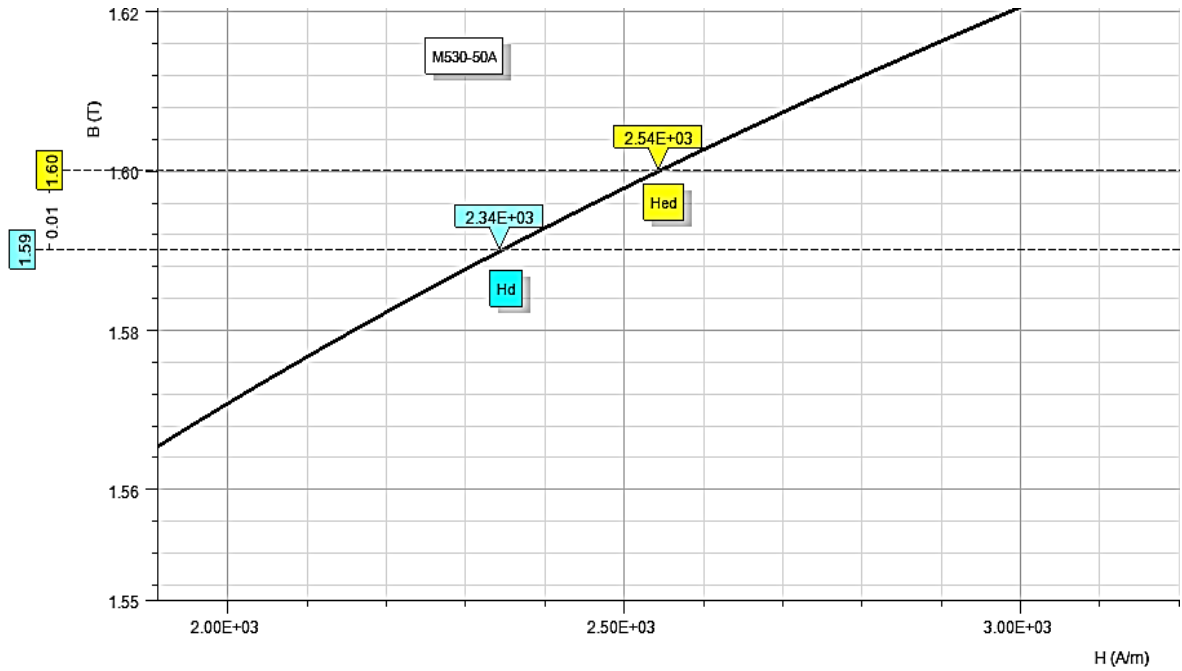
olarak bulunur. Buradan Şekil 3.8’de yer alan B-H eğrisinden faydalanılarak dişlerdeki gerçek alan şiddeti;

$$H_d = 2,34 \times 10^3 \text{ [A/m]} \quad (3.39)$$

olarak elde edilmiştir. Oyuk ve diş genişliği eşit olmadığı durumda akı yoğunluğu sabit değildir. Dişin manyetik voltajı bölümler halinde integral edilmeli ve hesaplanmalıdır. Diş ucunun ve dişin yuvarlatılmış kısımlarının manyetik gerilimleri küçüktür ve bu nedenle ihmal edilmiştir. Dişteki manyetik gerilim oyuk yüksekliği boyunca hesaplanırsa [75];

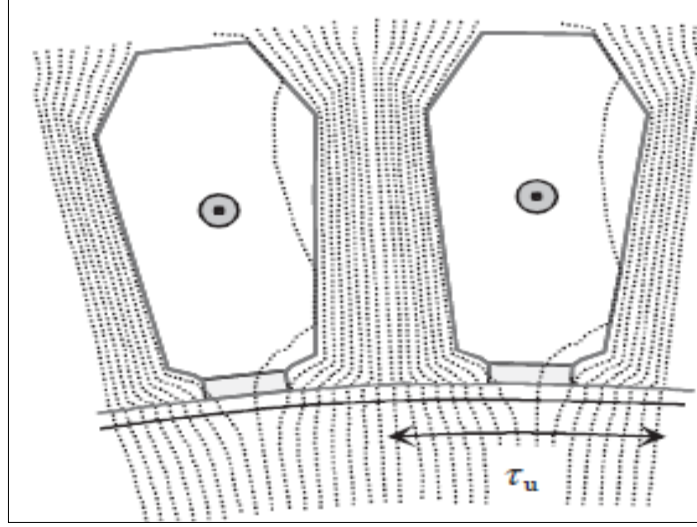
$$U_{m,d} = \int_0^{H_s} H_d dl = (2,34 \cdot 10^3) \cdot (0,045) = 105,3 \text{ [A]} \quad (3.40)$$

Şekil 3.8’de manyetik çeliğin “Hd” oyuk dişlerindeki alan şiddeti eğrisi yer almaktadır.



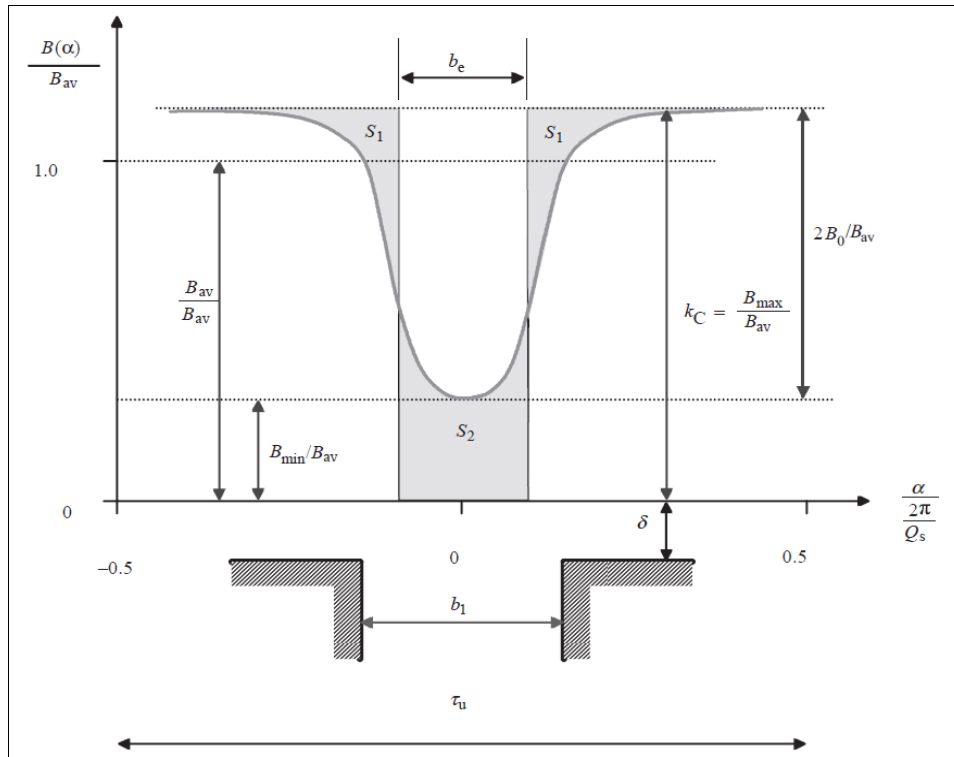
Şekil 3.8: Manyetik çeliğe (M530-50A) ait Hd ve Hed alan şiddetleri.

Elektrik makinasında bulunan hava boşluğu, manyetomotor kuvvet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir hava boşluğu üzerinden manyetik gerilimi hesaplayabilmek için geometriyi basitleştirmek gerekmektedir. Şekil 3.9 incelendiğinde oyuk aralığı boyunca akı diagramı yer almaktadır. Akı yoğunluğu oyuk açıklığında daha fazla kaçağa uğramakta ve dolayısıyla buralarda akı yoğunluğu azalmaktadır. Ortalama akı yoğunluğunu tanımlamak için Carter ilkesine göre hava boşluğu fiziksel ölçüsünden daha uzun tanımlanmaktadır. Fiziksel hava boşluğunun uzunluğu “ δ ”, Carter faktörü “ k_c ” ile artmaktadır. Ayrıca rotor yüzeyi düzgün olduğu varsayılarak hesaplamalar basitleştirilmiştir [75].



Şekil 3.9: Bir oyuk aralığı boyunca stator oyuğunun akı diagramı [78].

Şekil 3.10’da bir oyuk aralığı boyunca akı yoğunluk dağılımı yer almaktadır. Burada S_1 alanlarının S_2 alanına eşit olduğu bilinmektedir. Carter faktörü, gerçek akı yoğunluğu eğrisini dikdörtgen haliyle değiştirir. Bu sayede akı oyuk dişlerinin altında sabit kalır ve oyuk açıklığında yokmuş gibi kabul edilir. Şekilde “ b_1 ” oyuk açıklığı, “ b_e ” eşdeğer oyuk açıklığı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.10: Bir oyuk aralığı boyunca akı yoğunluğu dağılımı [78].

Yuva açıklığını azaltma faktörü [78];

$$\kappa = \frac{\frac{W_s}{\delta_g}}{5 + \frac{W_s}{\delta_g}} = \frac{\frac{47}{2,687}}{5 + \frac{47}{2,687}} = 0,777 \quad (3.41)$$

olarak bulunur. Görünür hava aralığının bulunması için Carter faktörü hesaplanırsa [78];

$$k_C = \frac{\tau_u}{\tau_u - \kappa W_s} = \frac{93,671}{(93,671) - (0,777) \cdot (47)} = 1,637 \quad (3.42)$$

olarak bulunur. Eşdeğer hava aralığı [78];

$$\delta_e = k_C \delta_g = (1,637) \cdot (2,687) = 4,398 \text{ [mm]} \quad (3.43)$$

olarak bulunur. Hava aralığı manyetik gerilimi [75];

$$U_{m\delta_e} k_C = \frac{B_{1peak}}{\mu_o} \delta_e = \frac{0,95}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (4,398 \times 10^{-3}) = 3324,8 \text{ [A]} \quad (3.44)$$

olarak bulunur. Buradan hava boşluğu akısının en yüksek değeri [75];

$$\phi_m = a_{PM} B_{max} \tau_p l = (0,8) \cdot (0,7845) \cdot (0,112) \cdot (0,396) = 0,0278 \text{ [Wb]} \quad (3.45)$$

olarak bulunur. Stator ve rotorun boyunduruğunun boyut parametreleri hava aralığı akısı, nüve paketleme faktörü, makine nüve uzunluğu ve boyunduruk akı yoğunluğu parametrelerinin bir fonksiyodur. Tablo 3.5'de izin verilen makine parametrelerine göre stator boyunduruk maksimum akı yoğunluğu (B_{ys}) 1,3 T ve rotor boyunduruk maksimum akı yoğunluğu (B_{yr}) 1,3 T olarak seçilmiştir.

Stator boyunduruk yüksekliği [75];

$$H_{ys} = \frac{\phi_m}{(2)(k_{FE})(l)(Bys)} = \frac{0,0278}{(2).(0,97).(0,396).(1,3)} = 0,0278 \text{ [m]} \quad (3.46)$$

Rotor boyunduruk yüksekliği;

$$H_{yr} = \frac{\phi_m}{(2)(k_{FE})(l)(Byr)} = \frac{0,0278}{(2).(0,97).(0,396).(1,3)} = 0,0278 \text{ [m]} \quad (3.47)$$

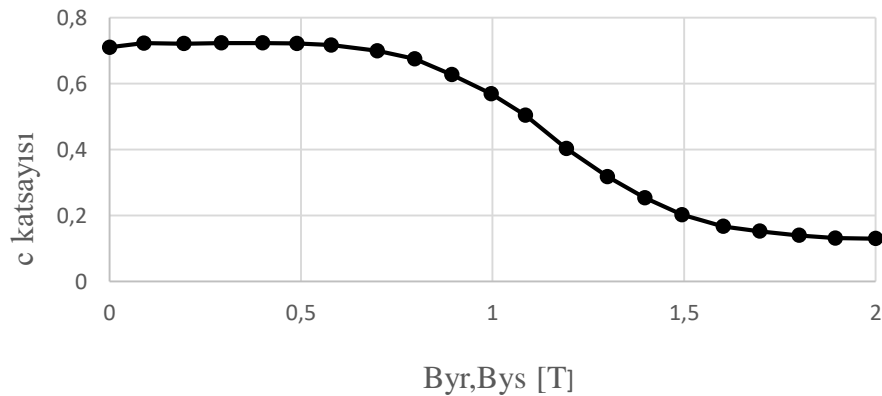
olarak bulunur. Stator boyunduruğunun manyetik gerilimlerinin tespiti sırasında ideal integrasyon yolu olarak tanımlanan akı yolu kullanılır. Bu akı yolu stator oyuk bitimine yarı boyunduruk genişliği eklenerek bulunan bir çaptır. İdeal integrasyon yolu [75];

$$D_{ys} = D_s + 2H_s + H_{ys} = 3,578 + 2.(0,045) + (0,0278) = 3,7 \text{ [m]} \quad (3.48)$$

olarak bulunur. İdeal integrasyon yolunun stator kutup adımı;

$$\tau_{ys} = \frac{\pi D_{ys}}{2p} = \frac{\pi.(3,7)}{2.(50)} = 0,116 \text{ [m]} \quad (3.49)$$

olarak bulunur. Stator boyunduruğundaki manyetik akı yoğunluğu, uygulanan manyetik alanla doğrusal olarak artmadığı bilinmektedir. Boyunduruktaki manyetik akı yoğunluğu çoğu zaman uygulanan manyetik alandan daha düşük olduğu göz önüne alındığında boyunduruktaki manyetik gerilim Şekil 3.11'de yer alan c katsayısı grafiğiyle tahmin edilmektedir [75].



Şekil 3.11: C katsayısının boyunduruktaki maksimum akı yoğunluğuyla değişimi [75].

Şekil 3.11’de yer alan c katsayının değişim eğrisinden yararlanılarak stator boyunduruğunun maksimum akı yoğunluğu değeri 1,3 T için c katsayısı;

$$c_s = 0,33 \quad (3.50)$$

olarak elde edilir. Rotor boyunduruğunun akı yoğunluğu statorunkine eşit olduğundan rotor boyunduruğundaki c katsayısı stator boyunduruğu değerine eşittir. Buradan;

$$c_r = 0,33 \quad (3.51)$$

olarak bulunur. Boyunduruğun maksimum akı yoğunluğu değerindeki manyetik alan şiddeti malzemenin B-H eğrisinden faydalanılarak;

$$H_{y_{maxs}} = H_{y_{maxr}} = 332 \text{ [A/m]} \quad (3.52)$$

olarak bulunur. Rotor boyunduruğundaki manyetik alan değeri stator boyunduruğundakine eşittir. Stator boyunduruğundaki manyetik gerilim [75];

$$U_{mys} = C_s H_{y_{maxs}} \tau_{ys} = (0,33).(332).(0,116) = 12,70 \text{ [A]} \quad (3.53)$$

olarak bulunur. Sabit mıknatısın akı yoğunluğu, Eşitlik 3.13’de yer alan hava aralığı akı yoğunluğu değerine eşit kabul edilmiştir.

$$B_{PM} = 0,95 \text{ [T]} \quad (3.54)$$

Sabit mıknatısın kalınlığı [75];

$$H_{PM} = \frac{U_{m\delta e} + U_{m,d} + \left(\frac{U_{mys}}{2}\right) + \frac{(\pi)(c_r)(H_{y_{maxr}})(D_r - H_{yr})}{4p}}{H_c - \frac{H_c}{B_r} B_{PM} + \frac{(\pi)(c_r)(H_{y_{maxr}})}{2p}} \quad (3.55)$$

$$H_{PM} = \frac{3324,8 + 105,3 + \frac{12,70}{2} + \frac{\pi.(0,33).(332).(3,576 - 0,0278)}{4.(50)}}{924000 - \frac{924000}{1,16} .(0,95) + \frac{\pi.(0,33).(332)}{2.(50)}} = 0,0206 \text{ [m]} \quad (3.56)$$

$$H_{PM} = 21 \text{ [mm]} \quad (3.57)$$

olarak bulunur. Miknatıs kalınlığı 21 mm olarak tam sayıya yuvarlanmıştır. Oyuk yüksekliği ve boyunduruk kalınlıklarının tespitinden sonra stator dış çapı;

$$D_{se} = D_s + 2H_s + 2H_{ys} = 3,583 + 2(0,045) + 2(0,0278) = 3,728 \text{ [m]} \quad (3.58)$$

olarak bulunur. Rotor maksimum iç çapı;

$$D_{ri} = D_r - 2H_{PM} - 2H_{yr} = 3,576 - 2(0,0206) - 2(0,0278) = 3,480 \text{ [m]} \quad (3.59)$$

olarak bulunmuştur. Rotor maksimum iç çapı olarak hesaplanan makine mili boyutunun tahmin edilen boyutlardan yüksek çıktığı ön görülmüştür. Rotor üzerinden kılavuzlanan akı yollarının şekillerini bozmamak ve rahat hareket edebilmeleri için generator mil denklemini yeniden incelenmiştir.

Tork ve mil çapları arasındaki ilişki incelendiğinde kamalı mil kullanılması durumunda minimum mil çapı, makine gücü ve devir sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir [79]. Generator mil çapı;

$$D_{rmil} = \sqrt[3]{\frac{(1,33)P10^6}{N}} = \sqrt[3]{\frac{(1,33)(1000)10^6}{60}} = 280,90 \text{ [mm]} \quad (3.60)$$

$$D_{rmil} = 281 \text{ [mm]} \quad (3.61)$$

olarak bulunur. Generator mil çapı 281 mm olarak tam sayıya yuvarlanmıştır. Burada “ D_{rmil} ” generator mil çapını ifade etmekte olup rotor maksimum iç çapının “ D_{ri} ” yeni değerini, “ P ” generator gücünün kilowatt cinsinden değerini, “ N ” generatorün dakikada dönüş hızını ifade etmektedir.

3.2 Ansys Maxwell Yazılımı İle Elektromanyetik Tasarım

Analitik tasarım hesaplamaları yapılmış generatör modelinin, gerçek davranış karakteristiğini belirlemek için ANSYS Maxwell simülasyon tabanlı yazılım programı kullanılmıştır. Bu çalışmada RMXprt aracı yardımıyla sezgisel hesaplama yapabilen program, SEA analizlerine geçilmeden önce ikinci bir kontrol hesaplamasının gerçekleştirileceği basamaktır. Ayrıca RMXprt modülünde SMSG'nin değişken devir durumundaki elektriksel davranışı incelenecektir. Analitik hesaplama değerlerinin kontrolünden sonra 2B ve 3B generatör modelleri oluşturulacaktır. Ardından SEA yönetimiyle modellerin simülasyonu gerçekleştirilecek makinenin etiket değerleri, elektromanyetik davranışı ve harmonik verileri hesaplanacaktır.

3.2.1 Ansys Maxwell Yazılımı

ANSYS Maxwell akışkanlar dinamiği, yapısal, elektromanyetik sistem modelleme gibi bir çok disiplini destekleyerek 2B-3B çoklu fizik analizlerinin gerçekleştirilmesini sağlayan bir yazılımdır. Bu analizler sınırlı uzay geometrisinde, kullanıcı tarafından tanımlanan başlangıç şartları ve sınır koşulları doğrultusunda Maxwell denklemleri kullanılarak çözüme ulaştırılır. Analizin gerçekleştirileceği problemde uygulanan denklemler, modelin çözüm ağı (mesh) olarak isimlendirilen üçgen ve dörtgen küçük parçalarda işlemler gerçekleştirilir. Ansys Maxwell programı manyetik ve elektriksel temelli analizleri sonlu elemanlar (finite element analysis) metodunu kullanarak gerçekleştiren geniş çözüm ağına sahip yüksek verimli interaktif bir yazılımdır [80].

 Akışkanlar Mekanikliği	Çok Fazlı Yanma	
 Yapısal Mekanik • Doğrusal statik	Yüksek Hız Etkisi	
 Elektromanyetik • Alçak frekanslı Sargıları	Yüksek Frekanslı Alan Analizi	
 Sistem • Veri paylaşımı	Çoklu Alan Sistem Analizi	

Şekil 3.12: Ansys Maxwell teknoloji disiplinleri [81].

Analiz işlemi gerçekleştirilirken probleme uygun ağ tanımlaması yapmak ve problemin sınır şartlarını iyi tespit etmek çok önemlidir. Ağ tanımlaması yapılırken modelin örnekleme sıklığının gereğinden fazla olması işlem süresini gereğinden fazla arttırırken, çok az yapılması kritik bölgelerde hata yapma oranını arttırarak analizin sonuçlarında saplamalara yol açabilmektedir [80] .

Maxwell denklemleri elektromanyetik teorisinin dört temel eşitliği sayılan, 1861-1862 yıllarında James Clerk Maxwell tarafından yayınlanan fiziksel denklemlerdir. Bu denklemler Lorentz yasası ile birlikte optik, elektromanyetik ve elektrodinamik olayları açıklar. Bu dört denklemin integral ve türev formları Tablo 3.6’da gösterilmiştir [82].

Tablo 3.6: Maxwell denklemleri [82].

Denklem	Türev İfadesi	İntegral İfadesi
Gauss'un Elektrik Yasası	$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0}$
Gauss'un Manyetizma Yasası	$\nabla \cdot B = 0$	$\oint B \cdot dA = 0$
Faraday'ın İndüksiyon Yasası	$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt}$	$\oint E \cdot dS = -\frac{d\phi_m}{dt}$
Amper'in Yasası	$\nabla \times B = (J + \epsilon_0 \frac{dE}{dt})$	$\oint B \cdot dS = \mu_0 \cdot I + \epsilon_0 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$

Maxwell denklemlerinde elektrik alan için “E”, manyetik alan için “B” sembolleri kullanılmıştır. Ayrıca değişim ifadesi için “ $\frac{d}{dt}$ ” ve miktar belirtmek için “ $\nabla \times$ ” sembolleri tercih edilmiştir. Yük yoğunluğu için “ ρ ”, akım yoğunluğu için “J” olarak ifade edilmektedir.

3.2.2 Ansys Maxwell İle Çözüm Aşamaları

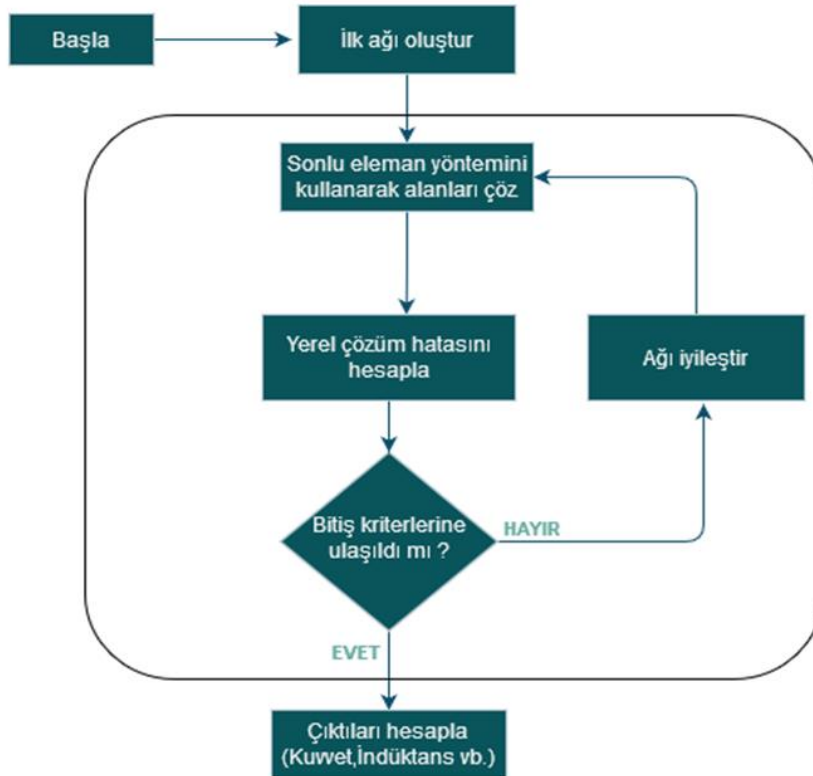
Maxwell yazılımında analizin çözüm aşamaları, ön işleme (pre processing), analizi çalıştırma (run analysis), çözüm ağı oluşturma (meshing), çözüm (solve) ve sonuçların elde edildiği rötuş adı verilen (post processing) kısımlardan oluşmaktadır. Şekil 3.13’te çözüm aşamalarının adım sırası yer almaktadır. Ön işleme kısmında çözücünün seçilmesi, modelin sınır şartlarının tanıtılması gibi işlemlerin yapılmasının yanı sıra sonlu bölgenin

oluşturulması ve malzeme tanımlamaları yapılmaktadır. Analizi çalıştırma bölümünde analize hazır hale getirilen modelde yapılan tanımlamalar kontrol edildikten sonra analiz aşamasına geçilir. Çözüm ağı oluşturma kısmında; analiz yapılacak model üzerinde, sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözüm ağı denen mesh bölgelerinin tanımlamaları gerçekleştirilmektedir. Çözüm aşaması olarak adlandırılan kısımda analiz programı bilgisayar çekirdeği yardımıyla çözüm denklemleri hesaplanır. Sonuç bölümü ise modelin tork, güç, gerilim, akım ve manyetik alan yoğunluğu gibi çalışmanın amacına yönelik faydalı bilgilerin alındığı kısımdır.



Şekil 3.13: Ansys Maxwell çözüm aşamaları.

Maxwell yazılımı çözüm ağı oluşturmak için uyarlanabilir çözüm ağı (adaptive meshing) tekniğini kullanmaktadır. Şekil 3.14’de uyarlanabilir çözüm ağının akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.14: Uyarlanabilir çözüm ağı akış şeması.

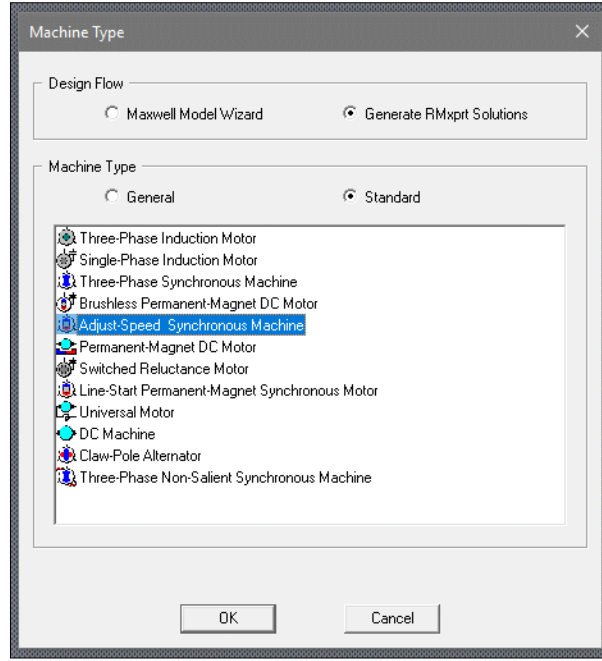
Elektromanyetik alanları içeren problemlerde kaçak akı tahmini, yıldırım düşme tahmini, dielektrik kırılmalar ve elektriksel atlamaların nerede olacağını kestirimi oldukça zordur. Bu nedenle uyarlanabilir çözüm ağı tekniğinde belirli bir iterasyon sayısı ve elektromanyetiğin temel denklemleri olan Maxwell denklemlerinin çözümünü içeren bir hata payı belirlenir. Bu girdilere bağlı olarak model üzerinde belirlenen ilk çözüm ağı oluşturulur. Her iterasyonda Maxwell denklemlerinin çözüm için belirlenen hata kriterleri göz önüne alınarak analizin gerçekleşmesi için nihai çözüm ağı oluşturulur. Uyarlanabilir çözüm ağı metoduyla modelde oluşturulan çözüm ağı, analiz için belirlenen çözücüyle Maxwell denklemlerini hesaplayarak analizler gerçekleştirilmektedir. Analizler tamamlandıktan sonra grafiksel olarak sonuçlar alınabilmektedir. Tork, kuvvet, indüktans, rezistans, kapasitans gibi hesaplamaların yapılabildiği gibi manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan, akım yoğunluğu, elektrik alan, voltaj dağılımı gibi veriler skaler ve vektörel olarak elde edilebilmektedir [81].

3.2.3 Ansys Maxwell Rmxprt Aracı

RMxprt hızlı analitik hesaplamalar sağlayan şablon tabanlı bir elektrikli makina tasarım aracıdır. Ayrıca detaylı sonlu eleman hesaplamaları için tasarlanan makinanın 2B ve 3B geometri oluşturma metotlarını içermektedir. RMxprt makine performans hesabını yapabilmekte olup ayrıca tasarım için ilk boyutlandırma işlemini gerçekleştirerek değişken makine parametrelerine göre çoklu analiz gerçekleştirebilmektedir [83].

3.2.3.1 Makine Tipi Seçim Ekranı

Makine seçim ekranında desteklenen alternatif akım ve doğru akım döner makine tipleri yer almaktadır. Seçilen makine türüne göre otomatik olarak model, boyut ve mekanik özellikler tanımlanır.



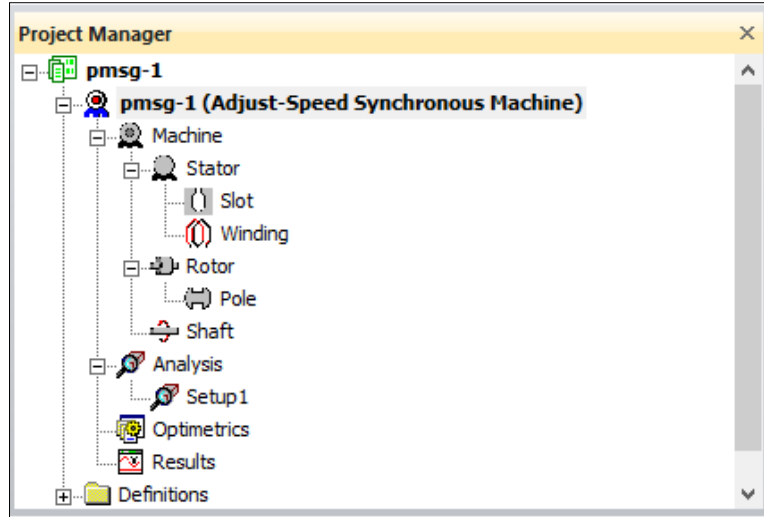
Şekil 3.15: Uyarlanabilir çözüm ağı akış şeması.

Şekil 3.15’de yer alan ve RMXprt aracıyla simüle edilebilen makine tipleri; üç faz ve tek fazlı indüksiyon motorları, fırçasız sabit mıknatıslı dc motorlar, hız ayarlı senkron motor ve generatörler, sabit mıknatıslı dc motorlar, anahtarlama relüktans motorlar, hat başlatmalı sabit mıknatıslı senkron motorlar, üniversal motorlar, genel DC makineler, pençe kutuplu alternatörler, ve üç fazlı yuvarlak kutuplu senkron makineler olarak sayılabilir.

Programın arayüzü; proje yöneticisi bölümü, özellikler arayüzü, mesaj yöneticisi ekranı, ilerleme gösterge ekranı ve model pencereleri olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır.

3.2.3.2 Proje Yöneticisi Penceresi

RMXprt aracında proje yöneticisi; tasarımı yapılacak makinenin, alt bileşenlerinin tanımlamalarının yapıldığı, analiz ve kurulum ayarlarının belirlendiği önemli bir arayüz penceresi olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.16: Proje yönetici arayüzü.

Bu pencerede listenin en başında proje başlığı, bir alt sekmesinde makine ana bileşenlerini içeren açılır liste bulunmaktadır. Bu listenin ana sekmeleri; makine, analiz, optimetrik ve sonuçlar bölümleri olup makine bölümünde stator, rotor ve şaft özellikleri tanımlanmaktadır. Analiz kısmında, analiz kurulum parametreleri girilmektedir. Optimetrik bölümünde değişken tanımlamaları yapıлып çoklu analizlerin gerçekleştirilmesi sağlanmakta olup, sonuçlar kısmında ise makine karakteristiğini tanımlayan grafik ve veriler elde edilmektedir.

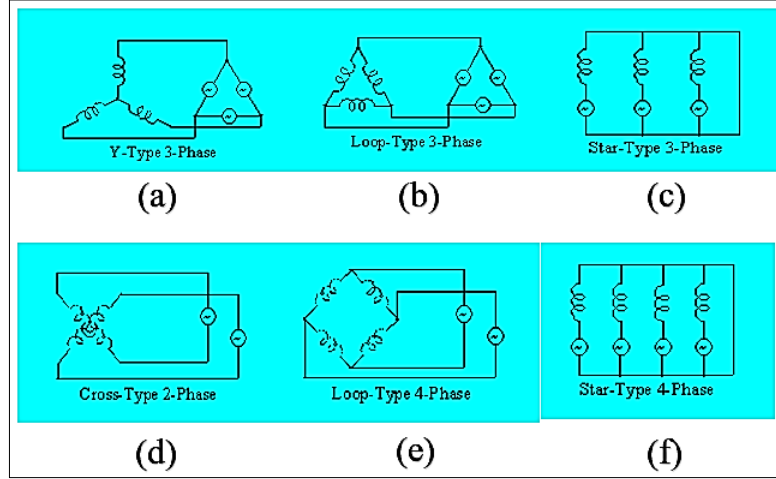
3.2.3.3 Makine Özellik Kontrol Penceresi

Bu pencerede proje yöneticisi üzerinden seçilen makine bileşenlerinin niteliklerini görüntüleme ve düzenlenmesini sağlayan arayüzü içermektedir. Şekil 3.17’de makine özellik tanımlarının yapıldığı pencere yer almaktadır. Makine özelliklerinden kutup çifti sayısı yalnızca tam sayı seçilebilmektedir. Rotor konumu, sargı ve hava direnci kayıpları, makine nominal hızı kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Machine Type	Adjust-Speed Synchronous Machine		
Number of Poles	100		
Rotor Position	Inner Rotor		
Frictional Loss	0	W	0W
Windage Loss	0	W	0W
Reference Speed	60	rpm	
Control Type	AC		
Circuit Type	Y3		

Şekil 3.17: Makine özellik penceresi.

Generatörlerde tasarım ve modellerine göre farklı sargı bağlantıları kullanılabilir. Ayrıca analiz sonrası tasarımın ihtiyacına yönelik yapılan dış uyartım ve harici devre tasarım çalışmaları yapılabilir. Şekil 3.18’de devre modeli sekmesinde yer alan ve kullanılabilir devre modelleri yer almaktadır.



Şekil 3.18: Kullanılabilir devre modelleri, (a) Üç faz bağlantı-Y3, (b) Döngü tipi bağlantı-L3, (c) Üç faz yıldız bağlantı-S3, (d) İki faz çapraz bağlantı-C3, (e) Dört faz döngü bağlantı-L4, (f) Dört faz yıldız bağlantı-S4.

3.2.3.4 Stator Özellik Penceresi

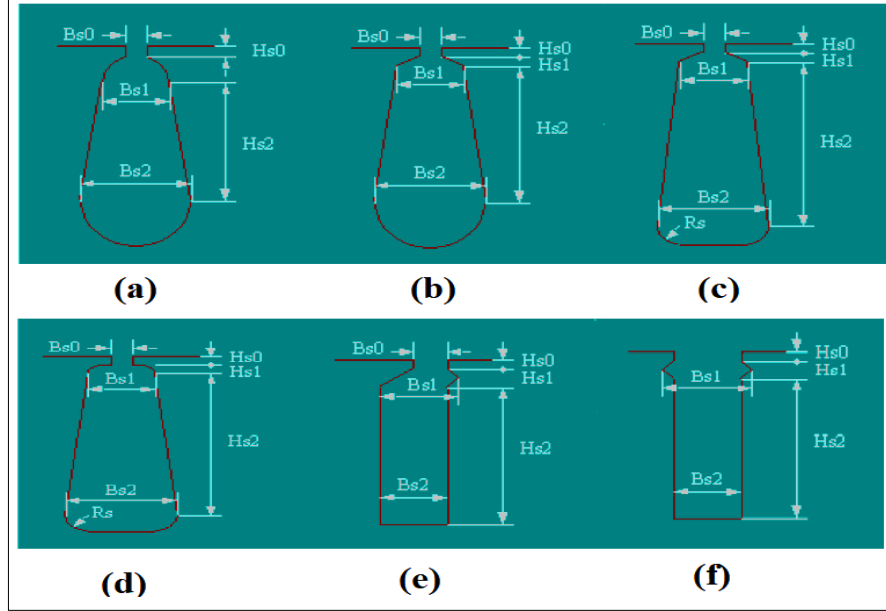
Stator dış çapı, iç çap, paket boyu ve çelik istifleme faktörü gibi parametrelerin belirlendiği Şekil 3.19’da gösterilen ara yüzde stator çelik materyalinin türü tanımlanmış malzeme kütüphanesinden seçilebileceği gibi malzemenin B-H verileri, çekirdek kayıpları, kütle yoğunluğu gibi parametreleri biliniyorsa yeni materyal tanımlaması yapılabilir. Ayrıca stator çeliği üzerine işlenecek oyuk sayısı, oyuk şekli ve çekirdek uzunluğu boyunca oyuk eğim açısı (skew) tanımlamaları bu ara yüzde yapılmaktadır.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Dia...	3721	mm	3721mm
Inner Diam...	3578	mm	3578mm
Length	396	mm	396mm
Stacking F...	0.97		
Steel Type	M530-50A		
Number of...	120		
Slot Type	3		
Skew Width	1		1

Stator

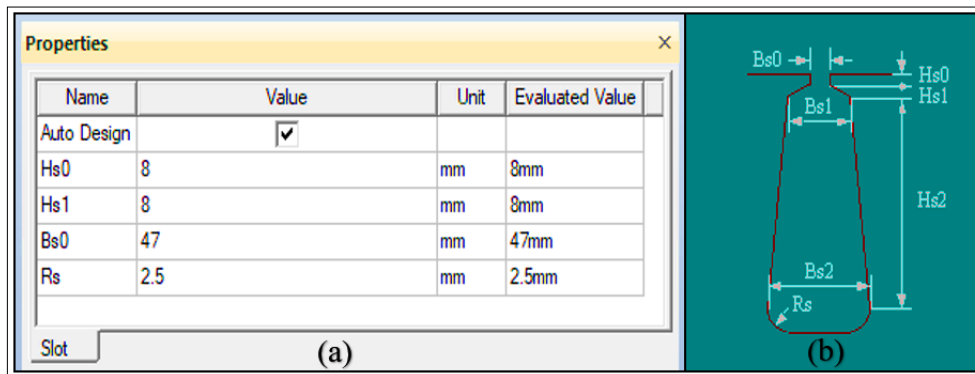
Şekil 3.19: Stator özellik penceresi.

Stator özellik penceresinde seçim özelliği bulunan altı adet oyuk tipi seçeneği Şekil 3.20’de görülmektedir. Oyuk tipi seçimi yapıldıktan sonra stator sekmesinin altında dallanan kısımdan oyuk boyutlandırma parametreleri girilebilmektedir.



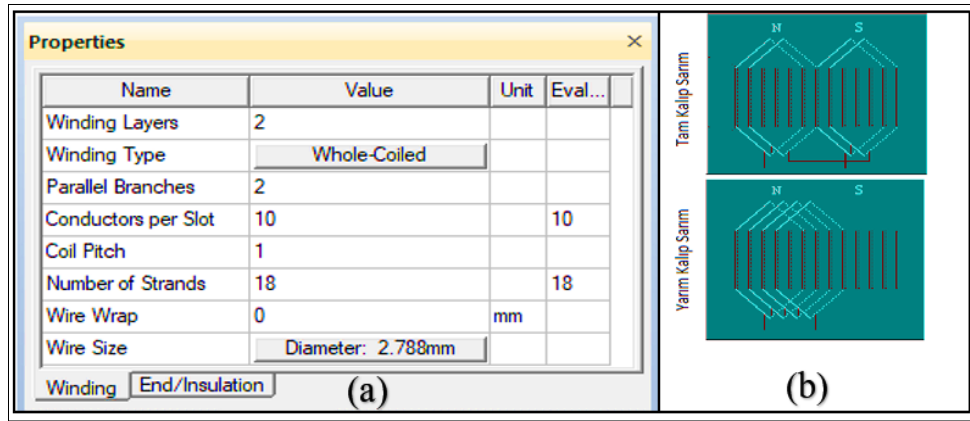
Şekil 3.20: Kullanılabilir oyuk modelleri, (a) Tip 1 oyuk modeli, (b) Tip 2 oyuk modeli, (c) Tip 3 oyuk modeli, (d) Tip 4 oyuk modeli, (e) Tip 5 oyuk modeli, (f) Tip 6 oyuk modeli.

Şekil 3.21’de oyuk uzunluk parametrelerinin tanımladığı oyuk özellik penceresi ve oyuk modeli görülmektedir. Tasarım tercihinine göre otomatik tasarım (auto design) kutucuğu işaretlenerek oyuk genişlik parametreleri modele uygun otomatik olarak atanabilmektedir. Yükseklik parametreleri Hs0, Hs1, Hs2 oyuk dış açıklığı Bs0 ve oyuk gövde yuvarlaklık parametresi Rs kullanıcının girişine bırakılmıştır.



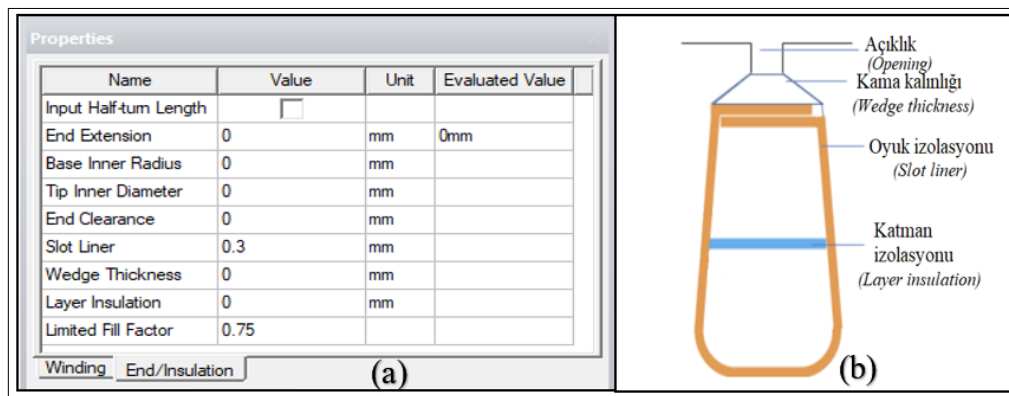
Şekil 3.21: (a) Oyuk özellikleri penceresi, (b) Oyuk modeli.

Stator sekmesinin altındaki kısımda sarım bilgilerinin girildiği arayüz bulunmaktadır. Oyukların katman sayısı, sargı tipi, sargı paralel kol sayısı, bir oyuktaki iletken sayısı, sargı adımı, bir iletkende bulunan damar sayısı, tel sarma genişliği, tel boyutu gibi parametreler sarım özellik penceresindeki sarım sekmesinden giriş yapılmaktadır. Katman sayısı seçimi bir ve ya iki olmalıdır. Şekil 3.22’de sarım özellikleri penceresi ve sargı çeşitleri gösterilmiştir. RMXprt programına tanımlı tam kalıp ve yarım kalıp sarım seçenekleri bulunduğu gibi kullanıcının sarım tanımı yapabileceği sargı editörü seçeneği de mevcuttur.



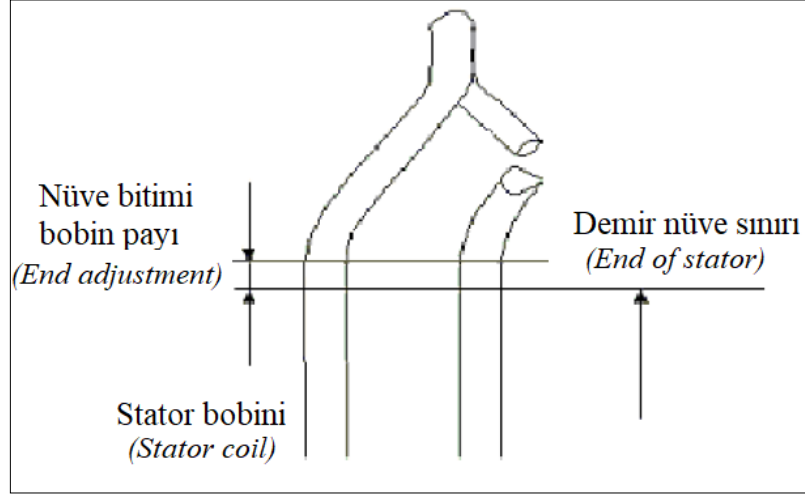
Şekil 3.22: (a) Sarım özellikleri penceresi, (b) Sargı çeşitleri.

Sarım özellik penceresinde sonlandırma ve yalıtım sekmesinde sarım sonlandırma parametreleri ve yalıtkan malzeme kalınlık parametreleri girilen arayüz mevcuttur. Şekil 3.21’de oyukta bulunan yalıtım ve sonlandırma parametrelerinin tanımlandığı pencere ve gösterilen oyuk modelinde katmanlar arası yalıtım malzemesi, oyuk yalıtım malzemesi, oyuk ağız açıklığı, kama kalınlığı gibi parametreler gösterilmektedir. Sınırlandırılmış doldurma faktörü net oyuk alanının kullanım yüzdesini ifade etmektedir.



Şekil 3.23: (a) Yalıtım ve sonlandırma penceresi, (b) Oyuk ve oyuk yalıtımları.

Şekil 3.24'te verilen stator bobini için demir nüve sınırı ve sarım sonlarında stator dışına çıkan bobin için bırakılan pay uzunlukları gösterilmiştir. Stator dışına çıkan sarımlar makinanın manyetik eşdeğer uzunluğunu artırarak manyetik akı kaçaklarını ve makine tork değerini etkilemektedir.



Şekil 3.24: Bobin sarım sonu modeli [83].

3.2.3.5 Rotor Özellik Penceresi

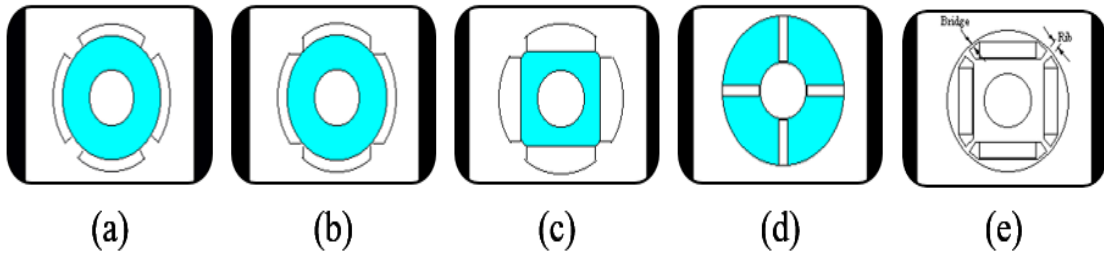
Sabit mıknatıslı senkron generatör rotor çevresinde ya da rotor içinde gömülü mıknatıslardan oluşan çelik lamineli olarak imal edilmektedir. Manyetik alan kaynağı olan mıknatıslar, dışarıdan uygulanan dönme momenti ile birlikte stator sarımlarında alan değişimi oluşturur ve bu sayede gerilim indüklenir. Rotor ana parametrelerinden; mıknatıs dahil dış çap, iç çap, rotor uzunluğu, rotor çelik tipi, istifleme faktörü, kutup tipi gibi parametreler Şekil 3.25'te yer alan rotor özellik penceresinden tanımlanabilmektedir. Çelik tipi tanımlanmış malzeme kütüphanesinden seçilebileceği gibi kullanıcı tarafından materyal ekleme özelliği de bulunmaktadır. İstifleme faktörü rotor kesit alanının, laminasyonlar arasındaki yalıtılmış çelik alanına oranını ifade etmektedir.

Name	Value	Unit	Evaluated Val...
Outer Diameter	3572.62	mm	3572.62mm
Inner Diameter	2242	mm	2242mm
Length	396	mm	396mm
Steel Type	M530-50A-		
Stacking Factor	0.97		
Pole Type	1		

Rotor

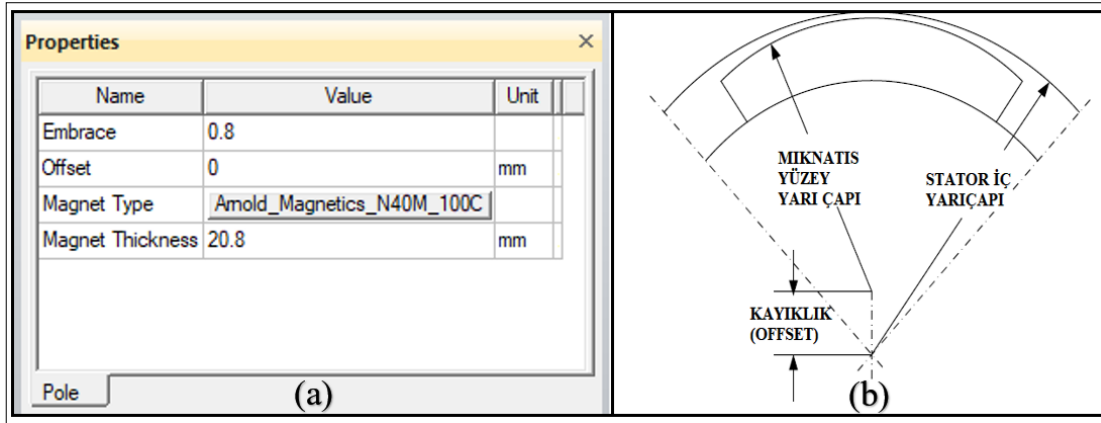
Şekil 3.25: Rotor özellikleri penceresi.

Ayrıca RMxprt'te SMSG'ler için Şekil 3.24'de gösterilen beş adet seçilebilir kutup tipi içermektedir. Çalışmada tork dalgalanmasını en aza indirmek için tip 1 kutup modeli seçilmiştir [84].



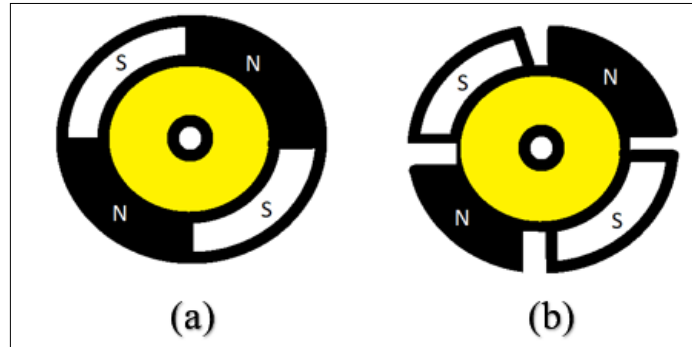
Şekil 3.26: Kullanılabilir kutup modelleri, (a) Tip 1 kutup modeli, (b) Tip 2 kutup modeli, (c) Tip 3 kutup modeli, (d) Tip 4 kutup modeli, (e) Tip 5 kutup modeli.

Rotor özellikleri sekmesinin altında bulunan özellikler kısmından kutup parametrelerinin belirlendiği arayüz ve rotorun merkezine göre kayıklık değeri (offset) Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27: (a) Kutup özellikleri penceresi, (b) Mıknatıs kayıklığı [85].

Ayrıca Şekil 3.27’de kutup özellikleri penceresinden, mıknatısın rotor yüzeyini kaplama oranı (embrace), mıknatıs tipi ve mıknatıs kalınlık parametrelerinin tanımlamaları yapılmaktadır. Şekil 3.28’de mıknatısların rotor yüzeyini kaplama oranları gösterilmektedir. Sarı olan kısımlar rotor kısmı olup siyah ve beyaz olan kısımlar sabit mıknatısları ifade etmektedir.

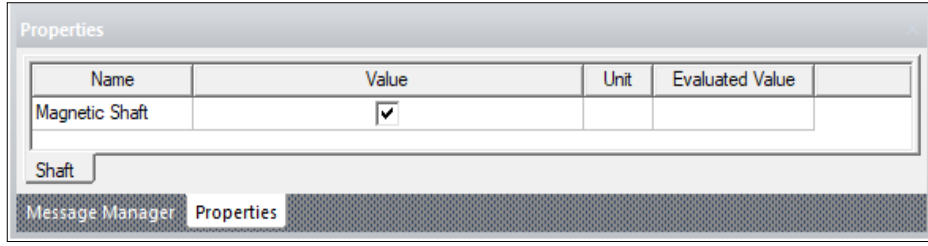


Şekil 3.28: Mıknatısların rotor yüzeyinde kapladığı alan, (a) Kaplama oranı 1, (b) Kaplama oranı 0,8.

Şekil 3.28’de görüldüğü gibi rotor yüzey kaplama oranı 1 seçildiğinde mıknatıslar rotor çevresini tam olarak kaplamaktadır. Rotor yüzey kaplama oranı 0,8 seçilmiş ise rotor çevresinin %80’inin mıknatısla çevrili olduğu görülmektedir.

3.2.3.6 Mil Özellik Penceresi

Rotor mili özellik penceresi, Şekil 3.29’da gösterilmekte olup milin manyetik malzeme olup olmadığını ifade etmek için işaretlenebilen kutucuktan oluşmaktadır.

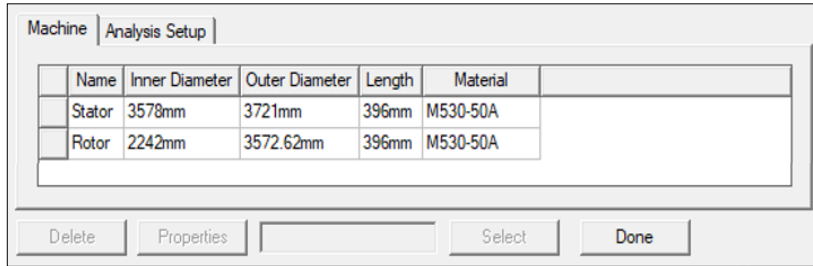


Şekil 3.29: Mil özellik penceresi.

Mil malzemesinin manyetik özellikte olması rotor üzerinden geçen manyetik akı yollarının daha düzenli akmasını sağlamaktadır.

3.2.3.7 Analiz Penceresi

Analiz penceresinin altında makine sekmesi, ana özellikleri tanımlanan makinede; stator iç çap, rotor iç çap, dış çap, paket boyu ve malzeme bilgilerinin özetini içermektedir. Gerekirse düzenlemeler Şekil 3.30'daki arayüzden yapılabilmektedir.



Şekil 3.30: Makine özet arayüzü.

Analiz penceresinin altında genel analiz kurulumu sekmesinde ise tasarlanan makinenin motor veya generatör olduğunu tanımlayan operasyon türü, sonsuz bara veya bağımsız generatör seçiminin mevcut olduğu mekanik yük tipi, makinanın mekanik veya elektriksel nominal çıkış gücü, nominal hat gerilimi, nominal hızı ve çalışma sıcaklığı gibi parametreler Şekil 3.31'de yer alan arayüzde düzenlenmektedir. Bunun yanında ASSM (Adjustable Speed Synchronus Machine) sekmesinde makinanın güç faktörü ve analizin gerçekleştirileceği domain türü (zaman-frekans) belirlenmektedir.

General | ASSM

Name	Value	Unit	Evaluat...	Read-only
Name	Setup 1			<input type="checkbox"/>
Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
Operation Type	Generator			<input type="checkbox"/>
Load Type	Independent Generator			<input type="checkbox"/>
Rated Output ...	1000	kW	1000kW	<input type="checkbox"/>
Rated Voltage	690	V	690V	<input type="checkbox"/>
Rated Speed	60	rpm	60rpm	<input type="checkbox"/>
Operating Tem...	75	cel	75cel	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Tamam iptal Uygula

Şekil 3.31: Genel makine parametre penceresi.

3.2.3.8 Çözüm Verileri

RMxprt çözümü tamamlandıktan sonra analiz çıktıları, çözüm verisi (solution data) ekranı yardımıyla grafik ve tablo verileri olarak görüntülenebilir. Çözüm veri ekranı; performans, tasarım sayfası ve eğriler olmak üzere üç sayfadan oluşmaktadır. Performans bölümü tasarım sayfası; verilerin ana başlıklar halinde özetini, tasarım sayfası tasarlanan makinenin giriş çıkış tüm verilerini, eğriler sayfası ise kritik makine parametrelerinin grafik olarak incelenebildiği bölümdür. Performans bölümü sonlu elemanlar yöntemi giriş verileri, tam yük çalışma, materyal kullanımı, yüksüz çalışma, sabit mıknatis, rotor, stator oyuk verisi, stator sarım verisi, kararlı durum verisi olmak üzere dokuz ana başlıktan oluşmaktadır. Örnek olarak Şekil 3.32’de yüksüz çalışma verileri gösterilmektedir.

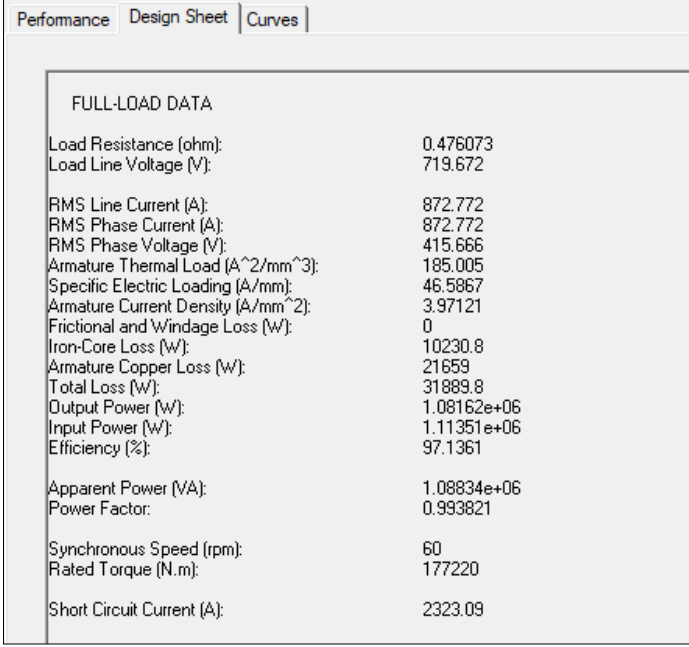
Performance | Design Sheet | Curves

Data: No-Load Operation

	Name	Value	Units	Description
1	Stator-Teeth Flux Density	1.82937	tesla	
2	Stator-Yoke Flux Density	1.83755	tesla	
3	Rotor-Yoke Flux Density	0.06345	tesla	
4	Air-Gap Flux Density	0.879265	tesla	
5	Magnet Flux Density	0.89778	tesla	
6	Stator-Teeth Ampere Turns	419.414	A.T	
7	Stator-Yoke Ampere Turns	154.359	A.T	
8	Rotor-Yoke Ampere Turns	1.07438	A.T	
9	Air-Gap Ampere Turns	3793.54	A.T	
10	Magnet Ampere Turns	-4366.76	A.T	
11	Leakage-Flux Factor	1		
12	Stator Yoke Correction Factor	0.226575		Correction factor for stator yoke magnetic circuit length
13	Rotor Yoke Correction Factor	0.73602		Correction factor for rotor yoke magnetic circuit length
14	Fundamental Back emf	798060	mV	
15	THD of Back emf	0.438632	%	
16	Cogging Torque	9.0974e-09	NewtonMeter	

Şekil 3.32: Yüksüz çalışma performans verileri.

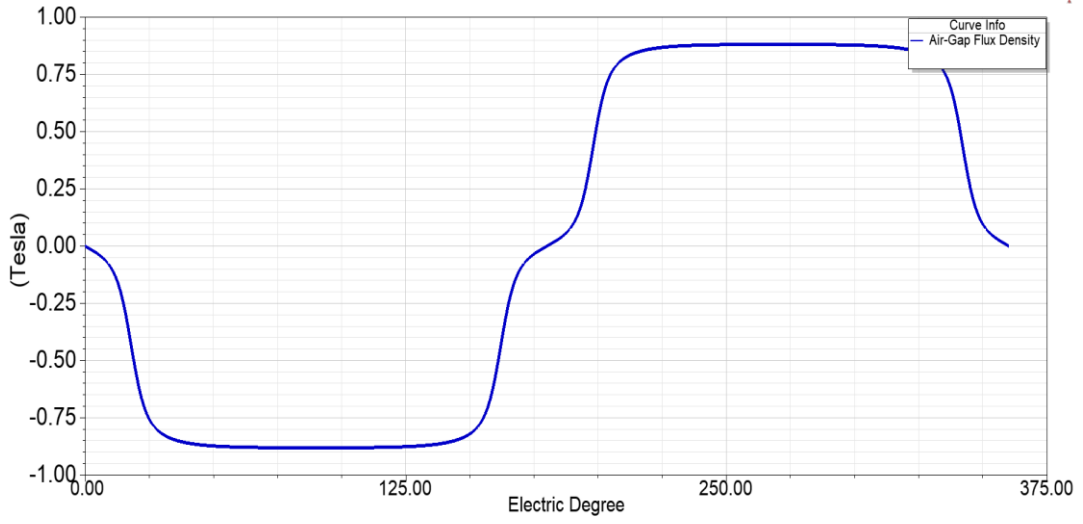
Tasarım sayfası genel makine, stator, rotor, sabit mıknatıs verisi, materyal kullanımı, kararlı durum verisi, yüksüz manyetik durum verisi, tam yük verisi, sargı düzeni, geçici sonlu elemanlar yöntemi giriş verileri olmak üzere on ana başlıktan oluşmaktadır. Örnek olarak Şekil 3.33’de raporun tam yük verilerinin yer aldığı bölüm görülmektedir.



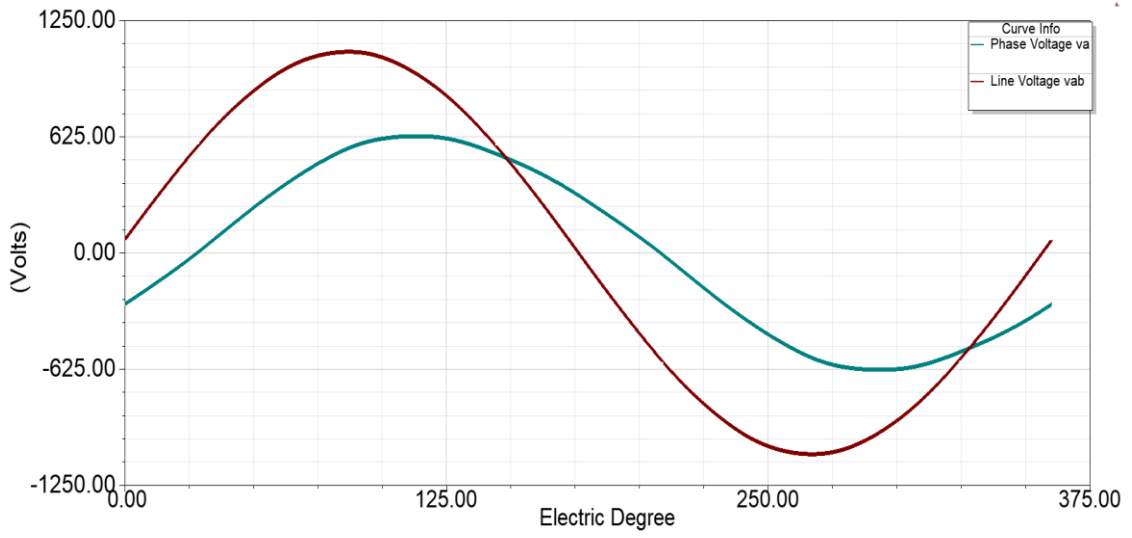
FULL-LOAD DATA	
Load Resistance (ohm):	0.476073
Load Line Voltage (V):	719.672
RMS Line Current (A):	872.772
RMS Phase Current (A):	872.772
RMS Phase Voltage (V):	415.666
Armature Thermal Load (A ² /mm ³):	185.005
Specific Electric Loading (A/mm):	46.5867
Armature Current Density (A/mm ²):	3.97121
Frictional and Windage Loss (W):	0
Iron-Core Loss (W):	10230.8
Armature Copper Loss (W):	21659
Total Loss (W):	31889.8
Output Power (W):	1.08162e+06
Input Power (W):	1.11351e+06
Efficiency (%):	97.1361
Apparent Power (VA):	1.08834e+06
Power Factor:	0.993821
Synchronous Speed (rpm):	60
Rated Torque (N.m):	177220
Short Circuit Current (A):	2323.09

Şekil 3.33: RMxpert tasarım sayfası tam yük verisi.

Eğriler sayfasında program tarafından kritik parametreler otomatik olarak çizdirilmekte olup, RMxpert aracı kullanıcının istediğine göre yeni grafik çizimine müsade etmektedir. Örnek olarak hava aralığı akı yoğunluğunun elektriksel açıya göre değişim grafiği Şekil 3.34’de, nominal hızda sargılarda indüklenen faz gerilim ve hat geriliminin elektriksel açıya göre değişim grafiği Şekil 3.35’de gösterilmiştir.



Şekil 3.34: Hava aralığı akı yoğunluğu grafiği.



Şekil 3.35: İndüklenen voltaj grafiği.

4. SMSG MODELİNİN ELEKTROMANYETİK TASARIMI

Hedef tasarım için belirlenen ve Tablo 3.3'te yer alan tasarım giriş parametreleri kullanılarak yapılan analitik tasarım hesaplamaları sonucunda elde edilen önemli boyut parametreleri Tablo 4.1'de görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda RMXprt modülüne tasarım verileri girilerek hedeflenen tasarım, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile elektromanyetik analize hazır hale getirilmektedir. RMXprt aracı program arka planında analitik işlemler ve bir takım hesaplamalar yaparak tasarım hakkında ön bilgiler vermektedir. Bu sayede 2B ve 3B SEY analizleri için hızlı bir kontrol mekanizması olarak işlev görmektedir.

Tablo 4.1: Analitik hesaplama sonucu boyut parametreleri.

Parametre	Değer	Birim
Rotor Çapı	3576	mm
Makine Paket Boyu	396	mm
Hava Aralığı	2,687	mm
Stator İç Çapı	3583	mm
Mıknatıs Bağlı Genişliği	0,8	%
Oyuk Dış Genişliği	47	mm
Stator Boyunduruk Yüksekliği	27,8	mm
Rotor Boyunduruk Yüksekliği	27,8	mm
Mıknatıs Yüksekliği	20,6	mm
Stator Dış Çapı	3728	mm
Rotor Maksimum İç Çapı	3480	mm

4.1 Rmxprt Modülü İle Ön Tasarımı

100 kutuplu, 120 oyuk, 3 fazlı doğrudan sürürlü makinanın başlangıç verileri ve hesaplanan boyut parametreleri bu modüle tanıtılarak model üzerinde ikinci bir hesaplama yapılmıştır. Bu veriler aynı zamanda ilk hesaplamaların kontrolü niteliğinde olup doğru modeli oluşturmada yarar sağlamıştır.

4.1.1 Genel Makine Parametreleri

Kutup sayısı belirlenirken makine frekansı, makine devri ve kutup sayısının oluk sayısına oranı göz önünde bulundurularak en optimal seçim yapılmıştır. Devre tipi sargılarının bağlantı şekli olan yıldız bağlantı, hat gerilimini yüksek tutulması amacıyla belirlenmiştir. Sürtünme ve rüzgar kayıpları makinanın giriş gücüyle ilgili bir parametre olduğu için

hesaplamlarda ihmal edilmiştir. Makine parametreleri Tablo 4.2’de yer aldığı gibi belirlenmiştir.

Tablo 4.2: Genel makine verileri.

Parametre	Değer	Birim
Kutup Sayısı	100	
Sürtünme Kaybı	0	W
Rüzgar Kaybı	0	W
Referans Hızı	60	d/d
Devre Tipi	Y3	

4.1.2 Stator Parametreleri

İstifleme faktörü üretim katsayısı olarak 0,97 olarak seçilmiştir [86]. Stator oyuk eğimi yapılan araştırmalar sonucunda 1 oyuk adımı olarak belirlenmiştir [87]. Oyuk şekli olarak tip 3 seçilmiştir [88]. Ayrıca stator dış çapı Eşitlik 3.58’de stator iç çapı Eşitlik 3.9 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Oyuk doluluk oranı yalıtım malzemeleri ve sarım kolaylığı için %75 olarak ön görülmüştür. Özetle stator tasarım parametreleri Tablo 4.3’te yer aldığı gibi belirlenmiştir.

Tablo 4.3: Stator verileri.

Parametre	Değer	Birim
Dış Çap	3728	mm
İç Çap	3583	mm
Paket Boyu	396	mm
İstifleme Faktörü	0,97	
Çelik Tipi	M530-50A	
Oyuk Sayısı	120	
Oyuk Tipi	3	
Oyuk Eğimi (Skew)	1	Oyuk
Oyuk Doluluk Oranı	75	%

4.1.3 Oyuk Boyutlandırma Parametreleri

Şekil 3.21’de yer alan oyuk parametreleri Tablo 4.4’te yer alan verilere göre belirlenmiştir.

Tablo 4.4: Oyuk verileri.

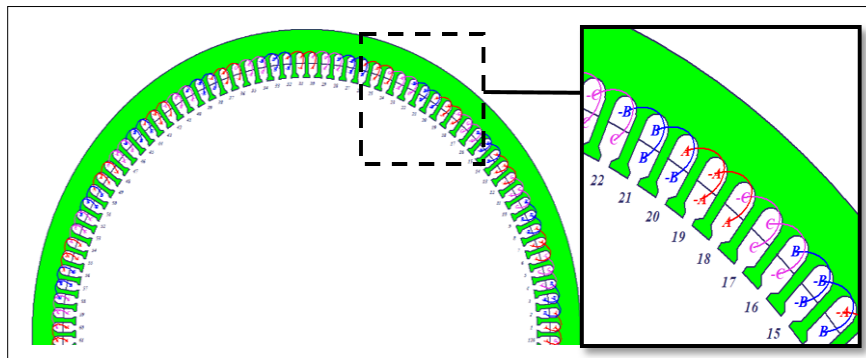
Parametre	Değer	Birim
Hs0	8	mm
Hs1	8	mm
Hs2	31,57	mm
Bs0	47	mm
Bs1	47,46	mm
Bs2	49,11	mm
Rs	2,5	mm

4.1.4 Sarım Parametreleri

Makine oyuklarındaki sargı katmanı çift seçilmiştir [86]. Makinenin belirli gücün üzerinde olması, daha iyi performans, yüksek indüklenme gerilimi, daha ekonomik olması gibi avantajları barındırmaktadır. Sargı tipi tam kalıp olarak tercih edilmiştir. Paralel kol sayısı yüksek akımı bölmek için 2 seçilmiştir. Eşitlik 3.21’de hesaplanan oyuk başına iletken sayısı ve Eşitlik 3.32’de hesaplanan iletken çapı değerleri yeniden düzenlenerek Tablo 4.5’de yer alan sarım verileri oluşturulmuştur.

Tablo 4.5: Sarım verileri.

Parametre	Değer	Birim
Sargı Katmanları	2	
Sargı Tipi	Tam Kalıp	
Paralel Kol Sayısı	2	
Oyuk Başına İletken Sayısı	11	
Bobin Adımı	1	oyuk
İletken Damar Sayısı	18	
İletken Çapı	2,788	mm



Şekil 4.1: Stator ve bobin yerleşimi yarım görünüm.

4.1.5 Rotor Boyutlandırma Parametreleri

Rotor kutup tipi, Şekil 3.26’da yer modeller arasından tip 1 olarak seçilmiştir. Rotor boyutlandırma parametreleri Tablo 4.6’da yer alan verilere göre belirlenmiştir.

Tablo 4.6: Rotor verileri.

Parametre	Değer	Birim
Dış Çap	3577,62	mm
İç Çap	281	mm
Paket Boyu	396	mm
Çelik Tipi	M530-50A	
İstifleme Faktörü	0,97	
Kutup Tipi	1	

4.1.6 Kutup Parametreleri

Eşitlik 3.14’te kutup örtüşmesi, Eşitlik 3.56’de ise mıknatıs kalınlığı belirlenmiştir. Genel kutup verileri Tablo 4.7’de yer almaktadır.

Tablo 4.7: Kutup verileri.

Parametre	Değer	Birim
Örtüşme (Embrace)	0.8	
Kayıklık (Offset)	0	mm
Mıknatıs Tipi	Arnold Magnet N40M_100C	
Mıknatıs Kalınlığı	20.6	mm

4.1.7 Analiz Kurulum Parametreleri

Tasarımı yapılan makinanın tipi, gücü, anma voltajı, çalışma sıcaklığı, anma hızı gibi analiz verileri Tablo 4.8’de yer almaktadır.

Tablo 4.8: Analiz verileri.

Parametre	Değer	Birim
Operasyon Tipi	Generatör	
Yük tipi	Bağımsız Generatör	
Anma Gücü	1000	kW
Anma Hat Voltajı	690	V
Anma Hızı	60	d/d
Çalışma Sıcaklığı	75	Celsius

4.1.8 Analiz Çözüm Verileri

Analitik hesaplamalar sonucunda bulunan parametreler yardımcı modül kullanılarak tekrardan hesaplamaya tabi tutulmuştur. Böylece teorik hesaplama ile elektromanyetik çözücü arasında kontrol basamağı olarak görev yapmaktadır. Çözüm sonucunda elde edilen bazı önemli analiz çıkış verileri Tablo 4.9'da yer almaktadır.

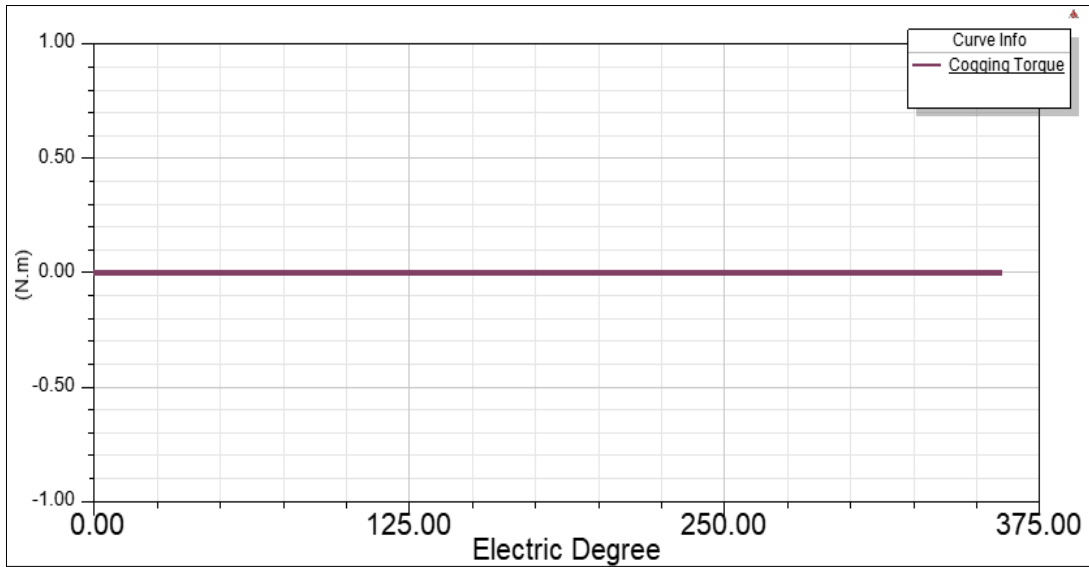
Tablo 4.9: Bazı önemli analiz çıkış verileri.

Parametre	Değer	Birim
Hat Voltajı	764,27	V
Hat Akımı (RMS)	928,86	A
Yük Direnci	0,47	Ω
Toplam Kayıp	36915	W
Demir Kaybı	10038	W
Çıkış Gücü	1,22	MW
Verim	97,06	%
Toplam Net Ağırlık	31844,3	Kg
Anma Torku	200418	Nm
Armatür Akım Yoğunluğu	4,217	A/mm ²
Voltaj Harmonik Bozulma (THD)	0,43	%
Tutma Torku	$9,11 \times 10^{-9}$	Nm
Stator Sargı Faktörü	0,933	
Oyuk Doluluk Oranı	79	%
Stator Dış Akı Yoğunluğu	1,82	T
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu	1,76	T
Hava Boşluğu Akı Yoğunluğu	0,88	T
Miknatıs Akı Yoğunluğu	0,89	T

Tablo 3.3'te bulunan makina tasarımı giriş verileri ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler burada hesaplanan analiz çıkış verileriyle karşılaştırılırsa sonuçların yakın olduğu ve kabul edilebilir limitlerde oldukları görülmektedir. Gerilim ve akım değerlerinin analiz sonucunda daha yüksek çıkması bu çalışmada uygun görülmüş, güç düşümü ve kayıpların hesap edilerek uygulama için esnek bir çalışma alanı oluşturulmuştur. Bu yüzden sarım miktarı artırılmıştır. Artan sarım miktarı sayesinde makine gücü artmış analiz sonucunda 1,22 MW olarak hesaplanmıştır. Artan generatör gücü ihtiyaç duyulan tork değerini hesaplanan değere göre bir miktar artırmış olup 200418 Nm olarak bulunmuştur. Bunun yanı sıra ön görülen sargı faktörü değeri hesaplamalarda belirtildiği gibi 0,933 olarak bulunmuştur. Ayrıca analiz sonucunda stator dış akı yoğunluğu için hesaplamada izin verilen değer aralığı 1,6 T ile 2 T arasında verilmiş olup hesaplamalar sonucu 1,82 T değeri program tarafından üretilmiştir. Hava aralığı akı yoğunluğu ve mıknatıs akı yoğunluğu için ön görülen değer 0,95 T olup analiz sonucunda hava aralığının akı yoğunluğu 0,88 T, mıknatısın akı yoğunluğu 0,89 T olarak üretilmiştir.

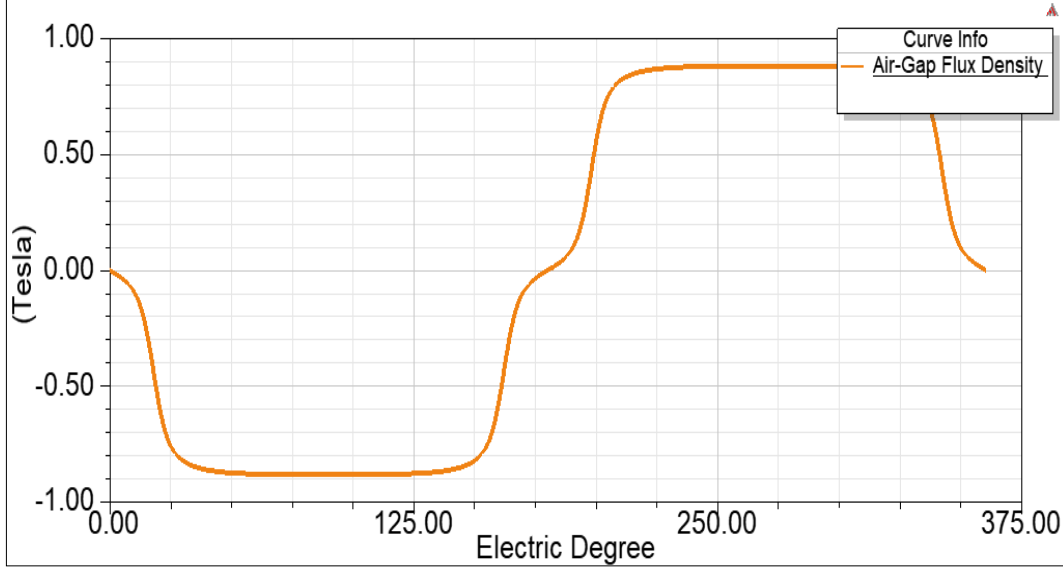
4.1.9 Analiz Çözüm Eğrileri

Tutma torku generatörün dönme hareketini gerçekleştirdiği esnada mıknatıslarla oyuklar arasındaki çekme kuvveti olup istenmeyen bir etkidir [89]. Şekil 4.2'den de görüleceği gibi analiz verilerine göre hesaplanan tutma torku değeri $9,11 \times 10^{-9}$ Nm olarak bulunmuştur ve elektriksel açıya göre değişim grafiği neredeyse sıfır olarak hesaplanmıştır.



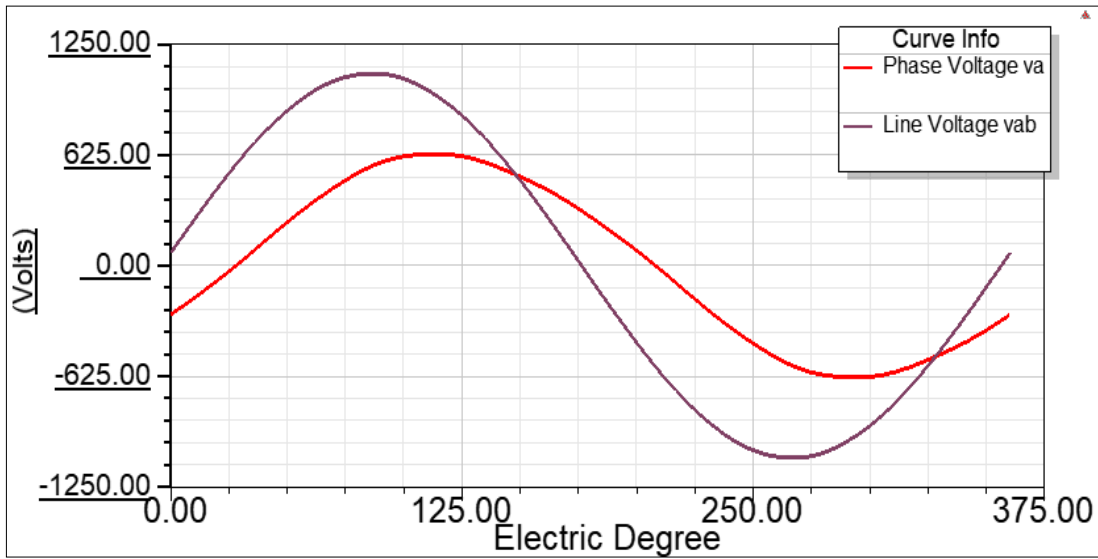
Şekil 4.2: Elektriksel açıya göre tutma torku.

Şekil 4.3’de hava aralığı akı yoğunluğu Tablo 3.5’te belirtildiği gibi çıkık kutuplu senkron makineler için izin verilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğuna uygun 0,88 T değerinde olduğu görülmektedir.

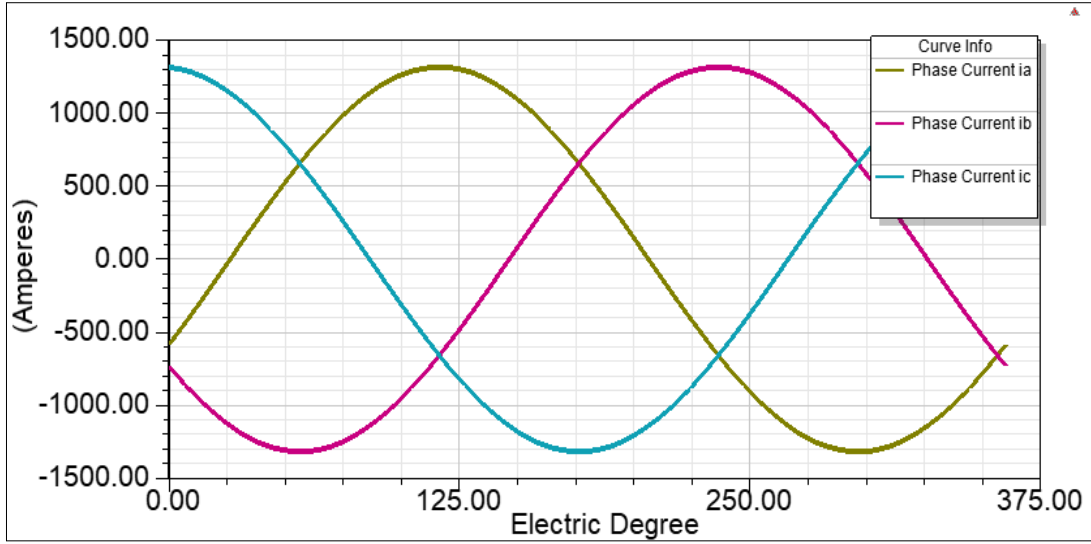


Şekil 4.3: Hava aralığındaki akı yoğunluğu.

Şekil 4.4’de nominal hızda yük altında faz voltajı ve hat voltajı grafiği, Şekil 4.5’de ise sargı akımları grafiği görülmektedir. Sinüs şekillerinin ideal formda olması düşük voltaj harmoniği olduğunu kanıtlar niteliktedir.



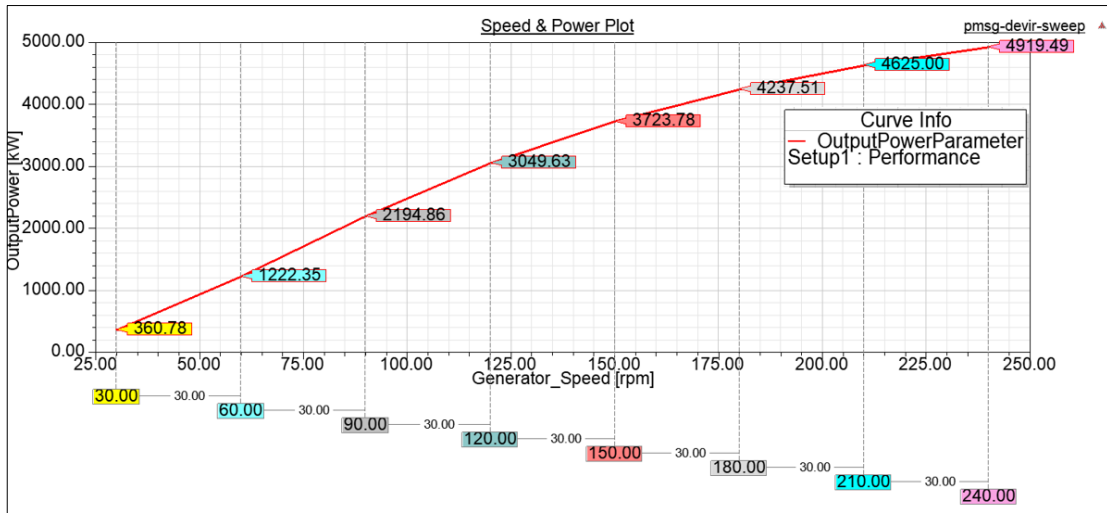
Şekil 4.4: Yük altında sargı gerilimleri.



Şekil 4.5: Yük altında sargı akımları.

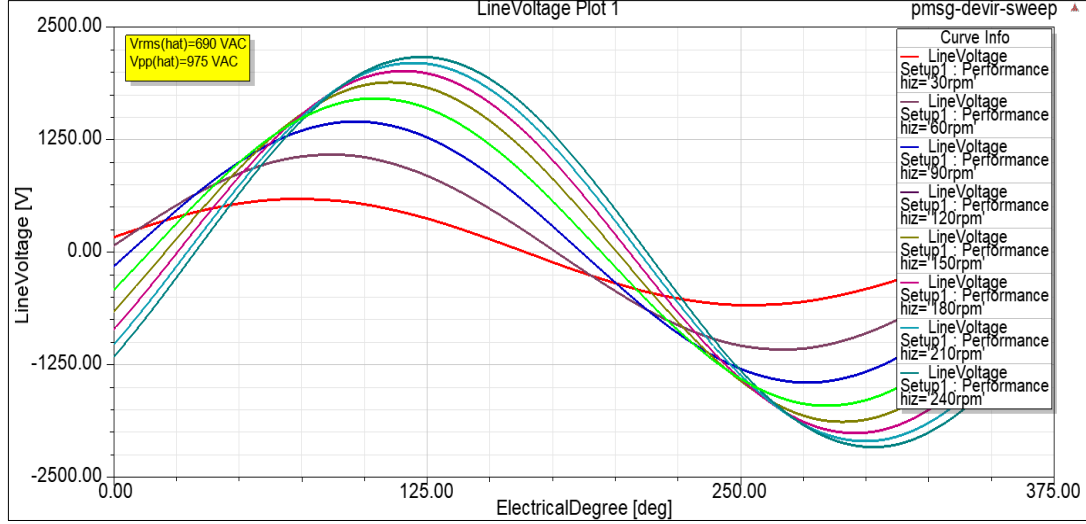
4.1.10 Tasarımın Değişken Devir Eğrileri

SMSG'ler aynı zamanda değişken devirli generatörler olarak bilinmektedir. Farklı hızlarda çıkış gücü, frekans ve voltaj değerleri değişiklik göstermektedir. Şekil 4.6'da yer alan devir-güç grafiğinde generatörün nominal deviri olarak belirlenen 60 d/d değerinde 1MW'ın üzerinde çıkış gücü sağladığı görülmektedir. Generatör çıkış gücünün generatör devrine göre ele alındığı grafikte 30 d/d ile 250 d/d arası incelenmiştir. Burada 180 d/d den sonra generatör gücünün artış hızının azaldığı ve 240 d/d seviyesinde neredeyse doyuma ulaştığı görülmektedir.



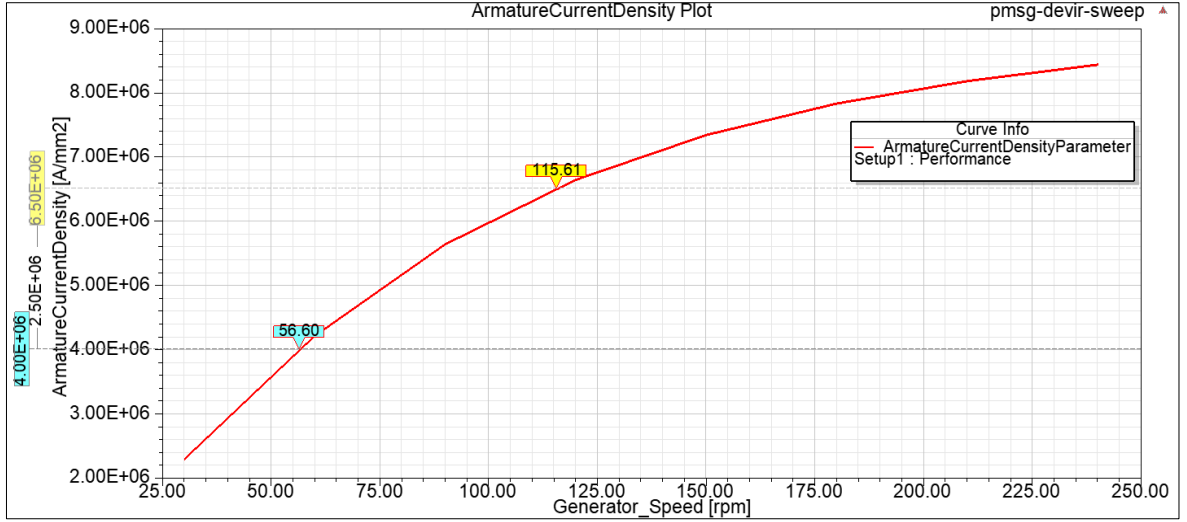
Şekil 4.6: Değişken devire göre çıkış gücü.

Şekil 4.7’de yer alan değişken devire göre voltaj hat grafiğinde generatör, 30 d/d hızında istenen nominal 690 V hat gerilimini sağlayamazken 60 d/d ve üstü değerlerde bu değeri karşıladığı görülmektedir.



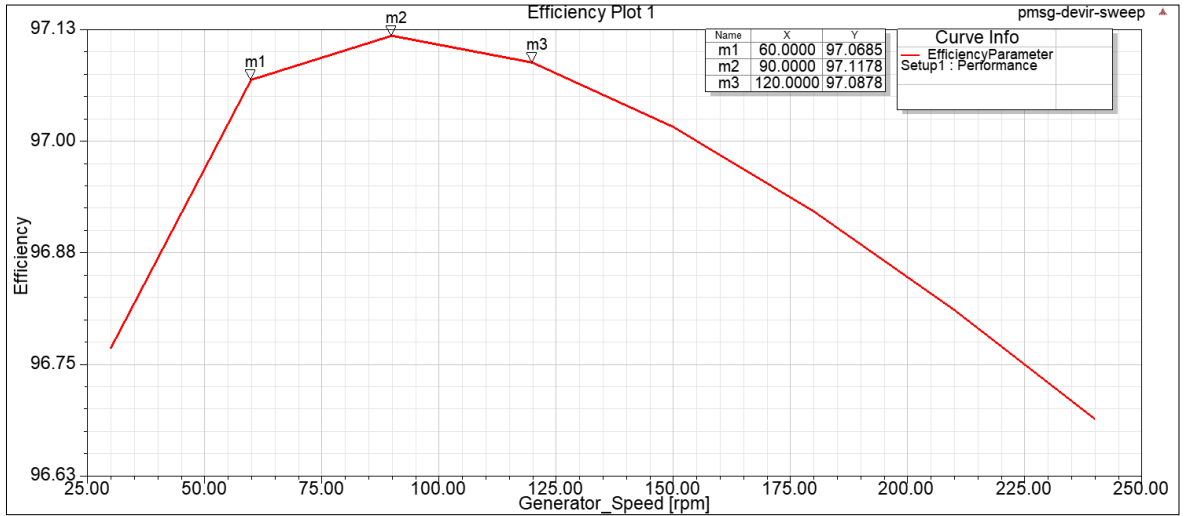
Şekil 4.7: Değişken devire göre hat voltajları.

Özel soğutma sistemi bulunmayan çıkık kutuplu senkron makinelerin veya SMSG’lerin izin verilen armatür akım yoğunluğu 4 ila 6,5 A/mm² arasındadır [75]. Armatür akım yoğunluğu makinenin gücüne ve tasarımına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 4.8’de değişken devire göre armatür akım yoğunluğu grafiği yer almaktadır. Armatür akım yoğunluğunun çok yüksek olması makinenin ısınmasına yol açmakta ve verimini düşürmektedir. Bu nedenle tasarımsal olarak akım yoğunluğu yüksek makineler için özel soğutma çözümleri uygulanmaktadır. Tasarlanan modelde yaklaşık 120 d/d’dan sonra soğutma sisteminin güçlendirilmesi, verim ve sıcaklık kaybı açısından uygun olacağı öngörülmüştür.



Şekil 4.8: Değişken devire göre armatür akım yoğunluğu.

Tasarlanan modelin Şekil 4.9’da değişken devir durumuna göre generatör verim eğrisi yer almaktadır. Generatör 60 d/d ile 120 d/d arasında yüksek verimde çalışmakta olup 120 d/d’den sonra veriminin düşmeye başladığı görülmektedir.



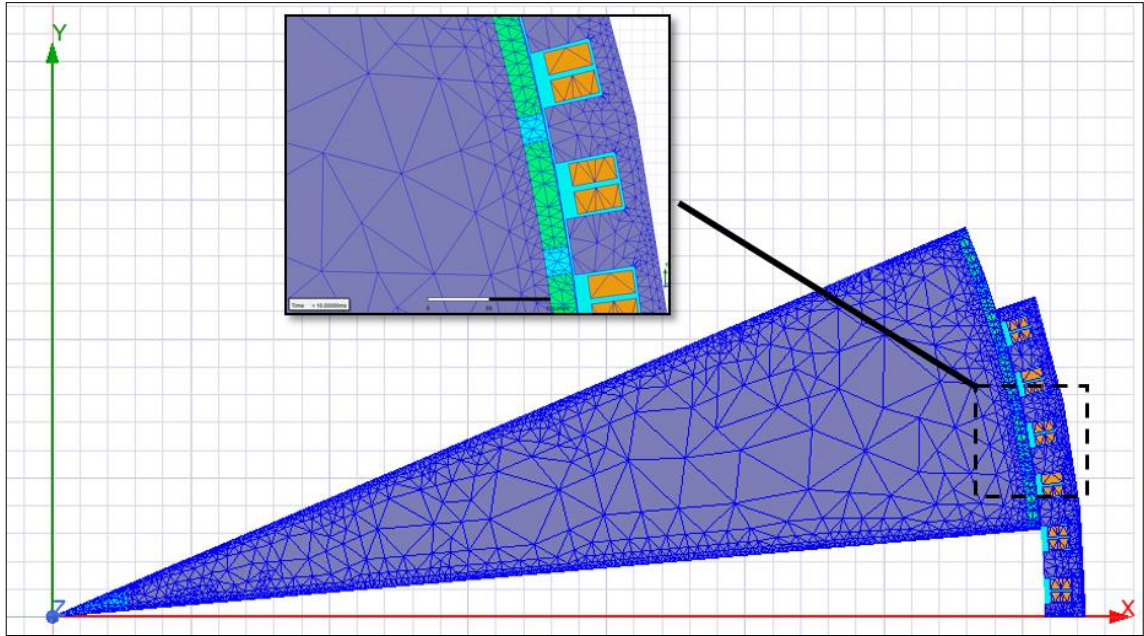
Şekil 4.9: Değişken devire göre generatör verimi.

4.2 2B ve 3B Elektromanyetik Tasarım

Yardımcı modül kullanımı ile analiz yapılmış, 2B ve 3B model oluşturmak için veriler kaydedilmiştir. SEY kullanılarak bu aşamada oluşturulan modelin elektromanyetik geçici durum analizleri, statik durum denklemleri gibi çözümler gerçekleştirilmektedir.

Tasarımı yapılan generatörün 2B ve 3B analizleri SEY kullanılarak elektromanyetik tabanlı analiz programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Program yardımıyla ilk olarak sonlu elemanlar metoduyla makine bileşenleri daha küçük hayali parçalara bölünerek farklı metotlarda kısmi diferansiyel denklemler sınır koşullarına göre çözdürülmüştür. Bu şekilde manyetik akı yoğunluğu, manyetik akı çizgileri, indüklenen hat voltajı gibi amaçlanan denklemlerin matematiksel davranışı incelenerek gerçeğe en yakın tasarım yapılmaya çalışılmıştır.

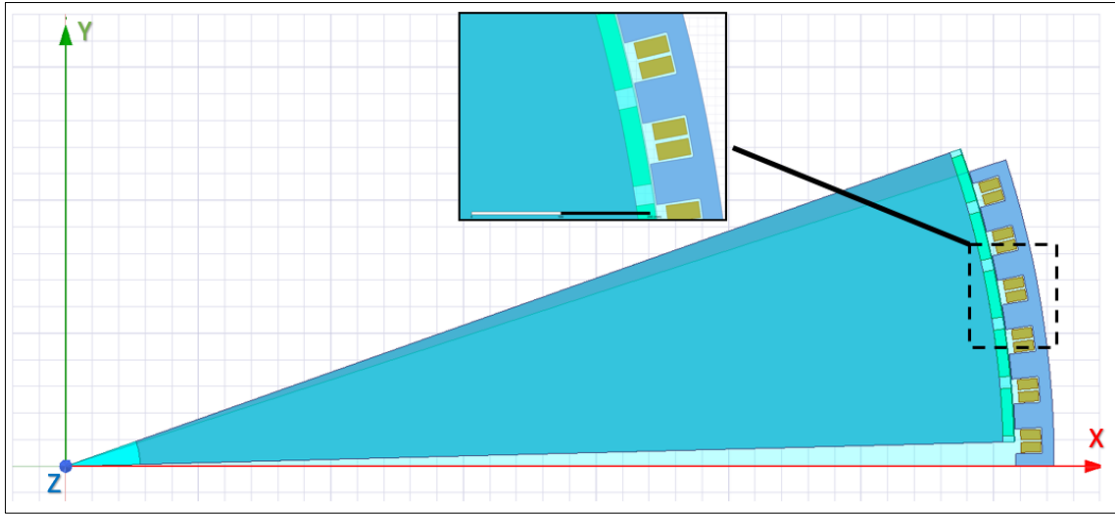
Çözümü yapılan denklemlerin gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için oluşturulan çözüm ağı makine boyutları ve kritik bölgeleri gözetilerek ayarlanmalıdır. Şekil 4.10'de yer alan 2B modelin çözüm ağı belirlenirken maksimum uzunluk değerleri girilerek oluşturulmuştur. Mıknatıs ve özellikle hava aralığı daha küçük yüzey alanı kapladığı için daha sık çözüm ağı tanımlanmıştır. Çözüm ağı sayısını artırmak belirli bir seviyeye kadar çözüm kalitesini artırarak elde edilen verileri gerçeğe yakın hale getirmektedir. Ancak belirli seviyenin üstünde çözüm ağı oluşturmak analiz kalitesinde iyileşme sağlayamadığı gibi analiz süresini uzatarak vakit ve enerji kaybına yol açmaktadır.



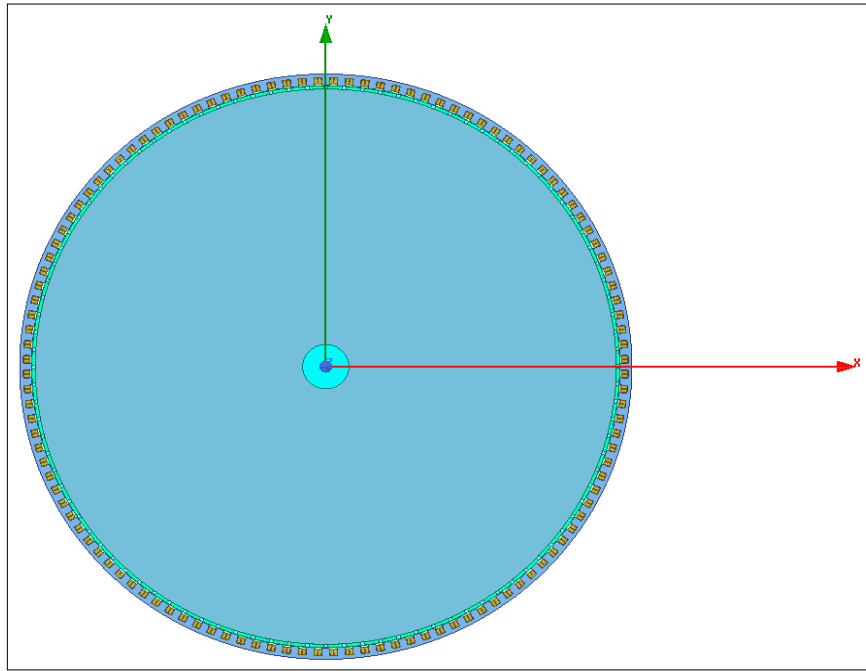
Şekil 4.10: Generatörün 2B çözüm ağı haritası.

Şekil 4.11'de yer alan generatörün 20 dilime bölünmüş halinin enine kesit alanı görülmektedir. Mavi renk tonundaki kısımlar manyetik çeliği, turuncu kısımlar bakır

sargıları, yeşil kısımlar sabit mıknatısları göstermektedir. Şekil 4.12’de 120 slot, 100 kutuplu generatörün tam model görseli yer almaktadır.



Şekil 4.11: Generatörün dilimli 2B enine kesit görseli.



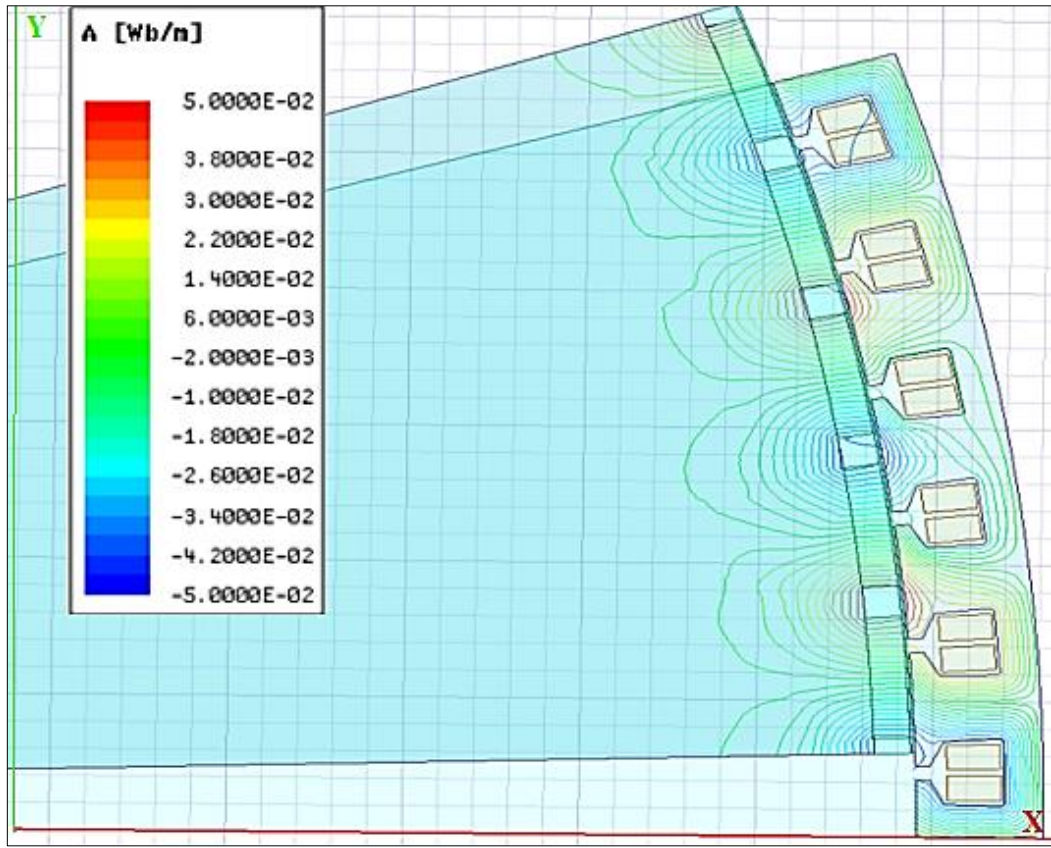
Şekil 4.12: Generatörün 2B tam model görseli.

4.2.1 Alan Haritaları ve Analiz Çözüm Eğrileri

Yüklenme testinin simülasyonunu gerçekleştirebilmek için sargı iç dirençleri istenen yük durumuna göre tanımlanmıştır. Tanımlanan bu değer sargı iç direnci ve yük direncinin

toplamını ifade etmektedir. Oluşturulan modelde sargı iç direnci anma yükünde 0,4865 ohm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer üç faz grubuna ayrı ayrı tanımlanmıştır. Analiz çözümüne geçmeden önce zamana göre değişen alanların hesaplanabilmesi için örnekleme süreleri belirlenmiştir. Zaman adımı olarak 0,2 ms, analiz durma zamanı 0,1 s belirlenmiştir. Süreler belirlenirken generatör gerilim sinyalinin periyodu dikkate alınmıştır. Çözüm ağı hesaplamalarının tamamlanmasının ardından potansiyel çözüm verilerinin anlamlı bir şekilde yorumlanması gerekmektedir. Hedeflenen veriler sonuçlar kısmında alan haritaları ve çözüm eğrileri oluşturularak anlamlı hale getirilmiştir.

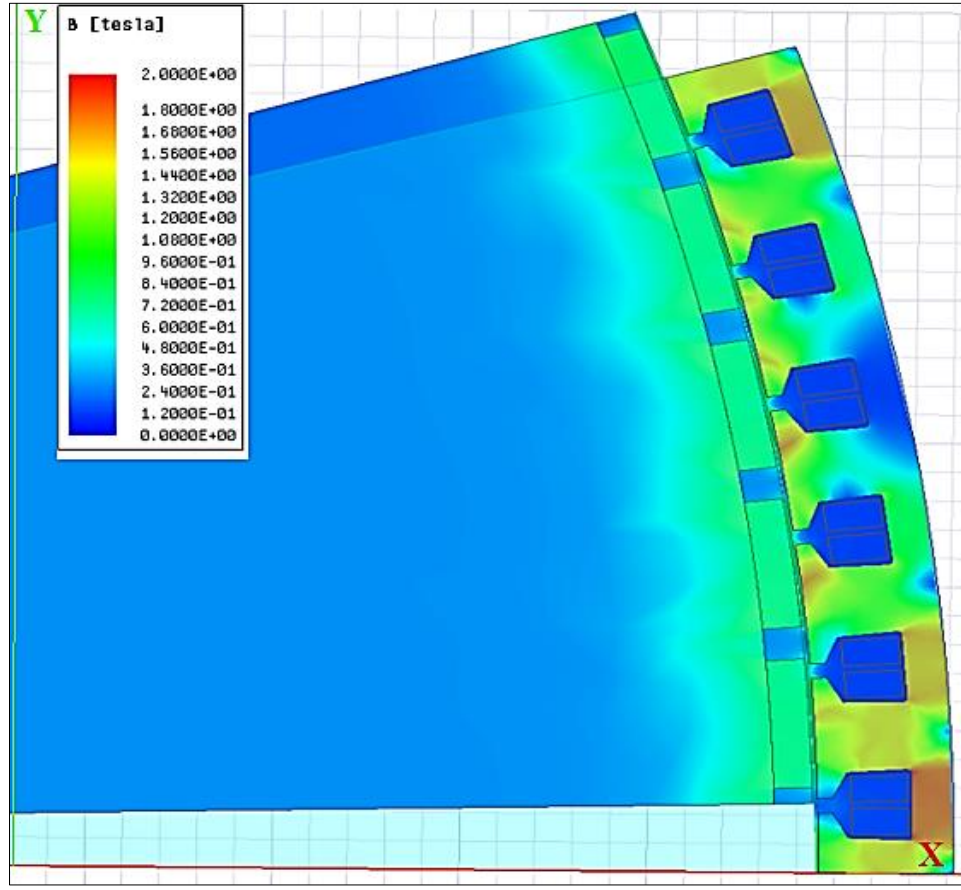
Şekil 4.13’de generatör modeli üzerinde oluşan manyetik akı çizgileri görülmektedir. Hava üzerinden yolunu tamamlayan kaçak akılar; geometri bütünlüğünün sağlanması, farklı stator-oyuk ve rotor tasarım çalışmaları ve akı bağlantısının belirlenmesinde akı çizgi haritasının incelenmesi önemlidir.



Şekil 4.13: Generatörün anma yükündeki akı çizgi haritası.

Generatörün manyetik akı yoğunluğu karakteristiği Şekil 4.14’de yer almaktadır. Generatör modeli üzerinde akı yoğunluğu maviden kırmızıya değişen renk spektrumuyla ifade

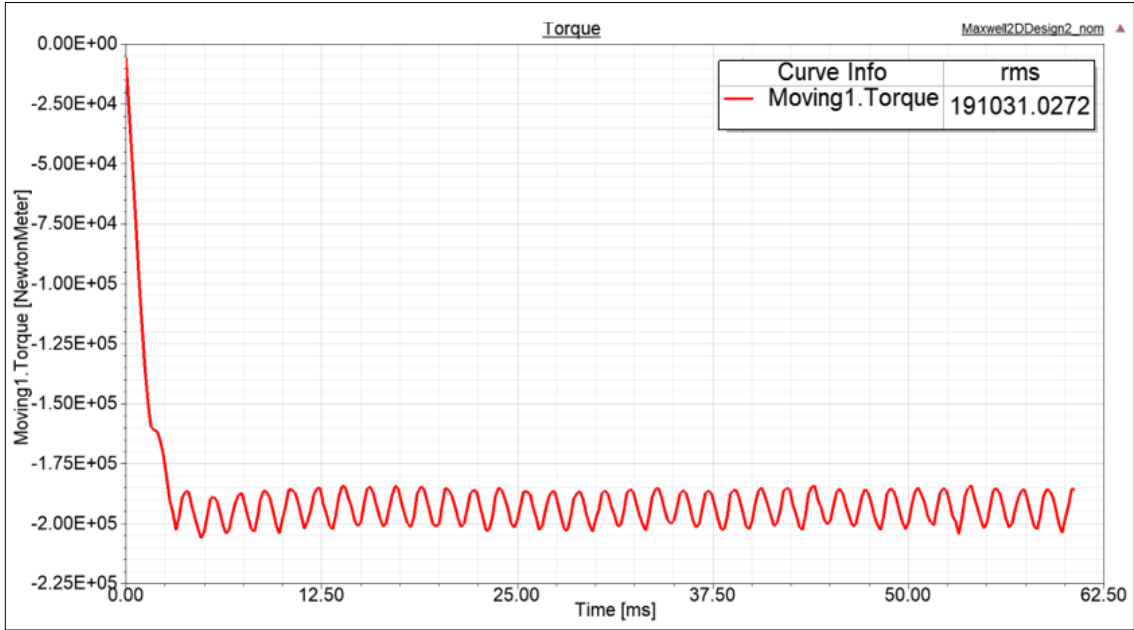
edilmiştir. Mavi renk 0 T olarak belirlenmiş olup kırmızı renk ise 2 T değeri olarak seçilmiştir. Generatörün rotor ve stator manyetik malzemesinin 1,9 T değerinden sonra lineerlikten çıktığı ve 2 T değerinde doyuma başladığı dikkate alındığında genel olarak akı yoğunluğu değişiminin bu değer altında kaldığı görülmüştür. Kutuplar oyuk dış hizasından uzaklaştığı zaman dişlerin 2 T değerine ulaştığı görülmüştür. Manyetik akının yoğunlaşması sebebiyle oluşan bu alan anlık bir değer ifade ettiği için normaldir. Kutupların oyuklarla örtüştüğü zaman diliminde oyuk ve boyunduruklardaki manyetik akı yoğunluğu 1,5 T ile 1,8 T arasında olmuştur. Analitik hesaplama aşamasında oyuk dişleri, stator ve rotor bileşenleri için seçilen maksimum akı yoğunluğu değeri 1,6 T seçildiği dikkate alındığında, alınan sonuçların yapılan hesaplamalara uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14: Generatörün anma yükündeki manyetik akı yoğunluğu.

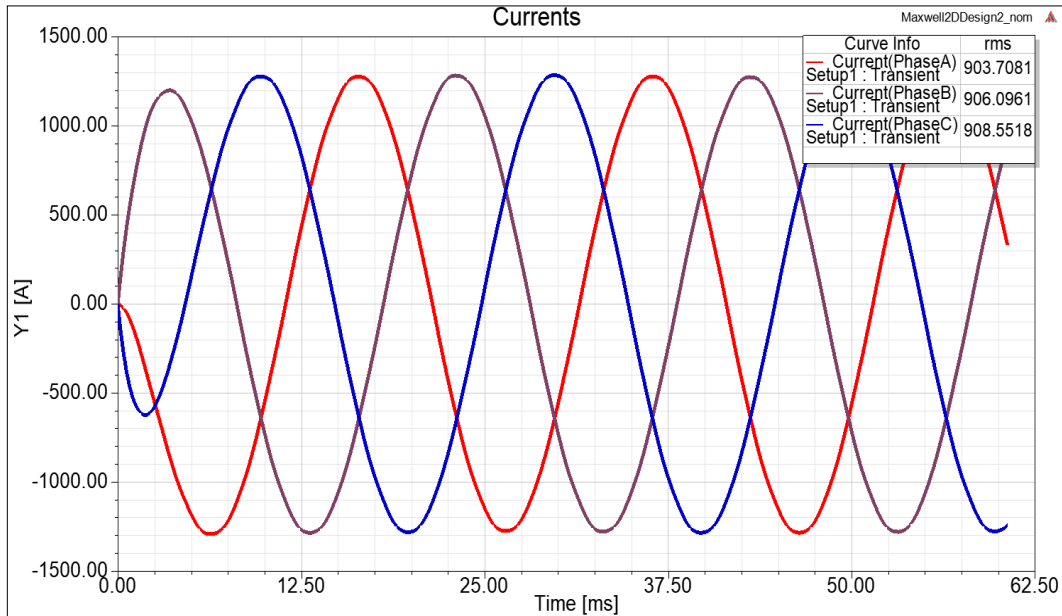
Yapılan analiz sonucunda generatörün tork grafiği Şekil 4.15’de yer almakta olup ortalama tork değeri 191031,027 Nm çıkmıştır. Analitik hesaplamada bulunan 167531,519 Nm değerine göre yüksek bir tork değeri bulunduğu görülmüştür. Bunun nedeni makine çıkış gücünü ve nominal voltajı hedeflenen seviyelere çıkarmak için analitik hesaplamalardan

sonra eklenen sarımlardan kaynaklanmaktadır. Tork grafiğinin negatif ekseninde olması generatör çalışma prensibinden kaynaklanan nominal güçte ihtiyaç duyduğu tork değerini ifade etmektedir.



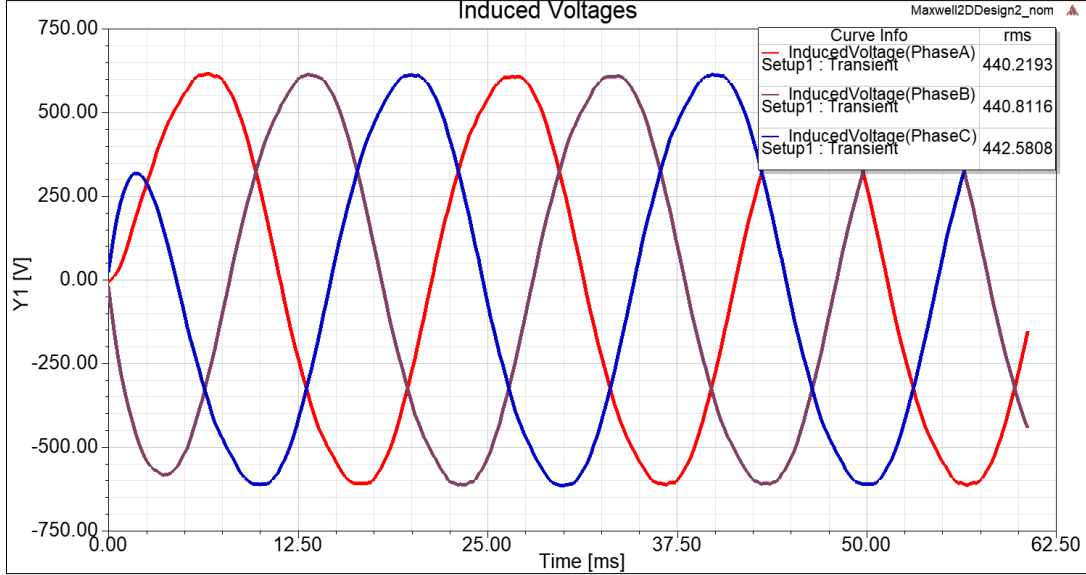
Şekil 4.15: Anma yükündeki tork grafiği.

Elde edilen faz akımı grafiği Şekil 4.16’da yer almaktadır. Etkin akım değeri 906 A civarındadır. Analitik hesaplamada bulunan değer 836,74 A olduğu göz önüne alındığında ön görülen değerden yüksek çıkmıştır.



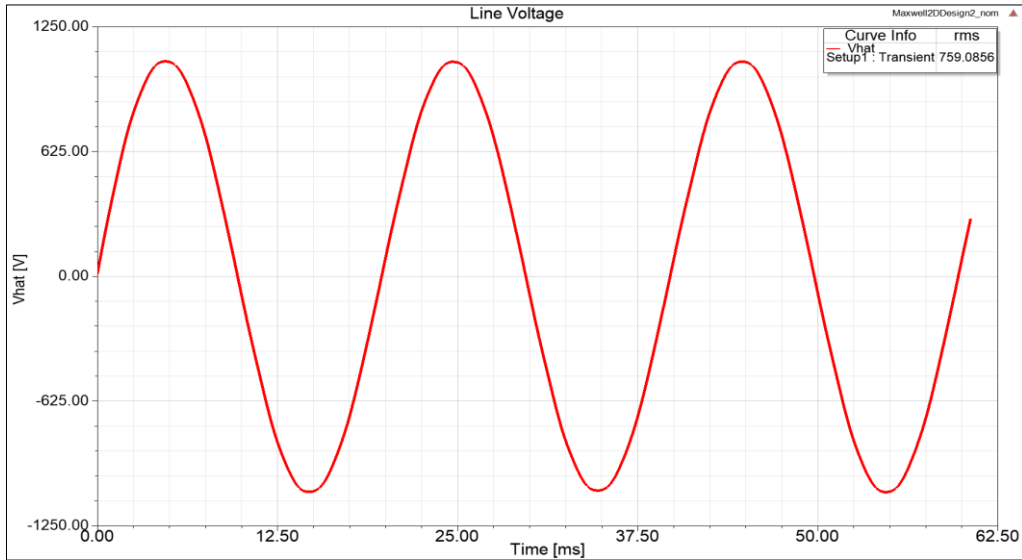
Şekil 4.16: Anma yükündeki faz akım grafiği.

Fazlarda endüklenen gerilim grafiği Şekil 4.17’de yer almakta olup etkin gerilim değeri 440 V civarında olduğu görülmüştür. Analitik hesaplamada 398,37 V olarak bulunan stator faz gerilim değerinin daha yüksek çıkması eklene sarımlardan kaynaklanmaktadır.



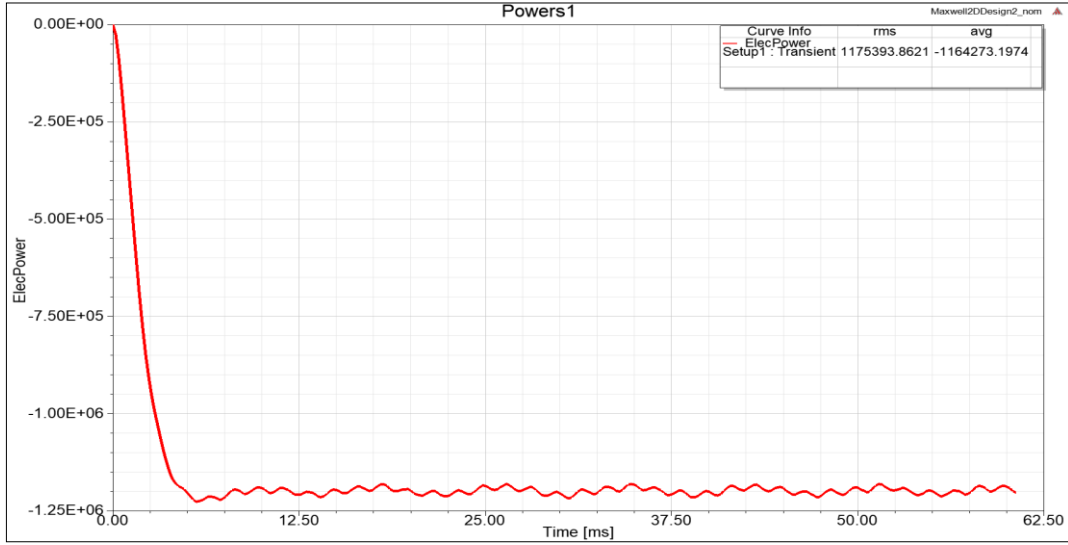
Şekil 4.17: Anma yükündeki indüklenen faz gerilim grafiği.

Ayrıca elde edilen A ve B fazındaki hat gerilim grafiği Şekil 4.18’de yer almaktadır. Etkin gerilim değeri 759 V civarındadır. Hedeflenen hat voltajı 690 V olarak belirlendiği göz önüne alındığında generatörün istenen gerilimi karşılayabildiği görülmektedir.



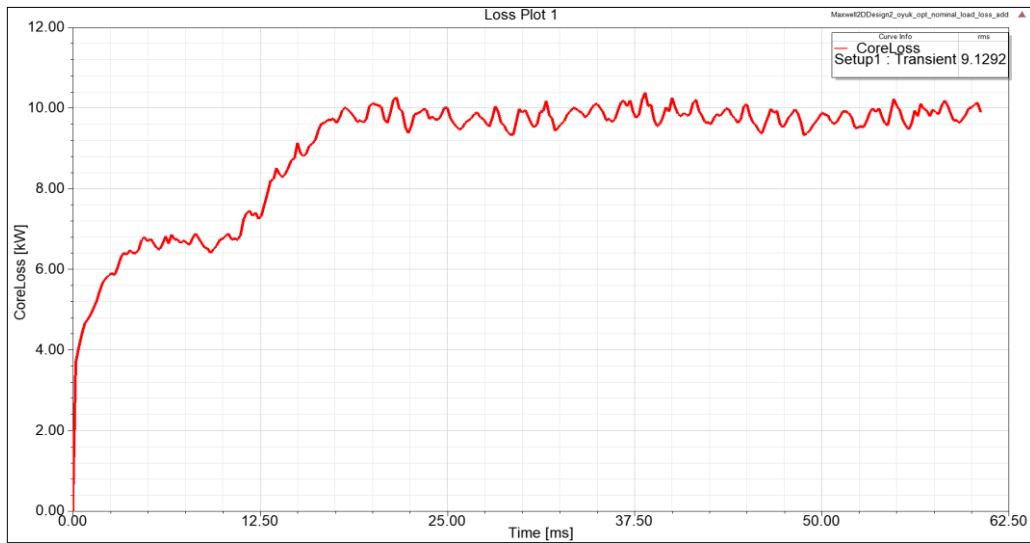
Şekil 4.18: Anma yükündeki indüklenen hat gerilim grafiği.

Yapılan analiz sonucunda generatörün güç çıkış grafiği Şekil 4.19’da yer almakta olup ortalama güç değeri 1175393,86 W çıkmıştır. Analitik hesaplama sonrası eklenen sarımlar sayesinde hedef nominal güçten yüksek çıktığı görülmüştür. Rüzgar kayıpları ve sistem çıkışında bulunan güç elektroniği elemanlarının kayıpları da düşünülmüştür.

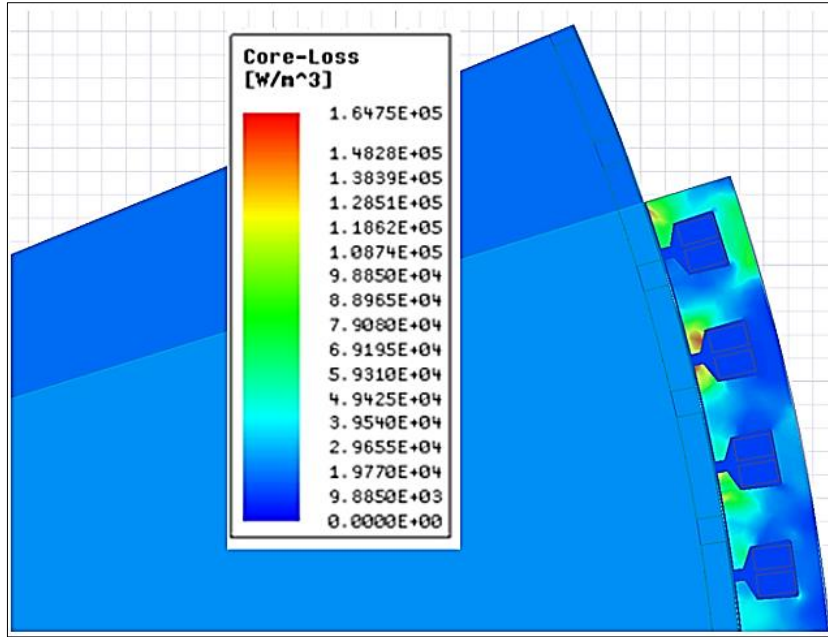


Şekil 4.19: Anma yükünde güç çıkış grafiği.

Yapılan analiz sonucunda Şekil 4.20’de yer alan anlık çekirdek kaybı grafiğinde ortalama 9,1 kW değerinde olan çekirdek kaybı görülmüştür. Şekilde 4.21’de ise çekirdek üzerinde tüketilen güç yoğunluğu değişimi görülmektedir. Oyuk dişlerindeki kayıplar anlık olarak ortalama 1,65 W/m³ değerlerine ulaşmaktadır.

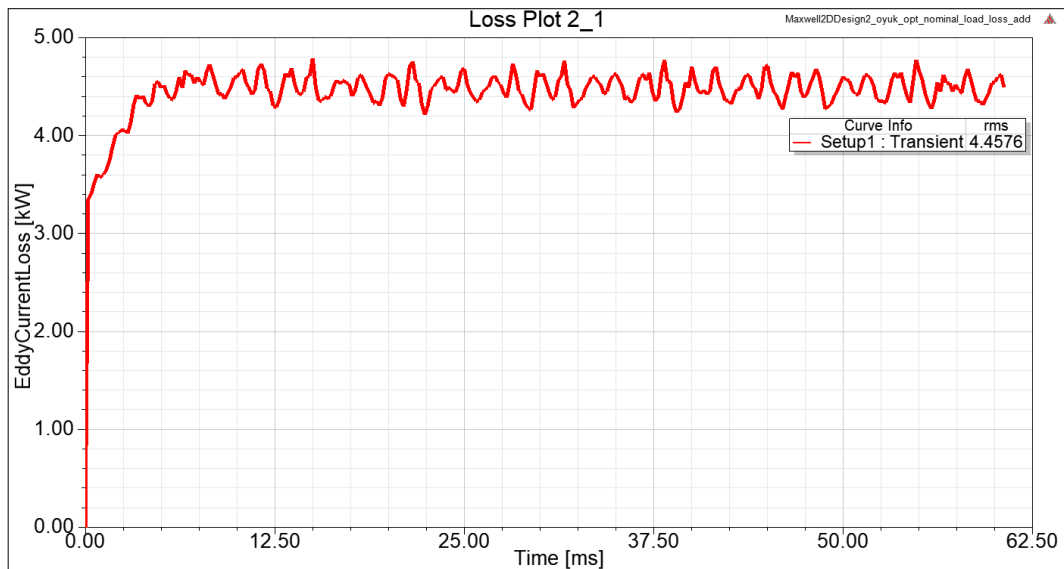


Şekil 4.20: Anma yükündeki çekirdek kaybı grafiği.



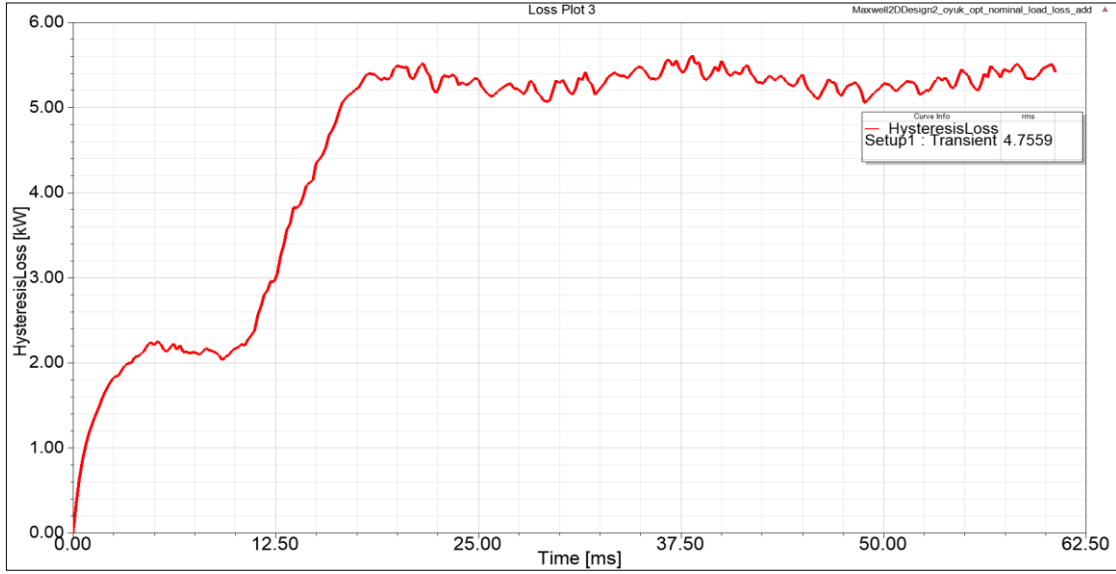
Şekil 4.21: Anma yükündeki anlık çekirdek kaybı haritası.

Şekil 4.22’de yer alan grafikte generatörün eddy akım kayıplarının zamana bağlı değişimi yer almaktadır. Ortalama değeri 4,45 kW olan bu kayıplar, manyetik malzemede oluşan değişen manyetik alanın etkisiyle indüklenen gerilimin neticesinde mil eksenı yönünde akmaya çalışan akımlar olarak tanımlanabilir. Bu akımlar ısınmaya yol açarak güç kaybına neden olmaktadır [75].



Şekil 4.22: Anma yükündeki eddy akım kayıpları.

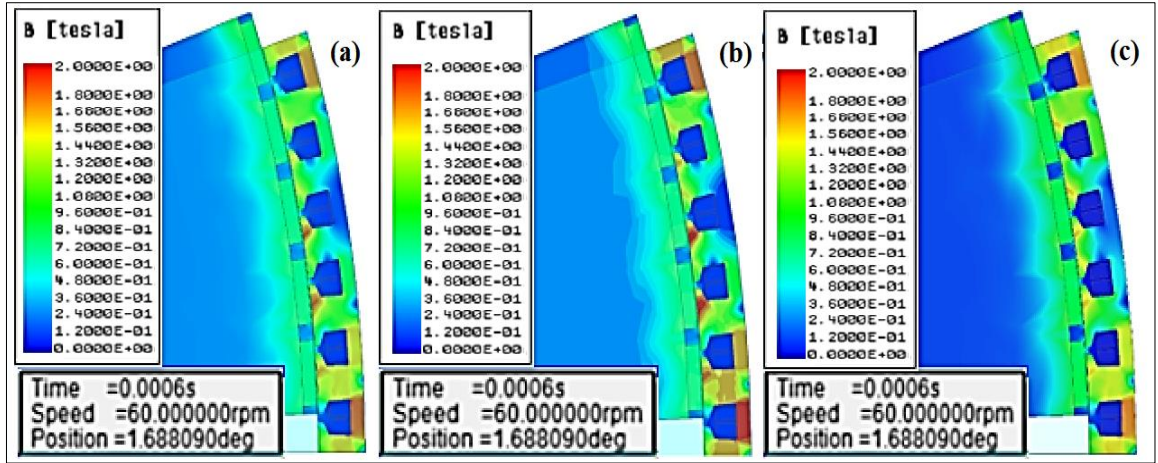
Şekil 4.23’de yer alan grafikte generatörün histeresiz kayıp grafiği görülmektedir. Ortalama kayıp değeri 4,75kW olarak elde edilmiştir. Histeresiz kayıpları manyetik alanın yön değiştirmesi sırasında manyetik malzemenin atomlarının bu değişim esnasında ısınmasından kaynaklanmaktadır [75].



Şekil 4.23: Anma yükündeki histeresiz kayıpları.

Eddy akımı kaybı 4,45 kW ve histerezis kayıpları 4,75kW olduğu ve bu kayıpların toplamının, Şekil 4.20’deki toplam çekirdek kaybı grafiğindeki 9,1 kW değerine yakın olduğu görülmüştür. Aynı zamanda analitik tasarım verileri kullanarak yapılan ön analizin çıktı verileri Tablo 4.9’da yer aldığı gibi 10038 W bulunmuştur. Bu değer Şekil 4.20’de yer alan anma yükündeki çekirdek kaybı grafiğinde bulunan ortalama kayıp değerine yakın olduğu görülmektedir.

Generatörün karakteristiği hakkında bilgi sahibi olmak için en az nominal yükte olduğu gibi kısa devre çalışma durumunun ve boşta çalışma durumunun incelenmesi gerekmektedir. Şekil 4.24’te nominal yük durumunda çalışma, kısa devre çalışma ve boşta çalışma durumlarındaki generatörün manyetik akı yoğunlukları görülmektedir

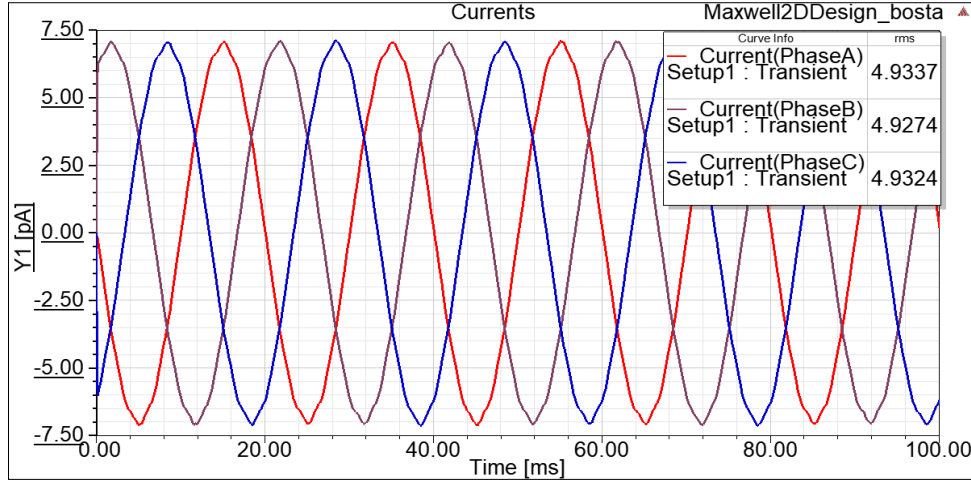


Şekil 4.24: (a) Nominal yükteki manyetik akı yoğunluğu, (b) Kısa devre halindeki manyetik akı yoğunluğu, (c) Boştaki manyetik akı yoğunluğu.

Kısa devre çalışma durumunu incelemek için üç fazın direnç tanımlaması 0 ohm olarak girilmiştir. Boşta çalışma için sargılar açık devre karakteristiği gösterdiğinden her bir fazın direnç değeri Gohm seviyesinde tanımlanmıştır. Burada sargılara tanımlanan direnç değeri sargıların iç direnci ve yük direncinin toplamıdır.

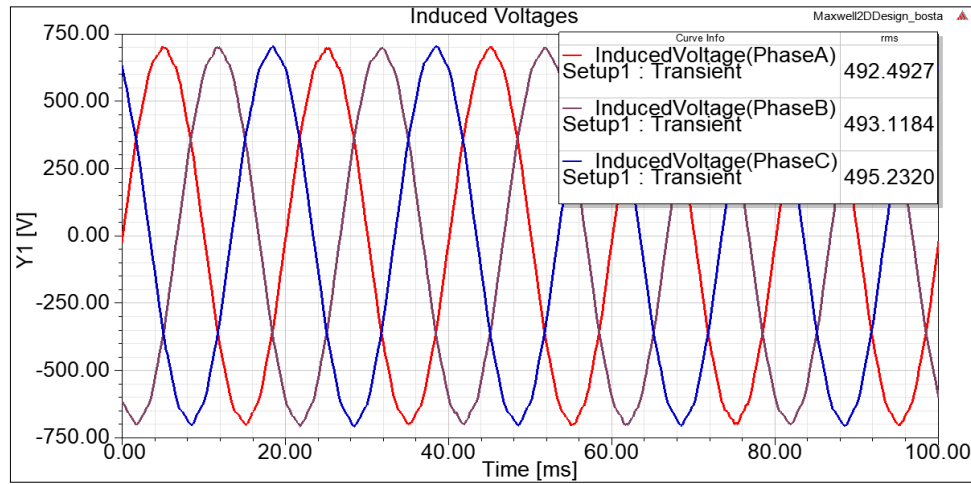
Şekil 4.24'te kısa devre çalışma durumunda faz iletkenlerinden geçen yüksek akımın mıknatıslara uyguladığı ters manyetik alanın incelenmesi gerekmektedir. Burada mıknatısların akı yoğunluğunun 0,8 T ile 1 T seviyelerinde kaldığı ve istenmeyen bir durum olan mıknatısların demanyetizasyona uğramadığı görülmektedir. Böylece seçilen sabit mıknatısın uygun değerlerde olduğu ve kalınlığının doğru seçildiği anlaşılmaktadır. Boşta çalışmada durumunda ise faz iletkenlerinde akım geçmemekte, sadece sabit mıknatısların oluşturduğu etki görülmektedir.

Şekil 4.25'te generatörün boşta çalışma durumunda fazlarından geçen akım değerleri görülmektedir. Fazlardan geçen akımın birimi pikoamper seviyesinde yani neredeyse sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 4.25: Boşta çalışma durumundaki faz akım grafiği.

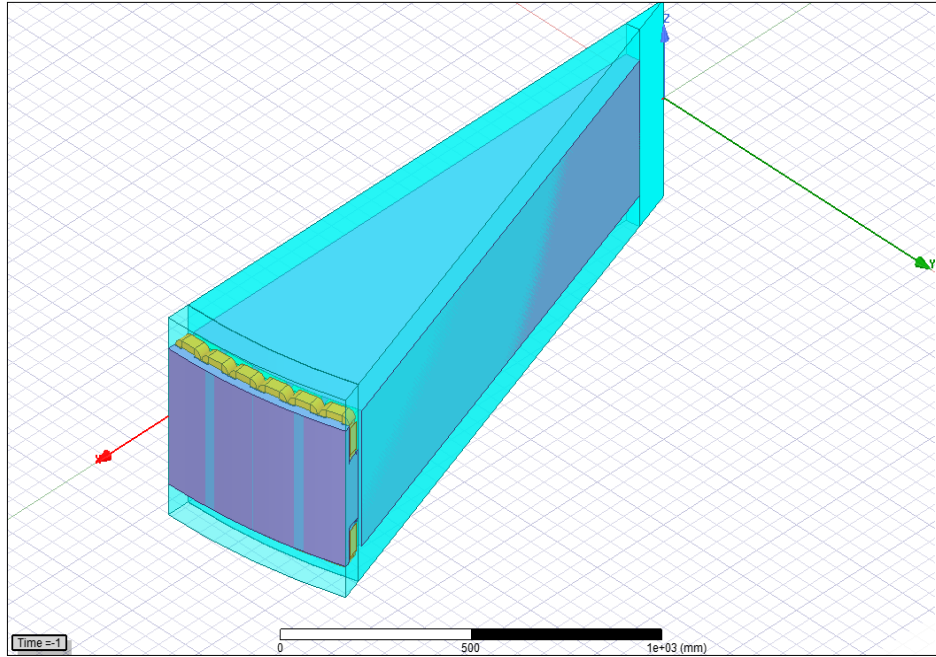
Şekil 4.26’da generatörün boşta çalışma durumunda fazlarında endüklenen gerilim değerleri görülmektedir. Boşta çalışma durumunda beklenildiği gibi fazlarda endüklenen gerilimin nominal çalışma durumundan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum generatörün yük alıntında voltaj düşümüne uğrama karakteristiğinden kaynaklanmakta olup başka bir ifadeyle faz iletkenlerinden geçen akımın iletken direnci nedeniyle gerilim düşümü oluşturması olarak açıklanabilir.



Şekil 4.26: Boşta çalışma durumundaki indüklenen faz gerilim grafiği.

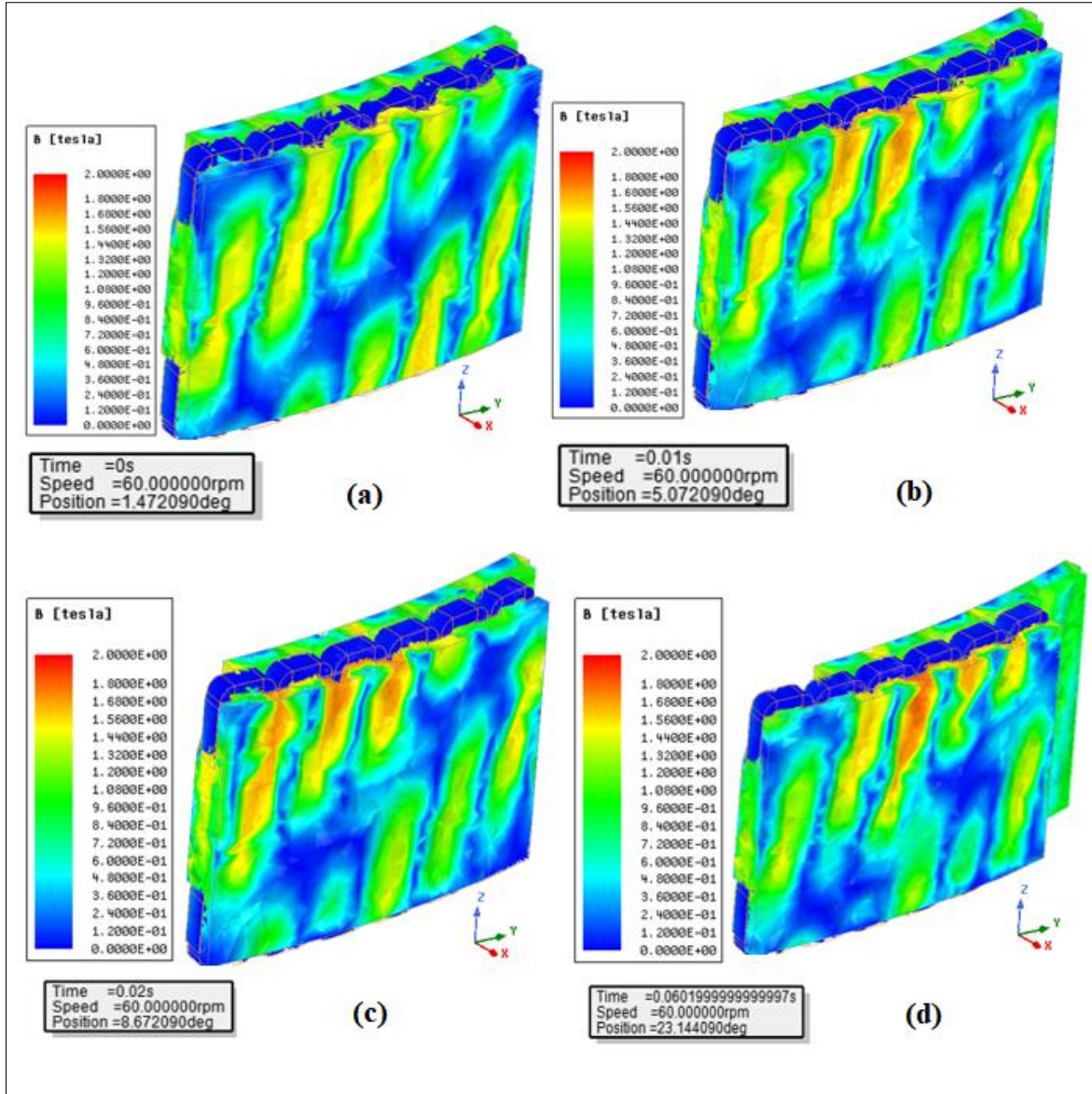
Sonlu elemanlar analizinde iki boyutlu analizin kullanılması tasarım verilerinin elde edilmesi ve yorumlanması açısından daha hızlı bir yöntemdir. Elde edilen veriler tasarım ve makine optimizasyon süreçlerinin kısa tutulmasına olanak sağlamaktadır. Simetrik makine tasarımlarında ağ kalitesi doğru seçilmiş iki boyutlu analizde yüksek doğruluk oranı

yakalanmaktadır. Fakat detaylı bir analiz için üç boyutlu tasarımın SEY ile çözümünün ve kontrolünün yapılması gerekmektedir. Yapılan üç boyutlu analizde manyetik akı yoğunlukları, akı vektörleri, tork değeri, makine gücü ve harmonik bozulma değeri gibi önemli parametreler kontrol edilerek tasarımın gerçek verilere yakınsaması hedeflenmiştir. Makinanın tümünde mil eksenini yönünde ilerleyen yeni ağ haritası oluşturulmuştur. Bu ağ haritası oluşturulurken mıknatıs, hava aralığı ve oyuklarda ağlar sıklaşmış diğer bölgelerde daha seyrek tutulmuştur. Üç boyutlu analizde çözüm ağı sayısı çok yüksek olduğu için makinanın yirmide bir parçalı modeli kullanılmıştır. Parçalı makine geometrisinde fazlar gruplanarak akım yönleri belirlenmiştir. İki boyutlu analizde olduğu gibi örnekleme süreleri aynı tutulmuştur. Zaman adımı olarak 0,2 ms, analiz durma zamanı 0,1 s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.27’de generatörün 20 dilime bölünmüş hali yer almaktadır.



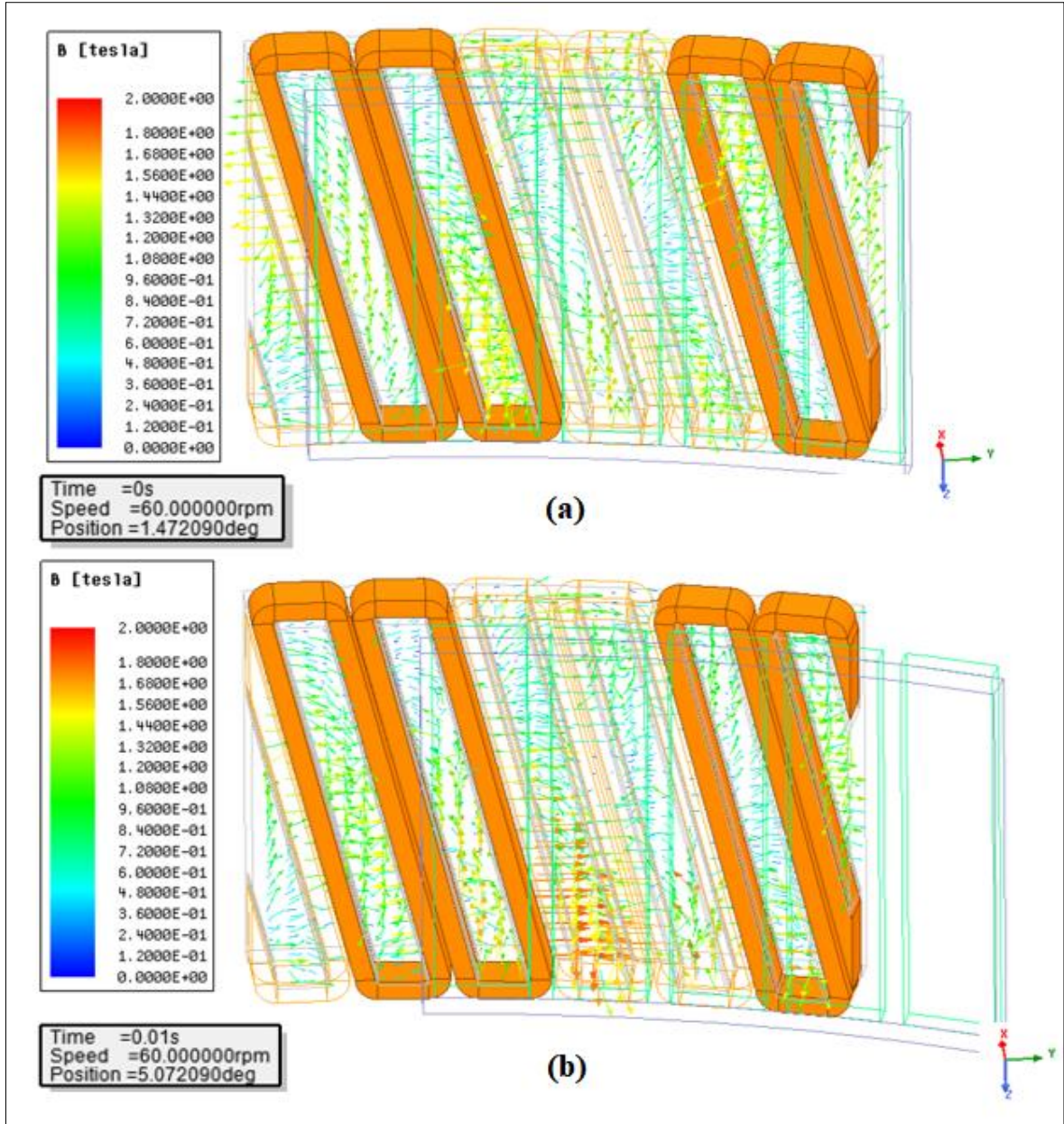
Şekil 4.27: Generatörün dilimli 3B görseli.

Şekil 4.28’de nominal yükte manyetik akı yoğunluğu haritasının farklı zaman adımlarında gösterimleri yer almaktadır. Generatörün harekete başlangıç anı, generatör gerilim sinyalinin; yarım sinüs dalgası oluşturduğu an, bir tam sinüs dalgası oluşturduğu an ve üç tam sinüs dalgası oluşturduğu an olmak üzere dört farklı manyetik akı yoğunluğu incelenmiştir. Akı yoğunlukları incelendiğinde anormallik görülmediği yani anlık doyumların normal seviyelerde olduğu görülmektedir.

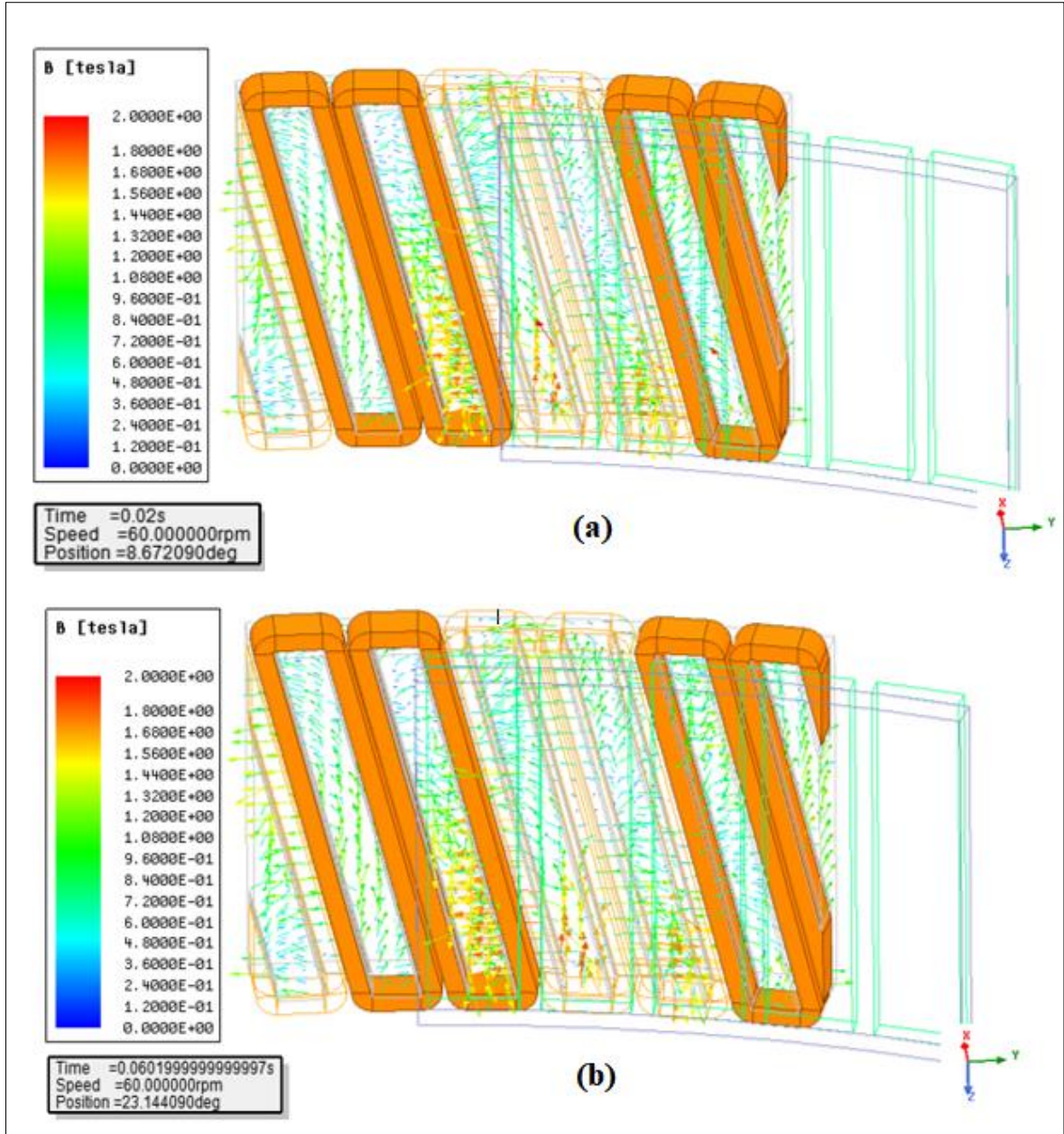


Şekil 4.28: (a) Nominal yükte harekete başlama anındaki manyetik akı yoğunluğu, (b) Nominal yükte 0,01 saniye sonraki manyetik akı yoğunluğu, (c) Nominal yükte 0,02 saniye sonraki manyetik akı yoğunluğu, (d) Nominal yükte 0,06 saniye sonraki manyetik akı yoğunluğu.

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da nominal yük durumunda akı çizgi yollarının farklı zaman adımlarında gösterimleri yer almaktadır. Sabit mıknatıs kaynaklı oluşan manyetik alanların stator oyuklarınınca bozulmadan doğru yönde hareket ettiği görülmektedir.

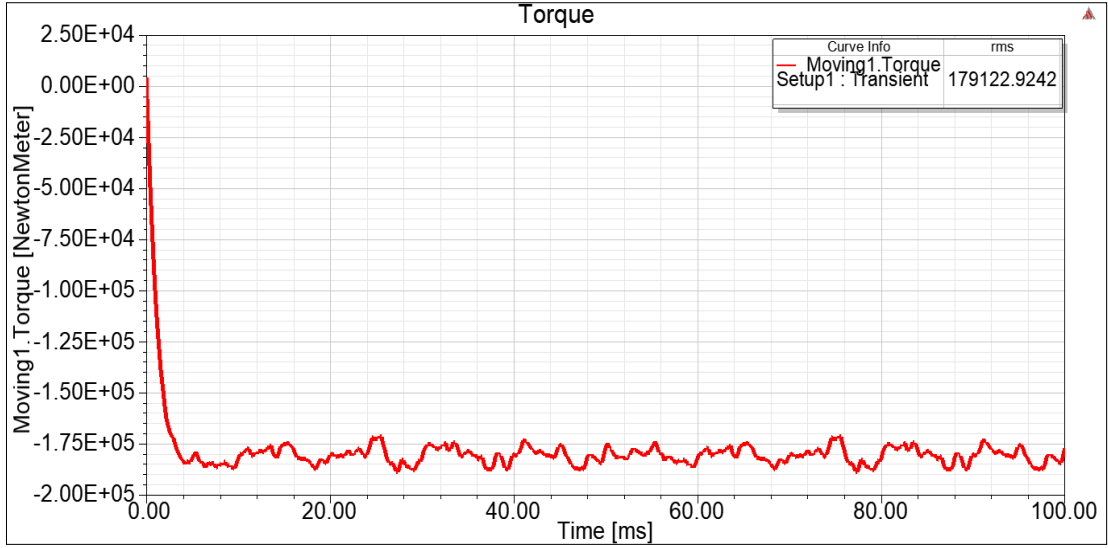


Şekil 4.29: (a) Nominal yükte harekete başlama anındaki akı çizgi yolları, (b) Nominal yükte 0,01 saniye sonraki akı çizgi yolları.



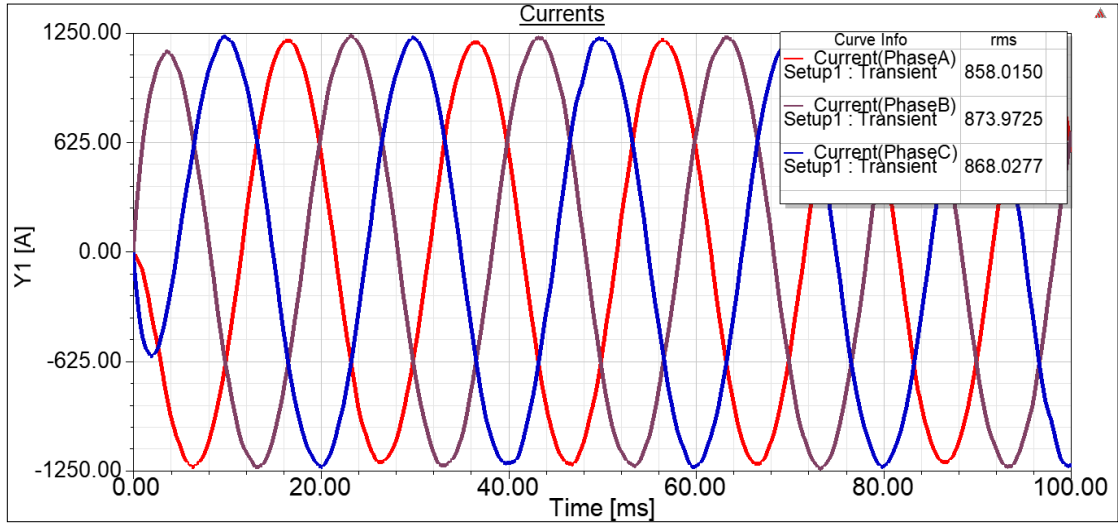
Şekil 4.30: Nominal yükte 0,02 saniye sonraki akı çizgi yolları (a), Nominal yükte 0,01 saniye sonraki akı çizgi yolları (b).

Üç boyutlu model üzerinde yapılan analiz sonucunda generatörün tork grafiği Şekil 4.31’de yer almakta olup ortalama tork değeri 179122,924 Nm çıkmıştır. İki boyutlu analizden nispeten düşük olan bu değer analitik hesaplamada bulunan değere daha yakın bulunmuştur.



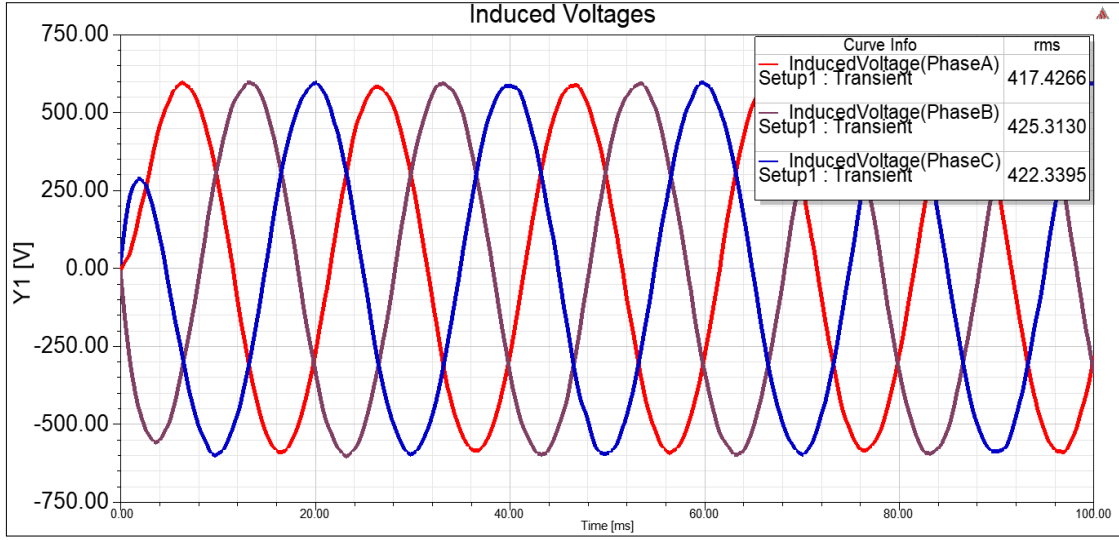
Şekil 4.31: 3B Analizde anma yükündeki tork grafiği.

Elde edilen faz akımı grafiği Şekil 4.32’de yer almaktadır. Efektif akım değeri 868 A civarındadır. İki boyutlu analizde yapılan hesaplama göre daha düşük, analitik hesaplamada bulunan değerden daha yüksek bir değer bulunmuştur.



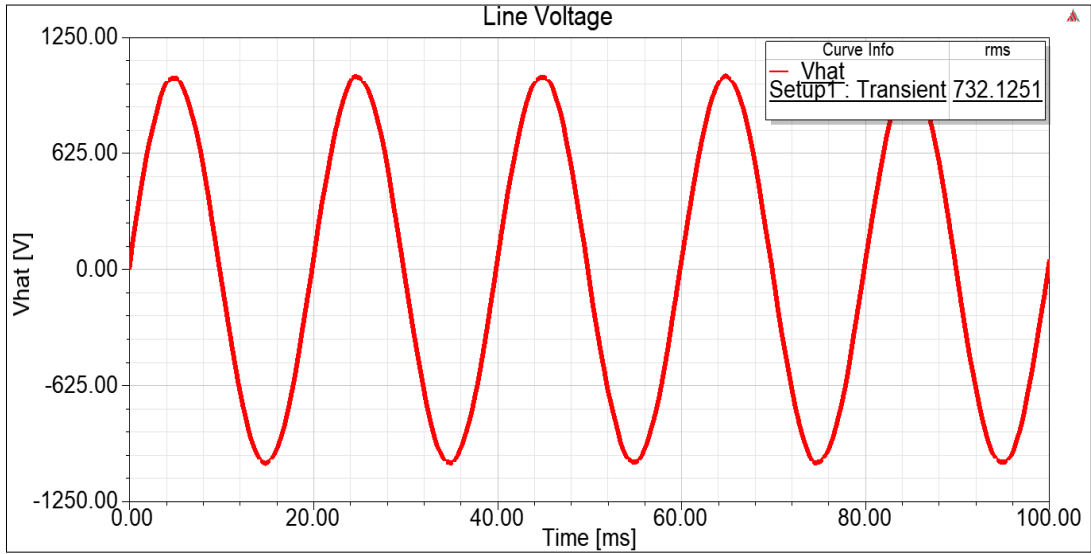
Şekil 4.32: 3B Analizde anma yükündeki faz akım grafiği.

Fazlarda endüklenen gerilim grafiği Şekil 4.33’te yer almakta olup ortalama gerilim değeri 422 V civarında olduğu görülmüştür. Analitik tasarım hesaplamalarında ve iki boyutlu hesaplamalarda bulunan değere yakın bir değer olduğu görülmektedir.



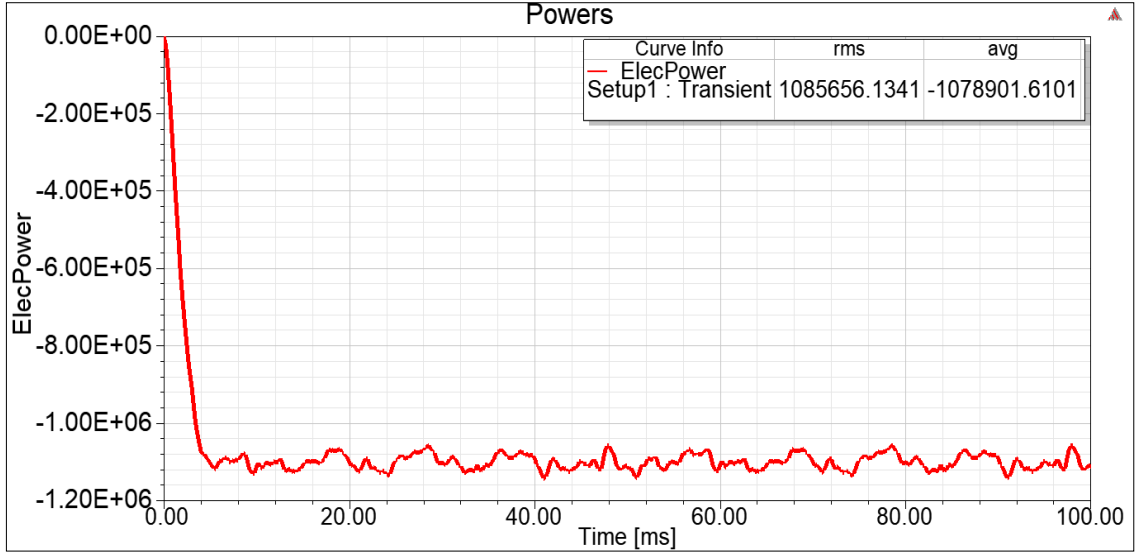
Şekil 4.33: 3B Analizde anma yükünde indüklenen faz gerilim grafiği.

Üç boyutlu model üzerinde yapılan analiz sonucunda elde edilen A ve B fazlarındaki hat geriliminin grafiği Şekilde 4.34'te yer almaktadır. Ortalama gerilim değeri 732 V civarındadır. Hedeflenen hat geriliminin karşılandığı bu analiz sonucunda teyit edilmiştir.



Şekil 4.34: 3B Analizde anma yükünde indüklenen hat gerilim grafiği.

Yapılan analiz sonucunda generatörün güç çıkış grafiği Şekil 4.35'te yer almakta olup ortalama güç değeri 1085656,13 W çıkmıştır. Bu değer istenen makine gücünü karşıladığı görülmektedir.



Şekil 4.35: 3B Analizde anma yükünde güç çıkış grafiği.

Makinenin enerji kalitesini belirleyen önemli parametrelerden biri de toplam harmonik bozulma değeridir. İstenmeyen bir etki olup makinanın nominal frekansının tek katlarında indüklenen gerilim olarak tarif edilebilir. Harmonik bozulma ne kadar yüksek olursa generatör iletkenlerinin üzerinden anma akımının o kadar üstünde akım geçmesine, dönüş iletkeni yani nötr iletkenin ısınmasına yol açmaktadır. Ayrıca demir ve bakır kayıplarını artırarak generatörün ısınmasına etki etmektedir.

IEEE'nin belirlediği STD-519'a göre 1 kV altı makinalarda voltaj bozulması olarak ifade edilen toplam harmonik bozulma değerinin %8'in altında olması gerekmektedir. Bu harmonik değerlerin hesaplamasında tek harmonik katların 51. değerine kadar olan kısmı dahil edilmektedir [90].

Yapılan 3B analiz sonucunda sarım verileri içerisinde nominal gerilimin tam katlarında indüklenen gerilim değerlerinin verileri çekilmiştir. Tablo 4.10'da farklı frekans değerlerine göre ayrı ayrı her üç fazdaki harmonik değerleri yer almaktadır. Veriler incelenirse (150 Hz – 350 Hz) 3. ve 7. harmonik değerlerinin nispeten diğerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 4.10: (a) Farklı frekans değerlerinde A fazında indüklenen gerilim, (b) Farklı frekans değerlerinde B fazında indüklenen gerilim, (c) Farklı frekans değerlerinde C fazında indüklenen gerilim.

Frekans [Hz]	Faz A Gerilim [V]	Frekans [Hz]	Faz B Gerilim [V]	Frekans [Hz]	Faz C Gerilim [V]
50	592,136841	50	593,410871	50	581,668077
150	5,133646	150	6,921037	150	14,887314
250	2,967525	250	3,423237	250	5,1052
350	3,072317	350	3,339972	350	5,782261
450	1,68932	450	2,812344	450	4,201163
550	2,704892	550	1,839927	550	3,708649
650	1,698744	650	1,459679	650	2,774021
750	1,235396	750	0,89673	750	2,595275
850	0,744895	850	1,020414	850	2,234691
950	0,952775	950	1,000736	950	1,503858
1050	0,800826	1050	0,539469	1050	1,634673
1150	0,772035	1150	0,957773	1150	1,342769
1250	0,470182	1250	0,772475	1250	1,115424
1350	0,456691	1350	0,831572	1350	0,986842
1450	0,288696	1450	0,647467	1450	0,959581
1550	0,347273	1550	0,38292	1550	0,674749
1650	0,252479	1650	0,302549	1650	0,817173
1750	0,289035	1750	0,363492	1750	0,677481
1850	0,267986	1850	0,268019	1850	0,56246
1950	0,247928	1950	0,295664	1950	0,327736
2050	0,145055	2050	0,282646	2050	0,299133
2150	0,1605	2150	0,132412	2150	0,271945
2250	0,170599	2250	0,03207	2250	0,150847
2350	0,059843	2350	0,038823	2350	0,219431
2450	0,088172	2450	0,108379	2450	0,076902

(a)

(b)

(c)

Farklı frekans değerlerinde sargılar üzerinde indüklenen gerilim verileri kullanılarak toplam gerilim harmoniğini bulmak için Eşitlik 4.1'den faydalanılmıştır.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_{1(nominal)}} \quad (4.1)$$

Elde edilen verilere göre A faz sargısındaki toplam harmonik bozulma değeri %1,339 olarak B faz sargısındaki %1,604 ve C faz sargısındaki harmonik değeri %3,188 olarak hesaplanmıştır. Generatörün ortalama harmonik değeri %2,044 olarak hesaplanmıştır Bu değer standartta istenen harmonik sınırın altında olup harmonik karakteristiğinin uygun olduğu görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında rüzgar türbinlerinde kullanılacak, 1 MW gücünde, radyal akılı, doğrudan sürürlü çıkık kutuplu, sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı, modellenmesi ve manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada izlenen yol özetlenirse ilk olarak analitik yöntemle ön tasarım gerçekleştirilmiş böylece ana boyutlar belirlenmiş, daha sonra bilgisayar destekli tasarım yazılımı yardımıyla iki boyutlu ve üç boyutlu generatör geometrisi oluşturularak tanımlamaları yapılmıştır. Generatörün tasarım modeli oluşturulduktan sonra, sonlu elemanlar yöntemi temelli yazılım programı yardımıyla manyetik analizleri tamamlanmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları hedeflenen generatör modeliyle uygunluğu incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda analitik tasarımın ve manyetik analiz sonucunun tutarlı ve uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca analiz sonucunun hedeflenen generatörün etiket değerlerine uygun olduğu gözlenmiştir.

Yapılan çalışma sırasında şu problemlere çözüm aranmıştır. Hedeflenen generatör tasarımı için etiket değerlerini karşılayan en az 1 MW gücünde, hat geriliminin minimum 690 V, düşük harmonikli, yüksek verimli, düşük tork dalgalanmasına sahip manyetik akı yoğunluğunun Tablo 3.5'te verilen koşullara uygun ve ısınma problemi olmayan bir model çözümü üzerinde çalışılmıştır.

Tasarlanan makinanın etiket değerlerine uygun çıkış geriliminde ve güçte olması amaçlanmıştır. Manyetik analiz safhasında yapılan itaratif denemeler sonucunda sarım sayısı ve tel kesiti düzenlenmiş, böylece yapılan analizin sonucunda hedef güçte ve hat geriliminde generatör modeli elde edilmiştir.

Sarım sayısı ve tel kesiti düzenlenmesi aşamasında ayrıca stator iletkeninin akım yoğunluğu incelenmiş bu değerlerin izin verilen ideal limitlerde olması sağlanmıştır. Böylece makine verimi yüksek tutulmuş aynı zamanda çok yüksek bir değer seçilmeyip iletken tellerin ısınmasının önüne geçilmiştir.

Tasarım esnasında bir diğer önemli konu generatörün ısınmasıdır. Generatör tasarımında kullanılan manyetik çeliğin lineer olmayan karakteri sebebiyle B-H eğrisi incelenmiş ve stator dışınının, stator-rotor boyunduruğunun manyetik akı yoğunluğu limitleri Tablo 3.5

esas alınarak belirlenmiştir. Manyetik malzemenin doyum sınırının altında çalışması sağlanarak makinanın ısınmasının önüne geçilmiştir.

Tasarlanan generatör sistemi doğrudan sürüslü olup bakım kolaylığı ve basit tasarımına ek olarak bakım maliyeti düşünüldüğünde avatantajlıdır. Doğrudan sürüslü sistemler rüzgarın kanatlarda oluşturacağı yüksek torku mil aracılığıyla generatöre aktarmakta bu nedenle milde yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Bu sebeple generatörün tork salınımının olabildiğince düşük tutulması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda makine KOKS olarak tasarlanmış, ayrıca stator çelik laminasyonlarının açılı şekilde tasarımı sayesinde tutma torku düşük tutulmuştur.

Generatörün enerji kalitesini belirleyen bir diğer önemli parametre harmonik bozulma değeridir. Bu değer ne kadar yüksek olursa generatörün gerilim sinyali o kadar bozulur, nötr iletkeni ısınır, demir ve bakır kayıplarında artışlara neden olur. Harmonik değerini düşük tutmak için mıknatısların rotor yüzeyi kaplama oranı Eşitlik 3.14’de yer aldığı gibi ideal bir değerde seçilmiştir. Ayrıca stator çeliğinin laminasyonu açılı bir şekilde tasarlanmış olup oyuk şekil geometrisinin uygun olması harmonik değerlerinin düşük tutulmasını sağlamıştır.

Generatörün tam olarak uygulamaya hazır hale gelmesi için, detaylı yapılacak ısınma analizleri ve generatörün tam olarak ısınma karakteristiğinin belirlenmesi faydalı olabilir. Ek olarak yapılacak akış analizleriyle generatörün doğal soğutmayla ne limitlerde çalışabileceği incelenebilir generatörün dış yüzeyine uygun kanatçık yapıları tasarlanarak soğutma kabiletinin artması sağlanabilir. Buna ek olarak generatör milinde yüksek tork bulunması dolayısıyla yapılacak detaylı stres ve dayanım analizi faydalı olabilir.

Yapılan tüm analizler ve verilerin sonucunda tasarım nihai hale gelmiştir. Tarımın önce analitik hesaplamalarının yapılması sonrasında sonlu elemanlar yöntemi temelli yazılım programı yardımıyla analizlerinin gerçekleştirilmesi yatırım maliyetini ciddi oranda düşürmüştür ve gerçek uygulamada optimizasyon süreçlerinde harcanılan vakti ortadan kaldırmıştır.

6. KAYNAKLAR

- [1] ELDER, “2022 Yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı Enerji Sektörü Özet Raporu”. [Online] Erişim adresi: <https://www.elder.org.tr/Content/files/a4cfa306-6d2a-44ff-920d-2f2b55741b18.pdf> Erişim tarihi: 15.12.2022.
- [2] TEİAŞ, “Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Kurulu Güç Raporu Haziran 2022”. [Online] Erişim adresi: <https://webim.teias.gov.tr/file/f3f85fb8-d0b9-4a41-b540-61328e28e82f?download> Erişim tarihi: 16.12.2022.
- [3] Dünya Enerji Konseyi Türkiye, “2021 Küresel Enerji Raporu Nisan 2021”. [Online] Erişim adresi: <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2021/04/2021-Kuresel-Enerji-Raporu-Ozeti.pdf> Erişim tarihi: 16.12.2022.
- [4] O. Ellabban, H. Abu-Rub, and F. Blaabjerg, “Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 748-764, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
- [5] Z. D. Yakıncı ve M. Kök, “Yenilenebilir Enerji ve Toplum Sağlığı”, *İ.Ü Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi*, cilt 5, no 1, s. 43-55, 2017.
- [6] E. Cihan, “Yenilenebilir Enerji ve Türkiye’de Güneş Enerjisi”, Yüksek Lisans tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep, 2019.
- [7] V. Quaschnig, “*Understanding Renewable Energy Systems*”, Revised edition, Taylor & Francis Group, New York, 2016.
- [8] BP Statistical Review of Global Energy, “Renewable Energy Generation, Word” . [Online] Erişim adresi: <https://ourworldindata.org/renewable-energy> Erişim tarihi: 19.10.2022.
- [9] M. Apaydın, A. K. Üstün, M. Kurban ve Ü. B. Filik, “Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Jeneratörlerin Karşılaştırmalı Analizi”, *5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, 2019.
- [10] Türkiye Cumhuriyeti Dış İşleri Bakanlığı, “Viyana Sözleşmesi ve Montreal Protokolü” [Online] Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/viyana-sozlesmesi-ve-montreal-protokolu.tr.mfa> Erişim tarihi: 30.08.2022.
- [11] Kyoto Protocol Reference Manuel, “UNFCCC” [Online] Erişim adresi: https://unfccc.int/sites/default/files/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [12] İklim Değişikliği Başkanlığı, “Paris Anlaşması”. [Online] Erişim adresi: <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34> Erişim tarihi: 10.12.2022.

- [13] Dünya Enerji Konseyi Türkiye, “2021 Küresel Rüzgar Raporu Özeti Nisan 2021”. [Online] Erişim adresi: <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2021/04/2021-Kuresel-Ruzgar-Raporu.pdf> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [14] GWEC, “Global Wind Report 2022”. [Online] Erişim adresi: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/03/GWEC-GLOBAL-WIND-REPORT-2022.pdf> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [15] Wood Mackenzie , “Global Wind Turbine Market: State of Play”. [Online] Erişim adresi: <https://www.woodmac.com/news/opinion/global-wind-turbine-market-state-of-play/> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [16] Wind Turbine Models, “Wind Turbines Manufacturers”. [Online] Erişim adresi: <https://en.wind-turbine-models.com/manufacturers> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [17] Vestas, “Vestas becomes the first company to install 100 GW of wind turbines”. [Online] Erişim adresi: <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2019/vestas-becomes-the-first-company-to-install-100-gw-of-w-c2963243> Erişim tarihi: 15.11.2022.
- [18] Goldwind, “Timeline”. [Online] Erişim adresi: <https://www.goldwind.com/en/about/timeline/> Erişim tarihi: 11.11.2022.
- [19] Temiz Enerji, [Online] Erişim adresi: <https://temizenerji.org/2021/10/15/abd-tum-kiyi-seritlerine-ruzgar-enerjisi-santrali-kurmayi-hedefliyor/> Erişim tarihi: 20.09.2022.
- [20] Elektrik Dünyası, “Türkiye’deki Yeni Rüzgar Türbini Kurulumlarına 1 Milyar Euro Finansal Yatırım Gerçekleşti”. [Online] Erişim adresi: <http://www.elektrikdunyasi.com.tr/Home/Haber/479> Erişim tarihi: 26.10.2022.
- [21] İklim Haber, “Almanya Rüzgar Enerjisi Hedefini Güçlendiriyor” . [Online] Erişim adresi: <https://www.iklimhaber.org/kategori/ekonomi/> Erişim tarihi: 26.10.2022.
- [22] Temiz Enerji, [Online] Erişim adresi: <https://temizenerji.org/2022/01/26/cinin-yeni-acik-deniz-ruzgar-enerjisi-rekoru/> Erişim tarihi: 20.09.2022.
- [23] Temiz Enerji, “Karbon Nötr Hedefi” [Online] Erişim adresi: <https://temizenerji.org/2021/06/30/cin-2060-karbon-notr-hedefi-icin-ruzgar-enerjisine-yoneldi/> Erişim tarihi: 21.09.2022.
- [24] Anadolu Ajansı, “Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi: Türkiye, deniz üstü rüzgar potansiyeli yüksek 4 ülke arasında” [Online] Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/kuresel-ruzgar-enerjisi-konseyi-turkiye-deniz-ustu-ruzgar-potansiyeli-yukse-4-ulke-arasinda/2555426#:~:text=Bu%20kapsamda%20T%C3%BCrkiye%2C%202030'a,ise%2070%20gigavat%20olarak%20hesaplan%C4%B1yor.> Erişim tarihi: 21.10.2022.
- [25] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Rüzgar”. [Online] Erişim adresi: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar#:~:text=T%C3%BCrkiye%20r%C3%BCzg%C3%A2r%20enerjisi%20potansiyeli%2>

048.000%20MW%20olarak%20belirlenmi%C5%9Ftir.,%2C30'una%20denk%20gelmek
tedir. Erişim tarihi: 19.12.2022.

- [26] TUREB, “Rüzgar Enerjisi Santralleri Raporu”. [Online] Erişim adresi: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNmFmYWY0MTYtNjUyNS00NzQ1LWlwMTMtOTI5ZTNkM2FIYWxlwidiCl6ImU5YzY0NjU4LWFKMWQtNDUwOS1hODk0LTE2NWZhYjU2NjEyMyIsImMiOjI9> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [27] Anadolu Ajansı, “Türkiye, rüzgar enerjisinde yeni yatırım fırsatları barındırıyor.”. [Online] Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiye-ruzgar-enerjisinde-yeni-yatirim-firsatlari-barindiriyor/2537915> Erişim tarihi: 21.10.2022.
- [28] F. Ermiş, “Türkiye’de Rüzgar Enerjisi”, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2019.
- [29] B. Sorensen, “History of and Recent Progress in Wind Energy Utilization”, *Ann. Rev. Energy Environ.* 1995, vol. 20, pp. 387-424.
- [30] Windmill, “New World Encyclopedia”. [Online] Erişim adresi: <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Windmill> Erişim tarihi: 18.12.2022.
- [31] T. J. Price, “James Blyth – Britain’s first modern wind power pioneer”, *Wind Engineering*, vol. 29, pp. 191-200.
- [32] Ö. Özgener, “Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, cilt 4, no 3, s. 159-173, Ekim 2002.
- [33] Danish Wind Industry Association, “The Wind Energy Pioneer – Poul la Cour” . [Online] Erişim adresi: <http://dromstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/pictures/lacour.htm> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [34] P. M. Kumar, K. Sivalignam, T. Lim, S. Ramakrishna and H. Wei, “Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Large Wind Turbines”, *Clean Technol*, Aug. 2019.
- [35] B. N. Owens, “*The Wind Power Story*”, IEE Press, Canada, 2019.
- [36] NASA, “Nasa History” [Online] Erişim adresi: <https://www.nasa.gov/feature/glenn/2019/nasa-experimented-with-wind-turbines-at-plum-brook-in-the-1970s> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [37] M. E. Şahin, “Açık Deniz Rüzgar Sistemleri Üzerine Bir İnceleme ve Danimarka Modeli”, *RTEU-JSE*, s. 54-67, 2020.
- [38] V. Nelson, and K. Starcher, “*Wind Energy*”, Third edition, Taylor & Francis Group, USA, 2019.
- [39] Recharge, “Model Unveils Skwid Hybrid Turbine Concept” [Online] Erişim adresi: <https://www.rechargenews.com/offshore-wind/moder-unveils-skwid-hybrid-turbine->

[concept/1-1-856967](#) Erişim tarihi: 5.09.2022.

- [40] W. Tong, “Wind Power Generation and Wind Turbine Design”, WIT Press, Kollmorgen Corp. USA, 2010.
- [41] J. F. Manwell, J. G. McGowan and A. L. Rogers “Wind Energy Explained”, Wiley, USA, 2002.
- [42] K. Kaya ve E. Koç, “Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 56, no 670, s. 38-48, 2015.
- [43] M. C. Şenel ve E. Koç “Kanat Tasarım Parametrelerinin Rüzgar Türbini Aerodinamik Performansına Etkisi”, *5. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, Kayseri, 2014.
- [44] U. Elibüyük ve İ. Üçgül, “Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-Dergi*, cilt 2, no 3, 2014.
- [45] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraja, and V. H. Krishna, “A review on small scale wind turbines”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 56, pp. 1351-1371, Nis. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.027.
- [46] F. Kiliç ve M. Gökteş, “Savonius Rüzgâr Türbini (İkili ve Üçlü) Kanat Çevresi Akışının Sayısal Analizi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, cilt 22, no 3 s. 1256-1261, Ara. 2018, doi: 10.19113/sdufenbed.501728.
- [47] S. M. Islam, C. V. Nayar, A. Abu-Siada, and M. M. Hasan, “Power Electronics for Renewable Energy Sources”, Elsevier, 2018, pp. 783-827. doi: 10.1016/B978-0-12-811407-0.00027-1.
- [48] R. Carriveau, Ed., “Advances in Wind Power”. InTech, 2012. doi: 10.5772/3376.
- [49] EE Power, “Direct Current Generator Components”. [Online] Erişim adresi: <https://eepower.com/technical-articles/direct-current-generator-components/> Erişim tarihi: 5.12.2022.
- [50] Z. Zhang, Y. Yan, and Y. Tao, “A New Topology of Low Speed Doubly Salient Brushless DC Generator for Wind Power Generation”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no 3, pp. 1227-1233, Mar. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2011.2169805.
- [51] M. UYAR Et Al. , “Değişken hızlı rüzgar türbinleri için generatör sistemleri” *III.Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu (YEKSEM 2005)* , Mersin, s.173-178, 2005.
- [52] M. Apaydın, A. K. Üstün, M. Kurban ve Ü. B. Filik, “Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Asenkron Jeneratörler”, *5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, 2019.
- [53] M. Ruviaro, F. Runcos, N. Sadowski, and I. M. Borges, “Analysis and Test Results of

- a Brushless Doubly Fed Induction Machine With Rotary Transformer”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no 6, pp. 2670-2677, June 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2165457.
- [54] Electrical World For You, “Induction Generators”. [Online] Erişim adresi: <http://electricalworldforyou.blogspot.com/2012/07/induction-generators.html> Erişim tarihi: 15.12.2022.
- [55] E. Koç ve A. N. Güven “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi”, *EMO Bilimse Dergi*, cilt 1, no 1, s. 51-55, 2011.
- [56] A. Beainy, C. Maatouk, N. Moubayed, and F. Kaddah, “Comparison of Different Types of Generator for Wind Energy Conversion System Topologies”, *2016 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, Zouk Mosbeh, Lebanon, July 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/REDEC.2016.7577535.
- [57] M. Yılmaz, H. Altinkaya, ve M. Akbaba, “Şebekeden Bağımsız Çalışan Sincap Kafesli Bir Asenkron Generatörün Sürekli ve Geçici Durum Analizi”, *ISITES2016*, Alanya/Antalya, 2016.
- [58] L. Arturo Soriano, W. Yu, and J. de J. Rubio, “Modeling and Control of Wind Turbine”, *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, pp. 1-13, 2013, doi: 10.1155/2013/982597.
- [59] M. Gustavo and P. Enrique, “Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines”, I. H. Al-Bahadly, Ed. InTech, 2011. doi: 10.5772/15880.
- [60] Y. Öner ve S. Özçira, “Düşük Güçlü Uygulamalar için Konvansiyonel Senkron Generatörler ile Sürekli Miknatıslı Senkron Generatörlerin Karşılaştırılması”, *ELECO Konferans*, Bursa 2008.
- [61] W. Soong, S. Kahourzade, C.-Z. Liaw, and P. Lillington, “Interior PM Generator for Portable AC Generator Sets”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, pp. 1-1, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2488594.
- [62] M. Karrari and O. P. Malik, “Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator From Online Measurements”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no 2, pp. 407-415, June 2004, doi: 10.1109/TEC.2003.822296.
- [63] E. Hau, “*Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*”, 2nd edition, Springer, Germany, 2006.
- [64] N. S. Tınğ, “*Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Sabit Miknatıslı Senkron Generatörün Back-to-Back Dönüştürücü ile Hız Kontrolü*”, Yüksek Lisans tezi, Yıldız Teknik

Üniversitesi, İstanbul, 2013.

- [65] J. Pyrhonen, J. Nerg, P. Kurronen, J. Puranen, and M. Haavisto, “Permanent Magnet Technology in Wind Power Generators”, *ICEM 2010*, Rome, Italy, Sep. 2010, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608312.
- [66] E. S. Ege, “*Doğrudan Tahrikli Rüzgar Türbinleri İçin Enine Eksenel Akılı Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı*”, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [67] A. Dahbi, M. Hachemi, N. Nait-Said and M. Nait-Sait, “Realization and Control of a Wind Turbine Connected to the Grid by Using PMSG” *Energy Conversion and Management*, vol. 84 pp. 346–353. doi:10.1016/j.enconman.2014.03.085.
- [68] Electrical Academia, “Induction Generator: Types & Working Principle” . [Online] Erişim adresi: <https://electricalacademia.com/> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [69] K. Kim, et al., “Analysis on the Direct Driven High Power Permanent Magnet Generator for Wind Turbine”, *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanjing, China, 2005, vol. 1, pp. 243-247. doi: 10.1109/ICEMS.2005.202521.
- [70] X. Zhang and R. Qu, “Pole Number Selection Strategy of Low-Speed Multiple-Pole Permanent Magnet Synchronous Machines”, *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, Chicago, IL, USA, May. 2013, pp. 1267-1274. doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556297.
- [71] Arnold Magnetic Technologies, “Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets”. [Online] Erişim adresi: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N40M-151021.pdf> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [72] K. M. V. Murthy, “*Computer-Aided Design of Electrical Machines*”, BS Publications, Shaikpet, Hyderabad, 2008.
- [73] Thyssenkrupp Steel, “Standart Grades Fully Finished M530-50A”. [Online] Erişim adresi: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/electrical-steel/electrical-steel-non-grain-oriented/powercore-a/powercore-a.html> Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [74] B. Egan, M. A. McCarthy, and C. T. McCarthy, “Comprehensive Composite Materials II ”, *Testing and Analysis of Bolted Joints and Connections*, vol. 8, pp. 175-205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10056-6>
- [75] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, “*Design of Rotating Electrical Machines*”, Wiley, United Kingdom, 2008.
- [76] Y. Lefevre, S. El-Aabid, J.-F. Llibre, C. Henaux, and S. Touhami, “Performance Assessment Tool Based on Loadability Concepts”, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 59, no 2, pp. 687-694, Mar. 2019, doi: 10.3233/JAE-171059.

- [77] L. Marino, “*Design and Analysis of a Fractional-Slot concentrated-Wound PM-Assisted Reluctance Motor*”, Degree Project in Electric Power Engineering, Stockholm, Sweden, 2015.
- [78] M. Arnaout, A. G. Mrad, A. Serhane, and Z. Noun, “An Analytical Study of a PMIG Using Matlab”, January 2017.
- [79] A. G. Yetgin, “Asenkron Motor Mil Çapının Motor Performansına Etkisi”, *SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, s. 1-1, Ağu. 2017, doi: 10.16984/saufenbilder.309406.
- [80] M. Çoramık, “Örnek Bir Analiz Üzerinden Ansys Maxwell Kullanımında Karşılaşılan Güçlüklere Detaylı Çözüm Önerileri”, *Uluslararası Necatibey Eğitim ve Sosyal Bilimler Araştırma Kongresi Balıkesir*, 2018.
- [81] Maxwell Courses, “Ansys Maxwell ile Elektrik Makinaları Aktüatör, Selenoid Tasarımı ve Analizi”. [Online] Erişim adresi: [https://learning.numesys.com.tr/redirection?toUrl=%2Fme%2Fcourses%2F5169%2F%20\(15.02.2019%20-%20ANSYS%20Maxwell%20ile%20Elektrik%20Makinalar%C4%B1,%20Akt%C3%BCat%C3%B6r,%20Solenoid%20Tasar%C4%B1m%C4%B1%20ve%20Analizi](https://learning.numesys.com.tr/redirection?toUrl=%2Fme%2Fcourses%2F5169%2F%20(15.02.2019%20-%20ANSYS%20Maxwell%20ile%20Elektrik%20Makinalar%C4%B1,%20Akt%C3%BCat%C3%B6r,%20Solenoid%20Tasar%C4%B1m%C4%B1%20ve%20Analizi) Erişim tarihi: 19.12.2022.
- [82] S. Uçar, “Maxwell’in Alan Denklemleri Üzerine Bir Değerlendirme”, *Felsefe Ark. - Arch. Philos.*, s. 51, Ara. 2019, doi: 10.26650/arc2019-5118.
- [83] Maxwell, “Maxwell Help”, January 2019.
- [84] S. M. Jang, H. I. Park, J.-Y. Choi, K. J. Ko, and S. H. Lee, “Magnet Pole Shape Design of Permanent Magnet Machine for Minimization of Torque Ripple Based on Electromagnetic Field Theory”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no 10, pp. 3586-3589, Oct. 2011, doi: 10.1109/TMAG.2011.2151846.
- [85] Session I – Modeling the Air-X Rotor and Stator “*Maxwell 3D Simulations of a Residential Wind Generator*”, Degree Project in Electromagnetics in Power Engineering, Northern Arizona Univ., pp. 37.
- [86] I. Boldea and S. A. Nasar, “*The Induction Machines Design Handbook*”, 2nd ed, CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- [87] Y. Cetinceviz, D. Uygun, and H. Demirel, “Optimal Design and Verification of a PM Synchronous Generator for Wind Turbines”, *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 7, pp. 1324-1332, Jan. 2017.
- [88] E. Ünlükaya, A. G. Yetgin, A. İ. Çanakoğlu, ve M. Turan, “Rotor Oluk Şekillerinin Asenkron Motor Performansına Etkileri”, *ELECO 2014 Elektrik*, Bursa 2014.
- [89] V. Türkmenoğlu, S. Arslan, A. Yusufoglu, A. Fenercioğlu, ve M. Atasorkun, “Neodyum Mıknatıslı Senkron Generatörlerde Tasarım Parametre Değişikliklerinin Generatör Verimine Etkisi”, *İleri Teknol. Bilim. Derg.*, cilt. 5, no 2, Tem. 2016.
- [90] S. Balci, “Senkron Generatörlerde Farklı Stator Oluk Yapılarının Uç Gerilimine Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi”, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim.*

Derg., cilt. 8, no 3, Eyl. 2019, doi: 10.17798/bitlisfen.518348.

EKLER

EKLER

EK A: RMxprt tasarım sonuç verileri

Tablo A.1: RMxprt tasarım verileri.

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR DESIGN	
Tanım	Açıklama
File	Setup1.res
GENERAL DATA	
Rated Output Power (kW)	1000
Rated Power Factor	1
Power Factor Type	Inductive
Rated Voltage (V)	690
Number of Poles	100
Frequency (Hz)	50
Frictional Loss (W)	0
Windage Loss (W)	0
Rotor Position	Inner
Operating Temperature (C)	75
Type of Circuit	Y3
Operation Type	Individual Machine
Domain	Time
STATOR DATA	
Number of Stator Slots	120
Outer Diameter of Stator (mm)	3728
Inner Diameter of Stator (mm)	3583
Type of Stator Slot	3
Stator Slot	
hs0 (mm)	8
hs1 (mm)	8
hs2 (mm)	31,5786
bs0 (mm)	47
bs1 (mm)	47,4616
bs2 (mm)	49,1154
rs (mm)	2,5
Top Tooth Width (mm)	47,1763
Bottom Tooth Width (mm)	47,1763
Skew Width (Number of Slots)	1
Length of Stator Core (mm)	396
Stacking Factor of Stator Core	0,97
Type of Steel	M530-50A
Designed Wedge Thickness (mm)	0

Tablo A.1 (devam)

Tanım	Açıklama
Slot Insulation Thickness (mm)	0,3
Layer Insulation Thickness (mm)	0,3
End Length Adjustment (mm)	0
Number of Parallel Branches	2
Number of Conductors per Slot	11
Type of Coils	21
Average Coil Pitch	1
Number of Wires per Conductor	18
Wire Diameter (mm)	2,788
Wire Wrap Thickness (mm)	0
Slot Area (mm ²)	2398,84
Net Slot Area (mm ²)	1940,98
Limited Slot Fill Factor (%)	75
Stator Slot Fill Factor (%)	79,2919
Coil Half-Turn Length (mm)	480,09
ROTOR DATA	
Minimum Air Gap (mm)	2,69
Inner Diameter (mm)	281
Length of Rotor (mm)	396
Stacking Factor of Iron Core	0,97
Type of Steel	M530-50A
Polar Arc Radius (mm)	1788,81
Mechanical Pole Embrace	0.8
Electrical Pole Embrace	0.792068
Max. Thickness of Magnet (mm)	20.6
Width of Magnet (mm)	893977
Type of Magnet	Arnold_Magnetics_N40M_100C
Type of Rotor	1
Magnetic Shaft	No
PERMANENT MAGNET DATA	
Residual Flux Density (Tesla)	1,1616
Coercive Force (kA/m)	535,179
Maximum Energy Density (kJ/m ³)	254,228
Relative Recoil Permeability	1
Demagnetized Flux Density (Tesla)	0,756086
Recoil Residual Flux Density (Tesla)	1,16159
Recoil Coercive Force (kA/m)	924,392
USER DEFINED DATA	
Fractions	1
MATERIAL CONSUMPTION	
Armature Copper Density (kg/m ³)	8900
Permanent Magnet Density (kg/m ³)	7500
Armature Core Steel Density (kg/m ³)	7750
Rotor Core Steel Density (kg/m ³)	7750

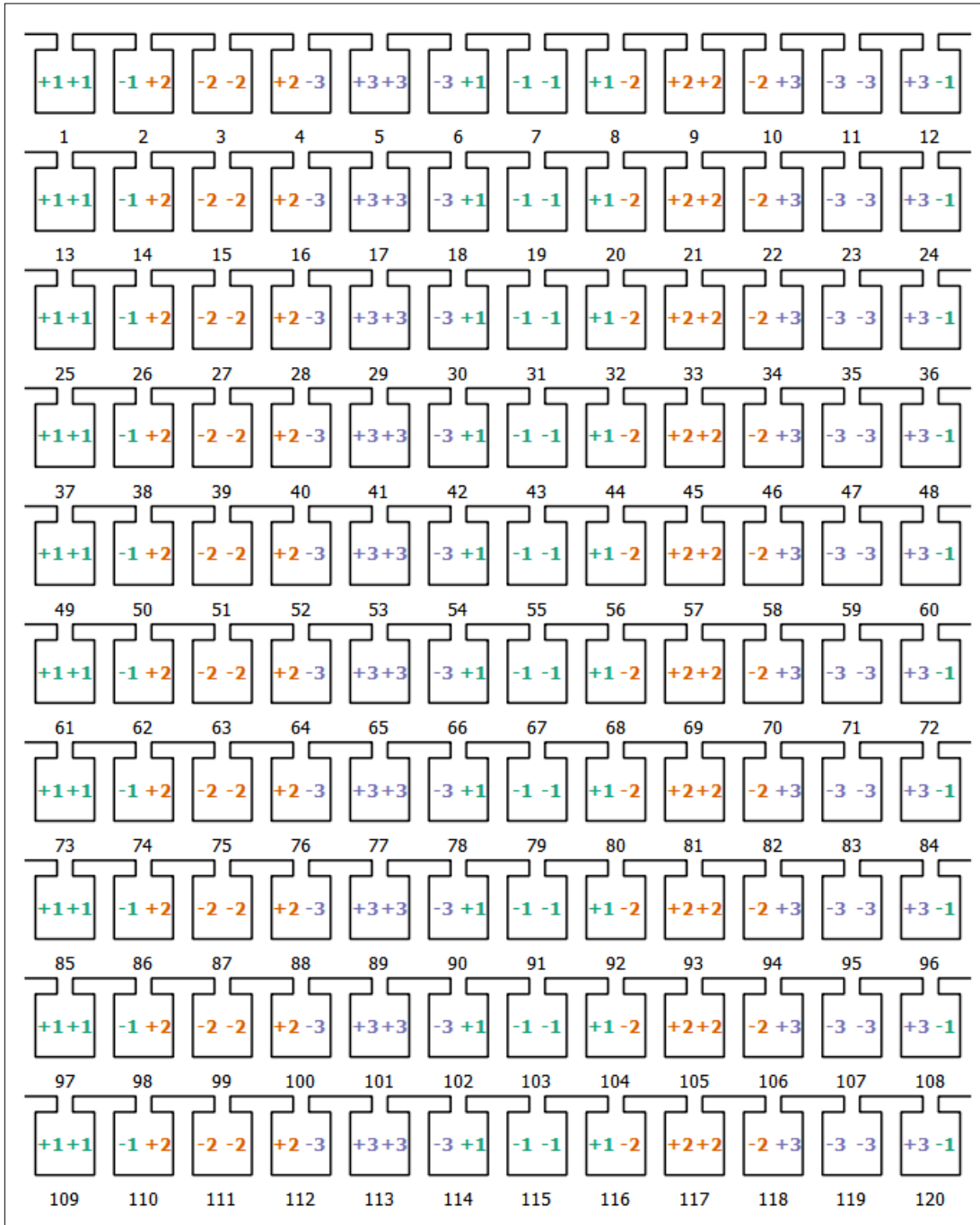
Tablo A.1 (devam)

Tanım	Açıklama
Armature Copper Weight (kg)	619,776
Permanent Magnet Weight (kg)	546,953
Armature Core Steel Weight (kg)	1621,64
Rotor Core Steel Weight (kg)	29056
Total Net Weight (kg)	31844,3
Armature Core Steel Consumption (kg)	12149,7
Rotor Core Steel Consumption (kg)	29290,2
STEADY STATE PARAMETERS	
Stator Winding Factor	0,933289
D-Axis Reactive Reactance Xad (ohm)	0,086681
Q-Axis Reactive Reactance Xaq (ohm)	0,086681
D-Axis Reactance X1+Xad (ohm)	0,250107
Q-Axis Reactance X1+Xaq (ohm)	0,250107
Armature Leakage Reactance X1 (ohm)	0,163426
Slot Leakage Reactance Xs1 (ohm)	0,0917207
End Leakage Reactance Xe1 (ohm)	0,00381944
Harmonic Leakage Reactance Xd1 (H)	0,0678855
Zero-Sequence Reactance X0 (ohm)	0,13017
Armature Phase Resistance R1 (ohm)	0,0104286
Armature Phase Resistance at 20C (ohm)	0,00857839
NO-LOAD MAGNETIC DATA	
Stator-Teeth Flux Density (Tesla)	1,8284
Stator-Yoke Flux Density (Tesla)	1,76278
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla)	0,0251845
Air-Gap Flux Density (Tesla)	0,880018
Magnet Flux Density (Tesla)	0,898489
Stator-Teeth By-Pass Factor	0,00771033
Stator-Yoke By-Pass Factor	0,000220946
Rotor-Yoke By-Pass Factor	1,97197e-005
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T)	417,278
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T)	105,641
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T)	0,281967
Air-Gap Ampere Turns (A.T)	3791,48
Magnet Ampere Turns (A.T)	-4313,15
Leakage-Flux Factor	1
Correction Factor for Magnetic	
Circuit Length of Stator Yoke	0,232613
Correction Factor for Magnetic	
Circuit Length of Roor Yoke	0,735977
Fundamental Induced RMS Line Voltage (V)	880,251
THD of Induced Voltage (%)	0,439862
Cogging Torque (N.m)	9,11442e-09
FULL-LOAD DATA	
Load Resistance (ohm)	0,476073

Tablo A.1 (devam)

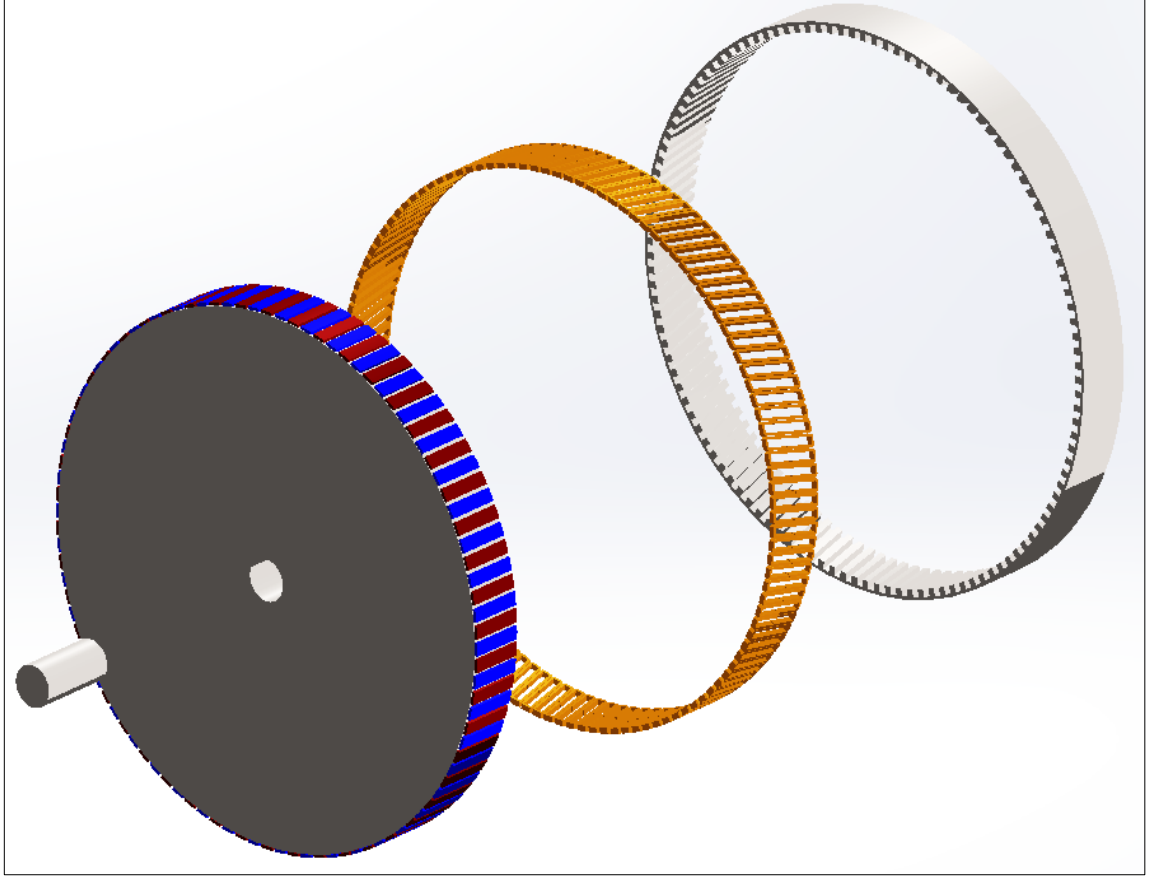
Tanım	Açıklama
Load Line Voltage (V)	764,276
RMS Line Current (A)	926,864
RMS Phase Current (A)	926,864
RMS Phase Voltage (V)	441,442
Armature Thermal Load (A ² /mm ³)	229,193
Specific Electric Loading (A/mm)	54,3454
Armature Current Density (A/mm ²)	4,21733
Frictional and Windage Loss (W)	0
Iron-Core Loss (W)	10038,1
Armature Copper Loss (W)	26877
Total Loss (W)	36915
Output Power (W)	1,22235e+06
Input Power (W)	1,25926e+06
Efficiency (%)	97,0685
Apparent Power (VA)	1,22747e+06
Power Factor	0,995829
Synchronous Speed (rpm)	60
Rated Torque (N.m)	200418
Short Circuit Current (A)	2087,25
WINDING ARRANGEMENT	
The 3-phase, 2-layer winding can be arranged in 6 slots as below	
ABYZCA	
Angle per slot (elec. degrees)	150
Phase-A axis (elec. degrees)	88,6046
First slot center (elec. degrees)	0
TRANSIENT FEA INPUT DATA	
For Armature Winding	
Number of Turns	220
Parallel Branches	2
Terminal Resistance (ohm)	0,0104286
End Leakage Inductance (H)	1,21577e-005
2D Equivalent Value	
Equivalent Model Depth (mm)	396
Equivalent Stator Stacking Factor	0,97
Equivalent Rotor Stacking Factor	0,97
Equivalent Br (Tesla)	1,16159
Equivalent Hc (kA/m)	924,392

EK B: Sarım yerleşimi



Şekil B.1: Sarımların stator oyuklarına yerleşimi.

EK C: Generatörün 3B görseli



Şekil C.2:Generatörün patlatılmış resmi.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : FURKAN KESKİN
Doğum tarihi ve yeri : 22.03.1996 BALIKESİR
e-posta : fur_kes1@hotmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Elektrik Elektronik Mühendisliği	2019-2023
Lisans	Uludağ Üniversitesi/ Elektrik Elektronik Mühendisliği	2014-2018
Lise	Gülser Mehmet Bolluk Anadolu Lisesi	2010-2014