

**T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI MODEL MİKRO RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN
İNCELENMESİ**

TUĞÇE TUNCER

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADİYAMAN, 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI MODEL MİKRO RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN İNCELENMESİ

Tuğçe TUNCER

Adıyaman Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Abdulcelil BUĞUTEKİN
Yıl : 2021, Sayfa sayısı: 215

Jüri : Prof. Dr. Abdulcelil BUĞUTEKİN
Prof. Dr. Ahmet Korhan BİNARK
Prof. Dr. Refet KARADAĞ

İnsanoğlu yaşamı boyunca ihtiyaçlarını karşılamak için bir enerji kaynağına ihtiyaç duymuştur. Fosil yakıtlara göre birçok avantajı olan ve ana kaynağı güneş enerjisi olan rüzgâr enerjisi yenilebilir enerji kaynaklarından yalnızca biridir. Rüzgâr enerjisi tarih boyunca tasarlanan türbinler birçok alanda kullanılmıştır. Gelişen teknoloji ile devasa boyutta sistem ve cihazların küçültülmesi ve teknik olarak iyileştirilmesi ile ilgili birçok örnek verilebilir. Bunlardan biride devasa boyutlara sahip olan rüzgâr türbinleridir. Türbin boyutları ile alakalı tarihte ilk çalışma ‘mikro rüzgâr türbin’ adını verdiği çalışma ile Lucien Gabor tarafından yapılmıştır. Daha sonra bilim insanları tarafından teorik ve deneysel metodlarla ‘farklı model mikro rüzgâr türbinler’ üzerine çalışmalar devam etmiştir.

Bu çalışmada klasik rüzgâr türbinlerinin dezavantajlarına çözümler araştırılmış, her konumda ve düşük rüzgâr hızlarında kesintisiz enerji üretimi sağlayacak ‘yeni tasarım mikro rüzgâr türbini’ bilgisayar destekli modelleme ve simülasyon uygulamaları ile sunulmuştur. Tasarım parametreleri olarak türbin çapı; 200-300-400 mm, kanat sayısı; 6-9-12 adet ve rüzgâr hızları; 2-3-4-5-6-7 m/s ve birleştirme yönetimi; dişli çark sistemi olarak incelenmiştir. Bu parametreler; açılma hızı, kanat uç hız oranı, moment katsayısı, devir, doluluk oranı ve ses şiddeti değerleri ile çizgi grafikler metoduyla karşılaştırılarak bazı veriler elde edilmiştir. Mevcut verilerin değerlendirilmesi sonucunda diğer türbinlere göre ‘300 mm çaplı türbin; 9 kanatlı; 5 m/s hız’ ile daha verimli türbin olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji; Rüzgâr; Türbin; Mikro; Tasarım; Süreklilik

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF DIFFERENT MODEL MICRO WIND TURBINES

Tuğçe TUNCER

Adiyaman University
Graduate Education Institute
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Abdulcelil BUĞUTEKİN
Year : 2021 , Number of pages: 215

Jury : Prof. Dr. Abdulcelil BUĞUTEKİN
Prof. Dr. Ahmet Korhan BİNARK
Prof. Dr. Refet KARADAĞ

Human beings needed an energy source to meet their needs throughout their lives. Wind energy, which has many advantages over fossil fuels and whose main source is solar energy, is only one of the renewable energy sources. Turbines designed throughout the history of wind energy have been used in many areas. Many examples can be given about downsizing and technically improving huge systems and devices with the developing technology. One of them is wind turbines with huge dimensions. The first study in history related to turbine dimensions was carried out by Lucien Gamborata with the study he named "micro wind turbine". Later, studies on "different model micro wind turbines" continued by scientists with theoretical and experimental methods.

In this study, solutions to the disadvantages of conventional wind turbines have been investigated, and "new design micro wind turbine" that will provide uninterrupted energy generation at every location and at low wind speeds is presented with computer aided modeling and simulation applications. Turbine diameter as design parameters; 200-300-400 mm, the number of wings; 6-9-12 pieces and wind speeds; 2-3-4-5-6-7 m / s and joining management; It has been studied as a gear wheel system. These parameters are; Some data were obtained by comparing the angular velocity, blade tip velocity ratio, moment coefficient, speed, occupancy rate and sound intensity with the method of line graphs. Compared to other turbines as a result of the evaluation of the available data "*300 mm diameter turbine; 9 wings; 5 m/s speed*" has been determined as a more efficient turbine.

Key Words: Energy; Wind; Turbine; Micro; Design; Continuity

BEYAN

“FARKLI MODEL MİKRO RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezimde çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Tuğçe TUNCER

İmza

TEŞEKKÜR

Kariyer hayallerimin ilk basamağı olan yüksek lisans eğitimimin sonuna gelmiş bulunuyorum. Mesleğimin önemi ve mühendislik etiğinin ışığında daha öğrenmem gereken birçok bilgi ve önümde katetmem gereken uzun bir yol olduğunun farkında olarak;

Yüksek lisans eğitimim boyunca ilmi ile beraber insani ve ahlaki değerler ile akademik kariyerime hazırlanmamda desteğini esirgemeyen, sabır ve sebat ile yaşam boyu öğrenme felsefesini benimseten, beraber çalışmaktan onur ve mutluluk duyduğum başta tez danışmanım sayın Prof. Dr. Abdulcelil BUĞUTEKİN'e

Çalışmanın özellikle bilgisayar destekli katı modelleme ve simülasyon aşamalarında yardımlarını ve engin bilgilerini içtenlikle paylaşan sayın Görkem ÖZAYDINLI'ya, çalışma kapsamında danıştığım her konuda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın Arş. Gör. Hakan BUCAK'a

Ayrıca karşıma çıkan herhangi bir problem ile ilgili olarak tanımlama, model kurma ve sonuçlandırma ilkesiyle ilerleyerek bilinçli bir araştırmacı olmamda büyük katkı sağlayan Adıyaman Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümü öğretim üyeleri sayın Prof. Dr. Refet KARADAĞ'a, ve sayın Doç. Dr. İsmail BOZKURT'a,

Bu zorlu süreçte desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve kıymetli dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tuğçe TUNCER

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	II
ABSTRACT.....	III
BEYAN.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
RESİMLER DİZİNİ.....	XVII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XIX
1. GİRİŞ	1
1.1. Konunun Amaç ve Kapsamı	1
1.2. Konunun Anlam ve Önemi	2
2. RÜZGÂR ENERJİSİ	4
2.1. Rüzgâr Nedir ve Nasıl Oluşur?	4
2.2. Rüzgâr Parametreleri ve Rüzgâr Gücü.....	4
2.2.1. Rüzgâr Parametreleri.....	4
2.2.1.1. Rüzgâr Hızı	5
2.2.1.2. Rüzgâr Yönü	6
2.2.1.3. Rüzgâr Frekansı	7
2.2.2. Rüzgâr Gücü.....	7
2.2.3. İdeal Disk Teorisi ve Betz Limiti.....	8
2.3. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi.....	11
2.3.1. Dünya’da Rüzgâr Enerjisi	17
2.3.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi	20
2.4. Rüzgâr Enerjisinin Kullanım Alanları.....	22
2.5. Rüzgâr Enerji Santrallerinin Avantaj ve Dezavantajları	24
2.5.1. Rüzgâr Enerji Santrellerinin Avantajları.....	24
2.5.2. Rüzgâr Enerji Santrellerinin Dezavantajları	25
2.6. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	29
2.6.1. Eksen Tipine Göre Rüzgâr Türbinleri.....	30
2.6.1.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini (YERT)	30
2.6.1.2. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT).....	30

2.6.1.3. Eğik Eksenli (Wagner) Rüzgâr Türbini	32
2.6.2. Güce Göre Rüzgâr Türbinleri.....	32
2.6.3. Kanat Sayısına Göre Rüzgâr Türbinleri	32
2.6.3.1. Tek Kanatlı Rüzgâr Türbini	32
2.6.3.2. 2 Kanatlı Rüzgâr Türbini	33
2.6.3.3. 3 Kanatlı Rüzgâr Türbini	33
2.6.3.4. Çok Kanatlı Rüzgâr Türbini.....	34
2.6.4. Rüzgâr Etkisine Göre Rüzgâr Türbini.....	34
2.6.4.1. Rüzgârı Önden Alan Türbinler.....	34
2.6.4.2. Rüzgârı Arkadan Alan Türbinler	35
2.6.5. Dişli Özelliklerine Göre Rüzgâr Türbinleri	35
2.6.5.1. Dişli Kutusu Kullanılan Rüzgâr Türbinleri.....	35
2.6.5.2. Dişli Kutusu Kullanılmayan Rüzgâr Türbinleri.....	35
2.6.6. Kurulum Yerine Göre Rüzgâr Türbinleri.....	36
2.6.6.1. Onshore RES	36
2.6.6.2. Offshore RES	36
3. MİKRO RÜZGÂR TÜRİNİ.....	38
3.1. Mikro Rüzgâr Türbinin Ortaya Çıkış Hikayesi.....	38
3.1.1. Lucien Gambarota Mikro Rüzgâr Türbin Teknolojisi	40
3.1.2. Lucien Gambarota Mikro Rüzgâr Türbini Çalışma Prensibi	40
3.1.3. Neden MRT Teknolojisini Tercih Etmeliyiz?.....	42
3.1.3.1. Bakım	42
3.1.3.2. Güvenlik Faktörü	42
3.1.3.3. Özel Hava Şartlarına Bağlı MRT Teknolojisi.....	42
3.1.3.4. Gürültü	42
3.1.3.5. Doğaya Zarar Verme.....	43
3.1.3.6. Rüzgâr Yönü	43
3.1.3.7. Üretimdeki Kararlılık	43
3.1.3.8. Güç Depolama Kapasitesi	43
3.1.3.9. Arazi Kullanımı ve Konum.....	44
3.1.3.10. Görsellik	44
3.1.3.11. Hibrit Sistem	44
3.1.3.12. Kullanım Ömrü ve Ekonomi	45
3.2. Farklı Model Mikro Rüzgâr Türbinleri	45

3.2.1. Kanat Tipine Göre	46
3.2.1.1. Mikro Rüzgâr Türbini	46
3.2.1.2. Francis Türbin	47
3.2.1.3. Ducted Mikro Türbin	48
3.2.1.4. Fan Tip Mikro Türbin	48
3.2.2. Dönme Eksenine Göre Mikro Rüzgâr Türbinleri.....	49
3.2.3. Kanat Sayısına Göre Mikro Rüzgâr Türbinleri	49
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	51
4.1. Türbin Çapı	51
4.2. Kanat Sayısı.....	55
4.3. Kanat Açısı	58
4.4. Diğer Çalışmalar	61
5. MATERYAL VE YÖNTEM	69
5.1. Yeni Tasarım Mikro Rüzgâr Türbini	69
5.2. Yeni Tasarım Mikro Rüzgâr Türbini Tasarımı	70
5.2.1. Literatür Taraması ve Planlama Süreci	70
5.2.2. Bilgisayar Destekli Katı Modelleme	72
5.2.3. Hesaplar ve Simülasyon	91
5.2.3.1. 200 mm Çaplı Türbin Simülasyonları ve Veri Analizi	98
5.2.3.2. 300 mm Çaplı Türbin Simülasyonları ve Veri Analizi	119
5.2.3.3. 400 mm Çaplı Türbin Simülasyonları ve Veri Analizi	141
6. BULGULAR ve TARTIŞMA	164
6.1. Bulgular	164
6.2. Tartışma.....	167
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	173
7.1. Sonuçlar.....	173
7.2. Öneriler.....	179
KAYNAKLAR	180
KİŞİSEL BİLGİLER	189
EKLER.....	190

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 İnceden kalına standart dişli modül ve Pd değerleri	77
Çizelge 5.2 Düz dişli çarklar	80
Çizelge 5.3 Türbin çapına göre diş sayısı	81
Çizelge 5.4 Türbin ve kanat tasarımı parametreleri ve değerleri	83
Çizelge 5.5 Simülasyon programı kabul şartı ve değerleri	92
Çizelge 5.6 Türbin doluluk oranının hesaplanmasında kullanılan değerler.....	93
Çizelge 5.7 Türbinler doluluk oranları.....	94
Çizelge 5.8 200 – 300 ve 400 mm çaplı 6 kanatlı türbinlerin kanat uç hız oranları ..	94
Çizelge 5.9 200 – 300 ve 400 mm çaplı 9 kanatlı türbinlerin kanat uç hız oranları ..	95
Çizelge 5.10 200 – 300 ve 400 mm çaplı 12 kanatlı türbinlerin kanat uç hız oranları	95
Çizelge 5.11 200 – 300 ve 400 mm çaplı 6 kanatlı türbinlerin açısal hızları.....	96
Çizelge 5.12 200 – 300 ve 400 mm çaplı 9 kanatlı türbinlerin açısal hızları.....	96
Çizelge 5.13 200 – 300 ve 400 mm çaplı 12 kanatlı türbinlerin açısal hızları.....	97
Çizelge 5.14 200 mm çaplı türbinlerin simülasyon ve hesap sonuçları.....	116
Çizelge 5.15 300 mm çaplı türbinlerin simülasyon ve hesap sonuçları.....	138
Çizelge 5.16 400 mm çaplı türbinlerin simülasyon ve hesap sonuçları.....	160
Çizelge 6.1 Türbinlerin doluluk oranına göre karşılaştırması.....	168
Çizelge 6.2 Türbinlerin açısal hız değerine göre karşılaştırması	168
Çizelge 6.3 Türbinlerin devir değerine göre karşılaştırması	169
Çizelge 6.4 Türbinlerin kanat uç hız oranı değerine göre karşılaştırması.....	170
Çizelge 6.5 Türbinlerin moment katsayısı değerine göre karşılaştırması	171
Çizelge 6.6 Türbinlerin ses şiddetine göre karşılaştırması	172

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Rüzgâr oluşumu	4
Şekil 2.2 Rüzgâr frekans gülü	7
Şekil 2.3 Örnek bir profil üzerine gelen kuvvetler.....	8
Şekil 2.4 Akım tüpündeki hareketli diskten geçen idealleştirilmiş akış	9
Şekil 2.5 2020 Yılı itibarı ile Dünya üzerindeki ülkelerin toplam kurulu rüzgâr enerjisi kapasitelerinin dağılımı	18
Şekil 2.6 2020 Yılı itibarı ile Dünya üzerindeki ülkelerin toplam kurulu rüzgâr enerjisi kapasitelerinin dağılımı	19
Şekil 2.7 Yıllara göre tesislerin tarihi gelişimi.....	19
Şekil 2.8 2020 yılına ait işletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı.....	21
Şekil 2.9 2020 yılına ait işletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı	21
Şekil 2.10 Kapasite faktörü dağılımı.....	28
Şekil 2.11 RES kurulabilir alanlar	28
Şekil 2.12 Trafo merkezleri ve enerji nakil hatları	29
Şekil 2.13 Kayıtlara geçmiş çeşitli RT tipleri	29
Şekil 2.14 Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırması	30
Şekil 3.1 Tek fazlı şebeke	41
Şekil 3.2 Üç fazlı şebeke.....	41
Şekil 3.3 Visual outlook örneği.....	44
Şekil 3.4 Mikro rüzgâr türbinlerin sınıflandırılması	46
Şekil 3.5 İki kanatlı yatay eksenli MRT.....	50
Şekil 3.6 5, 6 ve 7 kanatlı yatay eksenli MRT	50
Şekil 5.1 Ana dişli ve pinyon dişli	73
Şekil 5.2 Dişli bölgesi tanımları.....	74
Şekil 5.3 Dişli birleşiminde tanımlar	75
Şekil 5.4 Dişli birleşiminde tanımlar	75
Şekil 5.5 Açıklık ve diş boşluğu	76
Şekil 5.6 Hareket hattı.....	76
Şekil 5.7 Dişli ve çap gösterimi	77

Şekil 5.8 Dişli modülü genel görünüm	78
Şekil 5.9 İç göbek ve teknik resmi	82
Şekil 5.10 Göbek üzerinde kanat profili ve teknik resmi	83
Şekil 5.11 Göbek teknik resim	84
Şekil 5.12 Kanat teknik resim	84
Şekil 5.13 Kanat teknik resim	84
Şekil 5.14 Kanatların göbek etrafında belirlenen tam sayı kadar çoğaltılması işlemi ve son hali	85
Şekil 5.15 Kanatların son bulunduğu bölgeye dairesel hat oluşturma işlemi ve teknik resmi	86
Şekil 5.16 Türbin göbek oluşturma ve teknik resim	86
Şekil 5.17 Türbin göbek oluşturma son hali ve teknik resmi	87
Şekil 5.18 Türbin göbek tasarımı ve teknik resmi	88
Şekil 5.19 Türbin göbek tasarımı ve detaylı teknik resmi	88
Şekil 5.20 Türbin göbek tasarımı ve detaylı teknik resmi	89
Şekil 5.21 Türbin göbek tasarımı ve detaylı teknik resmi	89
Şekil 5.22 Türbin göbek tasarımı ve detaylı teknik resmi	90
Şekil 5.23 200 mm türbin dişliler ve tasarımın son hali	91
Şekil 5.24 200 mm - 6 kanatlı türbin	98
Şekil 5.25 200 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti	98
Şekil 5.26 200 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	98
Şekil 5.27 200 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti	99
Şekil 5.28 200 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	99
Şekil 5.29 200 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti	100
Şekil 5.30 200 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	100
Şekil 5.31 200 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti	101
Şekil 5.32 200 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	101
Şekil 5.33 200 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti	102
Şekil 5.34 200 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	102
Şekil 5.35 200 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti	103
Şekil 5.36 200 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	103

Şekil 5.37 200 mm - 9 kanatlı türbin	104
Şekil 5.38 200 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	104
Şekil 5.39 200 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	104
Şekil 5.40 200 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	105
Şekil 5.41 200 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	105
Şekil 5.42 200 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	106
Şekil 5.43 200 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	106
Şekil 5.44 200 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	107
Şekil 5.45 200 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	107
Şekil 5.46 200 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	108
Şekil 5.47 200 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	108
Şekil 5.48 200 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	109
Şekil 5.49 200 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	109
Şekil 5.50 200 mm - 12 kanatlı türbin	110
Şekil 5.51 200 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	110
Şekil 5.52 200 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	110
Şekil 5.53 200 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	111
Şekil 5.54 200 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	111
Şekil 5.55 200 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	112
Şekil 5.56 200 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	112
Şekil 5.57 200 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	113
Şekil 5.58 200 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	113
Şekil 5.59 200 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	114
Şekil 5.60 200 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	114
Şekil 5.61 200 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	115
Şekil 5.62 200 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	115
Şekil 5.63 200 mm türbinlerin doluluk grafiği.....	116
Şekil 5.64 200 mm türbinlerin açısal hız grafiği.....	117
Şekil 5.65 200 mm türbinlerin devir grafiği.....	117
Şekil 5.66 200 mm türbinlerin kanat uç hız oranı grafiği	118
Şekil 5.67 200 mm türbinlerin moment katsayısı grafiği.....	118

Şekil 5.68 200 mm türbinlerin ses şiddeti grafiği	119
Şekil 5.69 300 mm - 6 kanatlı türbin	119
Şekil 5.70 300 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	120
Şekil 5.71 300 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	120
Şekil 5.72 300 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	121
Şekil 5.73 300 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	121
Şekil 5.74 300 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	122
Şekil 5.75 300 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	122
Şekil 5.76 300 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	123
Şekil 5.77 300 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	123
Şekil 5.78 300 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	124
Şekil 5.79 300 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	124
Şekil 5.80 300 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	125
Şekil 5.81 300 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	125
Şekil 5.82 300 mm - 9 kanatlı türbin	126
Şekil 5.83 300 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	126
Şekil 5.84 300 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	126
Şekil 5.85 300 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	127
Şekil 5.86 300 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	127
Şekil 5.87 300 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	128
Şekil 5.88 300 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	128
Şekil 5.89 300 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	129
Şekil 5.90 300 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	129
Şekil 5.91 300 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	130
Şekil 5.92 300 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	130
Şekil 5.93 300 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti.....	131
Şekil 5.94 300 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	131
Şekil 5.95 300 mm - 12 kanatlı türbin	131
Şekil 5.96 300 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	132
Şekil 5.97 300 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	132
Şekil 5.98 300 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	133

Şekil 5.99 300 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	133
Şekil 5.100 300 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	134
Şekil 5.101 300 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	134
Şekil 5.102 300 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	135
Şekil 5.103 300 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	135
Şekil 5.104 300 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	136
Şekil 5.105 300 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	136
Şekil 5.106 300 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	137
Şekil 5.107 300 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	137
Şekil 5.108 300 mm türbinlerin doluluk oranı grafiği	138
Şekil 5.109 300 mm türbinlerin açısız hız grafiği.....	139
Şekil 5.110 300 mm türbinlerin devir grafiği.....	139
Şekil 5.111 300 mm türbinlerin kanat uç hız oranı grafiği	140
Şekil 5.112 300 mm türbinlerin moment katsayısı grafiği.....	140
Şekil 5.113 300 mm türbinlerin ses şiddeti grafiği	141
Şekil 5.114 400 mm - 6 kanatlı türbin	141
Şekil 5.115 400 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	142
Şekil 5.116 400 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	142
Şekil 5.117 400 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	143
Şekil 5.118 400 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	143
Şekil 5.119 400 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	144
Şekil 5.120 400 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	144
Şekil 5.121 400 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	145
Şekil 5.122 400 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	145
Şekil 5.123 400 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	146
Şekil 5.124 400 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	146
Şekil 5.125 400 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	147
Şekil 5.126 400 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	147
Şekil 5.127 400 mm - 9 kanatlı türbin	148
Şekil 5.128 400 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	148
Şekil 5.129 400 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	148

Şekil 5.130 400 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	149
Şekil 5.131 400 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	149
Şekil 5.132 400 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	150
Şekil 5.133 400 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	150
Şekil 5.134 400 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	151
Şekil 5.135 400 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	151
Şekil 5.136 400 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	152
Şekil 5.137 400 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	152
Şekil 5.138 400 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti....	153
Şekil 5.139 400 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	153
Şekil 5.140 400 mm - 12 kanatlı türbin	153
Şekil 5.141 400 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	154
Şekil 5.142 400 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	154
Şekil 5.143 400 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	155
Şekil 5.144 400 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	155
Şekil 5.145 400 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	156
Şekil 5.146 400 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	156
Şekil 5.147 400 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	157
Şekil 5.148 400 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	157
Şekil 5.149 400 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	158
Şekil 5.150 400 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	158
Şekil 5.151 400 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti..	159
Şekil 5.152 400 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları	159
Şekil 5.153 400 mm türbinlerin doluluk oranı grafiği	160
Şekil 5.154 400 mm türbinlerin açısız hız grafiği.....	161
Şekil 5.155 400 mm türbinlerin devir grafiği.....	161
Şekil 5.156 400 mm türbinlerin kanat uç hız oranı grafiği	162
Şekil 5.157 400 mm türbinlerin moment katsayısı grafiği.....	162
Şekil 5.158 400 mm türbinlerin ses şiddeti grafiği	163
Şekil 7.1 Doluluk oranı sonuç değerlendirme.....	173
Şekil 7.2 Açısız hız sonuç değerlendirme	174

Şekil 7.3 Devir sonuç değerlendirme	175
Şekil 7.4 Kanat uç hız oranı sonuç değerlendirme.....	176
Şekil 7.5 Moment katsayısı sonuç değerlendirme.....	177
Şekil 7.6 Ses şiddeti sonuç değerlendirme	178



RESİMLER DİZİNİ

Resim 1.1 Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlası-Rüzgâr hızı haritası	2
Resim 2.1 Kepçe, ultrasonik, propeller	5
Resim 2.2 Dijital anemometre	6
Resim 2.3 Jirüet.....	6
Resim 2.4 Windjak.....	6
Resim 2.5 Rüzgâr türbinlerinin tarihsel gelişimi	12
Resim 2.6 La Cour - Danimarka'da Lykkegard rüzgâr türbini	12
Resim 2.7 Beton kule ile Smidth aeromotor	13
Resim 2.8 Smidth üç kanatlı rotorlu aeromotor	13
Resim 2.9 Hermann Honnef'den büyük bir rüzgâr santrali vizyonu.....	14
Resim 2.10 Man-Kleinhenz	14
Resim 2.11 Rus rüzgâr türbini, Rüzgâr D-30	14
Resim 2.12 John Brown Company'nin Orkneys'deki rüzgâr türbini.....	15
Resim 2.13 Jacobs “rüzgâr şarj cihazı”	15
Resim 2.14 Offshore rüzgâr enerji santrali	16
Resim 2.15 Çeşme Germiyan RES	17
Resim 2.16 Soma Rüzgâr Enerji Santrali.....	22
Resim 2.17 Karaburun Rüzgâr Enerji Santrali.....	22
Resim 2.18 Burgaz RES.....	27
Resim 2.19 Darrieus tipi rüzgâr türbini	31
Resim 2.20 Farklı kanat sayılarında Savonius rüzgâr türbinlerinin tasarımı	32
Resim 2.21 Eğik eksenli rüzgâr türbini.....	32
Resim 2.22 Tek kanatlı rüzgâr türbini	33
Resim 2.23 2 kanatlı rüzgâr türbini.....	33
Resim 2.24 Üç kanatlı rüzgâr türbini	34
Resim 2.25 Çok kanatlı rüzgâr türbini	34
Resim 2.26 Rüzgârı önden alan türbinler.....	35
Resim 2.27 Rüzgârı arkadan alan türbinler.....	35
Resim 2.28 Onshore RES.....	36

Resim 2.29 Offshore RES	37
Resim 3.1 Mikro rüzgâr türbini.....	38
Resim 3.2 Mikro rüzgâr türbin paneli	39
Resim 3.3 MRT paneli	45
Resim 3.4 MRT	47
Resim 3.5 Francis MRT ile ilgili bir uygulama	47
Resim 3.6 Ducted 3 kanatlı mikro rüzgâr türbini.....	48
Resim 3.7 5 kanatlı 3 adet ducted MRT paneli.....	48
Resim 3.8 Fan tip MRT.....	49
Resim 3.9 Helisel darrieus model dikey eksenli MRT	49
Resim 3.10 Savonius model dikey eksenli MRT	49
Resim 3.11 3 kanatlı ducted tip MRT	50
Resim 3.12 Çok kanatlı (24 kanatlı) yatay eksenli MRT tasarımı	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_f	: kapasite faktörü
C_p	: maksimum güç katsayısı
dB	: desibel
F	: kuvvet
GW	: gigawatt
kW	: kilowatt
λ	: uç hız oranı
mb	: milibar
MW	: megawatt
η	: verim
ω_r	: açısal hız
Pd	: Diametral pitch (Çap adımı)
r	: yarıçap
R	: çap
rad	: radyan
rpm	: revolutions per minute (dakikadaki devir sayısı)
ρ	: yoğunluk
s	: saniye
V	: Rüzgâr hızı
V_r	: çizgisel hız
%	: yüzde
Φ	: basınç açısı
W	: watt

Kisaltmalar

AC	: Alternating Current-Alternatif Akım
AGMA	: Amerikan Dişli Üreticileri Birliği (American Gear Manufacturers Association)
Ar-Ge	: Araştırma-Geliştirme
BEM	: Blade Element Momentum
BL	: Betz Limiti
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DC	: Direct Current-Doğru Akım
EİEİ	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
KORT	: Küçük-Orta Rüzgâr Türbini
KRT	: Küçük Rüzgâr Türbini

LCOE	: Levelized cost of energy (Seviyelendirilmiş enerji maliyeti)
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MÖ	: Milattan Önce
MRT	: Mikro Rüzgâr Türbini
MS	: Milattan Sonra
NTM	: Normal Türbülans Modeli
ODTÜ	: Ortadoğu Teknik Üniversitesi
PPA	: Power Purchase Agreement- Enerji Satın Alma Sözleşmesi
PV	: Photovoltaik
RANS	: Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri)
RES	: Rüzgâr Enerji Santralleri
RGİ	: Rüzgâr Enerjisi Gözlem İstasyonları
REPA	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
RİTM	: Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi
RT	: Rüzgâr Türbini
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition (Denetleyici kontrol ve veri toplama)
SI	: System International (Uluslararası Birimler Sistemi)
SÖMRT	: Santimetre Ölçekli Mikro Rüzgâr Türbin
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
TÜREB	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Amaç ve Kapsamı

İnsanoğlu ihtiyaçlarını karşılamak için geçmişten günümüze çeşitli enerji kaynaklarından dönemin şartlarına göre değişik yöntemlerle faydalanmıştır. İhtiyaçların sürekli olarak karşılanması, yaşam kalitesinin artmasını ve refah düzeyinin yükselmesini sağlamıştır. Gelişen teknoloji ve bilinen enerji kaynaklarının çeşitlenmesi ile enerji kaynakları genel olarak ‘yenilenemez’ ve ‘yenilenebilir’ enerji kaynakları olmak üzere sınıflandırılmıştır.

Kökenini canlı organizmaların yüzyıllarca yeraltında, uygun derinlikte kimyasal ve fiziksel etkilerle dekompozisyonu (bozulması) sonucunda fosil kaynaklı olan (petrol, doğalgaz, kömür vb.) yenilenemez enerji kaynaklarına; fosil yakıtlar, mineral yakıtlar, konvansiyonel (tükenir) enerji kaynakları denilmektedir. Aynı zamanda doğrudan kullanılabilirlikleri için birincil (primer) enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır. Doğal kaynaklardan ve doğanın kendini yenileme süreci sonucu elde edilen (Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji vb.) yenilenebilir enerji kaynaklarına; doğal enerji kaynakları, sürdürülebilir enerji kaynakları, alternatif enerji kaynakları da denilmektedir. Kullanıma hazır hale gelmesi için doğal formundan başka bir forma dönüştürülerek kullanılabilirliğinden ikincil (sekonder) enerji kaynakları olarak bilinmektedir. Enerji her alanda ihtiyacı karşılamak amacıyla çok değişik formlarda, istenen miktarda üretilebilir ve dönüştürülebilir.

Birinci Dünya Savaşı’ndan sonra yenilenemez enerji kaynaklarının jeopolitik konumu ve doğadaki dengesiz dağılımı ile yenilenemez enerji kaynaklarının çevresel etkileri, tükenme riski gibi birçok dezavantaj fark edilmiştir. 18. ve 19. yüzyıllarda Sanayi Devrimi (Endüstri Devrimi) sonrasında buhar makinelerinin icadı ve yeni buluşlar ile enerjiye olan bağlılık artmıştır. Sanayi Devrimi sonrasında yenilenemez enerji kaynaklarının dezavantajlarının artması ve bilinen enerji kaynaklarının yetersiz kalması ile zararsız ya da daha az zararı olan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Günümüzde Dünya çapında devletler, sanayiler, üniversiteler ve çeşitli araştırma grupları ile araştırma ve çalışmalar devam etmektedir.

Klasik rüzgâr türbinlerin de tasarımsal; kanat sayısı, kanat açısı, kanat çapı gibi değişiklikler doğrultusunda ‘Mikro Rüzgâr Türbini’ (MRT) adı verilen tasarımlar geliştirilmiştir.

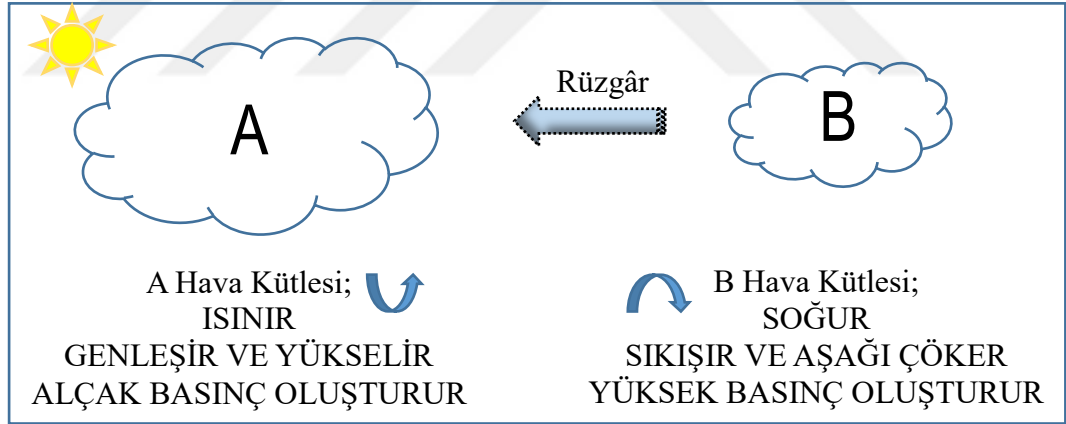
MRT’lerin amacı rüzgâr enerji santrallerindeki (RES) türbinlerin dezavantajlarına (yüksek rüzgâr hızları, kesintili bir enerji kaynağı olması, yüksek desibelde ses oluşturmaları, yerleşim yerlerine yakın kurulamaması, kurulum için geniş sahalara ihtiyaç duyması, göçmen kuşlara ve tabiata zarar vermesi, şebekeye aktarma ve depolama sorunları, yüksek meblağlar gerektirmesi, TV sinyallerini bozması ve görüntü kirliliği oluşturması vb.) çözüm getirmek ve bu dezavantajları minimize etmektir.

Bu çalışmada rüzgâr enerjisi ile ilgili genel bilgiler (literatür taraması-rüzgâr enerjisi türbinler...) verilmiş ve farklı model mikro rüzgâr türbinleri incelenmiştir. Mevcut rüzgâr enerji potansiyelinin kullanımını arttırmak ve hayatın her alanında ve hatta her yerinde (evlerde, balkonlarda, çatılarda vb.) rüzgâr enerjisinden faydalanılması ve enerjide sürekliliğin sağlanması amaçlanmıştır. Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynaklarında hatırı sayılır bir potansiyele sahip olmakla beraber kullanımında hala dışa bağımlı durumdadır. Bu çalışma ile rüzgâr enerjisinde kendi enerjimizi kendimiz üretebilecek bir niteliğe sahip olma ihtimalimiz söz konusudur. Ülkemizde benzeri bir çalışmaya rastlanılmamıştır. MRT ile ilgili yapılan çalışmaların devam ettirilmesi ve farklı araştırma konularına ön ayak olma potansiyeline sahiptir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1. Rüzgâr Nedir ve Nasıl Oluşur?

Hava kütlelerinin yatay yönde ki hareketine (akımına) rüzgâr denir. Rüzgâr oluşumu için, merkezleri farklı olan iki hava kütlesi arasında basınç farkı olmalıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ana maddesi Güneş'tir. Bahsi geçen basınç farkı sıcaklığın etkisiyle oluşur. Hava akımları daima yüksek basınçtan alçak basınca doğru oluşmaktadır. Basınç farkı ekvatorda yüksekliğe ve hava sıcaklığına göre değişmektedir. Şekil 1'de yeryüzünde yan yana bulunan iki bölge; A ve B hava kütlesi A hava kütlelerinde sıcaklığın artmasıyla, hava kütlesi genleşerek yükselir ve alçak basınç alanı oluşturur. Sıcaklığı daha az olan B hava kütlelerinde ise hava soğuyarak sıkışır, yoğunlaşarak aşağı doğru çöker ve yüksek basınç alanı oluşur. Yüksek basınç bölgesinde sıkışan bu hava alçak basınç bölgesine doğru akmaya başlar ve rüzgâr meydana gelir[1].



Şekil 2.1 Rüzgâr oluşumu

2.2. Rüzgâr Parametreleri ve Rüzgâr Gücü

Rüzgâr, çevreye yaptığı çeşitli etkilerle gözlenebilir. Bu etkilerin sonuçları rüzgâr parametreleri olarak gruplandırılabilir. Etkilerin bileşkesi ise rüzgâr gücü olarak adlandırılabilir.

2.2.1. Rüzgâr Parametreleri

Rüzgâr parametreleri rüzgâr enerjisinin ölçümlerinde, performans ve potansiyel değerlendirilmesinde önemli rol oynar. Rüzgârın üç belirgin parametresi vardır. Bunlar; yönü, hızı ve esme sayısı (frekansı) olarak sıralanabilir.

2.2.1.1. Rüzgâr Hızı

Hava akımının hareketine bağlı olarak oluşan skaler bir niceliktir. Rüzgâr hızının yanı sıra bazı meteorolojik parametrelerin de ölçülmesi son derece yararlı olacaktır. Özellikle rüzgâr enerjisi hesaplamalarında kullanılan bir parametre olan hava yoğunluğunu hesaplayabilmek için basınç, sıcaklık ve nemlilik değerlerinin ölçülmesi önemlidir. Havanın yoğunluğu SI birim sistemine göre (deniz seviyesinde, +15 °C sıcaklıkta ve 1013,25 mb atmosfer basıncında) havanın yoğunluğu 1,225 kg/m³ 'tür.

Deniz seviyesinden yükseldikçe hem atmosfer basıncı hem de havanın yoğunluğu azalır. Ayrıca atmosferik kararlılığın belirlenebilmesi amacıyla yine 2 seviyede sıcaklık ölçümü yapılması rüzgâr enerjisi hesaplamalarındaki hassasiyetin ve doğruluğun artırılması bakımından önemlidir[2].

Rüzgâr hızı anemometre ile ölçülür. Rüzgâr hızı, m/s, km/h ve knot (deniz mili/saat) birimleri ile ifade edilir.

1 kara mili = 1609 m,

1 deniz mili = 1852 m,

1 knot = 1 deniz mili/saat = 0,5148 m/s = 1,8532 km/h

Resim 2.1’de manuel anemometreler bir arada verilmiştir. Kepçe anemometrede kepçe rotorunun bir dönüşü için geçen süreye göre rüzgâr hızı belirlenir. Ultrasonik anemometrede her bir uçtan yayılan ses dalgasının diğer kol tarafından alınması sırasında geçen sürenin ölçülmesi prensibi ile çalışmaktadır. Propeller anemometrenin çalışma prensibi de kepçe anemometrelerle aynıdır. Bu tip anemometreler rüzgâr yönüne paralel monte edildiğinde yatay rüzgâr hızını, dik monte edildiğinde de dikey rüzgâr hızını ölçerler [3].



Resim 2.1 Kepçe, ultrasonik, propeller (manuel anemometre tipleri)

Resim 2.2’de gösterilen dijital anemometre rüzgâr hızının değerini direkt ekrandan okumaya yarayan cihazdır.



Resim 2.2 Dijital anemometre

2.2.1.2. Rüzgâr Yönü

Rüzgâr yönü, rüzgârın esme yönüdür. Esme yönünün belirlenmesinde kullanılan cihazlara yön sensörleri denir. Rüzgâr ölçümleri yapılırken rüzgârın hızının yanında, yönünün de ölçülmesi gereklidir. Ölçüm yapılan bölgedeki rüzgâr, belirli bir yönden esebileceği gibi, farklı yönlerde ve farklı yüzdelerde esebilmektedir. Rüzgâr yönlerinin değişen frekansları ve rüzgâr hızlarının dağılımını göstermek için yönünün belirlenmesi gerekir. Yön sensörü, rüzgârın esme yönünü elektriksel sinyale çeviren sensördür[4]. Yön sensörleri olarak adlandırılan sistemler; jirüet Resim 2.3'te (anemoskop) ve windjak Resim 2.4'te (rüzgâr torbası, rüzgâr tulumu, windsock) gösterilmiştir.



Resim 2.3 Jirüet

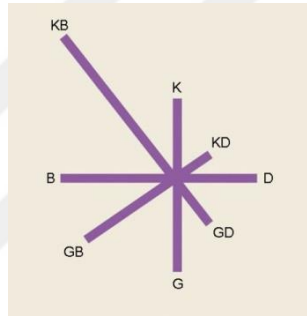


Resim 2.4 Windjak

2.2.1.3. Rüzgâr Frekansı

Rüzgâr yönleri zaman zaman değişir ve bu değişimler hava koşulları üzerinde önemli etkiler yaratır. Bu nedenle rüzgârın hangi yönden, ne kadar süre ile ve ne kadar sık estiğinin bilinmesi gerekir. Bir rüzgârın esiş sıklığına o rüzgârın frekansı denir. Rüzgâr frekansları aylık, mevsimlik veya yıllık olarak hesaplanabilir.

Belirli yönlü rüzgârların bütün rüzgârlara olan oranları %, diyagramlar veya rüzgâr frekans gülleri şeklinde belirtilmektedir. Bir örneği Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Rüzgâr frekans gülü çizilirken önce yön eksenleri üzerinde o yönde esen rüzgârların sayısı uzunluk olarak işaretlenir. İşaretlenen noktaların birleştirilmesiyle elde edilen poligonun içi taranarak rüzgâr frekans gülü oluşturulur[5].

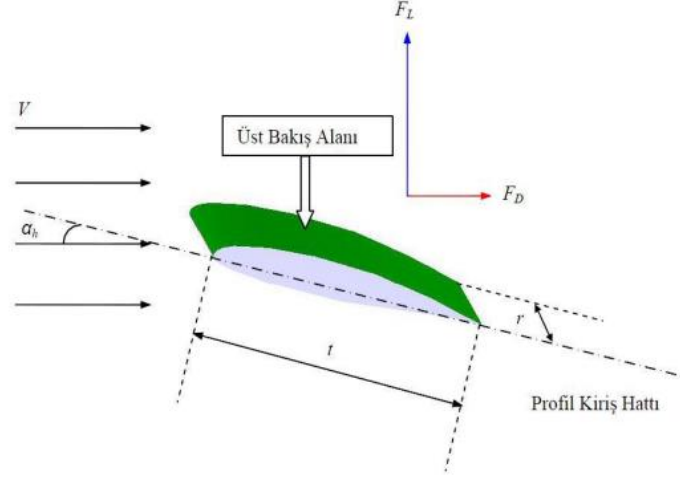


Şekil 2.2 Rüzgâr frekans gülü

2.2.2. Rüzgâr Gücü

Rüzgârlar, genel olarak bir merkez hareket halindedir ve kendilerini dolanım merkezlerinden uzaklaştırmak isteyen bir kuvvet etkisi altında bulunurlar. Bu kuvvete, merkezkaç kuvveti denilmektedir. Rüzgârda meydana gelen kuvvetlerin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli kanat profilleri tasarlanmıştır. En genel haliyle profiller, bir kiriş hattı üzerinde ve altında tanımlanmış 2 adet özel eğrinin birleşiminden oluşmaktadır. Üst eğrinin, alt eğriye göre daha eğimli bir şekle sahip olması, her iki tarafta farklı akışkan hızları oluşturmaktadır. Farklı akışkan hızlarından bir basınç farkı meydana gelir ve yüksek basınç tarafından alçak basınç yönüne doğru bir kaldırma kuvveti doğar. Bir serbest akım içerisinde yer alan, sahip olduğu kiriş hattı ile akışkan hızı arasındaki hücum açısı (α_h) olan örnek bir profil ve üzerine gelen kuvvetler ise Şekil 2.3’ te görülmektedir. Akış sebebiyle meydana gelecek olan sürüklenme kuvveti (F_D), her zaman için akış yönüne paraleldir.

Oluşan diğer kuvvet, kaldırma kuvveti ise (F_L), akışa ve sürüklenme kuvvetine dik yöndedir. Türbini döndüren kuvvet, bu iki kuvvetin bileşkesidir[6].



Şekil 2.3 Örnek bir profil üzerine gelen kuvvetler [6]

Rüzgârı meydana getiren ve rüzgârın hızına etki eden atmosfer içindeki diğer kuvvetler ise basınç gradyan kuvveti, Coriolis kuvvetidir. Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacaktır[7]. Havanın bu kuvvetlerin etkisi altında kalmasıyla oluşan rüzgâr enerjisinin bir bölümü mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir[6].

2.2.3. İdeal Disk Teorisi ve Betz Limiti

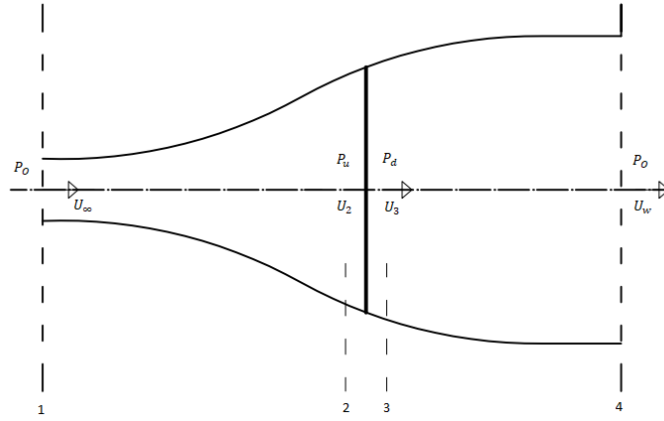
Rüzgâr türbini (RT) üretimi için geliştirilen modeller elde edilecek gücün tahmini için önemlidir. İdeal disk teorisi rüzgâr enerjisi için geliştirilmiş ilk teorilerdendir. Türbin kanatlarına gelen rüzgârın, giriş ve çıkış hızları arasındaki değer farkına bağlı olarak gücünde bir değişim oluşmaktadır.

Teorik olarak ilk yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT) 1930'lu yıllarda Betz tarafından tasarlanmış ve adını sahibinden alan Betz limiti ile rüzgâr türbinlerinin teorik verimini % 59 olarak ispatlamıştır. Betz limiti günümüzde hala kullanılmakla beraber literatür de rüzgâr enerjisi konusunda yapılmış olan ve halihazırda devam eden çalışmalara büyük bir kolaylık sağlamıştır[8]. Belirlenen bir konum için rüzgâr enerji hesabı yapılarak yerin enerji potansiyeli bulunmak istenirse; havanın yoğunluğu (ρ) = $1,225 \text{ kg/m}^3$, Betz Limit (BL)= 0,5926 olarak sabittir.

Rotor dönüş verimi (η_R) = 0,75 ve türbin verimi (η_T) = % 47 olarak kabul edilmiş olsun (2.1) denklemde V rüzgâr hızıdır. Birim alandan geçen rüzgâr enerjisi için bulunmuş enerji;

$$\frac{T}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 (BL) \eta_R \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) kullanılan ‘Betz Limiti’ bir sabittir ve hesaplama yapılırken, sürekli, homojen ve sıkıştırılamaz bir akış, disk üzerindeki basınç değişiminin her noktada aynı olduğu, sonsuz sayıda kanat olduğu, diskin önünde ve arkasında türbülans olmadığı kabul edilmektedir. İdeal disk teorisinin analizi, kontrol hacmi alınarak yapılır. Burada kontrol hacminin sınırları Şekil 2.4’te gösterildiği gibi akım tüpünün sınırları ve akım tüpünün iki ucudur.



Şekil 2.4 Akım tüpündeki hareketli diskten geçen idealleştirilmiş akış [6]

Diskten içinden geçen hava akış hızının sürekli olduğu varsayımı ile;

$$U_2 = U_3 = U_R \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır. Sabit debili bir akışta diskten geçen havanın debisi ise;

$$\dot{m} = \rho A U_R \quad (2.3)$$

olur. Kontrol hacminde lineer momentumun korunumu ilkesi uygulanır, böylece kontrol hacminin içerisindeki net kuvvetler bulunmuş olur.

Bernoulli fonksiyonu, hareketli diskin her iki tarafındaki kontrol hacminde de kullanılabilir. Serbest akış ve rotorun ön tarafı arasında ve rotorun arka tarafı ile oluşan dalga arasında sırasıyla Bernoulli fonksiyonu uygulanırsa;

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 = P_U + \frac{1}{2} \rho U_R^2 \quad (2.4)$$

$$P_d + \frac{1}{2}\rho U_R^2 = P_o + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 \quad (2.5)$$

Denklem (2.6)'da T rotordaki rüzgâr kuvvetidir ve itme kuvveti olarak adlandırılmaktadır. İtme kuvveti, hareketli diskin her iki tarafındaki kuvvetlerin toplamı olarak da aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$T = Ap' \quad (2.6)$$

p' hareketli disk yüzeyindeki basınç azalmasını temsil etmektedir.

$$p' = (P_U - P_d) \quad (2.7)$$

(2.4) ve (2.5) denklemlerini kullanarak basınç azalması;

$$p' = \frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2) \quad (2.8)$$

olarak yazılabilir. (2.6) ve (2.8) denklemleri de uygulanırsa;

$$T = \frac{1}{2}\rho A(U_\infty^2 - U_w^2) \quad (2.9)$$

olur. Rotor düzlemindeki hız ise;

$$U_R = \frac{U_\infty + U_w}{2} \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Böylece, rotor düzlemindeki rüzgâr hızı basit bir model kullanılarak ortalama olarak bulunur. (2.10) denkleminde görüldüğü gibi hareketli disk üzerindeki akış hızı, diskin önündeki ve arkasındaki hızların aritmetik ortalamasıdır. Bu denkleme göre U_w U_R 'ye ve U_R ise $U_\infty a$ dönüşür. Eksenel akış faktörü a ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$a = \frac{U_\infty - U_R}{U_\infty} \quad (2.11)$$

Eksenel akış faktörü 0-1 arasında değişen boyutsuz bir sayıdır. Buradan rotor düzleminde ki hız ile eksenel akış faktörü arasındaki ilişki;

$$U_R = U_\infty(1 - a) \quad (2.12)$$

ve diskten sonraki akış hızı ile eksenel akış faktörü arasındaki ilişki ise;

$$U_w = U_\infty(1 - 2a) \quad (2.13)$$

olarak belirlenir. Rotordaki güç çıkışı ise, itme kuvvetinin ve rotor düzlemindeki rüzgâr hızının çarpımına eşit olarak şu şekilde belirlenir;

$$P = TU_R \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir.

(2.9) ve (2.14) denklemleri kullanılır ve (2.12) ile (2.13) eşitliklerde bulunan U_R ve U_w değerleri yerine yazılırsa,

$$P = \frac{1}{2} \rho A (U_\infty^2 - U_w^2) U_R \quad (2.15)$$

eşitliği elde edilir. Türbin güç katsayısı ise;

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 \pi R^2} \quad (2.16)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Güç katsayısı C_p ise, (2.15) denklemi (2.16) denkleminde yerine yazılırsa

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.17)$$

halini alır. Maksimum C_p değerini bulmak için (2.17) denklemin türevi alınıp, sıfıra eşitlenirse ($\alpha=1/3$ olarak alındığında) ;

$$(C_p)_{max} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (2.18)$$

Bulunan bu değer, ideal ortam şartlarında, rüzgârdan çekilebilecek enerjinin teorik olarak en üst limitidir. İdeal çalışma koşullarında rotor serbest şekilde akan rüzgârın ancak $2/3$ ' ünden faydalanabilir. Fakat pratik kullanımda istenilen ideal çalışma şartları sağlanamayacağından bu üst değere ulaşılması zordur. Bunun temel nedenleri; rotor gerisindeki dairesel dalgalar, sınırlı sayıdaki kanat sayısı ve kanat uç kayıpları ile aerodinamik sürtünmedir[9].

2.3. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

Literatürde türbinlerin tarihçesiyle ilgili değişik dokümanlara rastlanmakla birlikte rüzgâr gücünün kullanımıyla ilgili daha eski yazılı metinlere rastlanmıştır. Rüzgâr gücüyle ilgili olarak yazılı metinlere geçen ilk kullanım şekli, MÖ 2800'lü yıllar da Mısırlılar tarafından ticari amaçlı yelkenliler olmuştur[10].

İlkel zamanlarda tahıl öğütmekte veya tekne yelkenlerinin şişirilmesi gibi amaçlar için kullanılmış olan rüzgâr gücü insanların aktif kullanımı ve gelişmesiyle yıllar içinde rüzgâr enerjisinden elektrik üretmeye kadar teknolojik birçok gelişim sürecinden geçmiştir. Tarihte rüzgâr gücü ile sulama da yapılmış ve kullanım alanı bu şekilde genişletilmiştir. Yel değirmenleri olarak, Çin'de MS 750-850 yıllarında pirinç tarlalarının sulanmasında kullanılmıştır[11]. Tarihsel gelişime genel bir bakış Resim 6'da verilmiştir.

Rüzgâr enerjisi fosil yakıtların kullanımına bağlı olarak tarihte bazen değer kaybetmiş bazen de kazanmıştır. Türkler tarafından ilk defa MS 640 yılına doğru imal edilen yel değirmenleri, haçlı seferleri sırasında Avrupa'ya geçmiştir[7].



Resim 2.5 Rüzgâr türbinlerinin tarihsel gelişimi

Avrupa ve Amerika yel değirmenleri konusunda zirvelerini yaşamışlarsa da, rüzgâr gücünden elektrik üretimi ile ilgili düzenli çalışmalar Danimarka'da olmuştur. Danimarkalı profesör Paul La Cour tarafından düzenli çalışmalar 1846-1908 yılları arasında yel değirmenleri ile ilk defa elektrik üretilmiştir. Klasik RT'lerin dönüm noktası olan bu çalışmada La Cour'un elektriği kırsal kesimlere taşımak amacıyla yaptığı çalışmalar dönemin hükümeti tarafından desteklenmiştir. La Cour yaptığı çalışmada jeneratörü döndüren bir RT yapmıştır. La Cour ürettiği doğru akımı elektroliz için kullanmış ve hidrojen gazı elde etmiş ve rüzgâr enerjisini depolamıştır.

1. Dünya Savaşı sırasında özellikle petrol fiyatlarındaki artış, rüzgâr türbinlerinin gelişmesini hızlandırmıştır. Lykkegard adlı şirket La Cour'un çalışmalarını endüstriyel kullanıma çevirmek için kurulduktan sonra 10-35 kW arasında güce ve çapı 20 metreyi bulan rotora sahip rüzgâr türbinleri üretti[12].



Resim 2.6 La Cour - Danimarka'da Lykkegard rüzgâr türbini [12]
(Rotor çapı 18 m, yaklaşık 12 m/s rüzgâr hızında 30 kW güç çıkışı)

1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgâr enerjisini değerlendirme çabaları, bir kenara bırakılmıştır.

1930'lu yılların sonuna doğru Danimarka' da kurulu toplam güç 3 MW ve toplam kurulu türbin sayısı 3000 olmuştur[9]. Rüzgâr enerjisinin umursanmayıp bir tarafa bırakılması, enerji sıkıntısı sebebiyle 2. Dünya Savaşı'na kadar sürmüştür. Bu tarihlerde rüzgâr enerjisi kullanımının tarihsel gelişimine; Resim 2.7'de verilen 1942 yılında üretilen 17,5 m pervane çaplı ve 50 kW nominal güçlü Smidth rüzgâr türbini ve Resim 2.8'de verilen 1957 yılında üretilen 24 m pervane çaplı ve 200 kW nominal güçlü Gedser rüzgâr türbini ilk örnek verilebilir[12].



Resim 2.7 Beton kule ile Smidth aermotor [12-13]
(rotor çapı 17,5 m, nominal güç yaklaşık 50 kW)

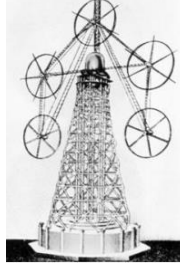


Resim 2.8 Smidth üç kanatlı rotorlu aeromotor [12]
(rotor çapı 24 m, nominal güç yaklaşık 70 kW)

La Cour – Lykkegard ortaklığına alternatif olarak daha modern tasarımlar ile bu sektöre girenler de olmuştur. F. L. Smidth şirketi normalde çimento üretimi için makina üretimi yapan bir firma iken, savaş sırasında fabrikaları çökmüş ve daha sonra Resim 2.8'da gösterilen “Aeromotor “ adını verdikleri 17,5 m rotor çapına sahip, 11 m/s rüzgâr hızında 50 kW elektrik üreten rüzgâr türbinini geliştirerek bu sektöre girmişlerdir. Rotor kanat profillerinde herhangi bir dönme açısı bulunmamaktadır. Dönme hızı aerodinamik frenleme ile istenilen değerde tutulmaktadır. Çoğunluğu beton kule üzerinde olmak üzere çelik kafesli kule üzerine kurulanları da vardır.

Dünya çapında çeşitli ülkelerde araştırmacıların türbinler üzerine yaptıkları çalışmalar ve çeşitli geliştirmeleri sonucunda günümüz klasik rüzgâr türbinleri tasarlanmıştır.

Aşağıda günümüze kadar tasarlanmış olan farklı yapıdaki rüzgâr türbinleri görülmektedir. Tasarımda yapısal değişiklikler genel olarak rotor çapı, sayısı ve nominal güç bazında olmuştur.



Resim 2.9 Hermann Honnef'den büyük bir rüzgâr santrali vizyonu [12-13]
(5 rotor, her biri 160 m çapında, 20 000 kW güç çıkışı)

Aerodinamik ilkelerine ek olarak, uçak mühendisliğinde gelişmiş hafif tasarım ilkeleri de yirmili yıllarda geliştirildi ve bu da büyük rotorların uygulanması için önemli bir ön koşuldu. Devasa boyutta rüzgâr santralleri için konseptler geliştiren çelik yapı mühendisi Hermann Honnef Resim 2.9'da ki tasarımı ile beraber 1930'dan 1940'a kadar, çok sayıda teorik ve tasarım faaliyeti geliştirdi[13].



Resim 2.10 Man-Kleinhenz [12-13]
(Rotor çapı 130 m, nominal güç 10 000 kW)

1937'de, mühendis Franz Kleinhenz büyük bir rüzgâr türbini projesinin planlarını yayınladı. Resim 2.10'da ki tasarımı 1938'den 1942'ye kadar birçok aşamada ve ayrıntıda geliştirildi ve rafine edildi[13].



Resim 2.11 Rus rüzgâr türbini, Rüzgâr D-30 [12-13]
(Rotor çapı 30 m, nominal güç 100 kW)

1931'de SSCB'de Balaklava'da, Kırım yarımadasındaki Yalta'dan çok uzak olmayan büyük bir Resim 2.11'de ki rüzgâr türbini inşa edildi. Konvansiyonel bir kulesi ve iki kuyruklu bir yalpalama sistemi vardı. Bu deneysel türbinin iyi sonuçları, rotor çapı 100 m olan 5000 kW'lık bir rüzgâr türbini tasarlamaya teşvik etti. Ancak MAN-kleinhenz projesine benzer şekilde, bu planlar da savaşın kurbanı oldu[13].



Resim 2.12 John Brown Company'nin Orkneys'deki rüzgâr türbini [13]
(rotor çapı 15 m, nominal güç 100 kW)

İngiltere'de John Brown Company, İskoçya Hidroelektrik Kurulu'nun Kuzeyindeki Orkney Adaları'nda deneysel bir rüzgâr türbini kurdu. Üç kanatlı rüzgâr türbini, kanatların şafta kanat menteşeleri ve sürüklenme menteşeleri ile bağlanmasıyla karmaşık rotor tasarımı nedeniyle başarılı olamadı [13]



Resim 2.13 Jacobs “rüzgâr şarj cihazı” [12-13]
(Rotor çapı yaklaşık 4 m, nominal güç 1,8 ile 3 kW)

Geliştirme aşamasında, birkaç kW nominal güce sahip küçük rüzgâr türbinleri üzerinde çalışıldı. Resim 2.13'te "Rüzgâr şarj cihazı" olarak bilinen bu rüzgâr türbini, pilleri şarj etmek için kullanıldı ve böylece kırsal yerleşim yerleri ve uzaktaki hafta sonu evleri için mütevazı bir güç kaynağı sağladı[13].

Alman Enercon Firması, 5 MW nominal güçlü bir rüzgâr türbinini üretmeyi ve Hannover'de 6000 konutun elektrik enerjisinin büyük bir kısmını bu şekilde karşılamayı planlamıştır ve bu türbinler 2 – 3 yıl piyasaya egemen olmuştur.

En küçük rüzgâr türbinleri 1982 yılında California piyasasına girdiğinde, Danimarka'da uzun süredir kullanılmaktaydı. California'da 1979 – 1985 yılları arasındaki devlet yardım programı etkisini göstermiştir. California'daki bütün rüzgâr türbinlerinin %75'ine ortak olan Danimarkalı üreticiler, 55 kW'lık rüzgâr türbinleri için bir endüstri kurmuşlardır. Danimarkalı rüzgâr türbini üreticileri, bugün bile piyasada en büyük üretici olma özelliğini elinde bulundurmaktadır. 1985 yılında 25 m kanat çapında ve 250 kW gücündeki rüzgâr türbini prototipi California'da yapılmış ve kısa bir zaman içinde piyasaya sürülmüştür[12].

Tasarımda ki değişiklikler doğrultusunda incelenen rüzgâr türbinleri tarih boyunca lokasyon olarak incelendiğinde deniz alanlarının karalara göre daha efektif olduğu için Resim 2.14'te görüldüğü gibi deniz üstü rüzgâr santralleri (Offshore) kurulmasına başlanmıştır[12].



Resim 2.14 Offshore rüzgâr enerji santrali [14]

Fosil yakıtların tükenme riskinin enerji piyasasında yarattığı kriz ve savaşların yanında temiz ve fosil yakıtlara oranla zararsız olduğu fark edilince çevre ve enerji bakımından çağdaş mühendislik ürünleri haline gelmiştir.

Ülkemizde rüzgâr enerjisiyle ilgili ilk bilimsel çalışmalar; 1960'larda Ankara Üniversitesi, 1970'lerde ise Ege Üniversitesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, 1981 yılından sonra ise Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından yürütülmüş ve 1989 yılında bu kuruluş bünyesinde Rüzgâr Enerjisi Şube Müdürlüğü kurulmuştur[15]. Ülkemizde ilk rüzgâr elektriği, 1986 yılında Çeşme Altinyunus Tesisleri'nde kurulan Vestas marka 55 kW nominal güçlü rüzgâr türbininden elde edilmiştir. Bu türbinin göbek yüksekliği 24,5 m ve pervane çapı 14 m'dir. 55 kW'lık nominal güce 12 m/s 'lik rüzgâr hızında erişen bu türbinden, Çeşme şartlarında yılda ortalama 100000 kWh elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu miktar, tesis elektrik enerjisi ihtiyacının % 4'ünü oluşturmaktadır.



Resim 2.15 Çeşme Germiyan RES

Ülkemizde uluslararası boyutta ilk rüzgâr elektriği, 21 Şubat 1998 tarihinde Çeşme Germiyan Köyü'nde üretilmiştir. Bir Alman Firması'ndan satın alınarak kurulan ve her biri 500 kW nominal güce sahip olan 3 adet Enercon - 40 Rüzgâr türbininden oluşan Resim 2.15'de görülen ilk rüzgâr çiftliğinden, yılda 4,5 milyon kWh elektrik enerjisi elde edileceği tahmin edilmekteydi[11].

2.3.1. Dünya'da Rüzgâr Enerjisi

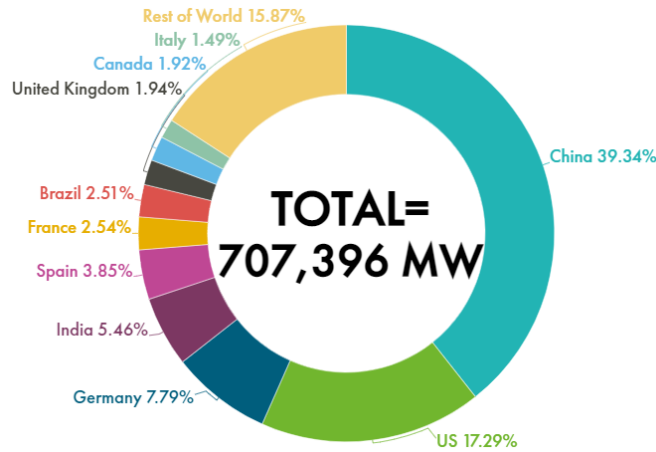
Rüzgâr enerjisi birçok ülkede en ucuz elektrik türlerindenidir. Rüzgâr kapasitesi tesisleri, birçok olgun ve gelişmekte olan piyasada ilk kez yeni fosil yakıt kapasitesini aşmıştır. Hükümetler, yenilenebilir enerji entegrasyonunun nasıl geliştirileceği ve en yüksek değerin nasıl elde edileceği üzerine odaklanmak için enerji piyasalarının tasarımını gözden geçirerek, çeşitli piyasa düzenlemeleri reform hareketleriyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmaya yönelik çalışmalar yapmaktadır. Bu sayede enerji piyasaları gelişmeye devam edecektir [16].

Global Wind Energy Council (GWEC) verilerine göre Dünya çapında rüzgâr enerjisi geleceğin enerjisidir. Bu verilere göre ülkelerin rüzgâr enerjisi gelişimini değerlendiren GWEC 2020 veri ve beklentilerine göre, 2021-2025 yıllarında bazı bölgelerde ki rüzgâr enerjisi kapasite artışı şöyle olacaktır: Asya, 338,597 MW olan rüzgâr gücü kapasitesini 602,248 MW yaparak yine lider konumda kalacaktır. İkinci sırada 218,912 MW ile takip eden Avrupa'nın 2025 yılına kadar 322,113 MW olası tahminler arasındadır. Hemen arkasından Kuzey Amerika bölgesinde 135,894 MW olan rüzgâr enerjisi kapasitesinin 194,639 MW olması beklenmektedir. Arjantin ve Karayipler'de toplam rüzgâr enerji kapasitesinin 2020 yılı sonunda 33,906 MW olduğu belirtilmiş ve 2025 sonunda bu değerin 56,143 MW olması beklenmektedir. 2020 yılında beşinci sırada yer alan Pasifik bölgesi, 8,103 MW olarak açıklanan rüzgâr enerji kapasitesini 13,512 MW değerine çıkarması olası tahminler arasındadır.

Bu tahminlere son olarak 2020 yılında altıncı sırada olan Afrika ve Orta Doğu'nun mevcut 7,277 MW kapasitesini 23,340 MW değerine çıkararak beşinci sıraya yükselineceğidir[16]. Bu artış tüm Dünya için önemlidir. GWEC, orta düzeyde 2023 yılına kadar yılda 50 GW'a kadar artış beklemektedir[17].

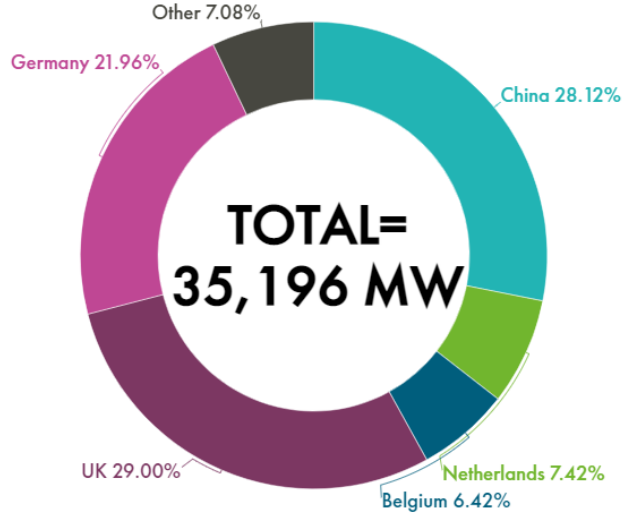
Hibritler ve ortak projeler gibi yeni çözümler geliştirilmektedir, bu da maliyet verimliliği, entegrasyon kolaylığı ve arz güvenliği üzerine odaklanmayı arttırmaktadır. GWEC, rüzgâr enerjisinin hem kısa hem de uzun vadeli büyümesinin bu üç alandan (revize iş modelleri, kurumsal kaynak kullanımı ve yeni çözümler) etkilenmesini beklemektedir.

Dünya rüzgâr enerjisi kurulu gücü, 2020 yılı itibarı ile toplam 742,689 MW'tır. Şekil 2.5'te, 2020 yılı itibarı ile dünya üzerindeki karaüstü toplam kurulu rüzgâr enerjisi santralleri (Onshore) kapasitesinin ülkelere göre dağılımı görülmektedir. Ülkelere ait rüzgâr enerjisi santral kapasiteleri incelendiğinde Çin Halk Cumhuriyeti (%39,34) en yüksek kapasiteye sahip ülkedir. En yüksek kapasite bakımından Çin Halk Cumhuriyetini, sırasıyla; Amerika Birleşik Devletleri (%17,29), Almanya (%7,79), Hindistan (%5,46) ve İspanya(%3,85) takip etmektedir.



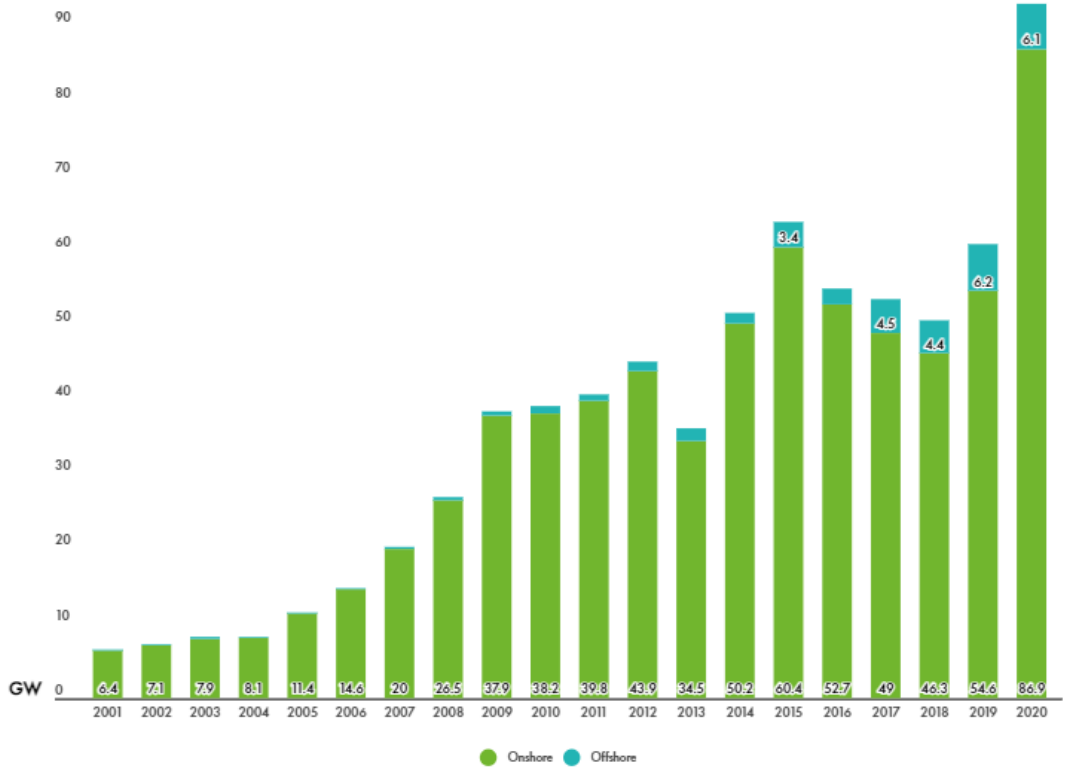
Şekil 2.5 2020 Yılı itibarı ile Dünya üzerindeki ülkelerin toplam kurulu rüzgâr enerjisi kapasitelerinin dağılımı (Onshore) [16]

Şekil 2.6'da ise 2020 yılı itibarı ile dünya üzerindeki toplam kurulu rüzgâr enerjisi santralleri (Offshore) kapasitesinin ülkelere göre dağılımı görülmektedir. Ülkelere ait rüzgâr enerjisi santral kapasiteleri incelendiğinde İngiltere (%29) en yüksek kapasiteye sahiptir. İngiltere'yi Çin (%28,12), Almanya (%21,96), Hollanda (%7,42) ve Belçika (% 6,42) ve diğer ülkeler (%7,08) takip etmiştir[16].



Şekil 2.6 2020 Yılı itibarı ile Dünya üzerindeki ülkelerin toplam kurulu rüzgâr enerjisi kapasitelerinin dağılımı (Offshore) [16]

Şekil 2.7’de ise Onshore ve Offshore tesislerin yıllara göre (2001-2020) toplam gelişimi bir arada verilmiştir.



Şekil 2.7 Yıllara göre tesislerin tarihi gelişimi [16]

2.3.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

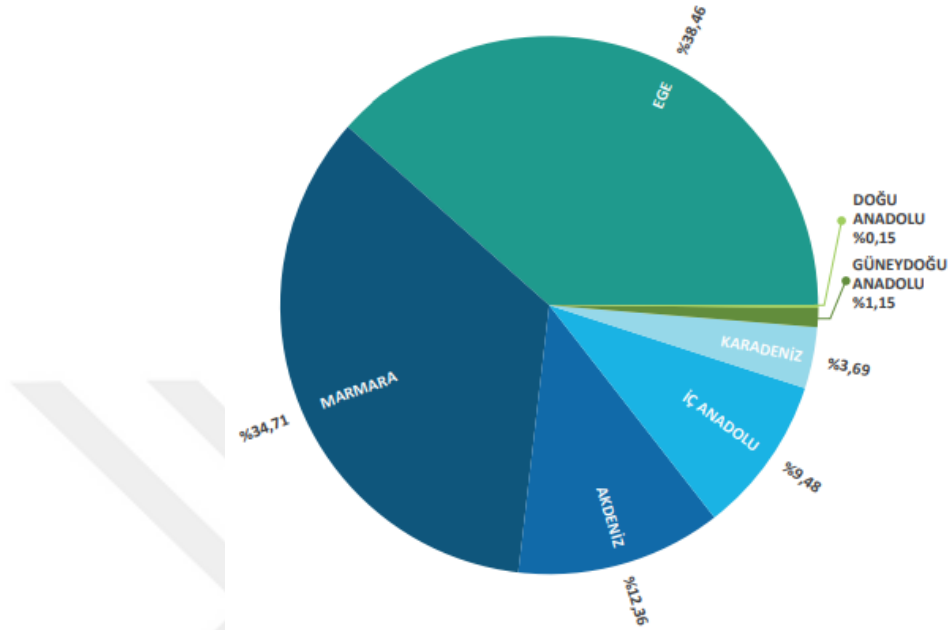
Ülkemizde rüzgâr enerji potansiyelini analiz etmek için rüzgâr ölçümleri, diğer meteorolojik ölçümlerle birlikte Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yapılmaktadır. İlk aşamada rüzgâr enerjisi bakımından elverişli yerlerde yapılan etütler ile rüzgârdan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelere Rüzgâr Enerjisi Gözlem İstasyonları (RGİ) tarafından veri toplanmaya başlanmıştır.

Ölçümler çoğunlukla 10 m yükseklikte alınmakla beraber, 30 m’de alınan ölçümler de mevcuttur. Veriler 10’ar dakikalık ve birer saatlik periyotlarla toplanarak, yazılım programı ile işlenmekte ve arşivlenmektedir. YEGM (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü) ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama rüzgâr hızları, bölgelerin rüzgâr enerjisi uygulamaları için elverişli olup olmadığını göstermektedir[18-19].

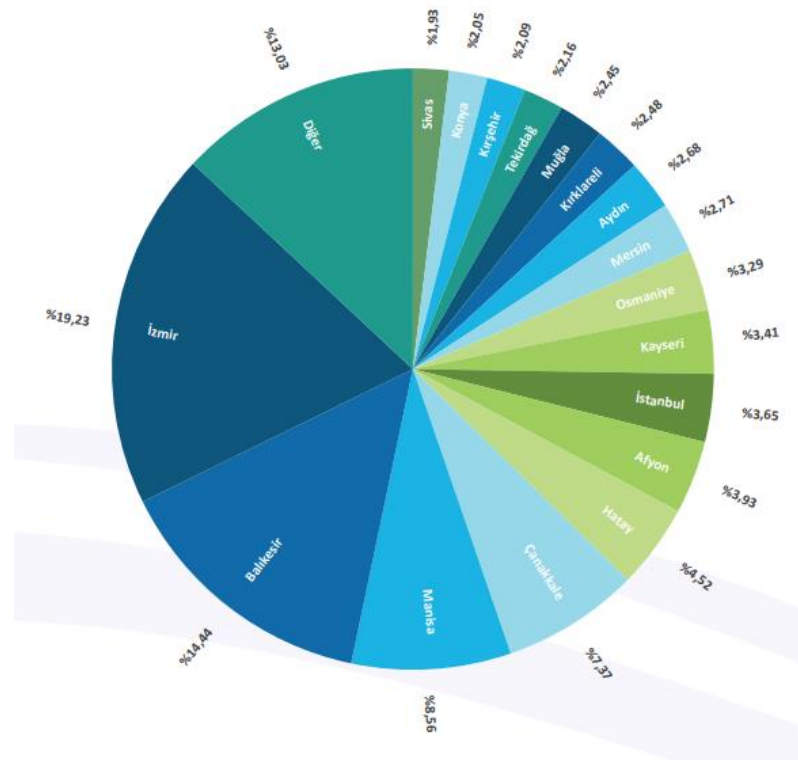
Resim 1.1’de verilen REPA detaylı rüzgâr kaynağı haritaları ve diğer bilgiler rüzgâr enerjisinden elektrik üretimine uygun bölgelerin belirlenmesinde kullanılabilecek bir altyapı oluşturarak fizibilite çalışmalarına katkı sağlamaktadır. Yıllık ortalama değer alındığında, Türkiye’nin en iyi rüzgâr kaynağı alanları, kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınındadır. Açık alan yakınlarındaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgâr hızları Türkiye’nin batı kıyıları boyunca, Marmara denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Orta şiddetteki rüzgâr hızına sahip geniş bölgeler ve rüzgâr gücü yoğunluğu Türkiye’nin orta kesimleri boyunca mevcuttur[20].

Ülkemiz rüzgâr enerjisi kurulu gücü, 2020 Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) raporuna göre toplam 8056,55 MW’tır. Şekil 2.8’de, 2020 yılı itibarı ile toplam kurulu rüzgâr enerjisi santralleri kapasitesinin bölgelere göre dağılımı görülmektedir. Bölgelere ait rüzgâr enerjisi santral kapasiteleri incelendiğinde Ege Bölgesi (%38,46) en yüksek kapasiteye sahip bölgemizdir. Hemen arkasından Marmara Bölgesi (%34,71) çok yakın bir oranla takip etmektedir. Daha sonra sırasıyla; Akdeniz Bölgesi (%12,36), İç Anadolu Bölgesi (%9,48), Karadeniz (%3,69), Güneydoğu Anadolu Bölgesi (%1,15) ve Doğu Anadolu Bölgesi (%0,15) takip etmektedir[20]. Şekil 2.9’da 2020 yılı itibarı ile ülkemizdeki işletmedeki toplam rüzgâr enerjisi santralleri kapasitesinin illere göre dağılımı görülmektedir. İllere ait

rüzgâr enerjisi santral kapasiteleri incelendiğinde İzmir (%19,23) en yüksek kapasiteye sahiptir. Balıkesir (%14,44) ve Manisa (%8,56) ile öne çıkmıştır[21].



Şekil 2.8 2020 yılına ait işletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı [21]



Şekil 2.9 2020 yılına ait işletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı [21]

Resim 2.16’da verilen Soma RES Manisa’da kurulu olup (Lisans No :EÜ/1149-7/827) kurulu gücü 288.1 MW’tır. Hala işletmede olan RES 181 adet türbinden oluşmuştur[22].



Resim 2.16 Soma Rüzgâr Enerji Santrali

Resim 2.17’de verilen Karaburun RES İzmir’de kurulu olup (Lisans No : EÜ/3382-14/2059) kurulu gücü 222.8 MW’tır. Hala işletmede olan RES 50 adet türbinden oluşmuştur[22].



Resim 2.17 Karaburun Rüzgâr Enerji Santrali

2.4. Rüzgâr Enerjisinin Kullanım Alanları

Rüzgâr enerjisinin kullanım alanları incelendiğinde oldukça geniş bir liste karşımıza çıkmaktadır. Kullanım alanlarını genel anlamda mekanik, elektriksel ve ısı enerjisi uygulamaları olarak gruplandırabiliriz. Elektrik uygulamaları alanında kullanılması uzun süren çalışmalar sonucunda gerçekleşmiş olsa da bugün günümüzde en sık kullanılan alan elektriksel uygulamalardır. Elektriksel uygulama alanlarının genişletilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Hükümetler tarafından ülkelerde çeşitli reformlar ile düzenlemeler geliştirilmekte ve yürütülen çalışmalar için çeşitli teşvikler verilmektedir.

Rüzgâr enerjisinin kullanım alanları için daha detaylı bir sınıflandırma yapılacaktır. Eğer aydınlatma sistemleri, su depolama ve su pompalama sistemleri, ısıtma ve soğutma mekanizmaları, şarj sistemleri, tahıl öğütme mekanizmaları ve taşımacılık sektörü gibi çok farklı alanlarda rüzgâr enerjisi kullanılabilir. Taşımacılık sektörü denildiğinde örneğin deniz yolculuklarında taşıtları hareket ettirmek için deniz üstü rüzgâr gücünden faydalanılmaktadır. Bu sistemler sayesinde farklı alanlarda ihtiyaç duyulan enerji günlük olarak karşılanabilmektedir. Uygun fiziki şartları sağlayan her konumda enerji ihtiyacını karşılamak için rüzgâr kullanılabilir.

Elektrik üretimi için rüzgâr enerjisinin ana yapı elemanı türbindir. Genel tanımıyla rüzgârın oluşturduğu kinetik enerji, rüzgâr türbinleri sayesinde mekanik enerjiye ve daha sonra da elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgâr enerjisini mekanik güç olarak kullanan tesis ve donanımlara rüzgâr değirmenleri adı verilirken, rüzgâr gücünü dönüştürerek, elektrik enerjisi üreten tesis ve donanımlara ise rüzgâr türbini adı verilir. Rüzgâr türbinlerine bazı kaynaklarda aerogeneratör de denilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin çalışma prensipleri, rüzgâr değirmenlerine benzemekte, fakat çok daha teknik detaylar içermektedir[15].

Bu nedenle kullanım alanlarının bu yaygınlığının yanı sıra elde edilen enerji direk ana hatlara verilerek kullanılabilir. Şebeke elektriğinde kullanılabilir olması, bu enerji için en büyük avantajdır. Bu özelliklerinin yanı sıra bağ evleri gibi enerji ihtiyacının düşük olduğu bölgelerde dahi daha küçük boyutlardaki rüzgâr türbinleri ile elektrik ihtiyacı kolay bir şekilde karşılanabilmektedir.

Enerji üretim maliyetlerinin yüksek olması üretici ve yatırımcıyı yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Sonsuz ve ucuz bir kaynak sağlayan rüzgâr yenilenebilir enerji kaynakları içinde oldukça önemli bir enerji yere sahiptir. Doğru yöntemlerle inşa edilen bir rüzgâr türbini küçük bir mahallenin bütün elektrik enerjisi ihtiyacını tek başına karşılayabilecek enerjiyi üretebilir[23]. Rüzgâr türbinlerinin bir araya getirilerek enerji ürettiği gruptur. Rüzgâr çiftliği veya rüzgâr tarlası gibi isimlerle anılmakla beraber en genel haliyle RES olarak adlandırılır[24].

2.5. Rüzgâr Enerji Santrallerinin Avantaj ve Dezavantajları

Gelişen teknoloji ile beraber yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasıyla birçok çalışmaya ana konu olan rüzgâr enerjisi günümüzde elektrik enerjisi amacıyla daha çok kullanılmaktadır. Her konu ve sistemde olduğu gibi rüzgâr enerjisinde de çalışmalar sonucunda bir takım avantaj ve dezavantajlar ortaya çıkmıştır. Avantajların arttırılması ve dezavantajları ortadan kaldırmak veya minimize etmek için yapılan araştırmalar ve çalışmalar devam etmektedir.

2.5.1. Rüzgâr Enerji Santrallerinin Avantajları

RES'lerin avantajları sıralanacak olursa, enerji üretimi ile ilgili en önemli parametrelerden, ilk sırada maliyetten bahsedilebilir. Örneğin üretim aşamasında maliyeti diğer enerji kaynaklarına göre çok daha ucuz ve hammadde maliyeti sıfırdır. Aynı zamanda petrol doğalgaz gibi enerji kaynaklarında olduğu gibi enerji nakliyatı gerektirmez. Tükenme ve zamanla fiyat artışı gibi bir durum söz konusu değildir. Aynı zamanda döviz kurundan etkilenmemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla oluşacak diğer bir fayda enerjinin üretiminde enerji kesintisi maliyetlerinde yaşanacak düşüşlerdir. Hammaddesi doğadan temin edildiğinden dışa bağımlılığı hammadde bakımından yoktur. RT olmadan kurulamamaktadır ancak hammadde kaynağı olarak milli kazanç sayılabilir. Gerçekçi ve güvenilir hesaplamalara dayalı bir RES kurulduğu andan itibaren amortisman süresini tamamlamaya başlamaktadır. RES'in büyüklüğüne göre değişse de ortalama birkaç yılda kendi maliyetini amorti edebilir[25]. Maliyeti günümüz teknolojisi sayesinde diğer güç santralleriyle rekabet edecek düzeye gelmiştir [26].

RES kurulduğu bölgede iş alanı oluşturmakta ve istihdam sağlamaktadır. RES kurulumunda proje aşamasından, enerji üretim aşamasına kadar daha sonra işletmede ki RES için bakım onarım ekibinden mühendisine kadar birçok meslek mensubuna iş imkanı sağlamaktadır.

Mevcut elektriğin ulaşmadığı; kırsal alanlara, deniz fenerlerine, sosyo-ekonomik işletmeler gibi enerji ulaştırma maliyetlerinin çok yüksek olduğu alanlara enerjisi sağlamada üstünlük sayılabilir. Enterkonnekte sisteme bağlanmaları ile şehirden uzak mesafelerde kurulan RES'ler aracılığıyla üretilen enerji şehir şebekesine de enerji sağlayabilir[15].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının tümünde olduğu gibi rüzgâr enerjisi de temiz bir enerji kaynağıdır. CO² emisyonuna neden olmaz ve çevreye yenilenemez enerji kaynaklarına kıyasla yok denecek kadar azdır. Fosil yakıtların kullanımını azaltarak, çevreye verilen zararı minimuma indirirken yenilenemez enerji kaynaklarının ihtiyaç halinde kullanımı için ömürlerini uzatmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları ile kurulan bazı sistemlerde, sistemin ömrü tükendiğinde bazı elemanlar geri dönüştürülememektedir, örneğin ömrü tükenen bir Photovoltaik (PV) panel geri dönüştürülemeyebilir. Ancak RT için böyle bir durum söz konusu değildir. Türbinler ömrünü doldurduğunda rahatlıkla sökülebilir ve söküldüğü alan çoğunlukla eski haline getirilebilir. Türbinlerin sökülmesinin maliyeti genelde arta kalan parçaların parasal değeriyle eşdeğerdir[25].

İhtiyaç veya arıza durumunda parça değişimine imkân sağlayan türbinler modüler yapısı sayesinde daha uzun ömürlüdür[27]. Tarımın elverişli olmadığı, kurak arazilerde kurulumu uygun bulunduğu tarım yapılamayan; yaşam alanlarından uzak bölgelere kurulduğundan kullanışlı olmayan arazilerin kullanımı sağlanmaktadır. RES'lerin geniş kurulum alanlarına ihtiyaç duyması dezavantaj olarak sayıldığı durumlarda söz konusudur ancak türbinlerin kapladığı gerçek alan santral alanının %1-1,2'si kadardır. Tarıma elverişli alanlarda kurulması gerektiği durumlarda çiftçilik faaliyetlerine engel değildir[27]. RES'lerin fizibilite çalışması uzun sürer ancak kısa sürede kurulabilmektedir[28].

Rüzgâr enerjisi depolanabilir bir enerji kaynağıdır. Depolama iki yöntemle yapılabilir. Şehir şebekesi ile bağlantı mümkünse en mantıklısı enterkonnekte sistem ile şebekeyi beslemektir. Söz konusu bölgede enterkonnekte sistem mümkün değilse en mantıklısı akülerde depolamaktır.

2.5.2. Rüzgâr Enerji Santrallerinin Dezavantajları

RES'lerin avantajları sıralandıktan sonra bahsedilmesi gereken ilk dezavantaj rüzgârın güvensizliğidir. Kesintisiz bir kaynak olmayan rüzgâr enerjisi yeryüzünde herhangi bir noktadaki rüzgâr hızı ve frekansı her an değişebilmektedir. Önceden tam olarak bilinmesi de mümkün değildir. Bazı bölgelerden, rakıma ve bazı coğrafi özelliklere bağlı rüzgârlı bölge olarak bahsedilse de rüzgâr enerjisi süresiz ve güvensiz bir enerji kaynağı olarak bahsedilebilir.

RES kurulumu yapılması planlanan bölgede uzun süren fizibilite çalışmaları gerekmekte ve o bölgeye ait birkaç aylık rüzgâr tahminleri Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi'nden (RİTM) alınmalıdır. Bu dezavantaj ancak enerjinin depolanması ile giderilebilir[11].

Çevresel dezavantajları sıralanacak olursa; RES'lerin yüksek desibelde ses üretmesi insan kulak sağlığına zarar verebilmektedir. Rüzgâr türbinlerinden yayılan gürültülerden biri aerodinamik ya da genişbant gürültüsü olup, bu gürültü makinenin kanatları üzerinden hava geçerken oluşur diğeri ise tonal (tek frekans) gürültüsüdür; dişli kutusu ve jeneratör gibi dönen ekipmanlar tarafından oluşturulur[29].

RES'ler de, duymanın zor olduğu 80-85 dB civarında gürültü olmaktadır. Bu sebeple, rüzgâr santralleri ile yerleşim birimleri arasında 400-500 m'lik bir mesafenin bulunması gereklidir. Bu dezavantajın giderilmesi ve gürültünün azaltılması için, teknik bir işlem olarak pervane, titreşimi emen, salımlı bir yatak kullanılarak dişli kutusundan izole edilmekte, dişli kutusu ve jeneratörü içinde bulunduran tekne, lastik ile yalıtılmaktadır [15].

Mevcut sistemin ses ile birlikte ürettiği titreşim TV ve radyo sinyallerinde parazit oluşturması da (2-3 km'lik alanlar) bilinen ve yaşam alanlarını olumsuz etkileyen dezavantajlardandır. Göçmen kuşlara zarar verebilmektedir[26].

Fizibilite çalışmaları uzun sürmektedir. Kırsal alanlara kurulması uygun görülen RES'ler için arazi üzerinde ayrıntılı arkeolojik araştırma yapılması gerektiğinden inşaata başlama süresi uzamakta ya da hiç başlanamamaktadır. Kırsal alanlara türbinlerin birbirlerinin rüzgârını kesmemesi açısından geniş yüzey alanlara kurulması gereklidir. Örneğin, büyük sayılabilecek 20 adet türbin, yaklaşık 1 km²'lik bir alan kaplar[15].

Kişi ve zevke bağlı olsa da RES'lerin doğal çevre görüntüsü bozması da çevresel bir dezavantaj olarak söylenebilir[29]. Resim 2.18'de Çanakkale'de bulunan Burgaz RES üzerinde türbinlerin dağılımları gösterilmiştir.



Resim 2.18 Burgaz RES

RES kurulumu için 2873 sayılı Milli Parklar Kanunu'nun 2. maddesinde tanımlanan ve bu kanunun 3. maddesi uyarınca belirlenen “Milli Parklar”, “Tabiat Parkları”, “Tabiat Anıtları” ve “Tabiat Koruma Alanları”; 3167 sayılı Kara Avcılığı Kanunu uyarınca Orman Bakanlığı'na belirlenen “Yaban Hayatı Koruma Sahaları ve Yaban Hayvanı Yerleştirme Alanları”; 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'nun 2. maddesinin “a – Tanımlar” bendinin 1., 2., 3., ve 5. alt bentlerinde “Kültür Varlıkları”, “Tabiat Varlıkları”, “Sit” ve “Koruma Alanı” olarak tanımlanan ve aynı kanun ile 3386 sayılı kanunun (2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'nun Bazı Maddelerinin Değiştirilmesi ve Bu Kanuna Bazı Maddelerin Eklenmesi Hakkında Kanun) ilgili maddeleri uyarınca tespiti ve tescili yapılan alanlar; rakımı 1500 metreden fazla olan alanlar; eğimi %20'den fazla olan alanlar; yerleşim bölgeleri ve askeri alanlar kullanılamaz alanlar olarak tanımlanmaktadır. Kullanılamaz alanların haritası REPA'da mevcuttur, ayrıca Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) buna ilişkin bir pafta listesi hazırlamıştır[30].

Kapasite faktörü bir türbinin değerlendirilmesinde en önemli parametrelerden biridir. Kapasite faktörü, sistemin ürettiği enerjinin nominal güçte üretmesi gereken enerjiye oranı olarak tanımlanır[29].

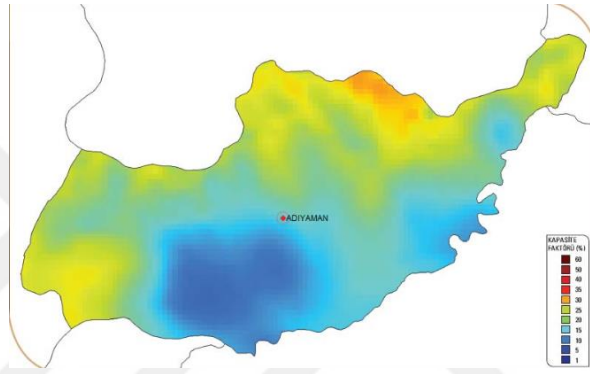
$$C_f = \frac{E_T}{T \cdot P_R} \quad (2.19)$$

(2.19) denkleminde verilen kapasite faktörünün tanımında; C_f : kapasite faktörü, E_T : üretilen enerji, T: zaman, P_R : nominal güç olarak tanımlanmaktadır.

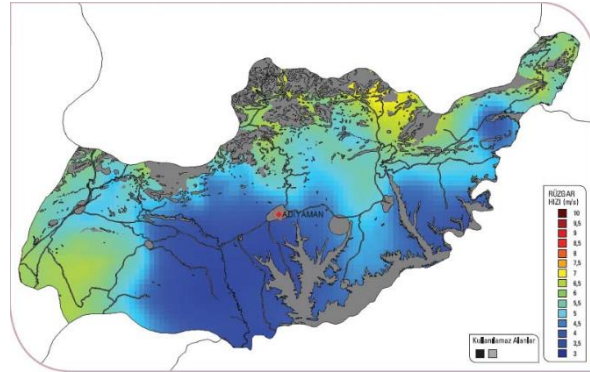
RT'nin elektrik üretimine başlama hızı ne kadar düşük ise o türbinin kapasite faktörü o kadar yüksektir. Aynı şekilde, bir türbinin elektrik üretiminden çıkma hızı ne kadar yüksek ise kapasite faktörü de o oranda yüksektir.

Bununla birlikte; kapasite faktörünü etkileyen tek parametre, türbinin üretime girme-çıkma rüzgâr hızları değildir. Aynı zamanda, kullanılan türbin çeşidi ve

kurulum yapılacak yerin rüzgâr rejimi de diğer önemli parametrelerdir [31-32]. Kapasite faktörünü verimlilik ile karıştırmamak gerekir, ama verimliliğin en etkili parametresi olduğu da unutulmamalıdır[31]. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına oranla rüzgâr enerjisinin kapasite faktörü düşüktür[28]. Üniversitemizin bulunduğu Adıyaman ili için kapasite faktörü dağılımı Şekil 2.10’da verilmiştir. Şekil 2.11’de ise RES kurulamayacak alanlar gri ile tarandığında kapasite faktörünün RES potansiyeli için ne kadar önemli olduğu gösterilmektedir. İl içinde taranan gri alanlar arttıkça RES potansiyeli o kadar düşmektedir[33].

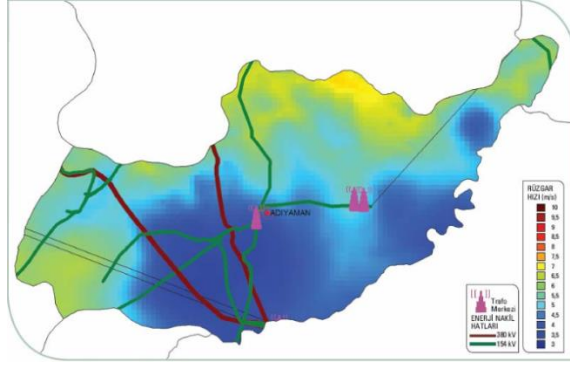


Şekil 2.10 Kapasite faktörü dağılımı [33]



Şekil 2.11 RES kurulabilir alanlar (Gri alanlar kurulamaz kabul edilmiştir.) [33]

Şekil 2.12’de ise yine RES potansiyelini etkileyen trafo merkezleri ve enerji nakil hatları gösterilmiştir. RES’lerden elde edilen güç trafo merkezleri ve enerji nakil hatlarıyla kullanılabilir. Kapasite faktörü ile uygun görülen alanlar trafo merkezleri ve enerji nakil hatlarına çok uzak kaldığı takdirde genelde tercih edilmemektedir[33].

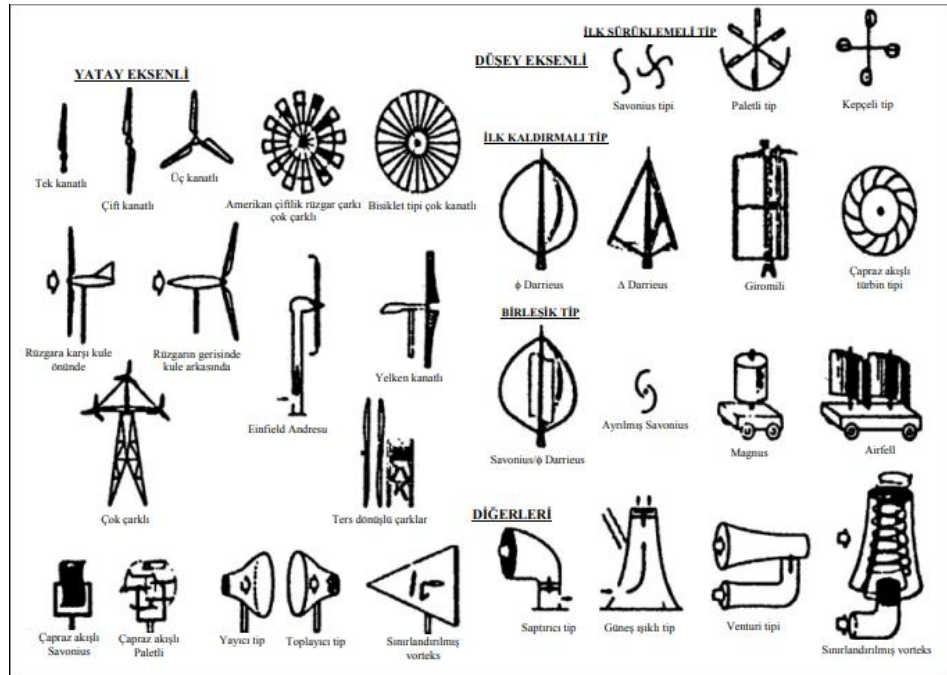


Şekil 2.12 Trafo merkezleri ve enerji nakil hatları [33]

2.6. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

İlk icadından bugüne gelene kadar çeşitli evrimler geçiren elektrik türbinleri kullanım amacına, belki de tasarlandığı andaki mevcut imkânlarla veyahut ihtiyaç durumuna göre Şekil 2.13’te görülen şekillerde üretilmiş ve kullanılmıştır[34].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar ülkemizde olduğu gibi birçok ülkede öncelikli alanlar seçilerek konunun çalışılmasına teşvik sağlanmıştır. Bu sebepten tasarımsal çalışmalar devam etmektedir ve çalışmalar sonunda ticari bir ürün elde etmek mümkündür. İnsanoğlunun geçmişten bugüne gelene dek en genel şekilde amacı her zaman rüzgâr enerjisinden daha çok ve en verimli şekilde faydalanmak olmuştur.



Şekil 2.13 Kayıtlara geçmiş çeşitli RT tipleri [34]

Şekil 2.14’te sınıflandırmaya göre türbinler; dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayısına, rüzgâr etkisine tepki verdiği yöne, mekanik tasarımında dişli özelliğine ve kurulum yerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.14 Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırması [35]

2.6.1. Eksen Tipine Göre Rüzgâr Türbinleri

2.6.1.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini (YERT)

Yatay eksenli türbinlerin rotorları yatay ekseninde çalışır ve diğer tiplere göre teknolojik ve ticari açıdan daha fazla tercih edilmektedir. En kötü tarafı, önden rüzgâr alan tip olduğundan sürekli rüzgâra bakması gerekir. Bu yüzden bir dümen sistemine ihtiyaç duymaktadır[32]. Bu türbinlerin verimi yaklaşık % 45’dir. YERT genel olarak yerden 20-30 m yüksekte ve çevredeki engellerden 10 m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir. Rüzgâr hızının, rotor kanadı uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı (λ) denir.

Eğer kanat uç hız oranı;

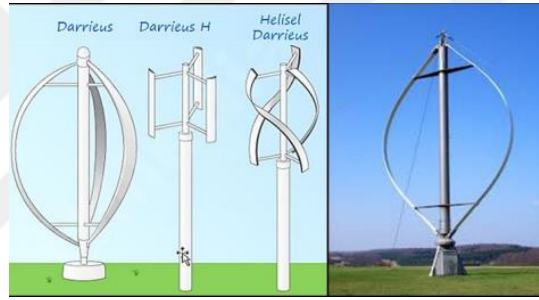
- ✓ $\lambda = 1-5$ Çok kanatlı rotor
- ✓ $\lambda = 6-8$ Üç kanatlı rotor,
- ✓ $\lambda = 9-15$ İki kanatlı rotor [32]

2.6.1.2. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT)

Düşey eksenli türbinlerin kanatları düşey ekseninde ve yere yakın olduğundan dolayı rüzgâr hızı düşüktür. Ticari kullanım alanları azdır ve daha çok deneysel amaçla kullanılırlar.

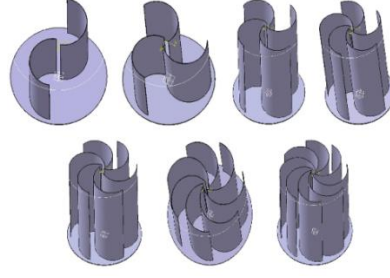
Rüzgârı her yönden alabilir böylece dümen sistemine ihtiyacı olmaz. Dönme hızları düşük olduğu için daha az riske sahiptir. Dönme hızı düşük olduğundan verimleri düşüktür. Sessiz olmalarından dolayı kentsel alanlara daha uygundur[35-36]. Darrieus ve Savonius olmak üzere 2 çeşidi vardır.

Amerika ve Kanada’da Darrieus türbinlerinin kanat tasarımları üzerine 1970’li yıllarda farklı çalışmalar yapılmıştır. Kanat şekline göre yapılan tasarımlarda Darrieus-H ve Helisel Darrieus isimleri verilmiştir. Resim 2.19’da gösterilmiştir. Geometrik formlu aerodinamik kanat profil yüksek performans sağlar. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbin; 2 veya 3 kanatlı olur. İlk hareket için Savonius RT veya bir tahrik motoru gerekmektedir. Rüzgârın tek yönden estiği düşünülürse; türbinin verdiği güç, sinüs şeklinde bir eğri oluşturur[35-37-38].



Resim 2.19 Darrieus tipi rüzgâr türbini [35]

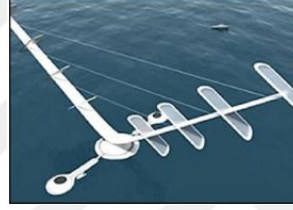
1925 yılında Finlandiya’lı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından bulunmuş ve mucidinin soyadını almıştır. Tasarımı iki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış, “S” şeklini andıran iki yarım silindirden oluşan Savonius türbinleri Resim 2.20’de gösterilmiştir. Düşük rüzgâr hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahip olması, yapımının kolay ve ucuz olması, rüzgârın geliş yönünden bağımsız olması ve kendi kendine ilk harekete başlaması gibi üstünlüklere sahip olan Savonius RT’lerinin, aerodinamik performansı düşük olduğu için ilk uygulama alanları kısıtlı kalmıştır ve elektrik üretiminde kullanılmamıştır. Savonius RT’nin birçok üstünlüğü bulunmasına rağmen, aerodinamik performanslarının düşüklüğü nedeniyle kullanılmamaktadır[35-37].



Resim 2.20 Farklı kanat sayılarında Savonius rüzgâr türbinlerinin tasarımı

2.6.1.3. Eğik Eksenli (Wagner) Rüzgâr Türbini

Dönme eksenleri düşeyle, rüzgâr yönünde bir açı yapan RT'lerdir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır. Örnek bir eğik eksenli rüzgâr türbini Resim 2.21'de gösterilmiştir.



Resim 2.21 Eğik eksenli rüzgâr türbini

2.6.2. Güce Göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinlerinin tümü ürettikleri güç bakımından sınıflandırılabilir. Ancak türbin tiplerinde güç değerleri değişiklik gösterir. Aşağıda belirtilen değerler klasik RT için bir kıyastır. Türbinlerin ortak noktası hepsinin enerji üretmesidir.

- Küçük güçlü türbinler: Güçleri 30 kW'tan az olan türbinlerdir.
- Orta güçlü türbinler: Güçleri 30-100 kW arasında olan türbinlerdir.
- Büyük güçlü türbinler: Güçleri 100 kW-1 000 kW arasında olan türbinlerdir.
- Çok büyük güçlü türbinler: Güçleri 1 MW veya daha fazladır[39].

2.6.3. Kanat Sayısına Göre Rüzgâr Türbinleri

2.6.3.1. Tek Kanatlı Rüzgâr Türbini

Tek kanatlı RT'nin yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede makine kütlesini ve rotorun döndürme momentini azaltmasıdır. Resim 2.22'de bir örneği verilen tek kanatlı türbinlerde, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için hub çok iyi yapılmalıdır.

Uç hız oranı, 120 m/s civarındaki üç kanatlı türbinlerle kıyaslandığında, uç hızı 2 kat daha yüksektir. En önemli dezavantajı, 120 m/sn civarındaki kanat uç hızının sebep olduğu rotorun aerodinamik gürültü seviyesidir [35-36].



Resim 2.22 Tek kanatlı rüzgâr türbini

2.6.3.2. 2 Kanatlı Rüzgâr Türbini

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Resim 2.23’te bir örneği verilen iki kanatlı RT’ler, üç kanatlılara göre daha ekonomik görünmesine rağmen, iki kanatlı rüzgâr türbinleri dinamik etkilerden dolayı bir takım ek ekipmanlar gerektirdiğinden, üç kanatlı RT ile aynı maliyete gelmektedir. İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür [35-37].



Resim 2.23 2 kanatlı rüzgâr türbini

2.6.3.3. 3 Kanatlı Rüzgâr Türbini

Günümüzde dünyanın her tarafında 3 kanatlı rüzgâr türbini kullanılmaktadır. RES’lerde ve modern yapılarda en çok 3 kanatlı RT kullanılmaktadır. Resim 2.24’te bir örneği verilen üç kanatlı RT’lerde dönme momenti tek ve 2 kanatlı türbinlere kıyasla daha düzgündür. Hub içinde titreşimi önleyici ek parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı 70 m/sn altında olduğundan gürültünün düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli bir avantaj olup, toplum tarafından kabulünü sağlamıştır. Küçük güçlü RT’lerde, üç kanatlı rotor kullanıldığında güç problemleri ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için düşük devirde dönen rotorun devir sayısını $1/n$ oranında arttıran dişliler kullanılır ve “Cut in” olarak adlandırılan hız değerine ulaşıncaya kadar, jeneratör boşa çalıştırılır [35-37].



Resim 2.24 Üç kanatlı rüzgâr türbini

2.6.3.4. Çok Kanatlı Rüzgâr Türbini

Resim 2.25’de bir örneği verilen çok Kanatlı RT’ler, RT’lerin gelişmemiş ilk örnekleridir. Rüzgârgülü de denilmektedir. Yıllarca sadece su pompalamasında kullanılan bu türbinler, bu işlemdeki moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Tek, 2 ve 3 kanatlı rüzgâr türbinlerine göre çok düşük hızda çalışırlar. Resim 2.24’te de görüldüğü gibi kanatlarının genişlikleri, pervane göbeğinden uçlara gidildikçe yine bilinenin aksine daralmaz ve hatta genişler. Rüzgârgülleri, rüzgârgülü kanat düzleminin rüzgâr hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için de, rüzgârgülü yönlendiricisi taşımaktadırlar[37].



Resim 2.25 Çok kanatlı rüzgâr türbini

2.6.4. Rüzgâr Etkisine Göre Rüzgâr Türbini

Türbinin rüzgârı karşılama yönüne göre rüzgâr türbinleri, rüzgârı önden alan ve rüzgârı arkadan alan türbinler olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.6.4.1. Rüzgârı Önden Alan Türbinler

YERT’lerde rotor yüzü rüzgâra yönlenmiş ise önden rüzgârlı türbinler adını alırlar. Kulenin yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmazlar. Öte yandan kulenin önünde, az da olsa, bir rüzgâr gölgelemesi vardır. Yani rüzgâr kuleye eğilerek gelir. Rüzgâr çekilmesinden dolayı kanatların çok sert yapılması ve kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekmektedir. Resim 2.26’da bir örneği verilen önden rüzgârlı türbinler, rotoru rüzgâra karşı döndürmek için yaw mekanizması ile donatılmışlardır[37-40].



Resim 2.26 Rüzgârı önden alan türbinler

2.6.4.2. Rüzgârı Arkadan Alan Türbinler

Resim 2.27’de bir örneği verilen arkadan rüzgârlı türbinlerin rotorları kule arkasındadır. Bunların önemli üstünlüğü yaw mekanizmasına gerek olmayışıdır. Rotor pasif olarak belirli bir periyotta her yöne dönebildiğinden, bu tip türbinlerin üreteçlerinden inen kabloların dolanabilmesi söz konusudur. Yaw mekanizması bu sorunu ortadan kaldırır. Kanat kule hizasından geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgârlı makinelerden daha çok zarar verebilir[37-40].



Resim 2.27 Rüzgârı arkadan alan türbinler

2.6.5. Dişli Özelliklerine Göre Rüzgâr Türbinleri

Bir rüzgâr enerjisi sistemi; bir rüzgâr türbini, bağlantı ekipmanı (dişli kutusu), jeneratör ve kontrol sistemi içermek durumundadır. Türbinler sürücü sistemleri bakımından; dişli kutusu kullanılan ve kullanılmayan olarak iki sınıfa ayrılabilir[40].

2.6.5.1. Dişli Kutusu Kullanılan Rüzgâr Türbinleri

Jeneratörleri az kutuplu, yüksek devirlidir. Bu yüzden pervanenin devir sayısı ile jeneratör devir sayısını uygunlaştırmak için 1/50, 1/70 gibi oranlarda dişli kullanılmaktadır. Bunlar;

- Sabit hızlı - sincap kafesli indüksiyon jeneratörü (SCIG)
- Değişken hızlı - çift beslemeli indüksiyon jeneratörü (DFIG)[40].

2.6.5.2. Dişli Kutusu Kullanılmayan Rüzgâr Türbinleri

Çok kutuplu, düşük devirli olan jeneratörlerde dişli sisteme gerek yoktur. Bunlar:

- Direkt sürümlü - elektriksel uyarımlı senkron jeneratör (EESG)
- Direkt sürümlü - sürekli mıknatıslı senkron jeneratör (PMSG) [40].

2.6.6. Kurulum Yerine Göre Rüzgâr Türbinleri

Kurulum yerine göre RT'leri iki gruba ayrılır. Bunlar;

- ✓ Onshore (Kara üstü)
- ✓ Offshore (Deniz üstü)

2.6.6.1. Onshore RES

Karada kurulan rüzgâr enerjisi santrallerine onshore denir. Resim 2.28'de görüldüğü gibi genellikle düşük koruma veya habitat değerinin olduğu alanlarda bulunurlar.



Resim 2.28 Onshore RES

Onshore sistemin bazı avantajları;

- ✓ Onshore santrallerin maliyeti kısmen ucuzdur ve türbinlerin toplu çiftliklerine olarak sağlar.
- ✓ Türbinler ve tüketici arasındaki daha kısa mesafe kablolamada daha az voltaj düşmesine izin verir.
- ✓ Rüzgâr türbinlerinin kurulumu çok hızlıdır, yirmi yıldan fazla sürebilen bir nükleer santralin aksine, birkaç ay içinde bir RES inşa edilebilir.

Onshore santrallerin bazı dezavantajları;

- ✓ Onshore santrallerin biri, çoğu insanın manzaraya uygun görmüyor olmasıdır.
- ✓ Genellikle düşük rüzgâr hızı ve fiziksel engeller nedeniyle yıl boyunca sürekli enerji üretmezler.
- ✓ Rüzgâr türbinlerinin yarattığı gürültü, yakındaki topluluklar için gürültü kirliliğine neden olmaktadır[41].

2.6.6.2. Offshore RES

Açık deniz rüzgâr enerjisi olarak da adlandırılan offshore santraller, açık denizde, genellikle okyanustaki rüzgârın güç üretmek için kullanıldığı rüzgâr enerji santralleridir. Offshore santraller, Resim 2.29'da görüldüğü gibi daha yüksek rüzgâr hızlarının mevcut olduğu su kütleleri üzerinde kurulur.



Resim 2.29 Offshore RES

Offshore santrallerin bazı avantajları;

- ✓ Offshore santrallerde türbinler, kıyıdaki Onshore santrallerden daha büyük ve daha uzun olarak inşa edilebilir ve daha fazla enerji toplanmasına izin verir.
- ✓ Denizde uzak olma eğilimindedirler, yani komşu ülkelere çok daha az müdahalecidirler ve mil kare başına büyük çiftliklerin oluşturulabilir.
- ✓ Tipik olarak denizde, bir seferde daha fazla enerji üretilmesine izin veren çok daha yüksek rüzgâr hızı/kuvveti vardır.
- ✓ Rüzgâr santralleri çevre üzerinde nispeten olumsuz bir etkiye sahiptir. Nakliye şeritlerinde, balıkçılık alanları gibi hassas ortamlarda inşa edilmezler.
- ✓ Rüzgâr akışını engelleyebilecek fiziksel kısıtlamalar yoktur.

Offshore santrallerin bazı dezavantajları;

- ✓ Offshore santrallerin en büyük dezavantajı maliyettir. Onshore santrallere göre inşa edilmesi ve bakımı pahalı olabilir ve ulaşılması zor konumlarından dolayı, fırtına veya kasırga sonrasında onarılması pahalı olan çok yüksek hızlı rüzgârlardan zarar görebilirler.
- ✓ Kıyı şeridine (genellikle 26 mil içinde) daha yakın olarak inşa edilen offshore santraller, mülk değerlerini ve turizmi etkileyebileceğinden, sakinlerle popüler değildir[41].

3. MİKRO RÜZGÂR TÜRİNİ

3.1. Mikro Rüzgâr Türbinin Ortaya Çıkış Hikayesi

Hong Kong kökenli İtalyan mucit Lucien Gambarota bir konak, şato veya kalede yaşamıyordu fakat evine çok yüksek meblağda elektrik faturası gelince çok şaşırılmıştı. Hong Kong etrafı doğal enerji kaynaklarıyla doluyken (rüzgâr ve dalgalar) bu kadar fazla fatura ödüyor olması ona delilik gibi geldi. Hizmetlerin bu yüksek bedelinden sıkıldı ve dengeli bir alternatif üretmek için aklını çalıştırdı.

Kendi enerjisini üretmenin hayalini kurmaya başladı ve bu hayal onu mikro rüzgâr türbinlerini üretmeye kadar götürdü. Resim 3.1’de güncel hali verilen mikro rüzgâr türbini bugün hala kullanılmaktadır. Bu türbinler klasik rüzgâr türbinlerin küçük bir parçası boyutundadır ve enerji üretmek için sadece saniyede 2 m hızla esen rüzgâr yeterlidir. En ufak bir esintide bile dönmeye devam ederler.



Resim 3.1 Mikro rüzgâr türbini (MRT)[42]

Gambarota ürününü 15 Mart 2007 yılında piyasaya sürmüş ve Hong Kong Üniversitesi’yle birlikte ortak düzenlediği bir basın açıklamasıyla dünyaya duyurdu. MRT teknolojisini detaylandırarak açıkladı ve çok iyi tepkiler aldı. Ertesi gün web sayfası 10 000 tıklanma ile çok hızlı bir şekilde yayıldı. Sıfırdan çok uluslu şirketini kurarak siparişleri yetiştirmeye çalıştı. Yatırımcılar ve bir iş ortağıyla birlikte Motorwave Group doğdu. 2 ay içinde bir atölye kurdu ve siparişlerini üretip kargolamaya başladı. 2007 yılından bu yana tepkiler çok iyi yönde devam etti ve şu an bu diziler 40’tan fazla ülkede satılmaktadır.

Klasik rüzgâr türbinleri belli bir oranda çalışmak üzere tasarlanmıştır ve bu oran genellikle saniyede 8-15 m’lik bir rüzgâr hızı gerektirir. Ancak yeryüzünde standart yüksekliklerde ve normal hava şartlarında ortalama rüzgâr hızının saniyede 0-7 m arasında değişmektedir.

Gambarota bu düşük hızlarda bile elektrik üretebilen bir sistem tasarlamayı başarak rüzgâr enerjisinin kullanımı ile ilgili çok önemli bir çalışmanın ön ayağı olmuştur(Patent No: FR2884285) [43].

Mucit 1987 yılında Hong Kong’a taşındı ve Çin oyuncak fabrikaları için bir ürün geliştiricisi olmadan önce bir saat işi kurdu. Kendine ait bir laboratuvarı vardı ve ne yapmak istediğine dair güçlü bir fikirle teknolojisini Hong Kong Üniversitesi ile ortak olarak geliştirmeye başladı. Üniversite ile ortaklık kurdu çünkü prototiplerini test etmek için üniversitenin rüzgâr tünellerini kullanıyordu.

Mikro rüzgâr türbinleri enjeksiyonla kalıplanmış plastik polimer dişlilerden oluşturulmuştur. Her biri 26 cm çapında ve birbirlerine çatı üstüne, balkonlar gibi herhangi bir yere yerleştirilebilecek iskelet diziler ile bağlanmıştır. Dişliler birbirine bağlanarak sistemin daha çok elektrik üretmesi sağlanmıştır. Gambarota’ya yol gösteren felsefesi sıradan müşterilere hem fiyat hem de teknoloji açısından uygun olan bir ürün üretmektir. Resim 3.2’de gösterildiği gibi 6-8-10 ve 20’lik dişli paketleri şeklinde satılmaktadır. Tıpkı küçük rüzgâr değirmenleri gibidirler ve dizilerin boyutu müşterinin özel alan ve enerji ihtiyaçlarına göre ayarlanabilir[44].



Resim 3.2 Mikro rüzgâr türbin paneli [42]

3.1.1. Lucien Gambarota Mikro Rüzgâr Türbin Teknolojisi

Kolay kullanımı ile ön plana çıkan bir teknolojidir. Ancak rüzgâr enerjisinden faydalanmanın engelleri üstesinden gelip düşük maliyeti, güçlü yapısı ve yüksek hızlı rüzgârlara ihtiyacı olmadan çalışması amaçlanmıştır.

Enerji çıkışı tabi ki rüzgârın hızına bağlıdır. 1 m^2 boyutunda olan ve 20 dişliden oluşan bir birim saniyede 5 metrelik bir rüzgârla 15-17 W güç üretmektedir. Saniyede 6 metrelik rüzgârda güç çıkışı 27-39 W, saniyede 8 metrelik rüzgârda 64-65 W enerji üretilir. Rüzgâr hızı her 2 katına çıktığında güç çıkışı 8 katına çıkmaktadır. Bu teknoloji, üretim süreci göz önünde bulundurularak ve bakım için kolayca kullanılabilen bir boyutta tasarlanmıştır.

Seri üretimin düşük maliyete sahip olması için plastik polimerden (nylon) üretilmiştir. Plastik polimer kimyasallar, kirlilik, tuzlu su, kum, ısı, soğuk, kardan etkilenmez. Bu nedenle dünyanın herhangi bir yerinde kullanılmaya uygundur.

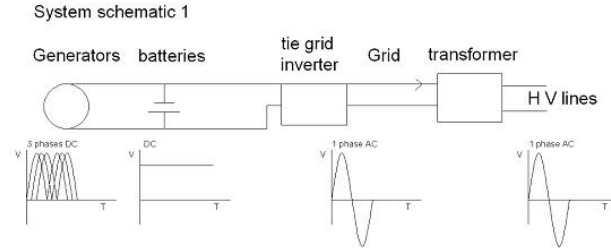
Saatin tersi ve yönünde bağlı türbinlere sahip olmanın eşsiz özelliği, çok geniş alanların ayarlanmasına izin verir. Yapısal sınırlar haricinde kaç tane monte edilebileceğine dair bir sınırlama yoktur. MRT teknolojisi maksimum % 44,25 ile çok yüksek bir verimliliğe sahiptir. Bu değer klasik rüzgâr türbinlerindeki fiziksel sınıra (% 45) çok yakındır. Modüler yapısı ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanması için istenilen boyutta modül tasarımını uygun kılar. Örneğin bir mikro türbin modülü 2 kW üretirse, 100 modül ile 200 kW üretecektir. Belirli bir güç çıkışıyla, belirli bir rüzgâr hızını hedefleyen sistem tasarlanabilir. Şirket son 8 yılda 30000 türbin ile şebeke bağlantılı ve şebeke dışı 5,7 MW değerinde sistem kurdu[44].

3.1.2. Lucien Gambarota Mikro Rüzgâr Türbini Çalışma Prensibi

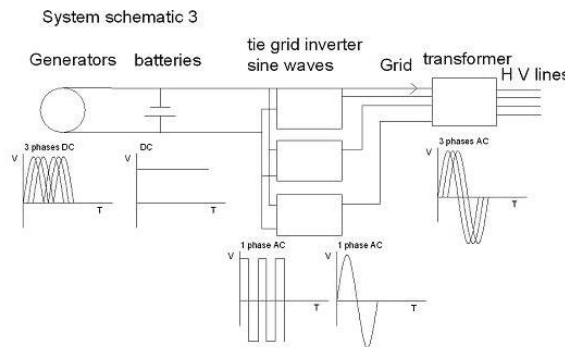
‘Yenilenebilir enerji; rüzgâr hızı değişebileceğinden ve güneş sadece yarım gün parlayacağından tam olarak güvenilir değildir ve bu yüzden onu daha güvenilir hale getirmek için çalışıyoruz.’ ilkesini benimseyerek çalışmalarına devam eden şirket çalışma prensibini şöyle açıklamaktadır; güvenilirliği için şebeke dışı teknolojinin bir kısmını büyük kurulumlarla uyumlu hale getirmek için kullanıyoruz.

Çok yüksek verimliliğe sahip Permanent Magnet (PM-Sabit Mıknatıs) jeneratörleri ile DC akım üretiliyor ve akülerde saklanıyor, ardından şebekeye yüklemek için invertörler kullanılıyordu. Bu ayarın birçok avantajı vardır:

- Bir depolama kapasitesine sahip olmak, şebeke seviyesi ile akü seviyesini ileterek gerçek zamanlı olarak şebeke ile mükemmel senkronizasyona izin vermektedir.
- Aküler, yük olarak hareket eder, bu nedenle ızgara mevcut olmasa bile, mekanik enerjiden kimyasal potansiyel enerjiye her zaman bir dönüşüm olur.
- Aküler tüm regülatörlere ve kontrol sistemlerine güç sağlar. Böylelikle yüksek bir güvenlik faktörü oluşturur.
- Sistemin doğrudan şebekeye bağlanma zorunluluğu yoktur, bu nedenle halkın veya çalışanların bakım yapması çok güvenlidir.
- Tek fazlı (monofaze) Şekil 3.1’de ve üç fazlı (trifaze) Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Tek fazlı devre; 220 V (şehir şebeke gerilimi) ve üç fazlı devre de 380 V (sanayi tipi gerilim) 220 V, 380 V ise olarak bilinmektedir. MRT sayesinde 2 gerilim türünde de enerji üretmek mümkündür[44].



Şekil 3.1 Tek fazlı şebeke [44]



Şekil 3.2 Üç fazlı şebeke[44]

Enerji üretim sistemlerinin birçoğunda olduğu gibi rüzgâr enerjisinde de nominal kapasite ile gerçek güç üretimi arasında bir fark vardır. 1 GW nominal kapasitedir ancak gerçek güç üretimi değildir. Enerji üretimi, yerdeki rüzgâr ve güneş enerjisine bağlıdır. Gerçek rüzgâr hızı yaklaşık 4-5 m/s'dir ve 1 GW değerinde

herhangi bir sistem yaklaşık 50 MW üretecektir. 1 MW değerinde herhangi bir markanın tek bir türbini, 4-5 m/s'de sadece 50 kW üretecektir. Yani elde edilecek net güç hesaplanırken kayıplar hesap edilmek zorundadır[44].

3.1.3. Neden MRT Teknolojisini Tercih Etmeliyiz?

3.1.3.1. Bakım

Yenilenebilir enerji sistemi için bakım çok önemlidir ve rüzgâr türbinlerinin, özellikle erişilmesi zor yerler için birkaç yıl sonra bakım eksikliği nedeniyle terk edildiği birçok durum vardır. Bu teknoloji ile bakım çok basittir ve bir teknisyen ya da kullanıcı tarafından yapılabilir. Sistem çalışırken bile bakım yapılabileceğinden tehlike oluşturmaz. Bileşenlerin çoğu yerel olarak üretildiğinden bakım da kolaylaştırılmıştır. Bu sayede tüm yedek parçalar her zaman mevcuttur. Kullanılabilirlik faktörü % 99'a yakındır. Son 20 yıldır, kulenin yorgunluğu veya yıldırım düşmesi veya yüksek rüzgâr hızı nedeniyle birçok RT hasarı vakası görülmüştür. MRT teknolojisinde belirtilen özellikler sayesinde bu tarz vakalar oluşmaz. Bu da teknolojinin güvenlik faktörünü yaratmaktadır[44].

3.1.3.2. Güvenlik Faktörü

Klasik türbinler, 60 m/s rüzgâr hızına 3 saniye dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu hızda (rüzgâr basıncı) kule, bu kuvvetin 1,2 ile 1,3 katına dayanacak şekildedir ve güvenlik faktörü 1,2-1,3'tür. MRT teknolojisinde güvenlik faktörü 3 ile 4 arasında olduğundan kaza olasılığı çok düşüktür. Belirtilen güvenlik faktörüne bağlı olarak 8 yıl içinde kayda geçen hiçbir çalışmada MRT teknolojisi ile kurulmuş, herhangi bir kaza yaşanmamıştır[44].

3.1.3.3. Özel Hava Şartlarına Bağlı MRT Teknolojisi

Klasik türbinler buzlu, karlı, kumlu ortamlarda kullanılamaz. Yoğun hava şartları sisteme zarar verebilir. MRT'ler paslanmaz çelik çerçeveli plastik polimerden yapılmıştır ve tipik bir tuzlu ortam olan Hong Kong'da kullanılmaktadır. Şirket buz fırtınası sırasında Kanada'da kurulum yapmış ve başarı kaydetmiştir[44]

3.1.3.4. Gürültü

Her bir türbin düşük frekanslı ses yaydığı için RES yakınlarında yaşamak pek mümkün değildir. Bu yüzden RES'leri yaşam alanlarından en az 2-3 km'lik mesafede kurulmalıdır. MRT teknolojisi çok daha sessizdir ve bu tür bir ses yaymaz.

Türbinlerin rüzgâra karşı direnç gösterirken oluşturduğu titreşimde yüksek bir ses oluşturur ancak plastik polimer malzeme titreşmez ve buna bağlı ses oluşturmaz[44].

3.1.3.5. Doğaya Zarar Verme

RES'lerde tasarım ve büyüklük nedeniyle, kuşlar ve uçan hayvanlar zarar görebilir. Ancak MRT'lerde tasarım ve büyüklüğü nedeniyle tabiata hiçbir zarar vermemektedir. Şirket kayıtlarına 'Böyle bir olayın gerçekleştiği tek bir vakamız yok' şeklinde not düşmüştür[44].

3.1.3.6. Rüzgâr Yönü

Genellikle rüzgâr yönü kışın kuzeyden, yaz aylarında güneyden gelir. Klasik rüzgâr türbinlerinin, maksimum verimlilik için çok önemli olduğu için rüzgâr yönünü takip edebilmesi gerekir. MRT'ler simetrik, böylece her iki taraftan da 60 derece rüzgâr alabilirler, böylece kurulumun çoğu rüzgâr izleme olmak zorunda değildir. Kurulumu daha güvenilir ve ucuz hale getirmektedir[44].

3.1.3.7. Üretimdeki Kararlılık

Çok güvenilir ve öngörülebilir bir kaynağı olan hidroelektrik, nükleer veya termik santrallerden farklı olarak, rüzgârın böyle bir avantajı yoktur ve MRT jeneratör seçimi çok dikkatli yapılmalıdır. Sonuç olarak Güneş'in her gün yükseldiğinden emin olunabilir ancak rüzgâr hızından emin olunamaz.

Ortalama yüksek rüzgâr hızı (7-12 m/s) olan bir konum için çok önemli değildir, ancak herhangi bir konum için sistemin başlangıç hızı çok önemlidir. Başlangıç hızı, sadece dönmeye başladıkları ancak yüksüz oldukları anlamına gelir. Enerji üretimine başlamak için en az saniyede 4-5 metre rüzgâr hızına ihtiyaç duyarlar. Mikro türbinler bugün herhangi bir rüzgâr türbininin en düşük başlangıç hızına sahiptir. Düşük rüzgâr hızı varsa, çok kararlı bir güç kaynağına ihtiyaç olacaktır. Bunu garanti edebilecek teknolojiler kullanması gerekir[44].

3.1.3.8. Güç Depolama Kapasitesi

RES'ler, AC ile doğrudan şebekeye bağlanacak şekilde tasarlanmıştır. AC'de, bir rezervuarda su pompalaması dışında enerji depolayabilen bir sistem yoktur. DC'de piller veya kapasitörler gibi enerjiyi depolamanın birçok yolu vardır. Enerji depolamak birçok hizmete daha izin verir. Depolanan enerji istenildiği zaman ve şekilde

tüketebilme şansı sunar. Üretim ve stok gerçek zamanlı olarak yapılabilir. Eş zamanlı olarak şebeke bağlantılı sistemlerde şebeke bağlantısının isteğe bağlı olarak kesilebilir veya geciktirilebilir[44].

3.1.3.9. Arazi Kullanımı ve Konum

RES'ler 1 ile 2 dönüm (10 ile 20000 metrekare) arasında araziye ihtiyaç duyar kabulüyle rakamsal oranlanırsa MRT'ler ise sadece yaklaşık 1000 metrekareye ihtiyaç duyar. İhtiyaç duyulan arazi ve alan için çok geniş detaylı fizibilite çalışmasına gerek yoktur. 50 metreden fazla bıçaklar özel taşıma aracına ihtiyaç duyar. MRT'ler maksimum 6 metre uzunluğunda ve bu nedenle temelde herhangi bir yere kurulabilen standart ekipmanlar kullanır. Rüzgâr hızının yüksek olduğu ve tarım arazilerini işgal etmeyen tepelere ve dağlara kurulum yapılması tercih edilir[44].

3.1.3.10. Görsellik

Kişiyeye ve zevke bağlı olarak RES'lerin görselliği bozduğu söylenmektedir. Ancak MRT'ler piksel görüntü sayesinde farklı renklerde enjekte edilebilir, böylece bunları grafik görüntüsü oluşturacak şekilde kurulabilir, bir logo veya grafik oluşturulabilir. Renklendirme ile görsel olarak kullanılabilen MRT paneli hatta reklam için kullanılabilir[44].



Şekil 3.3 Visual outlook örneği

3.1.3.11. Hibrit Sistem

Klasik rüzgâr türbinleri jeneratör ürünüdür ve diğer teknolojilerle uyumlu olacak şekilde tasarlanmamıştır. MRT'ler DC akımı üretir. Güneş panelleri gibi diğer DC teknolojileri ile uyumludur. MRT çerçeveleri ve kule özel olarak üretilmiştir ve modül kurulumunu kolayca içerebilir. Panellerinin dahil edilmesi hibrit sistemin güvenilirliğini arttırmaya izin verir. 10 metre yüksekliğinde 3 ile 500 metrekare panellerin montajı insanlar ve hayvanlar için doğal bir barınak oluşturur[44].

3.1.3.12. Kullanım Ömrü ve Ekonomi

Günümüzde herhangi bir teknolojinin 20 yıllık bir tasarım ömrü vardır. Bu süreden sonra hurdalığa atılmaları gerekebilir, çünkü ömrü tükenen hiçbir teknoloji kurtarılamaz. MRT'ler ise ömrü, her bir bileşen düzenli olarak ve minimum maliyetle değiştirilebileceği için 100 yılı aşabilir. Resim 3.3'te 60 türbinden 2 panel toplam 120 adet türbinle MRT paneli oluşturulmuştur[44].

Sistem fiyatını beş kat daha ucuz hale getirmesi önemli bir önem taşımaktadır. MRT teknolojisi ihracat edilebilir, dışa bağımlılığı da azaltacak yetiye sahiptir ve böylece yatırımın büyük bir kısmı ülke içinde kalır. Üstelik RES'lere göre bakım - onarımında da maliyetten kazanç sağlamaktadır[44].

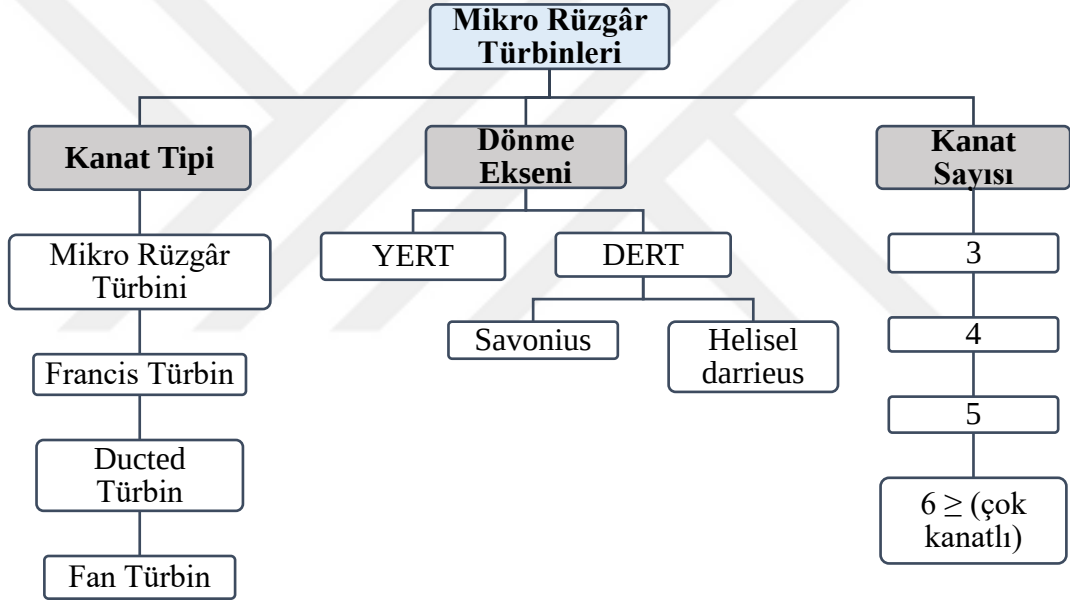


Resim 3.3 MRT paneli

3.2. Farklı Model Mikro Rüzgâr Türbinleri

İtalyan mucit Gambarota'nın ardından MRT ile ilgili çeşitli tasarımlar ve araştırmalar yapılmıştır. Farklı kullanım alanları ve ihtiyaçlar için farklı tasarımlar oluşturulmuştur. Bu çalışmada tasarımlar bir araya getirilerek 'farklı model mikro rüzgâr türbinleri' başlığında incelenmiştir. Şekil 3.4'de mikro rüzgâr türbinleri kanat tipi, dönme eksenini ve kanat sayısına göre sınıflandırılmıştır.

Tasarımda; kanat tipi kanadın geometrisi ile ilgilidir, dönme eksenı klasik RT'lerinde bahsedildiği gibidir, kanat sayısı ile ilgili klasik RT'lerde ki gibi bir sınıflandırma olmayıp tamamen tasarımsal kanat sayısı ile sınıflandırılır. Büyük ölçekli rüzgâr türbinleri için önerilen tasarım modelleri ve optimum çalışma koşulları, santimetre ölçekli mikro rüzgâr türbinlerinin (SÖMRT) tasarımı ve işletimi için doğrudan geçerli değildir. Santimetre ölçekli mikro rüzgâr türbinlerinin düşük Reynolds sayısı rejimi, akışkan özelliklerinde ve küçük ölçekli kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinden miktarlarda temel bir değişim öngörmektedir. Bu hız, türbinin güç üretmeye başladığı rüzgârın gelen akış hızıdır[49].



Şekil 3.4 Mikro rüzgâr türbinlerin sınıflandırılması

3.2.1. Kanat Tipine Göre

3.2.1.1. Mikro Rüzgâr Türbini

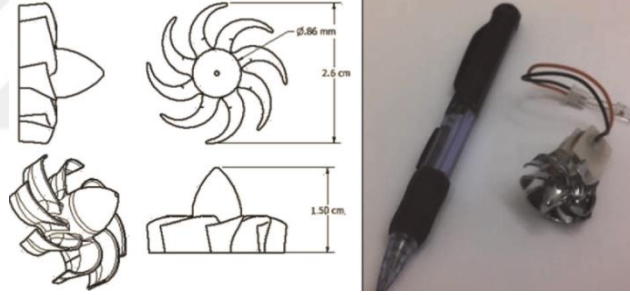
Klasik rüzgâr türbinlerinden esinlenerek rüzgâr enerjisinin gündelik yaşama uyarlanması çalışması sonucunda oluşan mikro rüzgâr türbini, MRT alanında çalışmaların ön ayağı olmuştur. Diğer türbinlerin modellenmesi bu çalışmadan sonra olmuştur (*Lucien Gambarata*) [44].



Resim 3.4 MRT [44]

3.2.1.2. Francis Türbin

Büyük çapta olan tasarımları daha çok hidroelektrik santrallerinde kullanılan fan tipi kullanım amacından dolayı ‘su türbini’ adını almaktadır[45]. Swirl (girdap) türbini de denir çünkü kanat tipinden akış sırasında girdap etkisi oluşturmaktadır. İngiliz-Amerikan Francis tarafından geliştirilerek Francis adını almıştır[46]. Genel olarak 1-2 metre kanat çapında tasarlandığından mikro rüzgâr türbini sayılabilmesi için türbin çapının bu ölçülerden küçük olması beklenmektedir.



Resim 3.5 Francis MRT ile ilgili bir uygulama

Resim 3.5’te AutoCAD ile tasarlanmış ve uygulaması yapılmış Francis MRT’nin kalem ile boyutu kıyaslanmıştır[47]. Francis türbinleri elektrik üretiminde kullanılmıştır. Türbinlerde kanat geometrisi çalışma prensibini doğrudan etkilemektedir ve bu sebeple Francis türbinlerin tasarımı ve çalışma prensibi Francis MRT ile aynıdır. Giriş ve çıkıştaki bıçak açılarının tasarımına yakından dikkat etmek gerekir, çünkü güç üretimini etkileyen ana parametrelerdir. Çalışma prensibi ise akışkan, türbinin kanatçıklarına çarparak türbin miline hareket verir, hareket milin çıkışında mekanik enerjiye dönüşür. Bu mekanik enerji çeşitli düzenekler yardımıyla elektrik enerjisine çevrilir[46-47].

3.2.1.3. Ducted Mikro Türbin

Türkçesi kanallı türbin olarak geçen ducted türbin modeli çevresindeki kanal yapısı ile bir iç akış oluşturmaktadır. Kanal düz bir boru şeklinde olmayıp havanın giriş-çıkış hareketini sağlayacak şekildedir. Mikro türbinlerde düşük Reynolds sayısı, akışkan özelliklerinde ve küçük ölçekli kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi klasik türbinlere göre temel bir değişim öngörülmektedir. Kanallı türbin akışlarında bu değerler iç taraftaki sürüklenme kuvvetine ve basınca göre değişir. Ducted RT'ler de kanal çapı 1 m'nin altında ise mikro sayılmaktadır. Kanat tasarımı ve verimliliğe bağlı olarak daha çok fan olarak kullanılmıştır[48].



Resim 3.6 Ducted 3 kanatlı mikro rüzgâr türbini



Resim 3.7 5 kanatlı 3 adet ducted MRT paneli

Büyük boyutlarda mikro olanlara göre daha etkili performans göstermektedir. Ducted türbinlerin incelenmeye alınması ve üzerinde iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekir[48].

3.2.1.4. Fan Tip Mikro Türbin

Kanat modellemesi, standart fanlardan alınarak tasarlanmıştır. Fan tip MRT ile ilgili akademik bir çalışma yapılmamıştır. Fan tip kanat bir vantilatörün bıçaklarına benzetilebilir. Genel olarak rüzgâr türbinlerinin aksine birleşme noktasından itibaren bıçaklar genişleyerek devam eder. Bıçak yapısı uç hız oranının hesaba katılmadığını göstermektedir. Kavisli yapısı sayesinde rüzgâra tepki vererek ekseni boyunca döner. Bu şekilde havaya yön verir[45].



Resim 3.8 Fan tip MRT

3.2.2. Dönme Eksenine Göre Mikro Rüzgâr Türbinleri

Klasik rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi yatay eksenli veya dikey eksenli tasarıma uygundur. Tıpkı klasik RT’lerde olduğu gibi yatay eksenli MRT’ler daha verimli sonuçlar vermiştir. Dönme eksenine göre dikey (DERT) tasarlanan Helisel Darrieus MRT Resim 3.9’da ve Savonius MRT Resim 3.10’ta verilmiştir.



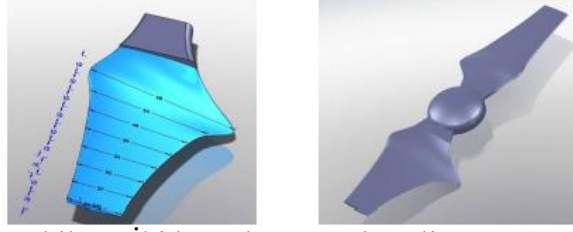
Resim 3.9 Helisel darrieus model dikey eksenli MRT



Resim 3.10 Savonius model dikey eksenli MRT

3.2.3. Kanat Sayısına Göre Mikro Rüzgâr Türbinleri

Henüz kanat sayısı ile ilgili klasik rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi bariz bir sınıflandırmayla anılmayan MRT’ler tasarımda istenildiği kadar kanat sayısı ile üretilebilir. Tek kanatlı mikro rüzgâr türbini ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmadığından MRT’ler kanat sayısına göre sınıflandırılacak olursa 2 kanatlı MRT’den başlamaktadır. Kanat sayısında değişiklik yapılan tasarımlar yatay eksenli mikro rüzgâr türbinlerinde çoğunluk göstermiştir.

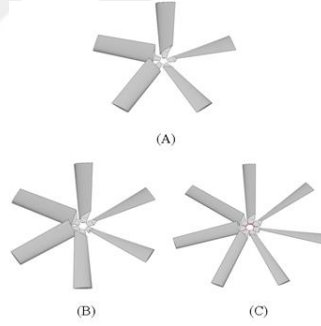


Şekil 3.5 İki kanatlı yatay eksenli MRT [49]

Şekil 3.5’te verilen iki kanatlı yatay MRT deneysel bir çalışma için üretilmiştir. Çalışmada iki kanatlı MRT önce modellenmiştir. Çalışma sonuçları teorik olarak değerlendirilmiş ve verimli bulunmamıştır. Gerekli iyileştirmelerin yapılması ve araştırmaların devam etmesi gerektiği bildirilmiştir[49].



Resim 3.11 3 kanatlı ducted tip MRT



Şekil 3.6 5, 6 ve 7 kanatlı yatay eksenli MRT



Resim 3.12 Çok kanatlı (24 kanatlı) yatay eksenli MRT tasarımı [44]

4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Rüzgâr enerjisine yeni bir bakış açısı getiren İtalyan mucit Gambarota'nın icadından sonra, teknoloji devrimleri ve ülkelerin gelişmişliğini enerjinin üretim ve tüketiminin gösterdiği bu dönemde dünya çapında üniversiteler enstitüler ve araştırmacılar mevcut konu ile ilgili (MRT) farklı çalışmalar yapmışlardır. Bu bağlamda yapılan her araştırmanın niteliği farklılık göstermiş ve yapılan her çalışma farklı bir sonuç getirmiştir. Bu bölümde MRT olarak bahsedilen mevcut çalışmalar, türbin çapı, kanat sayısı, kanat açısı bakımından incelenerek aşağıda verilmiştir. İlgili konu ile alakalı çalışmalar tez konusuna bağlı olarak belirtilen başlıklar altında incelenirken, diğer çalışmalar başlığı altında tasarımda eksen tipine (DERT, YERT), araştırmanın niteliğine (deneysel, teorik), deneysel çalışmada deney düzeneğinin tasarımı, teorik çalışmada simülasyon ve formülizasyon uygulamasına göre incelenmiştir.

4.1. Türbin Çapı

Türbin çapı, türbini oluşturan kanatlarının (bıçakların) uzunluğunun oluşturduğu, rüzgârın karşılandığı net alandır. Türbin çapı, rotor çapı olarak da adlandırılmaktadır. Türbin çapı ile ilgili yapılan çalışmalarda rüzgâr türbinleri eksen tipine göre dikey ya da yatay olmakla beraber araştırmanın konusuna göre belirli ölçütler, belirli bir malzeme ve genel olarak farklı kanat tasarımları ile prototipler oluşturulmuştur. Bu prototipler çalışma konusuna göre teorik hesaplar ve simülasyon ile desteklenmiştir. Simülasyonlar bilgisayar destekli tüm uygulama ve modelleme esaslı programlar (CFD, ANSYS, AutoCAD, Solidworks vb.) kullanılarak yapılmıştır. Çalışmalar deneysel ya da teorik olup çalışmanın konusuna göre araştırmacılar tarafından belirlenen şekilde yapılmıştır. Türbin çapı bazen değişken bir parametre olarak belirlenmiş bazen de sabit tutularak başka değişken parametrelerle (rüzgâr hızı, kanat sayısı vb.) birlikte incelenmiştir. Sonuçlar araştırmacılar tarafından değerlendirilmiş; kabul edilmiş ve önerilmiş ya da önerilmemiştir. Türbin çapı ile ilgili yapılan bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

H. Mamur: MRT tasarımı, uygulama ve güç performans analizlerini incelemiştir. MRT bıçakları için düşük rüzgâr hızlarında daha iyi performans sunan yeni bir bıçak formu kullanılmıştır. MRT'nin güç performans analizleri, farklı rüzgâr rejimleri için kamyon testleri ile yapılmıştır. MRT'nin elektrik gücünü ölçmek için programlanabilir bir mantık denetleyicisine dayanan yeni bir denetleyici kontrol ve veri toplama (SCADA) programı yazılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir[50].

Türbin çapı ile adlandırmada literatürde net bir terminoloji bulunmamakla beraber bu çalışmada IEC 61400.2 bir ölçüt olarak kullanılmıştır. IEC 61400.2 standardına göre, RT'ler 2 sınıfa ayrılır: süpürülmüş rotor alanı $200 m^2$ ve daha az olan küçük rüzgâr türbini (KRT) ve $200 m^2$ 'den büyük olanlar büyük rüzgâr türbini (BRT) olarak adlandırılır. İngiltere Pazar Raporu 2013'e göre, ticari olarak üretilen RT'ler 3 sınıfta verilmiştir: MRT'ler, KRT'ler ve KORT'ler (küçük-orta RT'ler)[50].

R.A Kishore ve ark.: üç kanatlı, 40 cm'lik rotor çapında yatay eksenli taşınabilir 1,7 m/s'lik çok düşük kesme rüzgâr hızına sahip, doğrudan tahrikli bir MRT incelemiştir. Araştırmada kullanılan terminoloji; mikro ölçekli rüzgâr türbini (rotor çapı ≤ 10 cm), küçük ölçekli rüzgâr türbini ($10 \text{ cm} < \text{rotor çapı} \leq 100 \text{ cm}$), küçük ölçekli rüzgâr türbini ($1 \text{ m} < \text{rotor çapı} \leq 5 \text{ m}$) ve büyük ölçekli rüzgâr türbini (rotor çapı $> 5 \text{ m}$) olmuştur[51].

P.Ying ve ark.: yeni küçük bir rüzgâr türbininin hava akışı özelliklerini incelemiş ve performansını tahmin etmek için hem sayısal hem de deneysel bir yaklaşım sunmuştur. Türbin modeli, kentsel alanlarda çok akışlı bir rüzgâr enerjisi sisteminde kullanılmak üzere dürtü türbini ilkelerine dayalı olarak oluşturulmuştur. Bu araştırmada kullanılan temel terminoloji de rotor çapına göre: mikro ölçek (rotor çapı $< 0.1 \text{ m}$), küçük ölçekli ($0.1 \text{ m} < \text{rotor çapı} < 1 \text{ m}$), orta ölçekli ($1 \text{ m} < \text{rotor çapı} < 5 \text{ m}$) ve büyük ölçekli (rotor çapı $> 5 \text{ m}$) dört kategoriye ayrılmıştır[52].

R. Amirante ve ark.: küçük ve orta ölçekli rüzgâr türbinleri için yenilikçi ve uygun maliyetli bir açık test teçhizatı önermiştir. Temel amaç, ölçeği küçültülmüş rüzgâr türbini testleri için eşsiz Reynolds sayıları gibi çözülmemiş sorunlar sunan

rüzgâr tünellerine geçerli bir alternatif geliştirmek olmuştur. Önerilen test düzeneği, yatay ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri için açık alan, ses altı bir tesistir. Test düzeneği, yerden belirli bir yükseklikte konumlandırılan ve fanların önüne yerleştirilmiş bir rüzgâr türbinini test etmeye uygun bir hava akışı oluşturan eksenel fan kümesidir. Bu çalışma da, rotor çapı 5 m'den küçük olan rüzgâr türbinleri için bu yeni test donanım konseptinin fizibilite araştırması amaçlanmıştır[53].

N. Reuther ve ark.: Yeni Zelanda'daki yerli rüzgâr türbinlerinin potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışma ilgili süreçlerin etkinliği, fizibilitesi ve ileriye yönelik fikir sahibi olmak için küçük ve mikro ölçekli rüzgâr enerjisi üretim planlama ve uygulama süreçlerine genel bir bakış sağlamıştır. Bu çalışmada türbinin ürettiği güce göre; enerji üretimi 1 kW altında olan rüzgâr türbinleri mikro RT, 1 kW üstünde olanlar küçük RT olarak adlandırılmıştır. Konutlarda MRT uygulaması için yapılan çalışmada 3 farklı konumda her konum için farklı türbin çaplarında (1,2,3,4 ve 5 m), sabit birer rüzgâr hızında (4,5,7 m/s) ve deneysel olarak yapılmıştır [54].

B. Loganathan ve ark.: konut enerji üretimi için çatı üstü güneş panelinin yanı sıra, düşük rüzgâr çalışma kabiliyeti nedeniyle yerel güç talebini desteklemek için dikey eksenli belirli ölçülerde bir dizi rüzgâr türbini incelemiştir. Sonuçlar 300 mm çaplı ve 24 kanatlı bir türbinin bölgede 4 kişilik bir ailenin güç ihtiyacının %10'unu sağlayabileceği belirtilmiştir[55].

N. Rosmina ve ark.: savonius türbininin yağmur suyu hasadı sistemine MRT uyarlamasını araştırmıştır. Savonius türbini, en boy oranı (AR) 1.8, yüksekliği (H) 8 cm ve çapı (D) 4.5 cm olan bir alüminyum levha ile tasarlanmıştır. Tek aşamalı rotor kullanıldığında güç çift aşamalı rotordan neredeyse iki kat daha fazla üretebileceği ve böylece 0,3 W bir LED lambayı başarılı bir şekilde aydınlattığı belirtilmiştir[56].

A. Tummala ve ark.: rüzgâr çiftliklerinin kurulumundaki zorluklar ve iklim koşulları üzerinde potansiyel etkisini değerlendirdiler. Farklı küçük ölçekli rüzgâr türbinleri hakkında bir takım incelemeler yapmış ve ayrıca rüzgâr türbinlerinin

konumlandırılması ile aero-akustik özelliklerini de sunmuşlardır. Bu araştırmada türbin çapı, 0.5-1.25 m arasında mikro, 1.25-3 m arasında mini, 3-10 m arasında mesken olarak adlandırılmıştır. Araştırmada kullanılan prototip Air-X olarak adlandırılmıştır ve rotoru 1,16 m çapına sahiptir[57].

J.Park ve ark.: kablolu algılayıcı köprüdeki kablosuz sensörlere güç sağlamak için mikro rüzgâr türbinlerinin kullanımının uygulanabilirliği kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. Bu araştırmada özel olarak seçilmiş 13.8 cm çapında 2-3-6 kanatlı üç adet mikro rüzgâr türbinini kullanarak, türbinleri en büyük gücü üretebilecek en iyi türbini bulmak için bir dizi deney yapılmıştır. Sonuçlar, altı kanatlı rotorlu rüzgâr türbininin, 7 m/s rüzgâr hızı ile 439 mW'lık bir üretme gücüne sahip en güçlü performansa sahip olduğu göstermiştir[58].

D.Y.C. Leung ve ark.: rüzgâr hızının genellikle düşük olduğu kentsel ortamlar için özel olarak tasarlanmış MRT performansını araştırmıştır. Rotor çapının bir metre ya da daha küçük bir çapa sahip olduğu küçük bir rüzgâr türbini, elektrik üretimi için evlerin ve binaların çatısında kurulabilir ve tek başına kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Tasarlanan MRT'nin bıçağı çok uzun değildir ve bıçak uzunluğu boyunca mono kalınlıktadır. Güç katsayısı ve başlangıç etkisi göz önüne alındığında, 60 derecelik, 5 kanatlı MRT en uygun türbin profili seçilmiştir. Maksimum güç katsayısı, ön türbin tasarımından (30 derecelik, 8 kanatlı rotor) çok daha yüksek ve yüksek güç katsayısının aralığının daha geniş olduğu bildirilmiştir[59].

İncelenen belli başlı veriler; elektriksel üretim kabiliyeti (nominal güç), başlangıç kabiliyeti (nominal rüzgâr hızı), uç hız oranı, maksimum güç katsayısı, maksimum tork sayısı, moment, optimum direnç yükleri, çevresel hava şartları (sıcaklık, basınç, nem) olarak belirtilebilir.

Çalışmalar bu verilerin değerlendirmesi sonucunda elektrik üretimi ve kullanım potansiyeline ayrıca üretim ve enerji tüketiminde ki maliyet durumuna ya önerilmiştir ya da eksikliklerin giderilebilmesi durumunda çalışmalara devam edilmesi gerektiği araştırmacılar tarafından bildirilmiştir.

4.2. Kanat Sayısı

Kanat sayısı türbini oluşturan kanatların sayısıdır. Klasik rüzgâr türbinlerinde genel olarak 3 kanatlı rotorlar tercih edilmektedir. Kanatlarda oluşan döndürme momenti üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde daha düzgün ve dengeli dağıldığı bilinmektedir. Ayrıca 3 kanatlı rüzgâr türbin yapılarının milinde atalet momentleri oluşmadığından ek donanımlara ihtiyaç duymazlar. Kanat uç hız oranları düşüktür ve bundan dolayı gürültü seviyeleri de azdır[60]. Mikro rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı ile ilgili çalışmalar kanat sayısının sabit tutulup diğer parametrelerin (rüzgâr hızı, türbin çapı, kanat eğim açısı vb.) değiştirilmesi ve kanat sayısının değişken bir parametre olarak seçilmesi ile tamamlanmıştır. Kanat sayısının sabit tutulduğu bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

R.A Kishore ve ark.: zemin seviyesine yakın yüksek verimlilikle çalışmayı hedefleyen 3 kanatlı YERT modeli ile tasarlanan küçük ölçekli taşınabilir bir türbin kullanmıştır. Sabit rüzgâr hızında, elektrik gücü önce yük direncindeki artışla artmış, optimum yükte maksimum değere ulaşmış ve daha sonra yük direncinde daha fazla artış ile azalmıştır. Rüzgâr hızındaki artışla elektrik gücünün arttığı görülmüş ve bunun sebebinin teorik olarak, bir rüzgâr türbininin güç çıkışı rüzgâr hızının küpü ile orantılı olmasından kaynaklı olduğu bildirilmiştir[51].

K. Tiwari ve ark.: 2 - 4 m/s 'lik düşük rüzgâr hızı olan yerlerde bile istikrarlı güç kaynağı sağlayabilen sürdürülebilir bir rüzgâr enerjisi sistemi geliştirmeyi amaçlamıştır. 3 kanatlı 700 W SNT-1 MRT ile bir dizi deney yapılmıştır. Muson mevsiminde, rüzgâr hızı yeterince dengeli olduğunda, yöntem ile en azından çatıdaki rüzgâr türbinleri için geçerli bir enerji sistemi kabul edilmiştir. Sonuçlar MRT'nin ticari olarak faydalı kullanılması için rüzgâr hızının 3 ile 6 m/s arasında olması gerektiğini göstermiştir[61].

Alice Y.: rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için polyMUMPS (katmanlı proses ön tasarım) işleminde, enerji hasadı amacıyla 6 kanatlı bir rotor tasarımı yapmıştır. Basitleştirilmiş bir fizik varsayımıyla bir pim eklemi, dönen türbini

yerinde tutarken, türbinin iç halkası, enerjiyi birleştirmek için elektrostatik bir jeneratör görevi görmüştür. Bu çalışma polyMUMPS işleminde bir MRT oluşturmaya yönelik ilk denemeyi temsil etmektedir. Sonuçlar özel rüzgâr yükleme koşulları için tasarımı optimize etmek ve daha fazla güvenilirlik sağlamak için daha fazla analiz yapılması gerektiğini göstermiştir[62].

D. Nongdhar ve ark.: elektrik üretmek için düşük rüzgâr hızındaki alanlar için küçük boyutlu yatay eksenli MRT tasarım fikirlerini sunmuştur. Ayrıca, kurulum ve bakım için çok düşük bir maliyet gerektiren evler, köyler ve benzeri birçok uygulamada kullanılabilir olduğu bildirilmiştir. MRT kanatları 10 inç uzunluğunda ve 3 inç çapında termoplastik malzemeden (PVC boru) 3 adet yapılmıştır. Bir dizi deney ve simülasyon yapıldıktan sonra rüzgâr hızı arttıkça türbin veriminin arttığı ancak daha fazla tasarım modifikasyonları yapılabileceği bildirilmiştir[63].

F. Hogan: McGill Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirdiği araştırma projesinde türbin tasarımının değişkenleri ve parametrelerini incelemiştir. Cep telefonları gibi taşınabilir cihazların bataryalarını şarj etme yeteneğine sahip küçük bir rüzgâr türbini tasarlamayı amaçlamıştır. Kanat profilini, akor uzunluğu ve bıçağın her bölümündeki açığı hesaplayarak 2 kanatlı tasarımla modellemeyi tamamlamıştır. Bu tasarım ile deneysel çalışma yapılmamıştır[64].

Antsos ve ark.: gürültü bariyerleri üzerine entegre edilmiş mikro rüzgâr türbinleri için rüzgâr kaynağı özelliklerini ve enerji verimini değerlendirmiştir. Rüzgâr hızı büyüklüğü, giriş açısı ve türbülans yoğunluğu üzerindeki etki 3 kanatlı türbinlerle analiz edilmiştir. Analizlerde DERT'ler veya Difüzör-Artırıcı rüzgâr türbinleri gibi farklı türbin rotor boyutları (piko/mikro/küçük) ve türlerinin deneysel veya modelleme değerlendirmesinde akış yönü, akış yönüne etkiyen dış etmenler incelenmiştir[65].

Moreira ve ark.: tipik olarak küçük rüzgâr türbinlerinde bulunan bir aktarma sisteminin dirençli torklarını deneysel olarak araştırmıştır. 4 kanatlı ve 1.3 m çapında bir türbin ile tork sensörü, devir enkoderi, jeneratör ve elektrik motorundan oluşan bir

tezgah düzeni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Türbin davranışını değerlendirmek için Newton'un ikinci yasasını ve kanat elemanı teorisini birleştiren bir yaklaşım kullanılmıştır. Ancak, MRT'lerin başlangıç koşullarını değerlendirmek için daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmıştır [66].

Moussa: yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgâr türbininin güç katsayısının, uç hız oranına göre gelişimini araştırmıştır. Modelleme çalışmasıyla ilgili olarak, kayma gerilmesi taşıma türbülansı modeli, Reynolds ortalama Navier Stokes denklemleri ve bunların kararsız versiyonu ile birlikte iki farklı üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile uygulanmıştır. Hem deney hem de sayısal sonuçlara göre, yaklaşık 5,39 uç hız oranında 0,24 C_p değerine ulaşılmıştır[67].

Kanat sayısının sabit tutulduğu çalışmalarda prototipler sayısal veya deneysel olarak değerlendirilmiş ve sonuçta tasarım uygun görülmüştür ya da çalışmaların devam etmesi gerektiği bildirilmiştir. Mikro rüzgâr türbinleri ile ilgili çalışmalar farklı parametrelerle MRT üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu parametrelerden biri de kanat sayısının değişken olduğu bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

B. Loganathan ve ark.: konut enerji üretimi için çatı üstü güneş panelinin yanı sıra, düşük rüzgâr çalışma kabiliyeti nedeniyle yerel güç talebini desteklemek için dikey eksenli bir rüzgâr türbini incelemiştir. Farklı 2 boyutta tasarlanan mikro DERT; prototip-1 (150 mm) ile sabit rüzgâr (8.5 m/s) hızında 8, 16, 24, 32, 40 ve 48 bıçak sayısı için bir dizi deney yapılmış maksimum güç çıkışları sırası ile 0,2- 0,5- 1,4- 2,1 ve 0,7 W olarak bulunmuştur. Prototip-2 'de (300 mm) yine sabit rüzgâr (8.5 m/s) hızında 8, 16 ve 24 için kanatlı türbin için maksimum güç çıkışları sırasıyla 1,2- 2,3- ve 3,6 W bulunmuştur. Prototip-1'de 32 kanatlı, prototip-2'de 24 kanatlı türbinler kendi aralarında kıyaslanmış ve 24 kanatlı prototip-2'nin daha uygulanabilir olduğu belirtilmiştir[55].

J.Park ve ark.: 2-3-6 kanatlı üç adet MRT kullanarak, türbinleri en büyük gücü üretebilecek en iyi şekilde bulmak için bir dizi deney yapılmıştır. Sonuçlarda, altı kanatlı rotorlu rüzgâr türbininin, 7 m/s rüzgâr hızı ile 439 mW'lık bir üretme gücüne sahip en güçlü performansa sahip olduğu belirtilmiştir[58].

D.Y.C. Leung ve ark.: bu çalışmada mikro ölçekli bir rüzgâr türbini sistemi için çok kanatlı bir yaklaşım tercih etmiştir. Kanat sayıları 3 ile 12 arasında değişen farklı bıçak ağzı ve kanat eğim açısına sahip türbinler deneysel çalışma ile test edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sekiz veya daha fazla kanatlı MRT'lerin torkunda belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Öte yandan, daha az kanatlı bir MRT rotoru, enerji dönüşümü için elverişli olmayan daha küçük bir tork yakalamıştır[59].

A. Nimje ve ark.: bu çalışma ile yüksek rüzgâr hızlarında çalışmayı amaçlamış yarım küre bıçaklı küçük ölçekli rüzgâr türbininin tasarımı ve geliştirilmesine yönelik sistematik bir çaba sağlamıştır. Sürtünmeye dayalı prototipin, çimento üretim tesisinde küçük ölçekli enerji üretimi için muazzam bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir. Mevcut üç kanatlı model, egzoz havasının tam olarak kullanılması için altı kanatlı modele genişletildi. Yarım küre şekilli bıçaklar üzerindeki maksimum ulaşılabilir hız ve basınç, ANSYS analizi kullanılarak çeşitli derinlik ve çaplar için elde edilmiş ve deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Yarım küre bıçakların uygun kasnak oranı, çapı ve derinliğinin seçilmesi, çimento endüstrisinde küçük enerji üretimi için öngörülebilecek ümit verici sonuçlar vermektedir[68].

4.3. Kanat Açısı

Türbin çapı ve kanat sayısından sonra türbin tasarımını etkileyen bir kritik değerde türbini oluşturan kanatların aerodinamik yapısıdır. Klasik rüzgâr türbinlerinde kanat yapıları kısaltması NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) olan Milli Havacılık Danışma Komitesi adlı Amerikan kuruluşu tarafından tasarlanmış olan kanat profil şekillerine verilen genel ad ile kodlanmaktadır [69]. NACA 1933 yılında kanat profili tanımlamasını yaparak, kanat profillerinin genel şeklini tanımlamıştır. NACA'nın yaptığı bu çalışma günümüzde çeşitli alanlarda (uçak kanadı, rüzgâr türbini) kullanılan kanat kesitlerinde kullanılmaktadır[70].

NACA kanat profilleri başta olmak üzere kanat tasarımlarında açı en önemli değerlerden biridir. Kanat profili ve geometrisini belirlemek için kanat üzerinde tanımlı olan açılar, bağıl iç akış açısı (kanadın bağıl hava hızını karşıladığı açı-hücum açısı) ve burulma açısıdır[71]. Düz profilli kanatlarda tanımlı açılar, bıçak eğim açısı, bıçak ağzı eğim açısı (uç ~ kök), bıçak büküm açısı olarak söylenebilir[59]. Aslında kanat olan tüm çalışmalarda açı önemlidir. Açı ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir;

M. Y. Zakaria ve ark.: küçük cihazlara güç sağlamak için belirli geometrik kısıtlamalar ile santimetre ölçekli girdap tipi bir MRT önermiştir. Bu geometrik kısıtlamalar arasında bıçak bükülme açısı, bıçak sayısı, akor uzunluğu ve uç kayıplarını azaltarak, aerodinamik verimliliği arttırmak için bıçak uçlarını dairesel bir örtü ile bağlamanın gerektiği belirtilmiştir [47].

A. Tummala ve ark.: büyük ölçekli rüzgâr çiftlikleri kurulumunun iklim koşulları üzerinde potansiyel bir etkisi olduğundan, merkezi olmayan farklı küçük ölçekli rüzgâr türbinleri sürdürülebilir enerji için bir seçenek görülmüş ve Air-X tasarlanmıştır. Air-X'in temel 3 kanatlı rotor ile 15°, 18° ve 20° 'lik farklı eğim açılarında performansı incelenmiştir. Sonuçlarda, kanat profillerinin küçük ölçekli YERT performansı üzerindeki etkisi, rüzgâr kuvvetinin etkisi, rüzgâr yönü ve türbülans yoğunluğunun etkisi üzerine fazla çalışma yapılmadığı ve ayrıca yapılan çalışmanın kanat profili tasarımı, üretim ve kullanım kolaylığı dikkate alınarak optimize edilmesi gerektiği belirtilmiştir[57].

D.Y.C. Leung ve ark.: rüzgâr hızının genellikle düşük olduğu kentsel ortamlar için özel olarak tasarlanmış MRT performansını araştırmıştır. YERT rüzgâr türbinleri, rüzgâr kesme açısı için kökten uca doğrusal konik bıçaklar kullanılmıştır. MRT büküm açısının, mevcut hesaplama ve optimizasyon çalışması için kritik bir parametre ve MRT'nin bıçak alt açısı ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Kanat profiline bağlı olarak değişen doluluk oranına göre yaptıkları incelemede çok kanatlı türbinlerin daha iyi sonuç verebileceğini ancak doluluk oranının rüzgârın bloke

edilmemesi için önemli olduğunu bildirmiştir. Genel olarak, belirli bir bıçak kesme açısı için, daha fazla bıçak daha iyi bir performans vermiştir. Güç katsayısı ve başlangıç etkisi göz önüne alındığında, 60 derecelik bıçak alttan kılığına sahip 5 kanatlı mikro rüzgâr türbini en uygun türbin profili seçilmiştir. C_p , ön türbin tasarımından (30 derecelik, 8 kanatlı rotor) çok daha yüksek ve yüksek güç katsayısının aralığının daha geniş olduğu bildirilmiştir [59].

R. Lanza fame ve ark.: araştırmada radyal akışların modellemesini ve fiziksel boyutlarını gözden geçirmiştir. Dönen bir kanat boyunca radyal akış, YERT'lerin akış alanını spesifik olarak etkileyen dinamik bir davranıştır. Bu akışın rotor performansı üzerindeki fiziksel etkileri, üç boyutluluğa ve Reynolds sayılarına olan yüksek bağımlılığı nedeniyle henüz tam olarak anlaşılmamıştır. Araştırmacılar tarafından geliştirilen model bir RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations), dört denklem, geçiş türbülansı modeline dayanıyordu ve uygun şekilde tasarlanmış bir mikro rotor üzerinde kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Mikro rotor, 0.225 m çapında bir NACA 4415 üç kanatlı, bükülmüş ve konik şeklindeydi[72].

T. Ikeda ve ark.: sağlam aerodinamik kuvvet üretimini ve istikrarlı uçuşu mümkün kılan kuş kanatlarından esinlenerek, bükülmüş kanat morfolojisine sahip temel bir kanat tasarımı geliştirmiş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile aerodinamik özelliklerini araştırmıştır. Bükülmüş kanadın akor uzunlukları ve bükülme açıları üzerindeki morfolojik optimizasyonu, optimize edilmiş bükülme kanadının, biyo-esinlenilmiş bükülme kanadının morfolojisine ilginç bir şekilde iyi uyan geniş uç-hız oranları aralığında güç katsayısında belirgin iyileştirmeler sağlayabildiğini göstermiştir[73].

4.4. Diğer Çalışmalar

Gambarota'nın icadından sonra konu ile çalışmalar dünya çapında birçok araştırmacı tarafından çalışma konusu seçilmiştir. Konu ile alakalı farklı zamanlarda ve farklı konularda yapılan çalışmaların bazılarına aşağıda yer verilmiştir.

S.P. Evans ve ark.: rüzgâr türbini kanatlarının yorulma açısından kritik olduğunu ve büyük rüzgâr türbini kanatlarının yorgunluk yüklemesini değerlendirmek için birçok literatür ve metodoloji mevcut olduğunu belirtmiştir. Ayrıca daha yüksek dönüş hızlarında çalışan ve oldukça kararsız aerodinamik yüklemeye maruz kalan küçük rüzgâr türbinlerinin yorgunluk ömrünü değerlendirmek için IEC 61400.2'de önerilen basitleştirilmiş yük modeli, 5 kW'lık küçük bir rüzgâr türbini kanadının yorulma ömrünü belirlemek için kullanılmıştır. IEC 61400.2 standartlarda küçük rüzgâr türbinlerinin tanımlanması için kullanılmıştır. Kanat yorgunluk ömrünü belirlemek için en iyi uygulamayı arayan küçük rüzgâr türbini geliştiricileri için bu araştırmanın sonuçları önemlidir. Bu çalışmada IEC metodolojisinin eksiklikleri detaylandırılmış ve tartışılmıştır[74].

A.I. Idriss ve ark.: Weibull parametrelerini kullanarak 10 m yükseklikte rüzgâr enerjisinde toplanan 5 yıllık (2014-2018) rüzgâr hızı verilerini kullanarak Cibuti kentindeki rüzgâr enerjisi potansiyelini ilk kez incelemiştir. İstatistiksel rüzgâr hızı, rüzgârgülü ve güç yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu çalışma aynı zamanda farklı yükseklikteki alanlarda 1–25 kW'lık beş adet MRT uygulama projesinin bir parçasıdır. Rüzgâr enerjisi üretiminin analizine göre, Cibuti şehrinin verimli hasat için 30,5 m'den daha yüksek göbek yüksekliğine sahip rüzgâr türbinlerini kurması gerekiyor[75].

J. Leary ve ark.: KRT'ler için düşük güneş kaynağı zamanlarında (gece, muson mevsimi, kış vb.) enerji üretme potansiyeli sunabilir ve üretilebilecek toplam enerji sistemi oranını arttırabilir demiştir. Araştırmacılar, Rüzgâr Güçlendirme Piyasası Değerlendirme Metodolojisi'nin (WEMAM) geliştirilmesini, mevcut pazar değerlendirme metodolojilerinin eleştirel bir incelemesiyle bilgilendirmeyi amaçlamış ve ayrıntılı bir pazar analizi yapmıştır. WEMAM'ı bileşen parçalarına ayırarak, bugüne

kadar ki pratik uygulamaları üzerine düşünerek ve literatürden elde edilen bilgilerden yararlanarak, gelişmeye devam edebileceği fırsatlar I.-II. ve III. numaralı aşamalarla vurgulanmıştır[76].

A. Messineo ve ark.: küçük bir rüzgâr türbininin enerji üretiminin birçok tasarım ve bağlam parametresine (rüzgâr profilleri, kurulum yüksekliği, arazi kullanımı, türbinin özellikleri) göre ne kadar değişken olabileceğini göstermiştir. Piyasadaki küçük türbinler genel olarak, sabit kanatlara sahip ve eğim ya da sapma için düzenlenirken, biraz daha büyük boyut genellikle eğim kontrolü için kontrol sistemleri ile donatılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada, altı sınıfa (sınıf 0.5 ÷ 1.8 kW, sınıf 2 ÷ 3.5 kW, sınıf 5 ÷ 6 kW, sınıf 10 ÷ 12.5 kW, sınıf 15 ÷ 17.5 kW ve sınıf 20 ÷ 25 kW) bölünmüş bir dizi RT analiz edilmiştir. Küçük sistemlerin, yayılmaları finansman ve devlet teşvikleriyle yakından ilgiliydi ve İtalyan yasama çerçevesi, yeni bir potansiyel pazar olarak kentsel alanlara izin vermekteydi. Bu araştırma ile desteklenmiştir[77].

H. Soleimanzad ve ark.: sadece hibrit sistemden rüzgâr dönüşümü kısmı ile ilgilenmiştir. Rüzgâr türbinlerinde gücü tatmin etmedeki önemli ilerlemeleri nedeniyle kontrol stratejisine odaklanmayı sürdürmek için, dinamik çıkış kontrol kanunu, voltajda yeterli hassaslığın yanı sıra özellikle geçici alanda belirli bir performans seviyesini garanti edebilecek şekilde geliştirilmiştir. Çıktı geri beslemeli stabilize edici tasarlanmış kontrolör için yeterli koşullar, doğrusal matris eşitsizliğine (LMI) yönelik çözümler açısından verilmiştir. Önerilen kontrol stratejisinin fizibilitesini görselleştirmek için sayısal çizimler ve bazı simülasyon sonuçları sunulmuştur[78].

B. Greening ve ark.: İngiltere'deki mikro rüzgâr türbinlerinin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliğini şebeke elektriği ve güneş PV (fotovoltaikler) ile karşılaştırarak değerlendirmiştir. Araştırmacılar, MRT tasarım parametreleri ve çalışma prensibini (tasarım, kurulum, hizmet ve bakım süreçleri) detaylandırmıştır. Daha sonra bazı çevresel etkiler (abiyotik tükenme ve küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon ve ötrofikasyon potansiyeli, tatlı su sucul ekotoksiste potansiyeli deniz

suyu ekotoksiste potansiyeli, ozon tükenme ve fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyeli...) incelemiştir. Rüzgâr türbininin % 7,5 daha düşük ötrofikasyondan % 85 daha düşük ozon tabakası incelmeye kadar değişen 11 çevre kategorisinin yedisinde PV'den daha çevresel olarak sürdürülebilir olduğunu göstermiştir[79].

D. Zammit ve ark.: MRT'leri, 100kW'ı geçmeyen türbinler olarak tanımlamıştır. DC mikro şebekeler, daha düşük dönüşüm kayıpları (daha az DC'den AC'ye veya tam tersi dönüşümler), senkronizasyon yok, faz veya frekans sorunları (AC mikro şebekelerinde mevcut), voltaj düşüşlerinden ve diğer güçlerden etkilenmez ana (AC) elektrik şebekesinde ortaya çıkabilecek kalite sorunları gibi bir dizi avantaj ile ele alınmıştır. Araştırmacılar, şebekeye bağlı operasyon altında bir DC mikro şebekeye bağlı bir MRT için maksimum güç çıkışı elde etmeyi amaçlayan bir başarılı sonuçlanan bir MPPT algoritması sunmuştur [80].

A. Sedaghat ve ark.: açık jet rüzgâr tüneli testi, araştırmacılar ve küçük rüzgâr türbini geliştiricileri için pahalı çevrimiçi rüzgâr gücü ölçümlerine alternatif bir çözüm sağlamayı amaçlamıştır. Ayrıca, yüksek Reynolds sayısı ve büyük çaplı jet akışları için bilgi eksikliği de gözden geçirilmiştir. Teoriler ve deneysel korelasyonlar, tam gelişmiş türbülanslı jetler hakkındaki anlayışı genişletmek için birleştirilmiştir. Küçük rüzgâr türbinlerinin ürettiği güçteki karşılık gelen azalma açıklanmış ve jetlerin doğru rüzgâr gücünü hesaplamak için analitik ilişkiler türetilmiştir. Jet çapı, rüzgâr türbininin jet nozulundan uzaklığı ve rüzgâr türbini göbeği çapı gibi küçük bir rüzgâr türbininin güç üretimi üzerine çeşitli parametrelerin etkileri araştırılmış ve sonuçlar tartışılmış ve daha fazla analiz önerilmiştir[81].

S. Chandrasekaran ve ark.: piezoelektrik ve triboelektrik etkilere dayanan mikro ve nano ölçekli jeneratörlerin enerji hasadındaki son gelişmelerine odaklanmıştır. Çeşitli enerji hasadı uygulamaları için esnek ve hibrit cihazların geliştirilmesi sistematik olarak gözden geçirilmiş ve cihazların performansını belirleyen önemli parametrelerin temel anlayışı önemli görülmüştür. Bu nedenle, son zamanlarda bildirilen hibrit cihazların yanında, piezoelektrik ve triboelektrik cihazlar ile

nanojeneratörlerin üretim yöntemlerini ve uygulamaları sunulmuştur. Ayrıca ticari sistemlerin gerçekleştirilebilmesi için cihazın performansını artırmaya yönelik bazı önemli perspektifler ve zorluklar ayrıntılı olarak tartışılmıştır[82].

B. Kosasih ve ark.: çıplak mikro rüzgâr türbini ve difüzörle güçlendirilmiş mikro rüzgâr türbini modellerinin farklı düzeylerde türbülans yoğunluklarına maruz kalan performanslarını rapor etmişlerdir. Düşük türbülanslı rüzgâra tabi olarak, difüzör takviyeli rüzgâr türbini, hem CFD (Computational Fluid Dynamics) simülasyonunda hem de deneyde 0.11 C_p 'ye sahip çıplak bir rüzgâr türbininkinden yaklaşık iki kat daha büyük olan 0.22'lik C_p gösterir, ancak her birinde optimum uç hızı oranının biraz farklı olduğu görülmüştür. Böylelikle bir difüzörün güçlendirilmesinin rüzgâr türbininin performansını artırma açısından faydalı olduğu kanıtlanmıştır[83].

J. Mazon ve ark.: Llobregat Deltası'nda rüzgâr hızı dağılımlarını tüm yıl için hesaplamıştır. Dağıtımlara takılan Weibull olasılık yoğunluğu işlevleri, şebekeden bağımsız IT-PE-100 ve HP-600W küçük rüzgâr türbinleri ile üretilen rüzgâr enerjisi değerlendirilmiştir. FAST ve AeroDyn simülasyon araçlarından elde edilen sonuçlar, ölçülen rüzgâr hızlarının üreticinin güç eğrilerine uygulanmasıyla elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. IT-PE-100 tüm yıl boyunca 132 kWh sunacaktır (deniz meltemi döneminde 70 kWh). Simülasyonlardan, IT-PE-100 tüm yıl boyunca 155 kWh (deniz meltemi döneminde 80 kWh) sunacağı bildirilmiştir. Llobregat Deltası'nda yollar, patikalar ve 20 km uzunluğundaki sahil şeridinin yanı sıra aydınlatma sistemlerine entegre bir dizi küçük rüzgâr türbinin kurulabileceği ve üretilen enerji ile akiferden su çıkarmak, aydınlatma sistemlerini veya elektrikli pompaları beslemek gibi birçok amaç için kullanılabileceği vurgulanmıştır[84].

O. Rodriguez ve ark.: rüzgâr türbini, küresel ısınmanın azaltılmasına katkıda bulunmak için temiz bir enerji alternatifi olarak sunulmuştur. Bir rüzgâr enerjisi projesinin ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek için rüzgâr hızları çok önemlidir. Kaynak değerlendirmesinde kullanılan örnekleme tekniği, minimum dağılımın ortalama 0.1 ile 2 saat arasında gerçekleştiği sonucuna varan Van der Hoven'ın

çalışmasıyla desteklenmiştir. Farklı ortalama sürelerin veri dağılımı ve rüzgâr kaynağı değerlendirmesi üzerindeki etkisini analiz ediyor ve güvenilir kaynak değerlendirmelerinin geliştirilmesine katkıda bulunan küçük rüzgâr türbini uygulamaları için yeterli ortalama süresi analiz edilmiştir. Türbinin başlangıç rüzgâr hızı ve tepki süresinin önemi vurgulanmıştır[85].

Z. Simic ve ark.: kurulu gücü 10 kW'tan az olan küçük rüzgâr türbinlerinin güç eğrilerini karşılaştırmış ve analiz etmiştir. Ayrıca, Hırvatistan'daki bir lokasyonda ölçülen çok yıllık bir veri dizisi kullanılarak, hepsi için olası elektrik üretimi farklı güç eğrileri, eş kutup yükseklikleri ve rüzgâr karakteristikleriyle değerlendirmiştir. Güç eğrisinin şeklinin, taranan alana göre türbin anma gücü ile birlikte toplam elektrik üretimi ve üretilen gelir üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve tartışılmıştır. Sonuçlar, hem potansiyel elektrik üretimi hem de elektrik maliyeti açısından beklenenden çok daha geniş aralıkları göstermiş ve rüzgâr gücü eğrisi ve nominal güce göre taranan alanın öncelikle dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır[86].

J. Bukala ve ark.: küçük bir rüzgâr türbininin verimliliğini ve güç çıkışını etkileyen en önemli parametreleri kısaca formüle etmiş ve açıklamıştır. Enerji üretimi tahmini için Weibull veya Rayleigh olasılık dağılımını kullanarak, enerji çıktısı tahmini için geçerli bir yaklaşım kabul etmiş ve bu işlevlerin şeklini tanımlayan parametrelerin evrensel olmadığını not etmiştir. Türbin aerodinamiğindeki ve genel verimdeki büyük bir artışın bile, artan kule yüksekliği kadar ek güç sağlamayacağı gösterilmiştir. Rotorun aerodinamik optimizasyonu, gelişmiş, hafif malzemelerin kullanımı vb. türbinlerin çalışması ve güç çıkışında olumlu bir sonuç doğuracağı, ancak bu tür çözümlerin artan maliyetleri şüphesiz aynı veya daha uzun amorti sürelerine neden olacağı bildirilmiştir[87].

J. Taylor ve ark.: küçük rüzgâr tesislerinden gelen gürültü ölçümlerini bireysel kişilik özelliklerinin ve gürültü algısının etkisine ilişkin bir araştırma ile ilişkilendiren disiplinlerarası araştırmalardan elde edilen bulguları sunmaktadır. Rüzgâr türbinlerine karşı tutumun gürültü algısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve gürültü algılamasının semptom raporlamasında önemli bir etkiye sahip olduğu da

gösterilmiştir. Küçük ve mikro türbin türleri için anket verilerinden en çok bildirilen sesler fişkırtıyor, uğultu ve ısıklık ancak 5 kW ve üzeri türbin türü düşük frekans, sesleri ısıklıktan daha fazla etki rapor edilmiştir[88].

R. Lanza fame ve ark.: bir dizi rüzgâr tüneli testi (rotor dinamiği ve başlatma hızı) için bir mikro rüzgâr türbini tasarlamıştır. Tasarımı, Blade Element Momentum (BEM) teorisine dayanan, yazarlar tarafından geliştirilen orijinal bir sayısal koddan kaynaklanıyor. Rotor performansını boyutlandırmadan ve değerlendirmeden önce, tasarım parametreleri ve kısıtlamaları tanımlanmıştır. Tasarım parametreleri ile ilgili olarak, proje rüzgâr hızı, rotor kanatlarının sayısı, aerodinamik kanat profili (tüm kanat boyunca sabit) ve dönüş hızı ayarlanmıştır. İlk analiz, yüksek güç katsayılarına rağmen, merkezi rüzgâr hızları aralığındaki gücün önemli ölçüde düştüğünü ve rotorların kısmi veya kontrollü durmasıyla güç regülasyonunu kısıtladığını ortaya çıkarmıştır[89].

F. Calise ve ark.: Bina entegre fotovoltaik (BIPV) toplayıcıları ve bina entegre hibrit fotovoltaik-termal (BIPVT) toplayıcıları inşa edilen iki farklı binada entegre güneş teknolojisinin dinamik bir simülasyonunu ve enerji ve ekonomik analizini sunmuşlardır. Her iki sistem de, güneş sistemlerine özgü enerji üretimindeki dalgalanmaları azaltmak için küçük boyutlu rüzgâr türbinleri (WT'ler) ile birleştirilmiştir. Genel olarak sonuçlar, güneş ve rüzgâr teknolojilerinin entegrasyonunun, çoğu yenilenebilir tabanlı sisteme özgü elektrik ve termal enerji üretimindeki dalgalanmaları azaltmak için yararlı olabileceğini göstermektedir. Parametrik analiz, sistemlerin enerji ve ekonomik performansının rüzgâr türbinlerinin sayısı ve boyutundan oldukça etkilendiğini göstermiştir[90].

K. M. Sunderland ve ark.: mikro rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri tarafından üretilen elektrik birimi başına ilgili maliyetleri, bu tür sistemler için potansiyel ve finansal uygulanabilirliği üç konum çalışması ile kentsel ve kırsal konum için tartışmıştır. LCOE (Seviyelendirilmiş enerji maliyeti) analizleri, ekonomik teşvik uygulamasına ilişkin karar vermede veya uygun tarife garantilerinin belirlenmesinde

geçerli olan bağlamsal bir uygulanabilirlik değerlendirmesi sunmuştur. Ayrıca, düşük ortalama rüzgâr hızlarına ve küçük rüzgâr üretim sistemleri için sunulan lojistik zorluklara rağmen, şehirler içinde giderek daha merkezileşen küresel nüfus ile bu tür tesislerin ticari olarak uygulanabilir hale getirilmesi için minimum gereksinimleri belirleme çabalarının araştırılması gerektiği vurgulanmıştır[91].

Anup KC ve ark.: iki konumdan seçilen rüzgâr koşulları, türbinin performansını ve yükünü araştırmak için aeroelastik kodu FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) kullanarak 5 kW'lık bir YERT'nin çalışmasını ve yüklenmesini IEC 61400-2 standardındaki normal türbülans modeli (NTM) ile karşılaştırdılar. IEC standardının, KRT'lerin kentsel konumlandırması için yetersiz görüldüğünü ve türbülanslı alanlarda daha güvenilir dağıtım için değişiklik gerektirdiğini gözlemlediler. IEC rüzgâr durumlarına kıyasla, tipik rüzgâr durumları için rotor gücünde % 17, % 25 ve % 19 artış gözlenirken, tipik olmayan durumlar seçilen üç rüzgâr hızı silosunda sırasıyla % 122, % 30 ve % 10 artış sağlamıştır[92].

F. Trivellato ve ark.: türbülanslı saha verilerinden sabit hız, pasif durma, küçük yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin ideal güç eğrisini değerlendirmeyi amaçlamıştır. İdeal güç eğrisi, ideal koşulları ifade eder (örneğin, rüzgâr sabit, laminar, mekansal olarak tek tiptir ve türbin tarafından rahatsız edilmemiştir; sapma hatası yoktur; güç çıkışı sabit durumda amaçlanmıştır). Oldukça türbülanslı bir sahada 12 kW'lık sabit hızlı bir rüzgâr türbini iki yıl boyunca izlenmiştir. Türbülanslı alan verilerinden ideal güç eğrisini elde etmek için analitik bir yöntemin türetilmesi amaçlanmış ve üretici güç eğrisinin ve IEC bazlı güç eğrisinin, sahanın türbülansından kaçınılmaz olarak etkilendiği vurgulanmıştır. Araştırmada üretilen analitik formülasyonun geçerlilik aralığı sınırlandırılmıştır ancak diğer türbinler için genişletilebilirliğini anlama konusundaki ilgi belirtilmiştir[93].

M. Awadallah ve ark.: bıçağın frekans (salınım) zirvelerindeki spektral kaymaları kullanarak çatlak konumunu tahmin etmek için özel bir Kriging modeli geliştirdi. Kriging modelini oluşturmak için bıçakların bilinen çatlak konumları için toplanan

spektral kaymalarının kayıtları kullanılmıştır. Kriging model, kırık kanadın spektral kaymalarını, bilinen çatlak konumlarıyla kanatlardan kaydedilen spektral kaymalarla ilişkilendirerek çatlak konumunu tahmin etmeye yardımcı olur. Deneysel doğrulama ile araştırmacılar, yöntemin mikro çatlak konumlarını % 95 doğrulukla tespit etme yeteneğini göstermiştir. Küçük bir 400 W YERT, 600 mm türbin kanadında çatlak derinliği ve kanat açıklığının sırasıyla %1,66 ve %0,01'i genişliğinde çatlak konumu tespiti için bir yöntem sundu[94].

S. Nojavan ve ark.: talep yanıt programı (TYP) ve enerji depolama sisteminin (EDS) etkilerini dikkate alan çoklu enerji tedarik kaynaklarına (ETK) sahip büyük elektrik tüketicisi (BET) için stokastik bir enerji tedarik problemi (SETP) önermiştir. ETK'ler enerji piyasası (EP), ikili sözleşmeler (İK'ler), mikro türbinler (MT'ler) ve yenilenebilir enerji kaynakları, RES'ler içerir. EDS ve TYP, beklenen enerji tedarik maliyetini (BETM) azaltmak için BET'in karar vericisi tarafından SETP'ye dahil edilir. Bu arada, SETP formülasyonunda piyasa fiyatı, yük ve RES çıktı gücünün belirsizlik modelleri dikkate alınmıştır. PV sistemlerinin piyasa fiyatı, yükü, sıcaklığı ve radyasyon tahmin hatası, ilgili senaryoları oluşturmak için normal dağılım kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, Weibull dağılımı, WT çıktı gücü belirsizlik modellemesi için değişken rüzgâr hızı senaryoları oluşturmak için kullanılmıştır. Ayrıca, senaryoların azaltılması için Kantorovich mesafe yaklaşımına dayalı hızlı ileri seçimi kullanılmıştır. Son olarak, EDS ve TYP'nin BETM üzerindeki etkileri araştırılmış ve öneri en SETP'nin kapasitesini göstermek için dört vaka çalışması kullanılmıştır[95].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Yeni Tasarım Mikro Rüzgâr Türbini

Çalışmanın başlangıcında rüzgâr enerjisi ve dezavantajlarına çözüm oluşturacağı planlanan klasik rüzgâr türbinleri incelenmiştir. Daha sonra farklı model mikro rüzgâr türbinleri ile devam edilmiştir. Tez çalışmasının temel çıkış noktası farklı model mikro rüzgâr türbinlerinin incelenmesidir. Mikro rüzgâr türbinleri ise İtalyan mucit Gambarota'nın icadından sonra çeşitli çalışmalar ile farklı araştırmacı ve bilim insanı tarafından çeşitli tasarım ve çalışmalarla devam ettirilmiştir. Farklı model mikro rüzgâr türbinleri ile eksen konumu (dikey veya yatay) olmak üzere kanat sayısı, türbin merkezinin lokasyonu ve yerden yüksekliği, jeneratör sistemine göre (dişli kutusu bulunduran-dişli kutusu bulundurmayan) gibi sınıflandırılmakla beraber genel olarak düşük rüzgâr hızlarına tepki gösterecek şekilde tasarlanmıştır.

Dünya üzerinde rüzgâr enerjisinden faydalanmak amacıyla tarih boyunca çeşitli rüzgâr türbini tasarımları ve uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr türbinleri de tıpkı telefonlar ve hatta bilgisayarlar gibi icatlarının ilk zamanlarında devasa boyutlarda üretilmiştir. İlk zamanlarda yine tıpkı telefonlar ve bilgisayarlar gibi sadece belirli amaçlar için kullanılmış ve günümüzde portatif olarak taşınabilecek boyutlara kadar indirgenmiştir.

Araştırma konusunun temel amacı klasik rüzgâr türbinlerinde ki ebatlar ve çalışması için gerekli olan yüksek rüzgâr hızları ile belli başlı dezavantajlarının giderilmesidir. Tüm bunların yanı sıra rüzgâr enerjisinin kullanım alanlarını genişleterek gündelik hayatta hatta çatı balkon, park ve bahçe gibi alanlarda rüzgâr enerjisinin kullanımına bir ön çalışma sunmak ve olumlu sonuçlar alınırsa MRT teknolojisini yaygınlaştırmaktır.

Bu yaygınlaşmanın yeni tasarım bir MRT ile yapılması planlanmıştır. Bu tasarımı oluştururken mühendislik bilgi birikimi ve deneyimlerimizin bir araya getirilmesi ile türbin tasarımını etkileyen parametreler ve MRT üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi ile sonuçlandırılacaktır.

5.2. Yeni Tasarım Mikro Rüzgâr Türbini Tasarımı

Konunun ehemmiyeti yıllar içinde gözle görülür bir farkla artmıştır. Bu bağlamda türbin tasarımında ki ilgili parametreler ve türbin üzerinde ne gibi etkileri olduğu çeşitli işlem basamakları ile araştırmanın ana hatları oluşturulmuştur. Bu basamaklar aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir;

- ✓ Literatür taraması ve planlama süreci
- ✓ Bilgisayar destekli katı modelleme
- ✓ Hesaplar ve simülasyon
 - 200 mm çaplı türbin simülasyonları ve veri analizi
 - 300 mm çaplı türbin simülasyonları ve veri analizi
 - 400 mm çaplı türbin simülasyonları ve veri analizi

5.2.1. Literatür Taraması ve Planlama Süreci

Rüzgâr enerjisi ile ilgili çalışmalar farklı zamanlarda ve farklı bilim insanları tarafından gerçekleştirilmiştir. Kaliteli bir bilimsel araştırmanın hazırlık ve planlama sürecinin temeli doğru bir literatür taraması ile başlamalıdır. MRT teknolojisinin mucidi Gambarota'nın icadından sonra günümüze kadar konu ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır[44]. Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda MRT teknolojisinin geçerliliği araştırılmıştır.

MRT teknolojisinin rüzgâr enerjisindeki dezavantajları ortadan kaldırdığı ve birçok avantajı beraberinde getirdiği ilgili başlık altında verilmiştir. Daha sonra MRT teknolojisi belirli bir çerçeve doğrultusunda sınıflandırılmıştır. Mevcut araştırmada sunulan sınıflandırma da MRT teknolojisi için yeni bir başlangıç sayılabilir ve bundan sonraki araştırmalara bir referans olabilir.

MRT teknolojisinin sınıflandırıldığı başlık altında konu ile alakalı parametrelerin belirlenmesi ve incelenmesine yardımcı olmuştur. Belirlenen parametrelerin türbin tasarımında kullanım alanına göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Bu parametreler türbine mekanik hareketi sağlayan akışkan tipi (su, hava vb.), tasarımı yapılan türbinin kullanım alanı ve amacı, kullanılması planlanan mevcut konumun özellikleri gibi etkiler ile değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

Literatür taraması ve planlama sürecinde araştırmanın konusu ışığında tasarımı doğrudan etkileyen parametreler rüzgâr hızı, türbin çapı ve kanat sayısı olarak 3 parametre ile genelleştirilmiştir. Diğer parametreler bu alt başlıklar altında incelenmiştir. Belirlenen parametreler değişken olup etkileyen diğer parametreler (ortam, türbin yüzeyi, türbin kalınlığı ve genişliği, kanat genişliği, sıcaklık, basınç vb.) sabit olarak belirlenmiştir. Sabit ve değişken olmak üzere iki grupta incelenen parametrelerin bilgisayar destekli katı modelleme sürecinde netleştirilmesi planlanmıştır.

İncelenen ilk parametre devasa kanat boyutlarına sahip klasik rüzgâr türbinlerine oranla daha küçük boyutlara sahip olan kanat uzunlukları yani türbin çapının belirlenmesi olmuştur. Yapılan literatür taraması sonunda mevcut çalışmaların sonuçları ve araştırmanın konusu doğrultusunda 200, 300 ve 400 mm ile 3 değişkenle sınırlandırılmıştır. Ancak MRT kanat çapı ile alakalı hala kesin bir sonuca varılamamıştır.

Belirlenen ikinci değişken ise kanat sayısı olmuştur. Kanat sayısı ile alakalı yapılan araştırmalar ile klasik rüzgâr türbinlerinde en verimli değere üç kanat ile ulaşılmıştır. Günümüzde hala klasik rüzgâr türbinleri üç kanatlı imal edilmektedir. Araştırmanın niteliğine uygun olarak kanat sayısı değişken parametre olarak seçilmiştir. Kanat sayısı 6, 9 ve 12 adet ile değişken parametre olarak seçilmiştir. Bu değerler mevcut mühendislik bilgilerimiz ve literatür taramasının kombinasyonu ile belirlenmiştir.

MRT teknolojisinde kanat sayısı ile ilgili yapılan çalışmalar da kanat profili, çeşitli açı değerleri (hücum, bükülme ve kök açıları) olmuştur. Kanat açı değerleri tasarımı etkileyen önemli birer parametre olarak belirlenmiş ve daha önce yapılmış çalışmalarda detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ancak sabit parametre kabul edilmesinde herhangi bir problem görülmemiştir.

Türbin tasarım parametreleri incelendikten sonra MRT'lerin modül oluşturmaları için verimli güç aktarım sistemi olan dişli çark sistemi ile dış çeperinin donatılması planlanmıştır. Bilgisayar destekli katı modelleme sürecinin ilk aşamasında belirlenerek sonrasında tasarlanan türbine uyarlanması modül bütünlüğünün sağlıklı sonuç vermesi için uygun görülmüştür. Bu aşamada dişli çark sistemleri ve formülleri

incelenmiştir[96]. Detaylı bilgiler ve kullanılan değerlerin bilgisayar destekli katı modelleme aşamasında verilmesi planlanmıştır.

Literatür taraması ve planlama sürecinin son kademesinde sonraki aşamaların adımları belirlenmiştir. Katı modelleme programı olarak Solidworks yazılımının kullanılması uygun görülmüştür. Bilgisayar destekli katı modelleme aşamasında kullanılacak olan programın ve programa uygun olarak gerekli tasarım parametreleri ve öncelikleri belirlenmiştir. Gerekli bilgiler ve ilgili parametreler hazırlık ve planlama sürecinde belirlenmiş olup gerekli bilgilerin detayları ilgili başlık altında verilecektir. Katı modelleme aşamasında 3 boyutlu olarak tasarlanacak türbin çizimleri 200, 300 ve 400 mm başlıklar altında, simülasyon sonuçları ile beraber değerlendirilmesi planlanmıştır.

Simülasyon programı olarak Solidworks Flow Simulation uygulamasının kullanılacaktır. Simulation uygulamasında bilgisayar destekli katı modelleme programında çizimleri tamamlanan türbinlerin, simülasyonu için gerekli parametreler ve programdan beklenen sonuçlar belirlenerek detaylı bilgilerin ilgili başlık altında verilmesi planlanmıştır.

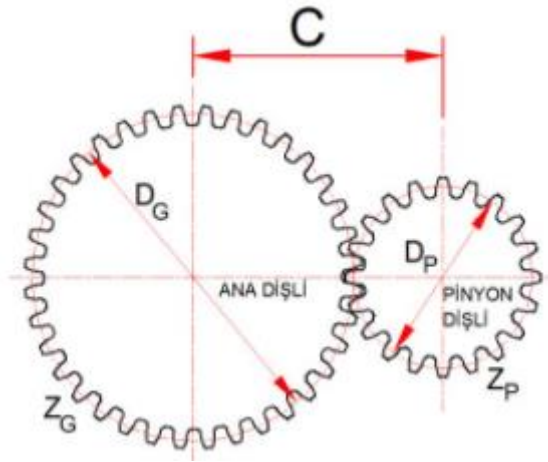
Planlama sürecinin son aşamasında geline son noktada bilgisayar destekli katı modelleme ve simülasyon sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ile beraber veri analizinde kullanılacak bazı sayısal verilerin (formüller) simülasyon sonuçlarına göre hesaplanması planlanmıştır. Bu aşama hesaplar ve simülasyon başlığı ile tanımlanmıştır. Bu aşamada ilk olarak en verimli türbini belirlemek amacıyla türbin çaplarına göre analiz yapılması planlanmıştır. Alt başlıklar altında türbin çaplarına göre sırasıyla 200, 300 ve 400 mm türbinlerin tüm sonuçlarının incelenmesine karar verilmiştir. Mevcut belirlenen verilerin çizelge ve çizgi grafik yöntemiyle kıyaslamalı olarak analiz edilmesi planlanmıştır. Planlama sürecinin tamamlanmasıyla bilgisayar destekli katı modelleme aşamasına geçilmiştir.

5.2.2. Bilgisayar Destekli Katı Modelleme

Bu aşama türbinin bilgisayar destekli katı modelleme programı olan Solidworks yardımıyla kanat profili ve türbinlerin üç boyutlu tasarlandığı adımdır. Solidworks programında başlangıç adımı olarak türbinin içten dışa doğru tasarlanması uygun görülmüştür.

Kanat tasarımının belirlenmesinde ilk olarak 200 mm türbin seçilmiştir. Tasarımın en sağlıklı sonucu vermesi için asgari değerlere sahip olan türbine göre belirlenmesi modelleme adımında 300 ve 400 mm için azami değerlerin belirlenebileceği düşünülmektedir.

Türbin tasarımına hangi türbin ve hangi noktadan başlanacağını belirlenmesinin hemen ardından modül bütünlüğünü sağlayacak olan türbinin dış çeperinde yer alan birleştirmede kullanılacak planlama aşamasında belirlenen dişlilerin nitelikleri belirlenmiştir. Harici bir birleştirme yöntemi olmayan, türbin iskeleti ile bütün halde tasarlanması planlanan mevcut dişli terminolojisi detaylıca incelenmiştir. Dişli tanımlamasının yapılabilmesi ve anlaşılabilmesi için öncelikle ilgili bölgelerin tanımları bilinmelidir. Mevcut konu ile ilgili makine elemanları başlığı altında incelenen dişli terminolojisi incelenmiştir[96]. Dişli hesaplaması örnek olarak 200 mm çapında türbin için detaylı bir şekilde incelenmiştir. 300 ve 400 mm türbinler için aynı hesaplamalar yapılmış ve sayısal değerleri belirtilmiştir.



Şekil 5.1 Ana dişli ve pinyon dişli [96]

Şekil 5.1’de belirtilen tanımlar,

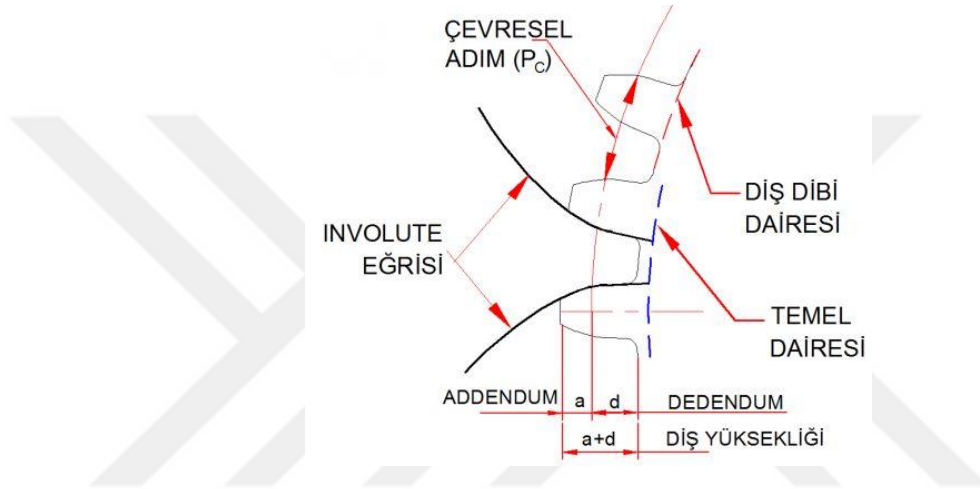
Ana dişli (ZG); bir dişli çiftinde diş sayısı daha fazla olan dişlidir.

Pinyon dişli (ZP); bir dişli çiftinde diş sayısı daha az olan dişlidir.

Bölüm dairesi çapı (D_P, D_G); çalışan dişli çiftinin birbirine kuvvet ve hareket aktarımında bulunduğu çaptır.

Eksenler arası mesafe (C): Ana dişli merkezi ile pinyon dişli merkezi arasındaki uzaklıktır.

Ana dişli diş sayısı tam sayı olmak zorundadır. Belli periyotlarda aynı dişlerin birbirine temasını önlemek için eğer pinyon dişli diş sayısı tek ise ana dişli diş sayısı çift sayı, (veya tam tersi) olmalıdır. Özellikle pinyon dişlilerde diş sayısının belli bir sayının altına düşmesi dişlilerde girişim ihtimalini arttırmaktadır. Tüm dişli hesapları bölüm dairesi çapı üzerine temellendirilir[96].



Şekil 5.2 Dişli bölgesi tanımları [96]

Şekil 5.2’de belirtilen tanımlar,

Taban dairesi (Base circle); diş profilini oluşturan involute eğrisinin başladığı çaptır. Bu çap belli bir diş sayısının altında iken diş dibi çapından büyük, diş sayısı büyük ise diş dibi çapından küçüktür.

Involute; diş profilini oluşturan eğridir.

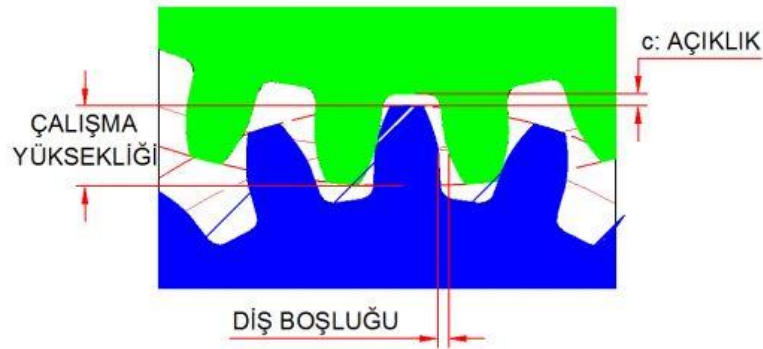
Diş dibi dairesi; diş dibinden geçen dairedir.

Çevresel adım (PC) (Circular pitch); bölüm dairesi üzerinden ölçülen çevresel adımdır.

Addendum (a); bölüm dairesi çapından dişli tepesine kadar olan radyal uzunluktur.

Dedendum (d); bölüm dairesi çapından diş dibi çapına kadar olan radyal uzunluktur.

Diş yüksekliği; addendum ile dedendumun toplamıdır (a+d) [96].



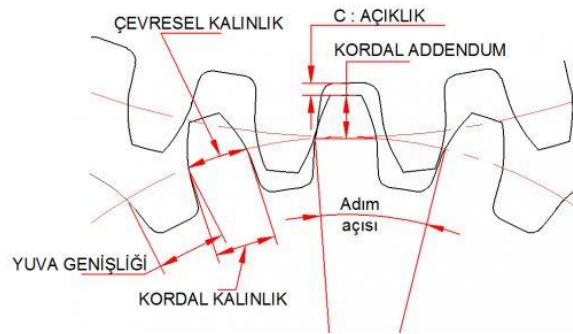
Şekil 5.3 Dişli birleşiminde tanımlar (sabit) [96]

Şekil 5.3'te belirtilen tanımlar,

Çalışma yüksekliği; dişli çiftinde bir dişin addendumu ile öteki dişin addendumunun toplamıdır. Bir dişlide addendum dedendumdan daha kısa olduğu için çalışma yüksekliği diş yüksekliğinden her zaman daha azdır.

Açıklık (c) (Clearance); dişli çiftinde bir dişin tepesi ile ötekinin diş dişi arasında kalan boşluktur. ($c = \text{diş yüksekliği} - \text{çalışma yüksekliği} \Rightarrow c = d - a$)

Diş boşluğu (Backlash); diş yuvada diğerine dokunduğunda arkasında kalan boşluktur[96].



Şekil 5.4 Dişli birleşiminde tanımlar (hareket anında) [96]

Şekil 5.4'te belirtilen tanımlar,

Adım açısı; çevresel adım yayını gören açıdır.

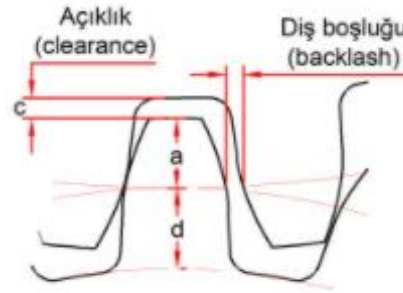
Çevresel kalınlık; bölüm dairesi üzerinde ölçülen çevresel diş kalınlığıdır.

Kordal kalınlık; bölüm dairesi üzerinde ölçülen çizgisel diş kalınlığıdır.

Kordal addendum; kordal kalınlık çizgisi ile diş tepesi arasındaki yüksekliktir.

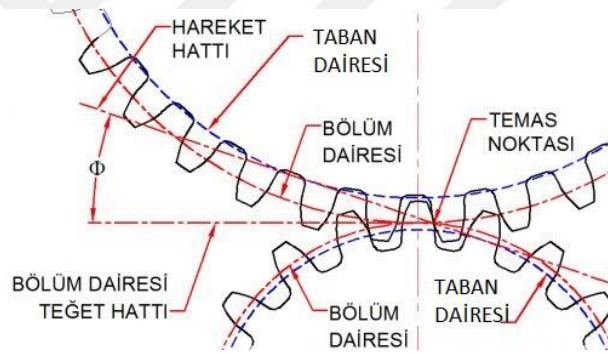
Diş yuva genişliği; bölüm dairesi üzerindeki diş boşluğunun genişliğidir.

Şekil 5.5'te ana dişli ve piyon dişlilerin birbirine geçmesi sırasında açıklık ve diş boşluğunun oluşturduğu alanlar gösterilmiştir [96].



Şekil 5.5 Açıklık ve diş boşluğu [96]

Şekil 5.6’da belirtilen hareket hattı, temas noktasından geçen ve her iki taban dairesine teğet olan çizgidir. Yani dişli çiftlerinin dönme sırasında birbirine temas eden noktaları bu hattı izlediği çizgi doğrultusudur[96].



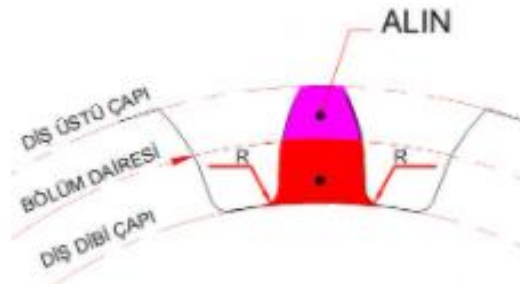
Şekil 5.6 Hareket hattı [96]

Dişli hesap ve tanımlamalarla ilgili önem arz eden diğer bir tanımlama da modüldür. Bölüm dairesi çapının diş sayısına bölünmesi ile ortaya çıkan değere modül denir. Dişli imalatında diş profilini sağlayan bıçakların sonsuz bir varyasyonu olamayacağı için kullanılacak bıçakların seçimi açısından bu değerler standart modül tablosu kullanılarak seçilir. Bu değer dişli dizaynındaki en önemli parametrelerden birisidir. Modül birimi mm’dir. Çap adımı (P_d) Amerikan Dişli Üreticileri Birliği (AGMA) standartlarında kullanılan ve metrik sistemdeki modül parametresinin yerine kullanılan değerdir. Bölüm dairesi çapının her bir inch’lik bölümüne düşen diş sayısını gösterir. Modül gibi bu değerde standart P_d tablosu kullanılarak seçilir. Birimi (1/inch)dir. Aşağıda çizelge 5.1’de ince diştten kalına standart dişli modül ve P_d değerleri verilmiştir. Bu çizelge de sarı boyalı olan standartlar tercih edilmelidir.

Çizelge 5.1 İnceden kalına standart dişli modül ve Pd değerleri [97]

İNCEDEN KALINA STANDART DIŞLI MODÜL VE Pd DEĞERLERİ					
1. SÜTUN		2. SÜTUN		3. SÜTUN	
M (mm)	Pd(1/inch)	M (mm)	Pd(1/inch)	M (mm)	Pd(1/inch)
	200	2,00		10,00	
	150		12		2,5
0,20		2,25		11,00	
	120		11		2,25
	96	2,50		12,00	
0,30			10		2
	80	2,75		14,00	
	72		9	16,00	
	64	3,00			1,5
0,40			8	18,00	
0,50		3,25		20,00	
	48	3,50		22,00	
0,60			7	24,00	
	40	3,75		25,00	
0,70		4,00			1
	32		6	27,00	
0,80		4,50		30,00	
0,90		4,75		32,00	
1,00		5,00			0,75
	24		5	36,00	
1,25		5,50		39,00	
	20	6,00		40,00	
	18		4	42,00	
1,50		6,50		45,00	
	16	7,00		50,00	
	15		3,5		0,5
1,75		8,00		55,00	
	14		3	60,00	
	13	9,00		65,00	

En yaygın kullanılan Modül ve Pd Değerleri

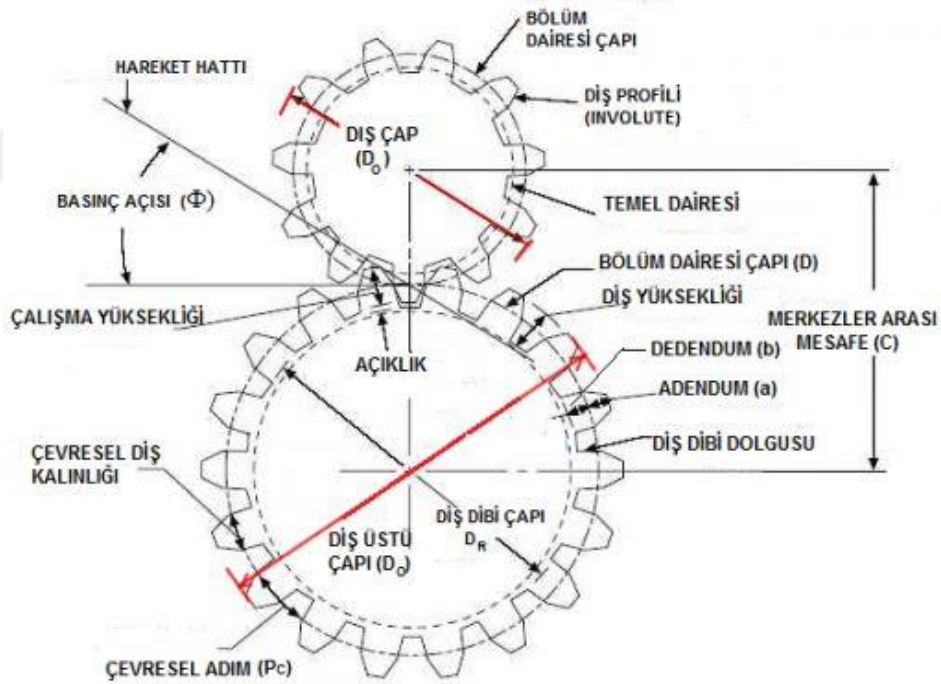


Şekil 5.7 Dişli ve çap gösterimi [96]

Şekil 5.7’de belirtilen pembe taralı alan bölüm dairesi ile addendum (diş üstü çapı) dairesi arasında kalan kısım alın (face) olarak adlandırılan dişli yüzeyidir. Şekil 5.7’de kırmızı taralı alan flank olup bölüm dairesi ile dedendum (diş dibi çapı) dairesi arasında kalan dişli yüzeydir.

Şekil 5.8’de belirtilen basınç açısı (Φ) bölüm dairelerinin birbirine dokunduğu noktadan çizilen teğet ile hareket hattı arasındaki açıdır. Önceleri basınç açısı sabit bir değer olarak 14.5° olarak kullanılmaktaydı. Bu basınç açısında diş sayısı 32’nin altına düştüğünde diş tepesi öteki dişlinin dibi ile girişim yaparak diş dibinin oyulmasına neden olduğu için bu açının kullanımı nispeten azalmıştır.

Basınç açısının 25° veya daha büyük olması durumunda daha güçlü diş profili elde edilmekte ve dişlilerde eksenler arası uzaklık toleransı azalmaktadır. 20° basınç açısında ise girişim olmaması için gereken diş sayısı 18’e kadar düşürülebildiğinden bugün artık dünyada en yaygın kullanılan basınç açısı 20° dir. Diş kalınlığı (b) eksenel yönde diş kalınlığıdır. Diş dibi radyüsü (R) dişlerin daha güçlü olması ve çentik etkisini yok etmek için diş diplerinde radyüs bulunur. Radyüs genellikle modülün 0.38 katıdır ($R = 0.38 \times M$)[96].



Şekil 5.8 Dişli modülü genel görünüm

Dişli tasarımı ve ilgili detaylar incelendikten sonra türbin tasarımları için gerekli dişli modülü hesaplarına geçilebilir. Standartlarda yer alan helis dişli ve düz dişli sistemleri incelenerek, düz dişli hesap çizelgesinden yararlanılmasına karar verilmiştir. Standartlarda belirtilen dişli modülü belli olmadığından mevcut tasarımın

netleştirilmesi için hesap çizelgeleri referans alınmıştır. Değerler türbin çapına göre belirleneceğinden referans çizelge belirlendikten sonra türbin çaplarına göre hesaplanmış ve Solidworks programı yardımıyla netleştirilmiştir. Referans çizelge Çizelge 5.2’de verilmiştir. Burada belirtilen değerlerin tanımları ve tanımlandığı bölgeleri yukarıda incelenmiştir. Bu çalışmada dişli tasarımı ve hesabı 5 adımda tanımlanmaktadır[98].

1. Adım (Modül belirleme); Amerikan dişli üreticileri birliğinin belirlediği tabloya bağlı kalma şartı bulunmaktadır. Bu sebeple arada kalan değerler tercih edilmeyecek olup, sadece tabloda belirtilen modül numaraları hesaplamada kullanılacaktır. Denklem 5.1’de M, modül; D, bölüm dairesi çapı; Z, diş sayısıdır. Modül değeri denklem 5.2’de olduğu gibi belirlenmiştir.

$$M = \frac{D}{Z} \quad (5.1)$$

$$M = \frac{25.4}{P_d} \quad (5.2)$$

2. Adım (Çap adımı belirleme); Pd olarak hesaplamada kullanılacak olup hesaplaması şu şekilde olacaktır. Denklem 5.3’te Pd çap adımını ifade etmektedir.

$$P_d = \frac{Z}{D} \quad (5.3)$$

3. Adım (Taban daire çapı belirleme); Db = D x cos(parçanın çapı).

Açı elbette ki Amerikan standartlarında olan modül ile belirlenir. Modülün belirlenmesinde deneme yanılma yolu tercih edilerek dişli sayısı bulunur. Dişli sayısı 200 mm için 68 adettir. 360 derece /68 adet = 5,29 yani yaklaşık 5,30 derece olduğu belirlenir. Buradan diş dibi çapı bulunur.

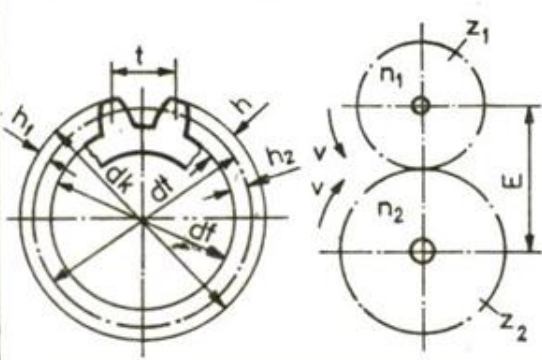
İncelenen örnek 200 mm çaplı türbin olduğu için bu türbin için diş dibi çapı = 200 mm X cos (5,30) = 199,87 olarak bulunur.

4. Adım (Diş yarıçapı belirleme); hesaplamaların başında bulunan modülün 0,38 katı yarıçapı verir. Fakat değişiklik gösterebilmektedir. Tasarım da uygunluk ve tasarım etütleri ile çözüme yaklaşılmalıdır. Genellikle 0,38 katı kullanılmaktadır.

5. Adım (Diş üstü çapı); 1,25 X Modül olarak hesaplanır bahsi geçen dişli için bu değer 5 mm olarak bulunur.

Örnek hesaplamaya göre 300 ve 400 mm türbinler için hesaplar çizelge 5.3'te verilmiştir. Türbin çapı verilen tabloda dış çapın değişmesi diş boyutunun büyüklüğünden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.2 Düz dişli çarklar [98]

DÜZ DİŞLİ ÇARKLAR		
		
ADLAR		FORMÜL
Modül	mm.	$m = t/\pi, dt/z, dk/z + 2$
Adım	mm.	$t = m \cdot \pi, \pi \cdot dt/z, \pi \cdot dk/z + 2$
Diş sayısı		$z = dt/m, \pi \cdot dt/t, dk - 2 \cdot m/m$
Bölme dairesi çapı	mm.	$dt = z \cdot m, t \cdot z/\pi, dk - 2 \cdot m$
Dişbaşı dairesi çapı	mm.	$dk = dt + 2 \cdot m, m \cdot (z + m)$
Diş yüksekliği	mm.	$h = 13/6 \cdot m, 2,167 \cdot m$
Dişbaşı yüksekliği	mm.	$h_1 = m, t/\pi$
Dişdibi yüksekliği	mm.	$h_2 = 7/6 \cdot m, 1,167 \cdot m$
Dişbaşı boşluğu	mm.	$a = 1/6 \cdot m, 0,167 \cdot m$
Diş genişliği	mm.	$b = \text{Kuvvet dişlileri için } 6-8 \text{ m}$ $b = \text{Hareket dişlileri için } 8-12 \text{ m}$
Eksenler arası uzaklığı	mm.	$E = dt_1 + dt_2/2, m(z_1 + z_2)/2$

Çizelge 5.3 Türbin çapına göre diş sayısı

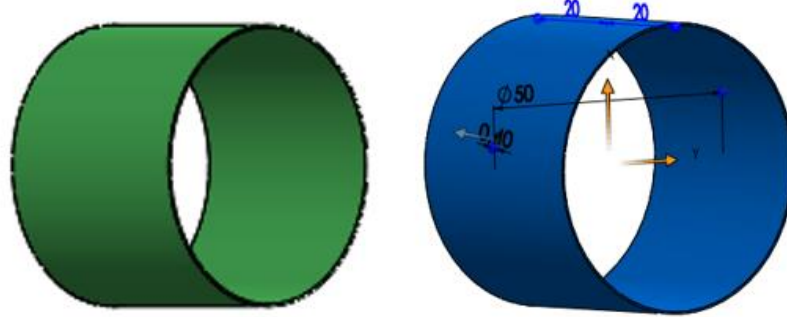
Türbin Çapı		
200 mm	Diş sayısı	68
	Dış çap	210,00
300 mm	Diş sayısı	76
	Dış çap	311,98
400 mm	Diş sayısı	102
	Dış çap	416,00

Dişli modülü ve türbin çapına göre sayılarının belirlenmesinin ardından kanat ve türbin tasarımına geçilmiştir. Türbin tasarımı için ilk olarak kanat modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Klasik rüzgâr türbinlerinde kullanılan NACA kodundan ziyade konik bıçak tipi kullanılacaktır. Konik bıçak tasarımında gerekli parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler ilgili aşamada çizelge halinde verilmiştir. Kanat tasarımının doğrudan belirlenen türbin çaplarına göre tasarlanması uygun görülmüştür. Kanat modellemesi türbin göbeğinden başlanarak yaklaşık 10 adımda tamamlanmıştır.

Türbin iskeletinde çizim esnasında oluşturulan ve türbin verimliliğini etkileyen bir unsurda türbinin göbek kısmı olarak adlandırılan ve rüzgârı karşılayan kanatların başladığı orta kısımdır. Burada satıh bir yüzeyden ziyade parabolik burun konisi şeklinde tasarlanmıştır. Aerodinamik hesaplamalarda akışın verimliliği açısından önem arz etmektedir. Bu göbek alanları türbin çaplarına göre program yardımıyla atanmıştır. Bu alanlar ilgili başlık altında incelenmiştir. Solidwork ile katı modellemenin ilk adımı olan Loft profiller (kesitler) arasını direkt veya bir doğrultu boyunca doldurarak katı model oluşturmak için kullanılan bir komuttur. Bu komut tasarım gereği programda kullanılan ana komutlardan biridir. Tasarımın gerektirdiği ilgili diğer komutlarla beraber kullanılarak bilgisayar destekli katı modelleme süreci aşağıda detayları ile verilmiş ve tamamlanmıştır.

1. Adım (iç göbek oluşturma); 2d olarak profili oluşturulan düzlem üzerinde ekstrüzyon ile katı oluşturma işlemidir. İç göbek kanatların türbin çeperine kadar birleştiği ilk alandır. Şekil 5.9’da iç göbek çizimi ölçüleriyle verilmiştir.

İç göbek ölçüleri kanatların ve türbinin ölçülerinin belirlenmesinde ve belirlenen ölçülerin doğrulanmasında önemlidir.



Şekil 5.9 İç göbek ve teknik resmi

Loft ile profil yolunda kullanılarak türbin göbeği üzerindeki konumuna göre kanat tasarımının bükülme açısı, hücum ve kök açıları verilerek, mikro türbinin burun kısmına doğru yönlendirilmiştir. Açı ve buna bağlı parametrelerin dişli ve türbin üzerinde tork oluşturmaması ya da oluşacak torkun asgari düzeyde olması açısından önemlidir.

2. Adım (kanat profili oluşturma); çapa göre uzunluğu belirlenen kanat profili tasarımı loft komutu kullanılarak yüzey üzerinde süpürme işlemi ile birlikte öncesinde taslağı belirlenen 2d çizgiler, düzlemler arasında yol-profil işlemi 3d katıya dönüştürme prensibine dayanır.

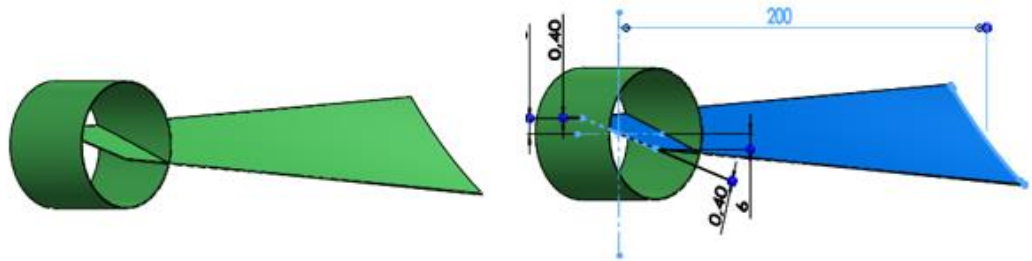
Konik bıçak şeklinde olacak kanatların profilini belirleyen üç açı tipi vardır. Bu kanat tipleri; hücum, bükülme ve kök açılarıdır. Hücum açısı tüm kanat profilinin tasarımını etkileyen çok önemli açı değerlerinden biridir. Aerodinamikte akış hattı ile kanat profilinin veter hattı arasında kalan açıdır. Akış hattı akışın kanat boyunca kanadı süpürerek taradığı düzlem olup veter hattı ise kanadın kök ve hücum düz bir koordinat boyunca birleştirilmesi ile oluşur. Kök açısı kanat boyunca devam eden akış hattının kanadı terk etmeden hemen önce yatayla yaptığı açı değeridir. Hücum açısı ise tam tersi türbin kanadının türbin göbeğinden ayrılarak kendi düzlemi boyunca devam ettiği ve yatayla yaptığı açı değeridir. Açı değeri ile beraber türbin iskeletinin ebat ve şeklini belirleyen türbin çapları, kanat sayıları, türbin ve kanat genişliği, et kalınlığı gibi parametreler değişken ve sabit olmak üzere çalışma boyunca kullanılacak değerler Çizelge 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.10'da kanat profilinin merkezi göbek

üzerinde ilk montajı teknik resim ölçüleriyle verilmiştir. Şekil 5.11’de göbek üzerinde kanat profilinin duruşu teknik resim olarak verilmiştir.

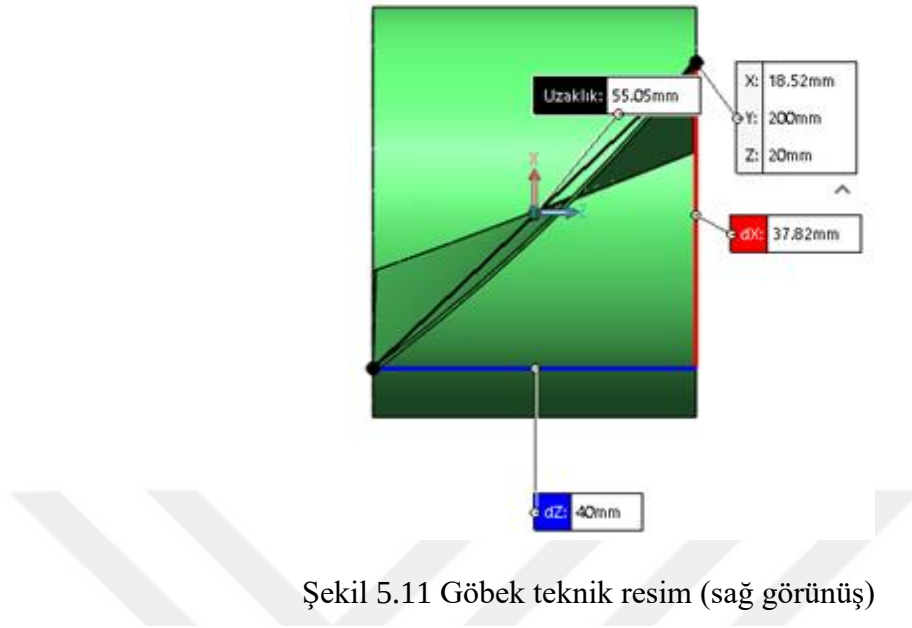
Şekil 5.12 ve 5.13’te kanat profilinin yine göbek üzerinde konumu ölçüleriyle verilmiştir. İncelene kanat profili parametreleri ve değerleri EK-1’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 5.4 Türbin ve kanat tasarımı parametreleri ve değerleri

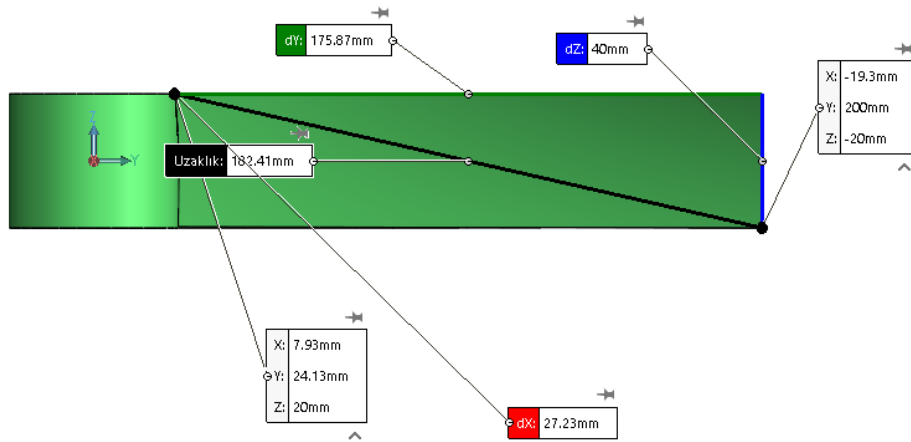
Parametre	Kabul Şartı	Değerleri
Türbin Çapı (mm)	Değişken	200-300-400
Malzeme Kalınlığı (mm)	Sabit	0.04
Türbin Genişliği (mm)	Sabit	40
Kanat Genişliği (mm)	Sabit	55,44
Kanat Sayıları (adet)	Değişken	6-9-12
Kanat Hücüm Açısı (°)	Sabit	65,53163635
Kanat Bükülme Açısı (°)	Sabit	21,93275985
Kanat Kök Açısı (°)	Sabit	31,504564



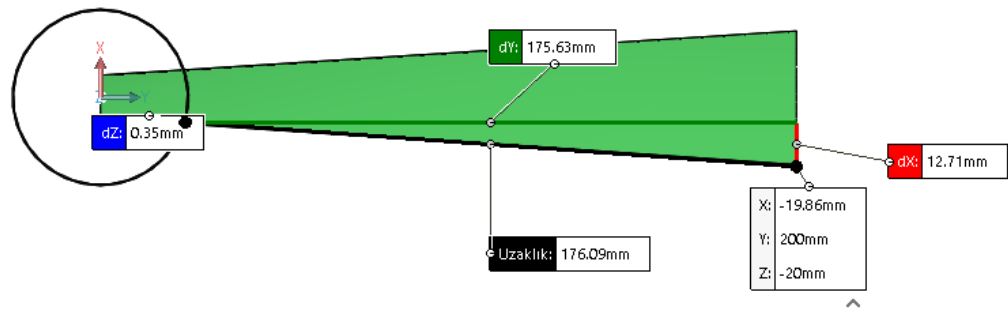
Şekil 5.10 Göbek üzerinde kanat profili ve teknik resmi



Şekil 5.11 Göbek teknik resim (sağ görünüş)

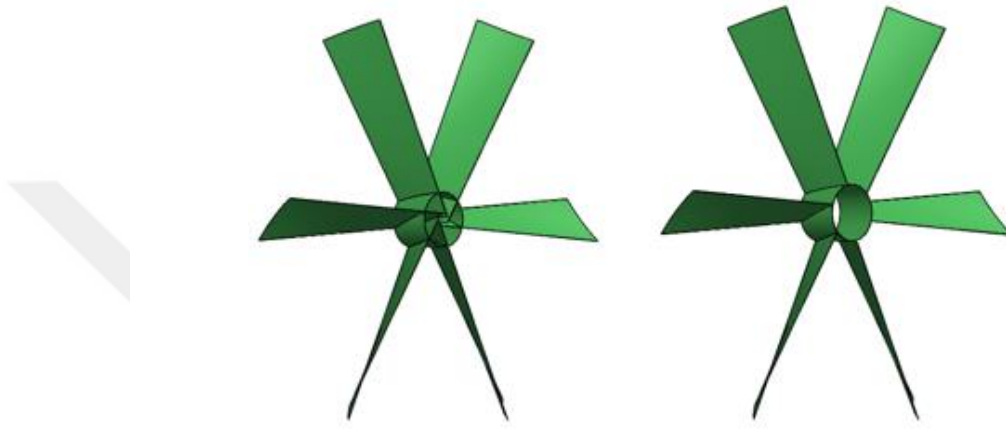


Şekil 5.12 Kanat teknik resim (üstten görünüş)



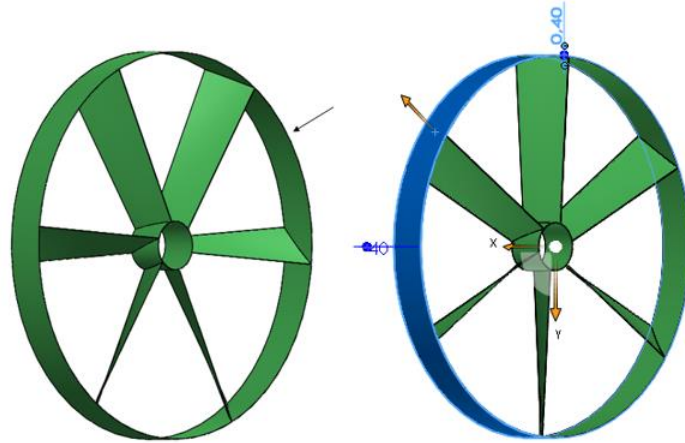
Şekil 5.13 Kanat teknik resim

3. Adım (kanatların göbek etrafında belirlenen tam sayı kadar çoğaltılması işlemi) ; önceden belirlenen kanat sayıları (6-9-12 kanat) dairesel bölge etrafında, dairesel çoğaltma metodu ile yapılır. Şekil 5.14’te 200 mm türbinin kanat sayısının 6 adet olarak çoğaltılmış ve mevcut tasarıma devam edebilmek için göbek kısmının boşaltıldığı son hali (sağda) verilmiştir.



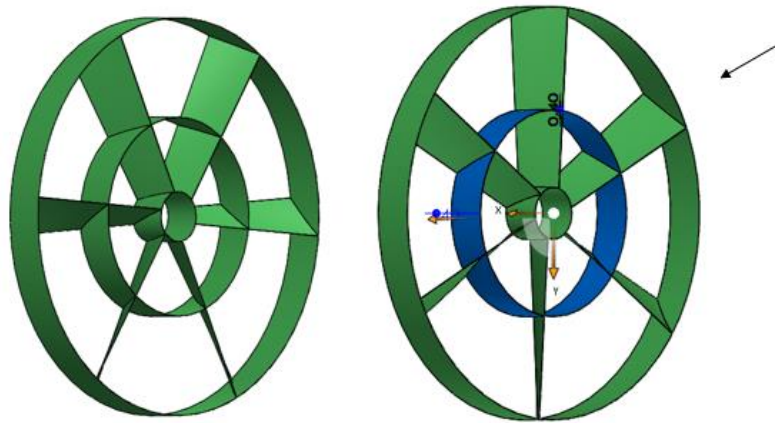
Şekil 5.14 Kanatların göbek etrafında belirlenen tam sayı kadar çoğaltılması işlemi ve son hali

4. Adım (kanatların son bulunduğu bölgeye dairesel hat oluşturma işlemi); kanatların son bulunduğu türbin çeperinin kanatların son bulunduğu bölge boyunca Solidworks katı modelleme de ekstrüzyon ile katı oluşturma işlemidir. Şekil 5.15’te tasarım ve teknik resmi verilmiştir. Bu adım türbinin en genel halinin belirlendiği adım sayılabilir. Bir sonraki aşama göbek tasarımının netleştirildiği adımdır.



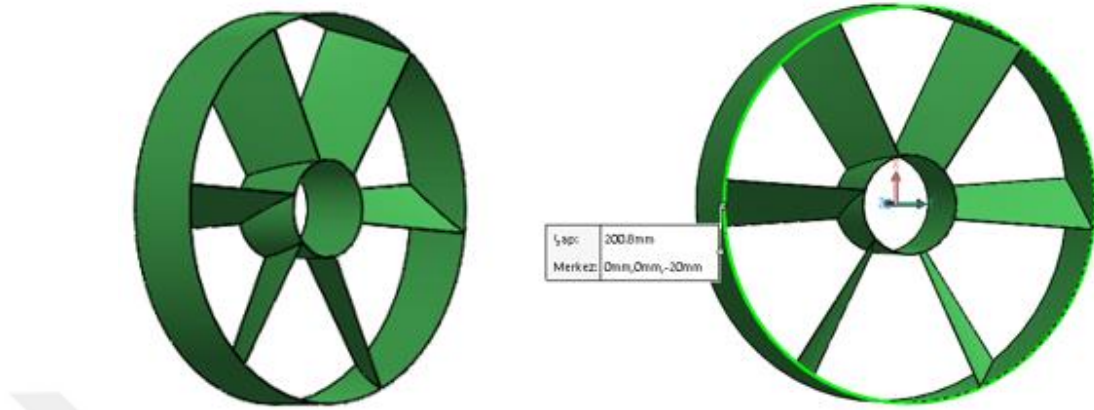
Şekil 5.15 Kanatların son bulduğu bölgeye dairesel hat oluşturma işlemi ve teknik resmi

5. Adım (Türbin göbek oluşturma); kanatların birleştirilmesi için belirlenen iç göbek profili ardından, iç göbeğin dış çeperinin bitiminde merkez koordinat sistemine ikinci göbek daire belirlenmiştir. Şekil 5.16’da bu daire ve teknik resmi verilmiştir.



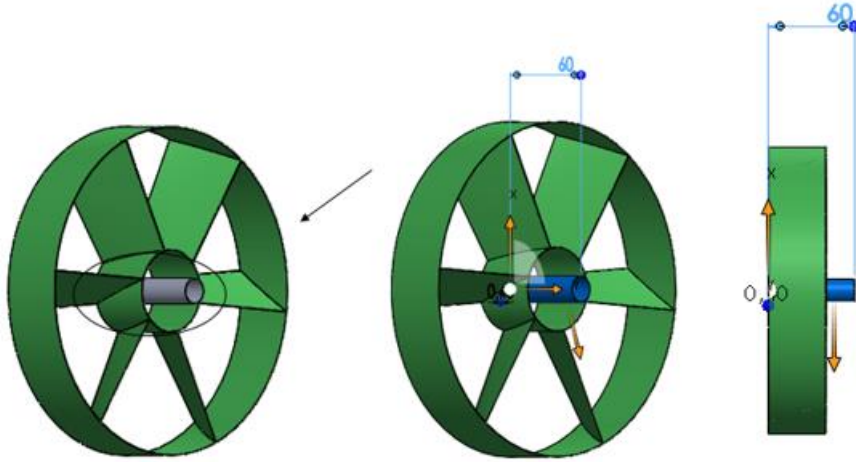
Şekil 5.16 Türbin göbek oluşturma ve teknik resim

Ardından yine çakışık olarak kanat uç noktasına açılan ikinci göbek ile ekstrüde kesim işlemi yapılarak 3d model trimle işlemi yapılarak Şekil 5.17’de mevcut tasarımın son hali verilmiştir. Burada sağdaki görselde incelenmekte olan 200 mm için malzeme kalınlığı sebebiyle program 200,8 olarak ölçüm vermiştir. Malzeme kalınlığı deney simülasyon ve programda dikkate alınacak ancak hesaplarda ihmal edilecektir.

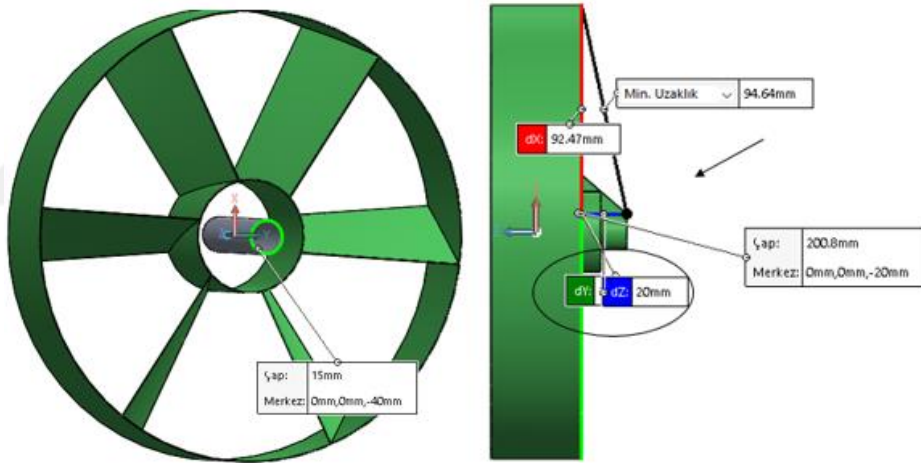


Şekil 5.17 Türbin göbek oluşturma son hali ve teknik resmi

6. Adım (türbin göbek tasarımı-ilk aşama); tasarımda ilk olarak ele alınan göbek sadece kanat birleşimi dikkate alınan türbin göbeği bu aşamada netleştirilecektir. Türbin tasarımında gelen rüzgârdan en yüksek verimde faydalanmak açısından göbek tasarımı da önemlidir. Tasarımda türbin göbeğinin düz bir doğrultuda olmadığı parabolik bir yapıya sahip olduğundan bahsedilmiştir. Bu sebeple kanatlara doğru gelen rüzgârın türbin üzerinde ilk temas noktası türbinin göbeğidir. Oluşturulan koordinat sistemi ile tam merkezli olarak yine 0,04 mm kalınlıkta ve 60 mm uzunluğunda ikinci dairesel bölge oluşturulmuştur. Şekil 5.18’de verilmiş olan göbek tasarımının ilk adımıdır, türbin yönü siyah ok ile belirtilmiştir. Burada göbek merkezinden eş merkezli ek bir dairesel bölge oluşturulmuştur. Hemen ardından Şekil 5.19’da mevcut görselin teknik resmi detay ve ölçüleriyle verilmiştir. 6, 7, 8 ve 9. adımlar dişli ve kanat tasarımı tamamlanan türbinin göbek tasarımının netleştirildiği adımlardır. Bu adımlar aşama aşama görseller ve anlatımlarla ilgili kısımda desteklenmiştir.

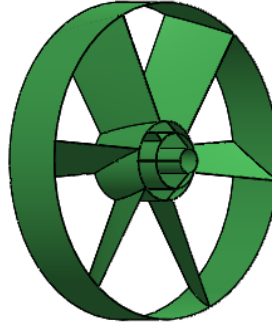


Şekil 5.18 Türbin göbek tasarımı ve teknik resmi (ilk aşama)



Şekil 5.19 Türbin göbek tasarımı ve detaylı teknik resmi (ilk aşama)

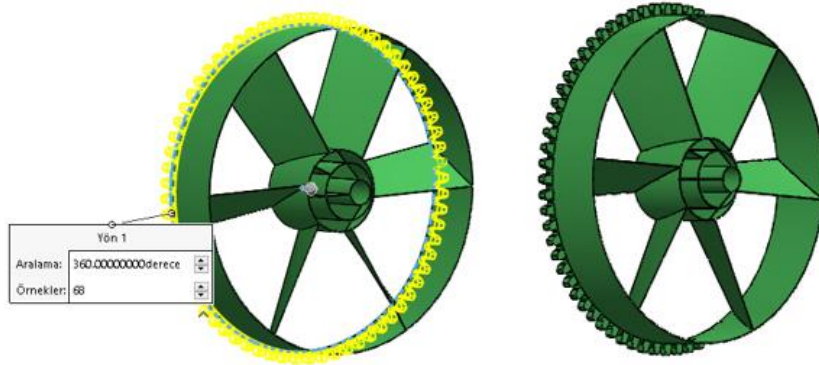
7. Adım (türbin göbek tasarımı-ikinci aşama); bu adımda göbek içinde oluşturulan koordinat sistemi ile eş merkezli olarak 0,04 mm kalınlıkta 48,42 mm uzunluğunda üçüncü dairesel bölge oluşturulur. Şekil 5.20’de ikinci aşamaya ait teknik resim detayları ile verilmiştir.



Şekil 5.22 Türbin göbek tasarımı ve detaylı teknik resmi (dördüncü aşama)

9. Adım (hesaplaması yapılan dişlilerin türbine montaj tasarımı); merkez koordinat sistemine tam tanımlı yardımcı geometri tanımlamasından 2d olarak diş dibi çapı, diş üstü çapı ve son olarak da bölüm dairesi bölgesini temsilen yardımcı daireler çizilmiştir. Dedendum ve addendum ölçüleri dairesel bölgelere (çap olarak) değeri atanır daha sonra merkez koordinat sistemine tam tanımlı çakışık ve ön düzlem ile bölgeye dik doğrultuda 4 adet yardımcı çizgi ataması yapılmıştır. Daha öncesinde yapılan hesaplamalara göre değeri ataması yapılan ölçüler, her bir çizgi ile koordinat sistemine dik olacak şekilde belirlenen açının, her bir çizgi arasındaki açısı bir öncekinin yarısı kadar küçültülerek, tasarım işlemi tamamlanmıştır.

Burada yapılan işlemlerin ardından giriş boyu ölçüsü kadar ekstrüzyon ile katı oluşturularak eksik kalan bölge olan radyuslama işlemi yapılır. Ardından modül hesaplamasında belirlenen dişli diş tam sayı değerleri programa tanıtılarak işlem sonlandırılır. İncelenen 200 mm türbinin son hali Şekil 5.23'te dişli modülünün sayısı, konumu ve türbinin son hali ile verilmiştir.



Şekil 5.23 200 mm türbin dişliler ve tasarımın son hali

Katı modellemesi tamamlanan türbin tasarımlarının teknik resim çizimleri EK-2, EK-3 ve EK-4’te sırası ile 200, 300 ve 400 mm için detaylıca verilmiştir. Teknik resim dosyaları genel hatları verdiğinden kanat sayısı 12 olarak sabit tutulmuştur. Süreçler genel alt başlıklar altında incelenmiştir ancak süreçler tam anlamıyla birbiri ile beraber gelişmiş hiçbir aşama kendi içinde sonuç alacak nitelikte olmamıştır bu yüzden yukarıda belirtilen tüm süreçlerin beraber tamamlanması gerekmektedir.

5.2.3. Hesaplar ve Simülasyon

Kanat simülasyon uygulamasında bilgisayar destekli bir yazılım olan ve aerodinamik hesaplarda kullanımı uygun görülen Solidworks Flow Simulation uygulaması kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar niteliğine uygun olan değerler, kanat profili tasarımında kullanılan Solidworks Flow Simulation uygulamasında kullanılan değerler belirlenmiştir. Araştırmanın niteliğine uygun olarak simülasyon da kullanılacak rüzgâr hız değerleri (V : 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 m/s) değişken seçilmiştir. Simülasyon uygulamasının sonunda türbin verimliliğinin kıyaslanmasında kullanılacak olan program değerleri; açısal hız (rad/s), devir sayısı (rpm), ses şiddeti (dB) olarak belirlenmiştir.

Solidworks katı modelleme programında çeşitli adımlar ile tamamlanan türbin tasarımları her bir türbin için sırası ile ön, perspektif, üst ve yan görüşler aşağıda ilgili başlıklar altında simülasyon sonuçları ile beraber verilmiştir.

Simülasyon uygulamasının ilk adımında ortam şartları, uygun birimler ve analiz tipi belirlenerek araştırmaya yönelik uygun parametreler adım adım girilmiştir. Simülasyon uygulamasında kullanılan parametreler kabul şartları, özellik ve değerleri

Çizelge 5.5'te verilmiştir. Solidworks programında üç boyutlu katı modellemesi tamamlanan türbinler Solidworks Flow Simulation uygulamasında sanal deney ortamında belirlenen rüzgâr hızlarına tabi tutulmuştur. Bu deneylerin sonucunda her bir türbinin simülasyon sonuç raporları elde edilmiştir. Bu raporların sonuçları ilgili başlıklar altında verilecektir. Simülasyon sonuçları görsel olarak verilmiş ve veri analizi ve değerlendirme sürecinde çizgi grafikler ile karşılaştırması planlanmıştır.

Çizelge 5.5 Simülasyon programı kabul şartı ve değerleri

Parametre	Kabul Şartı	Özellik ve Değerleri
Ortam	Sabit	Dış Adyabatik Ortam
Birimler	Sabit	kg-m-sn (SI)
Yüzey	Sabit	Pürüzsüz
Akışkan	Sabit	Doğal hava akımı
Rüzgâr Yönü (vektörel)	Sabit	Türbine Dik (Z yönünde)
Rüzgâr Hızı (m/s)	Değişken	2-3-4-5-6-7
Sıcaklık (°K)	Sabit	293,15
Basınç (Pa)	Sabit	101325
Dönme Yönü	Sabit	Saat Yönünde
Rüzgâr Yönü	Sabit	Önden
Akış Tipi	Sabit	Laminer ve Türbilanslı
Mesh (global ağ çözümleme)	Sabit	Standart boyut 3 birim, kalınlık 0.06 m
Türbin Çapı (mm)	Değişken	200-300-400
Kanat Sayısı (adet)	Değişken	6-9-12
Malzeme Kalınlığı (mm)	Sabit	0.04
Türbin Genişliği (mm)	Sabit	40
Kanat Genişliği (mm)	Sabit	55,44
Açısal Hız (rad/s)	Değişken	Değişkenlere Bağlı
Devir Sayısı (rpm)	Değişken	Değişkenlere Bağlı
Ses Şiddeti (dB)	Değişken	Değişkenlere Bağlı

Sonuç raporları ile elde edilemeyen ancak çalışmanın amacı doğrultusunda önemli birer kriter olan bazı değerler bu aşamada hesaplanmıştır. Raporlardan direkt elde edilen ilgili sonuçlarla beraber değerlendirilmesi planlanmıştır. Bu değerler, türbin doluluk oranı, kanat uç hız oranı ve açısal hızdır.

İlk olarak doluluk oranı incelenmiştir. Doluluk oranı türbinlerin verimliliğinin incelenmesinde önemli bir kriterdir. Aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\text{Süpürme alanı} = (\text{Alan}_{\text{türbin}}) - (\text{Alan}_{\text{göbek}}) - (\text{Alan}_{\text{kanat}} * \text{kanat sayısı}) \quad (5.4)$$

$$\text{Doluluk oranı} = \frac{\text{Alan}_{\text{kanat}} * \text{kanat sayısı}}{\text{Süpürme alanı}} \quad (5.5)$$

Denklem 5.4'te verilen *süpürme alanı* doluluk oranının hesaplanması için kullanılan bir değerdir. Türbinde kanatların ve göbeğin hareketi doğrultusunda rüzgâra karşılık veren net alandır. Denklem 5.4'te verilen $\text{Alan}_{\text{türbin}}$ türbin alanını ifade eder ve πr^2 ile hesaplanmıştır. $\text{Alan}_{\text{göbek}}$, türbinin göbek alanını ve $\text{Alan}_{\text{kanat}}$ türbinin bir kanadının alanını ifade etmektedir ve bu alanlar Solidworks yardımıyla hesaplanmıştır. Doluluk oranı süpürme alanının (m^2); $\text{Alan}_{\text{kanat}}$ ve kanat sayısının çarpımının oranlanmasıyla Denklem 5.5'te hesaplanmıştır. Yukarıda belirtilen ve türbinlerin doluluk oranının hesaplanmasında kullanılan değerler Çizelge 5.6'da verilmiştir. Doluluk oranları bu aşamada hesaplanmış ilgili grafiklerle verilmiştir. Hesaplar sonucunda süpürme alanı m^2 olarak verilmiştir.

Çizelge 5.6 Türbin doluluk oranının hesaplanmasında kullanılan değerler

MİKRO TÜRBİNLER		200 mm	300 mm	400 mm
6 Kanat	Türbin Alanı	125600	282600	502400
	Türbin Tek Kanat Alanı	3392,3	5559,3	7924,4
	6 Kanat Alanı	20353,9	33355,7	47546,2
	Göbek Alanı	123,1	144,81	170,34
	Süpürme Alanı (mm^2)	105123	249099,5	454683,5
	Süpürme Alanı (m^2)	0,105	0,249	0,455
9 Kanat	Türbin Alanı	125600	282600	502400
	Türbin Tek Kanat Alanı	3411,2	5581,4	7947,6
	9 Kanat Alanı	30700,6	50232,8	71528,6
	Göbek Alanı	123,1	144,81	170,34
	Süpürme Alanı (mm^2)	94776,3	232222,4	430701,1
	Süpürme Alanı (m^2)	0,095	0,232	0,431
12 Kanat	Türbin Alanı	125600	282600	502400
	Türbin Tek Kanat Alanı	3403,8	5568,7	7930,9
	12 Kanat Alanı	40846	66823,8	95170,2
	Göbek Alanı	123,1	144,81	170,34
	Süpürme Alanı (mm^2)	84630,9	215631,4	407059,5
	Süpürme Alanı (m^2)	0,085	0,216	0,407

Çizelge 5.7 Türbinler doluluk oranları

MİKRO TÜRBİNLER		200 mm	300 mm	400 mm
6 Kanat	$Alan_{kanat} * kanat\ sayısı$	203,539	333,557	475,462
	Süpürme Alanı (m ²)	0,105	0,249	0,455
	Doluluk Oranı (%)	19,362	13,391	11,039
9 Kanat	$Alan_{kanat} * kanat\ sayısı$	30700,6	50232,8	71528,6
	Süpürme Alanı (m ²)	0,095	0,232	0,431
	Doluluk Oranı (%)	32,393	21,631	16,607
12 Kanat	$Alan_{kanat} * kanat\ sayısı$	40846	66823,8	95170,2
	Süpürme Alanı (m ²)	0,085	0,216	0,407
	Doluluk Oranı (%)	48,264	30,990	23,380

Simülasyon rapor sonuçlarından elde edilen türbin verimliliğinin incelenmesinde önemli bir değer olan kanat uç hız oranı değeridir. Rapor sonuçlarından alınan türbinin oluşturduğu V_{maks} ile türbinin maruz bırakıldığı V rüzgâr hızlarının oranlanması ile bulunmuştur. Kanat uç hız oranı da türbin tasarımında önemli bir değerdir. Kullanılan formül Denklem 5.6’te verilmiştir. Kanat uç hız oranları 6, 9 ve 12 kanat sayılarına göre sırasıyla Çizelge 5.8, 5.9 ve 5.10’da verilmiştir.

$$Kanat\ uç\ hız\ oranı = \frac{V_{maks}}{V} \quad (5.6)$$

Çizelge 5.8 200 – 300 ve 400 mm çaplı 6 kanatlı türbinlerin kanat uç hız oranları

6 Kanatlı Mikro Rüzgâr Türbini	200 mm	300 mm	400 mm
$V_{maks} (m/s)$	3,326	5,826	2,648
$V (m/s)$	2	2	2
Kanat uç hız oranı (λ)	1,663	2,913	1,324
$V_{maks} (m/s)$	4,984	8,767	3,968
$V (m/s)$	3	3	3
Kanat uç hız oranı (λ)	1,661	2,922	1,323
$V_{maks} (m/s)$	6,629	11,630	5,279
$V (m/s)$	4	4	4
Kanat uç hız oranı (λ)	1,657	2,908	1,320
$V_{maks} (m/s)$	8,284	14,553	6,593
$V (m/s)$	5	5	5
Kanat uç hız oranı (λ)	1,657	2,911	1,319
$V_{maks} (m/s)$	9,942	17,565	7,910
$V (m/s)$	6	6	6
Kanat uç hız oranı (λ)	1,657	2,928	1,318
$V_{maks} (m/s)$	11,595	20,385	9,222
$V (m/s)$	7	7	7
Kanat uç hız oranı (λ)	1,656	2,912	1,317

Çizelge 5.9 200 – 300 ve 400 mm çaplı 9 kanatlı türbinlerin kanat uç hız oranları

9 Kanatlı Mikro Rüzgâr Türbini	200 mm	300 mm	400 mm
V_{maks} (m/s)	3,129	5,954	2,130
V (m/s)	2	2	2
Kanat uç hız oranı (λ)	1,565	2,977	1,065
V_{maks} (m/s)	4,930	8,897	3,197
V (m/s)	3	3	3
Kanat uç hız oranı (λ)	1,643	2,966	1,066
V_{maks} (m/s)	6,628	11,857	4,319
V (m/s)	4	4	4
Kanat uç hız oranı (λ)	1,657	2,964	1,080
V_{maks} (m/s)	8,314	14,836	5,367
V (m/s)	5	5	5
Kanat uç hız oranı (λ)	1,663	2,967	1,073
V_{maks} (m/s)	9,251	17,773	6,448
V (m/s)	6	6	6
Kanat uç hız oranı (λ)	1,542	2,962	1,075
V_{maks} (m/s)	10,899	20,815	7,613
V (m/s)	7	7	7
Kanat uç hız oranı (λ)	1,557	2,974	1,088

Çizelge 5.10 200 – 300 ve 400 mm çaplı 12 kanatlı türbinlerin kanat uç hız oranları

12 Kanatlı Mikro Rüzgâr Türbini	200 mm	300 mm	400 mm
V_{maks} (m/s)	2,952	5,914	2,956
V (m/s)	2	2	2
Kanat uç hız oranı (λ)	1,476	2,957	1,478
V_{maks} (m/s)	4,184	8,893	4,457
V (m/s)	3	3	3
Kanat uç hız oranı (λ)	1,395	2,964	1,486
V_{maks} (m/s)	5,580	11,852	5,956
V (m/s)	4	4	4
Kanat uç hız oranı (λ)	1,395	2,963	1,489
V_{maks} (m/s)	6,968	14,753	7,463
V (m/s)	5	5	5
Kanat uç hız oranı (λ)	1,394	2,951	1,493
V_{maks} (m/s)	8,318	17,742	8,966
V (m/s)	6	6	6
Kanat uç hız oranı (λ)	1,386	2,957	1,494
V_{maks} (m/s)	9,740	20,643	18,016
V (m/s)	7	7	7
Kanat uç hız oranı (λ)	1,391	2,949	2,574

Türbinin dönme hareketi doğrultusunda oluşan açısal hız değerleri aşağıda verilen Denklem 5.7’de ile hesaplanmıştır. Burada V çizgisel hız ve r değeri türbinin rüzgâra karşılık verdiği dişlisiz net yarıçapıdır. Çizgisel hız sonuç raporlarından elde edilmiştir. Belirlenen hava akımı rüzgâr hızlarına (2,3,4,5,6 ve 7 m/s) karşılık türbinlerin oluşturduğu rüzgâr hızlarıdır. Açısal hız değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Açısal hız değerleri 6, 9 ve 12 kanat sayıları; 200,300 ve 400 mm türbin çaplarına göre sırasıyla Çizelge 5.11, 5.12 ve 5.13’te verilmiştir.

$$\text{Açısal hız} = \frac{V}{r} \quad (5.7)$$

Çizelge 5.11 200 – 300 ve 400 mm çaplı 6 kanatlı türbinlerin açısal hızları

6 Kanatlı Mikro Rüzgâr Türbini	200 mm	300 mm	400 mm
V (m/s)	1,527	1,856	0,436
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	15,3	12,4	2,2
V (m/s)	2,289	2,459	1,018
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	22,9	16,4	5,1
V (m/s)	3,053	3,337	1,542
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	30,5	22,2	7,7
V (m/s)	3,805	4,166	2,759
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	38,1	27,8	13,8
V (m/s)	4,851	5,034	4,016
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	48,5	33,6	20,1
V (m/s)	5,536	5,891	5,863
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	55,4	39,3	29,3

Çizelge 5.12 200 – 300 ve 400 mm çaplı 9 kanatlı türbinlerin açısal hızları

9 Kanatlı Mikro Rüzgâr Türbini	200 mm	300 mm	400 mm
V (m/s)	1,063	1,858	1,180
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	10,6	12,4	5,9
V (m/s)	1,623	2,832	2,152
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	16,2	18,9	10,8
V (m/s)	2,154	3,836	3,411
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	21,5	25,6	17,1

V (m/s)	2,702	4,723	4,052
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	27,0	31,5	20,3
V (m/s)	3,232	5,714	4,325
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	32,3	38,1	21,6
V (m/s)	3,796	6,670	5,069
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	38,0	44,5	25,3

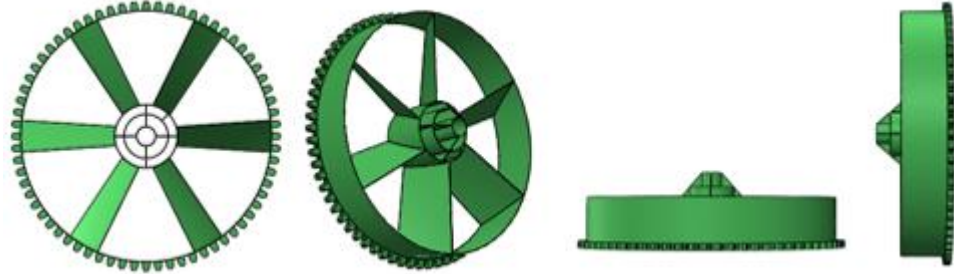
Çizelge 5.13 200 – 300 ve 400 mm çaplı 12 kanatlı türbinlerin açısal hızları

12 Kanatlı Mikro Rüzgâr Türbini	200 mm	300 mm	400 mm
V (m/s)	1,151	1,624	0,735
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	11,5	10,8	3,7
V (m/s)	1,767	2,409	0,967
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	17,7	16,1	4,8
V (m/s)	2,444	3,183	1,982
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	24,4	21,2	9,9
V (m/s)	2,974	3,954	3,029
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	29,7	26,4	15,1
V (m/s)	3,693	4,830	4,164
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	36,9	32,2	20,8
V (m/s)	4,218	5,708	5,027
r (m)	0,1	0,15	0,2
Açısal hız (rad/s)	42,2	38,1	25,1

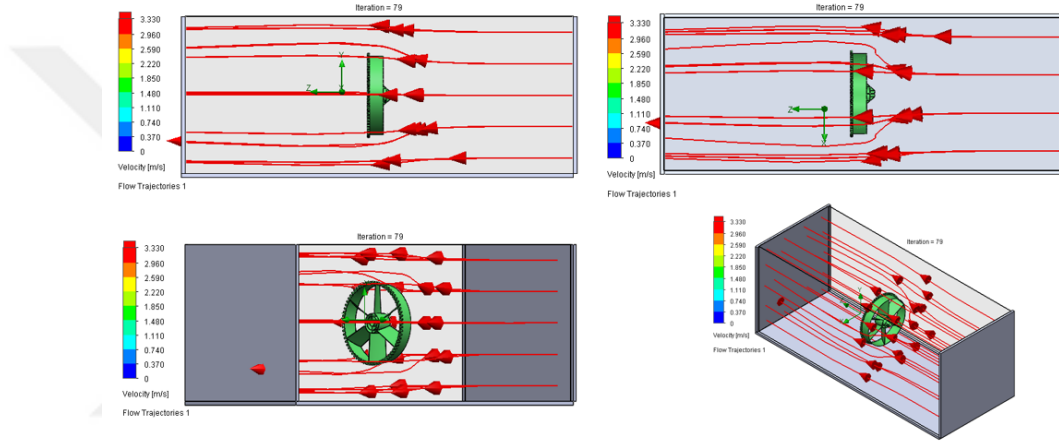
Araştırma konusu olan yeni tasarım MRT verileri ve değerlendirme aşamaları aşağıda çizelge ve çizgi grafikler halinde verilmiştir.

Veri analizi ilk olarak türbin çaplarına göre kıyaslama ile yapılacaktır. Türbin çaplarına göre yapılan inceleme gruplarında türbin çapı kanat sayısına göre doğrudan rüzgâr hızı ve ilgili diğer değerlerle oranlanacaktır. Veri analizinde, incelenen türbinlerin ön, perspektif, üst ve yan görünüşleri 200, 300 ve 400 mm türbinler için ilgili başlıklar altında verilmiştir. Belirlenen rüzgâr hızlarında Solidworks Flow Simulation uygulamasının sonuçları ve devamında sonuçlar çizgi grafikler yardımıyla verilmiştir. Sonuçlar bulgular ve tartışma başlığında değerlendirilerek, nihai türbin sonuç kısmında sebepleriyle paylaşılacaktır.

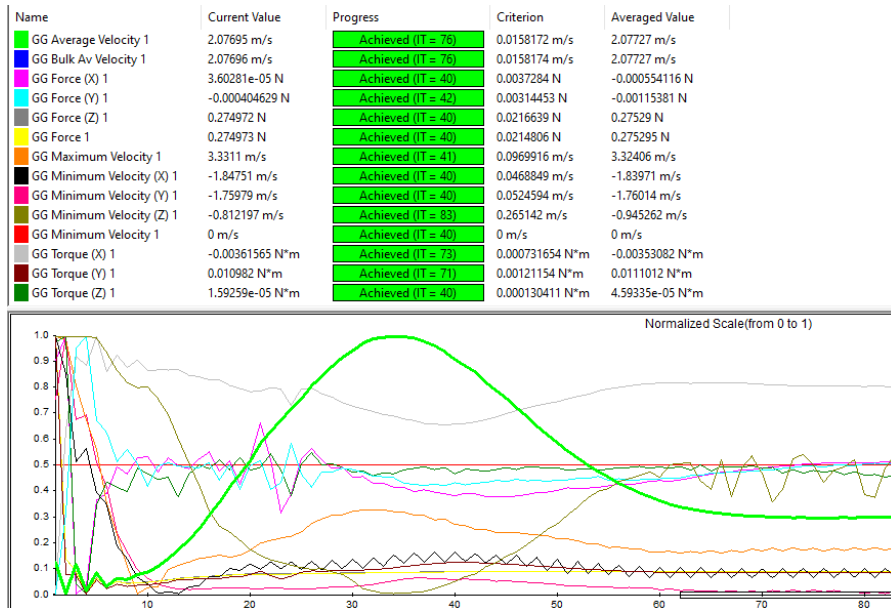
5.2.3.1. 200 mm Çaplı Türbin Simülasyonları ve Veri Analizi



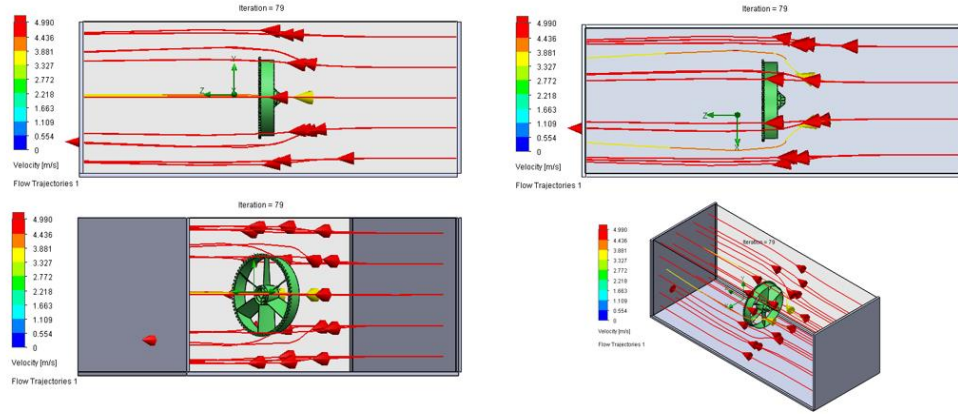
Şekil 5.24 200 mm - 6 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)



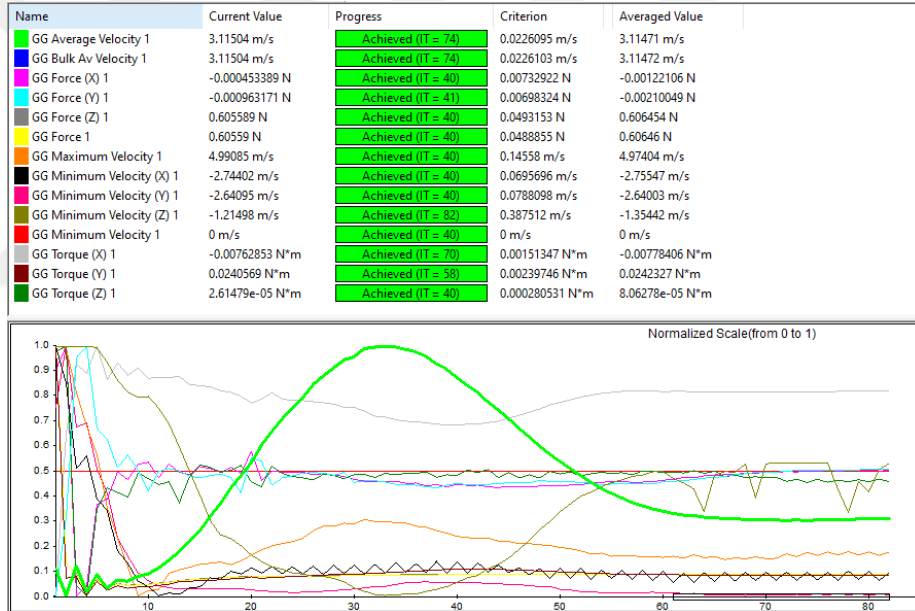
Şekil 5.25 200 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



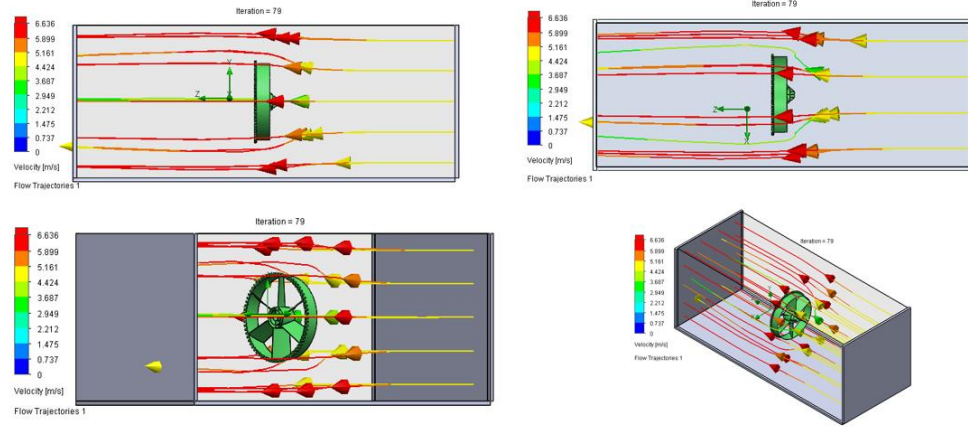
Şekil 5.26 200 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



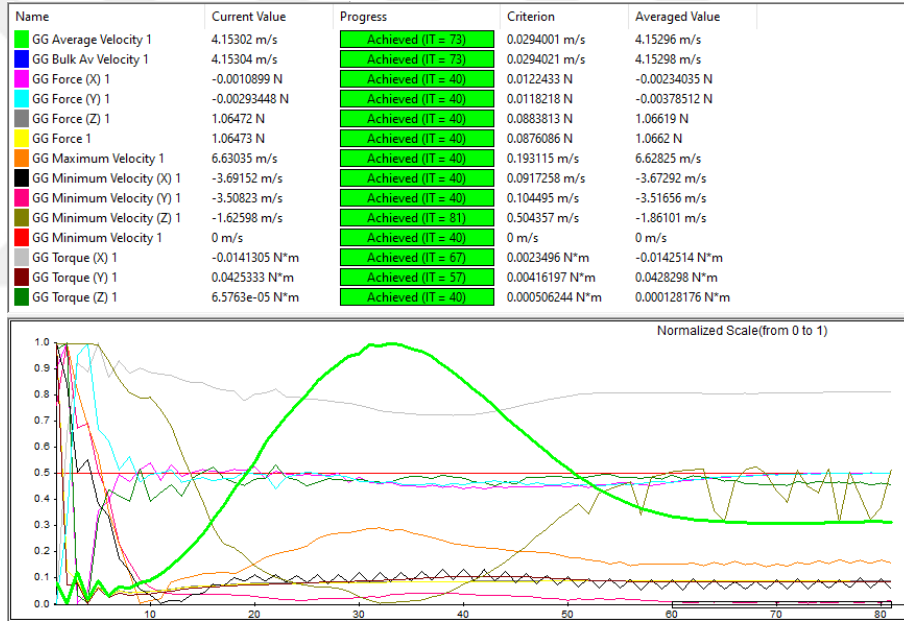
Şekil 5.27 200 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



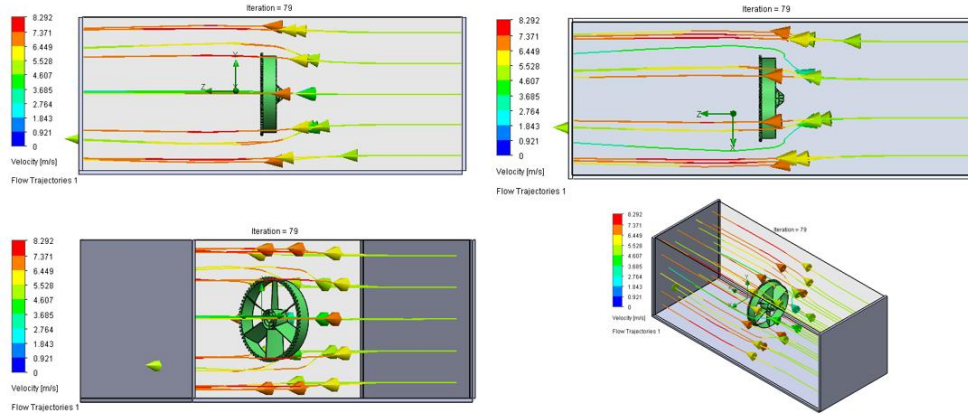
Şekil 5.28 200 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



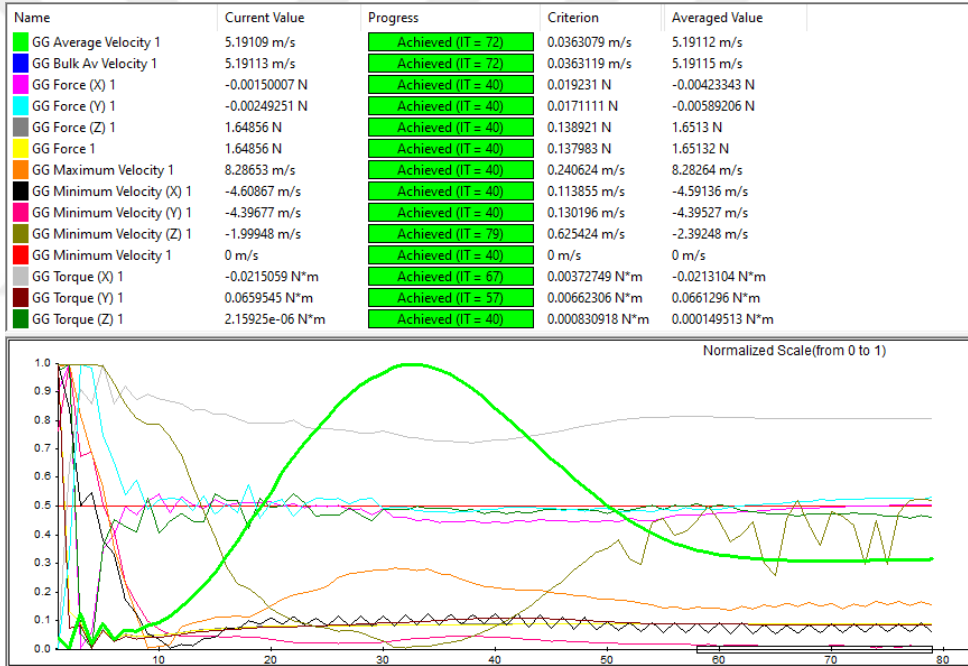
Şekil 5.29 200 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



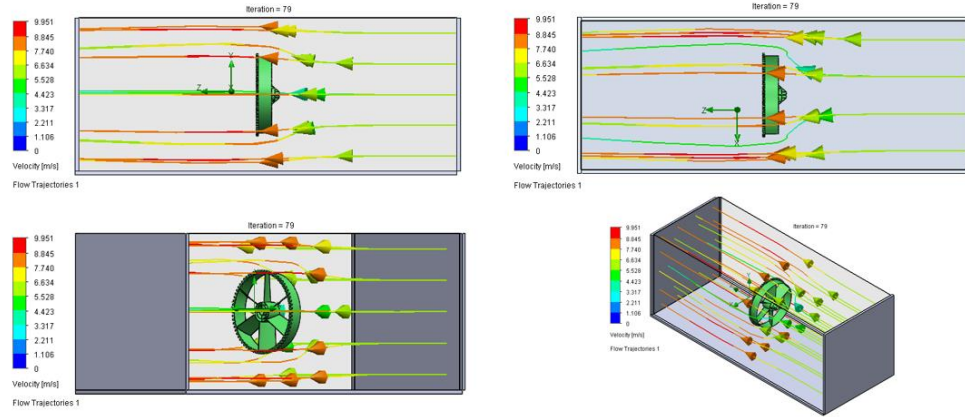
Şekil 5.30 200 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



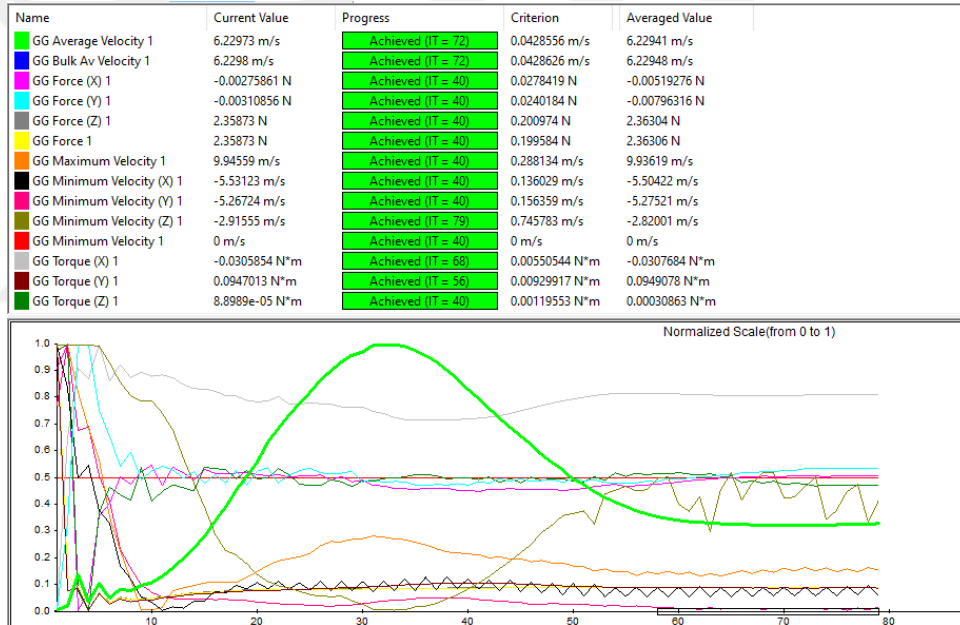
Şekil 5.31 200 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



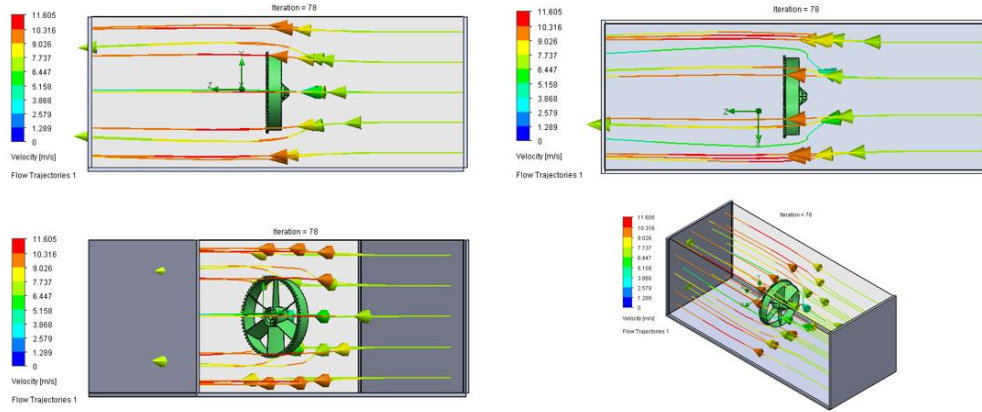
Şekil 5.32 200 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



Şekil 5.33 200 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

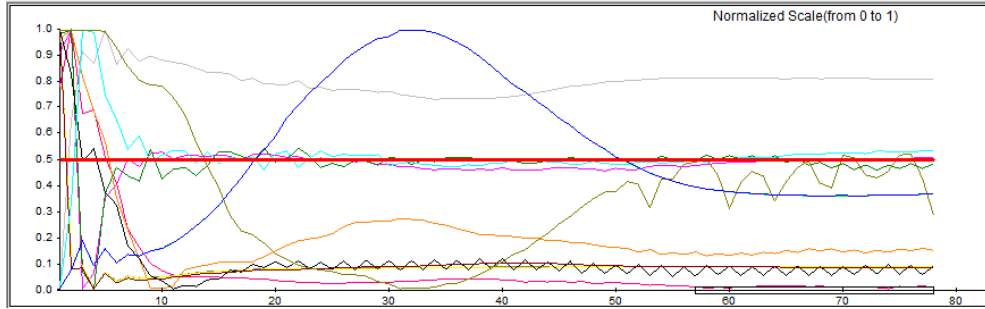


Şekil 5.34 200 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları

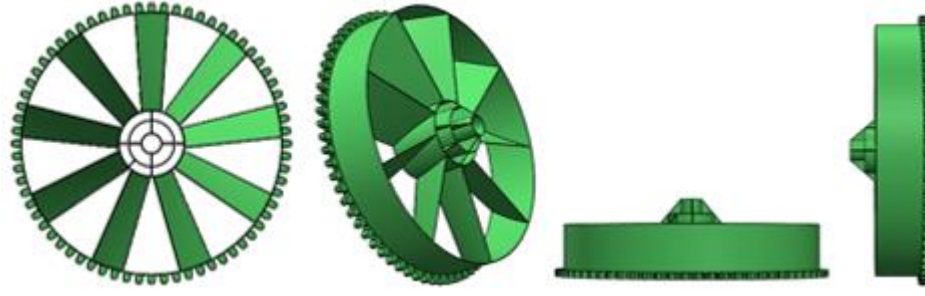


Şekil 5.35 200 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

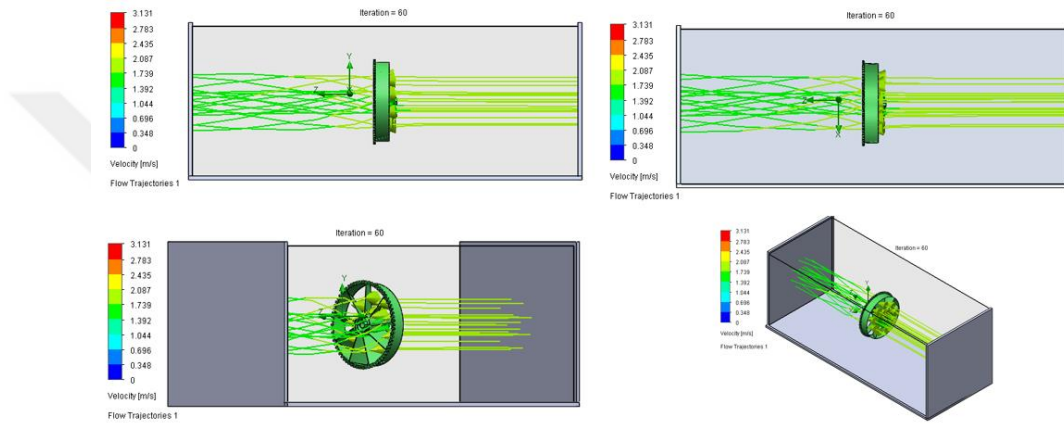
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Average Velocity 1	7.26798 m/s	Achieved (IT = 71)	0.0490403 m/s	7.26753 m/s
GG Bulk Av Velocity 1	7.26808 m/s	Achieved (IT = 71)	0.0490515 m/s	7.26764 m/s
GG Force (X) 1	-0.00417108 N	Achieved (IT = 40)	0.0365888 N	-0.00759353 N
GG Force (Y) 1	-0.00547606 N	Achieved (IT = 40)	0.0334006 N	-0.0110015 N
GG Force (Z) 1	3.19347 N	Achieved (IT = 40)	0.274562 N	3.19935 N
GG Force 1	3.19348 N	Achieved (IT = 40)	0.272662 N	3.19939 N
GG Maximum Velocity 1	11.5981 m/s	Achieved (IT = 40)	0.336549 m/s	11.5846 m/s
GG Minimum Velocity (X) 1	-6.3849 m/s	Achieved (IT = 40)	0.158382 m/s	-6.4149 m/s
GG Minimum Velocity (Y) 1	-6.15996 m/s	Achieved (IT = 40)	0.181011 m/s	-6.15538 m/s
GG Minimum Velocity (Z) 1	-4.13617 m/s	Achieved (IT = 78)	0.865342 m/s	-3.25763 m/s
GG Minimum Velocity 1	0 m/s	Achieved (IT = 40)	0 m/s	0 m/s
GG Minimum Velocity 2	0 m/s	Achieved (IT = 40)	0 m/s	0 m/s
GG Torque (X) 1	-0.0422888 N*m	Achieved (IT = 66)	0.00702977 N*m	-0.041914 N*m
GG Torque (Y) 1	0.12835 N*m	Achieved (IT = 49)	0.0122774 N*m	0.128939 N*m
GG Torque (Z) 1	0.000274982 N*m	Achieved (IT = 40)	0.00162251 N*m	0.000378868 N*m



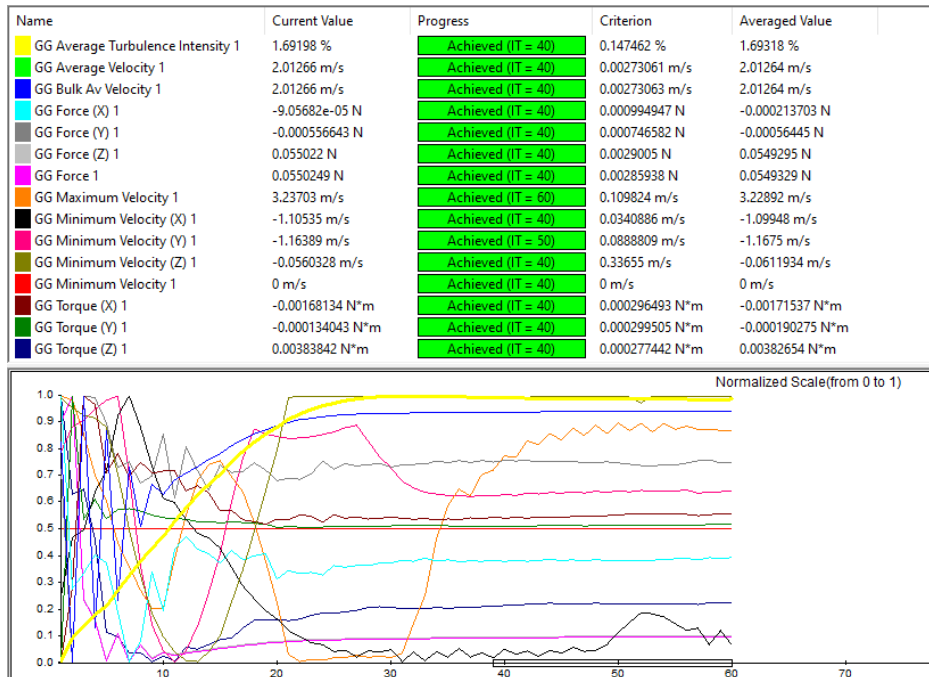
Şekil 5.36 200 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



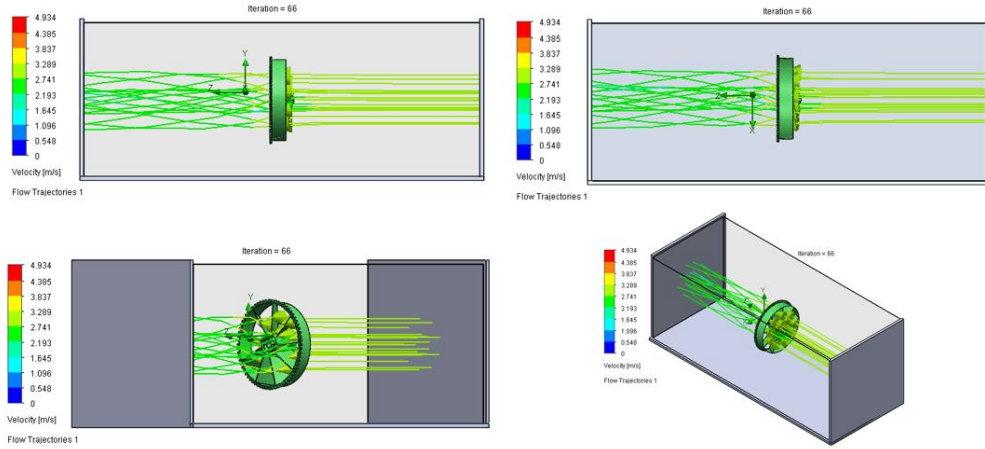
Şekil 5.37 200 mm - 9 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)



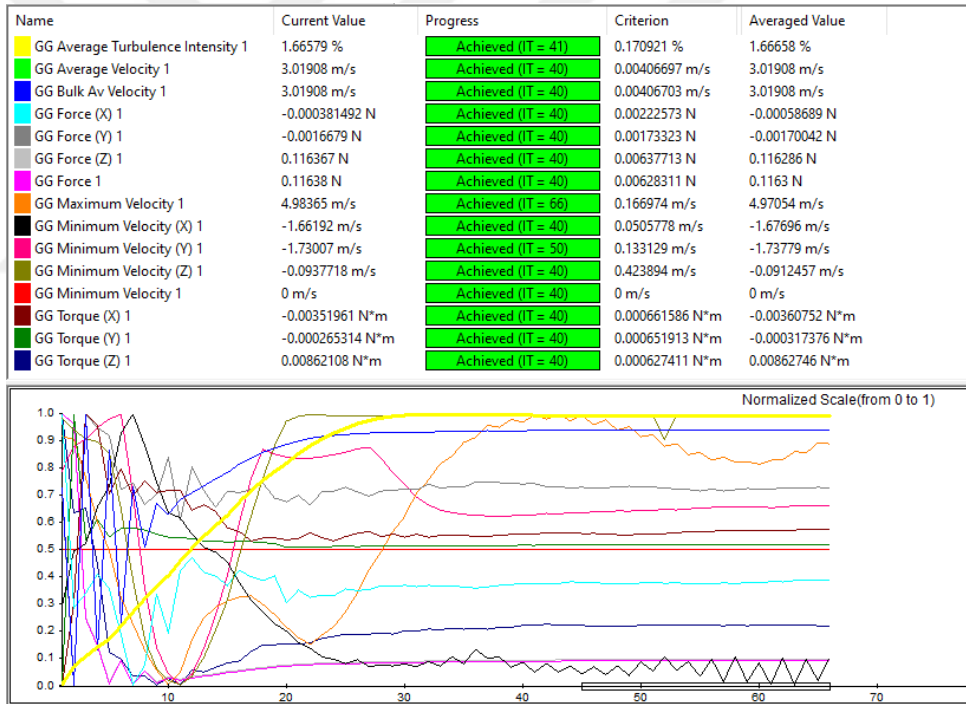
Şekil 5.38 200 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



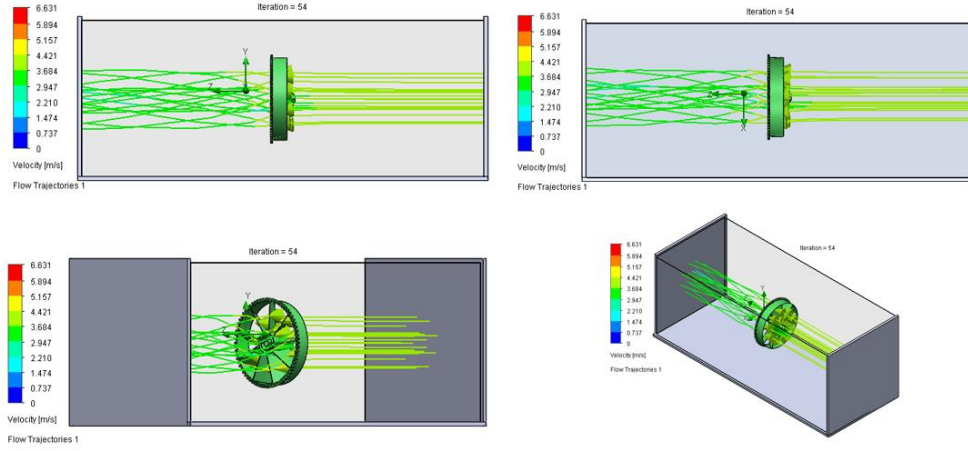
Şekil 5.39 200 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



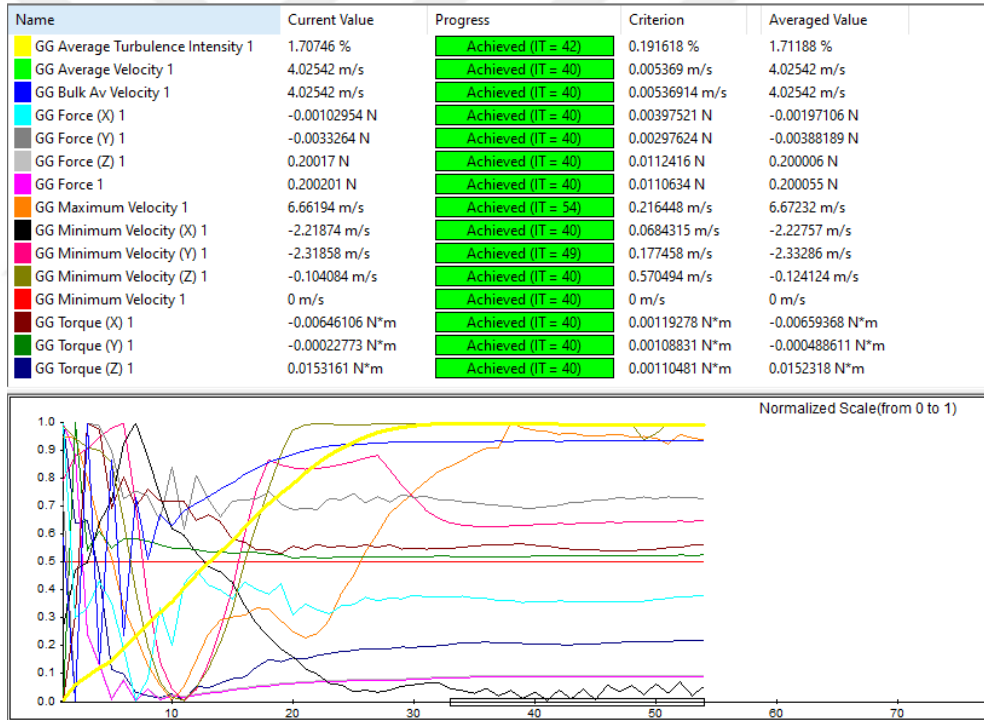
Şekil 5.40 200 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



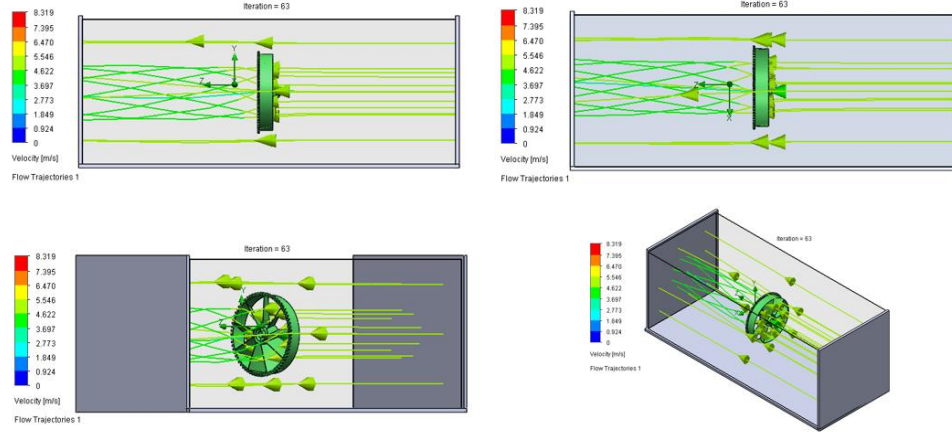
Şekil 5.41 200 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



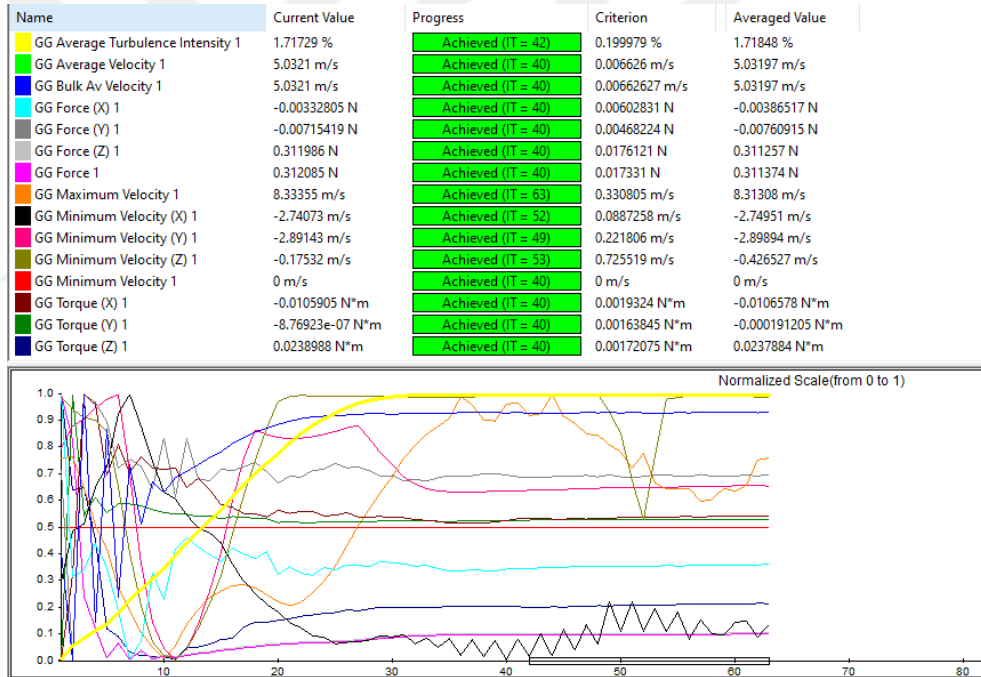
Şekil 5.42 200 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



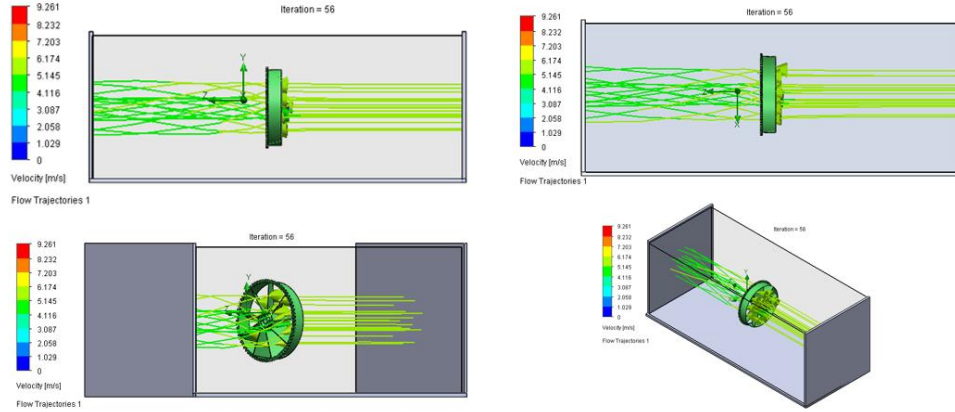
Şekil 5.43 200 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



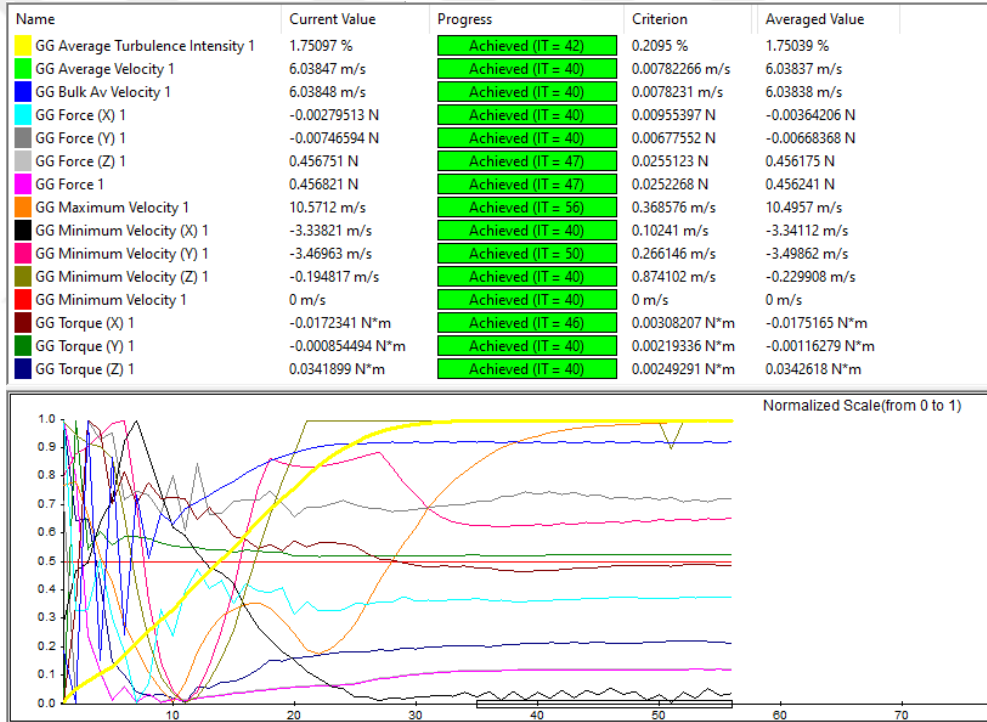
Şekil 5.44 200 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



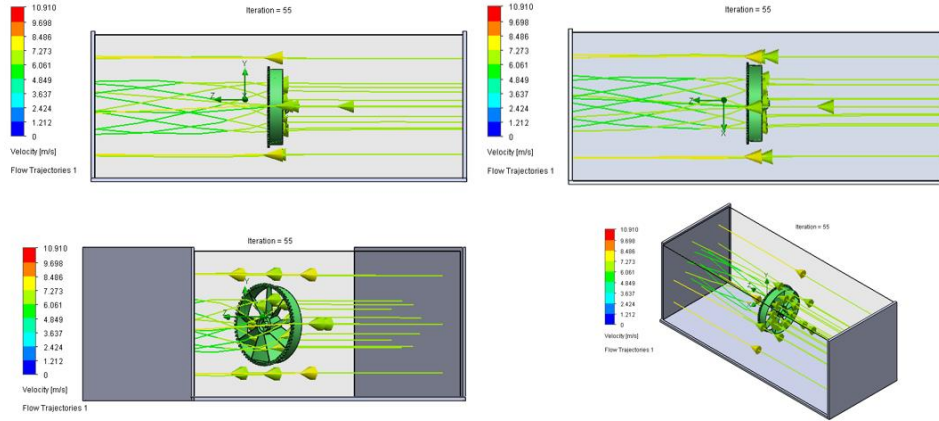
Şekil 5.45 200 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



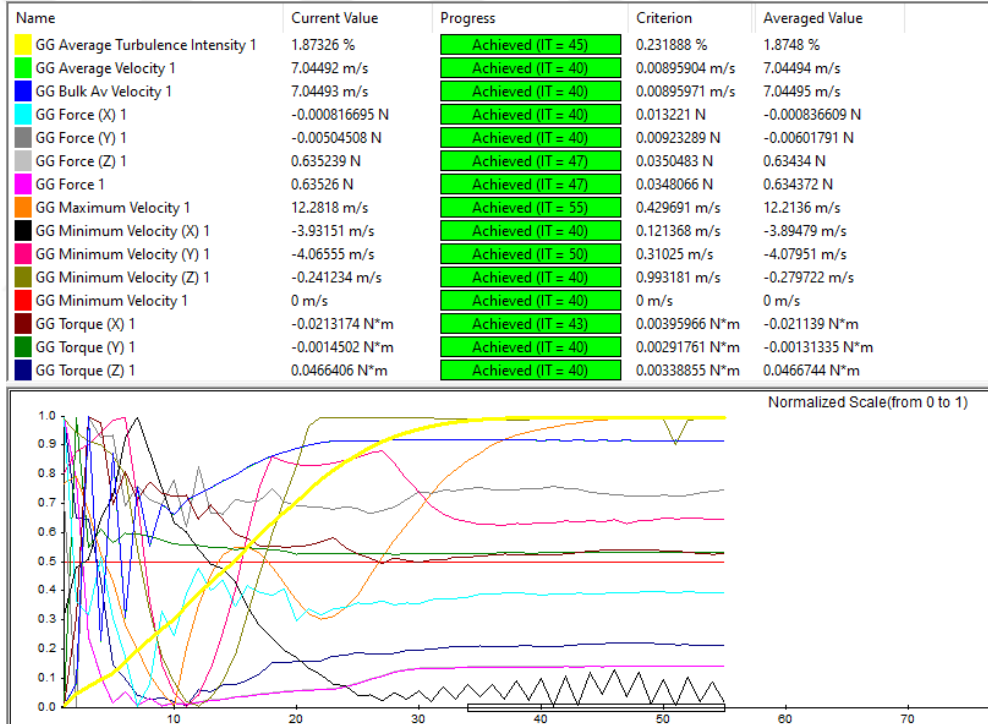
Şekil 5.46 200 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



Şekil 5.47 200 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



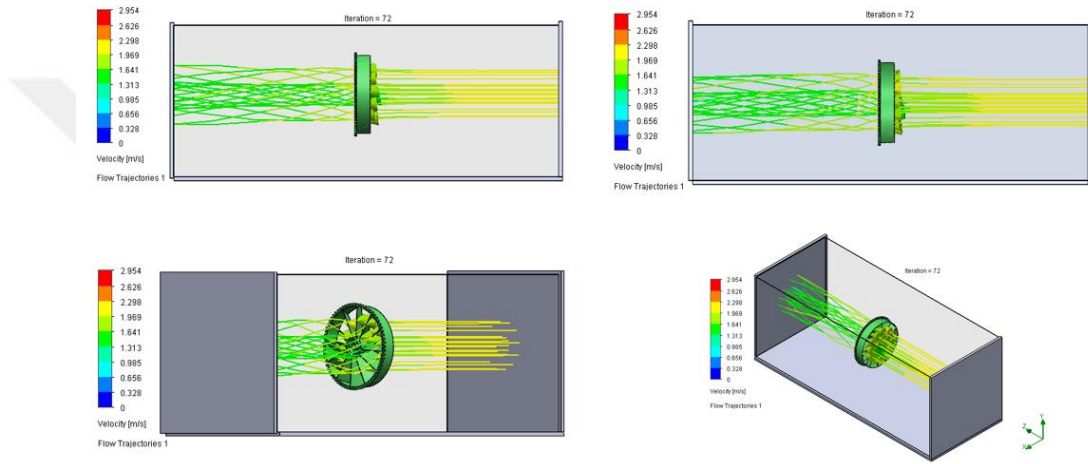
Şekil 5.48 200 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



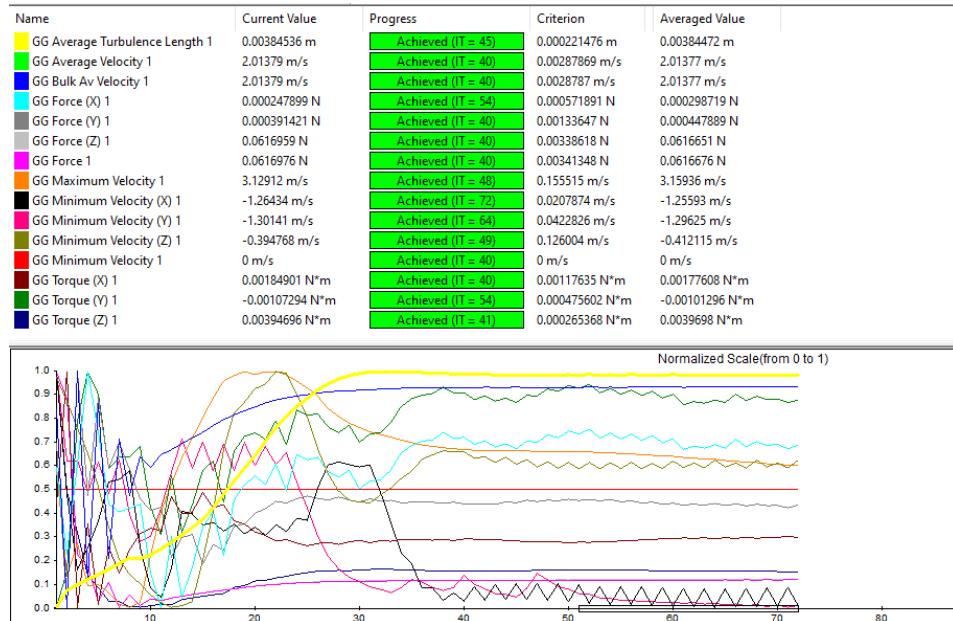
Şekil 5.49 200 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



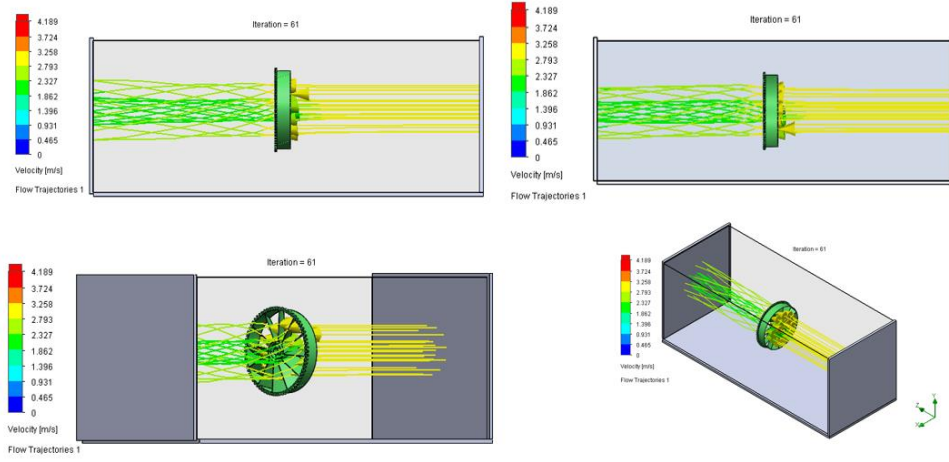
Şekil 5.50 200 mm - 12 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)



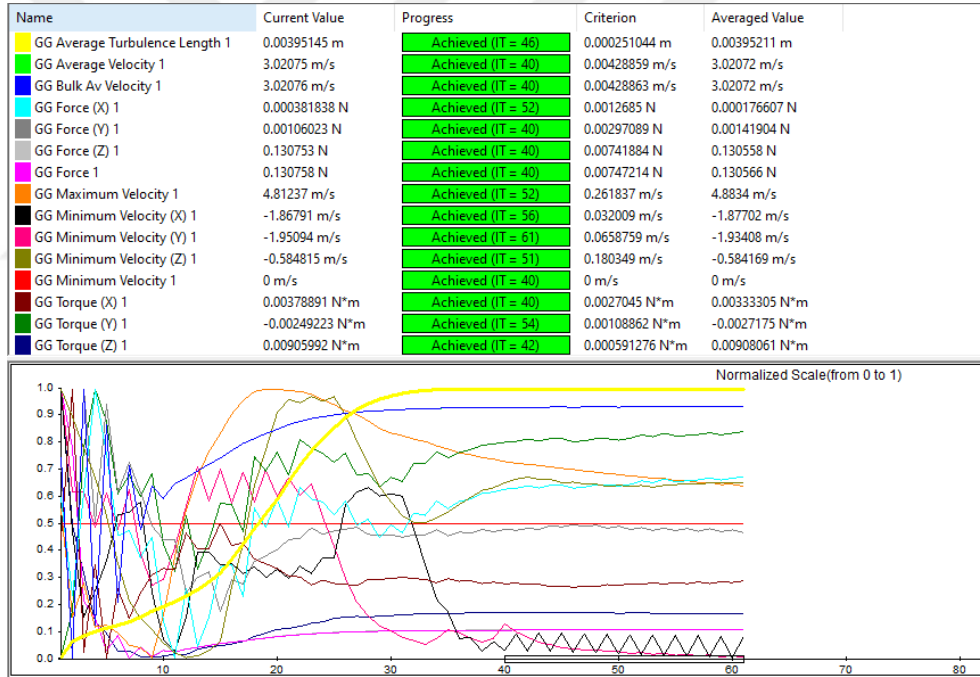
Şekil 5.51 200 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



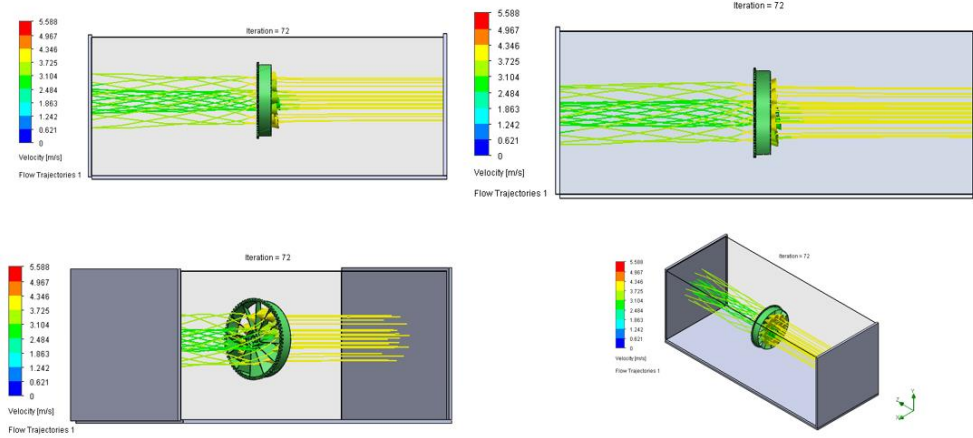
Şekil 5.52 200 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



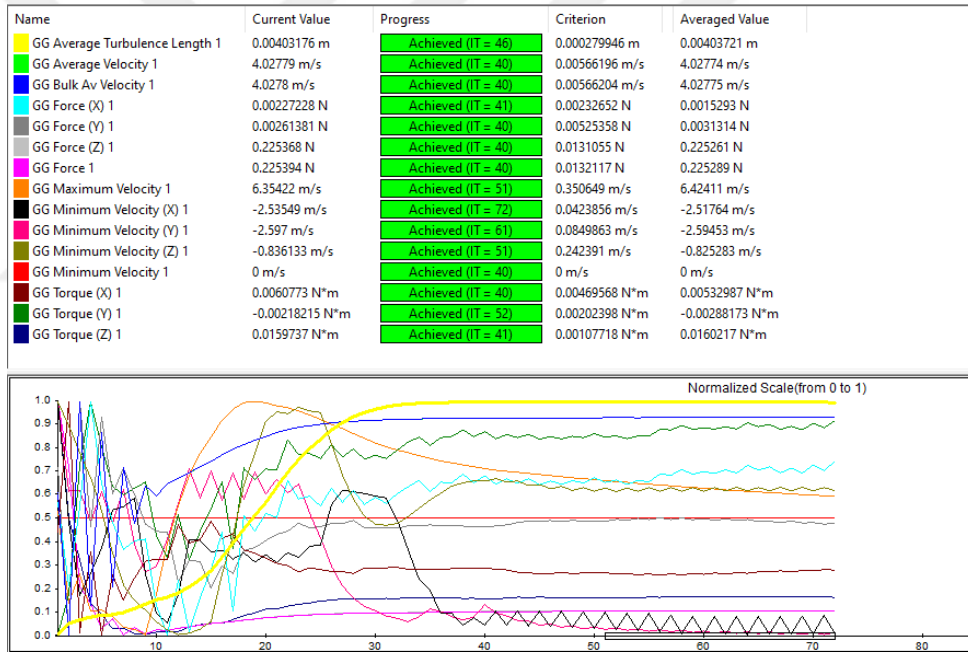
Şekil 5.53 200 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



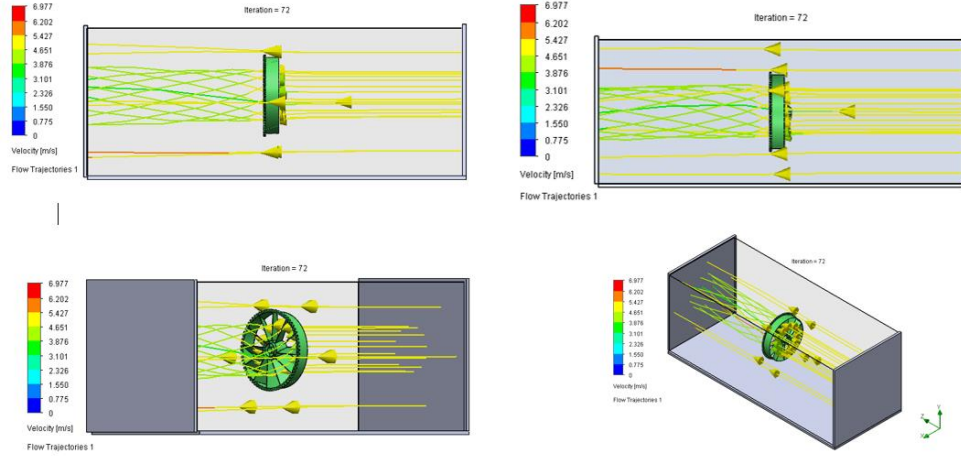
Şekil 5.54 200 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



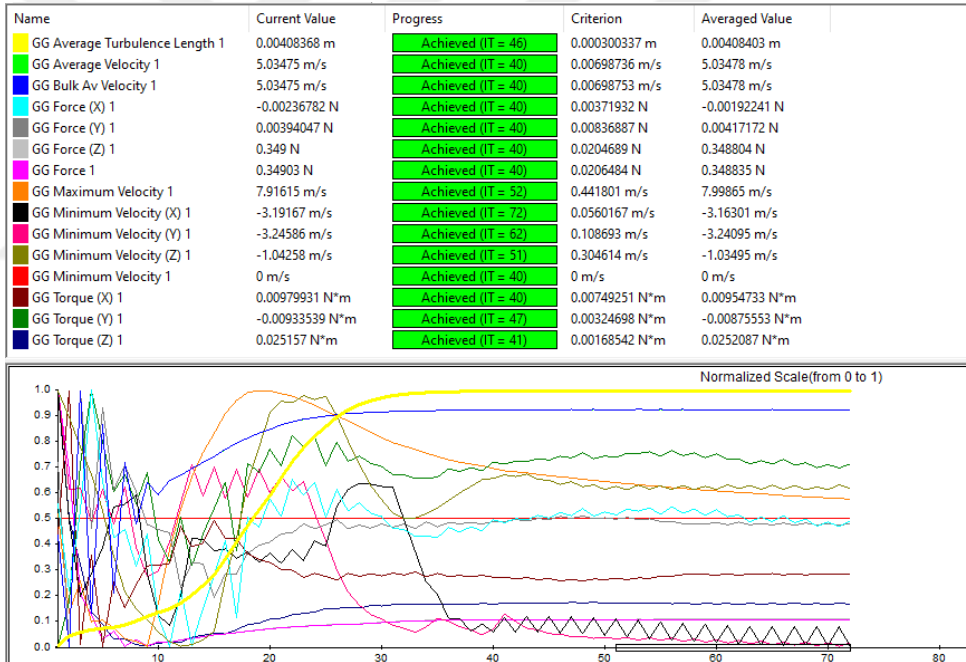
Şekil 5.55 200 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



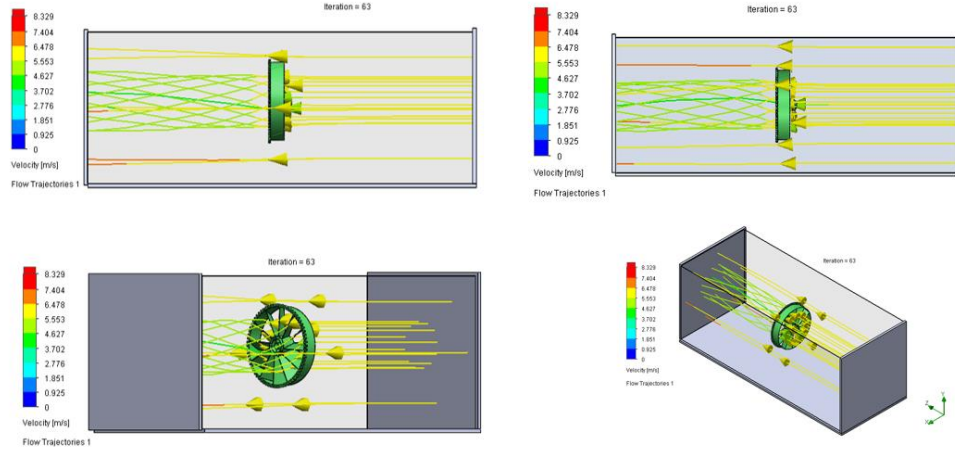
Şekil 5.56 200 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



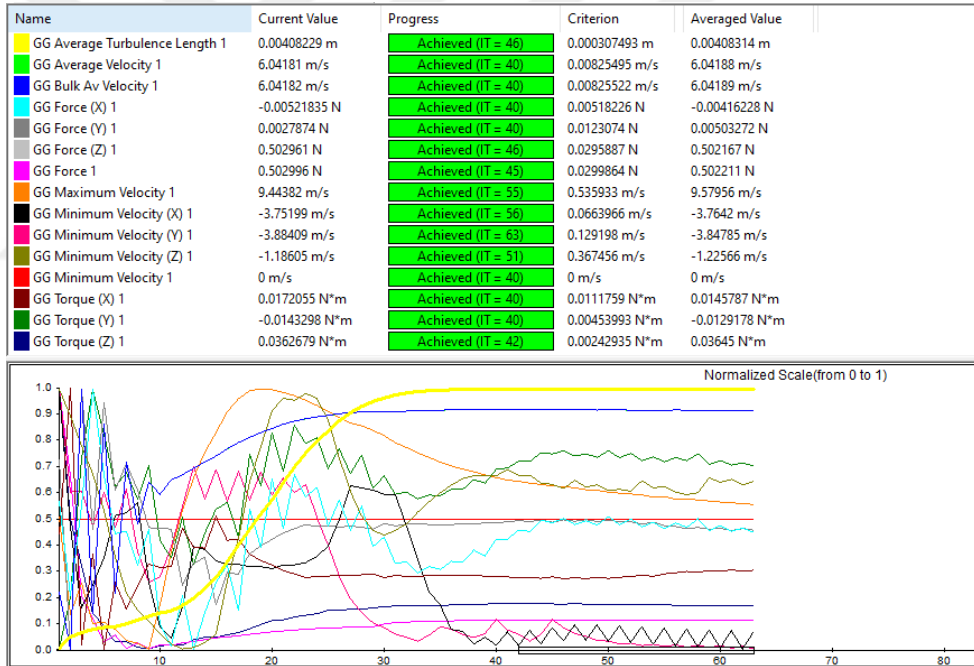
Şekil 5.57 200 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



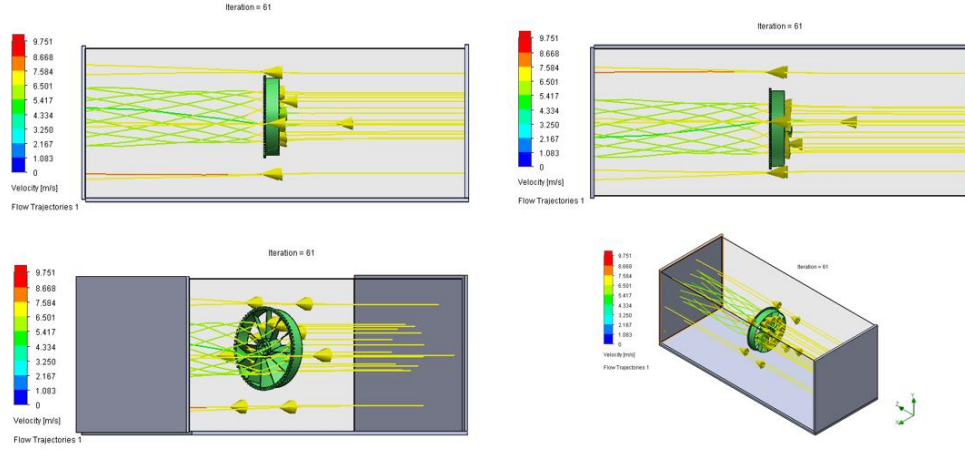
Şekil 5.58 200 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



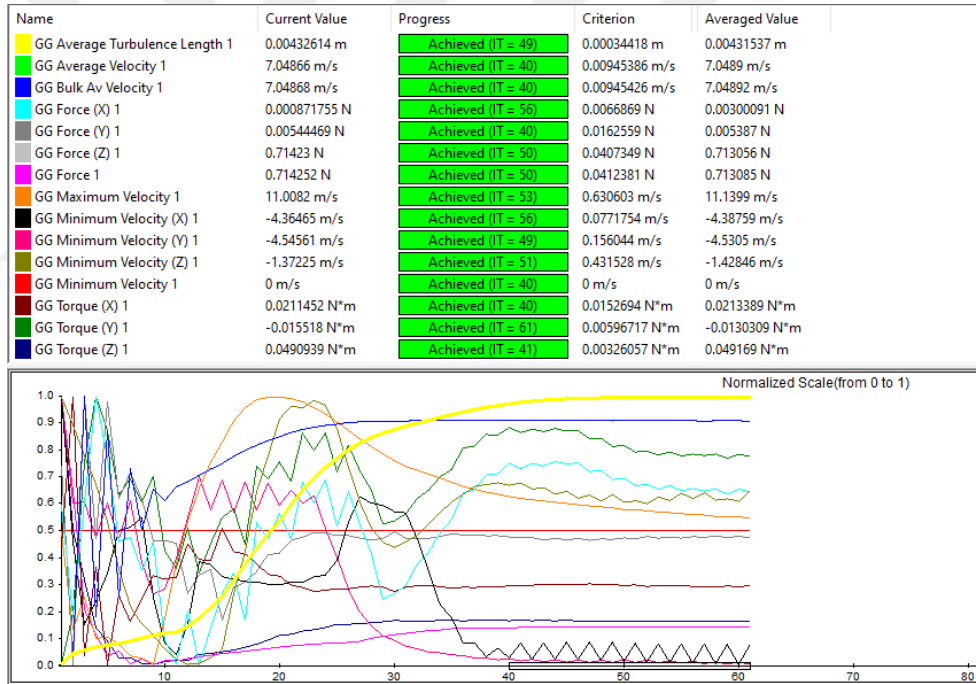
Şekil 5.59 200 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



Şekil 5.60 200 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



Şekil 5.61 200 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

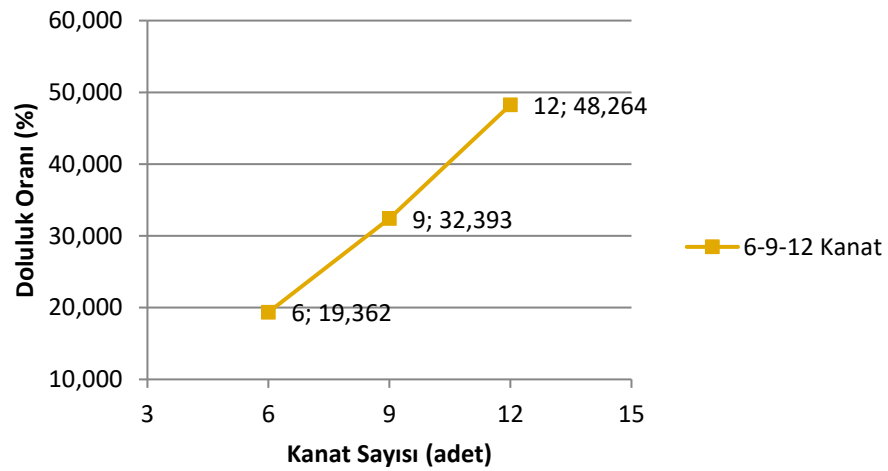


Şekil 5.62 200 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları

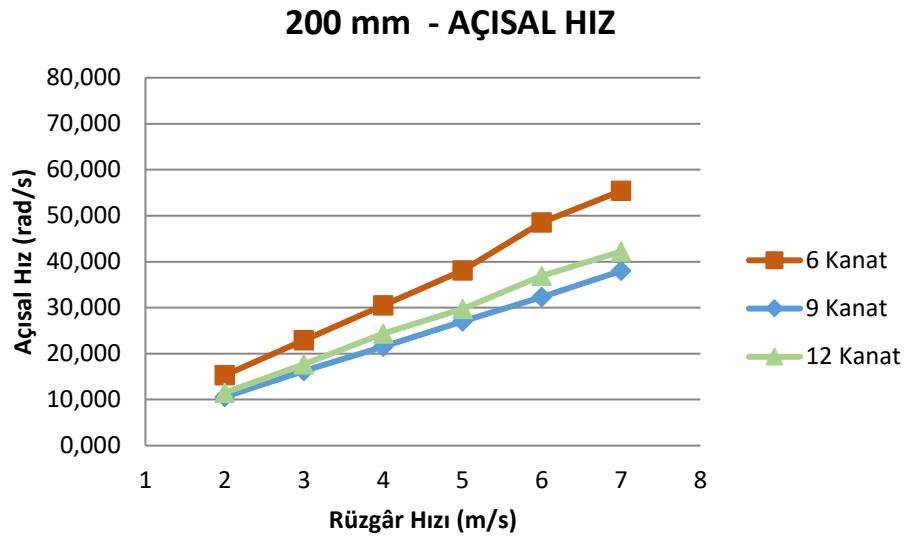
Çizelge 5.14 200 mm çaplı türbinlerin simülasyon ve hesap sonuçları

200 mm Türbin							
Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Açısal Hız (rad/s)	Kanat Uç Hız Oranı (λ)	Moment Katsayısı (Tork)	Devir (rpm)	Doluluk Oranı (%)	Ses Siddeti (dB)
6	2	15,3	1,663	0,012	96,0	19,362	12,76
6	3	22,9	1,661	0,240	191,0	19,362	24,55
6	4	30,5	1,657	0,045	273,0	19,362	35,64
6	5	38,1	1,657	0,070	287,0	19,362	43,24
6	6	48,5	1,657	0,100	382,0	19,362	47,60
6	7	55,4	1,656	0,135	478,0	19,362	49,49
9	2	10,6	1,565	0,206	91,0	32,393	0,00
9	3	16,2	1,643	0,071	98,0	32,393	0,00
9	4	21,5	1,657	0,032	187,0	32,393	26,82
9	5	27,0	1,663	0,011	189,0	32,393	27,83
9	6	32,3	1,542	0,017	273,0	32,393	41,95
9	7	38,0	1,557	0,021	287,0	32,393	47,44
12	2	11,5	1,476	0,045	94,0	48,264	0,00
12	3	17,7	1,395	0,045	106,0	48,264	13,27
12	4	24,4	1,395	0,072	188,0	48,264	27,65
12	5	29,7	1,394	0,013	192,0	48,264	38,40
12	6	36,9	1,386	0,021	288,0	48,264	44,84
12	7	42,2	1,391	0,027	378,0	48,264	50,65

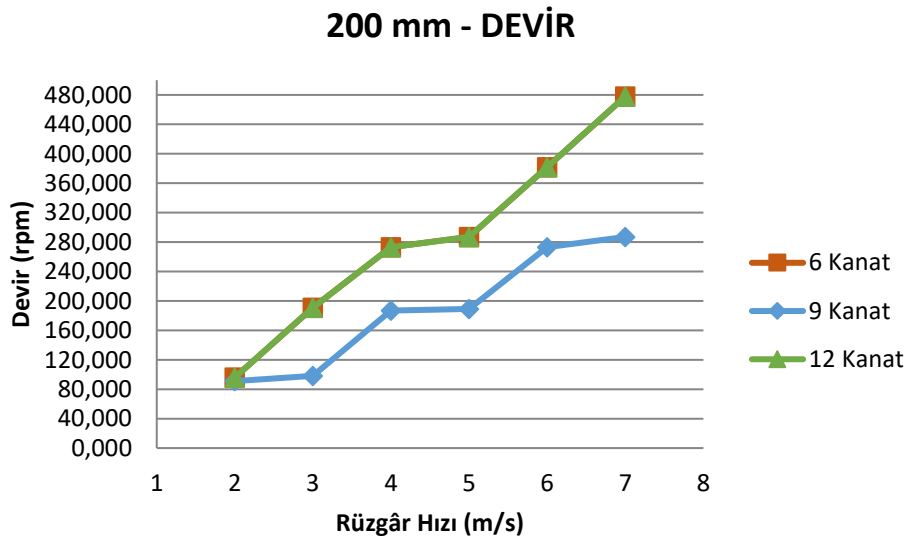
200 mm - DOLULUK ORANI



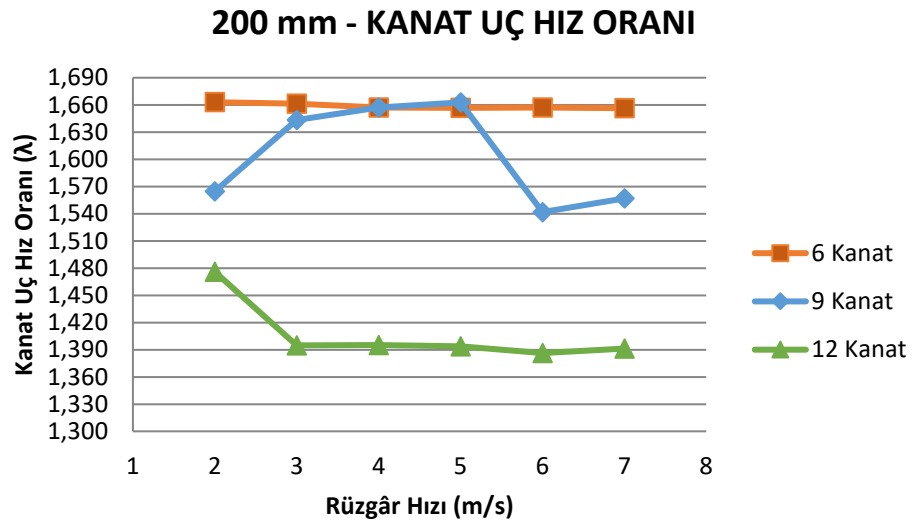
Şekil 5.63 200 mm türbinlerin doluluk grafiği



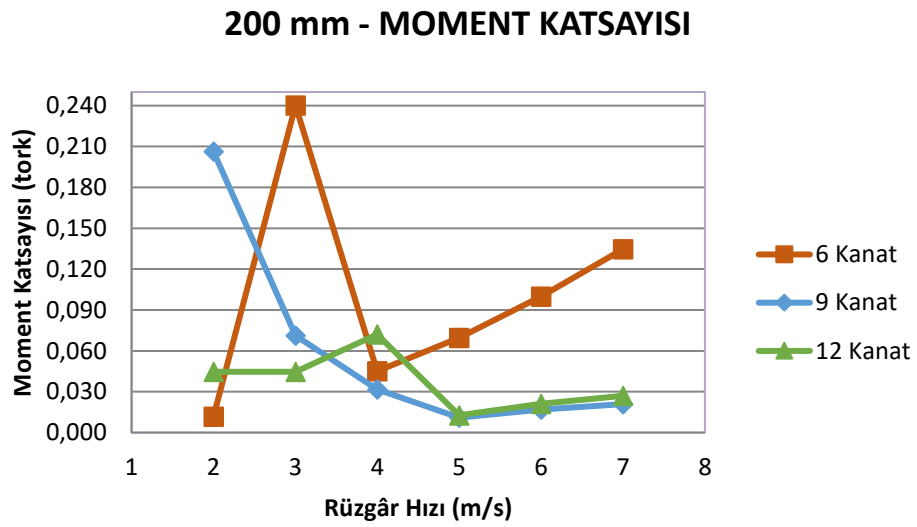
Şekil 5.64 200 mm türbinlerin açısal hız grafiği



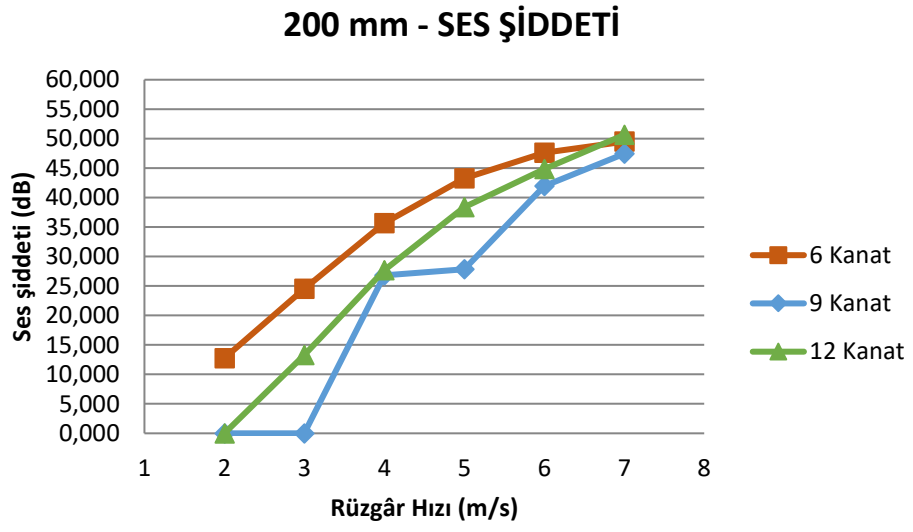
Şekil 5.65 200 mm türbinlerin devir grafiği



Şekil 5.66 200 mm türbinlerin kanat uç hız oranı grafiği



Şekil 5.67 200 mm türbinlerin moment katsayısı grafiği

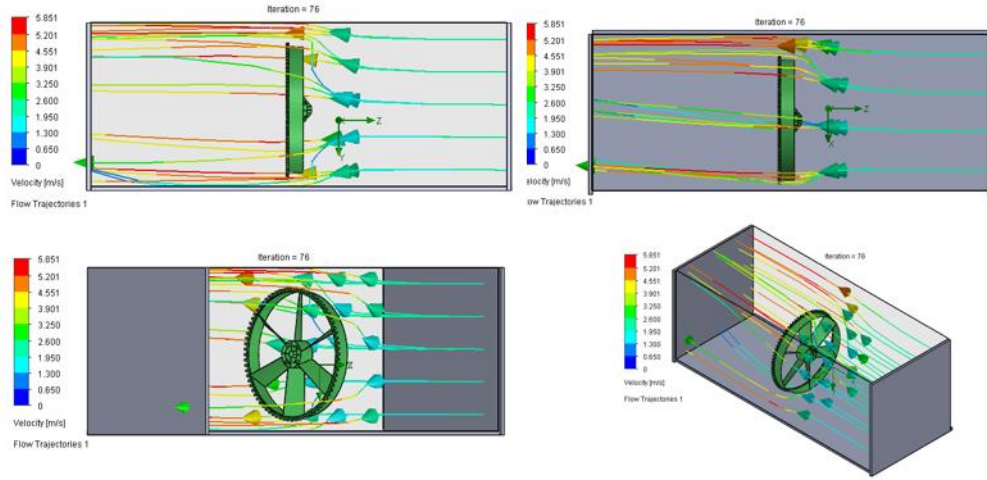


Şekil 5.68 200 mm türbinlerin ses şiddeti grafiği

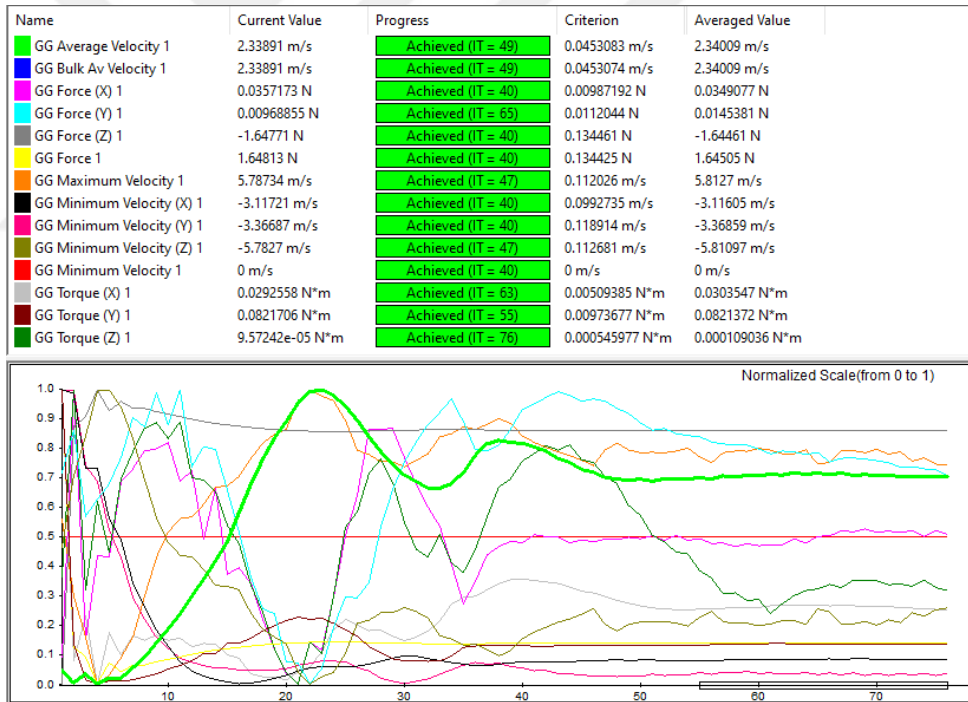
5.2.3.2. 300 mm Çaplı Türbin Simülasyonları ve Veri Analizi



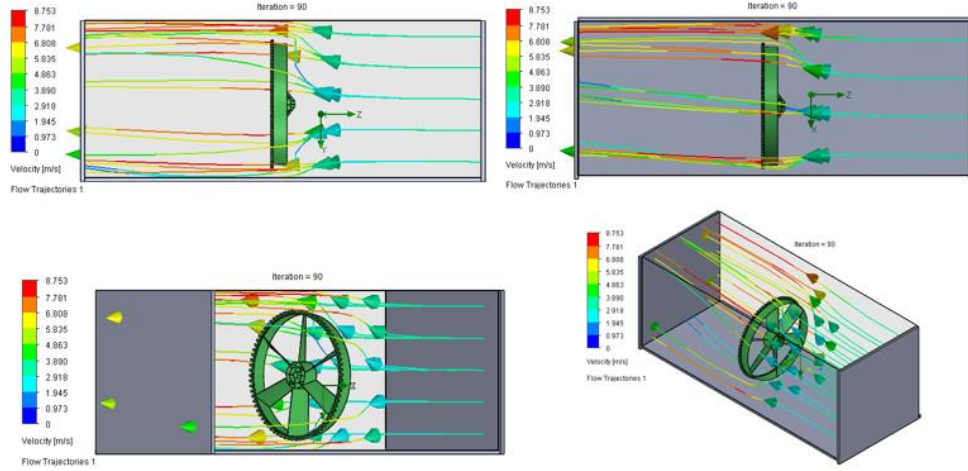
Şekil 5.69 300 mm - 6 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)



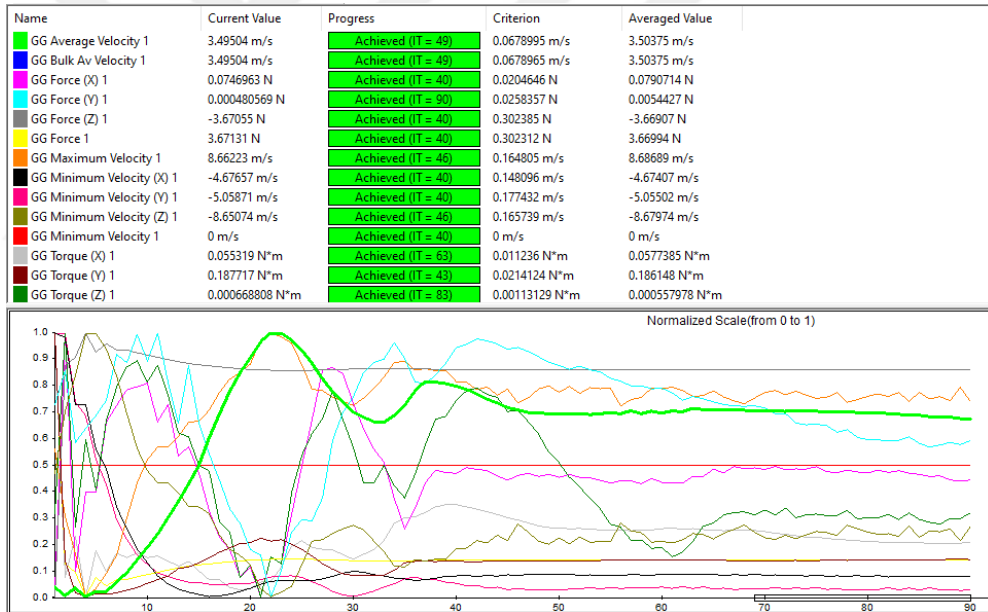
Şekil 5.70 300 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



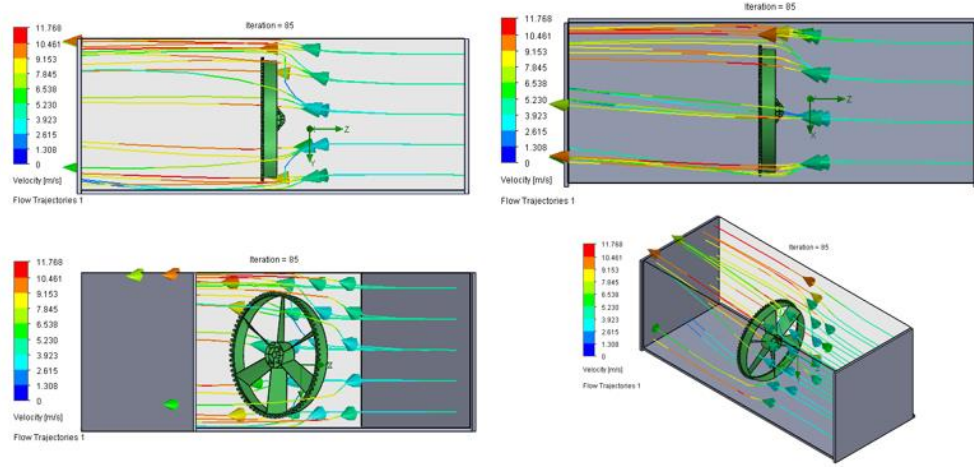
Şekil 5.71 300 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



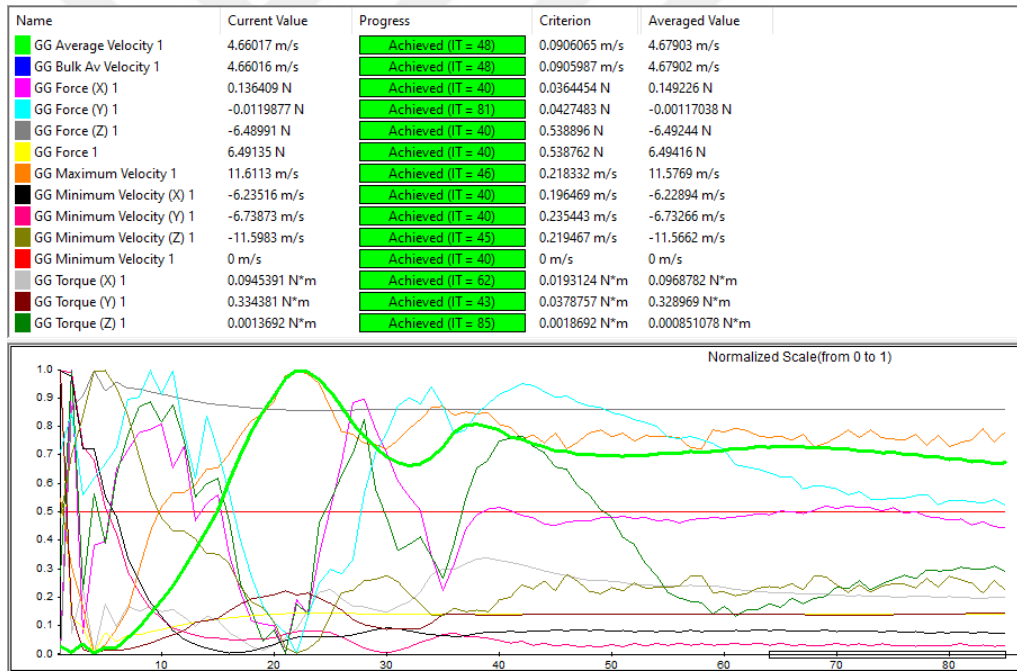
Şekil 5.72 300 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



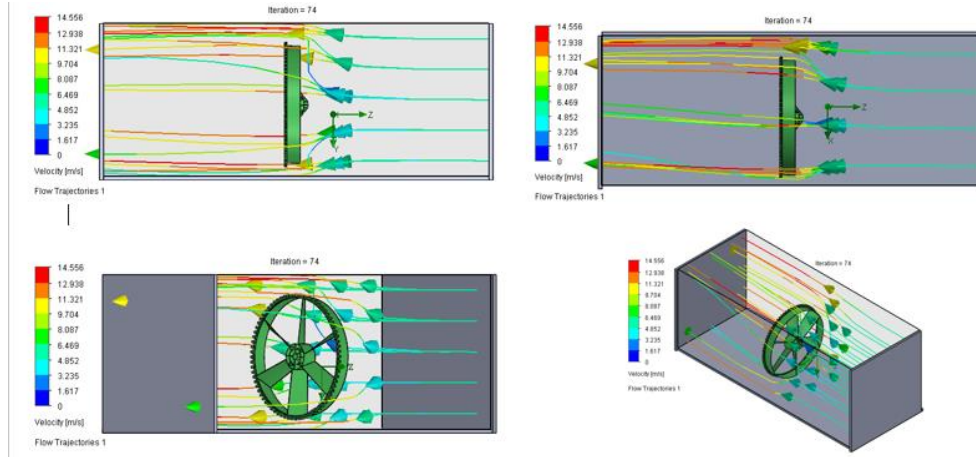
Şekil 5.73 300 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



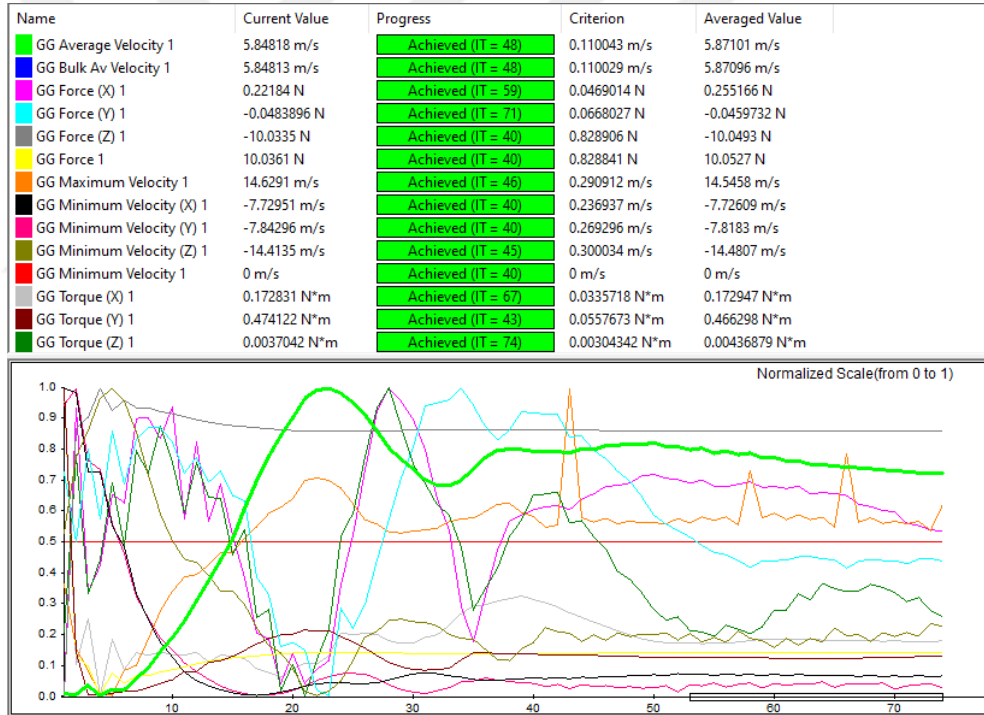
Şekil 5.74 300 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



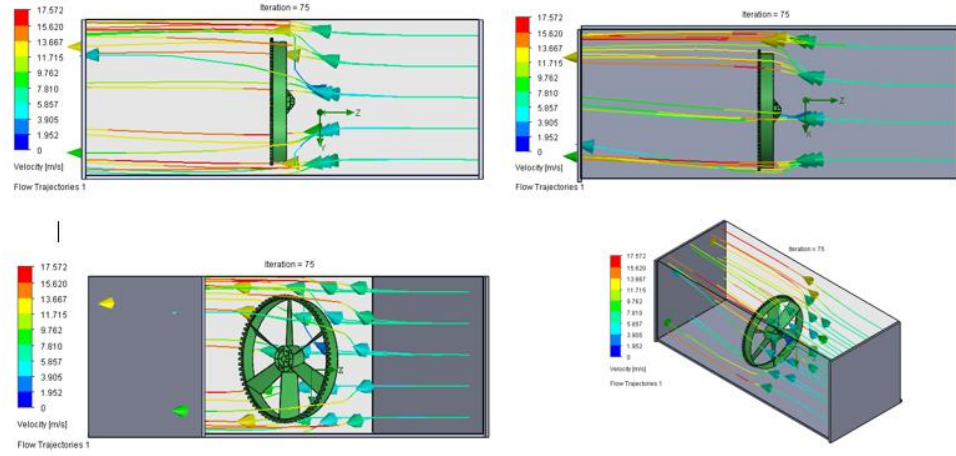
Şekil 5.75 300 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



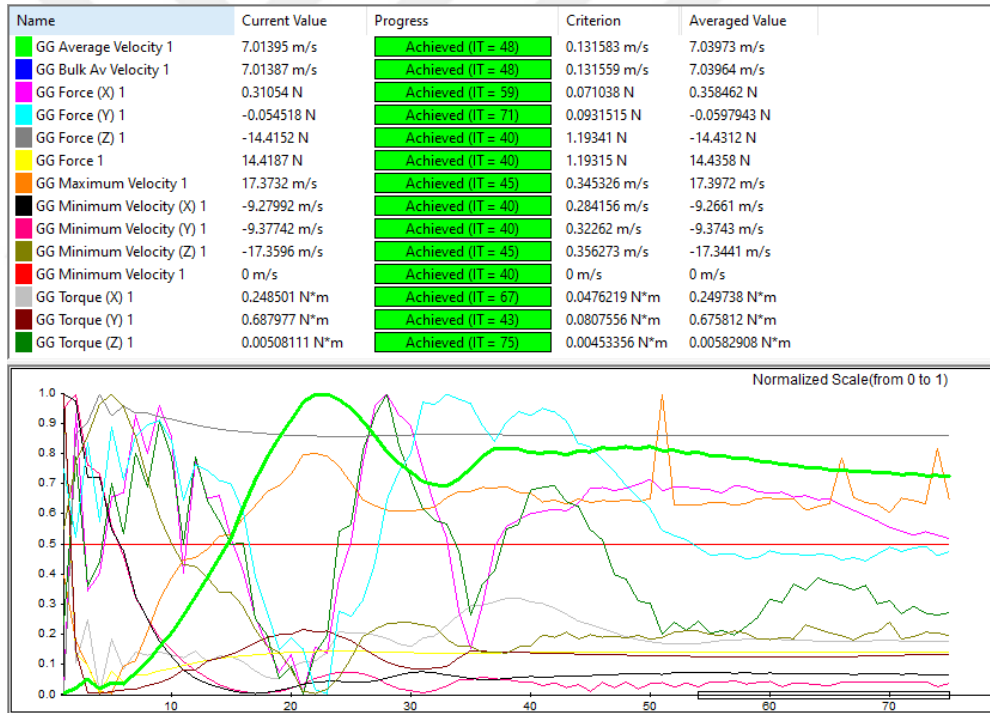
Şekil 5.76 300 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



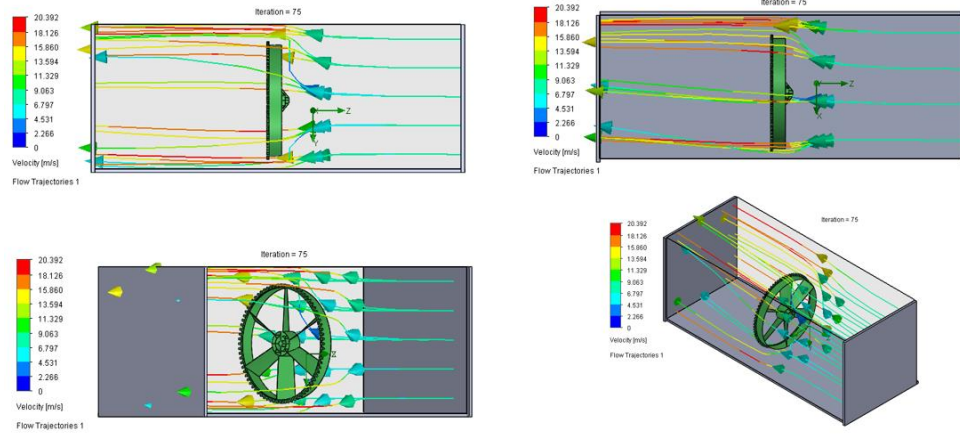
Şekil 5.77 300 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



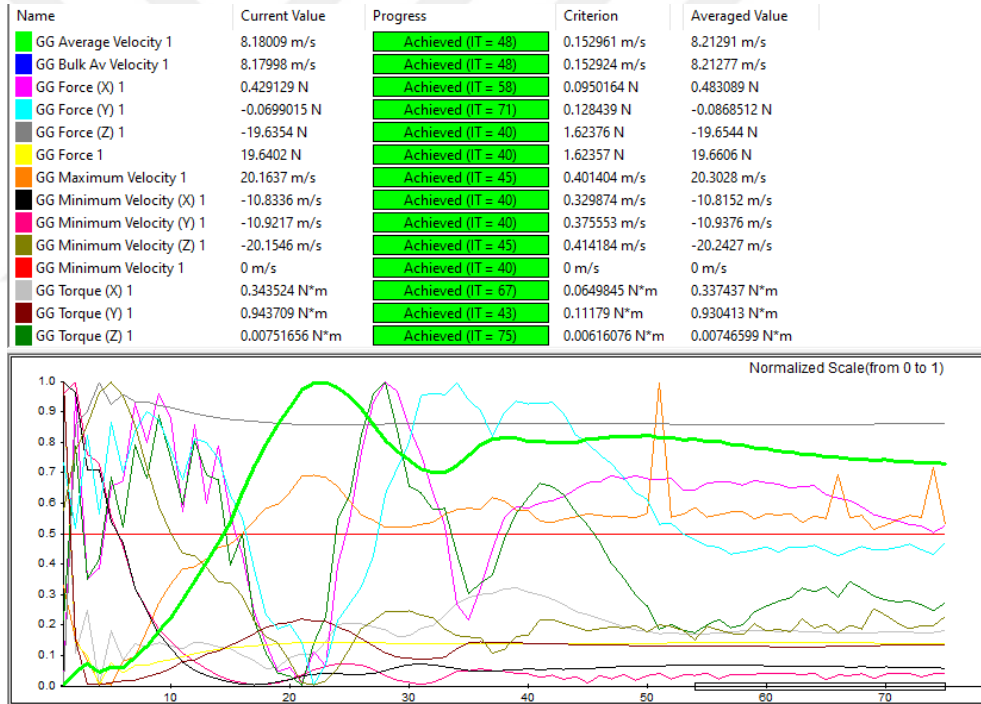
Şekil 5.78 300 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



Şekil 5.79 300 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



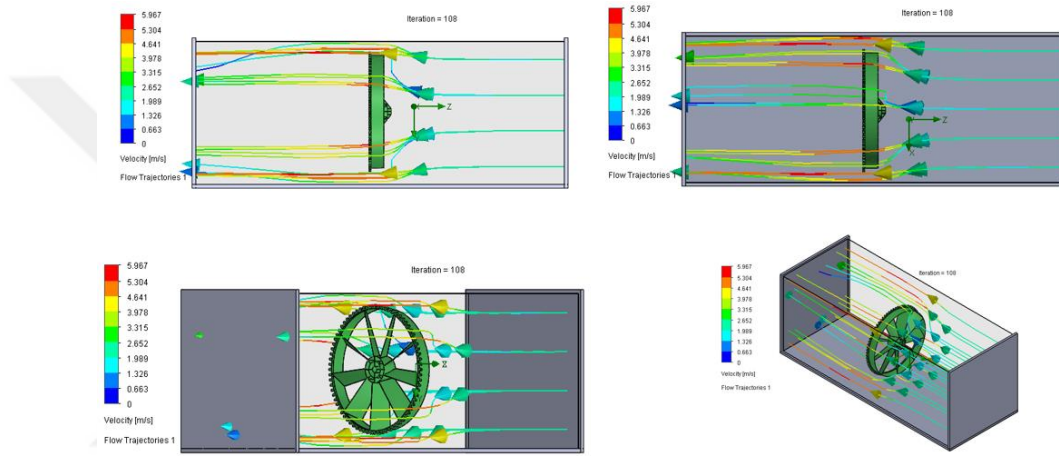
Şekil 5.80 300 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



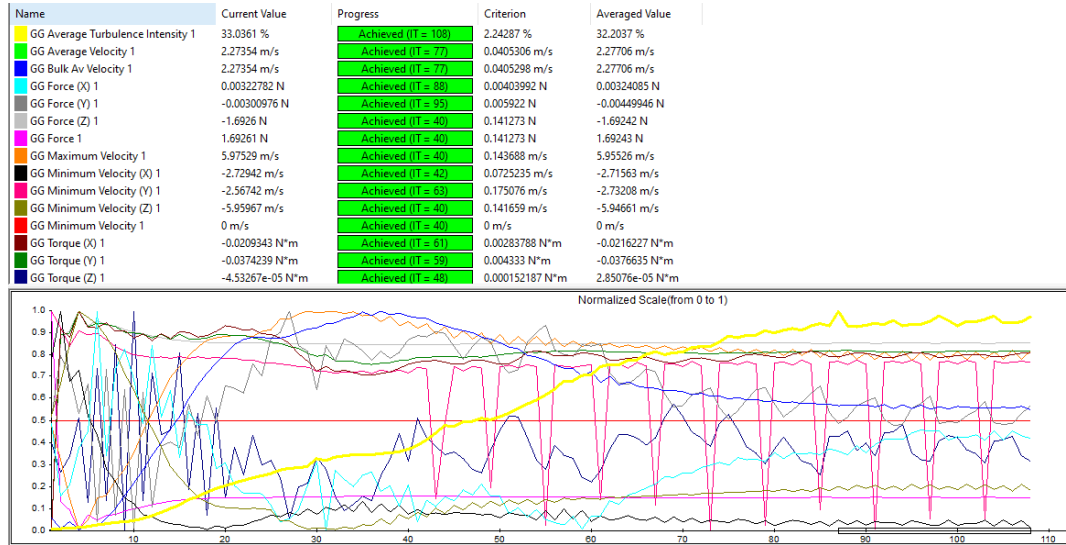
Şekil 5.81 300 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



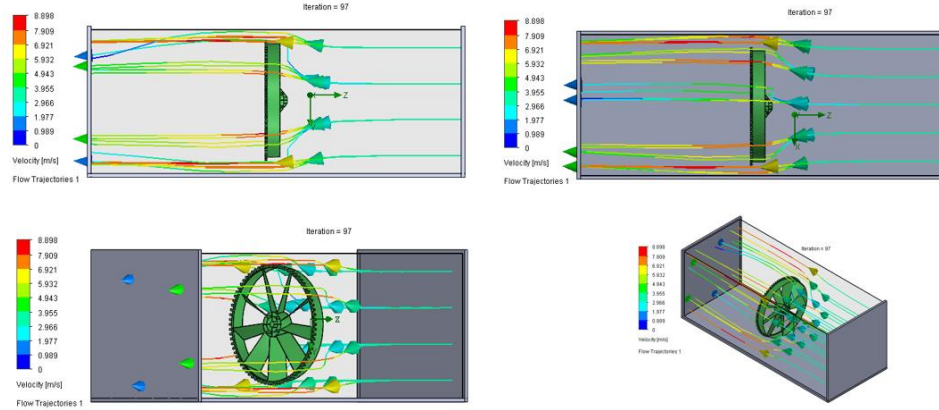
Şekil 5.82 300 mm - 9 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)



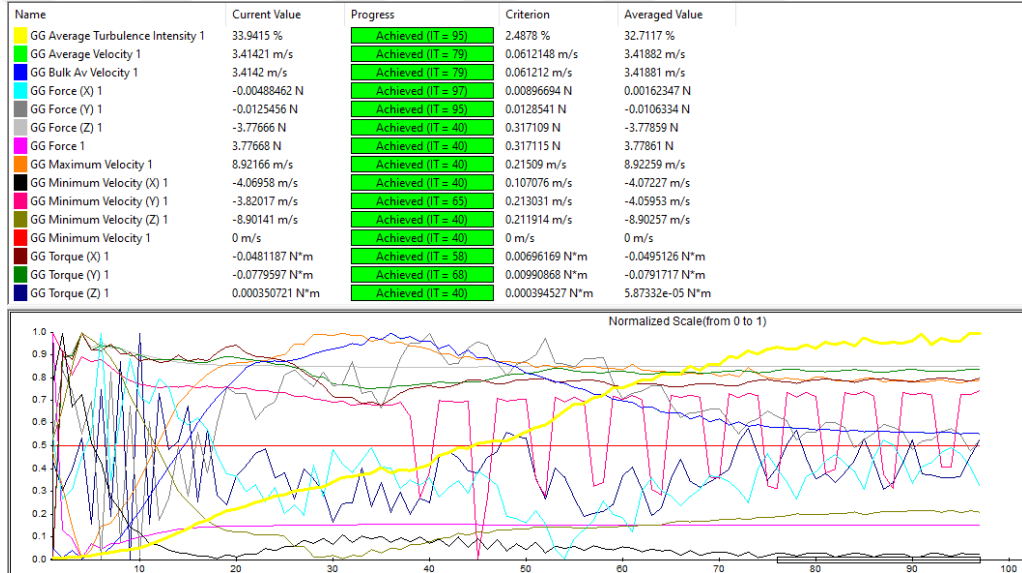
Şekil 5.83 300 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



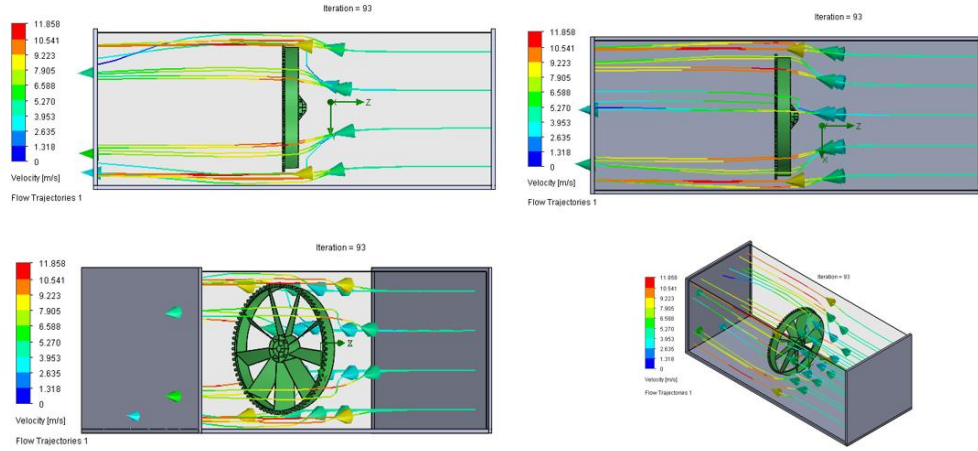
Şekil 5.84 300 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



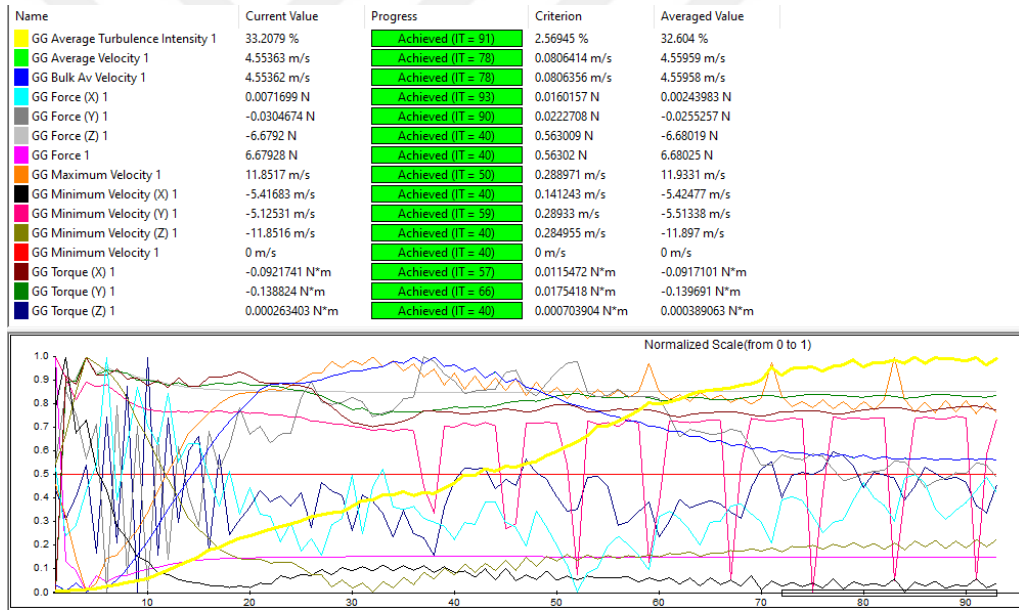
Şekil 5.85 300 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



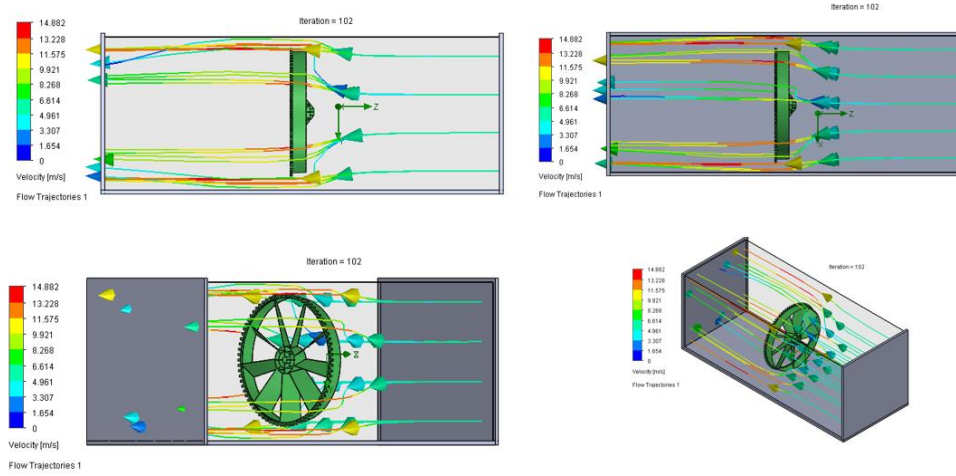
Şekil 5.86 300 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



Şekil 5.87 300 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

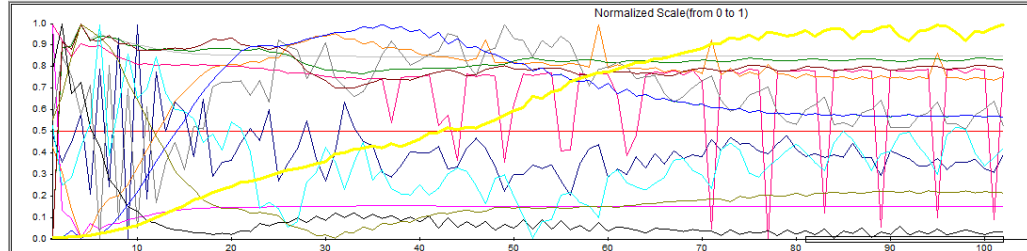


Şekil 5.88 300 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları

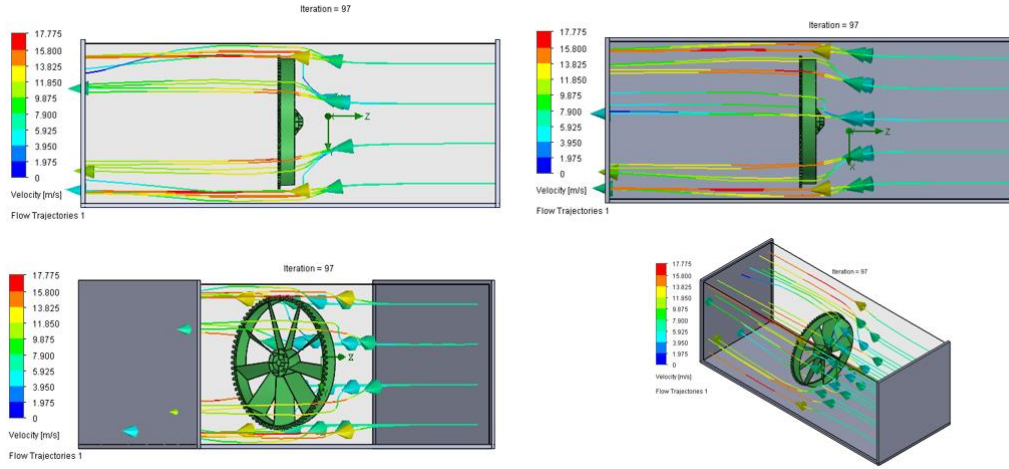


Şekil 5.89 300 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

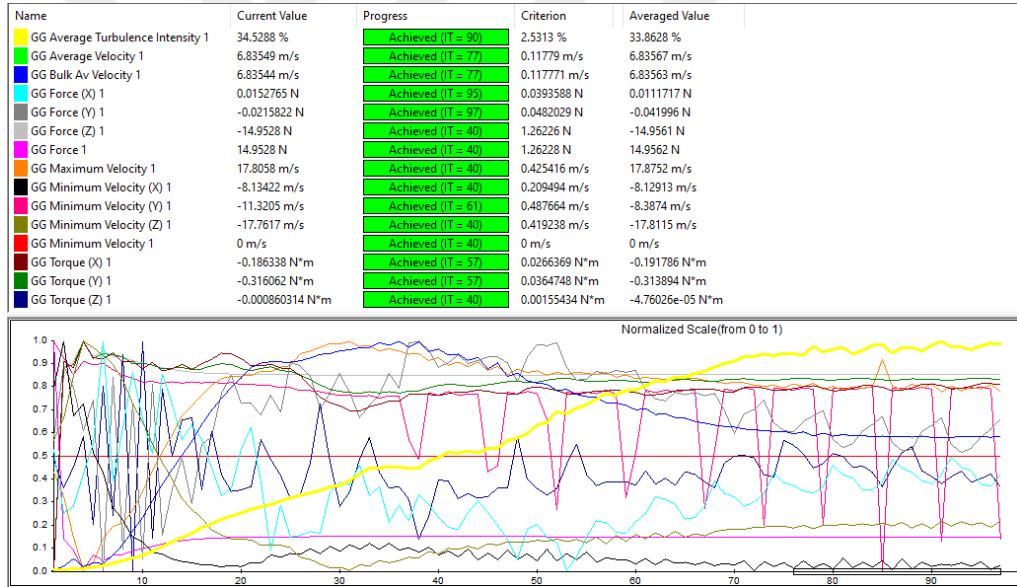
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Average Turbulence Intensity 1	34.966 %	Achieved (IT = 102)	2.4247 %	33.8284 %
GG Average Velocity 1	5.69018 m/s	Achieved (IT = 79)	0.0990831 m/s	5.69407 m/s
GG Bulk Av Velocity 1	5.69016 m/s	Achieved (IT = 79)	0.0990722 m/s	5.69404 m/s
GG Force (X) 1	0.0111989 N	Achieved (IT = 94)	0.02842 N	0.0101744 N
GG Force (Y) 1	-0.040272 N	Achieved (IT = 99)	0.0325084 N	-0.0293237 N
GG Force (Z) 1	-10.4112 N	Achieved (IT = 40)	0.878165 N	-10.4119 N
GG Force 1	10.4113 N	Achieved (IT = 40)	0.878175 N	10.4119 N
GG Maximum Velocity 1	14.8743 m/s	Achieved (IT = 41)	0.357958 m/s	14.8737 m/s
GG Minimum Velocity (X) 1	-6.77557 m/s	Achieved (IT = 40)	0.175178 m/s	-6.77716 m/s
GG Minimum Velocity (Y) 1	-6.40495 m/s	Achieved (IT = 66)	0.404213 m/s	-6.9769 m/s
GG Minimum Velocity (Z) 1	-14.8259 m/s	Achieved (IT = 40)	0.352561 m/s	-14.8189 m/s
GG Minimum Velocity 1	0 m/s	Achieved (IT = 40)	0 m/s	0 m/s
GG Torque (X) 1	-0.137193 N*m	Achieved (IT = 60)	0.0180713 N*m	-0.134744 N*m
GG Torque (Y) 1	-0.219396 N*m	Achieved (IT = 38)	0.025776 N*m	-0.217887 N*m
GG Torque (Z) 1	-0.000406435 N*m	Achieved (IT = 40)	0.00109394 N*m	-0.000574544 N*m



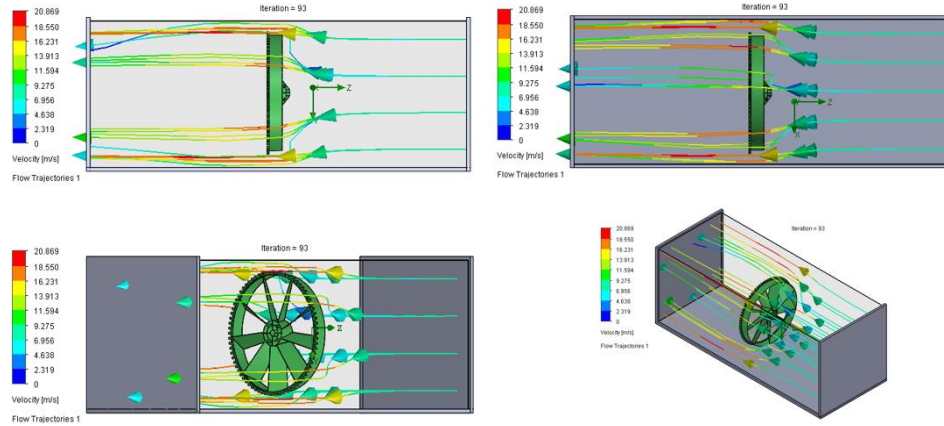
Şekil 5.90 300 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



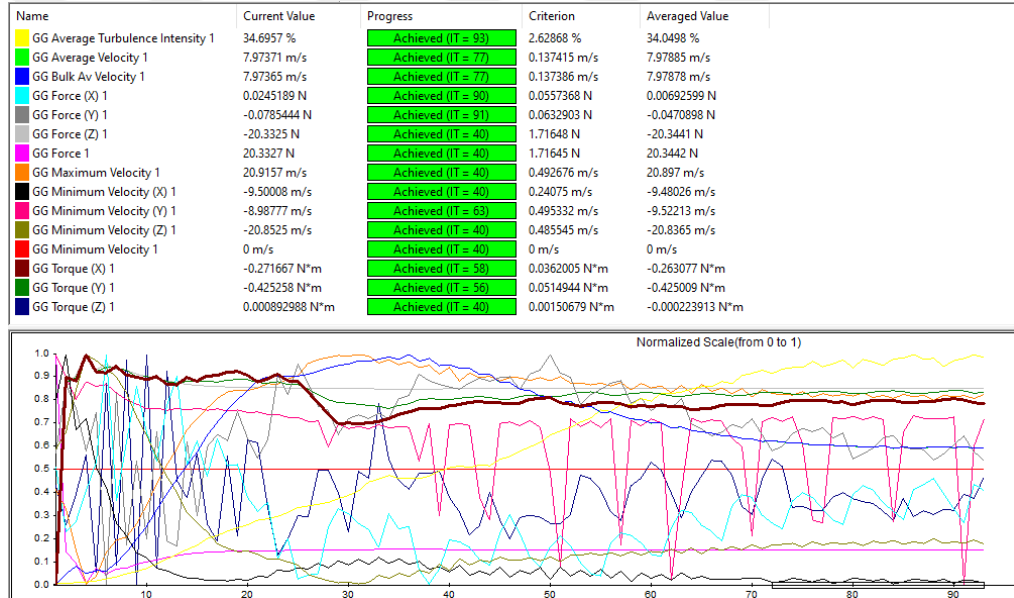
Şekil 5.91 300 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



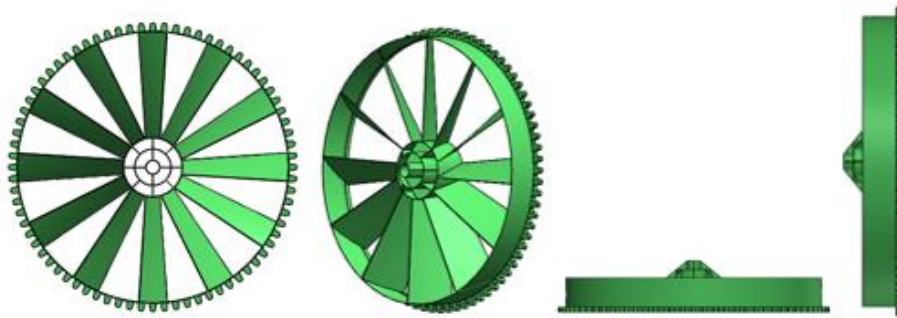
Şekil 5.92 300 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



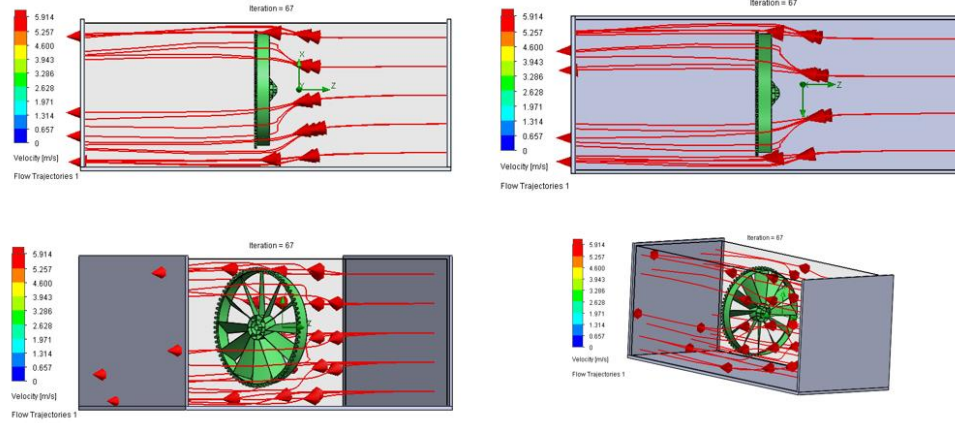
Şekil 5.93 300 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



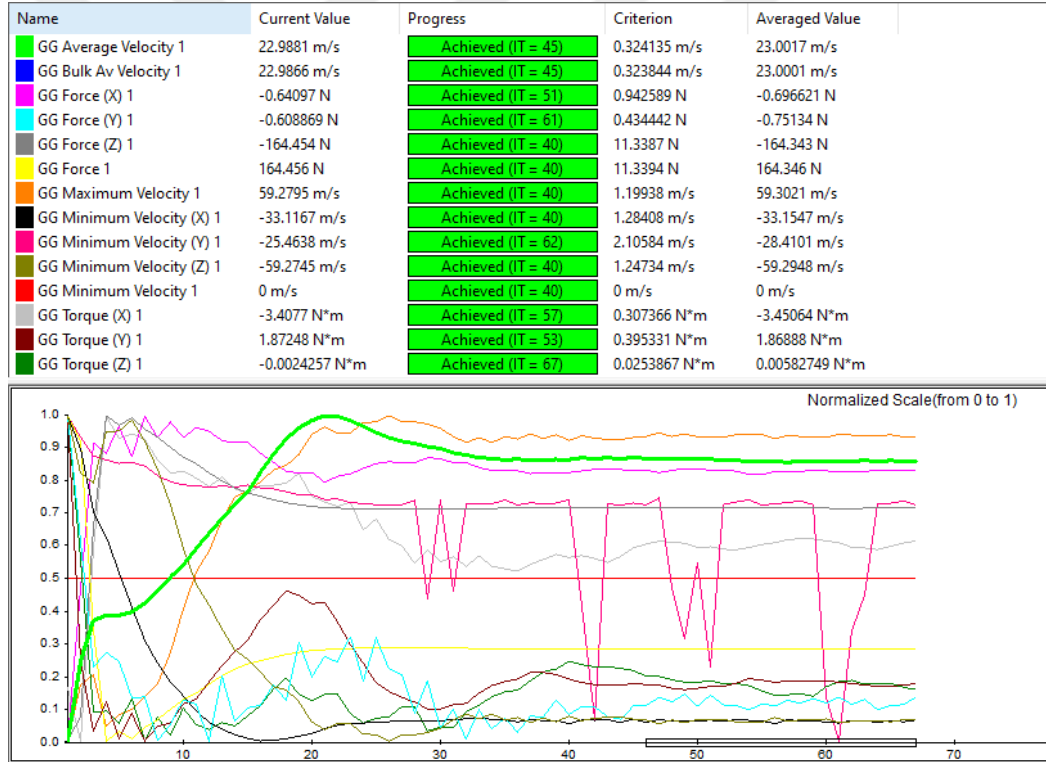
Şekil 5.94 300 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



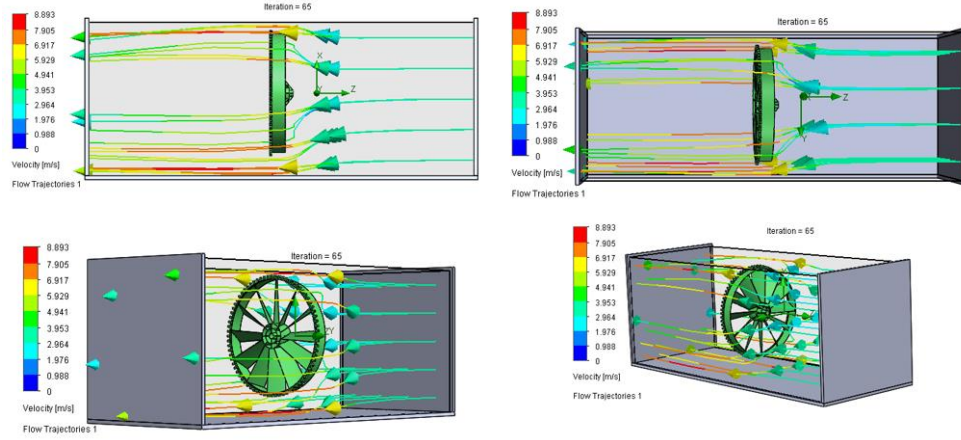
Şekil 5.95 300 mm - 12 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)



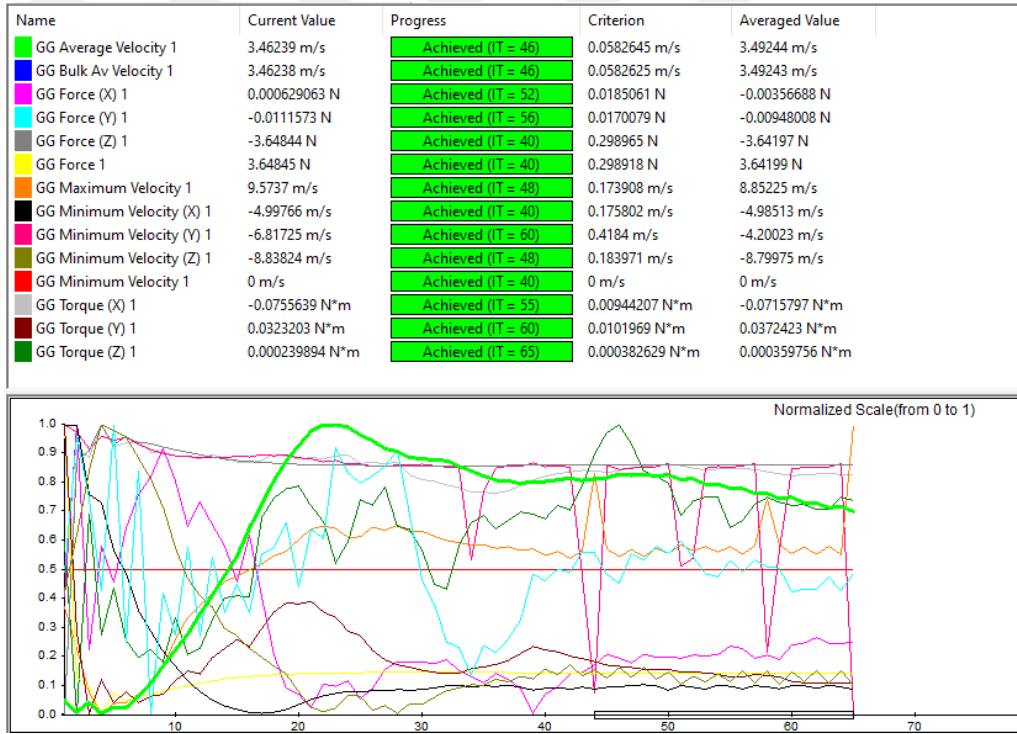
Şekil 5.96 300 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



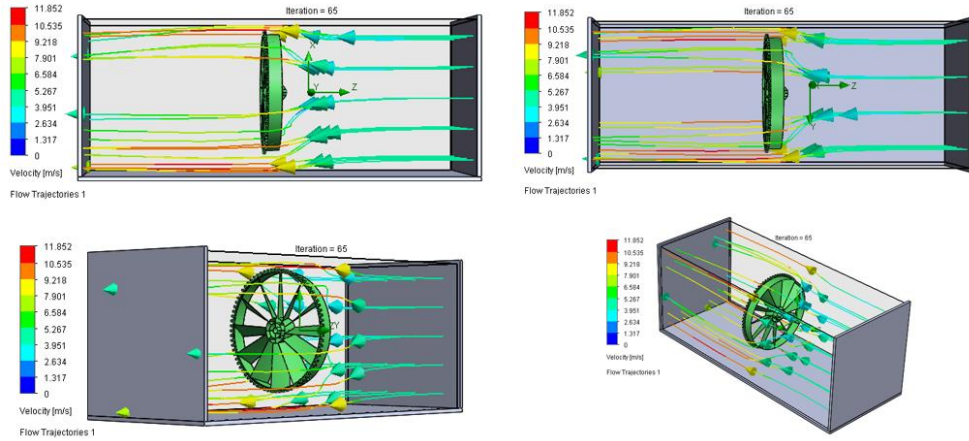
Şekil 5.97 300 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



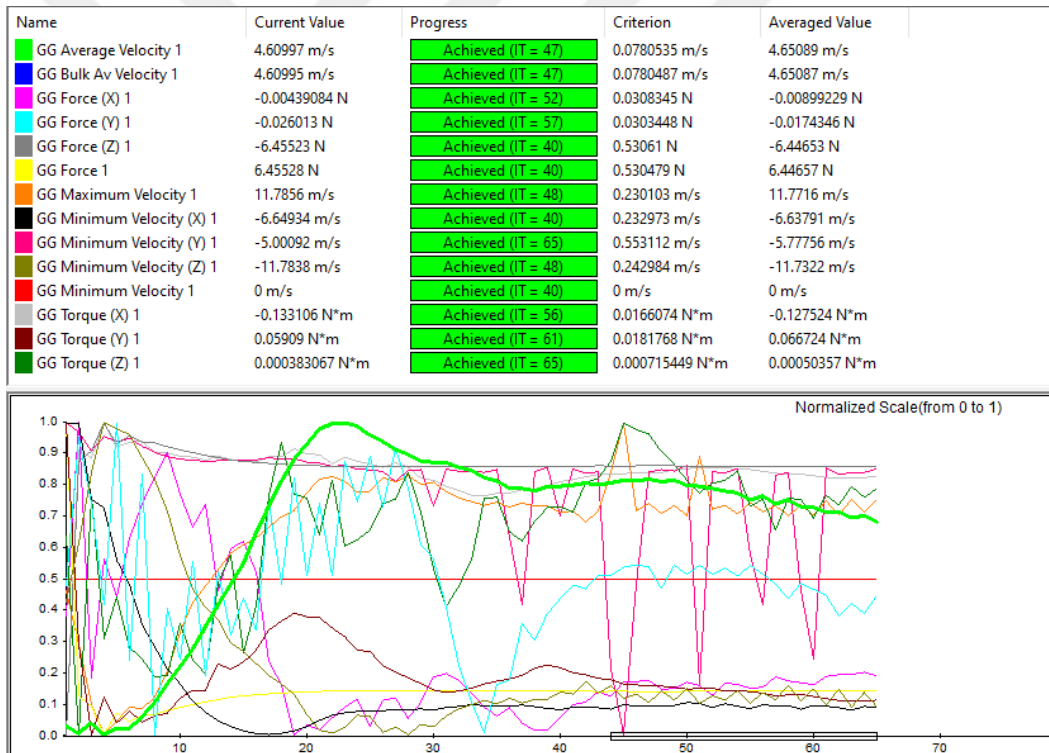
Şekil 5.98 300 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



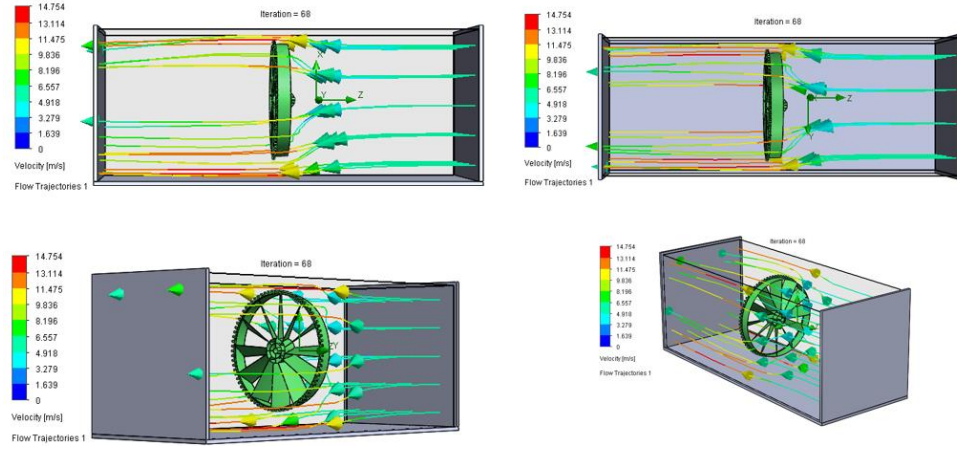
Şekil 5.99 300 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



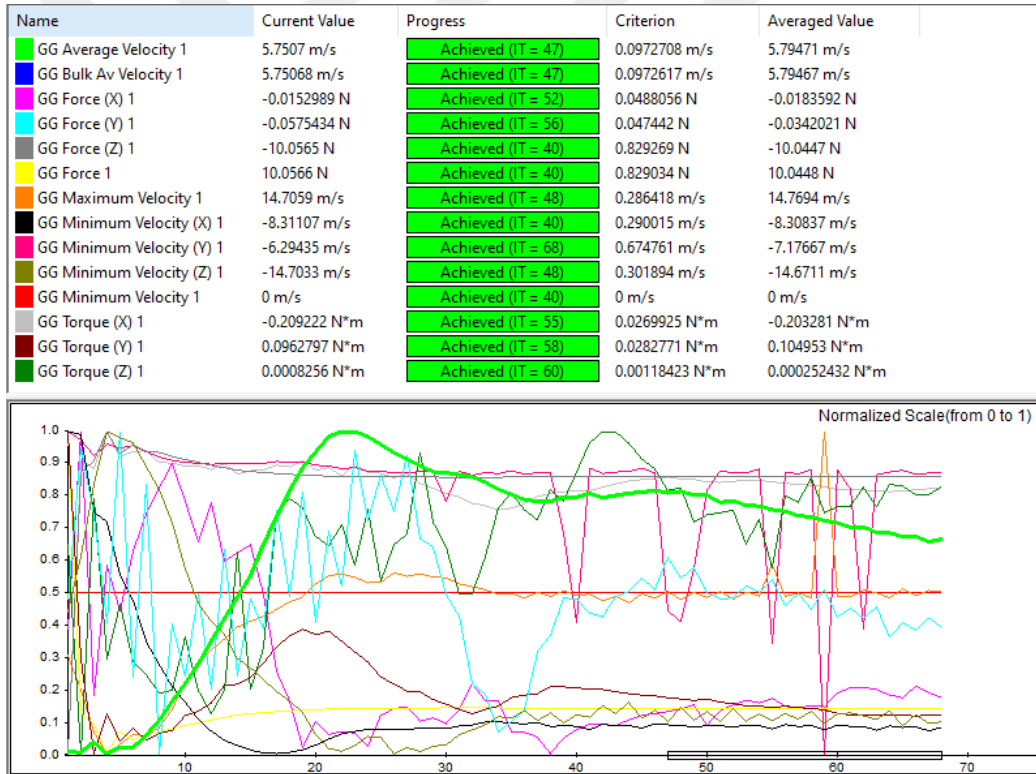
Şekil 5.100 300 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



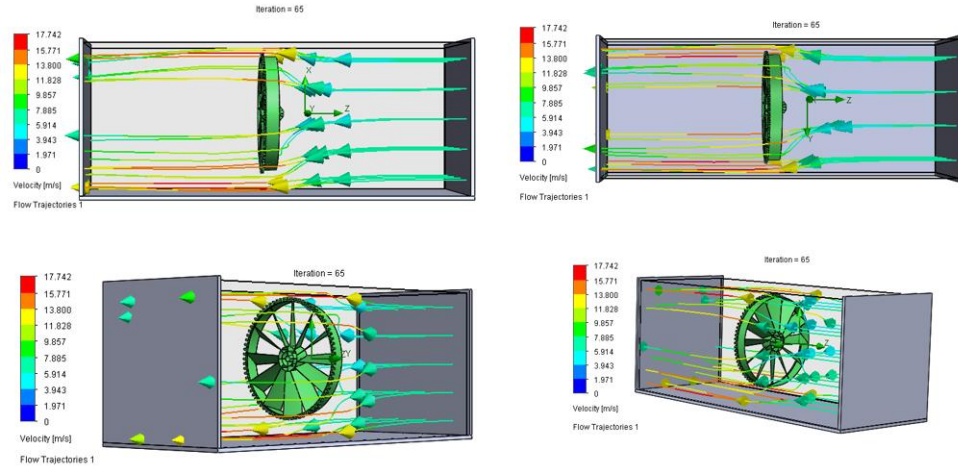
Şekil 5.101 300 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



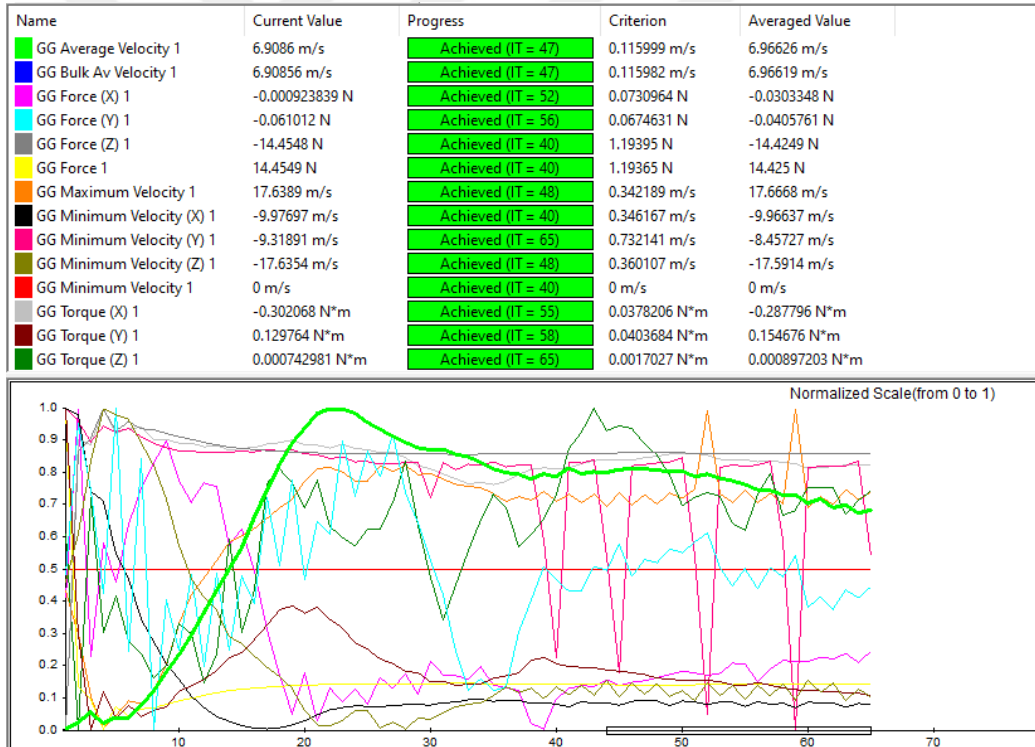
Şekil 5.102 300 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



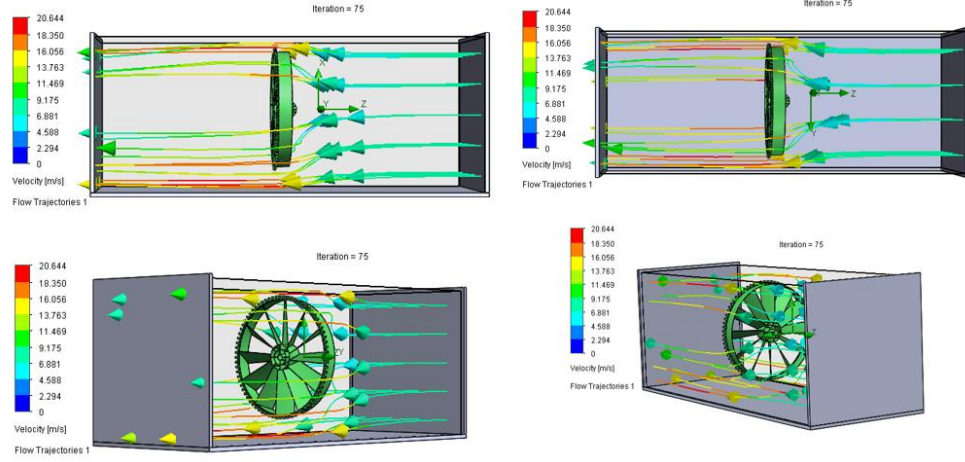
Şekil 5.103 300 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



Şekil 5.104 300 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

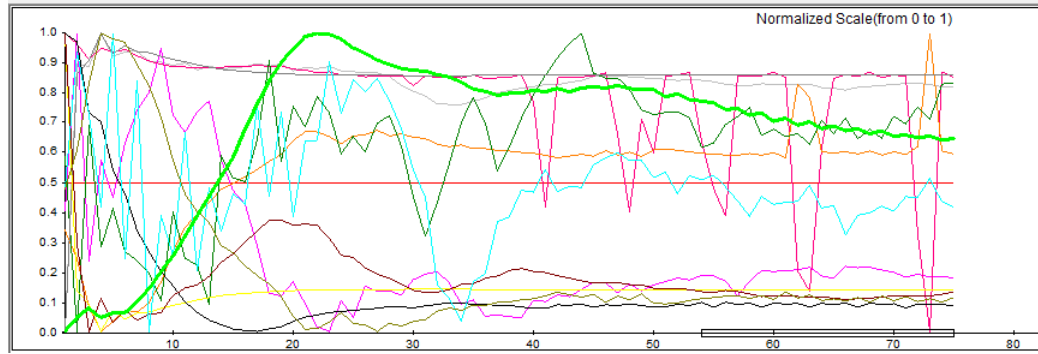


Şekil 5.105 300 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



Şekil 5.106 300 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Average Velocity 1	8.01602 m/s	Achieved (IT = 46)	0.134509 m/s	8.05687 m/s
GG Bulk Av Velocity 1	8.01598 m/s	Achieved (IT = 46)	0.134483 m/s	8.05681 m/s
GG Force (X) 1	-0.0477498 N	Achieved (IT = 51)	0.105617 N	-0.0388225 N
GG Force (Y) 1	-0.0990901 N	Achieved (IT = 55)	0.0929752 N	-0.0879798 N
GG Force (Z) 1	-19.6284 N	Achieved (IT = 40)	1.62154 N	-19.646 N
GG Force 1	19.6287 N	Achieved (IT = 40)	1.62122 N	19.6463 N
GG Maximum Velocity 1	20.5285 m/s	Achieved (IT = 40)	0.397316 m/s	20.694 m/s
GG Minimum Velocity (X) 1	-11.5898 m/s	Achieved (IT = 40)	0.402935 m/s	-11.5805 m/s
GG Minimum Velocity (Y) 1	-8.81798 m/s	Achieved (IT = 75)	0.795666 m/s	-10.3739 m/s
GG Minimum Velocity (Z) 1	-20.5257 m/s	Achieved (IT = 40)	0.417402 m/s	-20.533 m/s
GG Minimum Velocity 1	0 m/s	Achieved (IT = 40)	0 m/s	0 m/s
GG Torque (X) 1	-0.417695 N*m	Achieved (IT = 55)	0.0517635 N*m	-0.408834 N*m
GG Torque (Y) 1	0.205682 N*m	Achieved (IT = 60)	0.0533242 N*m	0.193996 N*m
GG Torque (Z) 1	0.00348446 N*m	Achieved (IT = 63)	0.00260202 N*m	0.000618751 N*m

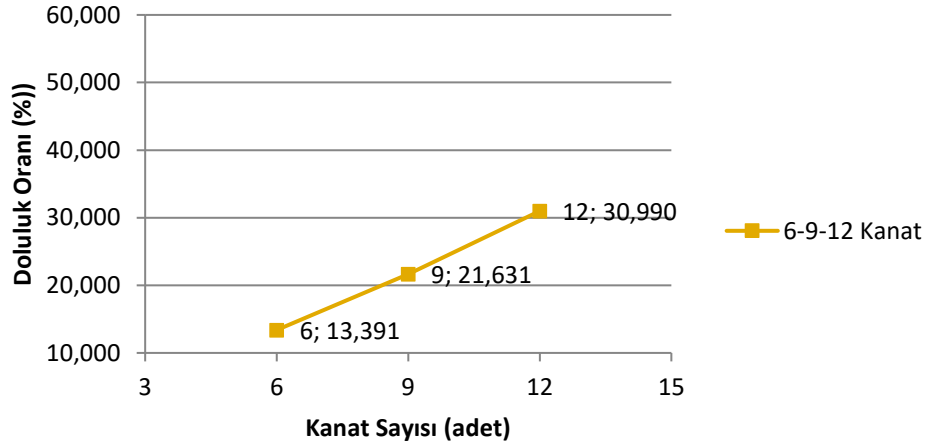


Şekil 5.107 300 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları

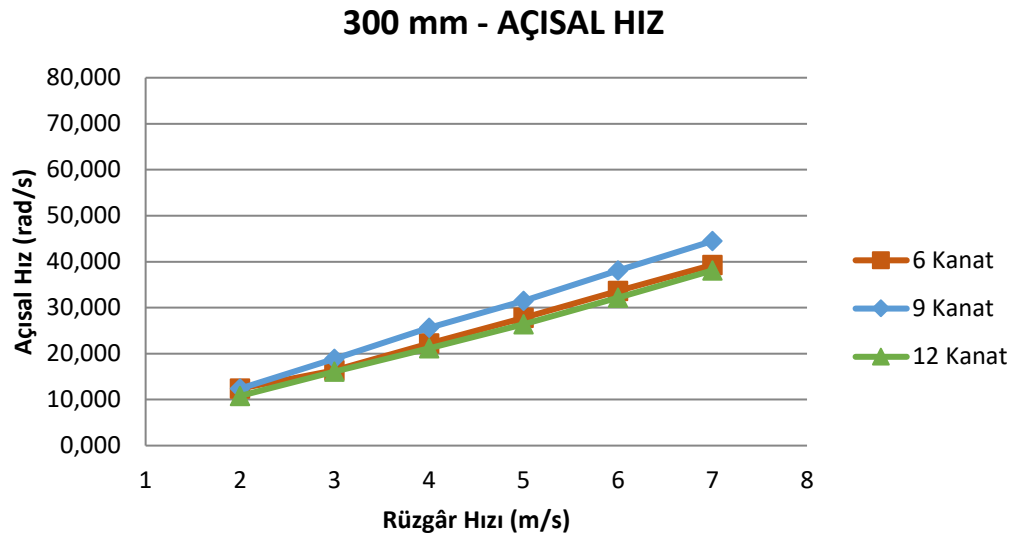
Çizelge 5.15 300 mm çaplı türbinlerin simülasyon ve hesap sonuçları

300 mm Türbin							
Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Açısal Hız (rad/s)	Kanat Uç Hız Oranı (λ)	Moment Katsayısı (Tork)	Devir (rpm)	Doluluk Oranı (%)	Ses Siddeti (dB)
6	2	12,4	2,913	0,078	64,0	13,391	12,22
6	3	16,4	2,922	0,301	124,0	13,391	26,38
6	4	22,2	2,908	0,320	193,0	13,391	36,50
6	5	27,8	2,911	0,505	255,0	13,391	44,10
6	6	33,6	2,928	0,732	314,0	13,391	50,12
6	7	39,3	2,912	1,005	341,0	13,391	55,29
9	2	12,4	2,977	0,043	64,0	21,631	20,88
9	3	18,9	2,966	0,092	132,0	21,631	22,23
9	4	25,6	2,964	0,167	196,0	21,631	34,67
9	5	31,5	2,967	0,258	264,0	21,631	57,14
9	6	38,1	2,962	0,367	328,0	21,631	46,16
9	7	44,5	2,974	0,505	386,0	21,631	64,77
12	2	10,8	2,957	0,037	66,0	30,990	11,78
12	3	16,1	2,964	0,082	131,0	30,990	26,60
12	4	21,2	2,963	0,145	198,0	30,990	35,95
12	5	26,4	2,951	0,230	234,0	30,990	43,51
12	6	32,2	2,957	0,329	296,0	30,990	49,70
12	7	38,1	2,949	0,466	308,0	30,990	53,38

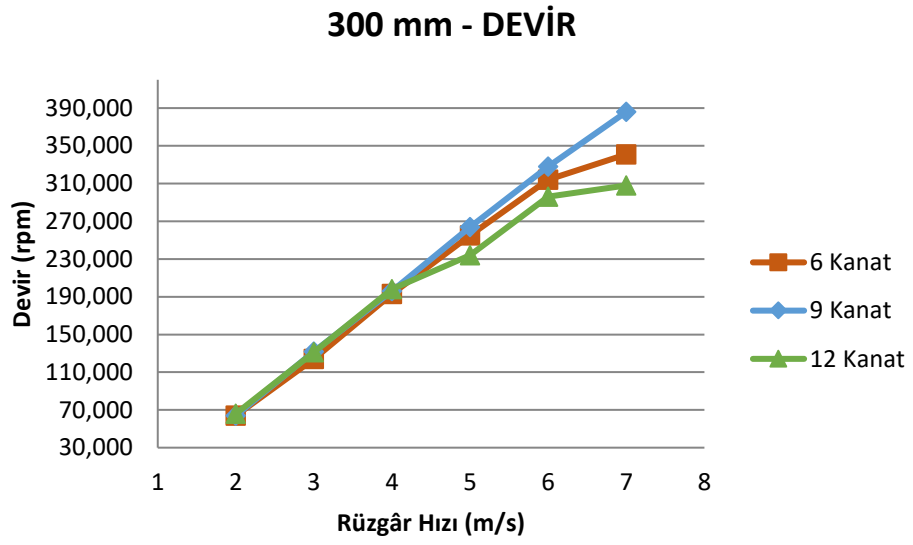
300 mm - DOLULUK ORANI



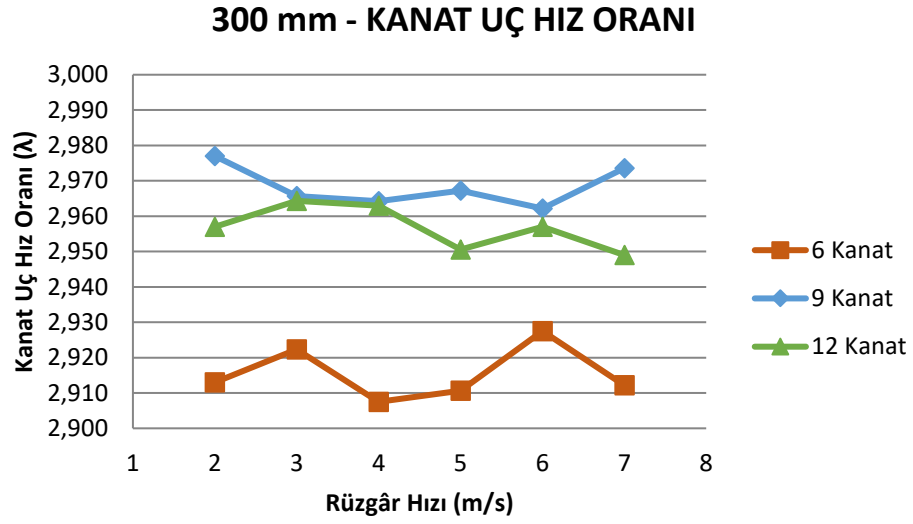
Şekil 5.108 300 mm türbinlerin doluluk oranı grafiği



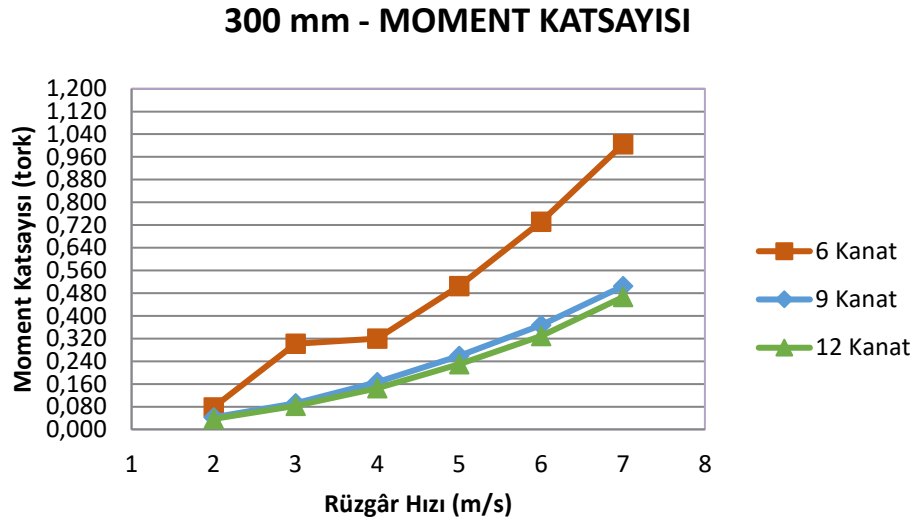
Şekil 5.109 300 mm türbinlerin açısal hız grafiği



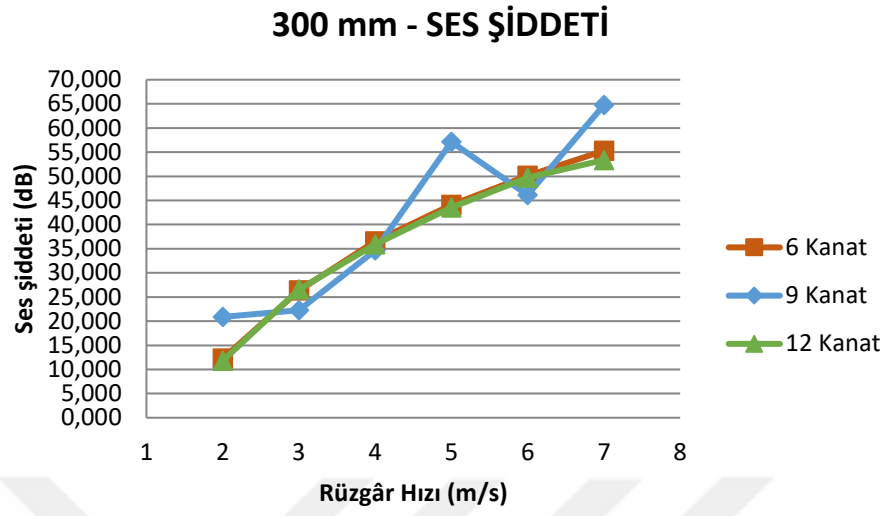
Şekil 5.110 300 mm türbinlerin devir grafiği



Şekil 5.111 300 mm türbinlerin kanat uç hız oranı grafiği



Şekil 5.112 300 mm türbinlerin moment katsayısı grafiği

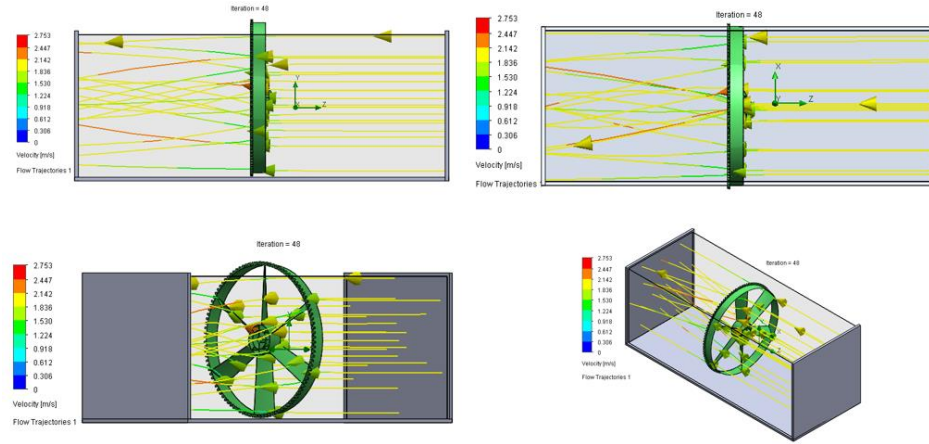


Şekil 5.113 300 mm türbinlerin ses şiddeti grafiği

5.2.3.3. 400 mm Çaplı Türbin Simülasyonları ve Veri Analizi

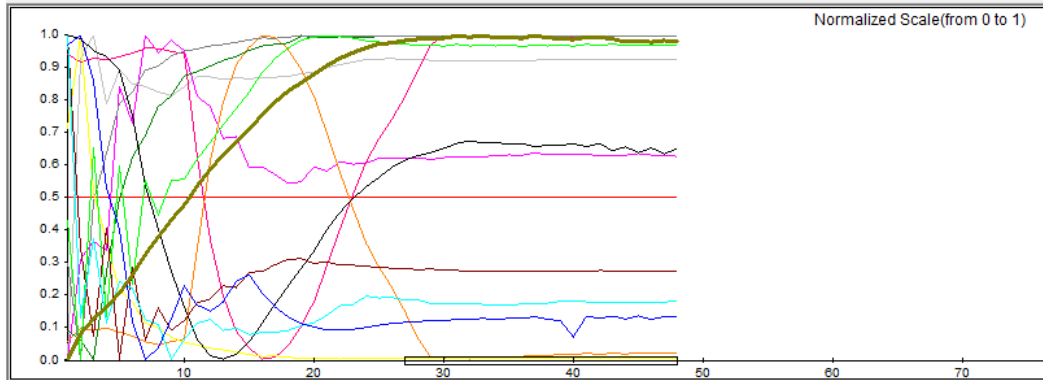


Şekil 5.114 400 mm - 6 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)

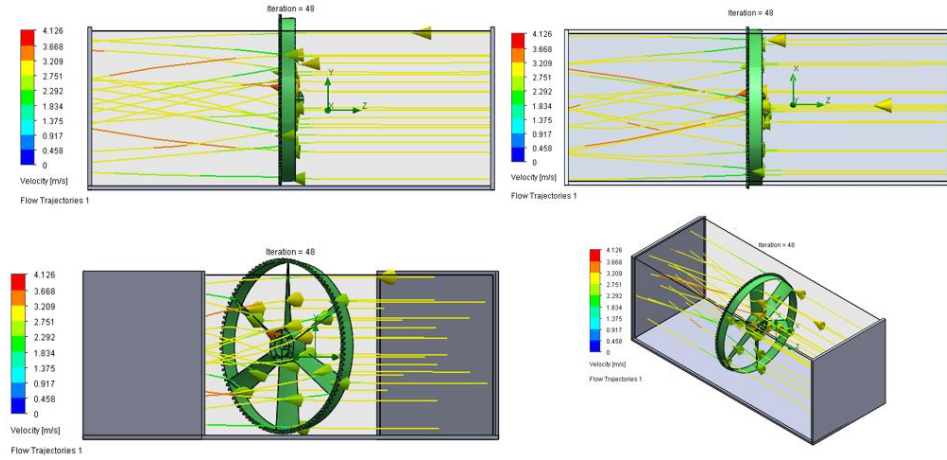


Şekil 5.115 400 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

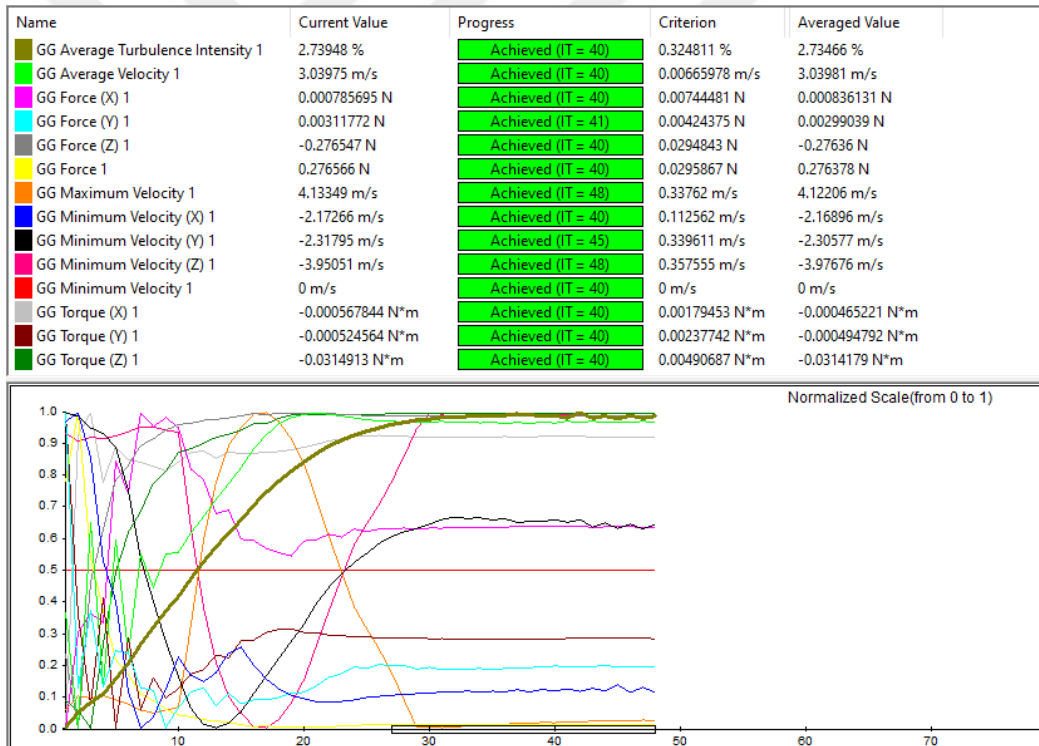
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Average Turbulence Intensity 1	2.28714 %	Achieved (IT = 40)	0.229327 %	2.30328 %
GG Average Velocity 1	2.02641 m/s	Achieved (IT = 40)	0.00446005 m/s	2.02646 m/s
GG Force (X) 1	8.34813e-05 N	Achieved (IT = 40)	0.00332068 N	0.00016608 N
GG Force (Y) 1	0.00117569 N	Achieved (IT = 41)	0.00186257 N	0.000985672 N
GG Force (Z) 1	-0.12209 N	Achieved (IT = 40)	0.0136923 N	-0.12213 N
GG Force 1	0.122096 N	Achieved (IT = 40)	0.013737 N	0.122135 N
GG Maximum Velocity 1	2.75291 m/s	Achieved (IT = 47)	0.237818 m/s	2.7461 m/s
GG Minimum Velocity (X) 1	-1.43841 m/s	Achieved (IT = 40)	0.0749341 m/s	-1.44215 m/s
GG Minimum Velocity (Y) 1	-1.53881 m/s	Achieved (IT = 43)	0.226689 m/s	-1.5305 m/s
GG Minimum Velocity (Z) 1	-2.64032 m/s	Achieved (IT = 48)	0.250516 m/s	-2.65479 m/s
GG Minimum Velocity 1	0 m/s	Achieved (IT = 40)	0 m/s	0 m/s
GG Torque (X) 1	-0.000177317 N*m	Achieved (IT = 40)	0.000767585 N*m	-0.000215884 N*m
GG Torque (Y) 1	-0.000414647 N*m	Achieved (IT = 40)	0.00103622 N*m	-0.000394377 N*m
GG Torque (Z) 1	-0.0139933 N*m	Achieved (IT = 40)	0.00217848 N*m	-0.0139873 N*m



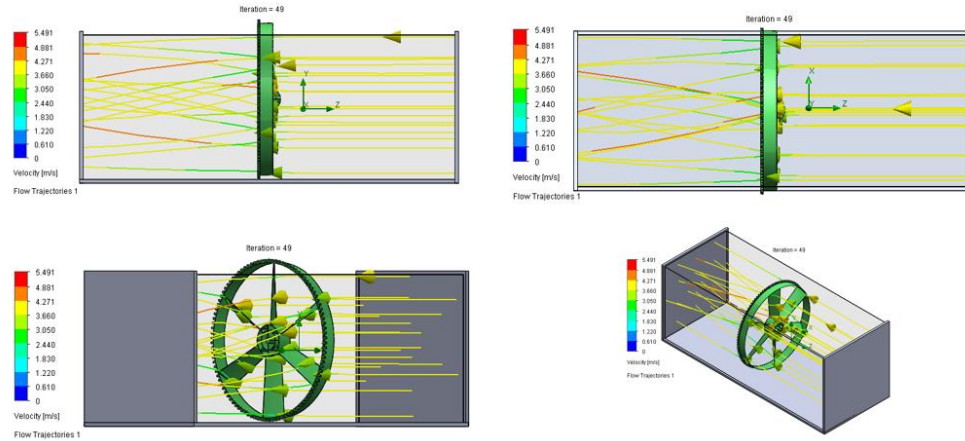
Şekil 5.116 400 mm - 6 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



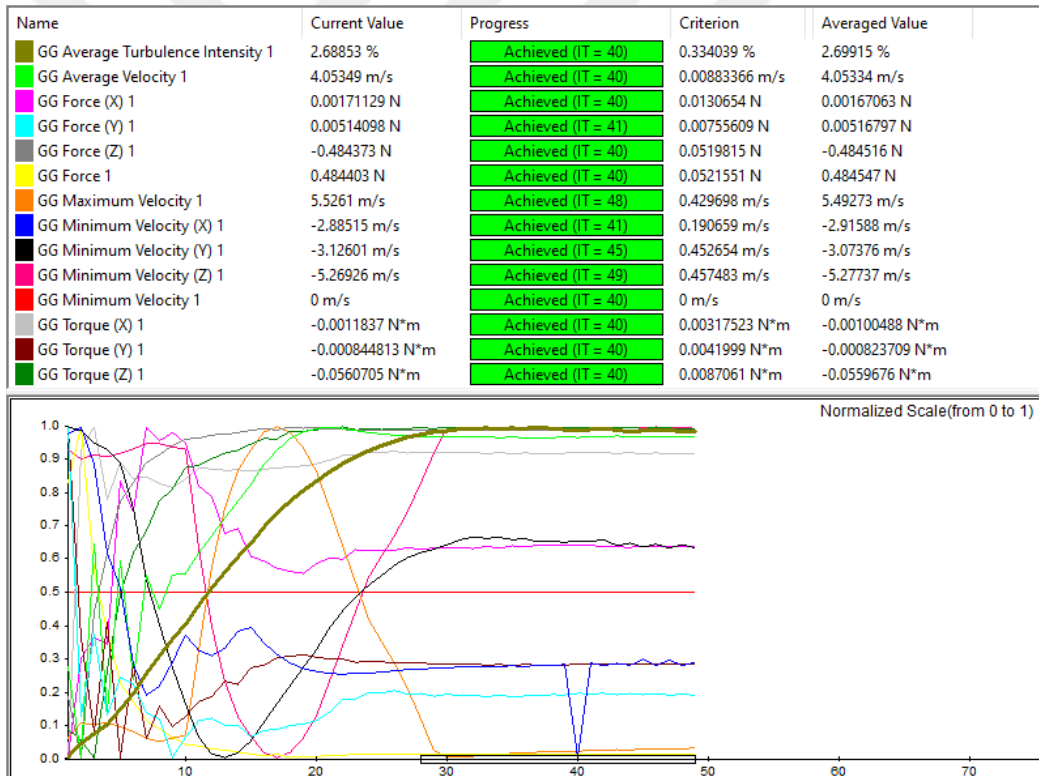
Şekil 5.117 400 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



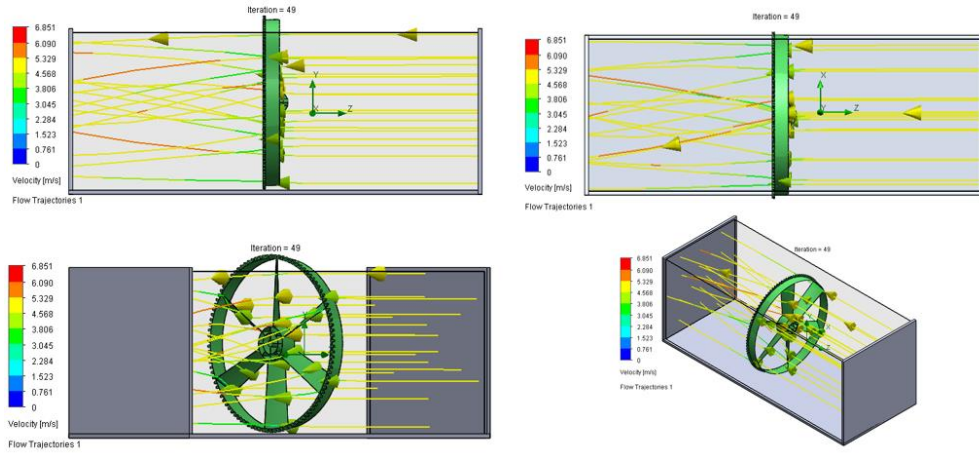
Şekil 5.118 400 mm - 6 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



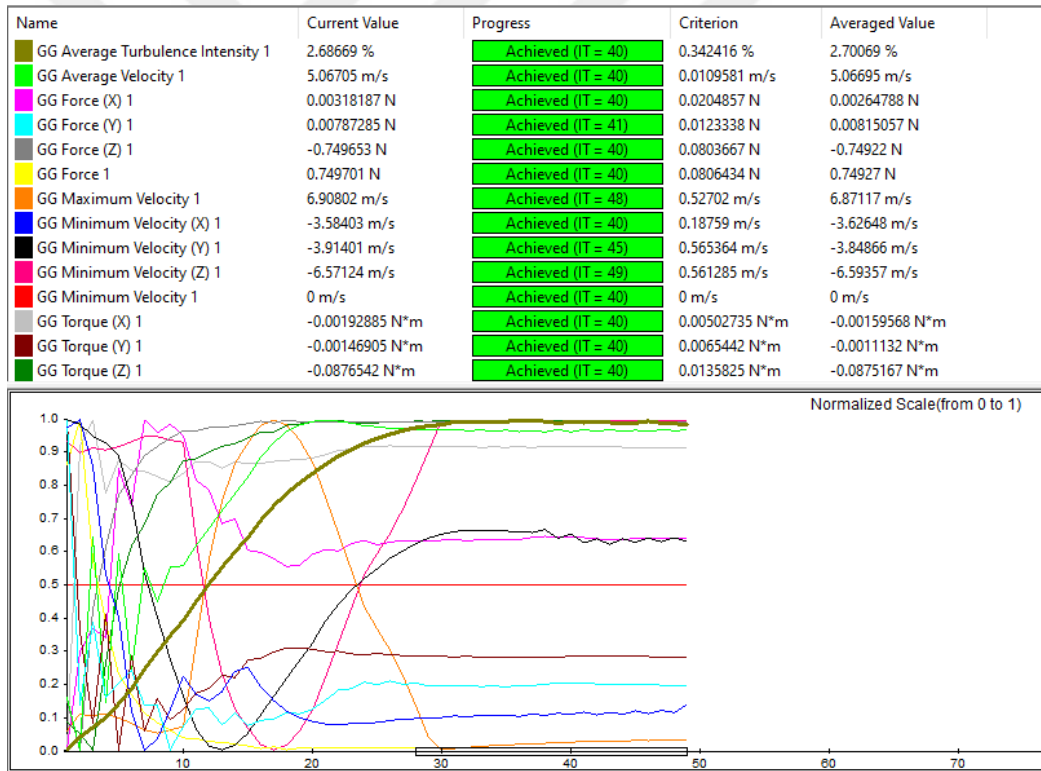
Şekil 5.119 400 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



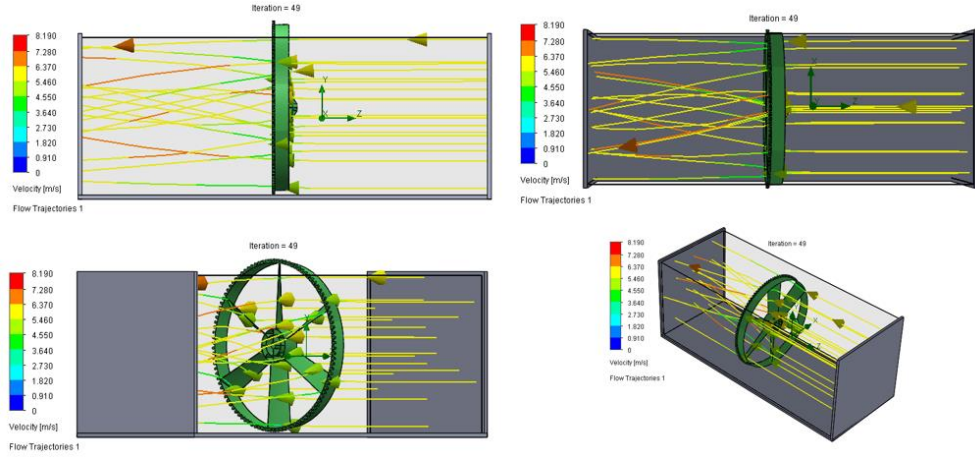
Şekil 5.120 400 mm - 6 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



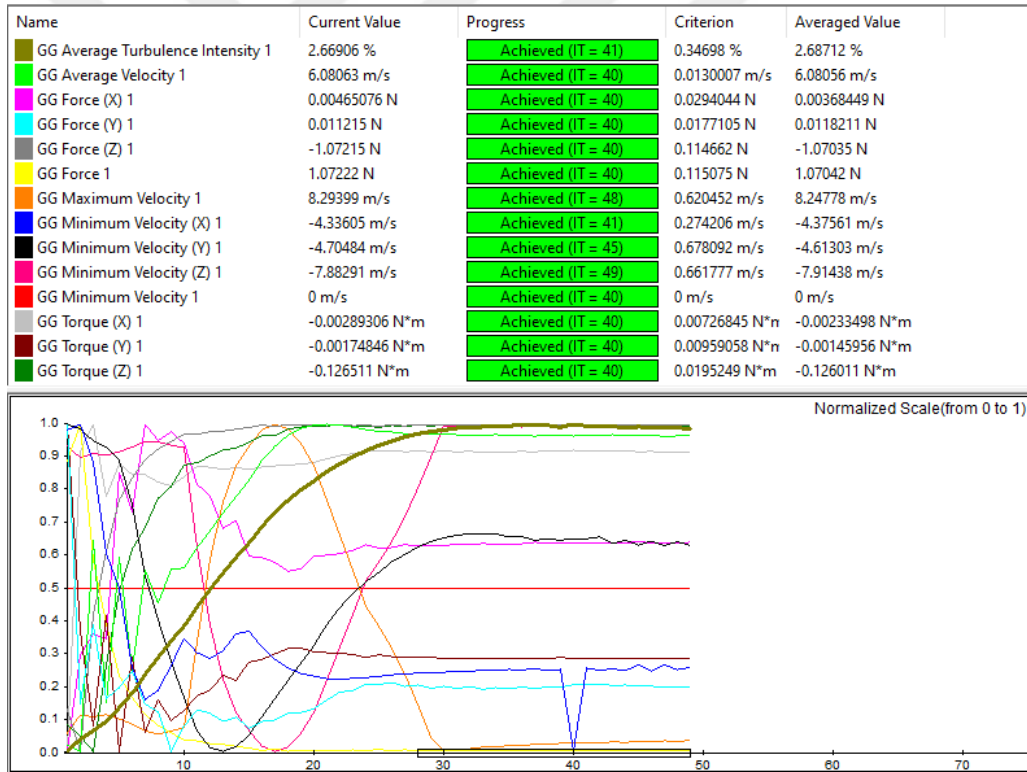
Şekil 5.121 400 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



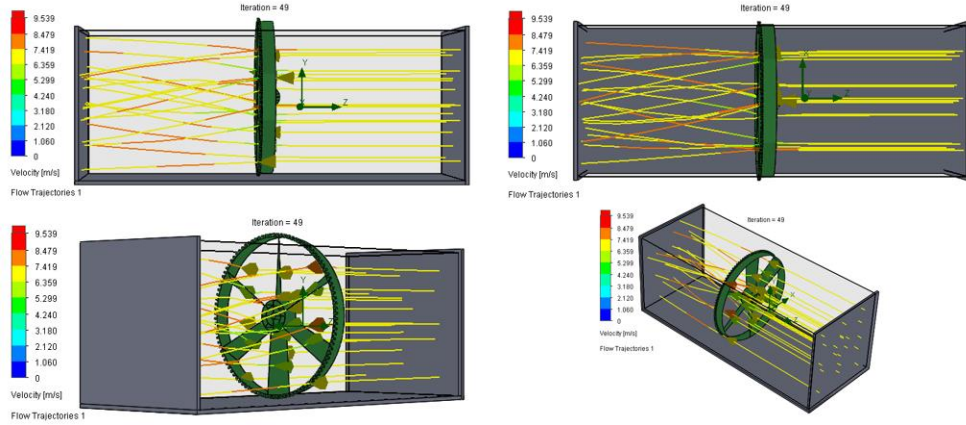
Şekil 5.122 400 mm - 6 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



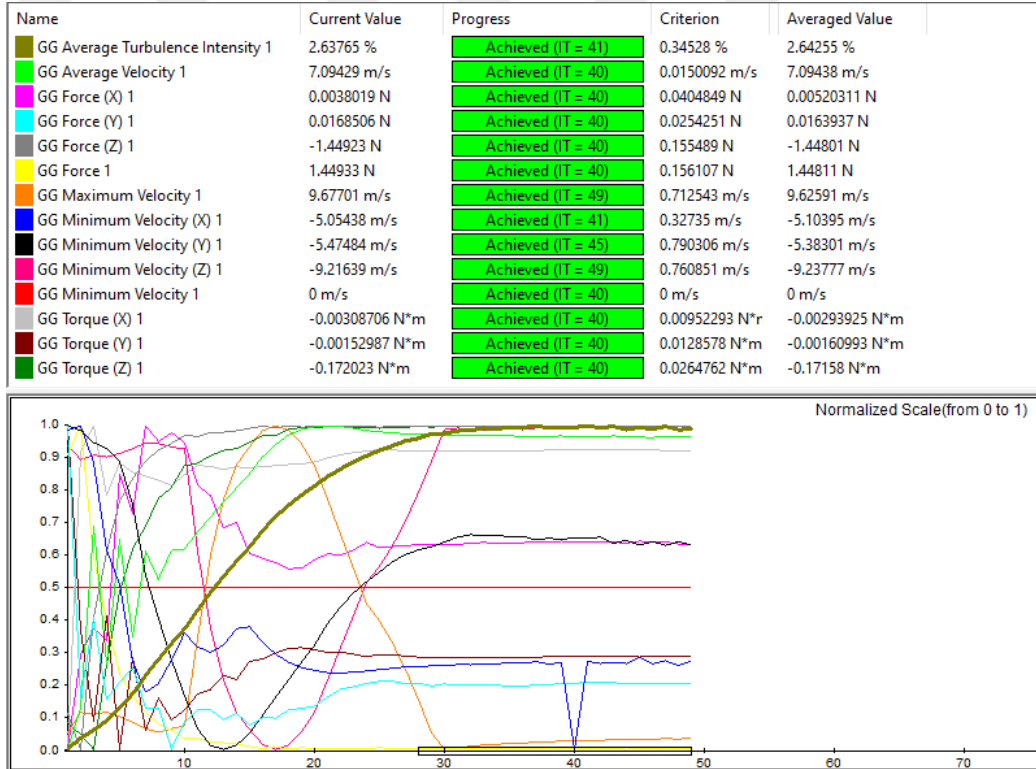
Şekil 5.123 400 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



Şekil 5.124 400 mm - 6 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



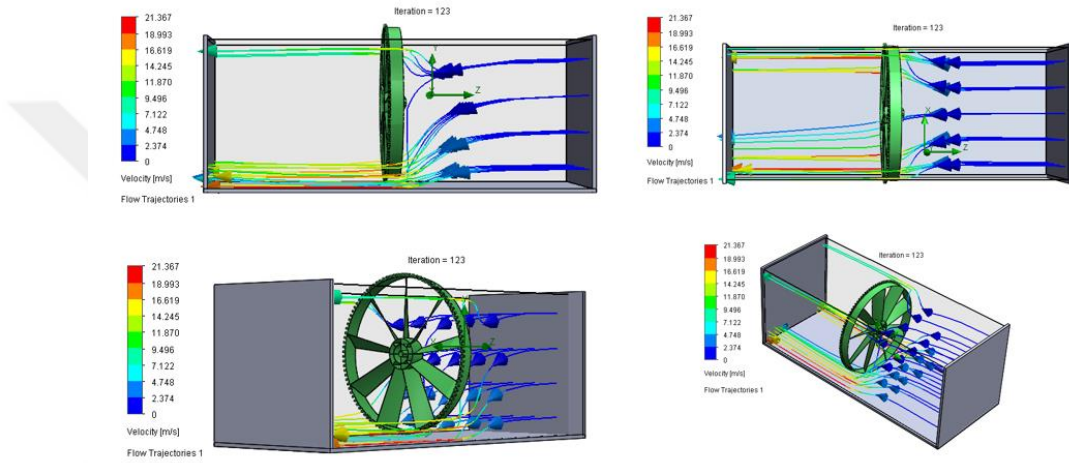
Şekil 5.125 400 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



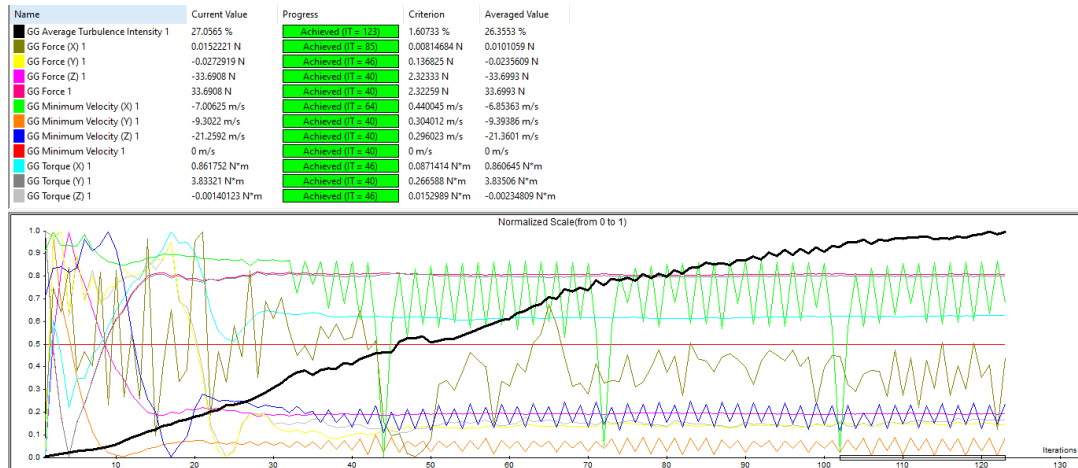
Şekil 5.126 400 mm - 6 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



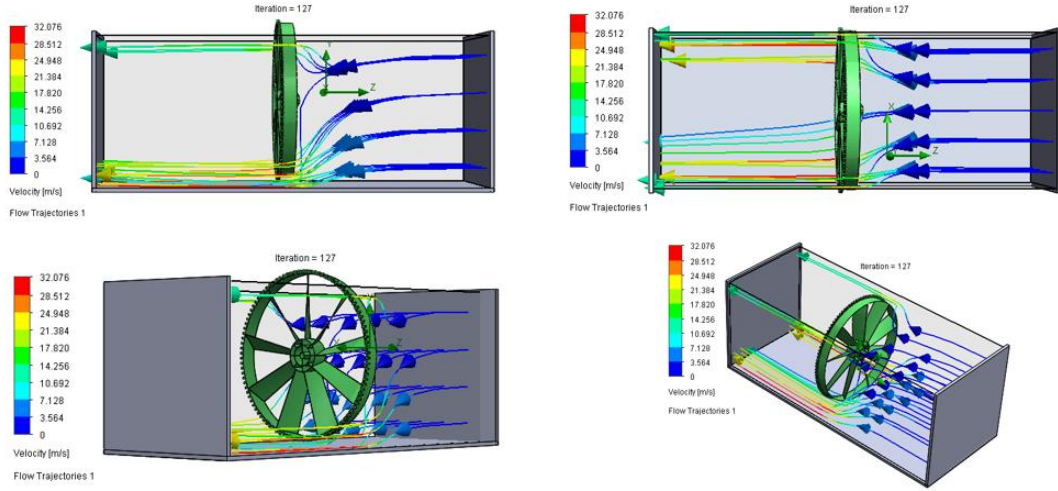
Şekil 5.127 400 mm - 9 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)



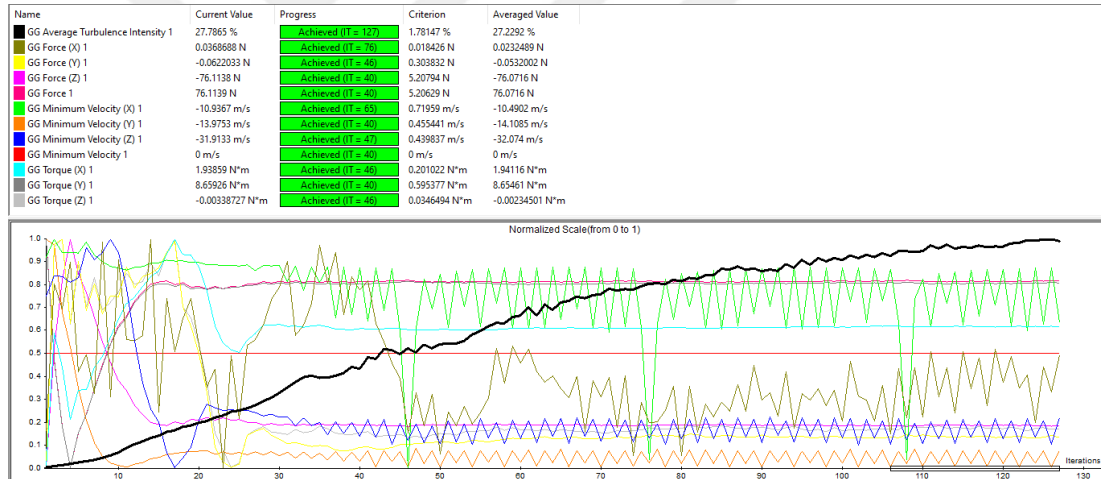
Şekil 5.128 400 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



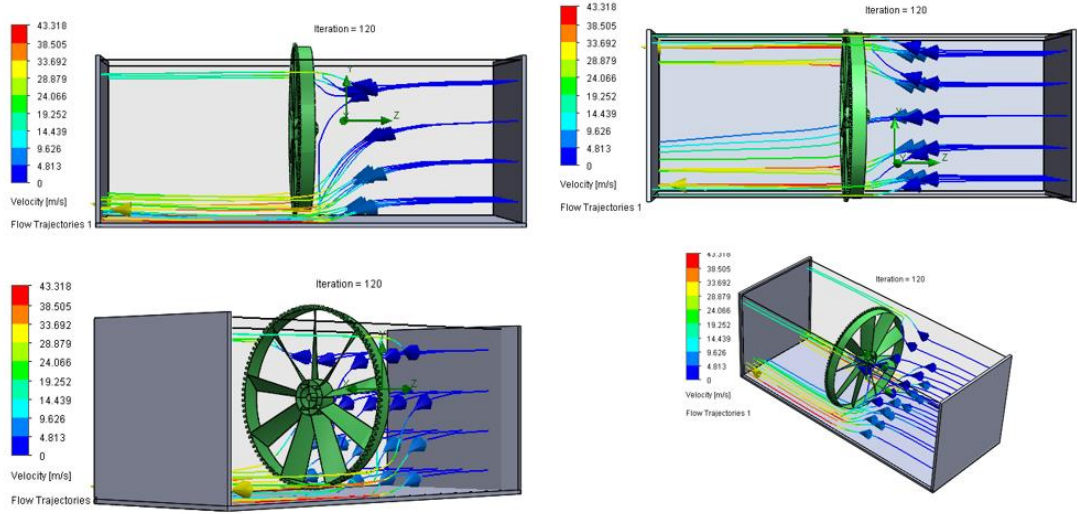
Şekil 5.129 400 mm - 9 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



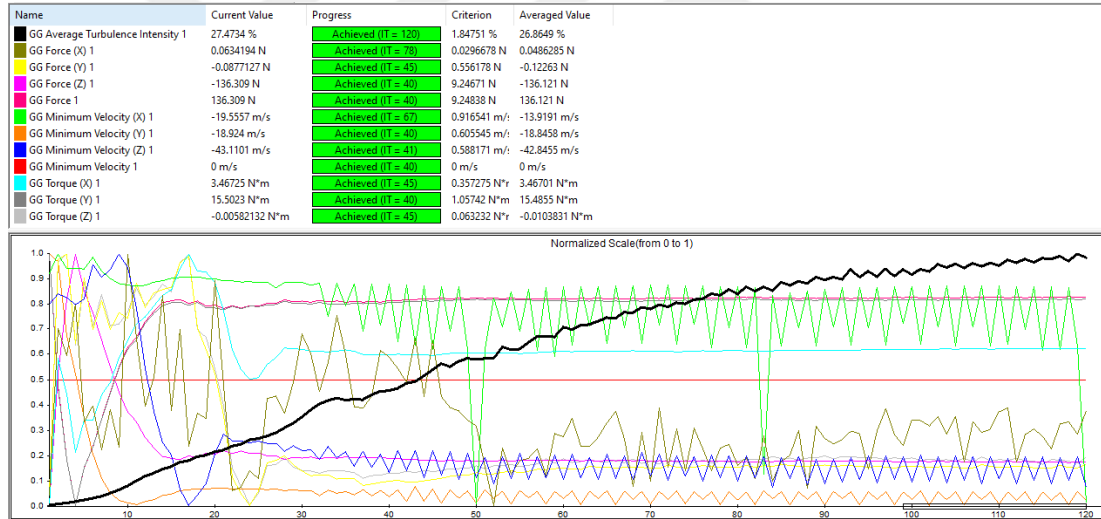
Şekil 5.130 400 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



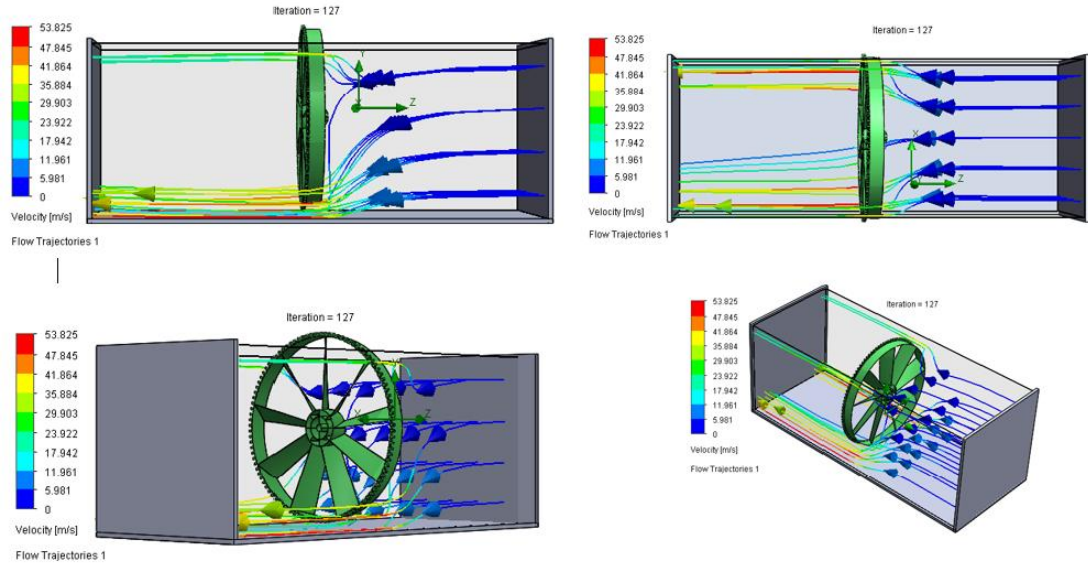
Şekil 5.131 400 mm - 9 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



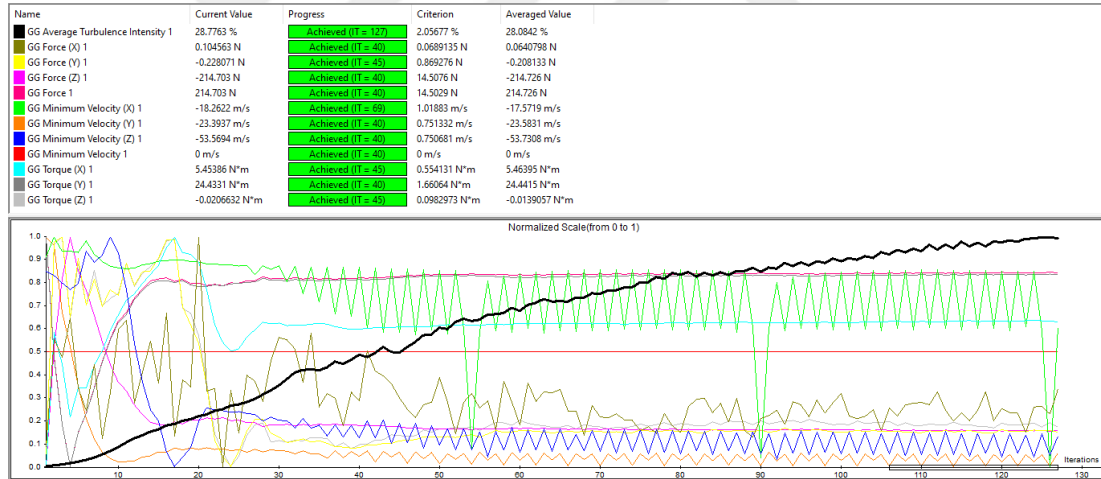
Şekil 5.132 400 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



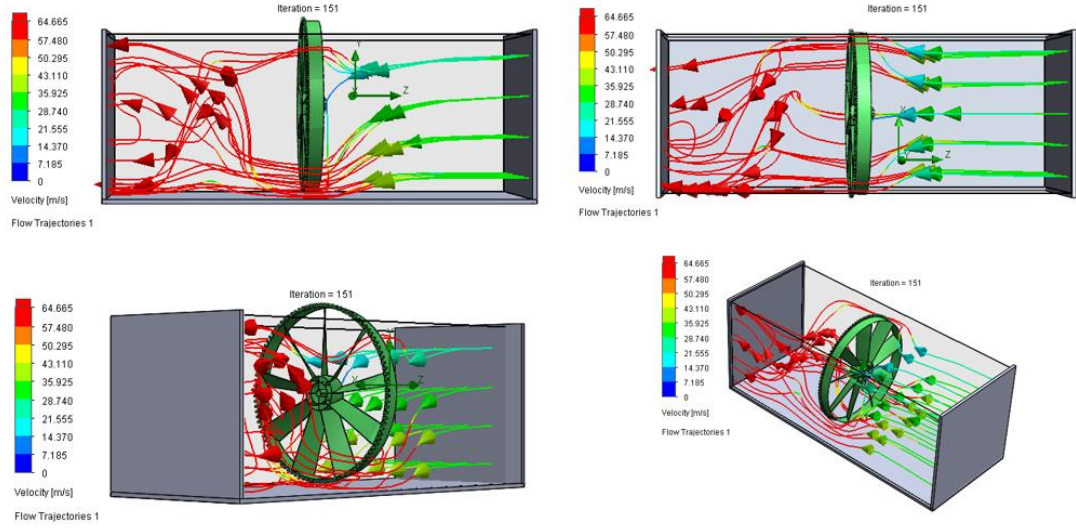
Şekil 5.133 400 mm - 9 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



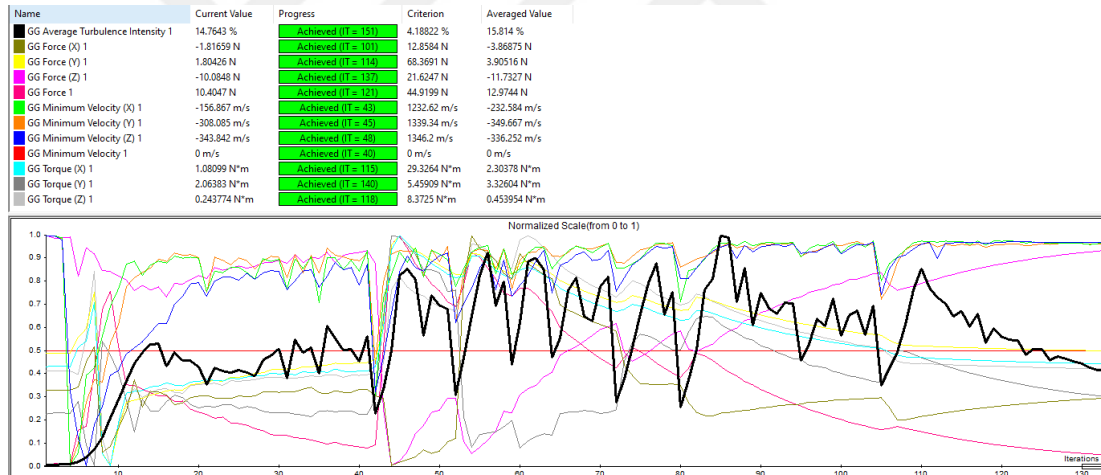
Şekil 5.134 400 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



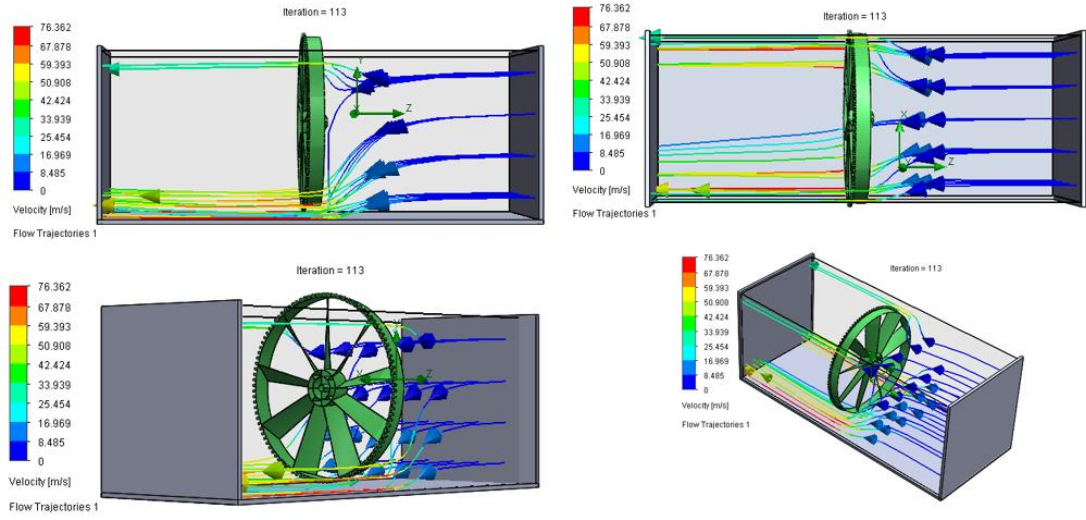
Şekil 5.135 400 mm - 9 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



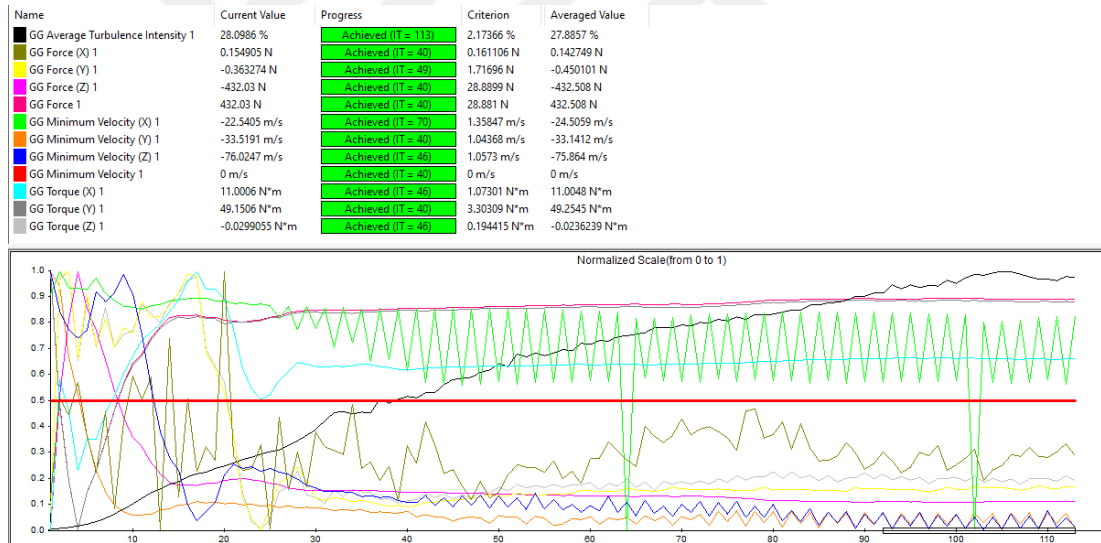
Şekil 5.136 400 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



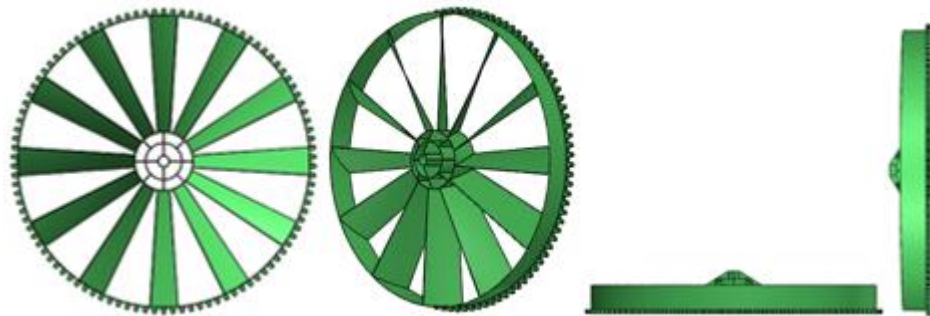
Şekil 5.137 400 mm - 9 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



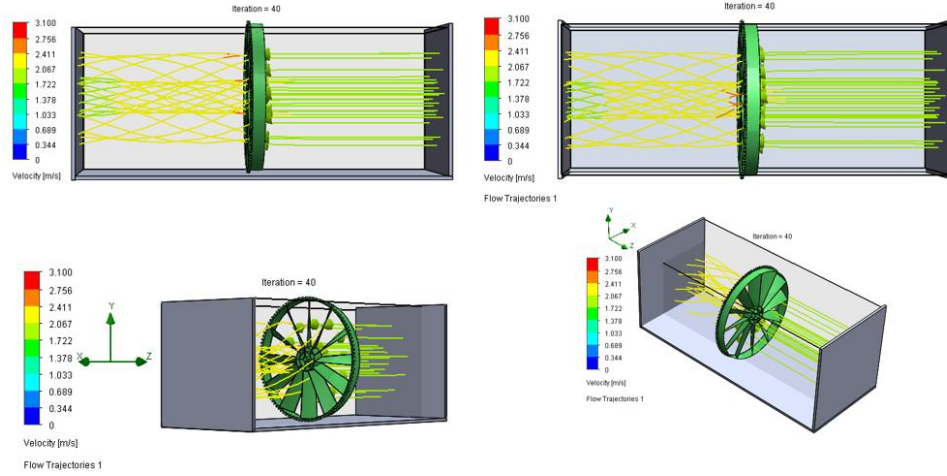
Şekil 5.138 400 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



Şekil 5.139 400 mm - 9 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları

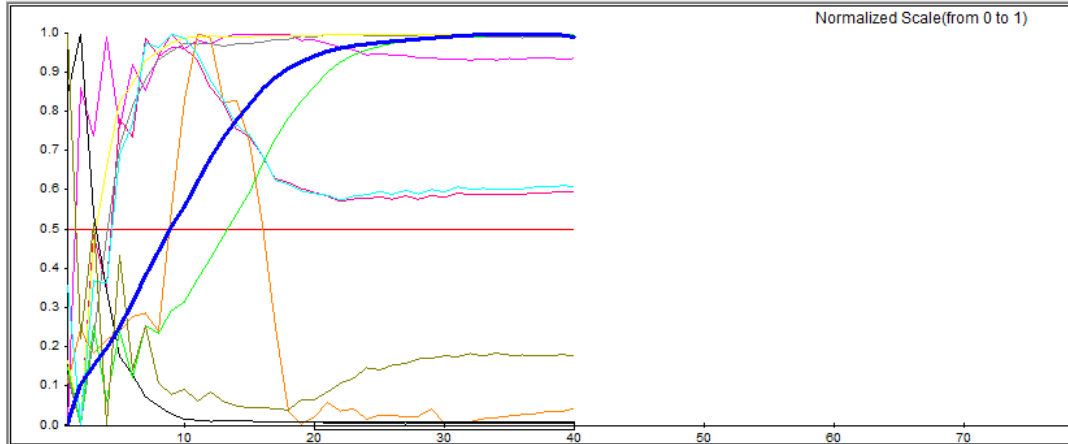


Şekil 5.140 400 mm - 12 kanatlı türbin (ön, perspektif, üst ve yan görünüş)

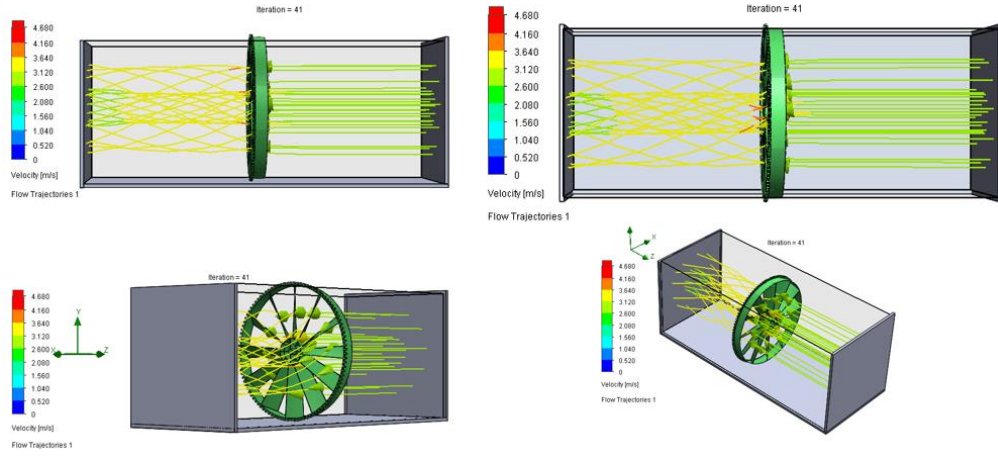


Şekil 5.141 400 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

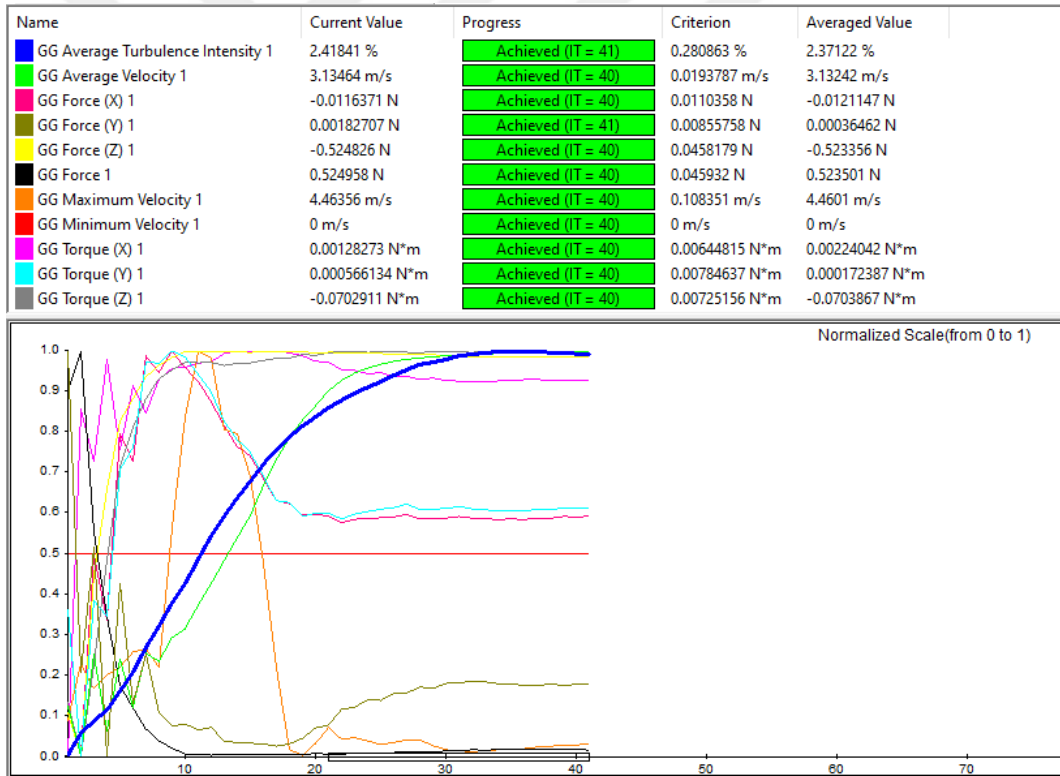
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Average Turbulence Intensity 1	1.90028 %	Achieved (IT = 40)	0.172537 %	1.89437 %
GG Average Velocity 1	2.08965 m/s	Achieved (IT = 40)	0.012935 m/s	2.08781 m/s
GG Force (X) 1	-0.00499499 N	Achieved (IT = 40)	0.00478272 N	-0.00546132 N
GG Force (Y) 1	0.00060488 N	Achieved (IT = 40)	0.00382719 N	-0.000245547 N
GG Force (Z) 1	-0.231731 N	Achieved (IT = 40)	0.0210234 N	-0.231776 N
GG Force 1	0.231786 N	Achieved (IT = 40)	0.0210964 N	0.231845 N
GG Maximum Velocity 1	2.97495 m/s	Achieved (IT = 40)	0.0711087 m/s	2.96774 m/s
GG Minimum Velocity 1	0 m/s	Achieved (IT = 40)	0 m/s	0 m/s
GG Torque (X) 1	0.000599868 N*m	Achieved (IT = 40)	0.00274733 N*m	0.00101171 N*m
GG Torque (Y) 1	0.000263771 N*m	Achieved (IT = 40)	0.0033718 N*m	-0.000162708 N*m
GG Torque (Z) 1	-0.0314588 N*m	Achieved (IT = 40)	0.00322302 N*m	-0.0314215 N*m



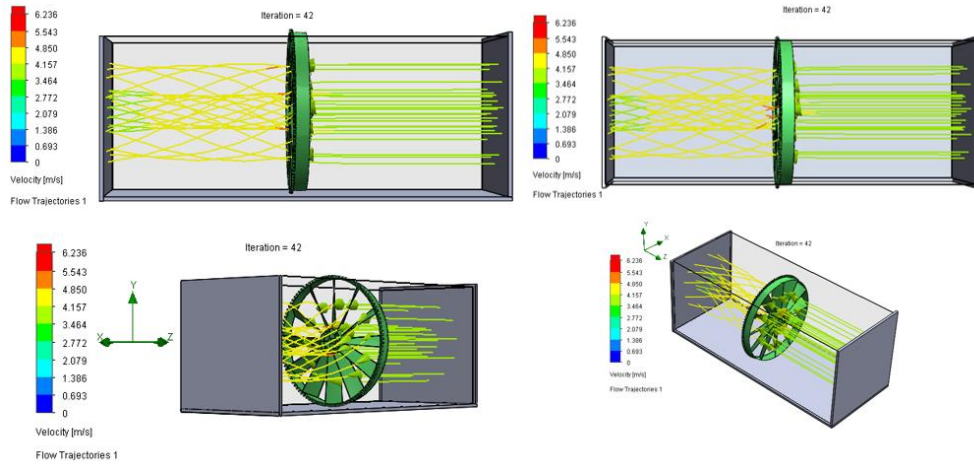
Şekil 5.142 400 mm - 12 kanatlı – 2 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



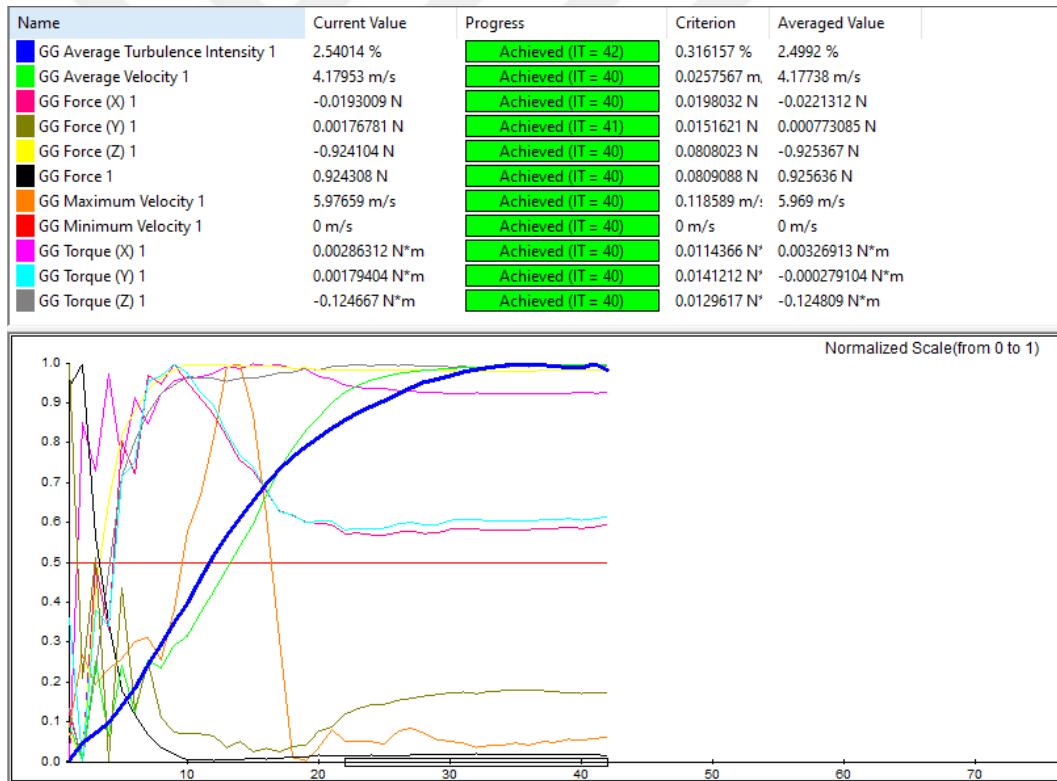
Şekil 5.143 400 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



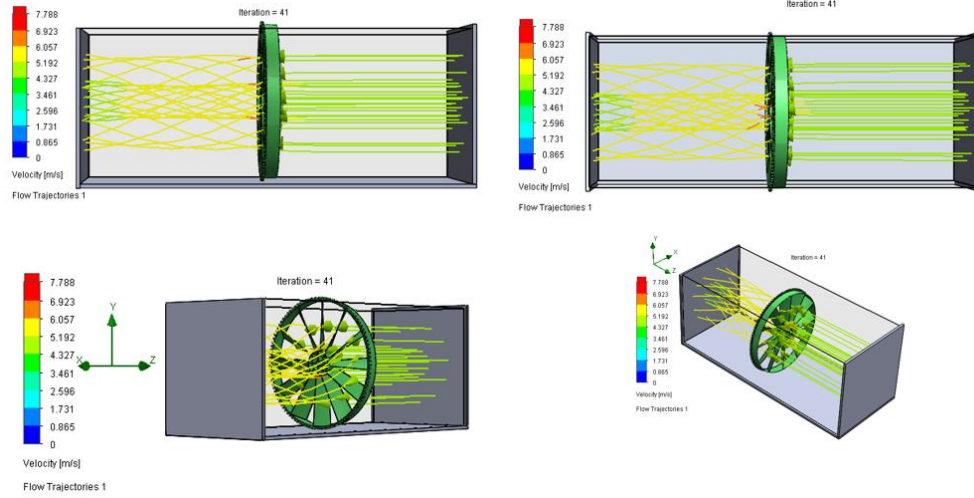
Şekil 5.144 400 mm - 12 kanatlı – 3 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



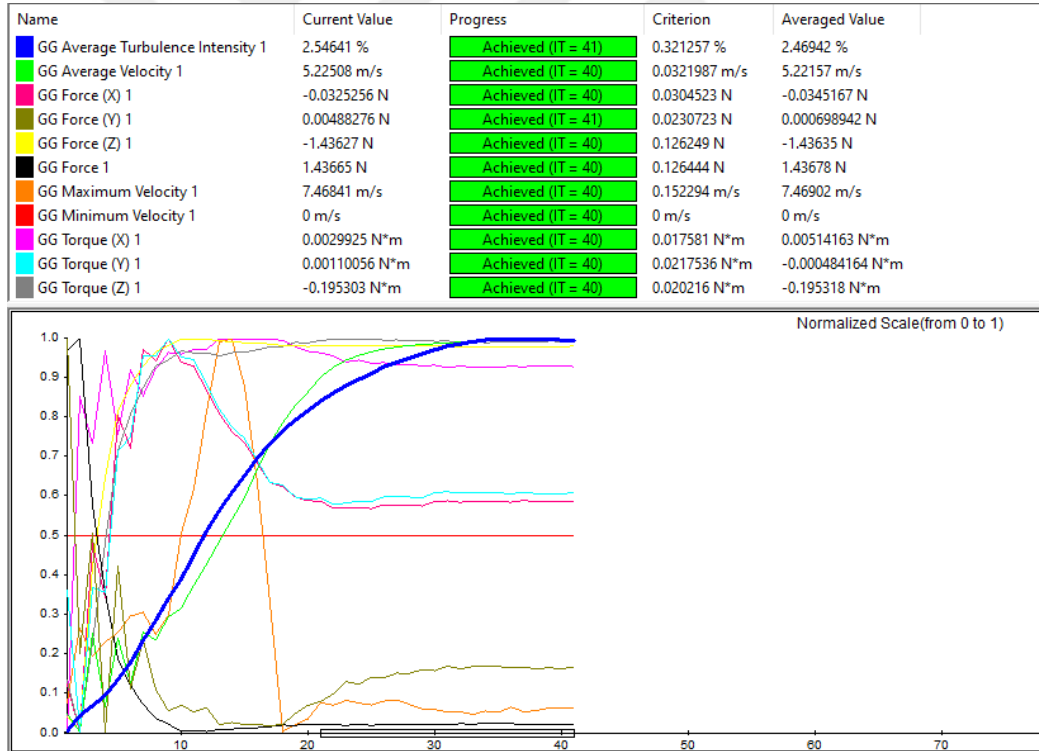
Şekil 5.145 400 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



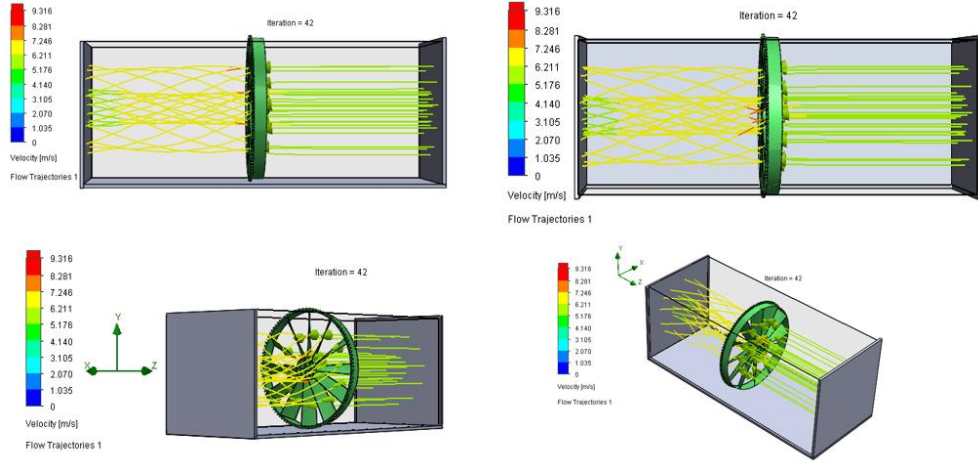
Şekil 5.146 400 mm - 12 kanatlı – 4 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



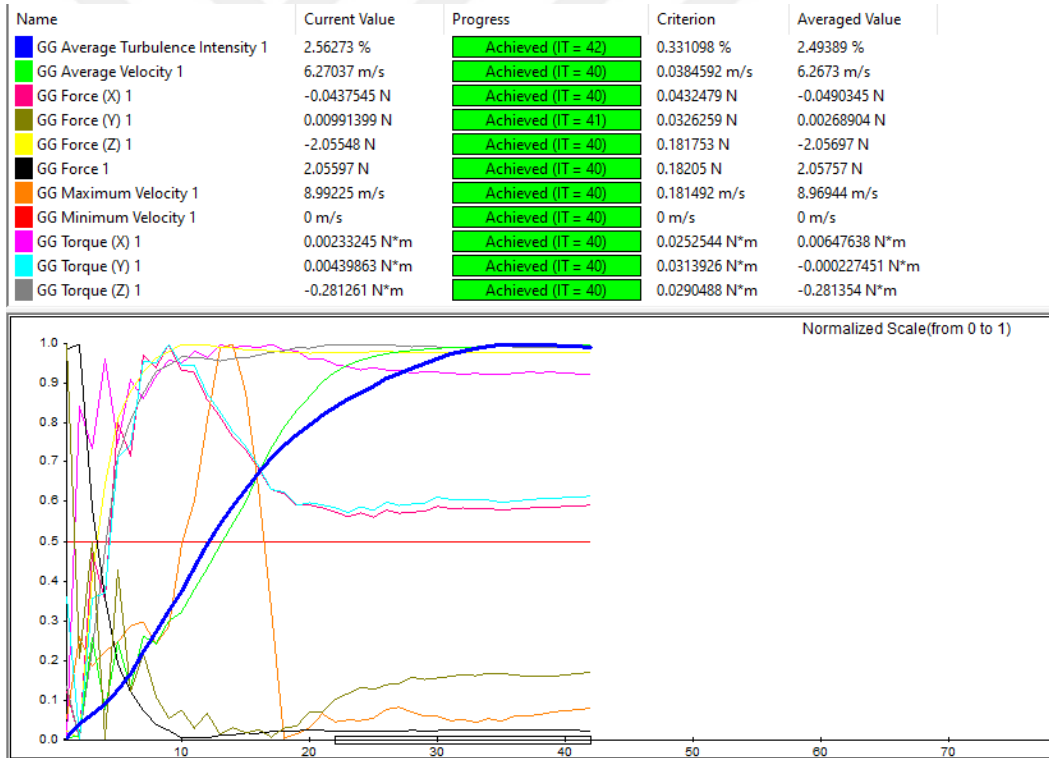
Şekil 5.147 400 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



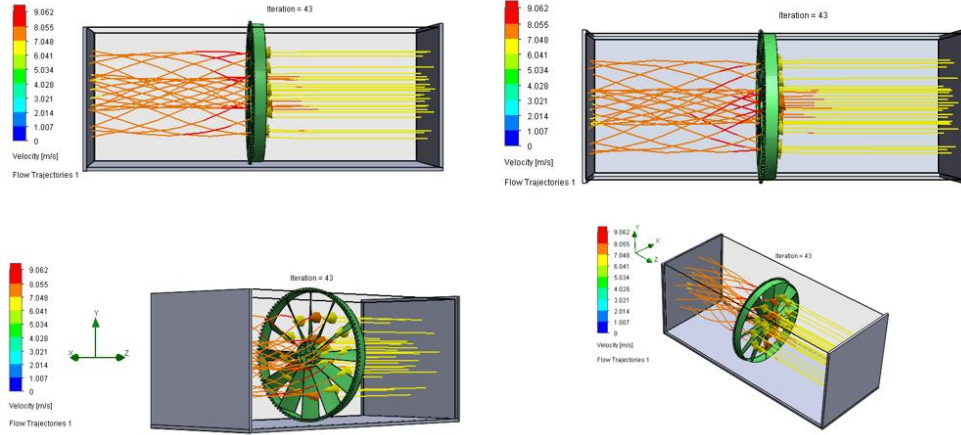
Şekil 5.148 400 mm - 12 kanatlı – 5 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



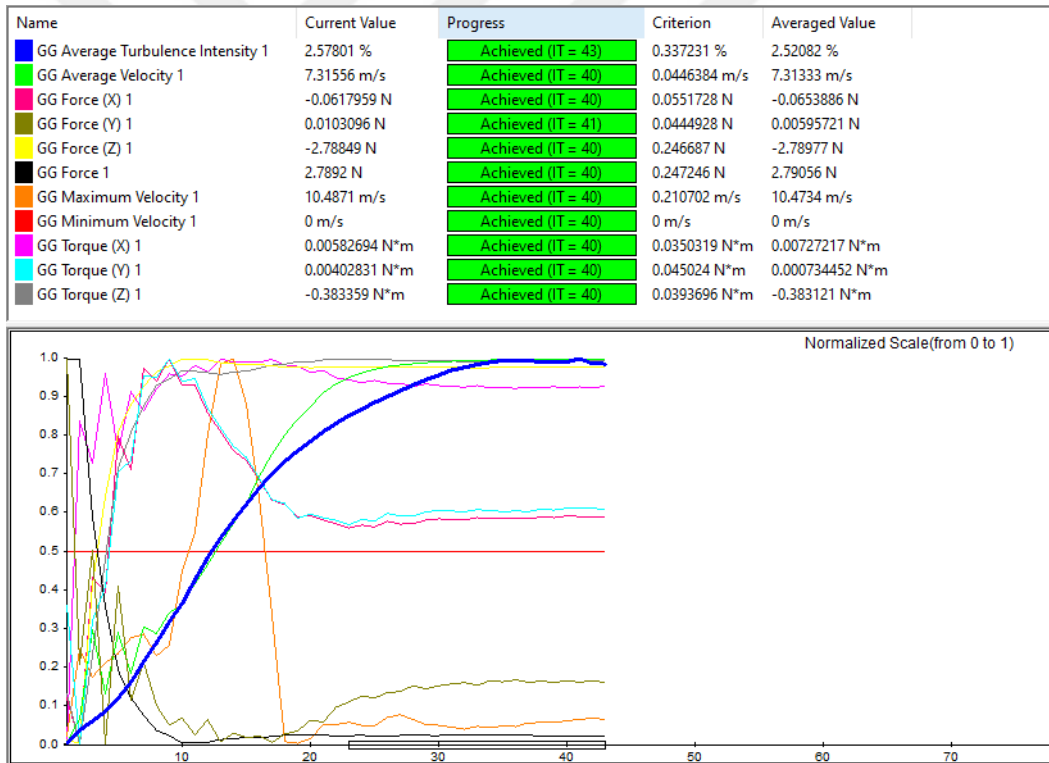
Şekil 5.149 400 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)



Şekil 5.150 400 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları



Şekil 5.151 400 mm - 12 kanatlı – 6 m/s rüzgâr hızında türbin simülasyon kesiti (yan, üst, izometrik perspektif ve perspektif görünüş)

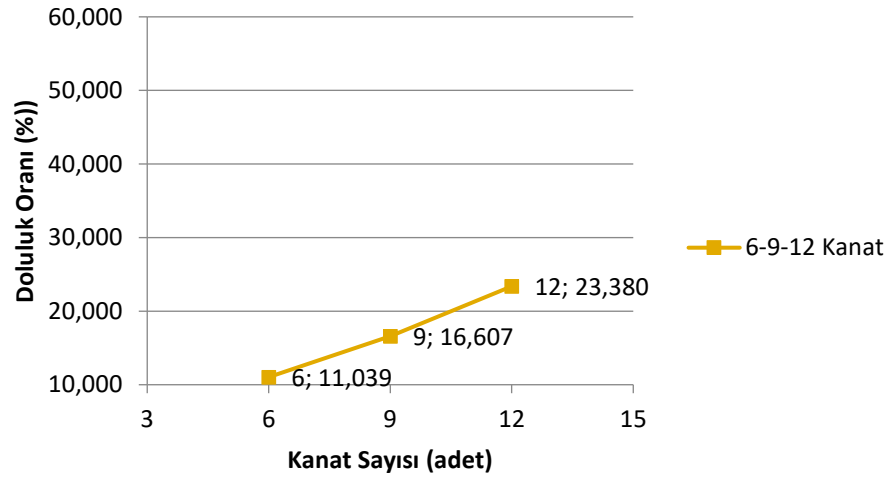


Şekil 5.152 400 mm - 12 kanatlı – 7 m/s rüzgâr hızı simülasyon sonuçları

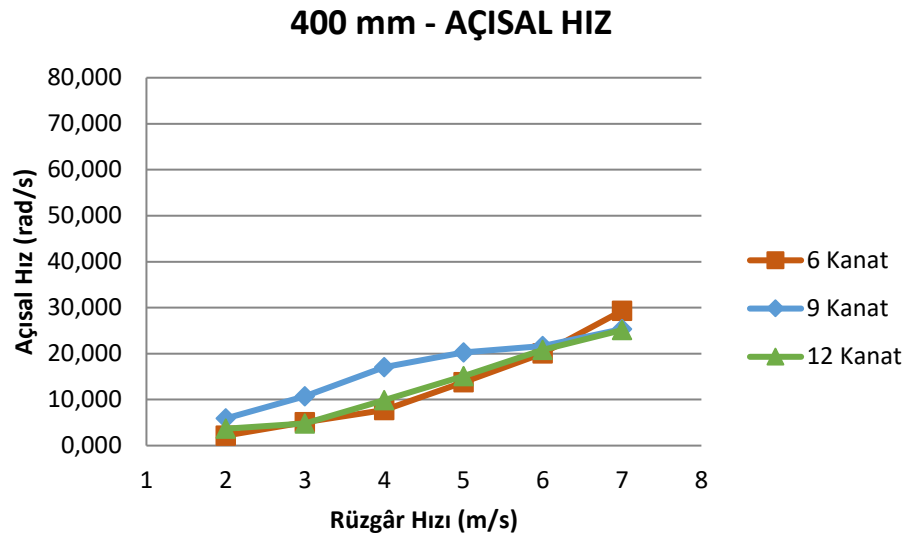
Çizelge 5.16 400 mm çaplı türbinlerin simülasyon ve hesap sonuçları

400 mm Türbin							
Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Açısal Hız (rad/s)	Kanat Uç Hız Oranı (λ)	Moment Katsayısı (Tork)	Devir (rpm)	Doluluk Oranı (%)	Ses Siddeti (dB)
6	2	2,2	1,324	0,101	18,0	11,039	0,00
6	3	5,1	1,323	0,002	48,0	11,039	11,05
6	4	7,7	1,320	0,001	51,0	11,039	20,97
6	5	13,8	1,319	0,010	93,0	11,039	29,64
6	6	20,1	1,318	0,045	186,0	11,039	34,47
6	7	29,3	1,317	0,045	233,0	11,039	41,24
9	2	5,9	1,065	3,929	49,0	16,607	33,64
9	3	10,8	1,066	8,873	89,0	16,607	49,86
9	4	17,1	1,080	15,885	174,0	16,607	59,37
9	5	20,3	1,073	25,031	186,0	16,607	68,37
9	6	21,6	1,075	36,484	188,0	16,607	74,48
9	7	25,3	1,088	50,371	218,0	16,607	81,71
12	2	3,7	1,478	0,262	21,0	23,380	0,00
12	3	4,8	1,486	0,001	39,0	23,380	11,34
12	4	9,9	1,489	0,003	67,0	23,380	21,11
12	5	15,1	1,493	0,020	142,0	23,380	36,09
12	6	20,8	1,494	0,005	191,0	23,380	30,99
12	7	25,1	2,574	0,019	239,0	23,380	58,59

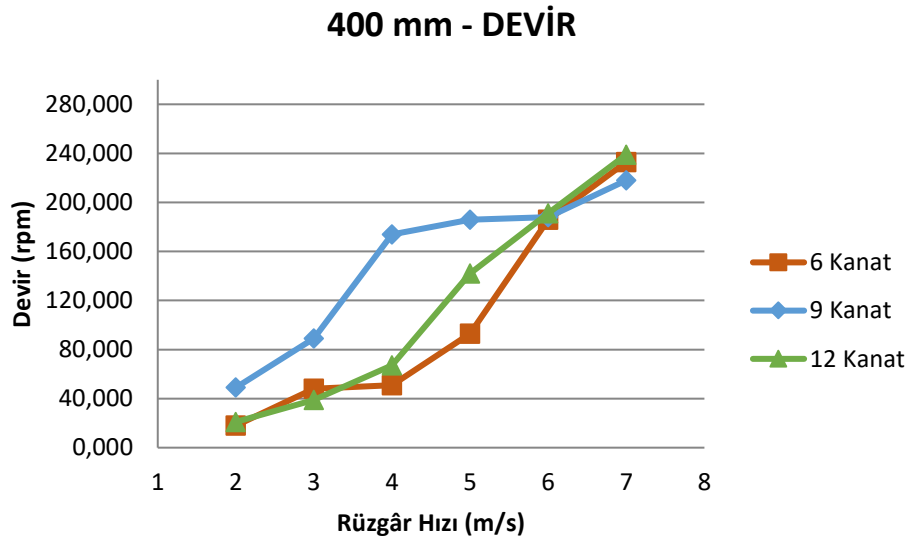
400 mm - DOLULUK ORANI



Şekil 5.153 400 mm türbinlerin doluluk oranı grafiği

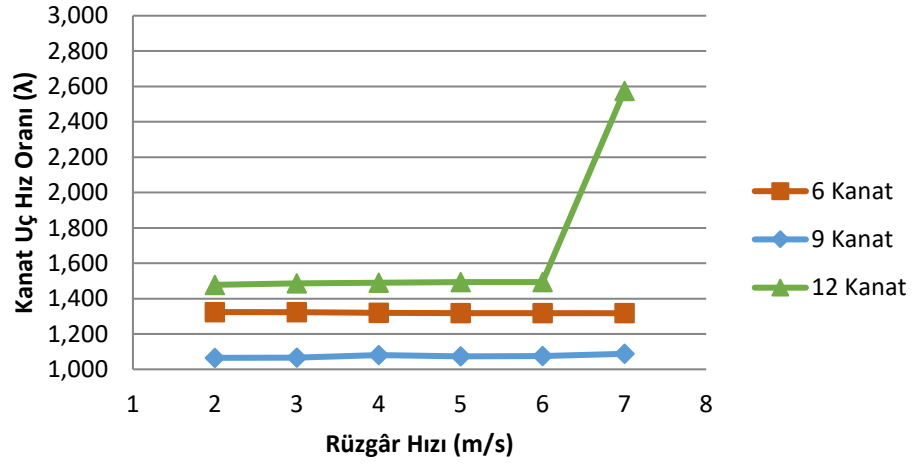


Şekil 5.154 400 mm türbinlerin açısal hız grafiği



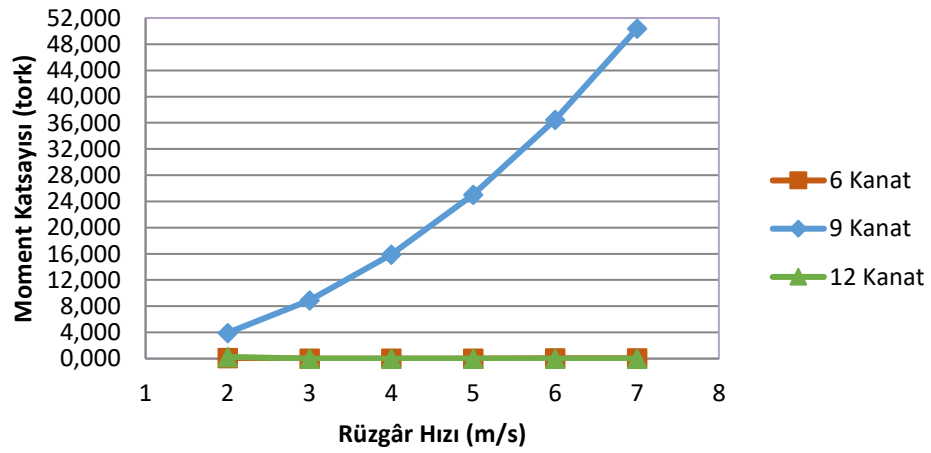
Şekil 5.155 400 mm türbinlerin devir grafiği

400 mm - KANAT UÇ HIZ ORANI

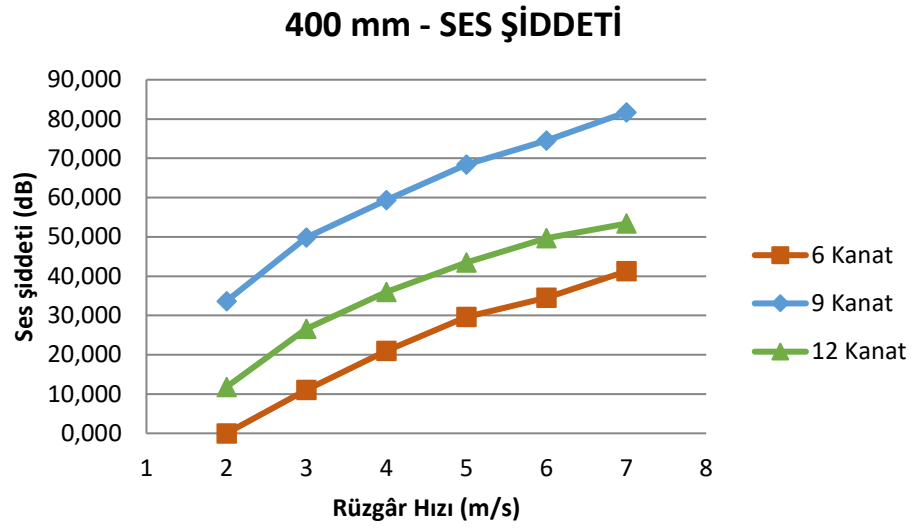


Şekil 5.156 400 mm türbinlerin kanat uç hız oranı grafiği

400 mm - MOMENT KATSAYISI



Şekil 5.157 400 mm türbinlerin moment katsayısı grafiği



Şekil 5.158 400 mm türbinlerin ses şiddeti grafiği

6. BULGULAR ve TARTIŞMA

6.1. Bulgular

Araştırmanın başlangıç noktasında rüzgâr enerjisinden ve devamında klasik rüzgâr türbinlerinden bahsedilmiştir. Klasik rüzgâr türbinlerinde ki dezavantajlara bir çözüm olarak tasarlanan mikro rüzgâr türbinlerinin avantajlarını ve klasik rüzgâr türbinlerine göre varsa dezavantajlarının belirlenmesi açısından ilgili tanımlamalar önemlidir. Araştırmada MRT teknolojisinin icadından sonra; çalışma prensibi ve ilk ürünün bazı avantajlarından bahsedilmiştir. MRT teknolojisinin tüm dünyada duyulmasının ardından Dünya çapında çalışmalar devam etmiştir. Bu araştırmaların derlenmesiyle öncelikle mikro rüzgâr türbinlerin sınıflandırılması yapılmıştır. Sınıflandırmanın ardından daha önce yapılmış çalışmalar araştırmanın niteliğine göre türbin çapı, kanat sayısı, kanat açısı ve çalışmanın içeriğine göre bazı diğer çalışmalar olarak 4 grupta incelenmiştir. Literatür taramasının tamamlanmasının ardından ‘*yeni tasarım mikro rüzgâr türbini*’ için araştırmanın uygulama planlaması yapılmıştır. Planlama aşamasında belirlenen adımlar ilgili alt başlıklar altında detaylıca verilmiştir.

Araştırma da tasarım ve verilerin toplanması; sayısal değerler ve bilgisayar destekli katı modelleme ile tamamlanan tasarımların bilgisayar destekli simülasyon uygulamasından elde edilen verilerin sayısal ve görsel sonuçlara dayandırılması sebebiyle olgusal araştırma niteliğindedir. Veriler 200, 300 ve 400 mm türbinler için sırasıyla Çizelge 5.14, 5.15, 5.16’da verilmiş ve elde edilen sonuçlar çizgi grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır. Araştırmanın izlencesine göre bu karşılaştırma mevcut çizelgeler de doluluk oranı, açısal hız, devir, kanat uç hız oranı, moment katsayısı ve ses şiddetinin düzeyine göre yapılmıştır. Türbin çaplarına göre karşılaştırma bulgular aşağıda listelenmiştir. Bulgular listelenirken seçilen türbin kalın puntıyla belirginleştirilmiştir.

200 mm türbinler doluluk oranına göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (% 19,362)**
- 9 kanatlı türbin (% 32,393)
- 12 kanatlı türbin (% 48,264)

200 mm türbinler açısal hız değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (6 m/s – 48,5 rad/s)**

- 9 kanatlı türbin (7 m/s – 38 rad/s)
- 12 kanatlı türbin (6 m/s – 36,9 rad/s)

200 mm türbinler devir değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (5 m/s – 287,0 rpm)**
- 9 kanatlı türbin (5 m/s – 189,0 rpm)
- 12 kanatlı türbin (5 m/s – 192 rpm)

200 mm türbinler kanat uç hız oranına göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (2 m/s – 1,663)**
- 9 kanatlı türbin (4 m/s – 1,657)
- 12 kanatlı türbin (2m/s – 1,476)

200 mm türbinler moment katsayısına göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (5 m/s – 0,070 N*m)
- **9 kanatlı türbin (6 m/s – 0,017 N*m)**
- 12 kanatlı türbin (7 m/s – 0,027 N*m)

200 mm türbinler ses şiddeti değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (2 m/s – 12,76 dB)
- **9 kanatlı türbin (3 m/s – 0 dB)**
- 12 kanatlı türbin (2 m/s – 0 dB)

300 mm türbinler doluluk oranına göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (% 13,391)**
- 9 kanatlı türbin (% 21,631)
- 12 kanatlı türbin (% 30,990)

300 mm türbinler açısal hız değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (7 m/s – 39,3 rad/s)
- **9 kanatlı türbin (7 m/s – 44,5 rad/s)**
- 12 kanatlı türbin (7 m/s – 38,1 rad/s)

300 mm türbinler devir değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (4 m/s – 193,0 rpm)
- 9 kanatlı türbin (4 m/s – 196,0 rpm)
- **12 kanatlı türbin (5 m/s – 234,0 rpm)**

300 mm türbinler kanat uç hız oranına göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (6 m/s – 2,928)
- **9 kanatlı türbin (2 m/s – 2,977)**
- 12 kanatlı türbin (3 m/s – 2,963)

300 mm türbinler moment katsayısına göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (5 m/s – 0,505 N*m)**
- 9 kanatlı türbin (7 m/s – 2,974 N*m)
- 12 kanatlı türbin (7 m/s – 2,949 N*m)

300 mm türbinler ses şiddeti değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (2 m/s – 12,22 dB)
- **9 kanatlı türbin (3 m/s – 22,23 dB)**
- 12 kanatlı türbin (2 m/s – 11,78 dB)

400 mm türbinler doluluk oranına göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (% 11,039)**
- 9 kanatlı türbin (% 16,607)
- 12 kanatlı türbin (% 23,380)

400 mm türbinler açısal hız değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (7 m/s – 29,3 rad/s)
- **9 kanatlı türbin (5 m/s – 20,3 rad/s)**
- 12 kanatlı türbin (7 m/s – 25,1 rad/s)

400 mm türbinler devir değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (4 m/s – 51,0 rpm)
- **9 kanatlı türbin (6 m/s – 188,0 rpm)**
- 12 kanatlı türbin (4 m/s – 67,0 rpm)

400 mm türbinler kanat uç hız oranına göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (2 m/s – 1,324)
- 9 kanatlı türbin (7 m/s – 1,088)
- **12 kanatlı türbin (7 m/s – 2,574)**

400 mm türbinler moment katsayısına göre türbinler incelendiğinde;

- 6 kanatlı türbin (4 m/s – 0,001 N*m)

- 9 kanatlı türbin (2 m/s – 3,929 N*m)
- **12 kanatlı türbin (3 m/s – 0,001 N*m)**

400 mm türbinler ses şiddeti değerlerine göre türbinler incelendiğinde;

- **6 kanatlı türbin (2 m/s – 0 dB)**
- 9 kanatlı türbin (2 m/s – 33,64 dB)
- **12 kanatlı türbin (2 m/s – 0 dB)**

6.2. Tartışma

Çalışmanın amacı doğrultusunda yapılan literatür taraması ve tasarımı adım adım planlanarak son halini alan türbinlerin mevcut hali ile yapılan bilgisayar destekli uygulamaları ve kıyaslamaları sonucunda nihai türbin belirlenmiş olacaktır. Çalışma tek bir noktaya bağlı kalmayıp birçok amaç doğrultusunda yapılmıştır. Ancak asıl amaç düşük rüzgâr hızlarında yüksek verimle çalışan nihai türbinin belirlenmesidir. Bu sebeple tüm parametreler belirlenen rüzgâr hızları ile bu rüzgâr hızlarına vermiş olduğu tepkiye göre kıyaslanmıştır. Yalnızca doluluk oranı hariç, bu değer rüzgâr hızına bağlı olmayıp türbin çapı ve kanat sayısına göre değiştiğinden türbin çapı kanat sayısı ile oranlanmıştır. Bu sebeple ilk olarak doluluk oranı incelenmiştir.

Doluluk oranı türbinin rüzgârı karşılayan net alanını belirttiğinden araştırmanın güvenilirliği için gerekli kriterler arasındadır. Ancak genel bir yaklaşım sunarak rüzgâr hızından bağımsız olduğu için sadece genel bir kriter niteliğindedir. Doluluk oranı yüzde ile ifade edilir. D.Y.C. Leung ve ark. yaptıkları çalışmada doluluk oranının kanat profiline ve kanat sayısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Çok kanatlı türbin oluşumunun daha etkili olduğunu ancak rüzgârın bloke olmasına karşılık kanat profiline doğrudan etkili olduğu ve yüksek moment oluşturabileceğinden optimizasyon sonuçlarına göre sadece doluluk oranına bakılarak karar verilmemesi gerektiği bildirilmiştir[59]. Mevcut çalışmada tüm türbinlerin karşılaştırılmasında elde edilen veriler türbin çaplarına göre verimli türbinler Çizelge 6.1’de verilen sonuçlar listelenmiştir.

Çizelge 6.1 Türbinlerin doluluk oranına göre karşılaştırması

Türbin Çapı (mm)	Kanat Sayısı (adet)	Doluluk oranı (%)
200	6	19,362
300	6	13,391
400	6	11,039

Açısal hız değerleri, çizgisel hız değerleri ve türbin çaplarının birlikte değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. Burada çizgisel hız türbinlerin hava akımında ki rüzgâr hızlarına verdiği karşılık olarak ifade edilebilir. Bu yüzden dolaylı olarak kanat profili ile doğrudan ilgilidir. Çizgisel hız simülasyon rapor sonuçlarından elde edilmiştir ve açısal hız değerleri formül ile hesaplanmıştır. Açısal hız değerleri de diğer parametrelerde olduğu gibi belirlenen hava akımı rüzgâr hızlarına göre değerlendirilmiştir. Deneysel ya da teorik olarak daha önce yapılmış çalışmalarda açısal hızın doğrudan incelendiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ancak rüzgâr hızının etkili olduğu tüm çalışmalarda dolaylı yoldan ilişkilidir. Açısal hız değerinden beklenen sonuç çizgisel hıza maksimum değerde yanıt vererek türbinin en verimli şekilde dönmesini sağlamasıdır. 200, 300 ve 400 mm türbinlerde açısal hız grafikleri; rüzgâr hızına göre kıyaslandığında belirli bir düzeyin üstünde sapma görülmemiş değerler birbirine yakın seyretmiştir. Ancak çizgi grafiklerde yapılan incelemelerde 400 mm 9 kanatlı türbinde açısal hız değeri için pozitif bir sapma gözlenmiştir. Araştırma kapsamında toplamda 9 adet türbin altışar farklı rüzgâr hızında simüle edilmiş ve türbin çaplarına göre karşılaştırma sonuçlarına göre en verimli türbinler Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Türbinlerin açısal hız değerine göre karşılaştırması

Türbin Çapı (mm)	Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Açısal Hız (rad/s)
200	12	6	36,9
300	12	7	38,1
400	9	5	20,3

Türbinlerde devir değeri de rüzgâr hızları ile kıyaslanmıştır. Devir türbinin dakikadaki dönme sayısıdır. Bu sebeple türbin tasarımı için önemlidir. Yüksek devir değerine sahip türbinler daha verimli kabul edilebilmektedir. Devir değerinden

beklenen sonuç ideal rüzgâr hızında maksimum dönme sayısını yapmasıdır. Burada karşılaştırma yüksek rüzgâr hızına göre değil yine rüzgâr hızlarına verdiği yanıtı göre değerlendirilmiştir. Devir sayısı ile ilgili olarak literatürde Moreira ve ark. 1.3 m çapında türbinde deneysel bir araştırma yapmış ve devri devir enkoderi ile ölçmüştür. Bu deneysel çalışmada araştırılan türbin için daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmıştır[66]. Konu ile ilgili günlük yaşamdan bir örnek verilecek olursa bilgisayar soğutma fanları olabilir. Devir sayısı yüksek değere sahip fanlı bilgisayarlar tercih sebebi olmaktadır. Daha etkin dönüş sağlayarak hava sirkülasyonu ile ısınan bilgisayarı kısa zamanda soğutabilir. Bir benzeri mantık rüzgâr türbinleri içinde geçerlidir yüksek devirli türbinler daha etkin çalışır aynı zamanda devri etkileyen diğer bir parametreyi de belirtebiliriz. Yüksek devir değerine sahip türbinlerin düşük moment katsayısı (tork) değerine sahip olması beklenir. 200 mm türbinler kanat sayılarına göre değerlendirildiğinde 9 kanatlı türbin diğerlerine göre negatif yönlü bir eğilim göstermiştir. 300 mm türbinlerde tüm kanat sayılarında yakın değerleri almış 7 m/s rüzgâr hızında fark görülmüştür. 400 mm 9 kanatlı türbinde diğerlerine göre 3,4 ve 5m/s hızlarında pozitif yönlü bir değişim görülmüştür. Aynı şekilde 6 kanatta negatif yönlü bir eğilim görülmüştür. Burada Simülasyon sonuçlarından elde edilen devir değerlerine göre türbinlerin karşılaştırılmasından elde edilen ilk sonuçlara göre türbin çaplarına göre en verimli seçilen türbinler aşağıda Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3 Türbinlerin devir değerine göre karşılaştırması

Türbin Çapı (mm)	Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Devir (rpm)
200	12	5	192
300	12	5	234
400	9	6	188

Yatay eksenli türbinler için kanat uç hız oranı tanımlaması ve türbinler için değerlendirme kriteri ilgili bölümde verilmiştir. Kanat profili ve rüzgâr hızı kanat uç hız oranı ile doğrudan ilişkilidir. Yeni tasarım MRT için kanat uç hız oranı değerlendirme parametreleri arasındadır ve teorik uygulama kapsamında simülasyon sonuçlarından elde edilen verilerle hesaplanmıştır. Literatürde ve çalışmada kanat uç hız oranının diğer parametreler hakkında fikir verdiği bilinmektedir.

Bilim insanı Moussa hem deneysel hem teorik bir çalışma yapan güç katsayısının, uç hız oranına göre değişimini incelemiş ve değerlerin birbiri ile ilişkili olduğunu bildirmiştir[67]. Bir başka çalışmada Kosasih ve ark. difüzörle güçlendirilmiş bir mikro rüzgâr türbini ile düşük türbülanslı rüzgâr deneysel ve CFD simülasyonunda çalışma yapmış çevresi difüzörle güçlendirilmiş olan türbinin performansında artış olduğunu ve yine güç katsayısı ile oranlı olduğunu bildirmiştir[83].

Literatür taraması hem teorik olarak hem de sayısal olarak çalışmanın doğruluğunu destekler niteliktedir. Kanat uç hız oranı sonuçlarına göre 200 mm türbinlerde 6 kanatlı türbin öne çıkmış, 9 kanatlı türbin çalkantılı değerler vermiş ve 12 kanatlı türbin negatif yönlü bir eğilim izlemiştir. 300 mm türbinler daha verimli sonuçlar vermiştir. 400 mm türbinler genel olarak negatif yönlü bir eğilim göstermiş yalnızca 12 kanatlı türbin 7 m/s hızda ortalamanın üzerinde bir değer yakalamıştır. Programda simülasyon ile alakalı bir sapma olduğu düşünülmektedir. İlk karşılaştırmada elde edilen verilerin sonuçlara göre en verimli türbinler türbin çapına göre Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.4 Türbinlerin kanat uç hız oranı değerine göre karşılaştırması

Türbin Çapı (mm)	Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Kanat Uç Hız Oranı
200	6	2	1,663
300	9	2	2,977
400	12	7	2,574

Klasik rüzgâr türbinlerinde de tek kanatlı türbinden ziyade çok kanatlı ve dengeli kanat dağılımına sahip türbinlerde daha düzgün dağılımlı moment katsayısı oluşturduğu bildirilmişti. Aynı zamanda dengeli tork dağılımı için klasik üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde NACA kodlu kanat profilleri tercih edilirken çok kanatlı türbinlerde konik bıçak tercih edilmektedir. Moment katsayısı için kanat sayısı ve kanat profili etkilidir. Leung ve ark. 3 ile 12 kanat sayılarında mikro rüzgâr türbinlerin deneysel çalışmasını yapmış ve sekiz ve üzerinde kanat sayısına sahip türbinlerin torkunda belirgin bir fark olmadığını ve daha az kanat sayısına sahip türbinlerin enerji dönüşümü açısından verimli sonuçlar vermeyeceğini bildirmiştir [59].

Öte yandan Moreira ve ark. 4 kanatlı 1,3 m çapında türbin için deneysel bir çalışma yapmış aktarma sisteminin dirençli torklarını tork sensörü ile ölçerek tork ölçümüne bir uygulama örneği sunmuş ve çalışmanın doğruluğunun sağlanabilmesi için çalışmanın başlangıç koşullarını değerlendirmek için daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmıştır [66]. Mevcut çalışmada türbinlerin kanatlarına rüzgârın çarpmasıyla moment katsayısı türbin üzerinde göbek, kanatlar ve dişliler olmak üzere üç ayrı bölgeden etkilenir. Türbinin dönme moment katsayısı olduğundan bu değerlerin bileşkesi simülasyon uygulamasından otomatik olarak çekilmiştir. Sonuçlara göre 200 mm türbinlerde en stabil sonuçları 12 kanatlı türbin vermiştir. Ancak verim açısından rüzgâr hızı ile beraber değerlendirildiğinde 9 kanatlı türbin 6 m/s hızda en sağlıklı sonucu vermiştir. 300 mm türbin sonuçlarında 6 kanatlı türbinler diğer türbinlere göre moment katsayısı için negatif sayılacak yüksek sonuçlar vermiştir. 300 mm türbin için 5 m/s rüzgâr hızında 6 kanatlı türbin en verimli sonucu vermiştir. 400 mm türbinde 9 kanatlı türbin rüzgâr hızının artışıyla moment katsayısında orantılı bir artış göstermiştir. Değerlendirme sonuçları türbin çaplarına göre Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5 Türbinlerin moment katsayısı değerine göre karşılaştırması

Türbin Çapı (mm)	Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Moment Katsayısı (N*m)
200	9	6	0,017
300	6	5	0,505
400	12	3	0,001

Ses şiddeti simülasyon uygulamasının bir çıktısı olup türbin ve çalışmanın doğruluğunu destekleyecek bir parametreden ziyade bir kıyaslama ölçütü sayılabilir. Ancak çalışma da diğer parametrelerle beraber değerlendirilmiştir. Ses şiddeti esasında kanatlar, oluşturulan hava akımına bağlı değişen; açısal hız, kanat uç hız oranı, moment katsayısı gibi türbin dönmesini etkileyen ve sonuçlarını veren tüm parametrelerle orantılı olması beklenir. Yüksek rüzgâr hızında, yüksek kanat uç hız oranı, dişli ve kanatların etkisiyle yüksek momentum katsayısı gibi etkilerle doğru orantılı olarak yüksek dB değerlerinde ses şiddeti üreteceklerdir.

Klasik rüzgâr türbinlerinde ciddi bir dezavantaj olan ses şiddeti değeri mevcut çalışmada incelenmiştir. Ses şiddeti değeri 200, 300 ve 400 mm türbinlerde tüm kanat sayılarında rüzgâr hızının artışıyla orantılı bir artış göstermiş ve beklenen sonuçları desteklemiştir. Ancak yine de asıl sonuçlara ulaşmak için uygulamaya geçilmelidir. Simülasyon uygulamasının sonuçlarının beraber değerlendirilmesi sonunda elde edilen veriler aşağıda karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6 Türbinlerin ses şiddetine göre karşılaştırması

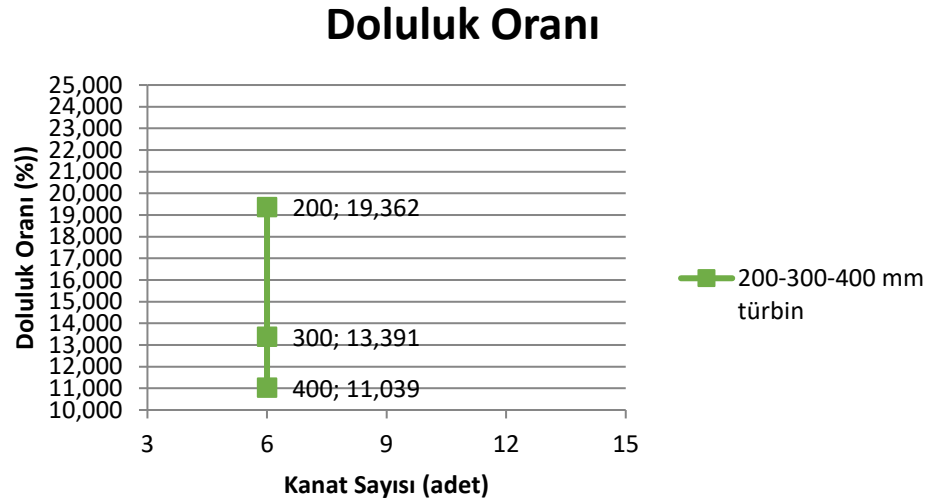
Türbin Çapı (mm)	Kanat Sayısı	Rüzgâr Hızı (m/s)	Ses Şiddeti (dB)
200	9	3	0
300	9	3	22,23
400	12	2	0

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu bölümde çalışmanın nihai sonuçları ve bazı öneriler sunulmuştur. Çalışma amaçları ve hedeflerin belirlenmesi ve çalışmanın yürütülmesi için yapılan planlamaya uyularak sonuçlandırılmıştır. Çalışma türbinler ve ilgili verilerin sürekli karşılaştırmasıyla olmuştur. Elde edilen verilerle nihai türbini belirlememizde yardımcı olan son karşılaştırmalar aşağıda verilmiştir.

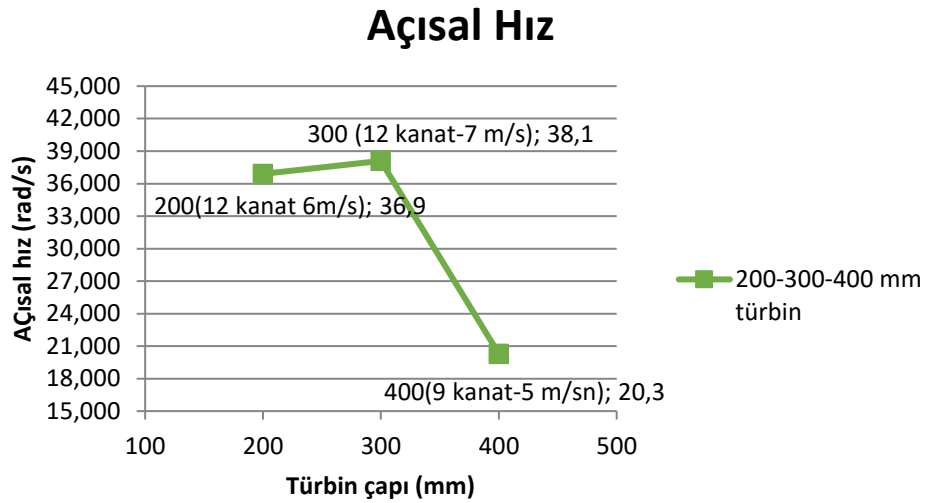
Doluluk oranına göre tüm türbinler beraber değerlendirildiğinde, 6 kanat sayısına sahip türbinlerin daha düşük doluluk oranı değerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebi kanat sayısı arttıkça türbin çeperi içinde kanatların daha çok alanı kaplamasıdır. Tüm sonuçlar beraber değerlendirildiğinde 400 mm türbinlerin daha düşük doluluk oranına sahip olduğu görülmüştür. Son değerlendirmenin sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 7.1’de verilmiş ve % 11,039 ile 400 mm 6 kanatlı en verimli türbin olarak seçilmiş ve diğer parametrelerle beraber değerlendirildiğinde ikinci sırada 300 mm türbin yer almıştır.



Şekil 7.1 Doluluk oranı sonuç değerlendirme (200-300-400 mm türbinler)

Açısal hız nihai sonuçlarda yapılan karşılaştırma da 200 ve 300 mm türbinler birbirine yakın seyretmiştir. Yapılan ilk karşılaştırmada 6 m/s hızda 200 mm türbin ve 7 m/s hızda 300 mm türbin öne çıkmıştır. Ancak çalışmanın hedeflerinden biri olan düşük rüzgâr hızında yüksek verim için 6 m/s hız ile 36,9 rad/s değeri yakalayan 200

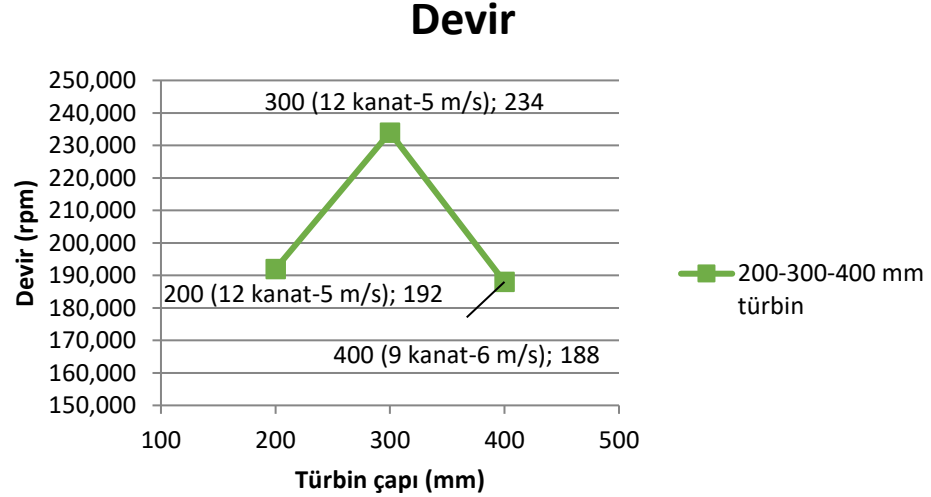
mm 12 kanatlı türbin seçilmiştir. 200 ve 300 mm türbinler birbirine yakın değerlere sahip olduğundan diğer parametrelerin sonuçları ile beraber değerlendirerek yeniden değerlendirme yapılmasında herhangi bir sorun görülmemektedir. 400 mm türbinler çok düşük açısal hız değerine sahiptir. Bunun sebebi 400 mm türbinlerin çizgisel hız değerine yeteri kadar cevap verememesidir. 400 mm türbinlerin açısal hızlarının beklenen verimi yakalaması için daha yüksek rüzgâr hızlarına ihtiyaç duyduğu söylenebilir. Çalışmanın mikro türbinler ile düşük hızında yüksek verim hedefini desteklemektedir. İlk değerlendirmenin genel sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 7.2’de verilmiştir. Değerlendirmenin sonuçlarına göre 300 mm türbin 12 kanatlı türbin 7 m/s hız ile ilk sırada yer almıştır ve 300 mm türbinlerin genel olarak daha verimli sonuçlar verdiği belirtilmelidir.



Şekil 7.2 Açısal hız sonuç değerlendirme (200-300-400 mm türbinler)

Devir değerleri ile ilgili yapılan tüm karşılaştırmada; 200 mm türbinler için 9 kanatlı türbinlerin geride kaldığını göstermiştir. 6 kanat ve 12 kanatta yok denecek kadar az farkla yakın seyretmiştir. 300 mm türbinlerde bariz bir sapma görülmemiştir. Yalnızca 5 m/s rüzgâr hızında 12 kanatlı türbin 5 m/s rüzgâr hızına daha verimli bir yanıt vermiştir. 300 mm türbin genel değerlendirmede 200 mm ve 400 mm türbinlere göre daha verimli kabul edilebilir. 400 mm türbinlerde ise 9 kanatlı türbinlerde 3, 4 ve 5 m/s rüzgâr hızlarında pozitif bir sonuç gözlenmiştir.

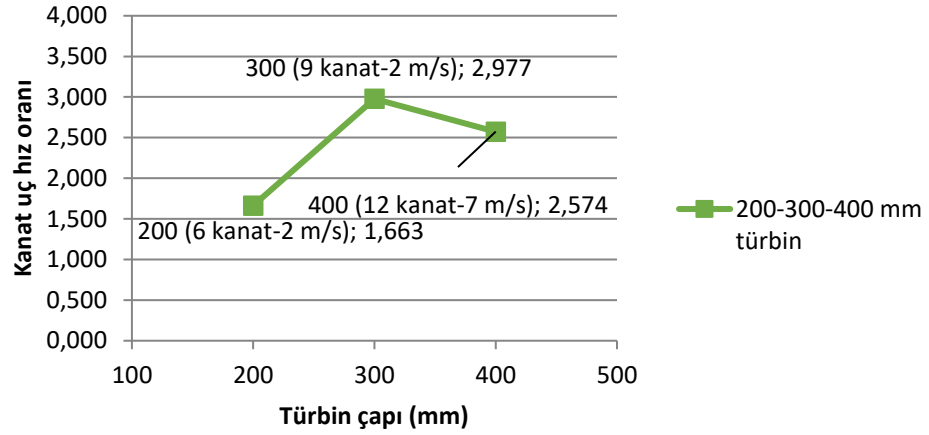
Genel değerlendirme sonuçlarına göre 300 mm türbinler daha verimli sonuç vermiştir. Türbin çaplarına göre yapılan karşılaştırma sonuçları aşağıda Şekil 7.3’de verilmiştir.



Şekil 7.3 Devir sonuç değerlendirme (200-300-400 mm türbinler)

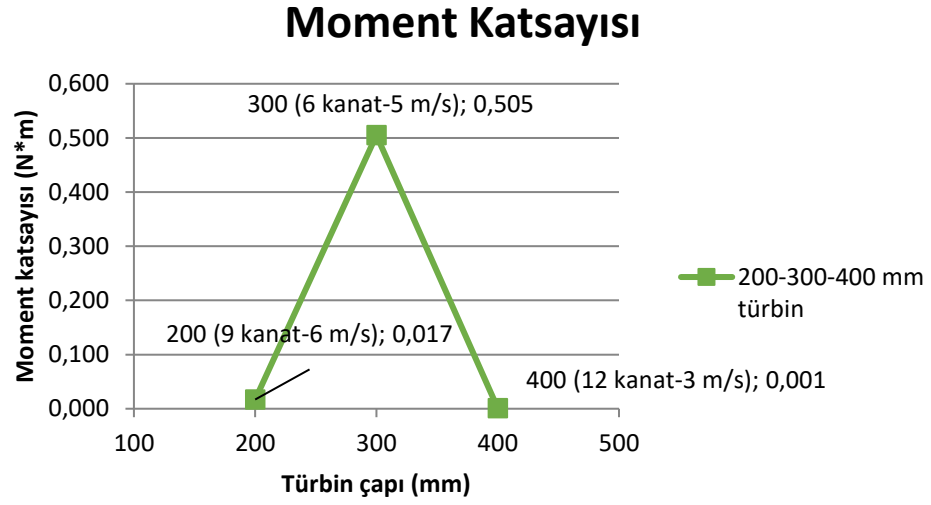
Türbin tasarımlarında önem arz eden bir değerde kanat uç hız oranıdır. Kanat uç hız oranına göre 200 mm türbinlerde 6 kanatlı türbinler tüm rüzgâr hızlarında yaklaşık değerler vermiştir. 9 kanatlı türbinde sapma görülmüştür. Örneğin 6 m/s hızda 5 m/s hıza göre daha düşük bir kanat uç hız oranı vermiştir. Türbin tasarımından beklenenin daha düşük rüzgâr hızlarında daha yüksek kanat uç hız oranına sahip bir değer vermesi olduğu unutulmamalıdır. 300 mm türbinler devir de olduğu gibi genel değerlendirmede daha verimli sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ancak diğerlerinden farklı olarak en verimsiz sonuçları 6 kanatlı türbinde ve tüm rüzgâr hızlarında vermiştir. 400 mm türbinlerde ise bu durum biraz farklılık göstermiştir. 6,9 ve 12 kanatlı türbinler kendi grubu içinde 2,3,4,5 ve 6 m/s rüzgâr hızlarında yaklaşık değerler almış ve 12 kanatlı türbinde 7 m/s rüzgâr hızında bir yükselen sapma görülmüştür. Tüm rüzgâr hızlarında yaklaşık değerlerin elde edilmesi ve gözlenen sapma normal değildir. Genel değerlendirme sonuçları Şekil 7.4’te verilmiştir.

Kanat Uç Hız Oranı



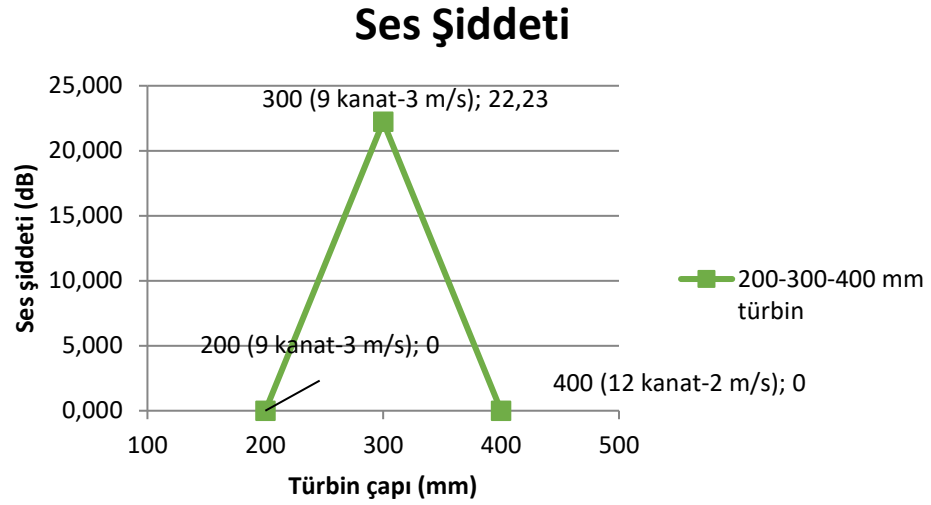
Şekil 7.4 Kanat uç hız oranı sonuç değerlendirme (200-300-400 mm türbinler)

Moment katsayısı ile türbinleri karşılaştırmada genel sonuçlar; 200 mm türbinler ve belirlenen rüzgâr hızları için düzenli bir dağılım gözlenmemiştir. Özellikle düşük sayılabilecek 3 m/s rüzgâr hızında 6 kanatlı türbin negatif bir eğilim göstermiştir. Aynı zamanda 9 kanatlı türbinde 2 m/s rüzgâr hızında beklenen değer üzerinde bir değer saptanmıştır. En az sapma 12 kanatlı türbinde görülmüş bu sebeple 200 mm türbin çapı için en verimli türbin seçilmiştir. 300 mm türbinler en yüksek değerleri verse de moment katsayısı için rüzgâr hızına bağlı olarak beklenen sonuçları vermiştir. En verimli değer ise 5 m/s rüzgâr hızında 6 kanatlı türbinde gözlenmiştir. 400 mm türbinlerde 6 ve 12 kanatlı türbinler yine beklenenin üzerinde tüm rüzgâr hızlarında yaklaşık değerler almıştır. 9 kanatlı türbin rüzgâr hızı ile orantılı olarak beklenen artışı göstermiş ancak beklenenin çok üzerinde değerler vermiştir. Bu sebeple 300 mm türbinler en doğru sonuçları vermiştir diyebiliriz. Türbin çaplarına ve rüzgâr hızlarına bağlı olarak genel değerlendirmenin sonuçları Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.5 Moment katsayısı sonuç değerlendirme (200-300-400 mm türbinler)

Ses şiddeti klasik rüzgâr türbinlerinin dezavantajlarından biri olan yüksek ses şiddetlerine bir çözüm getirip getirmeyeceğini incelemek amacıyla incelenmiştir. Ses şiddetinden beklenen yine rüzgâr hızı ile orantılı artış göstermesidir. Genel olarak tüm türbinlerde düzenli bir artış gözlenmiştir. Sonuçlara göre türbinler yaklaşık olarak; 200 mm 0-50 dB, 300 mm 10-65 dB, 400 mm 0-85 dB aralığında seyretmiştir. 200 ve 400 mm türbinlerde 0 dB değeri gözlenmiş ancak 300 mm’de gözlenmemiştir. En yüksek ses şiddeti değerleri 200 mm türbinlerde 6 kanatlı türbinlerde ve 400 mm türbinlerde 9 kanatlı türbinlerde gözlenmiştir. 300 mm türbinlerde tüm türbinler rüzgâr hızları ile ortalama yaklaşık değer gözlenmiş ve geçerliliği kabul edilmiştir. Türbin çaplarına göre yapılan karşılaştırmanın değerlendirme sonuçları aşağıda Şekil 7.6’da verilmiştir. Ses şiddetinin diğer parametreler gibi bir değerlendirme kriteri olmadığı araştırmanın amacına bağlı olarak çalışmadan elde edilen nihai sonucun doğruluğunu desteklemek amacıyla incelendiği unutulmamalıdır.



Şekil 7.6 Ses şiddeti sonuç değerlendirme (200-300-400 mm türbinler)

Yapılan çalışmalar mikro rüzgâr türbinlerinin düşük rüzgâr hızlarında yüksek verimli türbin tasarımının oluşturulması ile sınırlandırılmıştır. İlgili sınırlar ile ilgili ilk olarak türbin tasarımının hedefler doğrultusunda sınırların belirlenmesi olmuştur. Sonrasında çalışmanın yöntemi belirlenmiş ve literatür ile desteklenmiştir. Mevcut çalışmaların nihai sonucu ilk olarak türbin çapına göre 300 mm türbine yönlendirmiştir. Genel olarak tüm değerler beraber kıyaslandığında 300 mm türbinler 200 ve 400 mm türbinlere göre öne çıkmıştır. Bunun sebebi incelenen bazı parametrelerde bazen 200 mm bazen 400 mm türbinin negatif yönlü eğilim göstererek beklenen sonuçları vermemesidir. Bu da çalışmanın hedefleri doğrultusunda çalışmanın geçerliliğini sarsmaktadır. 300 mm türbinlerde çalışmanın sınırları ve hedefleri doğrultusunda klasik rüzgâr türbinlerinin aksine kentsel yaşamlarda ve daha düşük rüzgâr hızlarında rüzgâr enerjisinden faydalanmak olduğu unutulmamalıdır. Bu doğrultuda yapılan incelemeler ve öncelikle ülkemizin açık ortamlardaki rüzgâr hızı ortalaması dikkate alındığında diğerlerine göre, “ 300 mm çaplı türbin; 9 kanatlı; 5 m/s hız ” ile daha verimli türbin olarak saptanmıştır.

7.2. Öneriler

- ✓ Rüzgâr enerjisinin gün geçtikçe daha da önem kazandığı ve geleceğin enerjisi olduğu unutulmamalıdır.
- ✓ MRT teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar devam ettirilebilir.
- ✓ MRT tasarım ve verimliliğini incelemek için mevcut parametrelerden farklı parametreler araştırılabilir.
- ✓ Belirlenen parametreler ile daha verimli türbin için ne gibi değişiklikler yapılabilir araştırılabilir.
- ✓ Mevcut çalışma da elde edilen türbin için bahsi geçen kullanım alanları genişletilebilir.
- ✓ Mevcut çalışmada değerlendirme yönteminde kullanılabilecek farklı teorik metodlar araştırılabilir.
- ✓ Mevcut çalışma uygulamaya geçilerek sonuçların doğruluğu desteklenebilir.
- ✓ Uygulama metodu kaç farklı proses tekniğiyle ve malzeme ile yapılabilir araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Karaoğlu, Zirai Meteoroloji. Nobel Akademik 2013.
- [2] Dr. F. Türksöy. “Rüzgâr Verisi Ölçümü ve Analizi” *Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu*, İzmir, 2001.
- [3] M. S. Ataseven, S. Ataseven “Rüzgâr Ölçüm Sistemleri” Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Odası, Ankara, 2007.
- [4] M. Durak, S. Özer. Rüzgâr enerjisi: teori ve uygulama, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği Yayını, ss. 543. Ankara, 2008.
- [5] Doç. Dr. A. S. Anlı “Rüzgâr” *Meteoroloji Ankara Üniversitesi Açık Ders Notları*, Ankara, 2019.
- [6] B. Çakır, E. Helvacı. “ Rüzgâr Türbini ve Kanat Tasarımı” Bitirme Tezi, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2016.
- [7] Ö. Özgener, “Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı” *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Sayı: 3 ss.159-173, 2002.
- [8] H. Gençel, İ. Tarhan, “ Rüzgâr Enerjisinin Önemli Geçiş Yerlerinden Olan Çanakkale Bölgesindeki Bazı Rüzgâr Enerji Santralleri için Kapasite Faktörü İncelemesi” *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sayı:5,ss. 120-139, 2019.
- [9] B. Avcı ve T. B. Yılmaz “Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi” Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2012.
- [10] E. Er, “Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretimi” Yüksek Lisans Diploma Çalışması, Bülent Ecevit Üniversitesi, 2014.
- [11] A. Özdamar, “Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Sayı: 2-3, ss. 133-145, 2000.
- [12] K. B. Potuk, “Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi” Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2015.
- [13] F. Obeidat, “Electrical Power From the Wind – The First Attempts” *Wind Energy Systems*, Faculty of Engineering, Philadelphia University.

- [14] “Denizüstü (Offshore) Rüzgâr Enerjisi Santrali Nedir?”, *Enerji Portalı*, <https://www.enerjiportali.com/>. [Erişim tarihi: 24- Eylül- 2020].
- [15] S. Hayli, “Rüzgâr Enerjisinin Önemi, Dünya’da ve Türkiye’deki Durumu” *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Sayı:1, ss. 1-26, 2001.
- [16] “GWEC-2021”, *Global Wind Report*, <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>. [Erişim tarihi: 30- Nisan- 2021].
- [17] K. Ohlenforst, “Good year for wind energy with 51.3 GW new installations” *GWEC Nisan*, ss.11, Belçika, 2018.
- [18] “Yenilenebilir-Rüzgâr” *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü* <https://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>. [Erişim Tarihi: 01-Ekim-2020]
- [19] “Hezarfen” *Meteoroloji Genel Müdürlüğü* <https://hezarfen.mgm.gov.tr/>. [Erişim Tarihi: 01-Ekim-2020]
- [20] Z. T. Altuntaşoğlu, “Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi, Mevcut Durum, Sorunlar,” *Mühendis ve Makine Dergisi*, sayı 617, ss. 56-63, 2012.
- [21] “Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatik Raporu”, *TÜREB-2020*, http://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/istatistik_raporu_01_2020.pdf. [Erişim tarihi: 01-Ekim - 2020].
- [22] “Rüzgâr Enerji Santralleri”, *Enerji Atlası*, <https://www.enerjiatlası.com>. [Erişim tarihi: 20-Kasım- 2020].
- [23] “Rüzgâr enerjisi kullanım alanları”, *Ekolojist.net*, <http://ekolojist.net/ruzgar-enerjisi-kullanim-alanlari/>. [Erişim tarihi: 04-Ekim- 2020].
- [24] “Rüzgâr Çiftliği”, *Vikipedi*, https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_%C3%A7iftli%C4%9Fi. [Erişim tarihi: 05-Ekim- 2020].
- [25] M. T. Gençoğlu, M. Cebeci. “Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi” *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, İzmir, 2001, ss.1-8.
- [26] Rüzgâr, *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>. [Erişim tarihi: 07-Ekim - 2020].
- [27] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, *Yenilenebilir Enerji Teknolojileri, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Önemi- 522EE0421*, Ankara, 2012.

- [28] İ. Konyalı, “Türkiye İçin Mevcut Enerji Üretimine Alternatif Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji Kaynaklarının Seçimi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2019.
- [29] T. Kayhan, “Peyzaj Uygulamalarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Yararlanma Olanakları”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2019.
- [30] Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, http://www.cmo.org.tr/mevzuat/mevzuat_detay.php?kod=291. [Erişim tarihi: 07-Ekim - 2020].
- [31] A. Şenkal, N. S. Çetin, “Türkiye’de Kurulu Olan Büyük Güçlü Rüzgâr Santrallerinin Kapasite Faktörlerine Genel Bir Bakış” *Ege Bölgesi Enerji Formu*, Denizli, 2009.
- [32] N. S. Çetin, “Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgâr Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyon”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, 2006.
- [33] “Rüzgâr Hız Dağılımı”, DOCPLAYER, <http://docplayer.biz.tr/18836940-Ruzgar-hiz-dagilimi-50-metre-ekonomik-res-yatirimi-icin-7-m-s-veya-uzerinde-ruzgar-hizi-gerekmetedir.html>. [Erişim tarihi: 07-Ekim - 2020].
- [34] B. Deda Altan, “Perdeleme Yöntemi İle Savonius Rüzgâr Çarkının Performansının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2006.
- [35] U. Elibüyük, A. K. Yakut, İ. Üçgül “Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri” *SDÜ YEKARUM e-DERGİ*, Sayı:2 ss. 1-14, 2014.
- [36] H. Terzioğlu, M. Aslan, H.D. Demirok, “Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretimi” *Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri*, Konya, 2019, ss. 220-241.
- [37] N. Nurbay, A. Çınar, “Rüzgâr Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması” *Makine Eğitimi Bölümü*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2003.
- [38] “Rüzgâr Türbinleri Çeşitleri” *Free Enerji*, <http://sunenerji.blogspot.com/2013/10/ruzgar-turbin-cesitleri.html>. [Erişim tarihi: 8-Ekim - 2020].
- [39] Ş. Canpolat, “Rüzgâr Enerjisi ve Isparta Şartlarında Prototip Bir Rüzgâr Türbini Tasarımı”. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2013.

- [40] G. Emniyetli, “Elektrik İhtiyacının Karşılanması için Rüzgâr Türbini Tasarımı”. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, 2007.
- [41] “Offshore And Onshore Wind Farms: What Are The Pros And Cons?” *NES Global Talent*, <https://www.nesgt.com/blog/2019/07/offshore-and-onshore-wind-farms>. [Erişim tarihi: 09-Ekim - 2020].
- [42] “Motorwind Mikro Rüzgâr Türbinleri”, *Mikro Rüzgâr Türbinleri* <https://www.myfikirler.org/motorwind-mikro-ruzgar-turbinleri.html>. [Erişim tarihi: 08-Ekim - 2020].
- [43] “Patent Numarası” *Mikro Rüzgâr Türbin Teknolojisi* <http://bases-brevets.inpi.fr/fr/document/FR2884285.html?s=1439768984685&p=5&cHash=b7724955e21d466790ffbd5b59ed482e>. [Erişim tarihi: 08-Ekim - 2020].
- [44] “Lucien Gambarota Mikro Rüzgâr Türbin Teknolojisi”, *Motorwind Farms*, <http://www.motorwavegroup.com/windfarm/> [Erişim tarihi: 08-Ekim - 2020].
- [45] “Water turbine” *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Water_turbine. [Erişim tarihi: 10-Ekim - 2020].
- [46] “Francis Turbine” *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine. [Erişim tarihi: 10-Ekim - 2020].
- [47] M. Y. Zakaria, D. A. Pereira, M. R. Hajj, “Experimental investigation and performance modeling of centimeter-scale micro-wind turbine energy harvesters”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 147, pp. 58-65, 2015.
- [48] B. Kirke, “Developments in ducted water current turbines” www.cyberiad.net, Sustainable Energy Centre, University of South Australia, 2005.
- [49] F. Hogan, “Designing Micro Wind Turbines for Portable Power Generation” *Department of Mechanical Engineering, McGill University*, Montreal, Canada
- [50] H. Mamur, “Design, application, and power performance analyses of a micro wind turbine” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol.23, pp.1619-1637,2015.
- [51] R.A. Kishore, A. Marin, S. Priya. “Efficient Direct-Drive Small-Scale Low-Speed Wind Turbine” *Energy Harvesting and Systems*, vol.1(1-2) pp.27-43, 2014.

- [52] Pei Ying, Yong Kang Chen, Yi Geng Xu, "An aerodynamic analysis of a novel small wind turbine based on impulse turbine principles", *Renewable Energy-Elsevier*, vol. 37, pp.37-43, 2015.
- [53] R. Amirante, P. De Palma, E. Distaso, M. La Scala, P. Tamburrano, "Design of a novel open space test rig for small scale wind turbine", *72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*, Italy, 2017, pp. 628-635.
- [54] N. Reuther, J.P.Thull, "Feasibility Study of Small and Micro Wind Turbines for Residential Use in New Zealand" *Land Environment and People Research Report*, New Zealand, 2011.
- [55] B. Loganathan, H. Chowdhury, I. Mustary, Md M. Rana, F. Alam, " Design of a micro wind turbine and its economic feasibility study for residential power generation in built-up areas", *2nd International Conference on Energy and Power*, Sydney, 2018, pp. 812-819.
- [56] N. Rosmina, A. S. Jauharib, A. H. Mustaamal, F. Husind, M. Y. Hassane, " Experimental study for the single-stage and double-stage two-bladed Savonius micro-sized turbine for rain water harvesting (RWH) system", *2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA*, 2014, pp. 274-281.
- [57] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraja, V. H. Krishna, " A review on small scale wind turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp.1351-1371, 2016.
- [58] J.-W. Park, H.-J. Jung, H. J. and B. F. Spencer, Jr, " Feasibility Study of Micro-Wind Turbines for Powering Wireless Sensors on a Cable-Stayed Bridge", *Energies*, vol. 5, pp.3450-3464,2012.
- [59] D.Y.C. Leung, Y. Deng, M.K.H. Leung, "Design Optimization of a Cost-Effective Micro Wind Turbine" *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, 2010.
- [60] S. Çelikdemir, M. Özdemir, "Rüzgâr Türbin Sistemlerinin Karşılaştırılması", *URSI-TÜRKİYE'2014 VII. Bilimsel Kongresi*, Elazığ,2014.
- [61] K. Tiwari, T. Harinarayana, " Increasing the Efficiency of Grid Tied Micro Wind Turbines in Low Wind Speed Regimes", *Smart Grid and Renewable Energy-Elsevier*, vol. 5, pp. 249-257, 2014.

- [62] Z. Alice Ye, ‘‘ A Micro Wind Turbine for Energy Harvesting’’, *Department of Electrical Engineering and Computer Science University of California- EE247A Final Project*, Berkeley, 2015.
- [63] D. Nongdhar, B. Goswami, P. Gogoi, S. Borkataky, ‘‘ Design of Horizontal Axis Micro Wind Turbine for Low Wind Speed Areas’’, *ADBU Journal of Electrical and Electronics Engineering (AJEEE)*, vol.2, pp. 39-47, 2018.
- [64] F. Hogan, ‘‘Designing Micro Wind Turbines for Portable Power Generation’’ *Department of Mechanical Engineering, McGill University*, Montreal, Canada.
- [65] N. C.-Antsos, A. V. Amoros, Gerard J.W. van Bussel, S. M. Mertens, Ad J.M. van Wijk, ‘‘ Wind resource characteristics and energy yield for micro wind turbines integrated on noise barriers – An experimental study’’, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 203, pp. 1-15, 2020.
- [66] J. L.R. Moreira, A. L.A. Mesquita, L. F. Araujo, M. A.B. Galhardo, J. R.P. Vaz, Joao T. Pinho, ‘‘ Experimental investigation of drivetrain resistance applied to small wind turbines’’, *Renewable Energy-Elsevier*. vol. 153, pp. 324-333, 2020.
- [67] M. O. Moussa, ‘‘Experimental and numerical performances analysis of a small three blades wind turbine’’, *Energy*, vol. 203, pp. 1-18, 2020.
- [68] A. A. Nimje, N. M. Gandhi, ‘‘ Design and development of small wind turbine for power generation through high velocity exhaust air’’, *Renewable Energy-Elsevier*, vol.145, pp. 1487-1493, 2020.
- [69] T. Erdoğan, D.Terzioğlu, ‘‘Uçak Kanat Profilinin Had Yazılımı İle Analizi’’, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Lisans Tezi, 2018.
- [70] U. Rişvanoğlu, ‘‘Naca Profil Aile Geometrisi Hesap Programı’’, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [71] E. Işık, O. Ünal, ‘‘ Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi’’, Kocaeli Üniversitesi, Makine Mekanik Tasarım Projesi, 2020.
- [72] R. Lanzafamea, S. Mauroa, M. Messina, ‘‘ Evaluation of the radial flow effects on micro HAWTs through the use of a transition CFD 3D model - Part I: State of the art and Numerical model review’’, *ATI 2015 - 70th Conference of the ATI Engineering Association*, Catania, 2015, pp. 156-163.

- [73] T. Ikeda, H. Tanaka, R. Yoshimura, R. Noda, T. Fujii, H. Liu, ‘‘ A robust biomimetic blade design for micro wind turbines’’, *Renewable Energy-Elsevier*, vol.125, pp.155-165,2018.
- [74] S.P. Evans, D.R. Bradney, P.D. Clausen, ‘‘Assessing the IEC simplified fatigue load equations for small wind turbine blades: How simple is too simple?’’, *Renewable Energy-Elsevier*, vol.127, pp.34-31,2018.
- [75] A. I. Idriss, R. A. Ahmed, A. I. Omar, R. K. Said, T. C. Akinci, ‘‘ Wind energy potential and micro-turbine performance analysis in Djibouti-city, Djibouti’’, *Engineering Science and Technology, an International Journal-Elsevier*, vol.23, pp. 65-70, 2020.
- [76] J. Leary, M. Czynnek-Deletre, A. Alsop, A. Eales, L. Marandin, M. Org, M. Craig, W. Ortiz, C. Casillas, J. Persson, C. Dienst, E. Brown, A. While, J. Cloke, K. Latoufis, ‘‘Finding the niche: A review of market assessment methodologies for rural electrification with small scale wind power’’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews-Elsevier*, vol.133, pp.1-18, 2020.
- [77] A. Messineoa, S. Culottab, ‘‘Evaluating the Performances of Small Wind Turbines: A Case Study in the South of Italy’’, *2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*, Italy,2012,pp.137-145.
- [78] H. Soleimanzada, J. Boschea, M. Dahmanea, A. Hajjajia, ‘‘ Dynamic output feedback control for a micro wind turbine’’, *7th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings*, France, 2015, pp.350-359.
- [79] B. Greening, A. Azapagic, ‘‘Environmental impacts of micro-wind turbin’’, *Energy-Elsevier*, vol.59, pp.454-466, 2013.
- [80] D. Zammit, C. S. Staines, A. Micallef, M. Apap, J. Licari, ‘‘ Incremental Current Based MPPT for a PMSG Micro Wind Turbine in a Grid-Connected DC Microgrid’’, *9th International Conference on Applied Energy- ICAE2017*, Cardiff, 2017, pp.2284-2294.
- [81] A. Sedaghata, X. Liu, J. Whittyc, X. Tang, ‘‘ Wind power of small wind turbines in turbulent open jets’’, *Scientia Iranica*, vol. 19, pp. 272-281, 2012.
- [82] S. Chandrasekaran, C. Bowen, J. Roscow, Y. Zhang, D. K. Dang, E. Jung Kim, R.D.K. Misra, L. Deng, J. S. Chung, S. H. Hur,’’ Micro-scale to nano-scale generators

for energy harvesting: Self powered piezoelectric, triboelectric and hybrid devices'', *Physics Reports-Elsevier*, vol. 792, pp. 1-33, 2019.

[83] B. Kosasih, A. Tondelli, '' Experimental study of shrouded micro-wind turbine'', in *Evolving Energy-IEF International Energy Congress (IEF-IEC2012)*, Australia, 2012, pp. 92-98.

[84] J. Mazon, J. Rojas, J. Jou, A. Valle, D. Olmeda, C. Sanchez, ''An assessment of the sea breeze energy potential using small wind turbines in peri-urban coastal areas'', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics- Elsevier*, vol.139, pp. 1-7, 2015.

[85] O. Rodriguez-Hernandez, J.A. del Río, O.A. Jaramillo, '' The importance of mean time in power resource assessment for small wind turbine applications'', *Energy for Sustainable Development-Elsevier*, vol.30, pp. 32-38, 2016.

[86] Z. Simic, J. G. Havelka, M. B. Vrhovcak, ''Small wind turbines e A unique segment of the wind power market'', *Renewable Energy-Elsevier*, vol. 50, pp.1027-1036, 2013.

[87] J. Bukala, K. Damaziak, K. Kroszczynski, M. Krzeszowiec, J. Malachowski, ''Investigation of parameters influencing the efficiency of small wind turbines'', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics-Elsevier*, vol. 146, pp. 29-38, 2015.

[88] J. Taylor, C. Eastwick, C. Lawrence, R. Wilson, ''Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines'', *Renewable Energy-Elsevier*, vol. 55, pp. 120-127, 2013.

[89] R. Lanzafame, M. Messina, ''Power curve control in micro wind turbine design'', *Energy- Elsevier*, vol. 35, pp. 556-561, 2010.

[90] F. Calise, F. L. Cappiello, M. D. d'Accadia, M. Vicidomini, '' Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines'', *Energy-Elsevier*, vol. 191, pp. 1-21, 2020.

[91] K. M. Sunderland, M. Narayana, G. Putrus, M. F. Conlon, S. McDonald, ''The cost of energy associated with micro wind generation: International case studies of rural and urban installations'', *Energy-Elsevier*, vol.109, pp.818-82,2016.

- [92] A. KC, J. Whale, S. P. Evans, P. D. Clausen, ‘‘An investigation of the impact of wind speed and turbulence on small wind turbine operation and fatigue loads’’, *Renewable Energy-Elsevier*, vol.146, pp.87-98, 2020.
- [93] F. Trivellato, L. Battisti, G. Miori, ‘‘The ideal power curve of small wind turbines from field data’’, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics-Elsevier*, vol.107-108, pp.263-273, 2012.
- [94] M. Awadallah, A. El-Sinawi, ‘‘Effect and detection of cracks on small wind turbine blade vibration using special Kriging analysis of spectral shifts’’, *Measurement-Elsevier*, vol. 151, pp.1-14, 2020.
- [95] S. Nojavan, H. A. Aalami, ‘‘Stochastic energy procurement of large electricity consumer considering photovoltaic, wind-turbine, micro-turbines, energy storage system in the presence of demand response program’’, *Energy Conversion and Management-Elsevier*, vol.103, pp.1008-1018, 2015.
- [96] ‘‘Dişli Terminolojisi’’, *Mühendislik Bilgileri*, <http://www.muhendislikbilgileri.com/?pnum=164&pt=D%C4%B0%C5%9EL%C4%B0+TERM%C4%B0NOLOJ%C4%B0S%C4%B0>. [Erişim Tarihi: 03.03.2021]
- [97] ‘‘Dişli Terminolojisi’’, *Modül ve Pd tablosu*, <http://www.muhendislikbilgileri.com/?pnum=162&pt=MOD%C3%9CL%20VE%20Pd%20TABLOSU> [Erişim Tarihi: 03.03.2021]
- [98] ‘‘Makine Eğitimi, Dişli çark hesaplama formülleri tablosu’’, <https://www.makinaegitimi.com/disli-cark-hesaplama-formulleri-tablosu/> [Erişim Tarihi: 08.03.2021]

EKLER

EK-1

