

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ BİYOMİMETİK
OLARAK DENEYSEL VE SAYISAL METOTLARLA
TASARLANMASI**

**Hazırlayan
Mustafa ÖZDEMİR**

**Danışman
Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM**

Yüksek Lisans Tezi

**Aralık 2021
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ BİYOMİMETİK
OLARAK DENEYSEL VE SAYISAL METOTLARLA
TASARLANMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Mustafa ÖZDEMİR**

**Danışman
Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından FYL-2020-10291 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Aralık 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Mustafa ÖZDEMİR

“Rüzgâr Türbini Kanadının Biyomimetik Olarak Deneysel Ve Sayısal Metotlarla Tasarlanması” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Mustafa ÖZDEMİR

Danışman

Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM



Sivil Havacılık ABD Başkanı

Prof. Dr. İlke TÜRKMEN

İmza

TEŞEKKÜR

Tezimin yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen kıymetli danışmanım Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM ve eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Metin UZUN hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Bununla birlikte Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi' ne FYL-2020-10291 kodlu araştırma projesi desteğinden dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmalarım süresince desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, yoğun tez çalışması döneminde destekleriyle her zaman yanımda olan aileme, arkadaşlarıma ve nişanlıma çok teşekkür ederim.

Mustafa ÖZDEMİR

Kayseri, Aralık 2021

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ BİYOMİMETİK OLARAK DENEYSEL VE SAYISAL METOTLARLA TASARLANMASI

Mustafa ÖZDEMİR

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2021
Danışman: Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM**

ÖZET

Bu çalışmada, rüzgâr türbininin kanat tasarımında doğadan ilham alınarak, yeni tasarımlar ile rüzgâr enerjisinin verimliliği arttırılmaya çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmada baykuş kanat yapısından esinlenilmiş ve kavisli kanat, kanat ucuna eklenen kanatçıklı tasarım ve sonsuz kanat tasarımı ile çentikli firar kenarı tasarımları yapılmıştır. En iyi sonucu veren kanat tasarımını belirlemek için yapılan tasarımlar iki aşamalı olarak incelenmiştir. İlk aşamada tasarım parametrelerine uygun olarak tasarlanmış kanatlar Solidworks programında çizilmiş ve Ansys Fluent programına aktarılarak burada tasarlanan kanatların dinamik basınç, hız ve pattline analizleri sayısal olarak incelenmiştir. Aynı zamanda karşılaştırma yapılabilmesi adına sabit kanat yapısı da aynı analizlerde incelenmiştir. Analizlerin ikinci aşamasında ise sayısal analizlerde ideal sonuçlar veren kanat tasarımları 3B yazıcıda üretilerek rüzgâr tüneline farklı göbek bağlama açılarında ve farklı hızlarda incelenmiştir. Rüzgâr tüneli analizinde birebir rüzgâr türbini yapısında üretilerek test alanına bağlanan kanatlar değişik göbek bağlama açıları için üretilmiş çeşitli rotor göbekleri ile dönü hareketinden voltaj çıktısı verecek olan motora bağlanmıştır. Voltaj çıktılarını okuyabilmek için motora bağlanan bir multimetre devresine aynı zamanda bir integratör devresi eklenmiş ve her biri 3 dk süren deneysel incelemelerde ortalama gerilim değerini ve grafik çıktısı alınarak grafiksel olarak sunulmuştur. Kavisli kanatlarda kanat ucuna eklenen sonsuz kanat yapısının boyutuna bağlı olarak üretilen gerilim değerleri değişiklik göstermiş ve tasarlanan kanat yapısında %15'e varan aerodinamik performans iyileşmesi görülmüştür. Ayrıca yapılan tasarım geleneksel sabit kanatlar üzerinde de deneysel olarak incelenmiş olup sabit kanatlar üzerinde %6' ya varan iyileşme görülmüştür. Bunların yanı sıra baykuş kanat yapısında bulunan çentikli firar kenarı tasarımı da deneysel olarak çalışılmış ancak çalışmalar sonrasında enerji üretimi açısından bir gelişim gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr türbini, Aerodinamik performans, Biyomimetik tasarım

DESIGNING A WIND TURBINE BLADE BIOMIMETICALLY WITH EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS

Mustafa ÖZDEMİR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, December 2021

Supervisor: Assoc. Prof. Çağrı Vakkas YILDIRIM

ABSTRACT

In this study, the wind turbine blade design was inspired by nature and tried to increase the efficiency of wind energy with new designs. In this study, inspired by the owl wing structure, curved wing, fin design added to the wing tip, endless wing design and notched trailing edge designs were made. In order to determine the wing design that gives the best result, the designs were examined in two stages. In the first stage, the blades designed in accordance with the design parameters were drawn in the Solidworks and transferred to the Ansys Fluent, and the dynamic pressure, velocity and pattline analyzes of the blades designed here were analyzed numerically. At the same time, the fixed wing structure was also examined in the same analyzes for comparison purposes. In the second stage of the analysis, wing designs that give ideal results in numerical analysis were produced on a 3D printer and examined at different hub clamping angles and different speeds in the wind tunnel. In the wind tunnel analysis, the blades produced in the same wind turbine structure and connected to the test area are connected to the motor, which will output voltage from the rotation movement, with various rotor hubs produced for different hub coupling angles. In order to be able to read the voltage outputs, an integrator circuit was also added to a multimeter circuit connected to the motor, and the average voltage value and graphic output were taken in the experimental examinations, each of which lasted 3 minutes. In curved wings, the stress values produced depending on the size of the endless wing structure added to the wing tip have changed and up to 15% aerodynamic performance improvement has been observed in the designed wing structure. In addition, the design has been experimentally examined on conventional fixed wings, and up to 6% improvement has been observed on fixed wings. In addition to these, the notched trailing edge design in the owl wing structure was also studied experimentally, but after the studies, no improvement was observed in terms of energy production.

Keywords: Wind turbines, Aerodynamic performance, Biomimetic design

İÇİNDEKİLER

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ BİYOMİMETİK OLARAK DENEYSEL VE SAYISAL METOTLARLA TASARLANMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
ONAY:	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş	2
1.2. Rüzgâr Enerjisine Giriş.....	3
1.2.1. Rüzgâr	3
1.2.2. Rüzgâr Enerjisi	3
1.2.2.1. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları	3
1.2.2.2. Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları.....	4
1.2.3. Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretiminin Tarihçesi.....	4
1.3. Rüzgâr Türbinleri	8
1.3.1. Rüzgâr Türbini Çeşitleri	8
1.3.1.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri(YERT)	9
1.3.1.2. Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgâr Türbinleri(DERT)	10
1.3.2. Rüzgâr Türbini Elemanları ve İşlevleri	11
1.3.2.1. Kule	13
1.3.2.2. Türbin Kanatları ve Rotor	13
1.3.2.3. Dişli Kutusu	14
1.3.2.4. Jeneratör	14

1.4. Global Rüzgâr Enerji Potansiyeli ve Küresel Kümülatif Kurulu Güç Miktarı	15
1.5. Türkiye’de Rüzgâr Enerji Potansiyeli ve Kümülatif Kurulu Güç Miktarı.....	16
1.6. Biyomimetik Tasarım (Biyomimikri).....	17
1.7. Literatür Çalışması	20
1.8. Literatür Değerlendirmesi	27

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Giriş	29
2.2. Biyomimetik Kanat Tasarımımız Ve Aerodinamik Performans Analizimiz ...	29
2.2.1. Tasarım Parametreleri	30
2.2.1.1 Uç Hız Oranı.....	31
2.2.1.2 Kanat Planı Şekli ve Miktarı.....	33
2.3. Sınır Koşulları	34
2.4. Grip Bağımsızlığı Çalışması	35
2.5. Rüzgâr Tüneli Analizi.....	49
2.5.1. Teknik Detay	53
2.5.2. Cihaz Boyutları	53

3. BÖLÜM

ARAŞTIRMA VE BULGULAR

3.1. Rüzgâr Türbini Tasarımında Sonsuz Kanat Etkisi	54
3.2. Rüzgâr Türbini Tasarımında Kanatçık Etkisi.....	58
3.3. Rüzgâr Türbini Tasarımında Çentikli Fırar Kenarı Etkisi.....	61

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma	65
4.2. Sonuç ve Öneriler	66
KAYNAKÇA	68
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

BEM	: Kanat Elemanı Teorisi
CFD	: Hesaplamalı Akışkan Dinamiği
DERT	: Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
MÖ	: Milattan Önce
MS	: Milattan Sonra
OECD	: Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
REPA	: Rüzgâr Enerji Potansiyeli Atlası
RES	: Rüzgâr Enerji Santralleri
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini
YY	: Yüzyıl

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası(REPA)’na göre Türkiye rüzgâr enerji potansiyeli.....	16
Tablo 2.1.	Uç hız oranına bağlı değişimler	32
Tablo 2.2.	Optimum giriş uzunluğu.....	34
Tablo 2.3.	Mesh özellikleri.....	37



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Mısır'ın Luksor kentindeki Kraliçe Hatshepsut tapınağının duvarlarındaki çift yelkenli ve sandalların rölyefi.....	5
Şekil 1.2.	Charles F. Brush tarafından tasarlanan ve ilk elektrik üretimi yapan rüzgâr türbini.....	6
Şekil 1.3.	Geçmişten günümüze elektrik üretimi gerçekleştiren rüzgâr türbinleri.....	7
Şekil 1.4.	Rüzgâr Türbini Sınıflandırma Tablosu	8
Şekil 1.5.	Yatay eksenli rüzgâr türbinleri	9
Şekil 1.6.	Yatay eksenli rüzgâr türbinleri	9
Şekil 1.7.	Dikey eksenli rüzgâr türbinleri(Savonius ve Darrieus)	10
Şekil 1.8.	Rüzgâr türbini bileşenleri.....	11
Şekil 1.9.	Nasel iç görünümü	12
Şekil 1.10.	Yatay eksenli bir rüzgâr türbini yapılandırması	12
Şekil 1.11.	Yıllara göre küresel kümülatif kurulu rüzgâr gücü değişimi (2001-2020)	15
Şekil 1.12.	Ülkemizde yıllara göre kurulu rüzgâr gücü değişimi (2004-2020)	17
Şekil 1.13.	Geko kertenkelesinden esinlenilen tırmanış ayakkabısı tasarımı	18
Şekil 1.14.	Yalıçapkını kuşundan esinlenilen japon “mermi tren” tasarımı	18
Şekil 1.15.	Dulavrat otundan esinlenilen velcro bant tasarımı	19
Şekil 1.16.	L. Howle tarafından tasarlanan Rüzgâr türbin kanadı (sol üst) ve hücum kenarı tüberkülli olmayan rüzgâr türbininin (sağ üst) karşılaştırmalı performans verileri(alta)	21
Şekil 1.17.	(a)–(d) Yüzey yağ-akış modelleri	22
Şekil 1.18.	a) Triplaris Americana tohumunun 3 boyutlu modeli. b) Gerçek çalışma koşulları altında rüzgâr türbini testi.....	23
Şekil 1.19.	Farklı rüzgâr koşullarında C_p (Güç Katsayısı) performans grafiği	23
Şekil 1.20.	Dryobalanops aromatica tohumundan esinlenerek tasarlanan biyomimetik yatay eksenli rüzgâr türbininin (HAWT) 3B modelleri	24

Şekil 1.21.	Üretilmiş Kanatçıklar, (a) Geniş alt, (b) sabit genişlik, (c) geniş üst	25
Şekil 1.22.	Kanallı yapı içerisinde 3 kanatçıklı rotorlar, (a) Geniş alt, (b) sabit genişlik, (c) geniş üst	25
Şekil 1.23.	Wright tarafından tasarlanan hibrit kanat profili	27
Şekil 2.1.	Airfoil üzerine etki eden kuvvetler	30
Şekil 2.2.	Tipik bir kanat planı ve bölge sınıflandırması	33
Şekil 2.3	Alternatif tasarım için optimum bıçak kanat şekli uç hızı oranları ve kanat sayısı.....	34
Şekil 2.4.	Hesaplama alanının boyutları ve sınır koşulları	35
Şekil 2.5.	Mesh elaman sayısı ile taşıma katsayısının değişim grafiği	36
Şekil 2.6.	Sabit kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi.....	37
Şekil 2.7.	Sonsuz kanat 1 dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi.....	38
Şekil 2.8.	Sonsuz kanat 2 dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi.....	40
Şekil 2.9.	Sonsuz kanat 3 dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi.....	42
Şekil 2.10.	Aşağı kavisli kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi	44
Şekil 2.11.	Yukarı eğimli kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi	45
Şekil 2.12.	Sabit kanat ve kavisli kanadın sürüklenme kuvveti değerleri.....	46
Şekil 2.13.	Sabit kanat ve kavisli kanadın taşıma kuvveti değerleri.....	46
Şekil 2.14.	Taşıma/sürüklenme kuvveti değerleri sabit kanat ve kavisli kanat	47
Şekil 2.15.	Sürüklenme kuvveti değerleri sabit kanat ve sonsuz kanatlar.	47
Şekil 2.16.	Sabit kanat ve sonsuz kanatların taşıma kuvveti değerleri.	48
Şekil 2.17.	Taşıma/sürüklenme kuvveti değerleri sabit kanat ve sonsuz kanatlar.	49
Şekil 2.18.	T-490 rüzgâr tüneli	50
Şekil 2.19.	Rüzgâr türbini test sistemi	51

Şekil 2.20. Mikrometrenin sisteme entegrasi (a,b,c) ve deneysel rüzgâr tüneli(d).....	52
Şekil 3.1. Sonsuz kanat tasarımları	54
Şekil 3.2. Farklı hızlarda sonsuz kanat tasarımlarının ürettiği voltaj değerleri	55
Şekil 3.3. Rotor göbeği bağlantısı.....	57
Şekil 3.4. Rüzgâr türbini kanat ucuna monte edilmiş kanatçıklı tasarımlar	58
Şekil 3.5. Farklı hızlarda kanatçık kanat tasarımlarının gerilim değerleri.....	59
Şekil 3.6. Rüzgâr türbini kanat ucuna monte edilmiş Çentikli Firar Kenarı Tasarımları	61
Şekil 3.7. Çentikli Firar Kenarı Kanat Tasarımlarının Farklı Göbek Bağlantı Açılarındaki Gerilim Değerleri	62

GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada artan nüfus ve gelişen teknoloji ile her yıl artmakta olan enerji tüketimi beraberinde enerji talebini de getirmektedir. Yenilenemez enerji kaynaklarının tükenmekte olduğu bu dönemde, yeni enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaçla birlikte enerji sektörü enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerjiye yönelmiştir. Geleceğin yeşil enerjisi olarak görülen ve dezavantajları olsa da avantajlarıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının önde gelen kaynağı rüzgâr enerjisi olmuştur ve yapılan çalışmalar rüzgâr enerjisi üzerinde yoğunlaşmıştır. Araştırmacılar rüzgârdan en yüksek verimi sağlayabilmek için farklı tasarımlar üzerinde pek çok sayısal ve deneysel çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda pek çok araştırmacı doğadan gelen bu enerjiyi kullanmanın en etkili yolu olarak yine doğayı tercih etmiş ve doğada bulunan canlılardan ilham alarak biyomimetik tasarımlara yönelmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı rüzgâr enerjisinin, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerjinin gelişmesi için büyük bir öneme sahip olan rüzgâr türbini kanatları ve yapılan tasarımlar ile artan verim sayesinde kanat tasarımının önemini vurgulamaktır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş

Her yıl artan küresel nüfus ve teknolojik gelişmeler, enerji talebindeki artışı da beraberinde getirmiştir. Artan enerji talebi kaynağı her geçen gün azalmakta olan fosil yakıtların tükenme döngüsünü hızlandırmış ve insanoğlunu yeni enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretme yolunda atılan adımlar ile sürdürülebilir enerji gelişmiş ülkelerin gelecekteki enerji planlamaları arasında yerini almış ve önem kazanmıştır [1]. Rüzgâr, yenilenebilir, maliyet açısından rekabetçi ve hava kirliliğine neden olmayan bir enerji kaynağı olarak dünya çapında dikkatleri üzerine çekmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının tüm alanlara yayılması ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının hayatımızda yerini alması adına araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda güneş enerjisinden faydalanmak için güneş pilleri geliştirilmiş, rüzgâr enerjisinden faydalanmak için rüzgâr türbinlerinin kullanımına ve geliştirilmesine yönelik projeler sunulmuştur. Günümüzde, enerji politikalarının temelini oluşturmak için mevcut enerji kaynaklarının farklılaştırılması ve bu kaynakların hizmete sunulması gerekmektedir [2].

Dünya enerji talebindeki artışla birlikte odak yenilenebilir enerji kaynaklarına kaymıştır. Rüzgâr enerjisi, son yıllarda uygulanabilir bir enerji kaynağı olarak araştırılmış ve yüksek irtifalarda yüksek hızlı rüzgârlardan yararlanmak için pek çok yeni tasarım çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda biyomimetik tasarımlar öne çıkmaktadır. Araştırmacıların pek çoğu deniz canlılarından kuşlara, tohumlardan uçan böceklere pek çok canlıyı taklit ederek yeni tasarımlar yapmış, bazıları ise birkaç canlıdan esinlenerek harmanlanmış özgün tasarımlar sunmuşlardır [3].

1.2. Rüzgâr Enerjisine Giriş

1.2.1. Rüzgâr

Güneşten enerji olarak uzaya daha düşük bir sıcaklıkta ısı veren dünya atmosferi, devasa bir ısı motoru olarak modellenebilir. Güneş ışığı bitkiler, su, toprak ve kayalar tarafından farklı derecelerde emilir ve farklı bölgelerde hava farklı oranlarda ısınmaktadır. Bu ısı alışveriş değişken basınç bölgeleri oluşmasına neden olur. Hava hareketinin temel itici gücü, iki bölge arasında oluşan hava basıncı farkıdır. Isınan hava kütlesi yüksek basınç noktalarından düşük basınç noktasına doğru hareket etmeye başlar. Bu kütleli yer değiştirme sonucunda rüzgâr oluşumu meydana gelmektedir [4], [5].

1.2.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgârı oluşturan, yeryüzünün farklı ısınmasıyla meydana gelen basınç farklılığından dolayı yer değiştiren havanın sahip olduğu kinetik enerjiye rüzgâr enerjisi denilmektedir. Artan nüfus, gelişen teknoloji ve ihtiyaçlar daha fazla enerji gereksinimine sebep olmaktadır ve yenilenemez enerji kaynaklarını sona yaklaştırmaktadır. Tükenme döngüsü hızlanan yenilenemez enerji kaynaklarının yerini almakta olan ve yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen temiz ve çevre dostu olan rüzgâr enerjisi elektrik üretimi için en büyük kaynak olmaya adaydır. Yapılan çalışmalar ile geleceğin enerji üretiminde rüzgâr enerjisi alternatif bir çözüm olacaktır. Kaynağı güneş var oldukça tükenmeyecek ve kullanımına yönelik dezavantajı yok denecek kadar az olan rüzgâr enerjisi zaman içerisinde gemileri hareket ettirmek, yel değirmenlerini döndürerek tahıl öğütmek, tarım arazilerinde su pompalamak ve en nihayetinde elektrik üretimi sağlamak amacıyla geçmişten bugüne pek çok alanda kullanılmıştır [6].

1.2.2.1. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları

- Rüzgâr enerjisi güneş var olduğu sürece asla tükenmeyecek bir enerji kaynağıdır,
- Çevresel dezavantajı yok denecek kadar az, temiz ve çevre dostu enerji kaynağıdır,

- Güvenilir kaynağı ve yenilenebilir oluşu kaynak fiyatının zaman içerisinde artmasına sebep olmaz,
- Hammaddesi gereği dışa bağımlılık oluşturmaz,
- Sera gazı emisyonunun artmasıyla oluşan asit yağmurlarına sebebiyet vermez, sera gazı üretmez.
- Yatırım ve işletme masrafları düşüktür. Yüksek kurulum maliyetinin karşılanması ardından sadece bakım ve onarım masrafı vardır,
- Hammadde sıkıntısı yoktur,
- Şehir şebekesinin ulaştırılmasının mümkün olmadığı yerlerde elektrik enerjisi üretimi için elverişlidir,
- Rüzgâr çiftliklerinin tarım ve hayvancılığa açık olması sebebiyle aynı arazinin farklı iki amaç için kullanılabilmesi mümkündür.
- İstihdam yaratma gücü yüksektir.

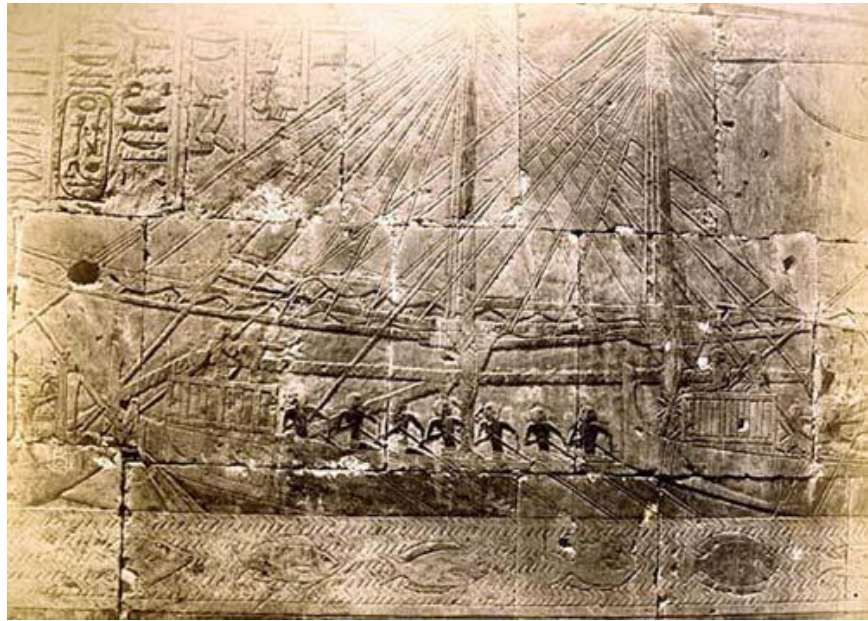
1.2.2.2. Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları

- Rüzgârların düzenli olmayışı sebebiyle enerji üretiminde dalgalanmalar yaşanmaktadır. Bunun yanı sıra şiddetli rüzgâr olan bölgelerde türbinler zarar görebilmektedir,
- Rüzgâr türbinlerinin gürültülü çalışmaları ve bu sebeple rüzgâr çiftliklerinin yerleşim yerlerine uzak konuma kurulması gerekmektedir,
- Bulunduğu çevredeki haberleşme dalgalarını olumsuz etkilemektedir,
- İlk yatırım(kurulum) maliyetleri yüksektir,
- Yoğun üretim süresi boyunca pahalı bir depolama maliyeti vardır,
- Yüksek kule boyuna sahip olmaları ve yüksek hızda dönmeleri göçmen kuşların ölümlerine ve uçuş yollarını değiştirmelerine sebep olabilmektedir.

1.2.3. Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretiminin Tarihçesi

Rüzgâr enerjisinin tarihte kullanımlarına dair örneklerini incelemek rüzgâr enerjisi sistemlerinin bugün hala karşı karşıya olduğu sorunların çözümünde yol gösterici olacaktır. Binlerce yıl insanlığa hizmet etmiş olan rüzgâr enerjisi günümüzde ise enerji üretimine katkı sağlamaktadır. Rüzgâr enerjisi yel değirmenlerinden, modern rüzgâr türbinlerine gelene kadar pek çok teknolojik gelişim göstermiştir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının en önemli ve en yaygın kullanıma sahip ürünlerinden olan petrolün ülkeler arası krize yol açması rüzgâr enerjisi kullanımının günümüze kadar taşınmasına hizmet etmiştir.

Rüzgâr enerjisi kullanımı hakkında tarihte pek çok farklı bilgi olsa da uygarlaşma yolunda ihtiyaçlarını karşılamak isteyen insanoğlu doğanın imkânlarından faydalanmış ve rüzgâr gücünü de bu amaçla kullanmıştır. Teknelerini hareket ettirmek, arazileri için su pompalamak, tahıllarını öğütmek gibi faydalı işlerde ilkel haliyle de olsa kullanımına rastlamak mümkündür. Rüzgâr enerjisinin kullanımına dair ilk ve en eski bulgular M.Ö. 4000’li yıllara ait Mısır seramiklerinde tasvir edilen yelkenli gemilerdir [7]. Günümüzde ancak o yıllara dair bulgulara rastlanmış olsa da doğanın faydalı güçlerinden olan rüzgârın gücünden faydalanma fikri çok daha eski tarihlere uzanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 1.1. Mısır’ın Luksor kentindeki Kraliçe Hatshepsut tapınağının duvarlarındaki çift yelkenli ve sandalların rölyefi [7].

Rüzgâr enerjisi uygulamaları, İran'da yaklaşık M.Ö. 200'lerde yel değirmeni olarak karşımıza çıkmıştır. Bununla birlikte ilk pratik yel değirmenleri olarak bilinen Sistan yel değirmenleri 7.YY'da Persler tarafından dikey eksenli olarak tasarlanmış ve kullanılmıştır [8]. Yel değirmenleri Çin'de M.S. 8.YY'da pirinç tarlalarını sulamak için kullanılmıştır. Tarihte kullanımına en çok rastlanan rüzgâr enerjisi uygulaması olan yel değirmenleri 1105 yılında Fransa'da, 1143'te İngiltere'de içinde olmak üzere pek çok dünya ülkesinde ilk defa kullanılmış ve kullanımı zamanla yaygınlaşmıştır [9]. Buhar makinesinin icadından önce kullanılan en büyük güç kaynaklarından biri yel değirmenleridir. Tarım bölgelerinde su pompalamak, hasat öğütme gibi işlerde kullanılan yel değirmenleri, odun kesmek gibi endüstriyel işlerde de kullanılmıştır. 18. YY' a gelindiğinde Hollanda'da 10.000 civarında yel değirmeni bulunmaktaydı.

Rüzgâr enerjisi tarih boyunca her alanda kullanılmasına rağmen, rüzgâr enerjisinden elektrik üretmeye yönelik ilk girişim 1888 yılında ABD'de Charles Brush tarafından yapılmıştır [10]. O zamanlar dünyanın en geniş türbini olarak bilinen bu türbin 17 m rotor çapıyla büyüklüğünün yanı sıra yalnızca 12kW enerji üretebilmektedir ve 20 yıl boyunca hizmet vermiştir.



Şekil 1.2. Charles F. Brush tarafından tasarlanan ve ilk elektrik üretimi yapan rüzgâr türbini [11]

Charles F. Brush'ın girişiminden sonra tasarımı geliştiren Danimarkalı Paul La Cour, 1891 yılında yapmış olduğu rüzgâr türbini ile doğru akım elde etmiş, elektroliz yoluyla

hidrojen gazı elde ederek rüzgâr enerjisini depolamayı başarmıştır [9]. Modern rüzgâr türbinlerine geçiş konusunda dönüm noktası ve öncüsü olarak anılmaktadır. Bir rüzgâr tüneline kurup, rüzgâr türbini testini yapan ilk kişi olduğu da düşünülmektedir.

20. YY ‘da rüzgâr enerjisi kullanımı buhar makineleri, odun ve kömür kullanımı, petrol fiyatlarındaki düşüşlerle zaman zaman gerilese de 20.YY sonlarında en hızlı büyüyen, önemli bir enerji kaynağı olmuştur. Avrupa ve Amerika’ da özel kesitler kullanan modern türbin üretimlerinin başlaması sektörü canlandırmış ve önemli yatırımlara kapı açmıştır. 1979-1985 yılları arasında devlet destekli 4500’den fazla 1-25 kW gücünde rüzgâr santralleri yapılmıştır. Elektriğin birim fiyatındaki yükseklikten dolayı, 1980’lerde 55 kW kapasiteli rüzgâr türbinleri üretilmiş ve kullanılmaya başlamıştır. Özellikle 1989 yılında Almanya’nın da rüzgâr türbini teknolojisine girmesi ile MW’lar düzeyinde kapasiteye sahip büyük rüzgâr türbinlerinin gelişimi ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Gelişen bu teknoloji ile günümüzde yaklaşık 200 metre rotor çapına sahip 2-3 MW güç kapasiteli rüzgâr türbinleri görmek mümkündür. Ayrıca Rüzgâr Enerji Santralleri (RES) yalnızca karasal uygulama olarak kalmamış, deniz üzerine kurulan çiftliklerden de elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.3. Geçmişten günümüze elektrik üretimi gerçekleştiren rüzgâr türbinleri

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)’nın ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD)’nin bildirmiş olduğu 2050 yılına ait senaryoda, rüzgâr enerjisinin dünyada üretilen elektriğin %12’ sini temsil edeceği öngörülmektedir. Bugün, rüzgâr türbinlerinin ürettiği toplam enerji miktarı üretilen elektriğin yaklaşık %4’ ünü kapsamaktadır. Rüzgâr gücünün kullanımının önündeki türbin maliyetleri, tersiz çiftlik alanları ve türbinlerdeki teknolojik sınırlamalar gibi zorluklar aşıldığında öngörülen senaryoya ulaşmak çok daha kolay olacaktır.

1.3. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr enerjisi, uygarlaşma yolunda insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak için pek çok farklı şekilde kullanılmış olsa da, bu enerjinin kullanımı, yel değirmenlerinden günümüzdeki modern yapısına pek çok teknolojik gelişme süreciyle gelmiştir. İlk zamanlarda rüzgâr enerjisi sadece mekanik enerjiye çevrilerek kullanılmıştır ancak modern rüzgâr türbinlerinde rüzgârın kinetik enerjisi önce mekanik enerjiye sonrasında ise elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Rüzgâr türbinleri genel olarak kule, kanatçıklar, jeneratör ve elektrik-elektronik elemanlarla birlikte rotor mili ve güç dönüşümünü sağlayan dişli kutusunu içerisinde barındıran göbekten oluşur [12].

Rüzgârın kinetik enerjisi rotor mili vasıtasıyla mekanik enerjiye çevrilir ve göbekte bulunan dişli kutusu vasıtasıyla rotor milinin devir hareketi arttırılır ve jeneratöre aktarılır. Jeneratörde elde edilen elektrik enerjisi depolanarak ya da doğrudan alıcılara ulaştırılarak kullanılır [13].

1.3.1. Rüzgâr Türbini Çeşitleri

Rüzgâr türbinleri, türbin jeneratör yapılandırmasına, dönme eksenlerine, türbin rotoruna göre hava akış eksenine(rüzgâr yönüne), devir ve güçlerine, kanat sayılarına, türbin kapasitesine, jeneratör tahrik modeline, güç kaynağı moduna, kurulum konumlarına ve dişli özellikleri gibi pek çok ölçütte sınıflandırılırlar [14].



Şekil 1.4. Rüzgâr Türbini Sınıflandırma Tablosu[14]

Bu sınıflandırmalardan en yaygın ve genel olarak kullanılan rüzgâr türbinlerinin dönme eksenlerine göre sınıflandırılmasıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbinleri ise yatay eksenli rüzgâr türbinleri(YERT) ve düşey(dikey) eksenli rüzgâr türbinleridir(DERT).

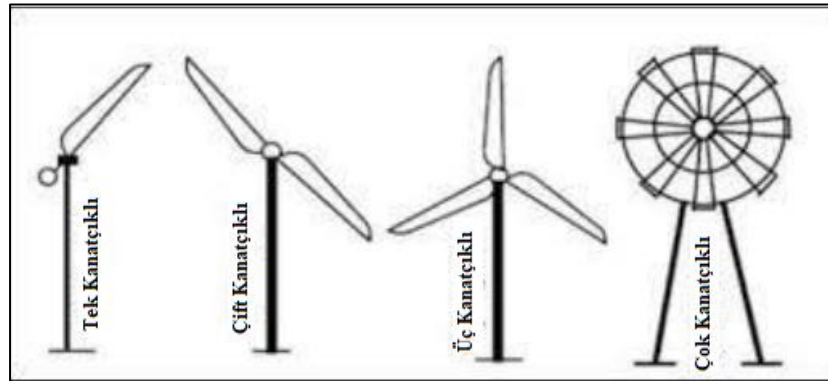
1.3.1.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri(YERT)

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde; rüzgâr yönü ile dönme eksenine birbirine paralel, kanatlar ise rüzgâr yönüne diktir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde rotor kanatçığı sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45'dir [15].



Şekil 1.5. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Rotor kanatlarının sayısı rotor kanadının uç hız oranına bağlı olarak belirlenir. Rüzgâr hızının, rotor kanadı uç hız oranına bölünmesiyle kanat uç hız oranı (λ) elde edilir [15].

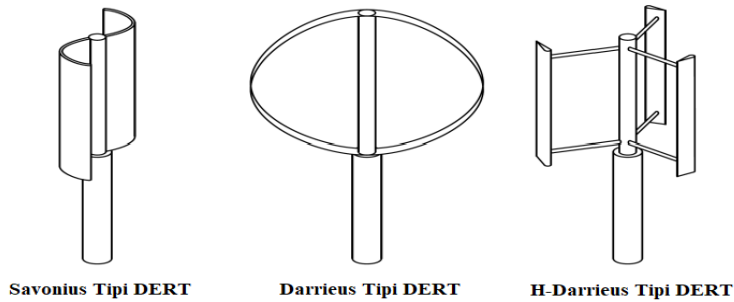


Şekil 1.6. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri [16]

1.3.1.2. Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgâr Türbinleri(DERT)

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde rüzgâr yönü, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi dönme eksenine paralel değil, diktir. Bu türbinlerde türbin kanatları dikey konumda bulunurlar. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin rüzgârı her yönden kabul edebiliyor olmaları ve en büyük avantajlarıdır. Ek olarak bir yaw mekanizmasına ihtiyaç duymazlar. Verimleri yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha düşüktür (yaklaşık %35'tir). Jeneratör ve dişli kutusunun nasıl yerine yer seviyesine yerleştirilebiliyor olması sayesinde kuleye ihtiyaç duymazlar. Düşük hızlarda çalışırlar. Yaw mekanizmasına ihtiyaç duyulmaması, bakım ve onarımının genel anlamda kolay olması, üretilen gücün daha kolay iletilebilmesi gibi pek çok avantajı bulunsa da ticari kullanımları oldukça zayıftır. Düşük verimli olmaları, yere yakın oluşundan rüzgâr hızlarının düşük olması ve çalışmaya başlaması için sisteme ilk hareketi verecek bir tahrik motoruna ihtiyaç duyması ise dezavantajları olarak sıralanabilmektedir. Üç farklı çeşidi mevcuttur. Bunlar;

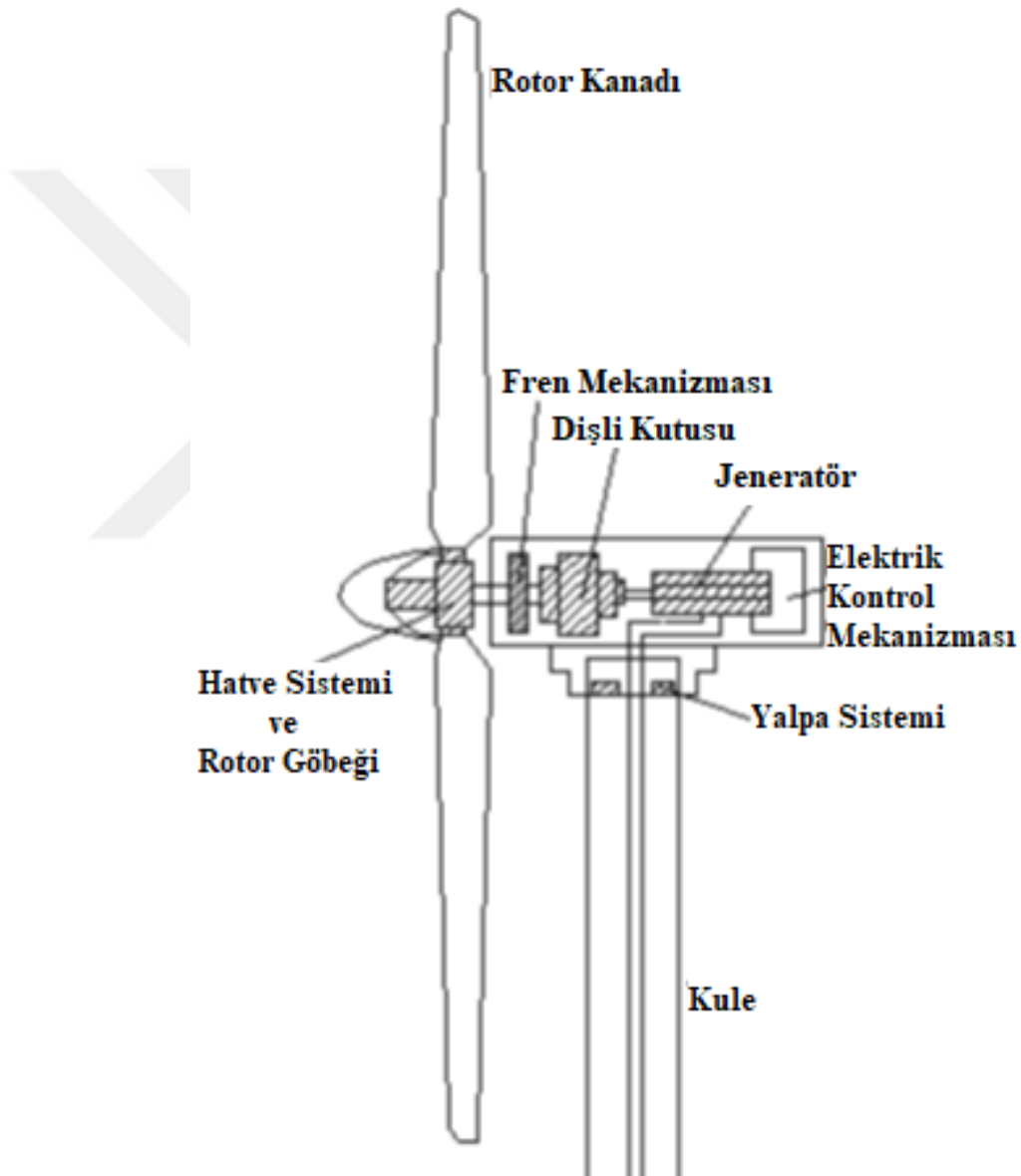
- Darrieus rüzgâr türbinleri
- Savonius rüzgâr türbinleri
- H-Darrieus rüzgâr türbinleri [17]



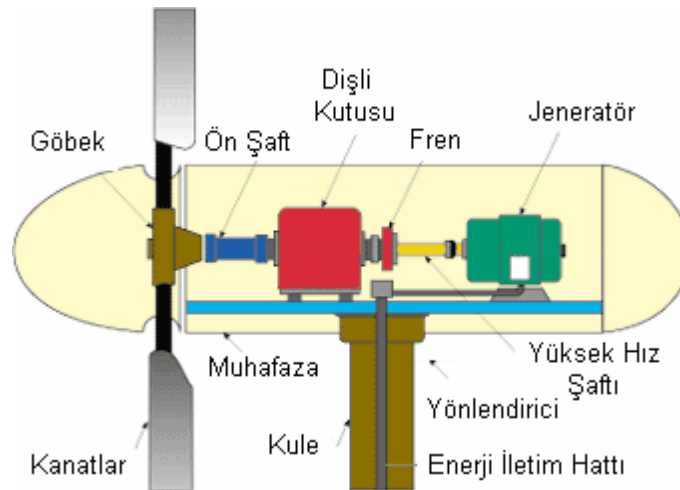
Şekil 1.7. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri(Savonius ve Darrieus) [14]

1.3.2. Rüzgâr Türbini Elemanları ve İşlevleri

Modern büyük rüzgâr türbinlerinin çoğu, tipik olarak üç kanatlı yatay eksenli türbinlerdir. Bu türbinler yapı itibarıyla genel olarak kule, kanatlar ve pek çok elektrik-elektronik bileşenle birlikte rotor, dişli kutusu ve jeneratörü bünyesinde barındıran göbek kısmından oluşmaktadır.

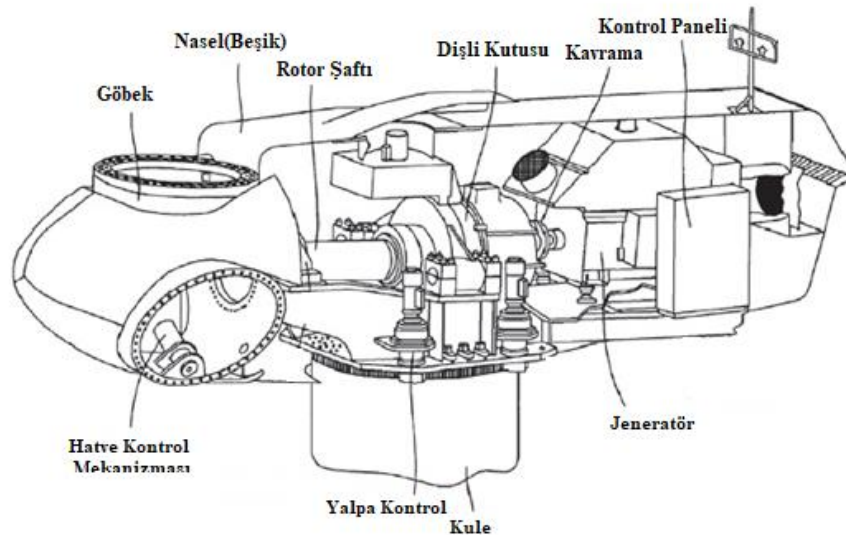


Şekil 1.8. Rüzgâr türbini bileşenleri [18]



Şekil 1.9. Nasel iç görünümü [18]

Şekil 1.10' da göbek yapısında gösterildiği gibi, bir rüzgâr türbini, içinde pek çok türbin bileşenini barındıran ve bir kulenin tepesine yerleştirilmiş motor bölmesinden oluşur. Rotor göbeğine monte edilmiş 3 kanat (şekilde gösterilmemiştir), ana mil aracılığıyla dişli kutusuna bağlanmaktadır. Bu sayede rotor göbeğinin yavaş dönüş hızı, dişli kutusu vasıtasıyla jeneratör rotorunun istenen yüksek dönüş hızına yükseltilir.



Şekil 1.10. Yatay eksenli bir rüzgâr türbini yapılandırması [6]

Pitch kontrol sistemi kullanılarak, normal çalışma koşullarında daha yüksek enerji dönüşümünü sağlamak ve acil durumlarda türbin bileşenlerini (kanat, kule vb.) hasardan korumak için kanadın hücum açısını optimize etmek için her bir kanat ayrı ayrı eğimlendirilir. Rüzgâr türbini tarafından ölçülen anlık rüzgâr yönü ve hızı gibi geri

besleme bilgileri ile yalpa kontrol (döndürme) sistemi, türbinin rüzgâra karşı sürekli olmasını sağlamak için yalpa yönlendirme kontrolünü sağlar [6].

1.3.2.1. Kule

Malzemesi genelde çelik veya beton olan kuleler, yüksekteki rüzgâr hızlarından yararlanmak için nasel ve türbin göbeğini taşıyan silindirik konik desteklerdir. Konik bükme yöntemi ile bölüm bölüm üretilen kulelerin her bir bölümü birbirine içerden kaynatılmış flanşlar vasıtasıyla tutturulur. Destek ve taşıma için kullanılan bu bileşen gerek işlevi gerekse maliyeti sebebiyle aerodinamik, dinamik ve yapısal her türlü testten geçmelidir. Kule yüksekliği, artan yükseklik ile elde edilen enerji artışı ile artan kule boyuna göre değişen kule maliyeti arasındaki en ideal çözümle belirlenir. Bir kule normalde en az rotorun çapı kadar yerden yüksek olmalıdır. Rüzgâr hızı yere yaklaştıkça türbülansın artması sebebiyle kule yüksekliği genellikle 24 m'den az olmamalıdır [13].

1.3.2.2. Türbin Kanatları ve Rotor

Rüzgârla sürekli temas halinde olan ve enerji üretimini sağlayan, rüzgâr türbinlerinin en önemli bileşeni türbin kanatlarıdır. Türbin kanatları rüzgârdan önemli ölçüde güç elde etmek için rüzgârın kinetik enerjisini dönü hareketi vasıtasıyla mekanik enerjiye çeviren türbin elemanıdır. Rüzgâr türbin kanatları genel olarak cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi veya polyester gibi kompozit malzemelerden üretilmektedir. Günümüz modern türbin kanatlarının üretiminde cam elyaf ile güçlendirilmiş plastik kullanılmaktadır. Eski tip rüzgâr türbinlerinde kanatlar rotor göbeğine sabitlenmiş şekilde takılırken, günümüz modern rüzgâr türbinlerinde kanatlar uzunlamasına eksenleri etrafında döndürülebilmektedir. Kanat gövdesine ve rotor merkezine doğru dik açıyla gelen rüzgârın etkisiyle kanatların taşıma kuvvetinde azalma olmaması için rotor kanatları burulmuş olarak tasarlanmıştır[13].

Türbin kanadı tasarımında dikkate alınması gereken pek çok şey vardır, ancak bunlar temel olarak iki kategori içerisinde değerlendirilir: (1) aerodinamik performans ve (2) yapısal güç. Tüm bunlar enerji döngüsünün maliyetini en aza indirmek içindir. Bu da sadece türbin maliyetinin değil, işletme ve bakım maliyetlerinin de düşük olması gerektiği anlamına gelmektedir. Diğer önemli tasarım hususları aşağıda listelenmiştir.

- Aerodinamik performans
- Yapısal güç
- Kanat malzemesi
- Geri dönüştürülebilirlik
- Kanat imalatı ve yöntemleri
- Gürültü azaltma
- Durum izleme
- Kanat kökü ve rotor göbek bağlantısı
- Pasif kontrol seçenekleri
- Maliyetler [13]

1.3.2.3. Dişli Kutusu

Rotor kanatlarının rüzgârdan elde ettiği mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için jeneratöre taşınması gerekmektedir. Rotor şaftı ile jeneratör arasında yer alan dişli kutusu bu iletim sırasında pervanelerin yavaş dönmesi sebebiyle düşük devirle gelen torkun devrini yükselterek jeneratöre uygun hale getiren aktarma sistemidir [19]. Bir rotorun dönüş hızı 20 ila 30 rpm arasında değişmektedir ve bir jeneratör şaftının nominal hızı 1500 ila 3000 rpm arasında ya da daha fazla olduğundan düşük hızlı şaftı hızlandırmak için dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da dişli kutusunu rüzgârın kinetik enerjisinden, elektrik enerjisine dönüşümünde başkahramanlardan birisi haline getirmektedir [15].

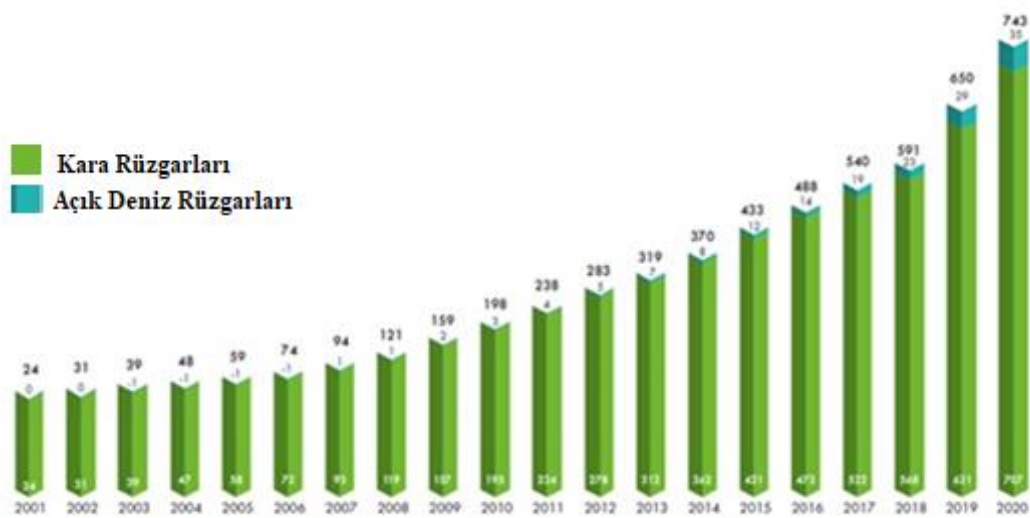
1.3.2.4. Jeneratör

Rüzgârın kinetik enerjisi türbin kanatlarında mekanik enerjiye çevrilerek önce rotor şaftına, sonrasında dişli kutusu ve jeneratöre iletilerek jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Elektrik motoru ile aynı yapıya sahip olan jeneratörler rotordan gelen düşük torklu mekanik enerjinin dişli kutusu ile yüksek torka ve jeneratörün nominal değerine ulaşması ile mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Jeneratör, yüksek hızlı şafttan tahrik almaktadır. Bir jeneratör, elektrik şebekesinin frekansına (çoğu ülkede 50 veya 60 Hz) karşılık gelen bir hızda döndürülmesi gerektiğinden, türbin rotorundan daha hızlı döndürülmelidir. Yani jeneratörün 1500 rpm'de (50 Hz için) ve 1800 rpm'de (60 Hz için) döndürülmesi gerekir. Bir türbin

rotorunun bu kadar hızlı dönmesi hiçbir şekilde mümkün değildir. Bu sebeple bir dişli kutusu, türbin rotorunun (ana mil) dönüş hızını, jeneratör tarafından kullanılabilir bir hıza çıkarmalıdır. Alternatif akım jeneratörleri, yüksek kapasiteli rüzgâr türbinlerinde tercih edilmektedir. Bunun nedeni, doğru akım jeneratörlerinin bakım ihtiyaçlarının çok sık olması ve doğru akım jeneratörlerinin pahalı olmasıdır [15] [13].

1.4. Global Rüzgâr Enerji Potansiyeli ve Küresel Kümülatif Kurulu Güç Miktarı

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından küresel rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek için yapılan araştırmalar sonucunda, dünyanın teknik rüzgâr potansiyeli yılda 53000 TWh olarak hesaplanmıştır. Bu araştırmalarda, 5.1 m/s üzerindeki rüzgâr kapasitesine sahip bölgeler kayda alınmıştır ancak, 4-5 m/s rüzgâr hızına sahip bölgeler dikkate alınmasa da, bu bölgelerin yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olduğu göz ardı edilemez bir gerçektir. Yalnızca Almanya’da bile bu potansiyelin değeri yılda 90 TWh olarak tespit edilmiştir. Şekil 1.11’de verilen grafikte 2001-2020 yılları arasında küresel kümülatif kurulu rüzgâr enerji gücündeki değişime bakıldığında 2001 yılında kurulu güç miktarı 24 GW iken 2020 yılına gelindiğinde kurulu güç miktarının 743 GW’ a ulaştığı görülmektedir. Bu, dünyada yılda 1.1 milyar ton CO₂ azaltımı yapıyor anlamına gelmektedir. Bu da rüzgâr enerjisinin günümüzde ne kadar önemli olduğunu kanıttır [20], [21].



Şekil 1.11. Yıllara göre küresel kümülatif kurulu rüzgâr gücü değişimi (2001-2020) [22]

Grafikte de görüldüğü üzere, küresel kurulu rüzgâr gücü, 2020 yılına bakıldığında son 10 yılda yaklaşık 4 katına çıkmıştır. Teknolojik yenilikler ve ölçek ekonomileri ile 2020 yılında, rüzgâr enerjisinin küresel olarak diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla rekabet önemini artırdığı görülmektedir [22].

1.5. Türkiye’de Rüzgâr Enerji Potansiyeli ve Kümülatif Kurulu Güç Miktarı

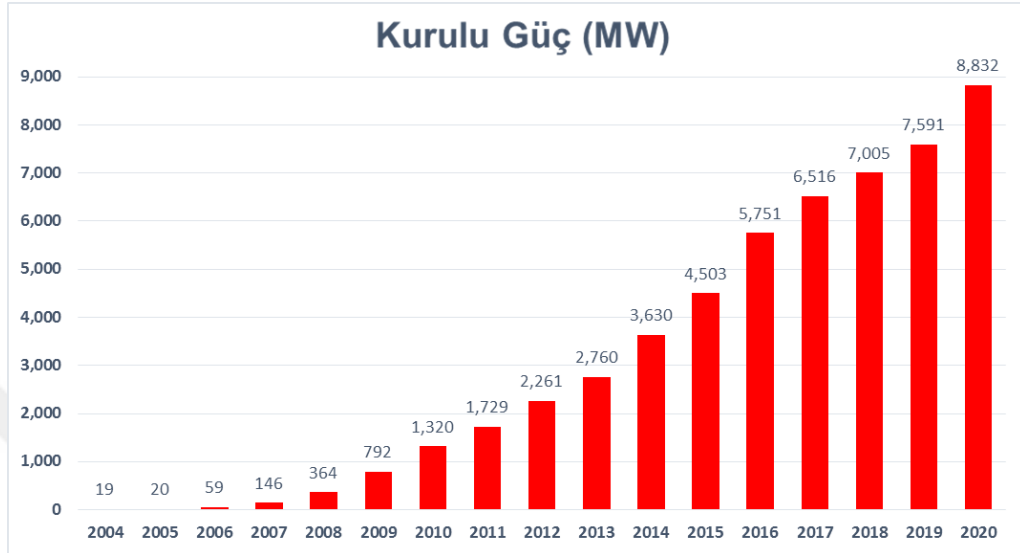
Ülkelerin sosyal ve ekonomik kalkınmalarında en önemli parametrelerden birisi enerji tüketim seviyesidir. Gelişmiş ülkeler enerji tüketimine karşılık gelen ihtiyacı karşılamak için alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Ülkelerin birçoğu rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları alanında büyük yatırımlar yapmışlardır. 20.YY da yaşanan petrol krizi ile alternatif enerji arayışları sonucunda yenilenebilir enerji kaynakları büyük önem kazanmıştır[1]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında çevre dostu ve dezavantajı yok denecek kadar az olan rüzgâr enerjisi bu bağlamda öne çıkmıştır ve Türkiye’ de var olan rüzgâr enerji potansiyeli ile küresel enerji potansiyeli arasında yerini almıştır. Ülkemizde yer seviyesinden 50 m yükseklikte ve 7 m/s üzeri rüzgâr hızlarında hesaplanan teorik rüzgâr enerjisi potansiyeli, Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası(REPA)’na göre 48000 MW olarak hesaplanmıştır [23].

Tablo 1.1. Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası(REPA)’na göre Türkiye rüzgâr enerji potansiyeli [23]

Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı – 50 m	Güç Yoğunluğu- 50 m	Kapasite
(m/s)	(W/m²)	(MW)
7.0 – 7.5	400 - 500	29.259,36
7.5 – 8.0	500 - 600	12.994,32
8.0 – 9.0	600 – 800	5.399,92
>9.0	>800	195,84
	Toplam	47.849

2006 yılında Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA-V1) verilerine göre hesaplanan, yerden 50 metre yükseklikteki ve 7 m/s üzeri rüzgâr hızlarında, Türkiye’ de kurulabilecek rüzgâr enerji santrallerinin toplam kapasitesi yaklaşık 48 GW’tır [24].

2014 yılında ülkemizde kurulu kümülatif güç miktarı 19MW iken, 2021 yılı itibariyle rüzgâr enerjisi kurulu gücümüz yaklaşık 9 GW'a ulaşmış olup yıllara göre kurulu güç değişimi Şekil 1.12' de verilen grafikte gösterilmiştir [25].



Şekil 1.12. Ülkemizde yıllara göre kurulu rüzgâr gücü değişimi (2004-2020) [25]

2004 yılında küresel kurulu rüzgâr gücü miktarı ülkemizin kurulu güç miktarının yaklaşık 2500 katı büyüklüğünde iken, gelişen teknoloji ile artan enerji talebinde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini anlayan ve ciddi yatırımlar yapılan ülkemizde 2020 yılı verilerine bakıldığında küresel kümülatif kurulu rüzgâr gücü miktarının, ülkemizdeki kurulu rüzgâr gücü miktarının yaklaşık 85 katına denk geldiği görülmektedir. Bu da Türkiye'nin 2023 enerji hedeflerine ulaşmakta ne kadar başarılı olduğunun bir kanıtıdır. Ülkemizde rüzgâr enerjisinin kullanımına yönelik genel dezavantajlardan en önemlileri olan ilk kurulum maliyeti ve verimli kanat yapısı sorunları aşıldığında kurulu güç miktarı potansiyel rakamlara ulaşacaktır [24].

1.6. Biyomimetik Tasarım (Biyomimikri)

Biyolojik yaşamda canlılar zaman içerisinde doğaya adaptasyon sağlayarak doğal seleksiyon çözümleri ile gelişmişlerdir. Biyomimetik veya biyomimikri, doğa tarafından benimsenen doğal seleksiyon çözümlerinden ilham almayı ve ilkeleri insan mühendisliğine çevirmeyi amaçlar. İnsanlar, varoluş boyunca problemlere çözüm bulmak için daima doğaya bakmışlardır. İçerisinde pek çok sorunla birlikte çözümlerini de barındıran doğa tüm zaman boyunca insanların gelişiminde ilham kaynağı olmuştur. Doğa kendi kendini iyileştirme yetenekleri, su iticilik (hidrofobiklik), çevresel direnç

maruz kalma direnci ve güneş enerjisinden yararlanma gibi pek çok alanda mühendislik çözümleri sunmuştur. Biyomimikri, yaşamın nasıl işlediğine ve nihayetinde nereye uyum sağladığımıza dair empatik, birbirine bağlı bir anlayış sunar. Amaç, en büyük tasarım zorluklarımızı sürdürülebilir bir şekilde ve dünyadaki tüm yaşamla dayanışma içinde çözen ürünler, süreçler ve politikalar - yeni yaşam biçimleri - yaratmaktır. Biyomimetik tasarımlar insan üretimlerinin daha verimli, esnek ve sürdürülebilir olmasını sağlayacaktır [26].

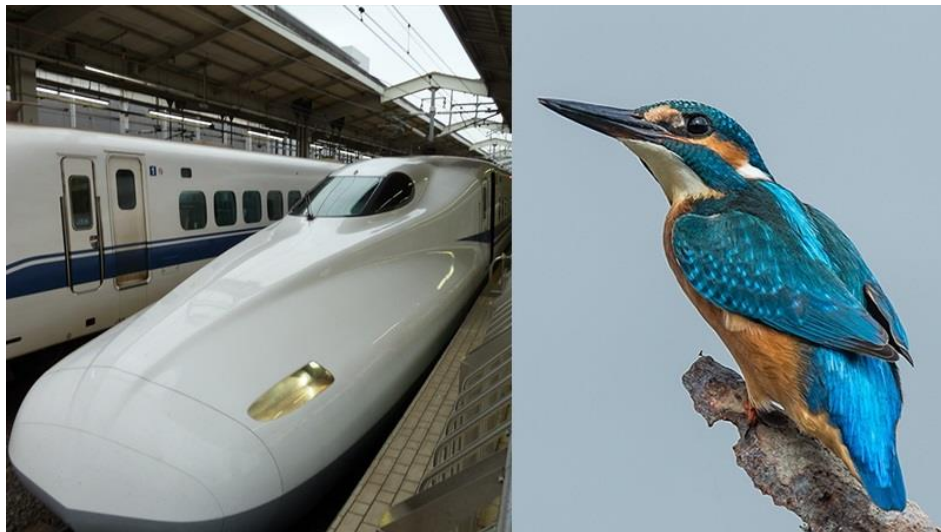
Biyomimikri Enstitüsü'ne göre biyomimikri, “doğanın zamana göre test edilmiş modellerini ve stratejilerini taklit ederek insan sorunlarına sürdürülebilir çözümler arayan bir inovasyon yaklaşımı” olarak tanımlanmaktadır [27].

- İnsan ağırlığını taşıyabilen tırmanma ayakkabıları, geko ayaklarının biyomekaniğinin bir taklididir.



Şekil 1.13. Geko kertenkelesinden esinlenilen tırmanış ayakkabısı tasarımı

- Ünlü Japon Mermi Treni'nin aerodinamiği, Yalıçapkını kuşunun sivri gagasının şeklinden ilham almıştır.



Şekil 1.14. Yalıçapkını kuşundan esinlenilen japon “mermi tren” tasarımı

- Velcro bantlar, dulavrat otunun tohumlarındaki kancaların hayvanların tüylerine takılmasından ilham alarak tasarlanmıştır.



Şekil 1.15. Dulavrat otundan esinlenilen velcro bant tasarımı

- Köpekbalığı derisinin incelenmesi, özellikle etkili mayoların yanı sıra uçak gövdesi için bir verniğin kökenindedir.

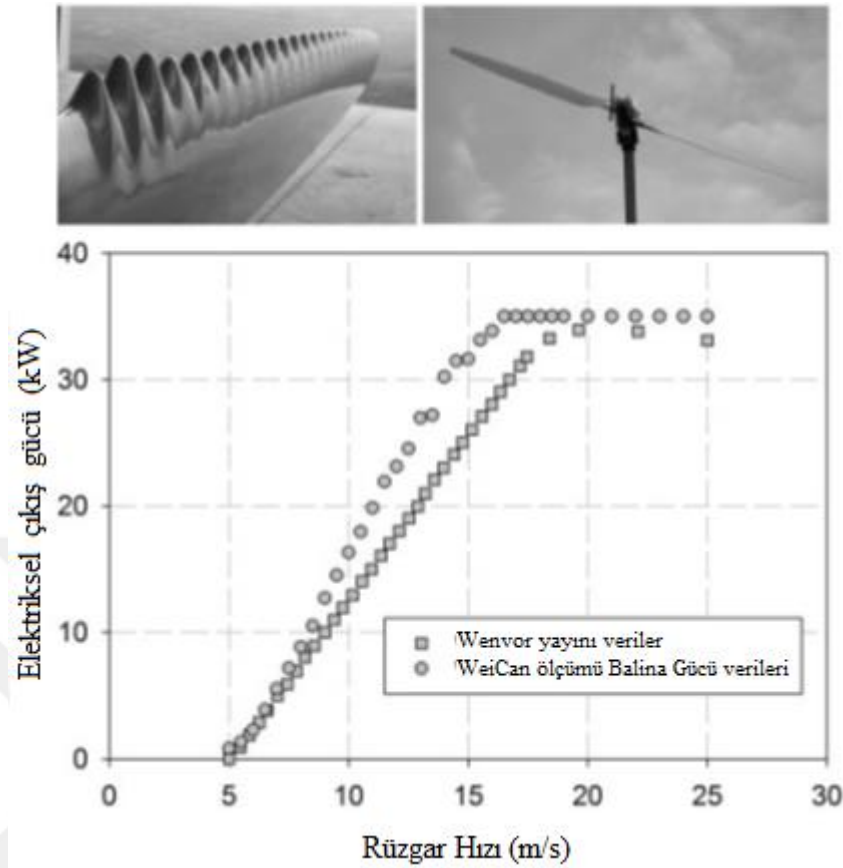
Bunların yanı sıra fil hortumlarından esinlenilerek üretilen hassas robotik kollar, kuş kanatlarından ve kuşlardan esinlenilerek tasarlanan kanat tasarımları ve uçak tasarımları, ayçiçeklerinden esinlenerek güneş panellerinin tasarlanması biyomimetik tasarımların yalnızca birkaç örneğidir.

Günümüzde doğa, mekanik cihazların işlemlerini iyileştirmek veya tamamen yeni teknolojiler geliştirmek için şablon olarak kabul edilmektedir. Yeni morfolojiler ve fizyolojiler biyologlar tarafından araştırılırken, mühendisler tarafından teknolojik gelişmedeki ilerlemeler için ilham kaynağı olarak hizmet ediyorlar.

1.7. Literatür Çalışması

Küresel enerji kullanım planlarının önündeki ilk kurulum maliyeti, rüzgâr çiftlikleri için gerekli geniş alan ihtiyacı ve teknolojik yetersizlikler gibi rüzgâr enerjisinin kullanımının artmasına engel sebepler arasında en önemlisi rüzgârla sürekli temas halinde olan ve elektrik üretiminin asıl kahramanı olan türbin kanatlarının tasarımlarıdır. Aerodinamik verimi artırmak için yapılan tasarımlarda, içinde pek çok sorunla birlikte çözümünü de barındıran doğa araştırmacılara ilham kaynağı olmuştur. Doğadan ilhamla çözüm arayan araştırmacılar, rüzgâr türbini kanatları için biyomimetik yeni tasarımlar yapmışlardır. Deniz canlılarından kuşlara, kanatlı böceklerin kanatlarından ağaç tohumları ve bitki yapraklarına varana kadar doğanın tasarımlarından esinlenilmiş ve gerek yeni tasarımlar gerekse tasarım optimizasyonları üzerine pek çok çalışma sunulmuştur [28].

Düz hücum kenarlı geleneksel kanat profilleri, taşıma, sürüklenme ve stall gibi değişken parametrelerle ilişkili performansa sınır getiren akış alanları oluşturmaktadır. Son zamanlarda biyomimetik bir kavram olarak kambur balinaların pektoral yüzgeçlerindeki hücum kenarı tüberkülleri yapılan çalışmalarda durmayı geciktirmesi ve taşıma sürüklenme oranında artış sağlaması ile dikkati üzerine toplamıştır. Frank E. Fish ve arkadaşları kambur balinaların yüzgeçlerinden esinlenerek biyo-ilhamlı bir rüzgâr türbini teknolojisi geliştirmişlerdir. Kambur balinalar benzersiz morfolojik yapıya sahip canlılardır. Yüzgeçlerinin ön kenarları boyunca uzanan büyük kabartılar avlanma sırasında eşsiz bir manevra ve dönüş kabiliyeti kazandırmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğini kullanarak tüberkülsüz bir bölüme kıyasla 10^0 hücum açısında tüberkül bulunan kanat kesitleri, taşımada %4,8 artış, indüklenmiş sürüklenmede %10,9 azalma ve taşıma /sürüklenme oranında %17,6 artış gözlemlemişlerdir. Ayrıca tüberküllere sahip rüzgâr türbinlerinin orta rüzgâr hızlarında elektrik üretiminin de arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu çalışma ile kanatların çalışma açıları 11 dereceden 17 dereceye çıkartılabilmektedir [29]. L.Howle' ye ait tasarımın karşılaştırmalı bir analizi Şekil 1.16' da gösterilmiştir.

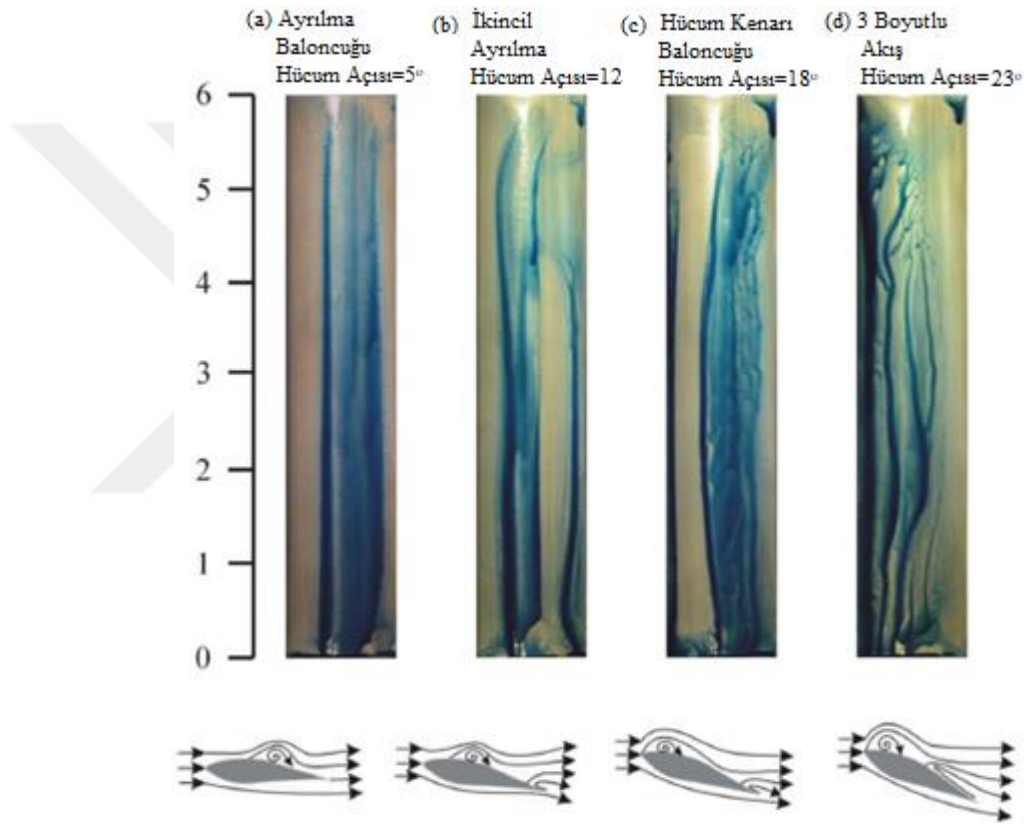


Şekil 1.16. L. Howle tarafından tasarlanan Rüzgâr türbin kanadı (sol üst) ve hücum kenarı tüberkülleri olmayan rüzgâr türbininin (sağ üst) karşılaştırmalı performans verileri(alta) [29]

Kanat etrafındaki hava akışını değiştirmenin birkaç pasif yolu durmayı geciktirebilir ve aynı zamanda hem taşıma kuvvetini arttırabilir hem de sürüklemeyi azaltabilir. Sonuç olarak, pasif akış kontrolü için hücum kenarı tüberküllerinin kullanılması, kontrol yüzeylerinin, kanatların, pervanelerin, fanların ve rüzgâr türbinlerinin tasarımında potansiyele sahiptir.

Rüzgâr türbinlerinde kanatların profil seçimi ve tasarımı türbin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Shun-Chang Yen ve arkadaşları rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını artırmak için hibrit bir kanat yapısı üzerinde incelemeler yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada, önceden kullanılan NACA 63215 ve S809 kanat profillerini temel alan yeni bir hibrit kanat profili tasarlamışlar ve incelemeleri bu 3 kanat profilinin aerodinamik performans karşılaştırmalarını içerecek yönde yapmışlardır. Çalışma, hibrit kanat profilinin yüzey-akış modlarını, dalga-akış karakteristiklerini ve aerodinamik performans analizlerinin farklı Reynolds sayıları ve hücum açıları kullanılarak yapılan

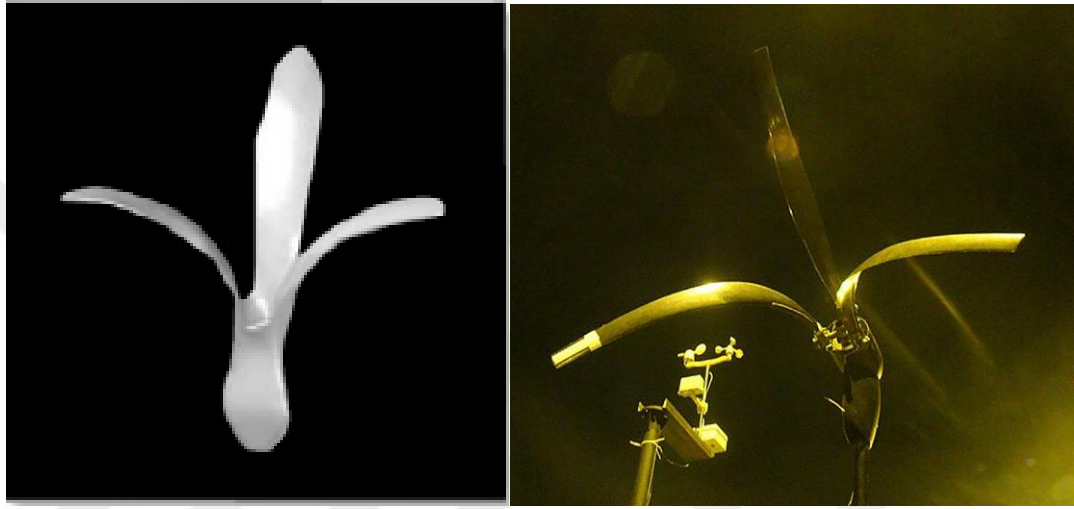
testlerini içermektedir. Kanatlar stall durumuna geldiğinde S809 ve NACA63215 için 1,07 olan taşıma katsayısı değeri hibrit kanat için yaklaşık iki katı olarak tespit edilmiş ve 2,12 olarak belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, hibrit kanat için 6,11 olarak ölçülen maksimum taşıma-sürüklenme oranı, S809 ve NACA63215'teki (3,63 ve 3,13) değerinin yine yaklaşık iki katı olarak belirlenmiştir. Ayrıca hibrit kanat tasarımının diğer iki kanattan daha yüksek bir durma açısına ve moment katsayısına sahip olduğu sonucuna varılmıştır [30].



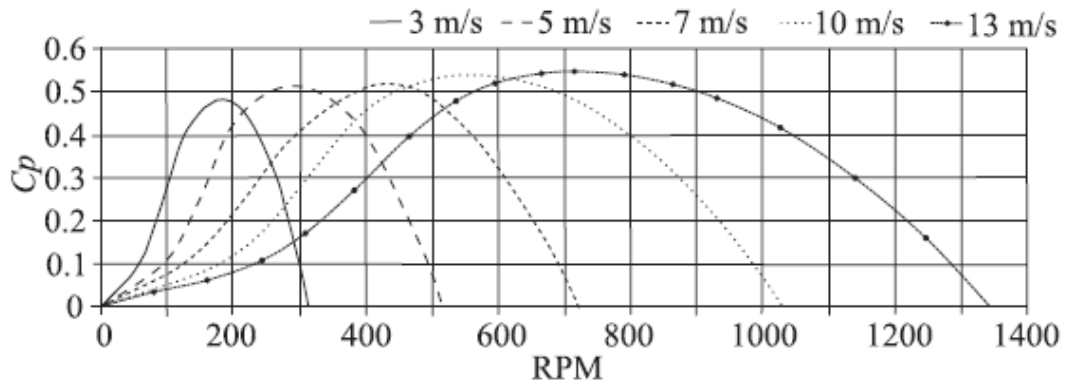
Şekil 1.17. (a)–(d) Yüzey yağ-akış modelleri [30]

Camilo Herrera ve arkadaşları karınca ağacı olarak bilinen “*Triplaris Americana*” adlı bir ağacın tohumundan esinlenerek bir rüzgâr türbini kanadı tasarlamışlar ve üç kanatlı geleneksel yatay eksenli rüzgâr türbinlerinden farklı bir tasarıma sahip bir rüzgâr türbini tasarımı ortaya koymuşlardır. Kanadın tasarımı tohumun kanat açıklığı boyunca eğriliği ve kanat profilinin analizi yoluyla ortaya konmuştur. Operasyonel yükleri tahmin etmek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada seçilen tohumun seçilme nedeni ağaçtan düşerken yaptığı dönme hareketidir. Çalışmanın ilk aşaması için kurdukları dikey rüzgâr tüneline 50’ den fazla farklı

tohumla yaptıkları deneyler sonucunda 1500 rpm civarı bir açısal hız ile 1,5 m/s ortalama serbest düşme hızı gözlemlemişlerdir. İkinci aşamada ise tohumun enine kesitinden kanadın yapısı karakterize edilmiş ve deneysel çalışma sonucunda 2,5 m/s rüzgâr hızında elektrik üretmeye başlayan bir tasarıma ulaşmışlardır. Tasarlanan bu özel geometri, rüzgâr türbinlerinin, rüzgâr hızı çok düşük olan bölgelerde elektrik üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir [31].

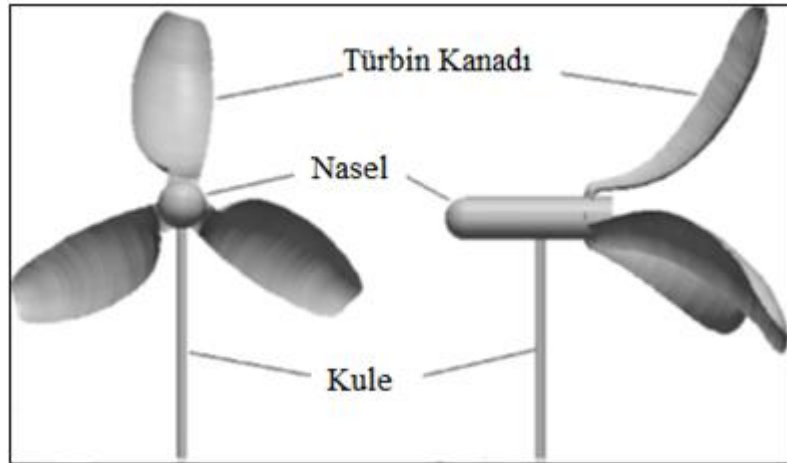


Şekil 1.18. a) *Triplaris Americana* tohumunun 3 boyutlu modeli. b) Gerçek çalışma koşulları altında rüzgâr türbini testi [31]



Şekil 1.19. Farklı rüzgâr koşullarında C_p (Güç Katsayısı) performans grafiği [31]

Yung-Jeh Chu ve Wen-Tong Chong, Borneo Kafuru olarak bilinen “*Dryobalanops Aromatica*” tohumundan esinlenerek biyomimetik bir rüzgâr türbini tasarlamışlardır. Tasarlanan biyomimetik rüzgâr türbini sahip olduğu yüksek tork sayesinde düşük rüzgâr hızlarında daha iyi bir kendi kendine başlama ve yalpalama mekanizmasında iyi bir denge sağlamıştır [32].

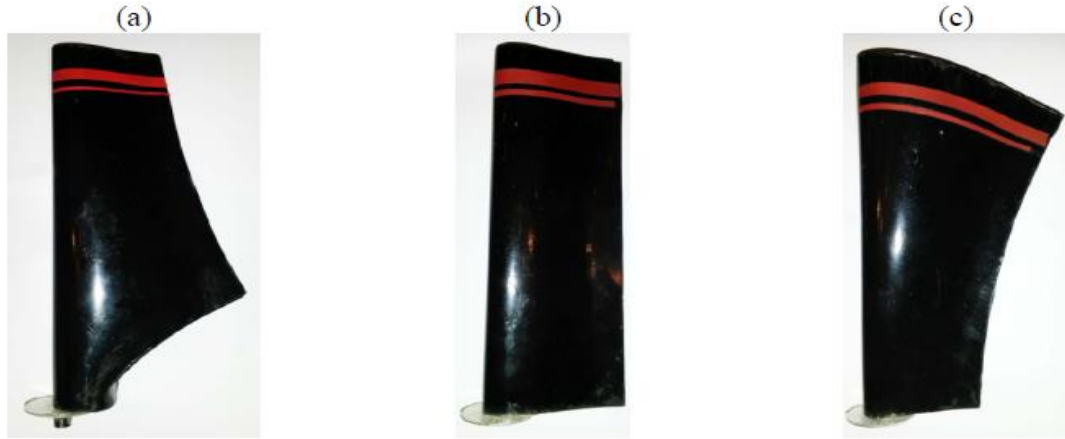


Şekil 1.20. Dryobalanops aromatica tohumundan esinlenerek tasarlanan biyomimetik yatay eksenli rüzgâr türbininin (HAWT) 3B modelleri [32]

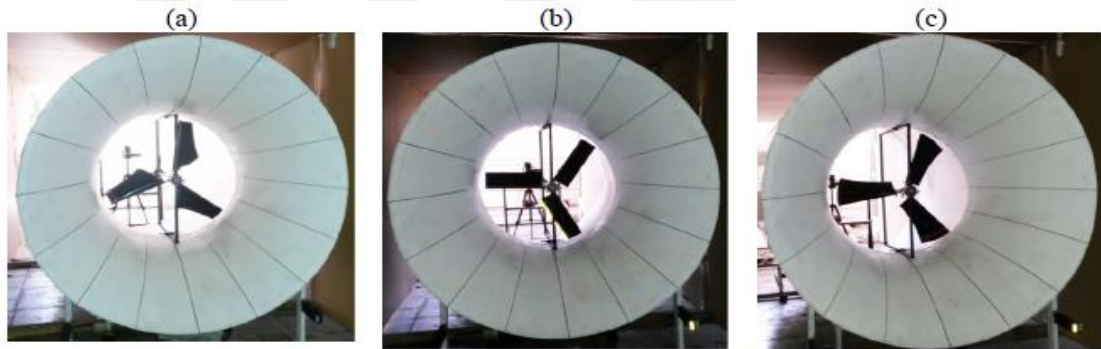
Cory seidel ve arkadaşları akçaağaç tohumlarından ve “*Triplaris Samara*” tohumlarından biyo-ilhamlı dikey eksenli bir rüzgâr türbini tasarlamışlardır. Tohumların yere düşerken taşıma kuvvetini artıran kararlı ön kenar girdapları (LEV) ürettiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca kanadın köküne yakın bir yerde oluşan hücum kenarı girdaplarının kanadın geometrisine, Reynolds sayısına ve hücum açısına bağlı olduğu da gösterilmiştir. Sonuç olarak akçaağaç tohumundan esinlenen türbin kanatlarının daha güçlü rüzgâr hızlarına dayanma yeteneği gösterdiği gözlemlenmiştir [33].

Son dönemlerde, rüzgâr türbinlerinin aerodinamik verimliliğini artırmak için birçok farklı kanallı türbin tasarlanmıştır. Kanatların tasarımı ve kanat sayısı, rüzgâr türbinlerinin verimliliğini optimize etmek için en önemli parametrelerdendir. Hamid Ahmadi Asl ve arkadaşları da rüzgâr hızını sayısal olarak 2,46 katına, uzak alan akışını 2,32 katına çıkaran bir kanallı kanat tasarımının, kanat sayısının ve hücum açılarının dönme hızı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bunu gerçekleştirmek için 3 farklı tip aerodinamik kanat tasarlanmış ve ardından bu kanatlardan 2 kanatlı, 3 kanatlı ve 4 kanatlı çarklar oluşturularak 9 test çarkı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Her bir çarkın dönüş hızı, bir rüzgâr tüneline aynı koşullarda kanallı ve kanalsız iki çalışma durumunda 7 hücum açısında kaydedilmiştir. Sonuç olarak, artan kanatçık sayısı ile birlikte dönme hızının azaldığını, geniş kanatlı çarkların daha düşük dönüş hızına sahip olduğu ve dönüş hızının, hücum açısı 0° ’den $7,5^{\circ}$ ’ye yükseltilerek artırılabilirdiği bulgularına ulaşılmıştır. Dolayısıyla dönüş hızı artış oranının bu 3

parametreye ve kanal boğazındaki rüzgâr hızı artış oranına bağlı olduğu deneysel olarak sunulmuştur [34].



Şekil 1.21. Üretilmiş Kanatçıklar, (a) Geniş alt, (b) sabit genişlik, (c) geniş üst [34]



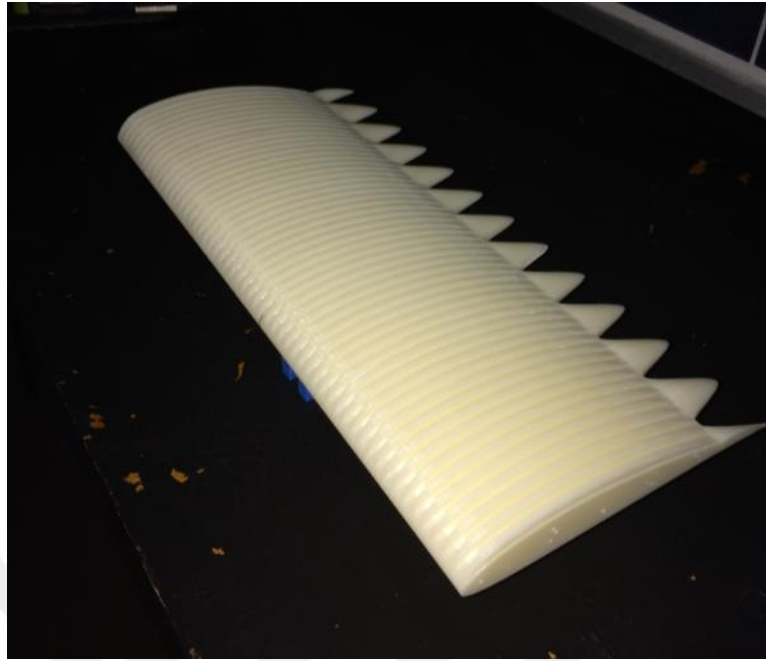
Şekil 1.22. Kanallı yapı içerisinde 3 kanatçıklı rotorlar, (a) Geniş alt, (b) sabit genişlik, (c) geniş üst [34]

Selahaddin Orhan Akansu ve arkadaşlarının yaptığı kanat profillerinin dikey eksenli bir rüzgâr türbininde türbin performansına etkisinin incelendiği çalışmada, dikey eksenli bir rüzgâr türbininin aerodinamik ve enerji performansı ile türbine uygulanan aerodinamik kuvvetler Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği(HAD) programında araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışma da sayısal incelemeler için NACA0021, NACA0015, NACA5520 ve CLARK-Y kanat profillerini tercih etmişlerdir. Bu dört kanat profiline ait karşılaştırmalı çalışma sonucunda sayısal sonuçlara bakıldığında, NACA5520 kanat profilinin kendi kendine başlamada ilk hareketi sağlamak için verimli olabileceği belirtilirken, en yüksek ortalama güç katsayısı değerine NACA0021 Kanat profilinde ulaşılmıştır [35].

Aerodinamik açıdan en etkileyici biyo-ilham çalışmalarından bazıları baykuşların ve martıların uçuşunu içermektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda büyük baykuş türlerinin kanatlarının 1.6 kHz'nin üzerindeki frekanslarda neredeyse sessiz uçuş kabiliyeti sağladığı tespit edilmiştir [36]. Araştırmalar baykuşlara bu kabiliyeti tarak benzeri bir hücum kenar yapısı, firar kenarındaki saçaklar ile yumuşak ve gözenekli üst yüzey yapısının sağladığını ortaya koymuştur. Bu yapı aerodinamik açıdan havanın verimli olarak kullanılmasını ve düşük hızlarda yüksek taşıma verimine ulaşılmasını sağlamaktadır [37]. Yaptığımız çalışmada hücum kenarında kullanılan çentikli tasarımın firar kenarında kullanılmasının aerodinamik parametrelere etkisi incelenmiş ancak oluşan türbülanslı akış ve akış ayrılmaları sonucunda taşıma/sürüklenme oranında artış gözlemlenmemiştir.

Teruaki Ikeda ve arkadaşları da yüksek aerodinamik güç üretimini ve kararlı uçuşa imkân veren kuş kanatlarından esinlenerek, küçük rüzgâr türbinleri için biyomimetik bir kanat tasarımı yapmışlardır. Geliştirdikleri, kuşlardan esinlenilmiş bükülmüş kanat morfolojisine sahip tasarımın aerodinamik özelliklerini incelemek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(HAD) kullanmışlardır ve geliştirmiş oldukları tasarımın geleneksel bir kanattan %8,1 oranında daha iyi performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bulmuş oldukları olumlu sonuçlar neticesinde biyomimetik kanat tasarımının rüzgâr türbinleri için önemli ve büyük bir potansiyele sahip olduğunu ve kendi tasarımlarının da türbülanslı ortamlar için rüzgâr türbini tasarımında yenilikçi, pratik ve etkili bir yöntem sağlayabileceğini belirtmişlerdir [38].

Garrett Wright yapmış olduğu tez çalışmasında biyomimetik tasarımın en etkili ve adı en çok duyulan kambur balina tüberkülleri ve baykuş kanat yapısını uyguladığı yeni bir tasarımını incelemiştir. Çalışmanın amacı iki tasarımı birleştirerek aynı anda verimliliği artıran ve gürültüyü azaltan hibrit bir tasarım geliştirmektir. Hibrit profiller üzerinde yapmış olduğu araştırma ve testlerden sonra, tasarımın gürültü azaltma yönü başarılı iken, tüberkülleri firar kenarına yerleştirmesinin genel verimlilikte düşüşe neden olduğunu tespit etmiştir [39].



Şekil 1.23. Wright tarafından tasarlanan hibrit kanat profili [39]

Jepp Johansen ve Niels N. Sørensen yaptıkları çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(CFD) kullanarak kanatçıklı bir rüzgâr türbini kanadı etrafındaki aerodinamiğin sayısal olarak incelenmesini açıklamışlardır. Farklı büküm ve kavise sahip 5 kanatçık modeli incelenmiştir. Bunlardan dördü basınç tarafı (yukarı akış) ve biri emme tarafı (aşağı akış) yönünde olacak şekilde belirlenmiştir. Sonuç olarak, geleneksel kanada bir kanatçık eklenmesinin, kanadın yaklaşık %14'lük kısmındaki kuvvet dağılımını artırdığını ve bunun da, 6 m/s'den daha büyük rüzgâr hızları için üretilen güçte yaklaşık %0,6 ila %1.4'lük bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Kanatçığın aşağı akışa yönünde kavisli olması, güç üretimini daha da artırmıştır ancak sonuçların elde edilmesinde süpürme ve eğim açılarının etkisi hesaba katılmamıştır [40].

1.8. Literatür Değerlendirmesi

Doğanın karmaşık yapısının çözülmesi ve yapılan biyomimetik tasarımlar ile rüzgâr türbinlerinin dezavantajı olarak ilerlemesinin önünde engel teşkil eden kurulum maliyeti, türbin gürültüsü ve tasarımdan kaynaklı düşük verim sorunları son bulacaktır. Yapılan çalışmaları geliştirerek ve doğadan ilhamla tasarlanacak olan yeni biyomimetik tasarımlar sessiz, düşük maliyetli olmasa bile, kurulum, operasyon ve geri dönüşüm maliyetlerini kısa sürede karşılayabilecek yüksek verimli ve yaygın kullanıma sahip

büyük ve küçük ölçekli pek çok türbinin hayatımızın bir parçası haline gelmesini ve enerji talebinde dışa bağıllığın son bulmasını sağlayacaktır.

Araştırmacılar doğadan esinimli kanat tasarımlarında suda yaşayan canlılardan kuşlara, uçuş kabiliyeti olan böceklerden bitki tohumlarına varana kadar her alanda gözlem yaparak ideal kanat tasarımına ulaşmaya çalışmışlardır. Deniz canlıları arasında boyutları ve ağırlıklarına rağmen üstün avlanma yetenekleri sayesinde kambur balinalar araştırmacılara ilham kaynağı olmuş ve benzersiz morfolojik yapıları kanat tasarımlarına aktarılmıştır. Kambur balinaların yüzgeçlerindeki tüberkül çıkıntıları kanat tasarımlarında taşıma/sürüklenme kuvvetinde yaklaşık %18 civarında bir artış sağlarken kanatların yüksek hücum açılarında çalışmasına da imkân sağlamıştır. Bitki ve ağaç tohumlarından esinlenen çalışmalar incelendiğinde, tohumlardan esinlenen kanat tasarımlarında rüzgâr türbin kanatlarının 2,5 m/s gibi düşük rüzgâr hızlarında çalışmaya başlamasını sağladığı görülmektedir. Bu da rüzgâr hızı düşük olan bölgelerde elektrik üretme potansiyeli sağlamaktadır. Ayrıca aerodinamik açıdan en etkileyici biyomimetik çalışmalar kuşların kanat tasarımlarından esinlenen çalışmalardır. Özellikle baykuş kanadından esinlenen kanat tasarımlarında gürültü ve titreşim miktarında ciddi bir azalma görülürken baykuş kanat yapısının sahip olduğu çentikli yapının yaptığımız tez çalışmasından farklı olarak hücum kenarında kullanılması aerodinamik açıdan olumlu sonuçlar vermiştir. İçerisinde pek çok sorunla birlikte çözümünü de barındıran doğa yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle rüzgâr enerjisinin önündeki engelleri kaldırarak geleceğin enerjisi olmasını sağlayacaktır.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Giriş

Bu çalışmada, kanat ucuna monte edilen sabit kanat ve değişken boyutlu kanatçıkların akış analizi ve sonucunda elde edilen aerodinamik parametreleri karşılaştırılmıştır. Kanat profili ile aynı yapıdan sonsuz kanat yapısı tercih edilmiş ancak sonsuz kanadın hangi boyutta daha iyi sonuç vereceği uygulanarak çeşitli varyasyonları incelenmiştir. Benzer şekilde baykuş kuşunun kanat yapısından esinlenerek sabit kanadın orta kısmından yukarı ve aşağı eğim verilerek aerodinamik performans değerlerinin değişimi incelenmiştir. Buna ek olarak, rüzgâr türbini kanat tasarımlarımızın sayısal analiz sonuçlarından ve aerodinamik performans kriterlerinden, doğadan ilham alan rüzgâr türbini kanat tasarımlarının rüzgâr tüneline bir elektrik motoru yardımıyla farklı hızlarda ve farklı bağlantı açılarında ürettiği gerilim değerleri deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı, farklı rüzgâr türbini kanat tasarımlarından daha yüksek güç üretebilen bir tasarım elde etmektir. Bu nedenle üretilen voltaj değeri hangi türbin kanadı tasarımının daha avantajlı olduğunun öğrenilmesi konusunda önemli bilgiler verecektir.

2.2. Biyomimetik Kanat Tasarımımız Ve Aerodinamik Performans Analizimiz

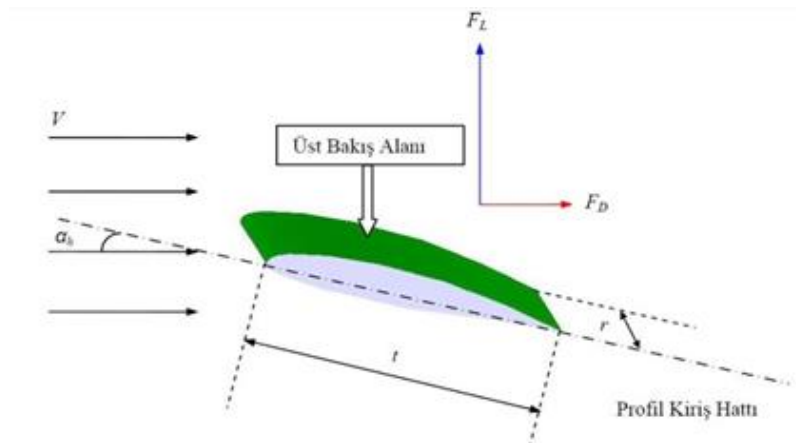
Bu çalışmada, doğadaki canlılardan ilham alınarak oluşturulan rüzgâr türbini kanat tasarımlarının aerodinamik performans parametreleri sabit kanat yapısı üzerinde incelenmiştir. Benzer şekilde bu çalışma, tasarlanan kanadın aerodinamik parametresinin sabit kanadın aerodinamik parametresinden daha iyi olması durumunda rüzgâr türbininde kullanıldığında daha iyi sonuçlar vereceği düşünülerek yapılmıştır. Uçakların yakıt tüketimini ve aerodinamik performansını önemli ölçüde etkileyen kanatçık, bu çalışmada da bize ilham kaynağı olmuştur. Ayrıca bu çalışmada rüzgâr

türbini kanat tasarımında kanatçık çalışma mantığına benzer kanat ucu girdabını azaltan sonsuz kanat incelenmiştir. Kavisli kanat ve kanatçık yapısının sayısal analizinde, eğrilik yüzdesinin değişmesiyle aerodinamik performansın arttığı gözlemlenmiştir [41]. Bu çalışmada, kanat yapısına uygun olarak sonsuz kanat ve kanadın yukarı ve aşağı kavisli şekli eklenerek aerodinamik performans değerleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmamız sabit hücum açısında farklı hızlarda gerçekleştirilmiş olup, akış görüntüleri ve aerodinamik parametreler grafiksel olarak verilmiştir.

2.2.1. Tasarım Parametreleri

Rüzgâr türbini endüstrisindeki hakimiyeti nedeniyle kanat profili ve tasarımındaki değişikliklere karşı çok hassastır. Rüzgâr türbini kanat tasarımında, türbin kanadının aerodinamiği ve rüzgâr yükü önemli parametrelerdir. Bu bölüm, modern rüzgâr türbini kanatlarının performansını etkileyen ana parametreleri kısaca açıklanacaktır. Kanat tasarımı yapılırken sürüklenme ve taşıma kuvveti, Betz limiti, kayıplar ve kanat elemanı teorisi kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüz modern rüzgâr türbinlerinde, kanattan ideal gücün elde edilebilmesi için özel kanat profilleri (airfoil) kullanılmaktadır. Airfoil yapısında taşıma kuvvetinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özel profillerde bir kiriş hattının altında ve üstünde bulunan iki farklı eğri kanat yapısını oluşturmaktadır. Üstteki eğrinin daha fazla kambur yapıya sahip olması iki yüzey arasında basınç farkı oluşturur ve yüksek basınç alanındaki havanın düşük basınç bölgesine hareket etme eğilimi taşıma kuvvetini oluşturur.



Şekil 2.1. Airfoil üzerine etki eden kuvvetler[42]

$$F_D = 1/2 C_D \rho A V^2 \quad (2.1)$$

$$F_L = 1/2 C_L \rho A V^2 \quad (2.2)$$

Burada C_L taşıma katsayısı, C_D sürüklenme katsayısıdır. C_L , C_D , C_L / C_D (ϵ) değerleri belirli Reynolds sayısı ve farklı hücum açılarında deneysel olarak belirlenmekte ve bu değerler kanat profilinin kalitesini göstermektedir.

Rüzgâr türbininin boyutları rüzgârdan en iyi şekilde enerji elde edebilmek için doğrudan aerodinamik yapıyla ilişkili olarak düşünülmektedir. Kurulan türbin ne kadar iyi olursa olsun sistemin rüzgârdan elde edebileceği enerjinin bir üst limiti vardır. Bu limite Betz limiti denilmektedir. Betz limitine göre, ideal ortam şartında, rüzgârdan elde edilebilecek enerji teorik olarak rüzgârın $2/3$ 'ü kadardır.

Kanat Elemanı Teorisi (BEM), türbin kanatlarını geliştirerek verimliliğini artırmayı amaçlayan çeşitli analizler için kullanılmaktadır. Bu teori, kanadın analiz edilecek küçük parçalara bölünmesine dayanmaktadır. Kanadı oluşturan bu küçük parçaların her birine etki eden kuvvetler belirlenir. Sonuç olarak, elde edilen tüm kuvvetlerin bir bütünleşmesi, tüm türbin tarafından üretilen momentleri ve kuvvetleri elde etmek için tüm kanat üzerinde ve tek bir rotor devrinde gerçekleştirilir. Basitliği ve hesaplanabilirliği sayesinde, bu yöntem farklı ölçeklerdeki rüzgâr türbini kanatlarını yöneten aerodinamiği tanımlamak için kullanılan en yaygın yaklaşımlardan biridir.

2.2.1.1 Uç Hız Oranı

Rotor kanat hızı ile bağlı rüzgar hızı arasındaki ilişki olarak tanımlanan uç hız oranı, etrafında tüm diğer optimum rotor boyutlarının hesaplandığı en önemli tasarım parametresidir [43]:

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_w} \quad (2.3)$$

λ = Uç Hız Oranı
 Ω = Dönme Hızı (rad/s)
 r = Yarı Çap
 V_w = Rüzgâr Hızı

Uygun uç hızı seçilirken verimlilik, tork, mekanik stres, aerodinamik ve gürültü gibi hususlar dikkate alınmalıdır (Tablo 2.1). Artan gürültü, aerodinamik ve merkezkaç gerilimi gibi bazı kayıplar göz önüne alındığında artış önemli olmasa da, bir türbinin verimliliği daha yüksek uç hızlarıyla arttırılabilir [44].

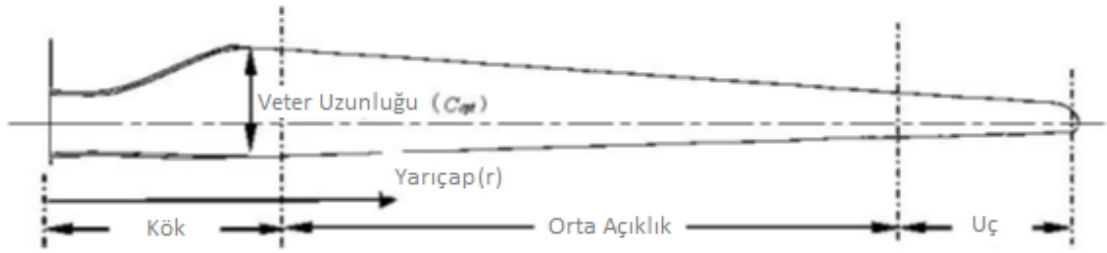
Tablo 2.1. Uç hız oranına bağlı değişimler

Uç Hız Oranı	Azalnca	Artınca
Değer	Bir ila iki uç hızları düşük olarak kabul edilir	Uç Hız Oranı 10'dan yüksek hızlar yüksek olarak kabul edilir
Kullanım	Geleneksel rüzgâr milleri ve su pompaları	Esas olarak tek veya iki kanatlı prototipler
Tork	Artar	Azalı
Verimlilik	Yüksek tork tarafından oluşturulan dönüş izi nedeniyle beşin altına önemli ölçüde düşer [44].	Sekizden sonra önemsiz artışlar
Merkezkaç gerilimi	Azalı	Dönme hızının karesi olarak artar [44].
Aerodinamik Basınç	Azalı	Dönme hızı ile orantılı olarak artar [44]
Katılık Alanı	Arttırır, birden fazla 20+ kanat gerekir	Önemli ölçüde azalı
Kanat Profil	Büyük	Önemli ölçüde Dar
Aerodinamik	Basit	Hassas
Gürültü	Yaklaşık 6. güce yükselir[44]	

Daha yüksek uç hızı, malzeme kullanımının azalmasına ve üretim maliyetlerinin düşmesine neden olabilir. Santrifüj ve aerodinamik kuvvetlerde bir artış olmasına rağmen, daha yüksek uç hızları ile ilişkilidir. Uç hızı arttıkça kanat tasarımının aerodinamiği giderek daha kritik hale gelir. Yüksek bağıl rüzgâr hızları için tasarlanmış bir kanat, daha düşük hızlarda minimum tork geliştirir. Bu, hızda daha yüksek bir kesinti [45] ve kendi kendine başlama zorluğu ile sonuçlanır. Artan uç hızları ile bir gürültü artışı da ilişkilidir [44]. Modern HAWT genellikle iki kanatlı rotorlar için dokuz ila ona ve üç kanatlı rotorlar için altı ila dokuz uç hız oranı kullanır [44]. Bunun rüzgârın kinetik enerjisinin elektrik gücüne verimli bir şekilde dönüştürülmesini sağladığı bulunmuştur [46,47].

2.2.1.2 Kanat Planı Şekli ve Miktarı

Bir HAWT rotor kanadının ideal plan formu, kiriş uzunluğu Betz limitine, yerel hava hızlarına ve kanat kaldırma kuvvetine göre hesaplanarak BEM yöntemi kullanılarak tanımlanır. En basit teori Betz optimizasyonuna [44] dayalı olarak karmaşıklık [44,46] aralığında değişen optimum kiriş uzunluğunu hesaplamak için çeşitli teoriler mevcuttur. İhmal edilebilir sürüklenme ve uç kayıplarına sahip aerofoil bölümleri kullanan altı ila dokuz uç hız oranlarına sahip kanatlar için, Betz'in momentum teorisi iyi bir yaklaşıklık verir [46]. Düşük uç hızları, yüksek sürtünmeli aerofoil bölümleri ve göbeğin etrafındaki kanat bölümleri durumunda, bu yöntemin yanlış olduğu düşünülebilir. Bu gibi durumlarda, iz bırakma ve sürüklenme kayıpları hesaba katılmalıdır [44,48]. Betz yöntemi, modern rüzgâr türbini kanadının temel şeklini verir (Şekil 2.2). Ancak pratikte daha gelişmiş optimizasyon yöntemleri sıklıkla kullanılır.



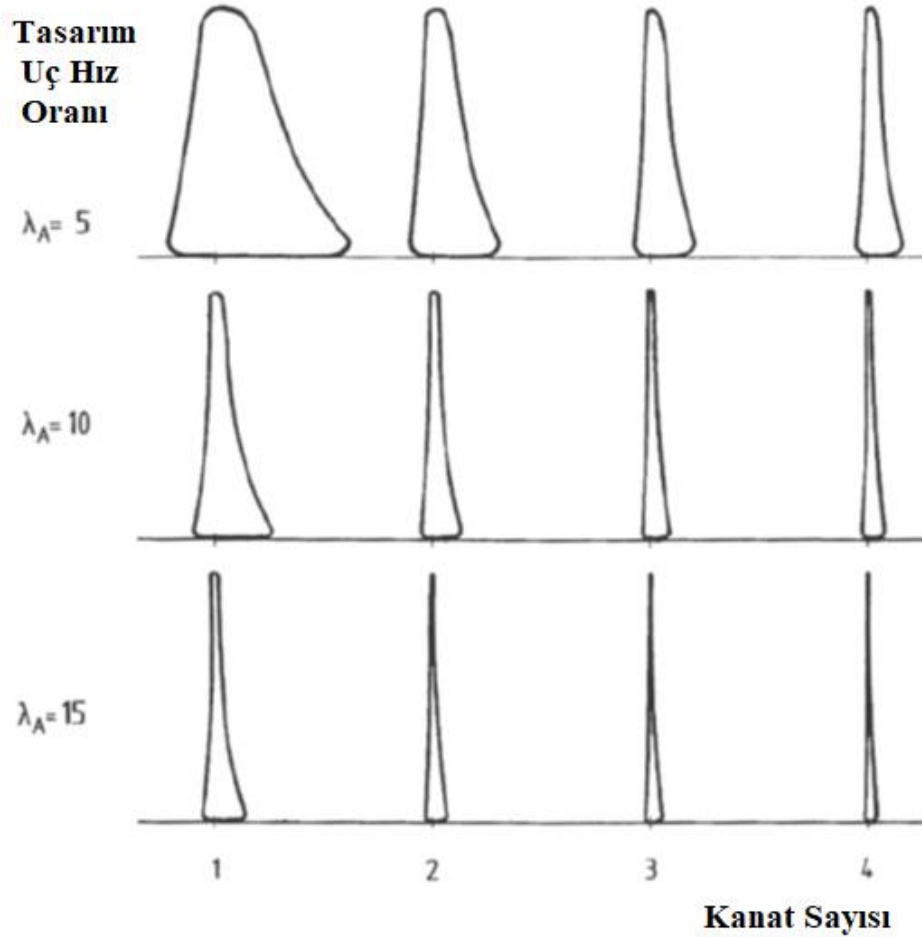
Şekil 2.2. Tipik bir kanat planı ve bölge sınıflandırması [43].

Tablo 2.2 Optimum kiriş uzunluğu

$C_{opt} = \frac{2\pi r}{n} \frac{8}{9C_L} \frac{U_{wd}}{\lambda V_r}$ Burada, $V_r = \sqrt{V_r^2 + U^2}$	r, yarıçap (m)
	n, kanat pale sayısı
	C_L , Taşıma katsayısı
	λ , Yerel uç hız oranı
	V_r , Yerel sonuçtaki hava hızı
	U, rüzgâr hızı (m/s)
	U_{wd} , Tasarlanan rüzgâr hızı
	C_{opt} , Optimum veter uzunluğu

Makul bir kaldırma katsayısının korunduğunu varsayarak, bir kanat optimizasyon yönteminin kullanılması, esas olarak tasarım uç hız oranına ve kanatların sayısına bağlı olarak kanat planları üretir (Şekil 2.3). Düşük uç hız oranları, bıçak alanının süpürülmüş

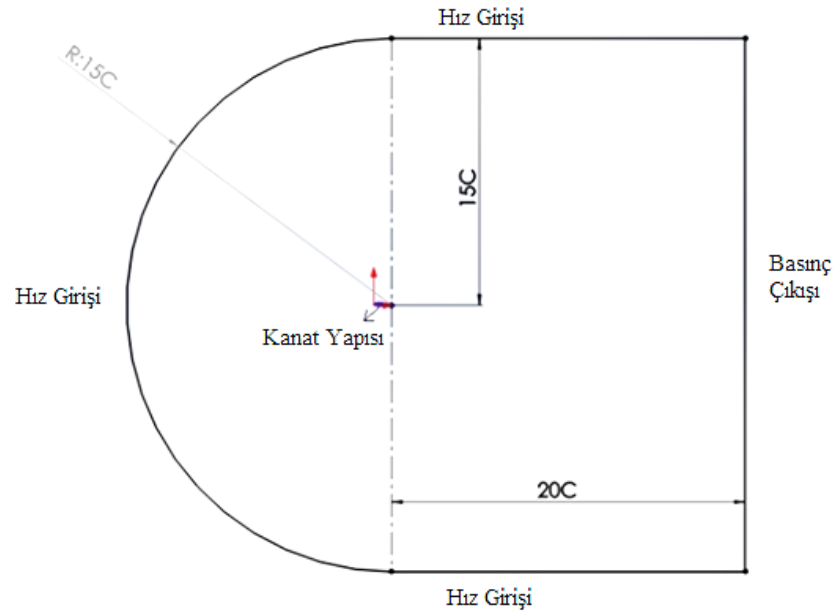
rotorun alanına oranı olan yüksek bir sağlamlık oranına sahip bir rotor üretir. Malzeme kullanımında ve dolayısıyla üretim maliyetlerinde azalmaya yol açtığı için sağlamlık alanının azaltılmasında fayda vardır. Bununla birlikte, sorunlar yüksek uç hızlarıyla ilişkilidir [43].



Şekil 2.3 Alternatif tasarım için optimum bıçak kanat şekli uç hızı oranları ve kanat sayısı[46]

2.3. Sınır Koşulları

Ansys Fluent programında sayısal analiz yapabilmek için nesnenin geometrisi tanımlanmalı, mesh yapısı oluşturulmalı ve çözüm yöntemi belirlenmelidir. Kanat açıklığının 15 katı uzunluğunda kanadın hücum kenarının üst ve alt bölgesine ve basınç çıkış bölgesinden arkaya doğru kanat açıklığının 20 katı kadar alan akış alanı olarak tanımlanmıştır. Hız değeri 13 m/s olarak tanımlanmıştır. Katı yüzeylerde kaymaz sınır koşulu uygulanmıştır. Şekil 2.1’de sınır koşulu çalışması gösterilmektedir.

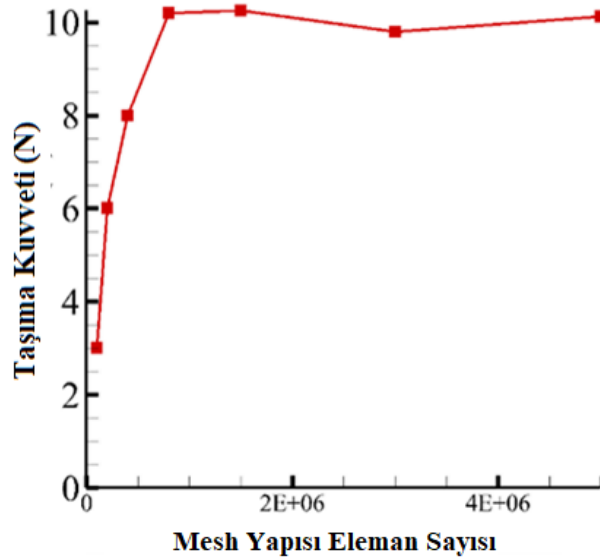


Şekil 2.4. Hesaplama alanının boyutları ve sınır koşulları

Her hücum açısı için hız bileşenleri tanımlanır. Hızın x bileşeni, $x=13.\cos\alpha$ ile hesaplanır ve hızın y bileşeni, $y=13.\sin\alpha$ formülü ile tanımlanır; burada α , derece olarak uçağın hücum açısıdır.

2.4. Grip Bağımsızlığı Çalışması

Ansys mesh programında Patch Conforming / sweeping method kullanılmıştır. Mesh etkisini yok etmek için optimum mesh eleman sayısı tanımlanmıştır. Element sayısındaki artış daha iyi sonuç vermekle birlikte çözüm sürecini de artırmaktadır. Bu sebepten dolayı mesh çalışması 100k, 400k, 1000k, 2400k, 6000k, 10000k element sayılarında yapılmıştır. Şekil 2.2’de 0 derece hücum açısında taşıma katsayısı ile element sayısının değişim grafiği verilmiştir. 900k element sayısından sonra taşıma katsayısı değerinin fazlaca değişmediği görülmüştür. Bundan dolayı optimum element sayısı 819427 olarak belirlenmiştir. Yakınsama kriter değeri $1e-06$ hedeflenmiştir. Yaklaşık olarak tüm analizler 500-1000 iterasyon arasında tamamlanmıştır. Analizlerde Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1620-0 @ 3.60 GHz x64 bit ve 8 GB ram özelliklere sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. . Bir simülasyon için geçen maksimum analiz süresi 4 saattir.



Şekil 2.5. Mesh eleman sayısı ile taşıma katsayısının değişim grafiği

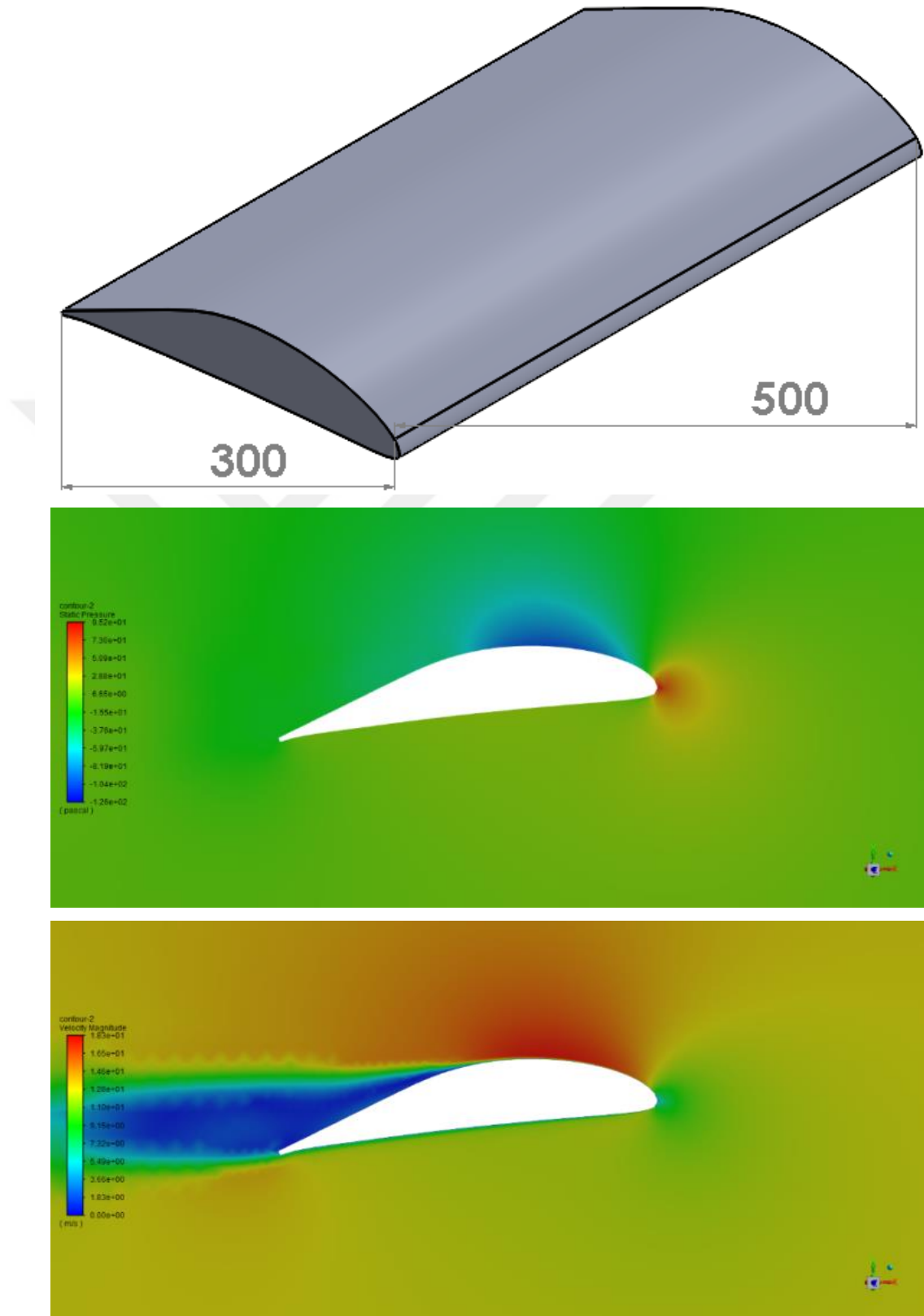
Bütün simülasyon çalışmaları 13 m/s hızında, 1.036 kg/m³ yoğunluğunda ve 1.5111x10⁻⁵ m²/s kinematik viskozite değerlerinde yapılmıştır. Türbülanslı akış olarak çalışılmış ve standart k- epsilon türbülans modeli seçilmiştir. Bütün çözüm değişkenliklerinde first order upwind discretization scheme kullanılmıştır.

Tablo 2.1, biyomimetik kanat tasarımıımızın mesh özelliklerini vermektedir. Mesh yöntemi olarak Parça Uyumlu / Süpürme seçilmiştir ve en küçük mesh eleman boyutu 1 mm'dir.

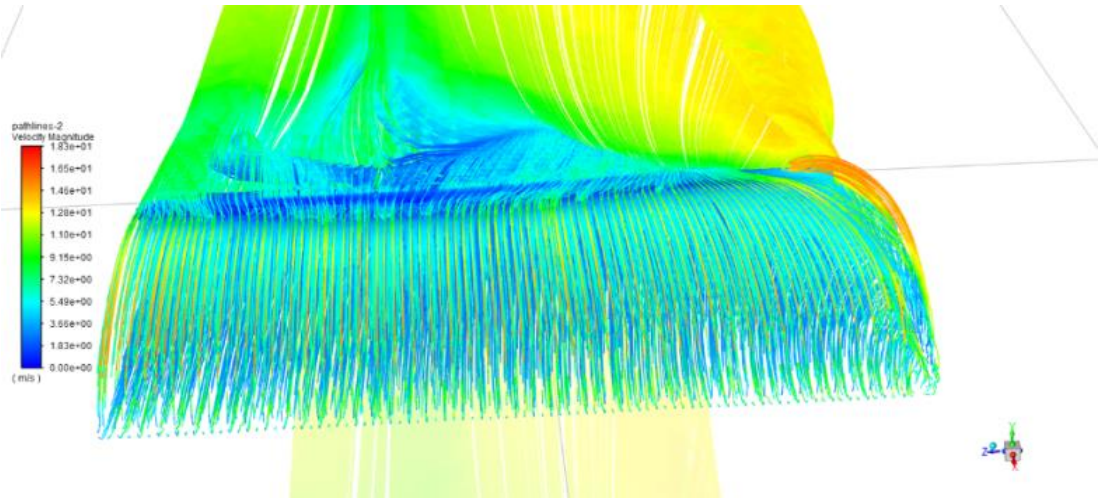
Tablo 2.3 Mesh özellikleri

MESH ÖZELLİKLERİ	
En Küçük Eleman Sayısı	0,0053056 m
Eleman Sayısı	819427
En büyük Boyut	0,61847 m
Dikey Kalite	0,19604
Çarpıklık	0,80212
Büyüme Oranı	1,115
Eğrilik Normal Açısı	18°
Mesh Metodu	Patch Conforming / sweeping method

Şekil 2.4'te, sırasıyla sabit kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analiz sonuçlarını gösterilmektedir.



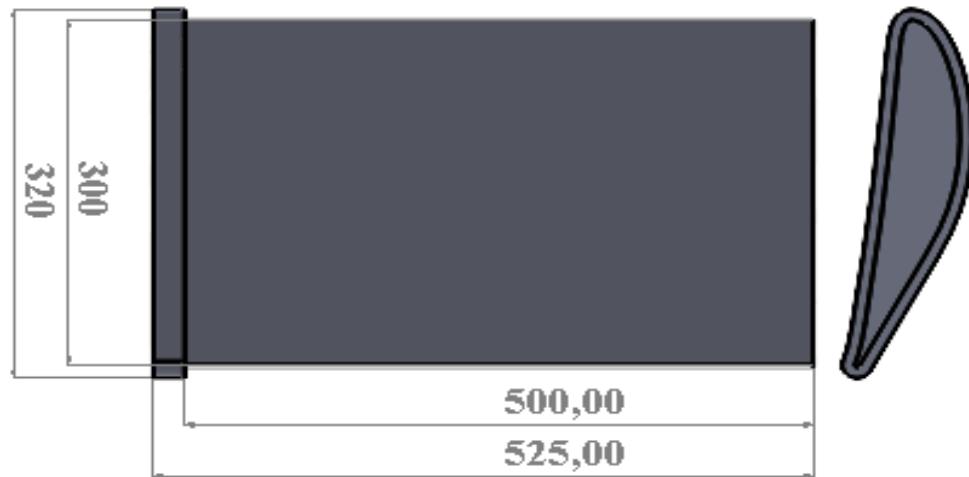
Şekil 2.6. Sabit kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi



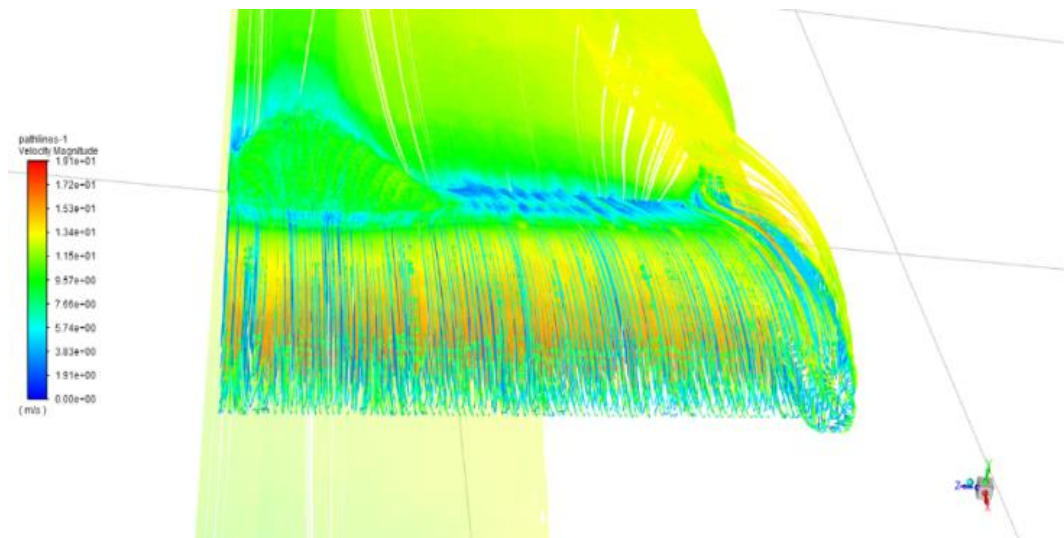
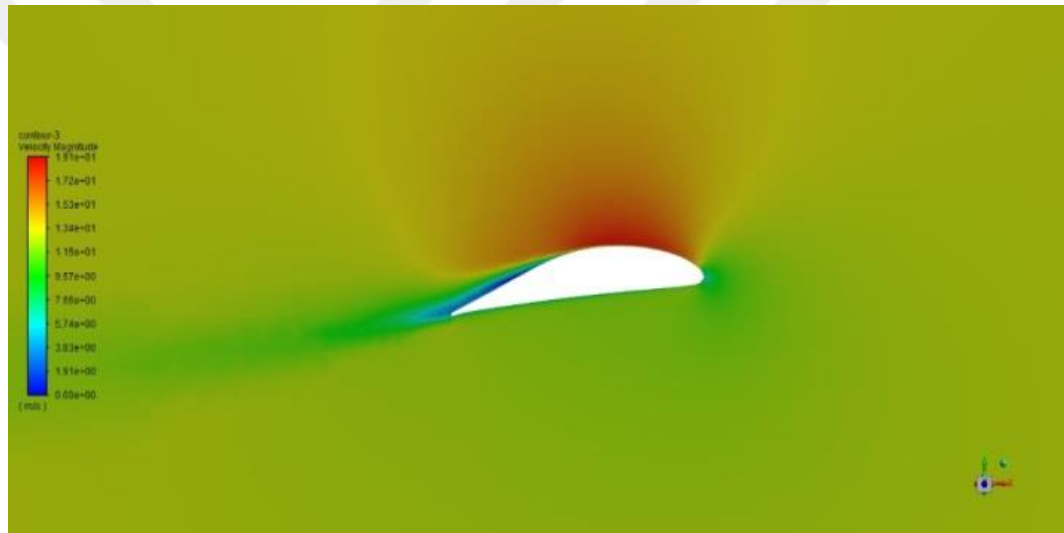
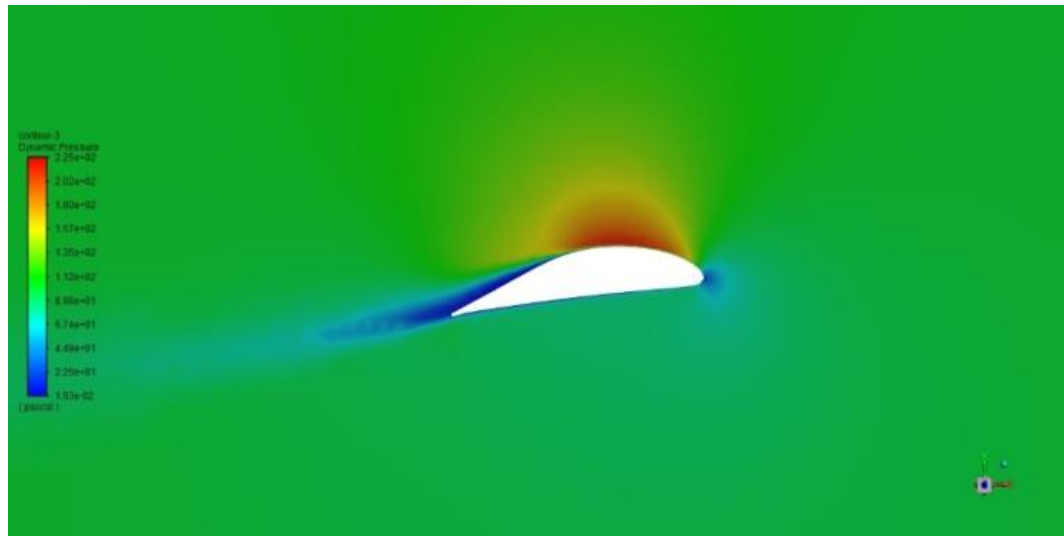
Şekil 2.6. Sabit kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi (devamı)

Şekil 2.4'teki akış analizleri incelendiğinde sabit kanadın alt yüzeyinden gelen hava akımının, kanat ucunda kanadın üst yüzeyine doğru hareket ederek girdap akımları oluşturduğu ve akış bozulmasına sebep olduğu görülmektedir.

Şekil 2.5'te sırasıyla sonsuz kanat 1'in dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analiz sonuçları verilmektedir.



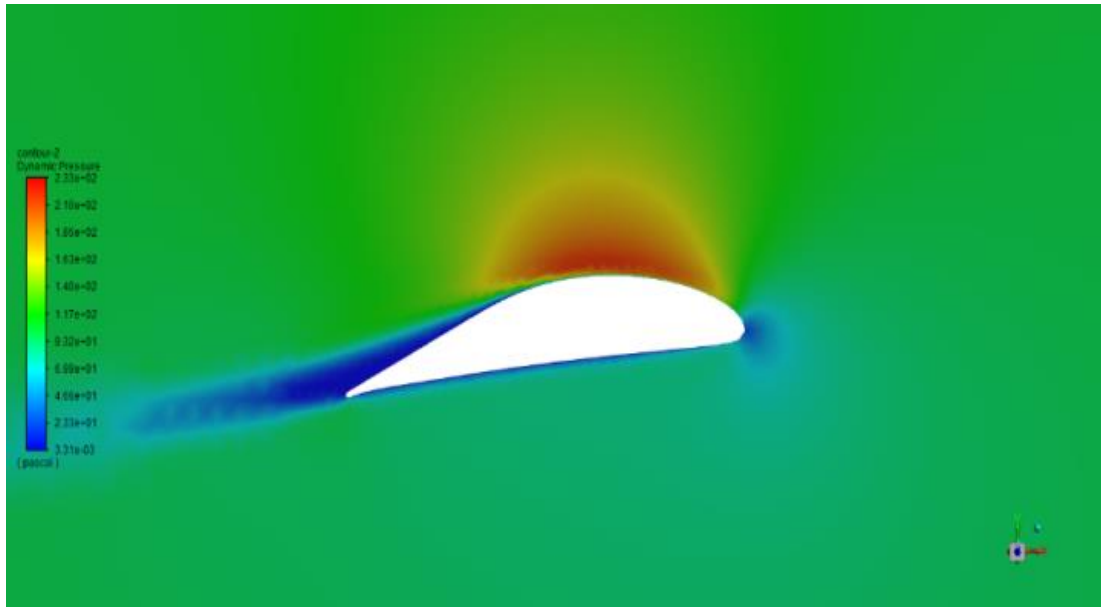
Şekil 2.7. Sonsuz kanat 1 dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi



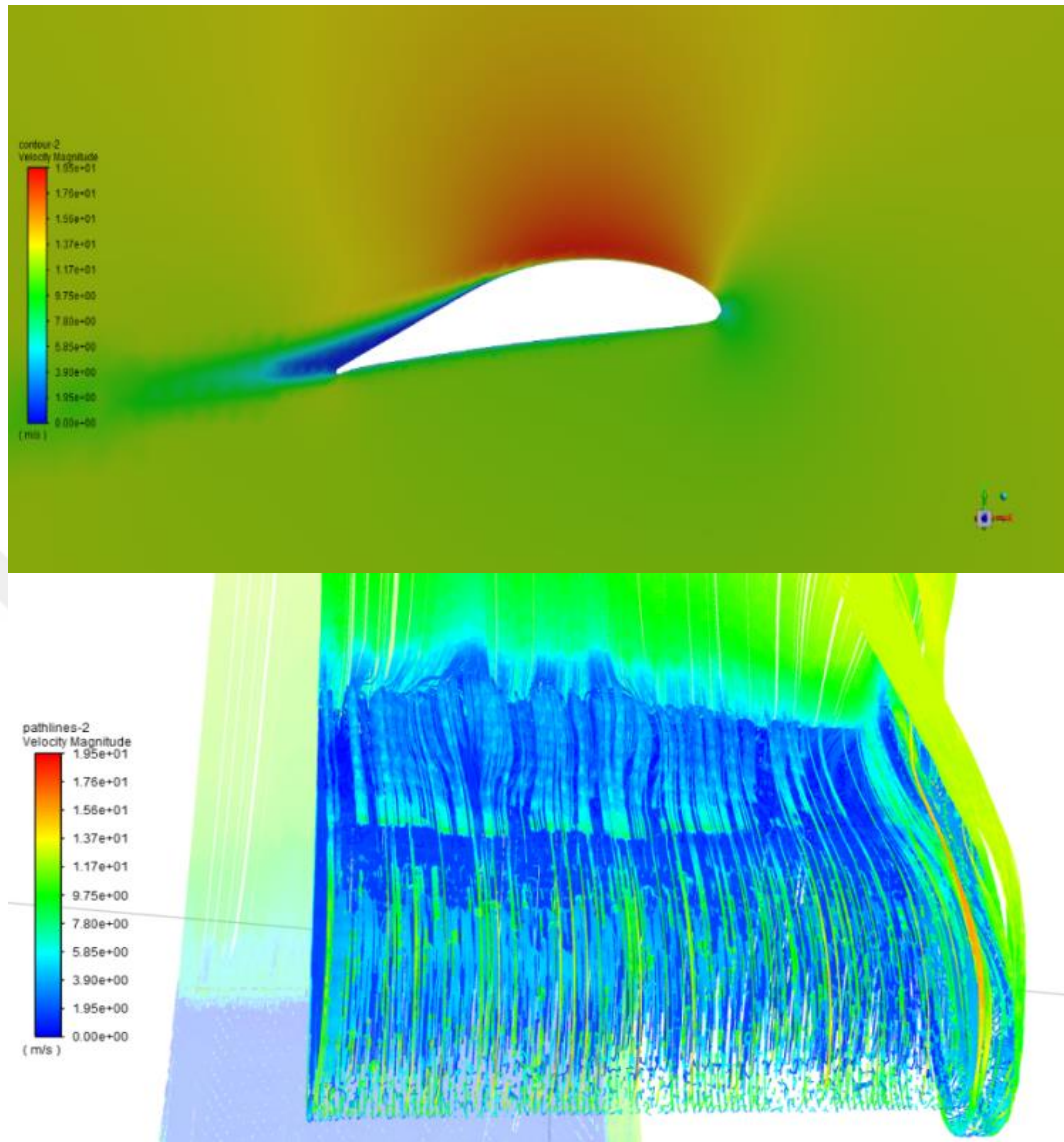
Şekil 2.7. Sonsuz kanat 1 dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi (devamı)

Şekil 2.5'teki akış analizi görüntüleri incelendiğinde, sonsuz kanat 1 tasarımını uygulanmış olan kanadın üst yüzeyinde sınır tabakasının daha düzenli olduğu ve akış ayrılmasının firar kenarına daha yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 2.6, sırasıyla sonsuz kanat 2'nin dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi sonuçlarını gösterilmektedir.



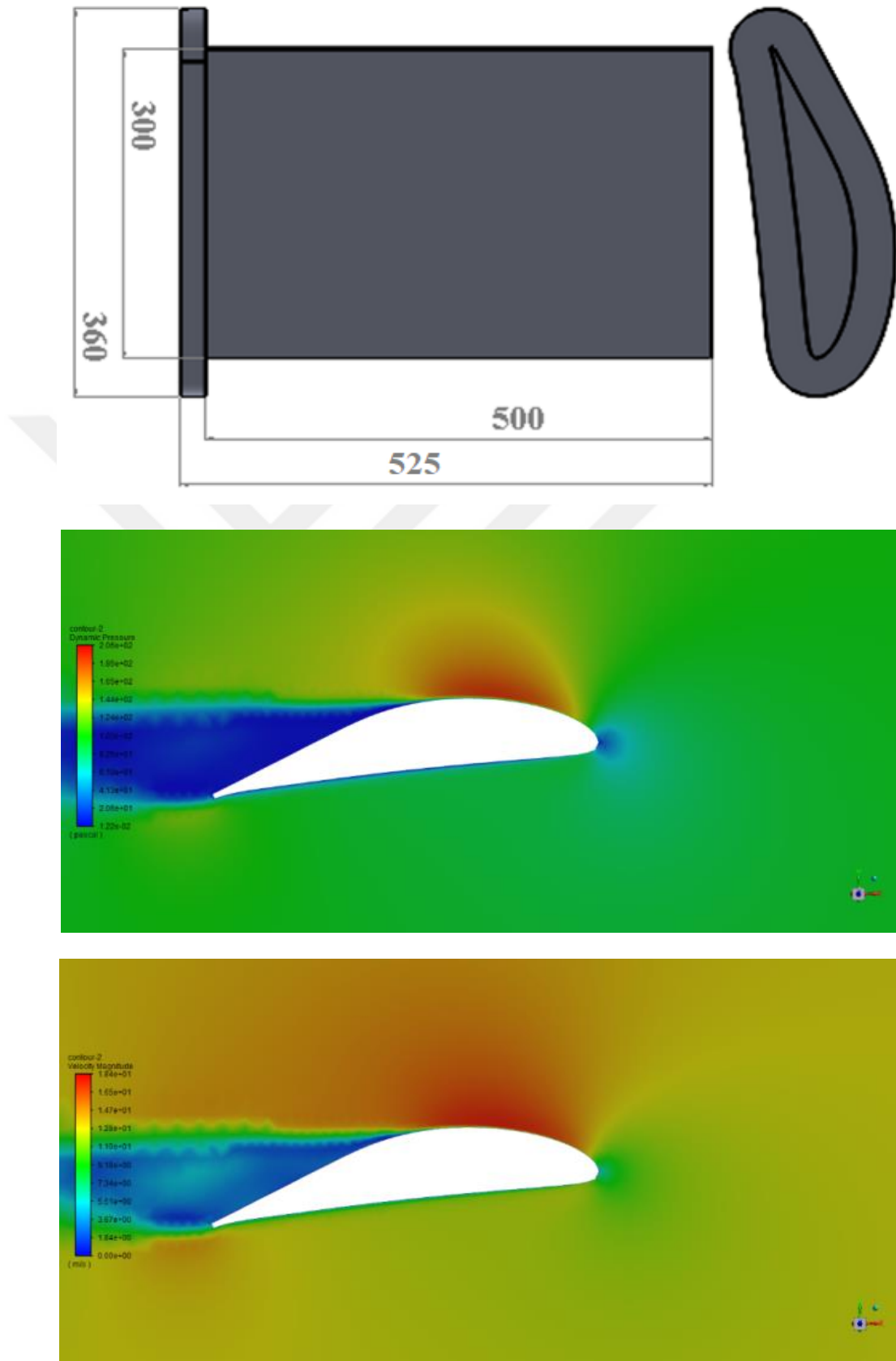
Şekil 2.8. Sonsuz kanat 2 dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi



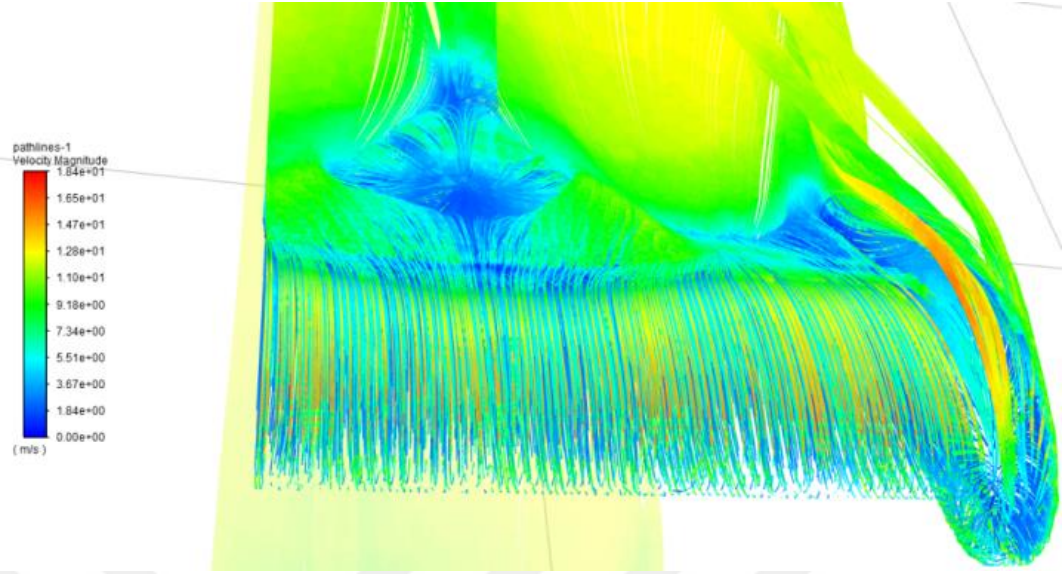
Şekil 2.8. Sonsuz kanat 2 dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi (devamı)

Şekil 2.6'daki akış analizi görüntülerine bakıldığında dinamik basıncın kanadın üst yüzeyine daha fazla yayılmasıyla akışın çok daha düzenli hale geldiği görülmektedir. Pattline analizi görüntülerine bakıldığında ise girdap akımları ve akış ayrılma balonu oluşmadığı, akış ayrılmasının firar kenarına yaklaştığı açıkça görülmektedir.

Şekil 2.7'da sırasıyla sonsuz kanat 3'ün dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analiz sonuçları verilmektedir.



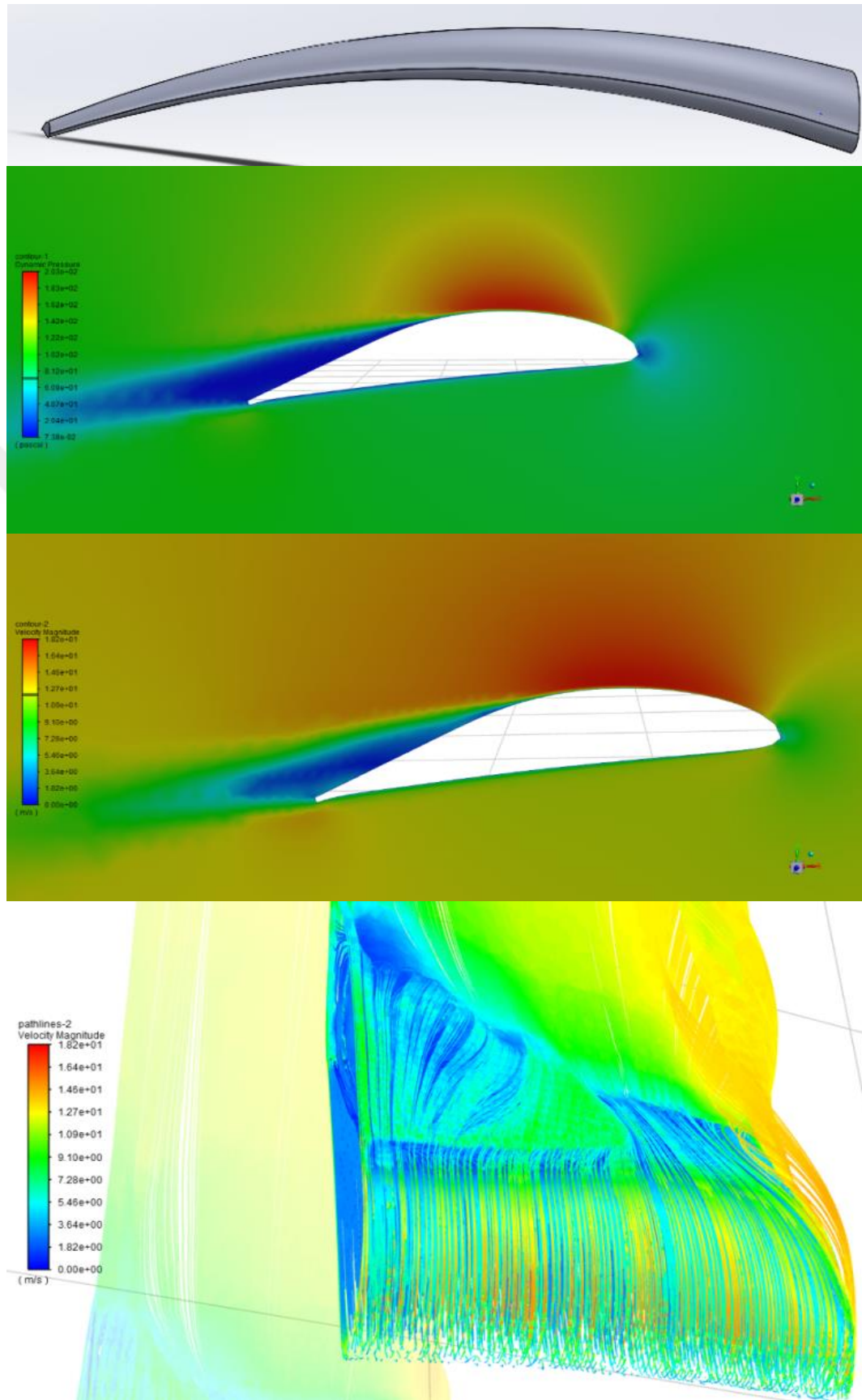
Şekil 2.9. Sonsuz kanat 3 dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi



Şekil 2.9. Sonsuz kanat 3 dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi (devamı)

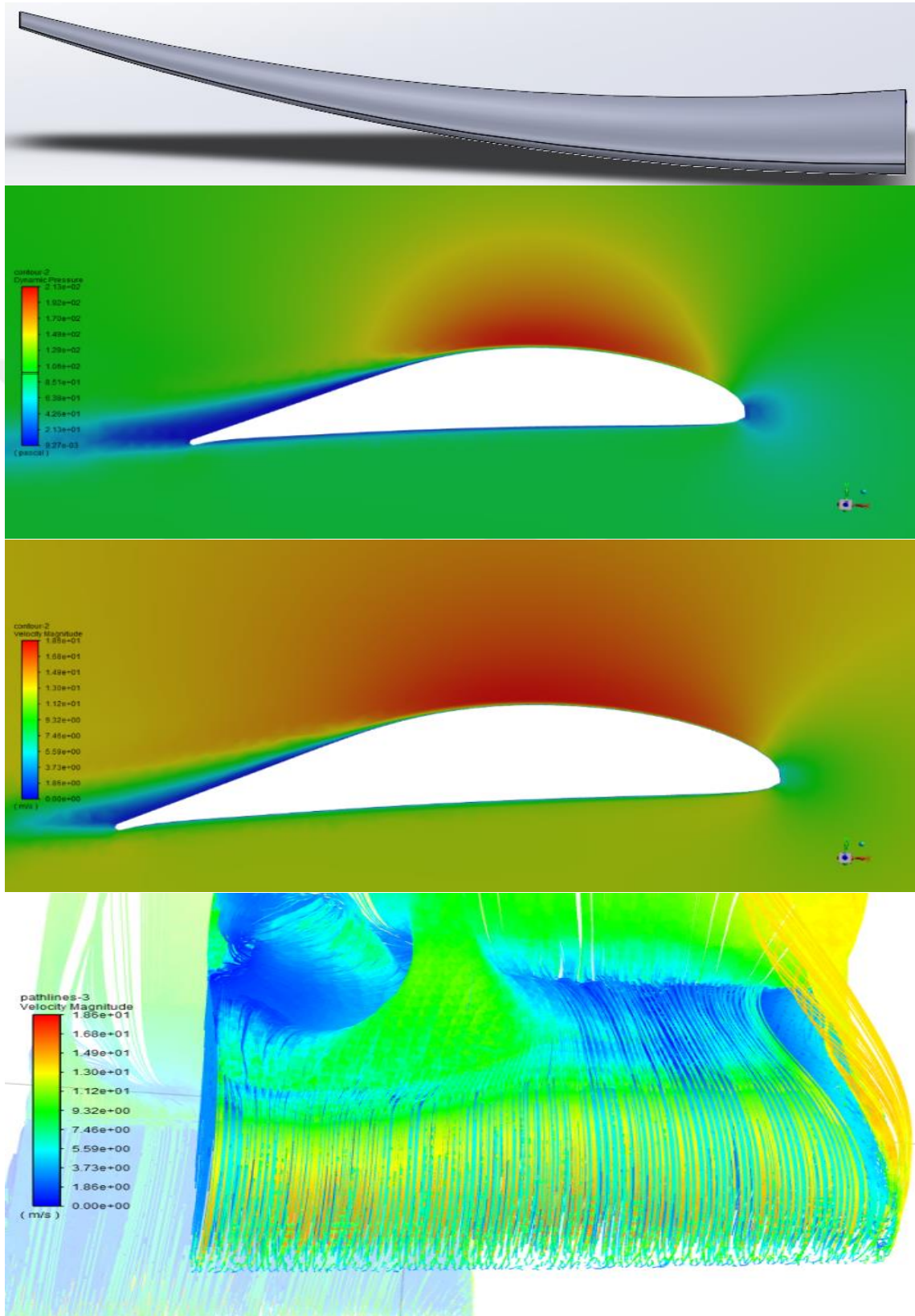
Akış görüntüleri incelendiğinde akış, sabit kanadın ucundan gelen basınç farkından dolayı bir girdap oluşturarak kanadın üst yüzeyinde bozulurken, sonsuz kanat yapısı uygulandığında bu bozulma kısmen önlenmektedir. Ancak sonsuz kanat yapısının boyutu büyütüldüğünde örneğin; sonsuz kanat 3 için sürüklenme kuvvetinin artması aerodinamik performansı olumsuz etkilemeye başlamıştır. Sonsuz kanat 1 ve 2 yapısı sabit kanat ile karşılaştırıldığında, kanat ucu girdapları sabit kanada göre azalma eğiliminde olduğundan aerodinamik performans değerlerinin iyileştiği görülmektedir. Sabit kanat ve sonsuz kanadın dinamik basınç görüntüleri incelendiğinde, kanadın üst kısmı girdaptan kısmen kurtulduğu için basınç değerinin doğal olarak akış tutma açısından iyileştiği açıktır.

Şekil 2.8, aşağı kavisli kanadın sırasıyla dinamik basınç, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi sonuçlarını göstermektedir.



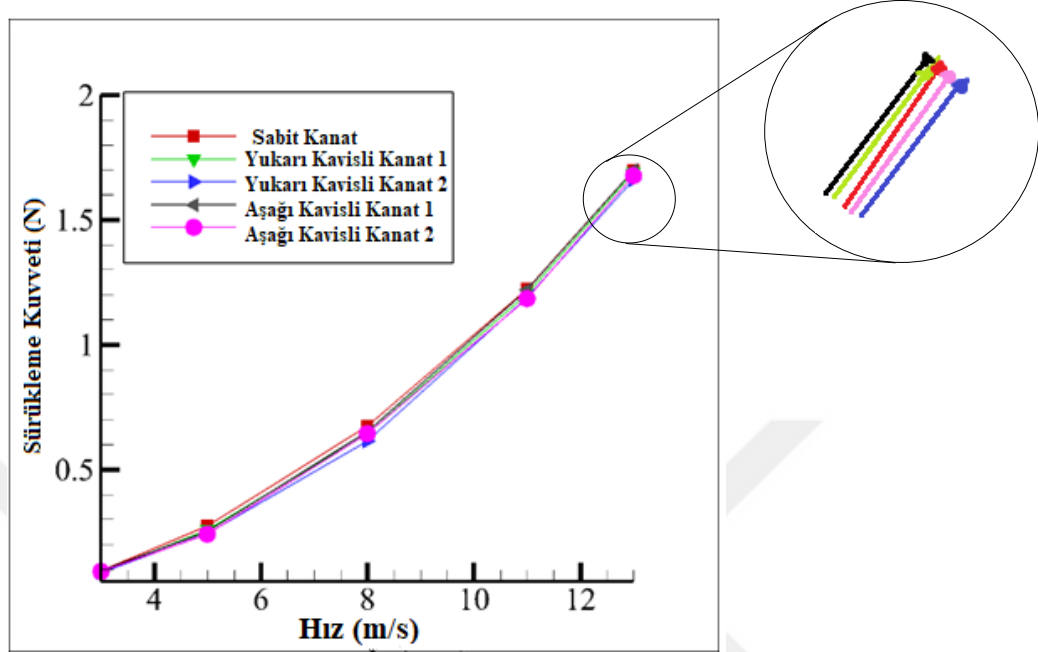
Şekil 2.10. Aşağı kavisli kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi

Şekil 2.9'da yukarı kavisli kanadın sırasıyla dinamik basınç, hız büyüklüğü ve çizgisel hız analizi sonuçları verilmektedir.



Şekil 2.11. Yukarı eğimli kanadın dinamik basıncı, hız büyüklüğü ve desen çizgisi hız analizi

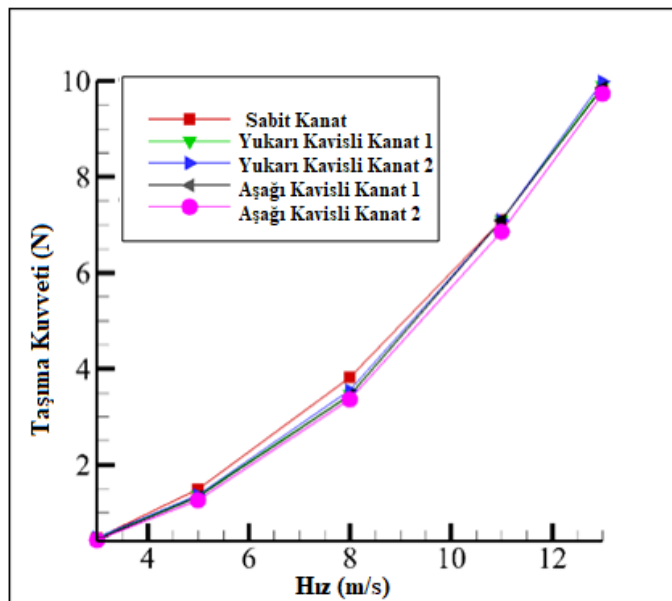
Şekil 2.10'da sabit kanat ve kavisli kanadın sürüklenme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır.



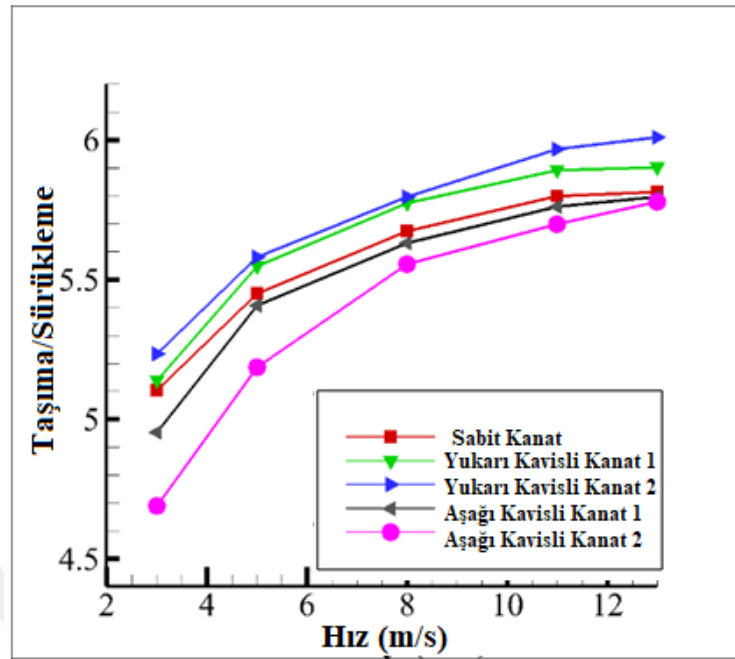
Şekil 2.12. Sabit kanat ve kavisli kanadın sürüklenme kuvveti değerleri

Şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'da yukarı ve aşağı kavisli tasarımın katı modeli, aerodinamik parametreleri ve akış analizleri detaylı olarak verilmektedir. Kanat yapısında kavis aşağı doğru verildiğinde kanat üzerinde oluşan akış ayrılma balonu ve bunun sonucunda aerodinamik performanstaki kayıplar görülmektedir.

Şekil 2.11'de sabit kanat ve kavisli kanadın taşıma kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır.

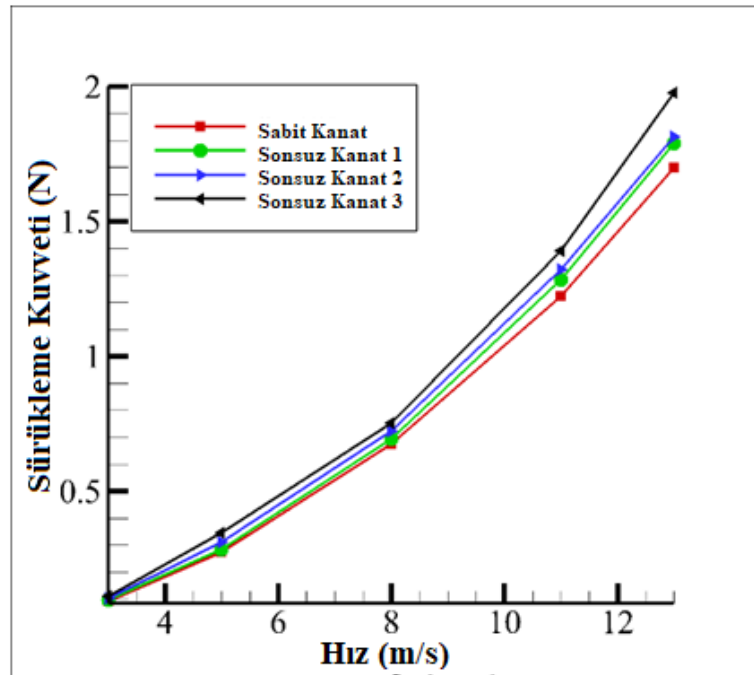


Şekil 2.13. Sabit kanat ve kavisli kanadın taşıma kuvveti değerleri



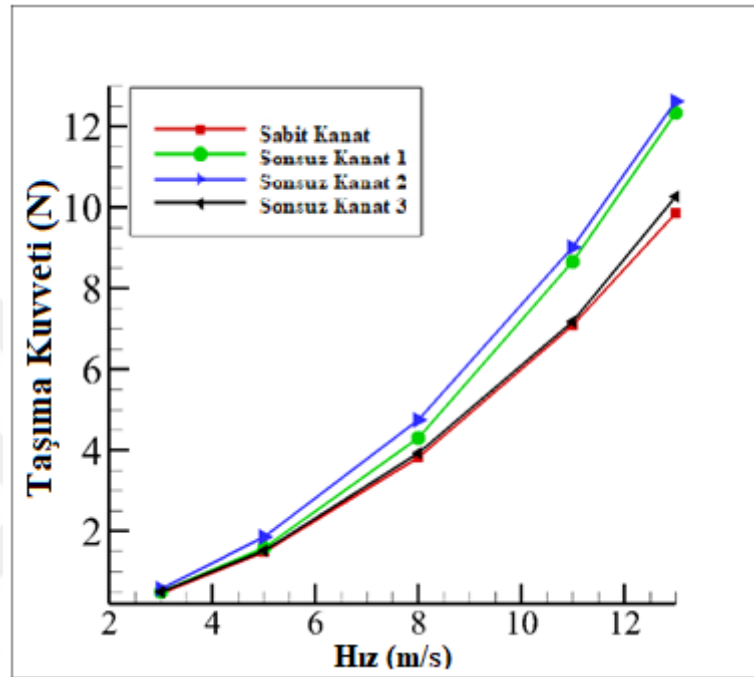
Şekil 2.14. Taşıma/sürüklenme kuvveti değerleri sabit kanat ve kavisli kanat

Şekil 2.12'de sabit kanat ve kavisli kanadın taşıma/sürüklenme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde, Taşıma/Sürüklenme oranının, kavis yukarı doğru olduğunda sabit kanada göre iyileştiği, kavis aşağı doğru olduğunda performans değerlerinin düştüğü açıkça görülmektedir.



Şekil 2.15. Sürüklenme kuvveti değerleri sabit kanat ve sonsuz kanatlar.

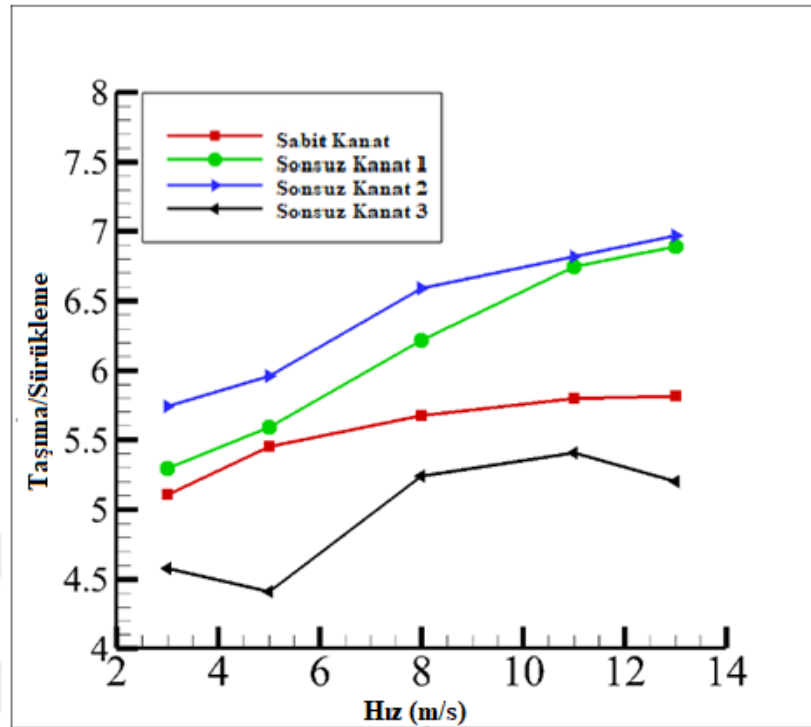
Şekil 2.13'te sabit kanat ve sonsuz kanatların sürüklenme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde 8 m/s hıza kadar sürüklenme oranındaki artışa bakıldığında benzer bir artış görülürken, 8 m/s üzeri hızlarda sonsuz kanat 3 ün boyutu nedeniyle sürüklenme kuvveti oranında büyük bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 2.16. Sabit kanat ve sonsuz kanatların taşıma kuvveti değerleri.

Şekil 2.14'te sabit kanat ve sonsuz kanatların taşıma değerleri karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde sonsuz kanat 3 tasarımının kanatçık benzeri mantıkla uç girdaplarını önlemesi ile sabit kanada oranla taşıma kuvvetinde artış görülmektedir. Sonsuz kanat 2 kanat tasarımının taşıma kuvveti değerleri incelendiğinde özellikle 12-13 m/s rüzgâr hızlarında yaklaşık %15 oranında artış sağladığı görülmektedir.

Şekil 2.15'te sabit kanat ve sonsuz kanatların taşıma/sürüklenme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.17. Taşıma/sürüklenme kuvveti değerleri sabit kanat ve sonsuz kanatlar.

Şekil 2.15'te sabit kanat ve sonsuz kanat tasarımının aerodinamik performans değerleri olan, taşıma kuvvetinin, sürüklenme kuvvetine oranı verilmektedir. Burada kanat ucuna sonsuz kanat eklendiğinde sabit kanadın aerodinamik performans değerinin arttığı, sonsuz kanat 2 dediğimiz tasarımın en yüksek aerodinamik performansa sahip olduğu, sonsuz kanat 3 boyutu sebebiyle aerodinamik performans değerinin azaldığı görülmüştür. Özellikle ideal rüzgâr aralıklarında sabit kanat ve sonsuz kanat 2 tasarımları karşılaştırıldığında sonsuz kanat 2 tasarımının taşıma sürüklenme oranında sabit kanada göre %20'ye varan iyileşme olduğu görülmektedir.

2.5. Rüzgâr Tüneli Analizi

Rüzgâr tüneli, hava içerisinde hareket eden katı cisimler üzerindeki gaz akışı etkisinin incelenmesi, araştırılması ve yorumlanması için hava hareketliliği sağlayan ve akış hızının ayarlanabildiği bir tüneldir. Hava tüneline (veya rüzgâr tüneline) yerleştirilen gerçek veya küçültülmüş boyutlu parçaların ve araçların kontrol edilebilir koşullar altında aerodinamik özelliklerini test etmek için kullanılır. Düzgün bir gaz (veya hava) akışı sağlamanın yanı sıra eskiden sadece uçak gövdelerinin aerodinamik formlarını kontrol etmek için kullanılan hava tünellerinden, günümüzde çok katlı binaların çevresinde oluşan rüzgâr girdaplarının incelenmesi, mermilerin ve karayolu-ray

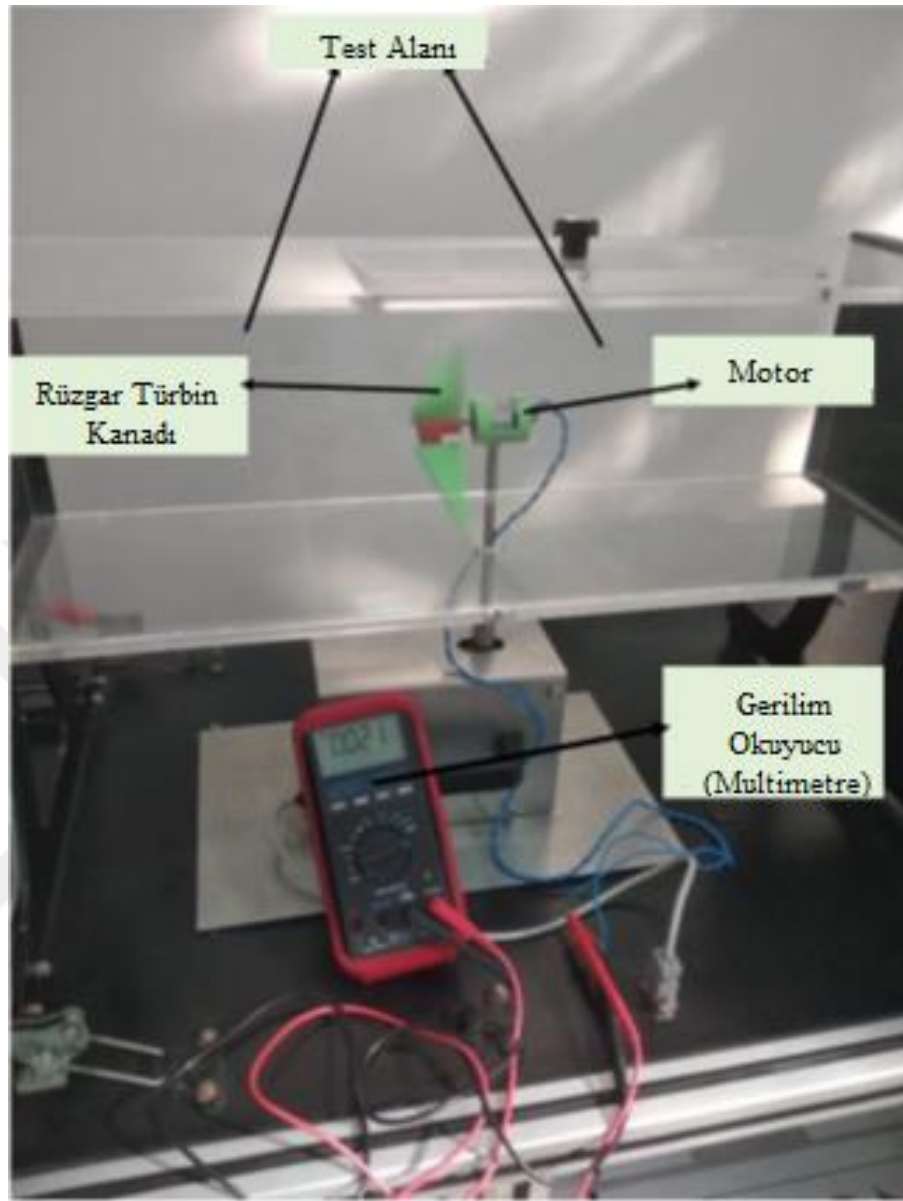
araçlarının şeklinin belirlenmesi ve yüksek yapıların, köprülerin, enerji nakil hatlarının ve radar tarayıcılarının rüzgâr yüklerinin hesaplanması için kullanılmaktadır.



Şekil 2.18. T-490 rüzgâr tüneli

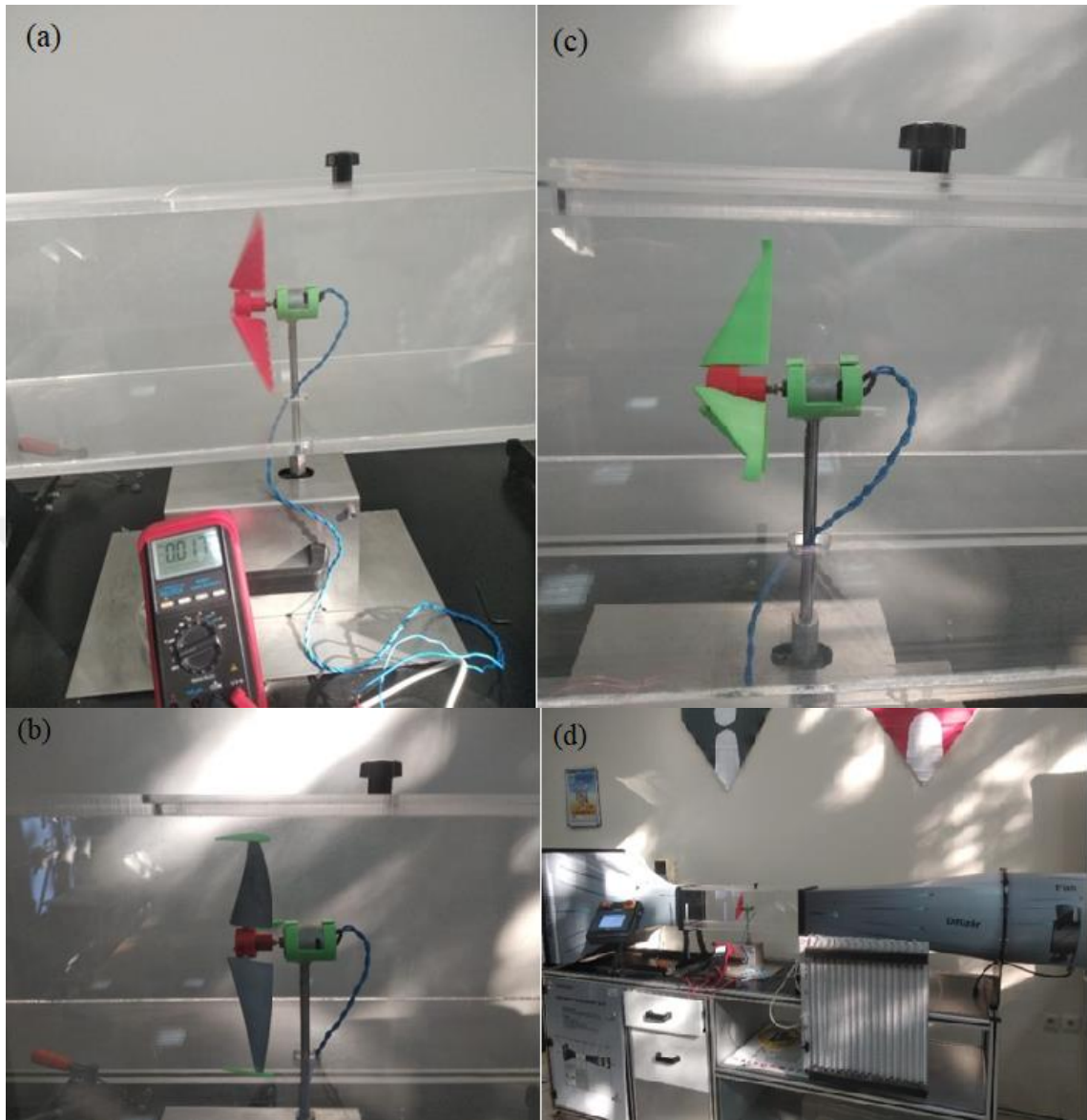
Rüzgâr türbini tasarımlarımızın deneysel çalışması İskenderun Teknik Üniversitesi makine mühendisliği envanterinde bulunan DNS marka T-490 model rüzgâr tüneli deney setinde gerçekleştirilmiştir.

T-490 rüzgâr tüneli, aerodinamik alan çalışmalarında ve akışkanlar mekaniği alanlarında yapılan deneyleri test etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu hava tüneli bir açık hava tünelidir. Bu tip hava tünellerinde hava atmosferden alınır ve atmosfere geri verilir. Nozul kısmı, kapalı ölçüm bölümünde sabit hız dağılımını kontrol eder [43].



Şekil 2.19. Rüzgâr türbini test sistemi

Şekil 2.17’ de rüzgâr tüneli test akış bölgesine yerleştirilen rüzgâr türbini göbeği, türbin göbeğine monte edilen kanat tasarımları ve türbin göbeğine monte edilen motorun multimetreye olan kablo bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Mikrometrenin sisteme entegrasi (a,b,c) ve deneysel rüzgâr tüneli(d)

Şekil 2.18’ de deneysel rüzgâr tüneli sistemimiz ve rüzgâr türbini tasarımız ile birlikte deneysel sonuçlarımızı elde edecek multimetrenin sisteme entegrasi gösterilmiştir.

Sistemde akışı farklı açılara ayarlayacak olan ve rüzgâr türbini kanatlarının monte edileceği burun konileri kırmızı renkte üretilerek Şekil 2.18(c)’de gösterilmektedir. Benzer şekilde burun konilerine monte edilmiş örnek bir rüzgâr türbini kanadı ve dönü hareketini enerjiye çevirecek elektrik motoru, bununla birlikte motorun kablo bağlantısı direk olarak multimetreye bağlanarak rüzgâr enerjisi ile birlikte oluşan enerji sistemden okunmuştur. Bu şekilde farklı kanat tasarımlarımızın, farklı hücum açısında ve farklı akış hızında oluşan enerjiler voltaj olarak ölçülmüştür. Rüzgâr tüneli farklı hızlarda

alıştırıldığında tnelimizin difüzör alanındaki debi sensöründen debi bilgisi alınır ve multimetre üretilen gücü voltaj olarak bize verir. Elde edilen voltaj değerleri her deney için en az 3 dakikalık test ortalaması alınarak elde edilmiştir.

2.5.1. Teknik Detay

Rüzgâr Tünelinin akış alanı başlangıcında akış alanında elde edilen rüzgâr hızını ölçmek için bir hız sensörü mevcuttur. Bu hava tüneli açık hava tnelidir. Bu tip hava tünellerinde hava atmosferden alınır ve yine atmosfere verilir. Meme kısmı kapalı ölçüm bölümündeki hızın kararlı dağıtılmasını kontrol altına almaktadır. Teknik detaylarından bahsedecek olursak; hava hız ölçümü, fan hız kontrolü, hava akışı, aerodinamik ve ısı transferi deneyleri için büyük ölçekte ara kanallar, açık tip hava tüneli, akış düzenleyici, şeffaf ölçüm bölümü, tünel tipi eksenel fan, farklı aparatlarla sürükleme ve taşıma kuvveti ölçümü, kanat modeli basınç dağılımı, silindirik basınç dağılımı, dokunmatik LCD Ekran, USB bilgisayar bağlantısı, bilgisayar kontrolü, 220V AC şebeke beslemesi özelliklerine sahiptir [43].

2.5.2. Cihaz Boyutları

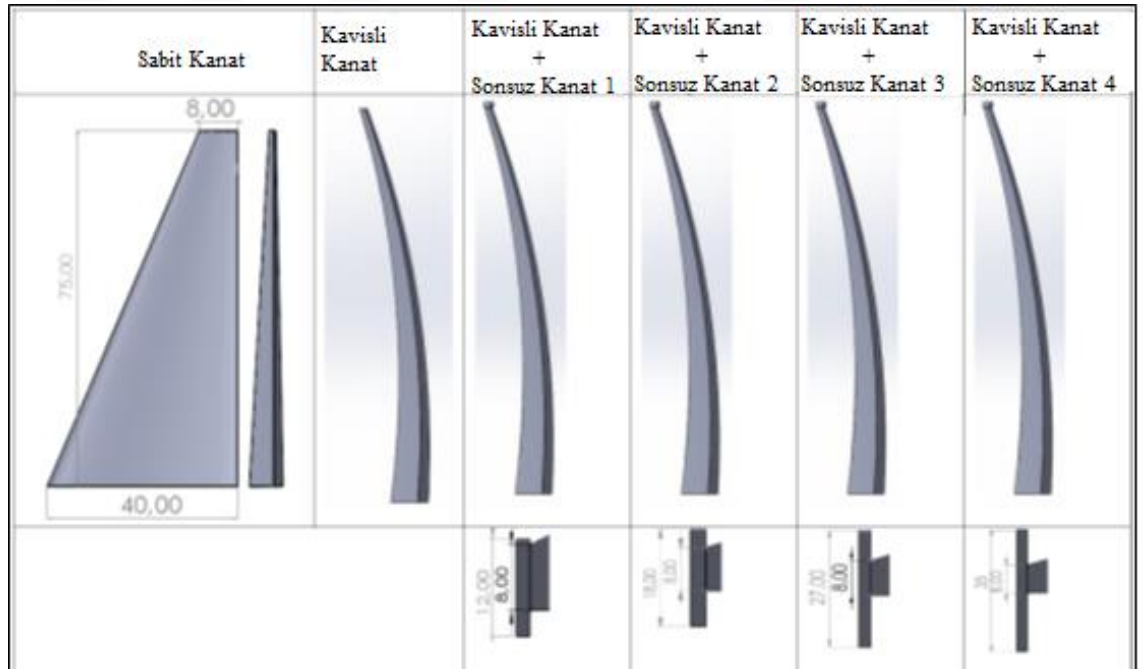
Rüzgâr tnelimizin boyu 2500 mm, genişliği 670 mm, yüksekliliği 1250 mm ve akış alanı 12*12 mm dir[43].

3. BÖLÜM

ARAŞTIRMA VE BULGULAR

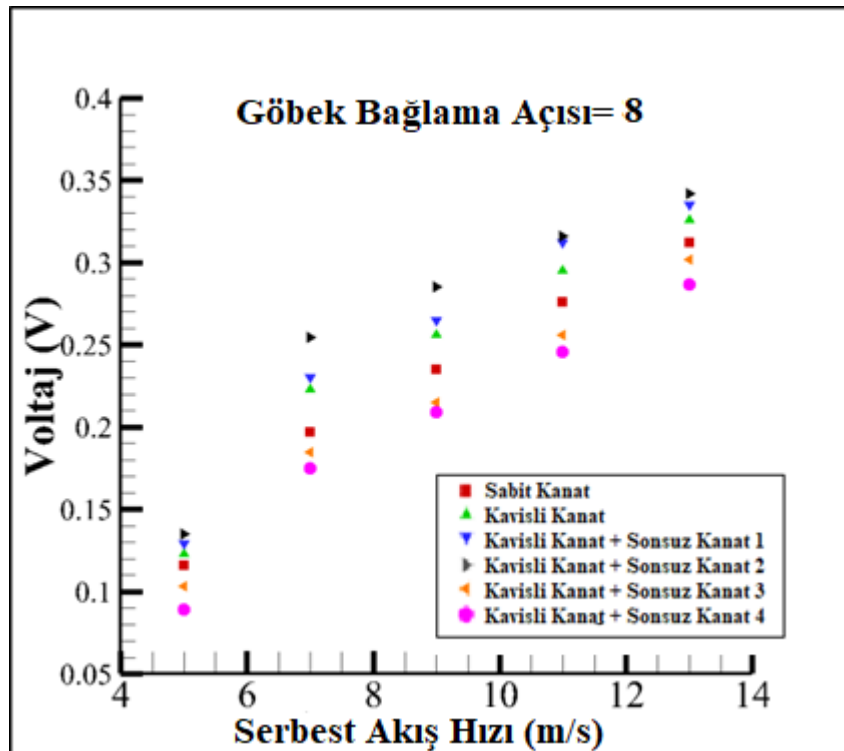
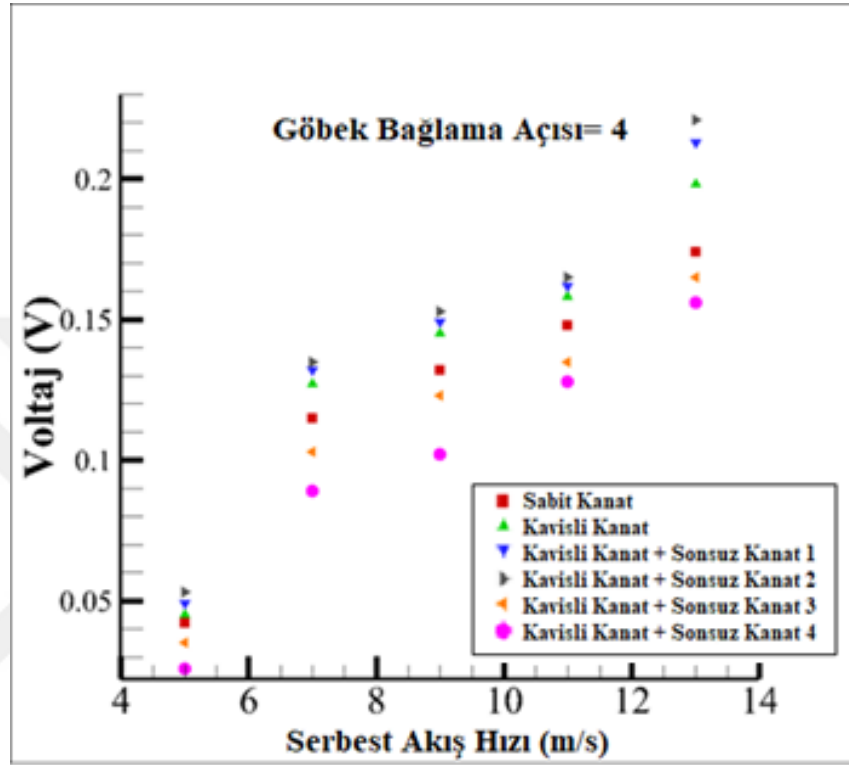
3.1. Rüzgâr Türbini Tasarımında Sonsuz Kanat Etkisi

Bu bölümde baykuş kanadı yapısından esinlenilerek sabit kanat yapısı kavisli kanat olarak tasarlanmış ve sonsuz kanat yapısı kanat ucuna monte edildiğinde deneysel olarak üretilen güç ölçülmüştür. Şekil 3.2'de kavisli kanat ucuna yerleştirilen sonsuz kanatların ölçüleri değişken olarak uygulanmış ve ölçü bilgileri gösterilmiştir. Burada sonsuz kanat 1 veya sonsuz kanat 2 olarak adlandırılan tasarımların anlamı ve kanat ucu giriş uzunluğundan ne kadar farklı oldukları açıkça verilmiştir.

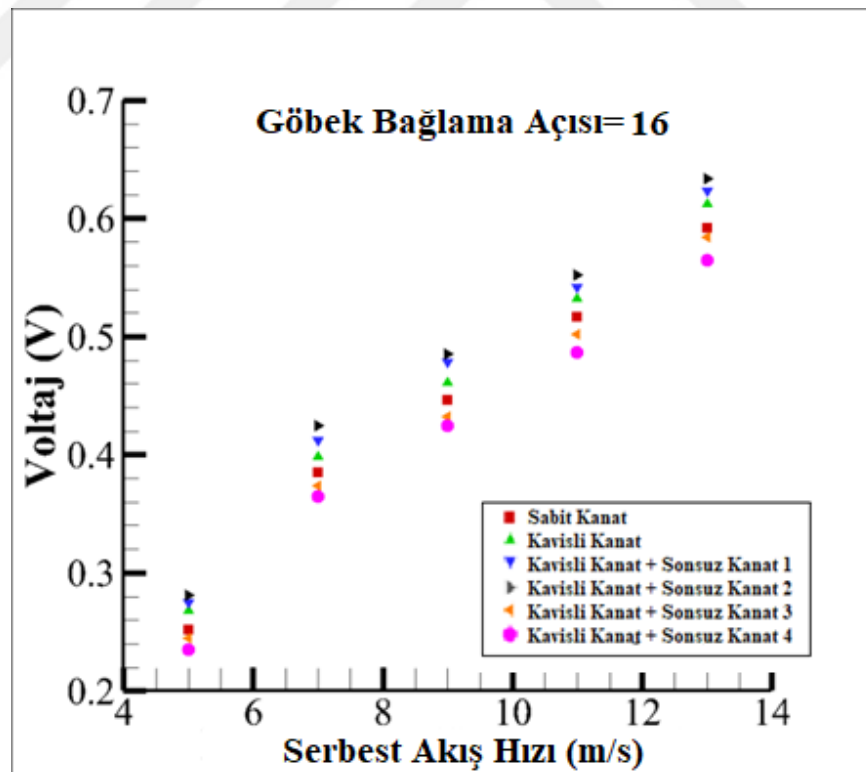
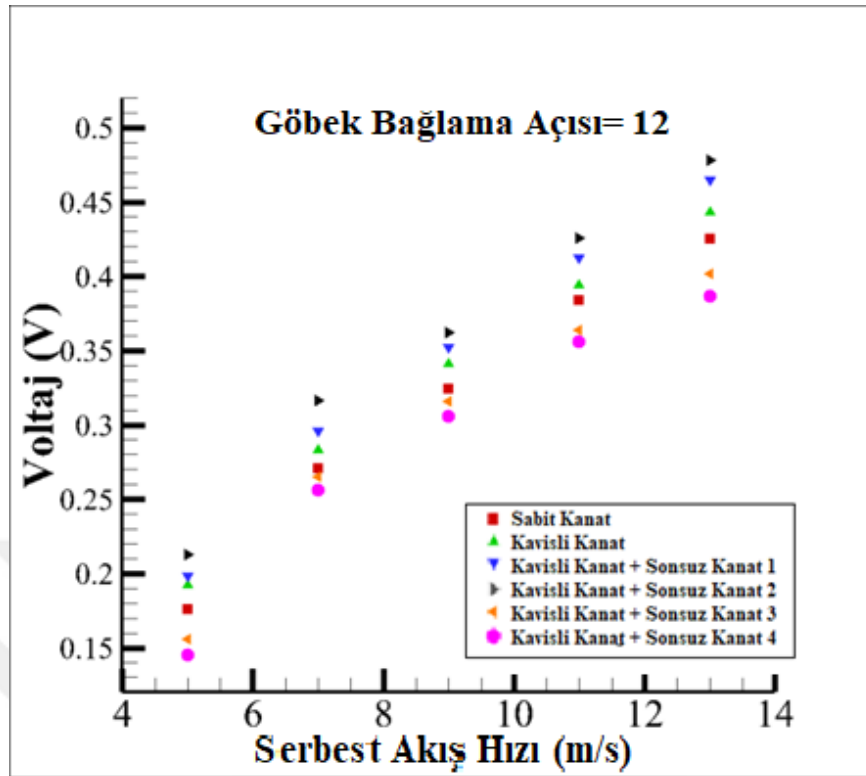


Şekil 3.1. Sonsuz kanat tasarımları

Sonsuz kanat 1 olarak adlandırılan tasarımda kanat ucu 8 mm iken, monte edilen sonsuz kanat kanat giriş uzunluğu 12 mm, sonsuz kanat 4 için ise 35 mm olarak tasarlanmıştır. Burada kanat profilinden sonsuz kanat yapısı elde edilir ve tüm parçalardan aynı oranda büyütülür.

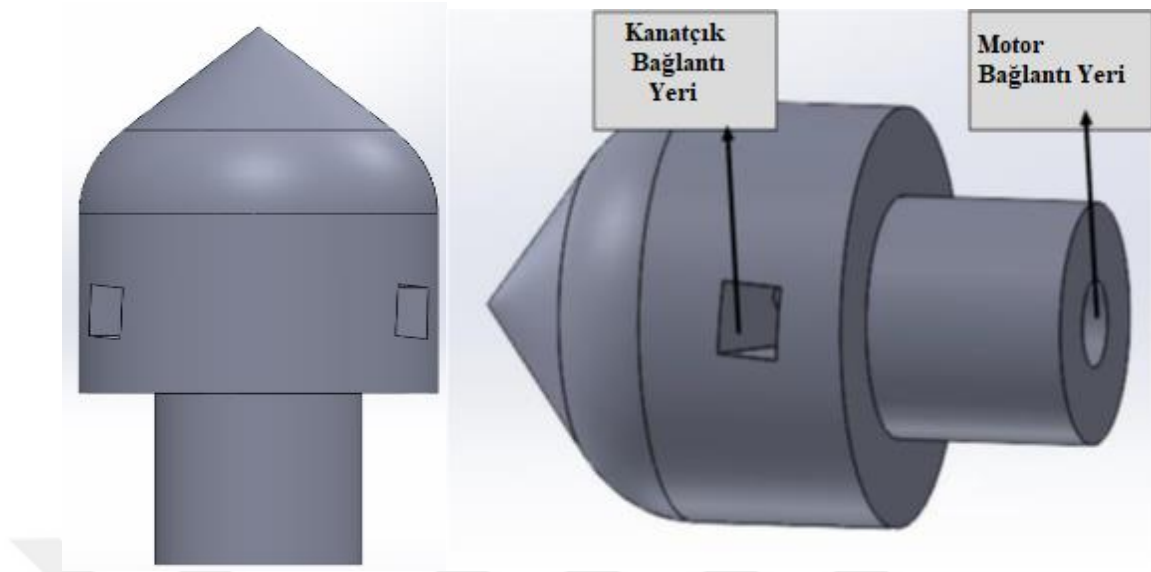


Şekil 3.2. Farklı hızlarda sonsuz kanat tasarımlarının ürettiği voltaj değerleri



Şekil 3.2. Farklı hızlarda sonsuz kanat tasarımlarının ürettiği voltaj değerleri (devamı)

Şekil 3.2'de farklı bağlantı açılarında ve farklı rüzgâr hızlarında tasarlanan sonsuz kanat yapılarından elde edilen gerilim değerleri verilmiştir.



Şekil 3.3. Rotor göbeği bağlantısı

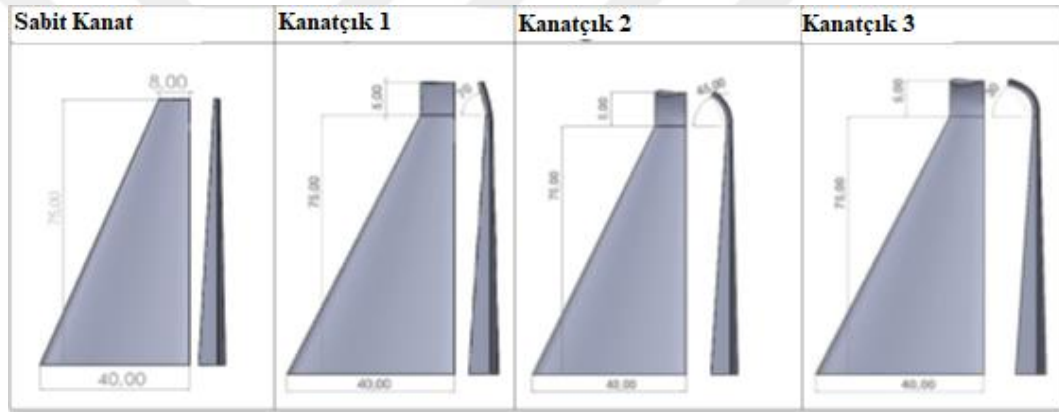
Şekil 3.3'te rüzgâr türbini kanatlarının göbeğe nasıl bağlandığı ve bu göbeğin motora nasıl monte edildiği ile ilgili bir görsel verilmiştir.

Burada alınan ölçüler farklı göbek bağlantı açılarındaki gerçekleştirildiği için birden fazla göbek üretilmiştir. Göbek bağlantı açısının değiştirilmesi sabit kanat sisteminde hücum açısına karşılık gelirken, pervane ve rüzgâr türbini gibi döner kanatlı sistemlerde yunuslama açısına benzer bir çalışma oluşturur. Şekil 3.2'de 4 farklı grafik verilmiştir. Bu grafiklerde kanat ucuna eklediğimiz sonsuz kanat yapısının farklı göbek bağlantı açılarındaki farklı akış hızı değerlerine göre bir rüzgâr türbini olarak nasıl faydalı olacağına dair bilgiler sunulmaktadır. Sabit kanat ile sonsuz kanadın karşılaştırması verilen grafikler incelendiğinde sonsuz kanat, kanat ucuna yerleştirildiğinde voltaj değerinin arttığı, ancak belirli bir değerden sonra sonsuz kanat kiriş uzunluğunun artması ekstra sürükleme kuvveti ürettiği için voltaj değerinin düşmeye başladığı görülmüştür. Göbek bağlantı açıları 4-16 derece arasında uygulanmış ve 16 dereceden yüksek bağlantı açılarıyla çalışıldığında kanat profilinde oluşan tutunma kaybı sebebiyle voltaj üretimi azalmıştır. Sonsuz kanatlı tasarımların sabit akış analizi sonuçları ve akış görselleri incelendiğinde sonsuz kanatlar uygulandığında kanat ucu girdaplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Buradan hareketle rüzgâr türbini kanat tasarımında sonsuz kanat uygulamasının faydalı olacağı düşünülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde doğru ölçülerde sonsuz kanat uygulaması yapıldığında üretilen gerilim değerlerinde iyileşme olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerde özellikle sonsuz kanat 2 tasarımı ideal sonuçlar

vermiş ve analiz sonuçlarında aerodinamik performans kriteri olarak değerlendirdiğimiz taşıma/sürüklenme oranında ideal rüzgâr hızlarında yaklaşık %20 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Elde edilen bu iyileşme oranı kurulu rüzgâr gücü miktarına bağlı olarak kıyaslandığında oldukça olumlu sonuçlar vermektedir.

3.2. Rüzgâr Türbini Tasarımında Kanatçık Etkisi

Bu bölümde sabit kanat ucuna bir kanatçık eklenerek rüzgâr türbini kanat tasarımı yapılmış ve kanatçık 1, kanatçık 2 ve kanatçık 3 olarak tanımlanan tasarımların ürettiği voltaj değeri ölçülmüştür. Kanatçık 1 olarak adlandırılan tasarımda, sabit kanat uzunluğu ve genişliği sabit tutulmuş, kanat ucuna düşey ile 70 derecelik bir açı yapılarak kanat profili ile aynı kanat yapısı ile tasarım elde edilmiştir.

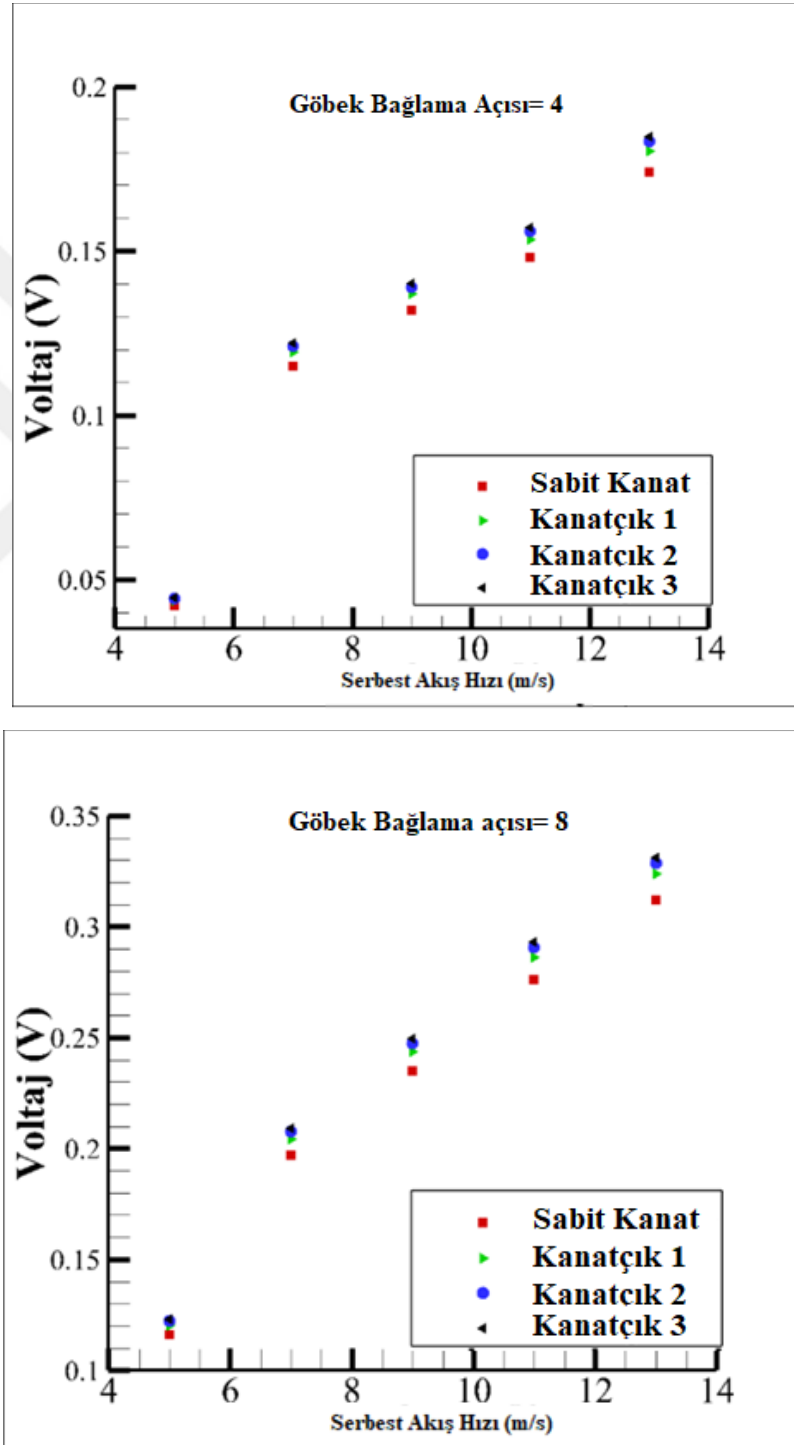


Şekil 3.4. Rüzgâr türbini kanat ucuna monte edilmiş kanatçıklı tasarımlar

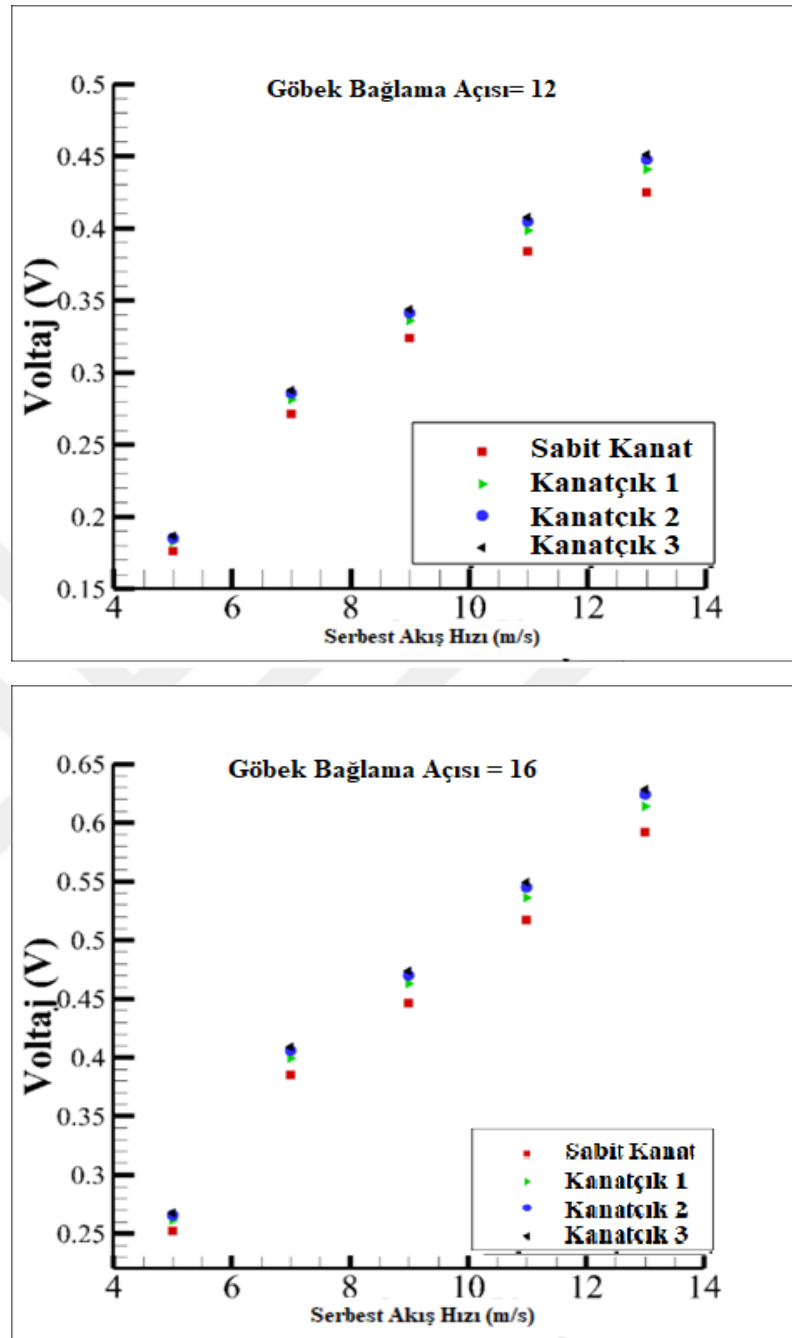
Kanatçık 2 ve kanatçık 3 olarak adlandırılan tasarımlarda sabit kanat ile uzunluk ve genişlik aynı olup düşey ile yaptıkları açılar sırasıyla 45 ve 30 derecedir. İnsansız bir hava aracının kanat ucuna kanatçık takıldığında aerodinamik performans değerlerinin arttığı açıktır [44]. Bu nedenle rüzgâr türbini kanadının ucuna bir kanatçık eklenmesinin de üretilen elektrik enerjisine katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

Mac Gaunaa ve Jeppe Johansen yapmış oldukları çalışmada rüzgâr türbinlerinde kanatçık kullanımının teroik değerlendirmesini ve hesaplama sonuçlarını sunmuşlardır. Yaptıkları teorik çalışmanın sonucunda kanatçıklarla elde edilen güç artışının kanat ucu girdap etkilerinin azalmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yeni bir algortima kullanılarak yapılan sayısal çalışma ise serbest iz taşıma metodu kullanarak, verilen uç hız oranı ve açıklığın geometrisi için güç katsayısının optimizasyonunu içermektedir. Kanatçıklı analizlerin sonucunda rüzgâr yönündeki kanatçıkların C_p optimizasyonu

açısından rüzgâra karşı olan kanatçıklardan daha üstün olduğunu ve güç üretimindeki artışın, kanadın radyal yönde basit bir şekilde uzatılmasıyla elde edilebilecek olandan daha az olduğunu göstermiştir. Hesaplamalar ayrıca, rüzgâr yönündeki daha kısa kanatçıkların ($>2\%$), kanadın radyal uzantısıyla elde edilen C_p 'deki artışa yaklaştığını göstermiştir [45].



Şekil 3.5. Farklı hızlarda kanatçık kanat tasarımlarının gerilim değerleri



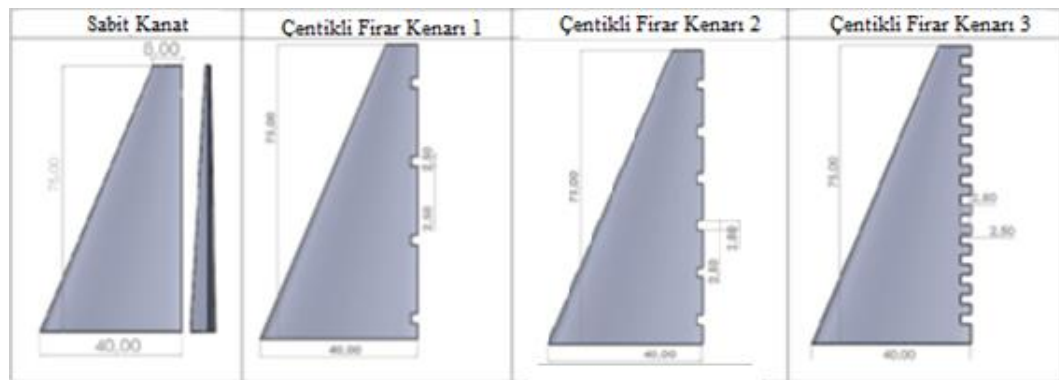
Şekil 3.6. Farklı hızlarda kanatçık kanat tasarımlarının gerilim değerleri (devamı)

Şekil 3.5'te kanatçık 1, kanatçık 2 ve kanatçık 3 olarak adlandırılan tasarımların farklı göbek açılarında sabit kanat ile farklı akış hızlarında elde edilen voltaj değerlerinin karşılaştırılması verilmektedir. Kanat yapısının uç kısmına yerleştirilen kanatçık yapısı, uç girdaplarını azaltmaya yardımcı olduğu için uçağın uçuş performansını iyileştirir. Benzer şekilde rüzgâr türbini kanat yapısında kanatçık kullanımı incelendiğinde üretilen gerilim değerinin arttığı görülmektedir. Tian-tian Zhang ve arkadaşları kanatçık kullanımının havacılık alanında uç girdabını azaltmada etkili olduğu düşüncesiyle,

dikey eksenli bir rüzgâr türbininde kanatçık kullanımının aerodinamik etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Kanatçık yapılandırmasının tanımlanmasında altı parametre uygulanmıştır. Kanatçık dönüş açısının kanatçık performansını etkileyen en önemli faktör olduğu belirtilmiştir. Yaptıkları tek kanatlı çalışmada, karşılaştırmalı sonuçlar, ideal kanatçığın uç girdaplarını azaltabileceğini ve 2.29'luk bir uç hız oranında kanadın güç performansını %31'e kadar iyileştirebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte kanatçıkların, kanadın iki tarafı arasındaki basınç farkını korumaya yardımcı olduğu, böylece uç girdabını azalttığı ve kanat ucunun yakınındaki yüzeyin aerodinamik verimliliğini artırdığı sonucuna varmışlardır [46]. Rüzgâr türbini kanat yapısında sabit kanatlara göre daha az sürüklenme kuvveti ürettiği için kanatçıkların kullanımı aynı ortamda devir sayısını artırır. Serbest akış hızı değerleri 3-13 m/s arasında tercih edilmiştir. Rüzgâr enerjisi genellikle 13 m/sn üzerinde verim düşüşüne neden olmaktadır ve 3 m/s altı hızlar, güç üretimine başlamak için tasarımlarımızda en verimsiz sonuçları vermektedir.

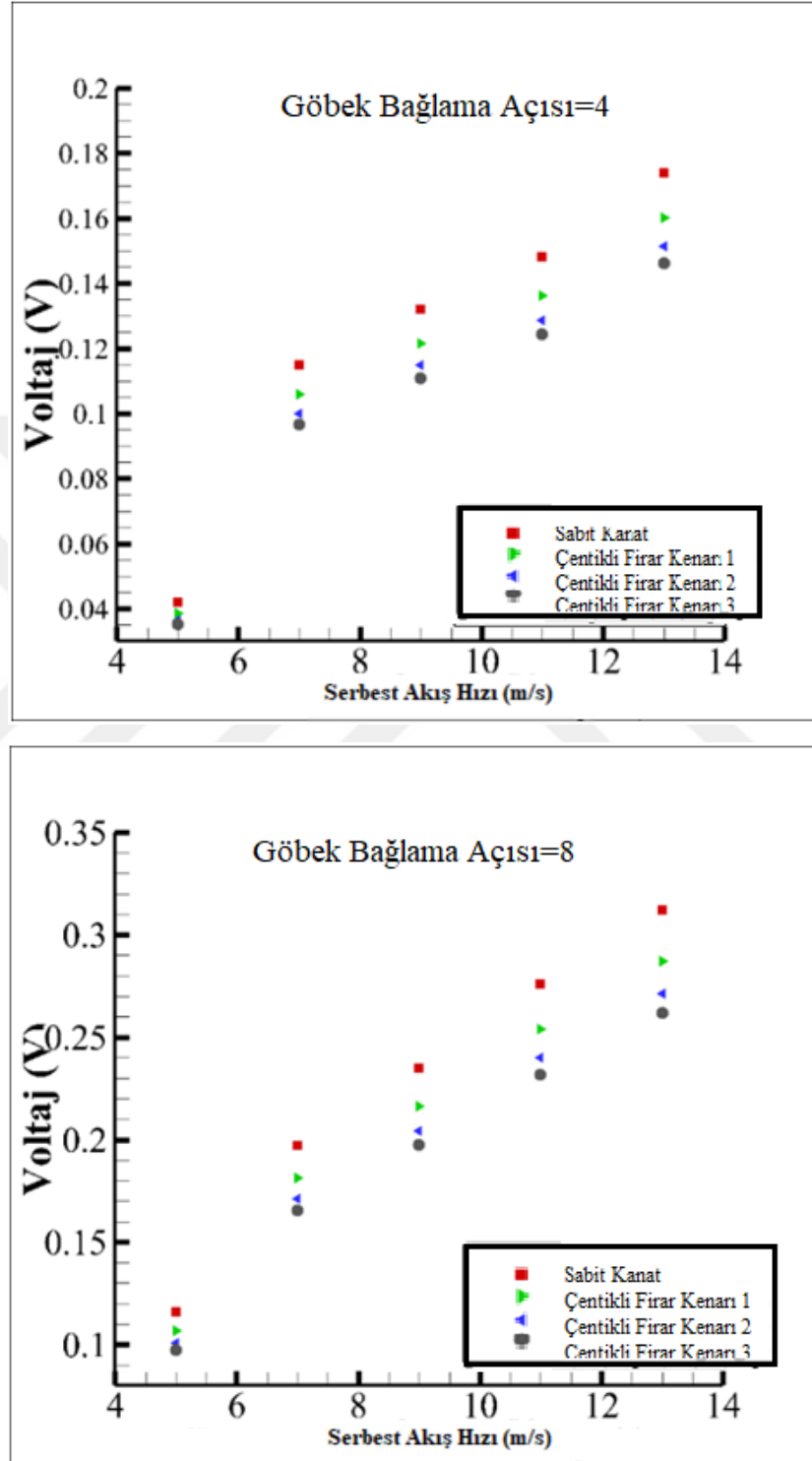
3.3. Rüzgâr Türbini Tasarımında Çentikli Firar Kenarı Etkisi

Baykuş kanat yapısının veya benzeri diğer kuşların kanat yapısının arka kenarları incelendiğinde, tüyleri arasında boşluklar olduğu gözlemlenmiştir. Doğadan ilham alınarak farklı teknolojik alanlarda farklı tasarımlar karşımıza çıkmıştır. Özellikle uçak motoru egzoz kısmında bu tasarımın mantığının aslında av mekanizmasındaki gürültü seviyesini azalttığından esinlenildiği aşikardır, bu nedenle gürültü ve titreşimin azaltılması istenen alanlarda tercih edilebilir. Bu çalışmada, bundan esinlenerek rüzgâr türbini kanat tasarımının üretilmesinin faydalı olacağı düşüncesiyle çalışma yapılmıştır [46].

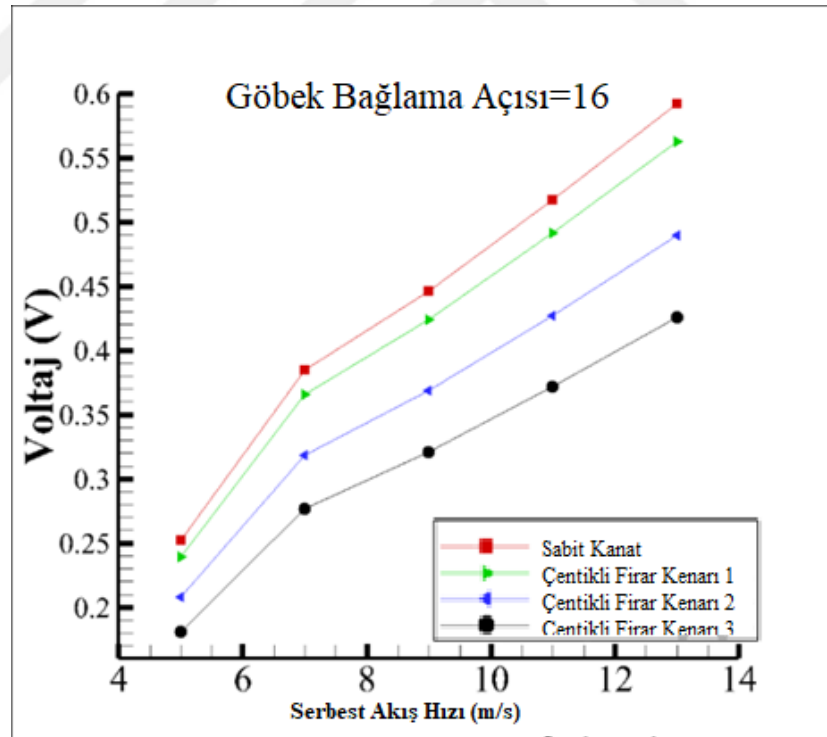
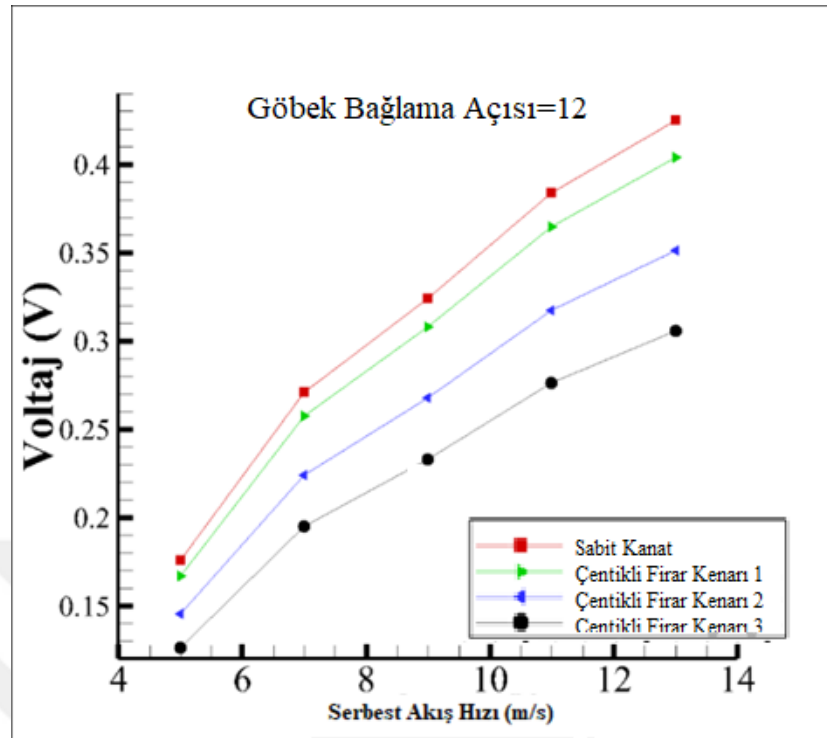


Şekil 3.7. Rüzgâr türbini kanat ucuna monte edilmiş Çentikli Firar Kenarı Tasarımları

Şekil 3.6'da sabit kanat tasarımında çentikli firar kenarı kanat yapısının farklı tasarımlarla arka kenara hangi boyutta ve ne sıklıkla eklendiği açıkça gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Çentikli Firar Kenarı Kanat Tasarımlarının Farklı Göbek Bağlantı Açılarındaki Gerilim Değerleri



Şekil 3.7. Çentikli Fırar Kenarı Kanat Tasarımlarının Farklı Göbek Bağlantı Açılarındaki Gerilim Değerleri (devamı)

Şekil 3.7'de Çentikli fırar kenarı 1, Çentikli fırar kenarı 2 ve Çentikli fırar kenarı 3 olarak adlandırılan tasarımların farklı göbek açılarındaki sabit kanat ile farklı akış hızlarında elde edilen voltaj değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Çentikli fırar

kenarı kanat tasarımlarının sabit kanat ile karşılaştırıldığında hız ve gerilim değişimleri incelendiğinde, frekansın artması, akış ayrımının ve türbülansın artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla çentikli firar kenarının kanat üzerinde uygulaması sonucunda verim düşmekte ve üretilen gerilim değeri düşmektedir. Ancak titreşim veya gürültüde herhangi bir iyileşme olup olmadığı ve bu etki sonucunda rüzgâr enerjisinde verim artışı olup olmadığı incelenmelidir.



4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Doğadan ilham alan kanat tasarımları incelendiğinde doğanın üstün mühendislik çözümleri sunduğu aşikârdır. Yapmış olduğumuz tez çalışmasında doğadan ilham alan kanat tasarımları ile aerodinamik verimliliği artırarak, rüzgâr enerjisinin geleceğin enerjisi olması yolunda katkı sağlamak amaçlanmıştır. Deniz canlılarından esinlenen kanat tasarımları incelendiğinde özellikle balinaların benzersiz morfolojik yapısı ve üstün avlanma kabiliyetinden esinlenilmiştir. Araştırmacılar balinaların yüzgeçlerinde bulunan tüberkül adı verilen çıkıntıların aerodinamik verimliliğe katkısı olacağını düşünmüş ve pek çok kanat tasarımı yapmışlardır. Öne çıkan çalışmalardan Frank. E Fish ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada balina tüberküllerinin geleneksel kanatlara kıyasla taşıma sürükleme oranında %17,6'lık bir artış sağladığı gözlemlenmiştir [47]. Bir diğer yandan kuş kanatlarından esinlenen tasarımlar da rüzgâr enerjisinin gelişmesinin önündeki aerodinamik verim ve gürültü problemlerine çözüm sunmuştur. Teriaki İkedo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada martı kanatlarından esinlenen bükülmüş kanat tasarımı geleneksel kanadın taşıma/sürükleme oranına kıyasla %8,1 performans artışı sağlamıştır [38]. Bunun yanı sıra baykuşların neredeyse sessiz uçmalarından esinlenen tasarımlar ise türbinlerin gürültülü çalışma problemine bir çözüm yolu açmış olup yapılan çalışmalarda baykuş kanat yapısının yaklaşık 10 dB gürültü azaltımı sağladığı görülmüştür [36]. Buradan hareketle baykuş kanat yapısının aerodinamik verimliliğe etkisi tez çalışmasında incelenmiştir. Sonuçlar Garrett Wright' ın yaptığı çalışma ile benzer çıktılar vermiştir. Garrett Wright yaptığı çalışmada balina tüberkülleri ve baykuş kanat yapısını birlikte kullanarak aerodinamik verimi yüksek ve bir o kadar da sessiz bir kanat tasarımı yapmayı amaçlamış ancak tasarım gürültü azaltımı konusunda başarılı iken genel verimlilikte düşüşe neden olmuştur. Yaptığımız çalışmada sabit kanat

tasarımının firar kenarına eklediğimiz çentikler ile baykuş kanat yapısı taklit edilmiş olup, çentiklerin akış bozulmasına sebep olarak taşıma/sürükleme oranında düşüşe neden olduğu, yalnızca tek yönlü esinin aerodinamik performansa katkısı olmadığı ve baykuş kanat yapısının detaylı olarak incelenmesi gerektiği kanısına varılmıştır. Ayrıca ağaç tohumlarından esinlenen kanat tasarımlarının düşük rüzgâr hızlarında operasyona başlamaya katkı sağladığı ve rüzgâr yüklerine karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür [31]. Yapılan bu biyomimetik tasarımlar ve bu tasarımların sayısal ve deneysel incelemeleri sonucunda pek çok araştırmacıya ilham kaynağı olan doğadan esinimli tasarımların rüzgâr türbinlerinde kullanılması aerodinamik verimliliği artırmayı başarmıştır. Çalışmada elde ettiğimiz bulgular ışığında kavisli kanat tasarımlarında yukarı kavisli kanadın kanat ucuna eklenen kanatçıkla benzer özellikler göstererek kanat ucundaki girdap akımlarını nispeten önleyerek taşıma sürükleme oranına katkı sağladığı ve kavisli kanat tasarımı ile birlikte tasarlanmış olduğumuz sonsuz kanat yapısının hibrit kanat yapısında birlikte kullanılmasının genel verimlilikte %10 civarında artış sağladığı görülmüştür. Yapılacak olan çalışmalarda baykuş kanat yapısının detaylı incelenerek kavisli ve çentikli yapısının yanı sıra morfolojik özellikleri gözlemlenerek farklı tasarımların ortaya konması ile neredeyse sessiz ve bir o kadar da verimli kanat tasarımları yapılacaktır.

4.2. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, rüzgâr türbininin kanat tasarımında doğadan ilham alınarak tasarlanan yeni bir tasarım ile rüzgâr enerjisinin verimliliği maksimize edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle baykuş kuşunun uçuş sırasında kanat yapısındaki kavisli kanat şekli dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmada, rüzgâr türbininin sabit kanatlı tasarıma göre verimliliğinde kavisli kanat yapısının faydalı olduğu görülmüş ve bunlarla birlikte sonsuz kanat, kavisli kanat yapısının ucuna entegre edilmiş ve çalışma rüzgâr tüneline test edilmiştir. Kanat ucuna eklenen sonsuz kanat yapısının boyutuna bağlı olarak üretilen voltaj değerinde değişimler gözlemlenmiştir. Kavisli kanat ile sonsuz kanat 1 ve kavisli kanat ile sonsuz kanat 2'nin birlikte kullanıldığı hibrit tasarımların analiz sonuçlarına bakıldığında voltaj çıktısı olarak sabit kanada oranla %15'e varan bir iyileşme gözlemlenmiştir. Benzer şekilde kavisli kanat ile sonsuz kanat 3 ve kavisli kanat ile sonsuz kanat 4'ün birlikte kullanıldığı tasarımlarda sonsuz kanat boyutu büyütüldüğünde tam tersi etki gözlenmiştir. Yani sürükleme kuvveti çok fazla arttığı

için sabit kanada oranla %12'ye varan bir voltaj düşüşü gözlemlenmiştir. Sabit kanat ve sabit kanat yapısının ucuna eklenen kanatçık yapısı ile karşılaştırılmasını verdiğimiz çalışmada kanatçık kullanımının ve kanatçık açısının değişmesinin voltaj üretimini nasıl etkilediği açıklanmıştır. Sabit kanat yapısında kanatçık kullanımı ile üretilen voltaj değerlerinde farklı hızlarda ve farklı göbek açılarında yaklaşık %6'lık bir iyileşme elde edilmiştir. Çentikli firar kenarı tasarımının sabit kanat üzerinde bir rüzgâr türbini olarak kullanımının karşılaştırması incelenecek olursa, kanat yapısının firar kenarına çentikli tasarım uygulandığında akışın bozulmasına ve arka kenarda girdapların artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Doğadaki canlılarda bu özelliğin olmasının mutlaka bir nedeni vardır ancak rüzgâr türbini kanat yapısında kullanıldığında voltaj veya enerji üretimi açısından olumlu bir etki gözlemlenmemiştir. Üretilen gerilim değerleri incelendiğinde çentikli hücum kenarı sayısının artması ile üretilen enerji değerinin sabit kanada göre %30 oranında azaldığı görülmektedir.

- Doğada var olan diğer kuşların kanat yapısı incelenerek, aerodinamik verimliliği artıran yeni bir tasarım literatüre kazandırılabilir.
- Baykuş kanat yapısı detaylı olarak incelenerek, çalışmada kullandığımız kavisli kanat yapısı ve firar kenarı çentikleri sonuçları göz önünde bulundurularak baykuş kanat yapısının aerodinamik verime etkisini artırabilecek yeni tasarımlar yapılabilir.
- Bu çalışmada uygulanan baykuş kanat yapısından esinlenen kavisli kanat ve sonsuz kanat tasarımlarından ideal sonuçlar elde edilen tasarım çentikli kanat tasarımı ile birlikte incelenerek sessiz ve verimli kanat için yeni bir tasarım literatüre kazandırılabilir.
- Bu çalışmada ideal sonuçlar veren kanat tasarımının doğadan esinimli ve aerodinamik verimliliğe katkısı gözlemlenmiş tasarımlarla hibrit olarak kullanılmasının aerodinamik verime katkısı incelenebilir.

KAYNAKÇA

1. Yılmaz, S., Kalkan, D.K. 2017. Enerji güvenliği kavramı: 1973 petrol krizi ışığında bir tartışma. **Uluslararası Kriz ve Siyaset Araştırmaları Dergisi**, 1(3), 169-199.
2. Külekçi, Ö.C. 2009. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi. **Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi**, 1(2), 83-91.
3. Özdemir, M., Yıldırım, Ç. V., Uzun, M., Çoban, S., 2001. Biyomimetik rüzgâr türbinleri: bir derleme, s. 176-194. *2nd International Conference on Access to Recent Advances in Engineering and Digitalization*. March 10-11, 2021, Kayseri.
4. Johnson, G.L., 1985. Wind Energy Systems, Practice-Hall, Madison University, Wisconsin, 360 pp.
5. Kalmikov, A., 2017. Wind power fundamentals, pp. 17-30. *In: Wind Energy Engineering: A Handbook For Onshore A Offshore Wind Turbines* (Eds. T. M. Letcher). Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
6. Tong, W., 2010. Fundamentals of wind energy, pp. 3-42. *In: Wind power generation and wind turbine design*, (Eds. W. Tong). WIT Press, Virginia.
7. Ragheb, M., Wind Turbine Technology, pp. 127-142. *In: Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines* (Eds. T. M. Letcher). Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
8. Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., Krishna, V. H. 2016. A review on small scale wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 56, 1351-1371.
9. Özgener, Ö. 2002. Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı. **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 4(3), 159-173.

10. Eriksson, S., Bernhoff, H., Leijon, M. 2008. Evaluation of different turbine concepts for wind power. **Renewable and sustainable energy reviews**, 12(5), 1419-1434.
11. Dismukes, J. P., Miller, L. K., Solocha, A., Jagani, S., Bers, J. A. 2007. Wind energy electrical power generation: industrial life cycle of a radical innovation. In *PICMET'07-2007 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology* (pp. 773-785). IEEE.
12. https://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgâr_türbini (Erişim Tarihi: 3 Kasım 2021)
13. Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. 2009. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
14. Elibüyük, U., Üçgül, İ. 2014. Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri. **SDÜ Yekarum e-Dergi**, 2(3), 1-14.
15. Durak, M., Özer, S. 2008. Rüzgâr enerjisi teori ve uygulama. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği, Ankara.
16. Durdyev, S., 2010. Rüzgâr Enerjisinde Uygun Türbin Seçimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
17. Erişik E. 2014. “Üç Kanatlı Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Kanat Yapısının İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Mühendisliği Uygulamaları-II, Ankara, 121 s.
18. Potuk, K.B., Ataş P., Rüzgâr türbini kanat tasarımı ve analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Projesi, İzmir, 2012.
19. Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. 2001. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
20. Karık, F., Sözen, A., İskender, Ü. 2015. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisinde Mevcut Durum. **Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)**, 1(2), 219-233.
21. Global Wind Report, 2021. <https://gwec.net/global-wind-report-2021/> (Erişim Tarihi: 17 Mayıs 2021)

22. “2021 Küresel Rüzgâr Raporu”, 2021. <https://www.dunyaenerji.org.tr/2021-kuresel-ruzgar-raporu/> (Erişim Tarihi: 3 Kasım 2021)
23. Çalışkan, M., 2018. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Yenilenebilir Enerji Kaynakları Şubesi Raporu, Ankara, ss. 1–25.
24. Şenel, M.C., Koç E., 2015. Dünyada ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi durumu-Genel değerlendirme. **Mühendis ve Makina**, 56(663), 46-56.
25. Türkiye Rüzgâr Enerji Potansiyeli. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (Erişim tarihi: 5 Kasım 2021)
26. Cabestany, J., Prieto, A., Sandoval, F. (Eds.). 2005. *Computational Intelligence and Bioinspired Systems: 8th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, IWANN 2005, Vilanova i la Geltrú, Barcelona, Spain, June 8-10, 2005, Proceedings* (Vol. 3512). Springer.
27. Biomimicry Definition: What Is It, Examples And Areas Of Application. <https://youmatter.world/en/definition/definitions-what-is-biomimicry-definition-examples/> (Erişim tarihi: Kasım 2021)
28. Cognet, V., Courrech du Pont, S., Dobrev, I., Massouh, F., Thiria, B. 2017. Bioinspired turbine blades offer new perspectives for wind energy. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 473(2198), 20160726.
29. Fish, F. E., Weber, P. W., Murray, M. M., Howle, L. E. 2011. The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology. 51 (1), 203–213, doi: 10.1093/icb/icr016.
30. Yen, S. C., Liu, W. S., San, K. C., Wang, W. F. 2021. Design of wind-turbine blades for improving aerodynamic performance using hybrid blades. **Ocean Engineering**, 2(227), 108889.
31. Herrera, C., Correa, M., Villada, V., Vanegas, J. D., García, J. G., Nieto-Londoño, C., Sierra-Pérez, J. 2019. Structural design and manufacturing process of a low scale bio-inspired wind turbine blades. **Composite Structures**, 208, 1-12.

32. Chu, Y. J., Chong, W. T. 2017. A biomimetic wind turbine inspired by *Dryobalanops aromatica* seed: Numerical prediction of rigid rotor blade performance with OpenFOAM®. **Computers & Fluids**, **159**, 295-315.
33. Seidel, C., Jayaram, S., Kunkel, L., Mackowski, A. 2017. Structural analysis of biologically inspired small wind turbine blades. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, **12**(1), 1-9.
34. Asl, H.A., Monfared, R.K., Rad, M. 2017. Experimental investigation of blade number and design effects for a ducted wind turbine. **Renewable Energy**, **105**, 334-343.
35. Akansu, S. O., Dağdevir, T., Kahraman, N. 2017. Numerical Investigation of the Effect of Blade Airfoils on a Vertical Axis Wind Turbine. **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, **38**(1), 115-125.
36. Oerlemans, S., Fisher, M., Maeder, T., Kögler, K. 2009. Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations. **AIAA journal**, **47**(6), 1470-1481.
37. Jaworski, J.W., Peake, N. 2013. Aerodynamic noise from a poroelastic edge with implications for the silent flight of owls. *Journal of Fluid Mechanics*, **723**, 456-479.
38. Ikeda, T., Tanaka, H., Yoshimura, R., Noda, R., Fujii, T., Liu, H. 2018. A robust biomimetic blade design for micro wind turbines. *Renewable Energy*, **125**, 155-165.
39. G. Wright, "Bio-inspired Wind Turbine Blade Profile Design", The Faculty of Alfred University Doctoral dissertation, 2017
40. Johansen, J., Sørensen, N. N. 2007. Numerical analysis of winglets on wind turbine blades using CFD. In *European Wind Energy Congress*. Milano: EWEA.
41. Dinç H., Yalçın H., (Ed.), 2021. *6.Uluslararası GAP Matematik- Mühendislik-Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi*. İksad Publications.

42. T-490 Hava Tüneli. <http://argemsan.com/urun/t-490-hava-tuneli-egitim-seti/> (Erişim tarihi: 5 Kasım 2021)
43. Schubel, Peter J., and Richard J. Crossley. "Wind turbine blade design." *Energies* 5.9 , 2012: 3425-3449.
44. Gasch, R.; Tvele, J. *Wind Power Plants*; Solarpraxis: Berlin, Germany, 2002.
45. Duquette, M.M.; Visser, K.D. Numerical implications of solidity and blade number on rotor performance of horizontal-axis wind turbines. *J. Sol. Energy Eng.-Trans. ASME* **2003**, 125, 425–432.
46. Hau, E. *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd ed.; Springer:Berlin, Germany, 2006.
47. Dominy, R.; Lunt, P.; Bickerdyke, A.; Dominy, J. Self-starting capability of a darrieus turbine.*Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy* **2007**, 221, 111–120.
48. Chattot, J.J. Optimization of wind turbines using helicoidal vortex model. *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME* **2003**, 125, 418–424.
49. Uzun M., Çoban, S. 2021. Aerodynamic Performance Improvement with Morphing Winglet Design. **Journal of Aviation**, 5(1), 16-21.
50. Gaunaa, M., Johansen, J. 2007. Determination of the maximum aerodynamic efficiency of wind turbine rotors with winglets. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 75, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
51. Zhang, T.T., Elsakka, M., Huang, W., Wang, Z.G., Ingham, D.B., Ma, L., Pourkashanian, M. 2019. Winglet design for vertical axis wind turbines based on a design of experiment and CFD approach. **Energy Conversion and Management**, **195**, 712-726.
52. Özdemir, M., Uzun, M., Yıldırım, Ç. V., 2021. Biyomimetik Yatay Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Deneysel İncelenmesi, 334-342. 6. *International Gap Mathematics -Engineering-Science and Health Sciences Congress*, June 26-27, 2021, Şanlıurfa.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Mustafa Özdemir

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık A.B.D.	-
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde-Motor	2017
Lise	Sema Yazar Anadolu Lisesi, Kayseri	2012

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019-Halen	Fırat Üniversitesi / Sivil Havacılık Yüksekokulu	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

- Özdemir, M., Yıldırım, Ç. V., Uzun, M., Çoban, S., (2021), Biyomimetik rüzgâr türbinleri: bir derleme, 176-194. *2nd International Conference On Access To Recent Advances In Engineering And Digitalization*, March 10-11, 2021, Kayseri.
- Özdemir, M., Uzun, M., Yıldırım, Ç. V., (2021), Biyomimetik Yatay Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Deneysel İncelenmesi, 334-342. *6. International Gap Mathematics-Engineering-Science And Health Sciences Congress*, June 26-27, 2021, Şanlıurfa.