



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIM VE
SAYISAL ANALİZİ**

Doktora Tezi

Kadir KAYA

Danışman
Prof. Dr. Erdem KOÇ

SAMSUN
2021

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**



**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIM VE
SAYISAL ANALİZİ**

Doktora Tezi

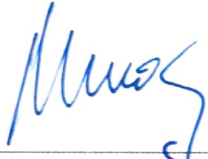




Kadir KAYA

Danışman
Prof. Dr. Erdem KOÇ

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Kadir KAYA tarafından, Prof. Dr. Erdem KOÇ danışmanlığında hazırlanan "Küçük Ölçekli Rüzgar Türbin Kanadı Tasarım ve Sayısal Analizi" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 12.3.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı	Adı Soyadı	Üniversitesi	Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan (Danışman)	Prof. Dr. Erdem KOÇ	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Makina Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Naci KURGAN	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Makina Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Bilal SUNGUR	Samsun Üniversitesi	Makina Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPUSUZ	Sinop Üniversitesi	Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

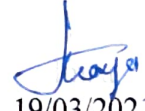
ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım yüksek lisans/doktora/sanatta yeterlik tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.



19/03/2021

Kadir KAYA

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Küçük Ölçekli Rüzgar Türbin Kanadı Tasarım ve Sayısal Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 18.01.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 6

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.



19/03/2021

Prof. Dr. Erdem KOÇ

ÖZET

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIM VE SAYISAL ANALİZİ

Kadir KAYA

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Mart/2021

Danışman: Prof. Dr. Erdem KOÇ

Ülkeler, artan nüfus, refah seviyelerinin yükselmesi ve teknolojik gelişmeler nedeniyle artan enerji talebini yeryüzüne zarar vermeden, sürdürülebilir bir şekilde karşılamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbinlerinde enerji üretim zincirinin ilk halkası olan kanadın tasarımı aerodinamik ve mekanik açıdan ele alınmıştır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerine ait 1 m uzunluğundaki kanadın aerodinamik ve mekanik tasarımı ile kanadın aerodinamik performans analizleri ve mekanik davranış analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan aerodinamik tasarım ve aerodinamik performans analizi çalışmalarında Düzeltilmiş Kanat Elemanı Momentum Teorisi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden; mekanik tasarım ve mekanik davranış analizi çalışmalarında ise küçük ölçekli rüzgar türbinleri için Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından geliştirilen IEC 61400-2 standardı ve Sonlu Elemanlar Metodu'ndan yararlanılmıştır.

Bu çalışmada ayrıca optimizasyon işlemleri de yapılmış olup düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayan, anma gücü yüksek, gerekli mekanik dayanıma sahip, hafif, kanat geometrisine ait tasarım parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra söz konusu parametreler kullanılarak kanat modeli oluşturulmuş ve kanadın aerodinamik performansı ve mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Rüzgar türbini, Kanat, Aerodinamik tasarım ve performans analizi, Mekanik tasarım ve davranış analizi, Optimizasyon.

ABSTRACT

DESIGN AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE SMALL SCALE WIND TURBINE BLADE

Kadir KAYA

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

PhD, March/2021

Supervisor: Prof. Dr. Erdem KOÇ

Due to the increasing population, rising welfare level and technological developments. Countries tend to use renewable energy sources in order to meet the increasing energy demand sustainably without harming the earth. Wind turbines are used to benefit from wind energy, one of the most important renewable energy sources.

In this study, the design of the blade, which is the first component of the energy generation chain in horizontal axis wind turbines, is discussed in terms of aerodynamical and mechanical aspects. Aerodynamic and mechanical design of the blade whose length is 1 m belonging to the horizontal axis wind turbines and the aerodynamic performance analysis and mechanical behavior analysis of the blade have been performed.

In the aerodynamic design and performance analysis studies, Blade Element Momentum Theory Improved and Computational Fluid Dynamics; In the mechanical design and mechanical behavior analysis studies, the IEC 61400-2 standard developed by the International Electrotechnical Commission (IEC) for small-scale wind turbines and the Finite Element Method have been used.

In this study, the design parameters of the blade geometry have been determined for the turbine which have low cut-in wind speed, high rated power and light while providing the essential mechanical strength by using aerodynamical and mechanical optimization procedures. Then, the blade model have been created and the aerodynamic performance and mechanical behavior of the blade have been evaluated with help of these parameters,

Keywords: Wind turbine, Blade, Aerodynamic design and performance analysis, Mechanical design and behavioural analysis, Optimization.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimi ve tez çalışma sürecimde bilgi, birikim ve tecrübelerinden faydalanma imkanı bulduğum, akademik çalışma hayatına başlamama vesile olan, bana bilimsel çalışmayı öğreten, beni yetiştiren, akademik görevlerine rağmen zaman ayırarak bu değerli çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan sayın danışmanım Prof. Dr. Erdem KOÇ'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Değerli zamanlarından ayırarak tezimi değerlendiren jüri üyesi sayın Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL'e, Doç. Dr. Naci KURGAN'a, Dr. Öğretim Üyesi Bilal SUNGUR'a ve Dr. Öğretim Üyesi Murat KAPUSUZ'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Lisans ve Lisansüstü eğitimim boyunca yoğun akademik ve idari görevlerine rağmen bana zaman ayıran, her daim destek olan, beni yönlendiren Sayın Prof. Dr. Recep GÜNEŞ'e saygılarımla teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca her türlü yardım ve desteğini her zaman hissettiğim sayın Doç. Dr. Mehmet DÖRDÜNCÜ'ye saygılarımla teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca her türlü yardım ve desteği esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Kürşat GÜLTEKİN'e, Öğr. Gör. Oğuz Emre KURAL'a, Arş. Gör. Erkan ÖZTÜRK'e, Arş. Gör. Çağlar Sevim'e, Dr. Ahmed Elnour'a, Ali İhsan YOĞURT'a, Onur Çınar'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak her zaman desteklerini hissettiğim, varlıklarından güç aldığım, babam Mustafa KAYA'ya, annem Gülcan KAYA'ya, kardeşim Merve ŞAN'a ve bütün aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte, her daim sabırla yanımda olan, hayata farklı gözle bakabilmemi sağlayan ve varlığıyla bana güç veren sevgili eşim Dudu KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, kısacık ömründe hayata tutunma mücadelesiyle, azmiyle, direnciyle bize birçok şey öğreten kızım Zeynep Vera KAYA'ya sonsuz şükranlarımı sunarım

Mart 2021

Kadir KAYA

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Çalışmanın Amacı	3
1.3. Tez Düzeni.....	3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Rüzgar Türbinleri ve Kanat Teknolojisi ile İlgili Çalışmalar.....	5
2.2. Kanat Tasarımıyla İlgili Çalışmalar	6
2.3. Kanat Aerodinamik Performansı ile İlgili Çalışmalar	7
2.4. Kanat Mekanik Davranışıyla İlgili Çalışmalar	9
2.5. Kanadın Optimizasyonu ile İlgili Çalışmalar	11
3. ENERJİ VE ÇEŞİTLERİ	17
3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Rüzgar Enerjisi.....	18
3.2. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	22
4. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	30
4.1 Rüzgar Türbinleri ve Çalışma Prensipleri	31
4.2 Rüzgar Türbin Çeşitleri veya Sınıflandırılması.....	33
4.2.1 Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri	33
4.2.2 Rotor büyüklüğüne göre rüzgar türbinleri	37
4.2.3 Rüzgar alışı yönüne göre rüzgar türbinleri	38
4.2.4 Rüzgar hızına göre rüzgar türbinleri	39
4.2.5 Güç kontrol sistemine göre rüzgar türbinleri	40
4.2.6 Rotor dönüş hızına göre rüzgar türbinleri	42
4.2.7 Kullanım yerine göre rüzgar türbinleri	42
4.3 Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Elemanları.....	42
4.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Kanatları	46
4.4.1 Kanat yapısı ve malzeme.....	46
4.4.2. Kanat imalatı	52
5. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIM VE OPTİMİZASYONU	53
5.1. Kanadın Aerodinamik Tasarımı	55
5.1.1. Temel Aerodinamik Tasarım Parametreleri.....	55
5.1.2. Aerodinamik Teoriler ve Yaklaşımlar	65
5.1.2.1. Bir Boyutlu (Lineer) Momentum Teorisi.....	65
5.1.2.2. Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi	67
5.1.2.3. Kanat Elemanı Teorisi	68

5.1.2.4. Kanat Elemanı Momentum Teorisi	71
5.1.2.4. Kanat Elemanı Momentum Teorisi Düzeltme	73
5.1.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğiyle Akış Analizi	81
5.1.4. Kanadın Aerodinamik Tasarım Adımları	90
5.2. Kanadın Mekanik Tasarımı	92
5.2.1. Temel Mekanik Tasarım Parametreleri	92
5.2.1.1. Kanada Etki Eden Yükler	92
5.2.1.2. Rüzgar Türbin Kanadının Zorlanma Halleri ve Gerilmeler	96
5.2.2. IEC 61400-2 Standartına Göre Kanadın Tasarımı	97
5.2.3.1. Küçük Ölçekli Rüzgar Türbini İçin Basit Yük Modeli	98
5.2.3.2. Eşdeğer Gerilmeler ve Emniyet Katsayıları.....	105
5.2.3.3. IEC 61400-2 Standardına Göre Tasarım Kontrolü.....	107
5.3. Kanadın Performans Analizleri	108
5.3.1. Aerodinamik Performans Analizleri.....	108
5.3.1.1. KEM Teorisi ile Kanadın Aerodinamik Performansının İncelenmesi	109
5.3.1.2. HAD ile Kanadı Oluşturan Aerofoil Kesitlerin ve Kanadın Etrafındaki Akışın İncelenmesi	113
5.3.2. Kanadın Mekanik Davranışının Değerlendirilmesi	127
5.3.2.1. Qblade Yazılımıyla Kanadın Mekanik Davranışının Değerlendirilmesi	127
5.3.2.2. Akışkan-Yapı Etkileşimi Analizleriyle Kanadın Mekanik Davranışının Değerlendirilmesi	129
5.4. Kanadın Optimizasyonu	135
5.4.1. Optimizasyon ve Temel Optimizasyon Parametreleri	135
5.4.2. Kanadın Aerodinamik Kriterlere Göre Optimizasyonu	137
5.4.3. Kanadın Mekanik Davranışına Göre Optimizasyonu	139
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	141
6.1. Kanadın Aerodinamik Tasarımı	141
6.2. Qblade Yazılımıyla Kanadın Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi	142
6.3. Kanadın Aerodinamik Kriterlere Göre Optimizasyonu	145
6.4. Kanadın Mekanik Tasarımı	148
6.5. HAD ile Kanadın Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi	151
6.5.1. Aerofoilin Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi.....	151
6.5.2. Kanadın Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi	163
6.6. Kanadın Mekanik Davranış Analizi ve Optimizasyonu.....	182
6.7. IEC 61400-2 Standardına Göre Kanadın Tasarım Doğrulaması.....	188
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	191
KAYNAKLAR.....	196

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Simge	Açıklama	Birim
Ue50	50 yıllık en yüksek rüzgar hızı	[m/s]
λ_{e50}	50 yıllık en yüksek rüzgar hızı için uç-hız oranı	[-]
a'	Açısal indükasyon faktörü	[-]
c	Aerofoil profil kiriş hattı uzunluğu	[m]
Vrel	Aerofoile etki eden izafi rüzgar hızı	[m/s]
r	Aerofoilin kanat üzerindeki konumu	[m]
\emptyset	akış açısı	[o]
Γ_B	B sayıda kanada sahip rotor sirkülasyonu	[-]
\bar{m}	Birim kanat kesit kütlesi	[kg/m]
a	Eksenel indükasyon faktörü	[-]
η	Elektriksel ve mekanik verim	
dTB	Elementer İtke Kuvveti	[N]
dL	Elementer Kaldırma Kuvveti	[N]
dFN	Elementer Normal Kuvvet	[N]
dD	Elementer Sürüklenme Kuvveti	[N]
dFT	Elementer Teğetsel Kuvvet	[N]
dQB	Elementer Tork	[Nm]
$\sigma_{\text{eş}}$	Eşdeğer gerilme	[N/m ²]
ΔM_{yk}	Flapwise momenti	[Nm]
Ntekrar	Gerilme için yük tekrar sayısı	
F(r)	Glauert Kök Kayıp Düzeltmesi	[N]
FT(r)	Glauert Uç kayıp düzeltmesi	[N]
N	Güç	[Watt]
CN	Güç katsayısı	[-]
ρ	Hava yoğunluğu	[kg/m ³]
α	Hücum açısı	[o]
Vref	IEC 61400-2 Standardına göre ortalama rüzgar hızı	[m/s]
Vmaks50	IEC 61400-2 Standardına göre referans rüzgar hızı	[m/s]
Vtasarım	IEC 61400-2 Standardına göre tasarım rüzgar hızı	[m/s]
Uf	IEC 61400-2 Standardında Yükleme Durumuna göre Kısmi Emniyet Katsayı	[-]
Cf	IEC 61400-2 standartına göre yükleme durumu H için kullanılan kuvvet katsayısı	[-]
CT	İtke katsayısı	[-]
F	İtke Kuvveti	[N]
U	İzafi rüzgar hızı	[m/s]
FL	Kaldırma kuvveti	[N]
CL	Kaldırma kuvveti katsayısı	[-]
Llt	Kaldırma noktası ile kule yüksekliği arasındaki mesafe	[m]

mkaldırma	Kaldırma noktası ile kule yüksekliği arasındaki mesafede bulunan kule kütlesi	[kg]
Aizdüşüm	Kanadın izdüşüm alanına	[m ²]
Rkm	Kanadın kütle merkezinin yarıçapı	[m]
R	Kanadın rotor yarıçapı	[m]
A	Kanadın süpürme alanı	[m ²]
V4	Kanadın yeterince arkasındaki rüzgâr hızı	[m/s]
V1	Kanadın yeterince önündeki rüzgâr hızı	[m/s]
P4	Kanadın yeterince arkasındaki statik basınç	[Pa]
P1	Kanadın yeterince önündeki statik basınç	[Pa]
ω	Kanat açısal hızı	[rad/s]
θ	Kanat azimuth açısı	[o]
φ	Kanat bağlama açısı	[o]
V3	Kanat çıkışındaki rüzgâr hızı	[m/s]
P2	Kanat girişindeki statik basınç	[Pa]
P3	Kanat çıkışındaki statik basınç	[Pa]
\aleph	Kanat eğim açısı	[o]
V2	kanat girişindeki rüzgâr hızı	[m/s]
r	Kanat istasyon noktasının konumu	[m]
m	Kanat kütlesi	[kg]
Mk	Kanat kütlesi	[kg]
Vuç	Kanat uç hızı	[m/s]
R	Kanat yarıçapı	[m]
NR	Kanatlar tarafından rüzgârdan alınan güç	[Watt]
σ	Katılık oranı	[-]
β	Koniklik açısı	[o]
ΔM_{xk}	Lead-lag momenti	[Nm]
CNmax	maksimum güç katsayısı	[-]
Cl,maks	Maksimum kaldırma kuvveti katsayısı	[-]
$\omega_{yaw,maks}$	Maksimum Yaw Oranı,	[rad/s]
$\sigma_{Akma,}$	Malzeme akma dayanımı	[N/m ²]
Um	Malzeme Karakterizasyonu İçin Kısmi Emniyet Faktörleri	[-]
ΔF_{Zk}	Merkezkaç yükleri	[N]
σ_{em}	Müsaade edilebilir malzeme sınır mukavemeti	[N/m ²]
Re	Reynold sayısı	[-]
e_r	Rotor eksantrikliği	[m]
N	Rotor gücü	[Watt]
β	Rotor koniklik açısı	[o]
m_r	Rotor kütlesi	[kg]
L_{rk}	Rotor merkezi ile kanat arasındaki mesafe	[m]
N_0	Rüzgâr gücü	[Watt]
V	Rüzgar hızı	[m/s]
N	Rüzgârdan Alınan Güç	[Watt]
Γ_{∞}	sonsuz sayıda kanada sahip rotor sirkülasyonu	[-]
F_D	Sürüklenme kuvveti	[N]

C_D	Sürüklenme kuvveti katsayısı	[-]
$\omega_{n, \text{tasarım}}$	Tasarım açısal Hızı,	[rad/s]
$T_{\text{Tasarım}}$	Tasarım Şaft Torku (Momenti)	[Nm]
$\lambda_{\text{tasarım}}$	Tasarım uç-hız oranı	[-]
m_{kule}	Toplam kulenin toplam kütlesi	[kg]
T	Tork	[Nm]
C_T	Tork katsayısı	[-]
$N_{\text{tasarım}}$	Türbin gücü	[Watt]
R	Türbin yarıçapı	[m]
C_p	Türbinin güç katsayısı	
T_d	Türbinin tasarım ömrü	[s]
P_k	Türbülans üretim hızı	
λ	Uç-hız Oranı	[-]
g	Yerçekimi ivmesi	[kgm/s ²]
σ'	yerel katılık oranı	[-]
s_i	Yorulma tekrar yüklerinin gerilme seviyeleri	
$n_i,$	Yorulma yükü tekrar sayısı	

Kısaltmalar

Kısaltma	Açıklama
FSI	Akışkan Yapı Etkileşim (Fluid Structure Interface)
SLM	Basit Yük Modeli (Simple Load Model)
LES	Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation)
DNS	Doğrudan Numerik Simülasyon
DERT	Düşey Eksenli Rüzgar Türbini
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Teşkilatı
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HES	hidroelektrik santraller
JES	Jeotermal Enerji Santrali
RES	Rüzgar Enerjisi Santralleri
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı - ABD
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Enerji Kaynakları	17
Şekil 3.2. Seçilmiş Yıllarda Birincil Enerji Talep Miktarları	20
Şekil 3.3. OECD Ülkelerinde 2018 ve 2019 Yıllarında Elektrik Enerjisi Üretimi....	21
Şekil 3.4. Ülkelerin Karasal ve Denizüstü Rüzgar Santrali Kapasiteleri	25
Şekil 3.5. Türkiye'nin Rüzgar Santrali Kurulu Gücü	26
Şekil 3.6. Türkiye'de Rüzgar Santrallerinde Üretilen Elektrik Enerjisi	27
Şekil 4.1. Rüzgar Türbinleri.....	30
Şekil 4.2. Yatay eksenli rüzgar türbini temel elemanları ve alt elemanları	31
Şekil 4.3. Rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisi üretimi.....	32
Şekil 4.4. Rüzgar türbin boyutlarının yıllar içindeki değişimi.....	33
Şekil 4.5. Rüzgar türbinleri sınıflandırılması	33
Şekil 4.6. Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri.....	34
Şekil 4.7. Savanois düşey eksenli rüzgar türbini.....	34
Şekil 4.8. Darrieus düşey eksenli rüzgar türbini	35
Şekil 4.9. Yatay eksenli rüzgar türbinleri ve kaldırma kuvveti oluşumu.....	36
Şekil 4.10. Kanat sayısına göre yatay eksenli rüzgar türbinleri	37
Şekil 4.11. Küçük, orta ve büyük ölçekli rüzgar türbinleri	38
Şekil 4.12. Rüzgar alışı yönüne göre rüzgar türbinleri	39
Şekil 4.13. Aerofoilde Stall Olayı.....	41
Şekil 4.14. Pitch kontrol sistemiyle kanat hareketi	41
Şekil 4.15. Stall kontrollü ve pitch kontrollü türbinlerde güç eğrileri	41
Şekil 4.16. Yatay eksenli rüzgar türbinleri için farklı göbek elemanlar	43
Şekil 4.17. Rüzgar türbinlerinde kontrol mekanizmaları	45
Şekil 4.18. Rüzgar türbinlerinde kullanılan kule yapıları	46
Şekil 4.19. Yatay eksenli rüzgâr türbin kanadı, kanat bölgeleri	46
Şekil 4.20. Yatay eksenli rüzgar türbin kanadı ve bileşenleri.....	47
Şekil 4.21. Kanat aerodinamik formunu oluşturan profiller ve kaldırma kuvveti oluşumu	47
Şekil 4.22. Kanatta kullanılan giriş yapılar	49
Şekil 4.23. Yatay eksenli rüzgar türbini kanadı ve yapısı.....	50
Şekil 4.24. Kanadın imalatı.....	52
Şekil 5.1. Kanadın Aerodinamik ve Mekanik Tasarımı.....	53
Şekil 5.2. Viskoz ve Viskoz olmayan akış bölgeleri.....	56
Şekil 5.3. Laminer ve Türbülanslı Akış	57
Şekil 5.4. Tipik Bir Yatay Eksenli Üç Kanatlı Rüzgar Türbini ve Kanat	57
Şekil 5.5. Aerofoil ve Fiziksel Büyüklükleri	58
Şekil 5.6. Yatay Eksenli 3 Kanatlı Rüzgar Türbinleri İçin, Kanat ve Aerodinamik Tasarım Parametreleri	60
Şekil 5.7. Aerofoilde Aerodinamik Kuvvetlerin Oluşumu ve Aerofoilin Davranışı	61
Şekil 5.8. Kanat Uzunluğu Boyunca Aerofoilin Açısız Konumunun Değişimi	61
Şekil 5.9. Rüzgar Türbinlerinde Uç-Hız Oranı	62
Şekil 5.10. Kanat Sayısı ve Uç-Hız Oranına Göre Farklı Kanat Geometrileri	64
Şekil 5.11. Bir Boyutlu Lineer Momentum Teorisi için Disk Modeli	65
Şekil 5.12. Dönen Disk Modeli İçin Momentum Teorisi İçin Geliştirilen Model....	67
Şekil 5.13. Kanat Elemanı Teorisine Göre Kanatta Oluşan Kuvvet ve Momentler	69
Şekil 5.14. Kanat Elemanı Teorisine Göre Kanat Kesitinde Oluşturulan Kuvvet ve Momentler	69
Şekil 5.15. Kanat Elemanı Teorisine Göre Kanatta Oluşan Kuvvetler	70

Şekil 5.16. Kanat İç Kısımlardaki Kesitlerinde Coriolis Kuvvetinin Sınır Tabaka Kaldırma Dinamikleri Üzerindeki Etkisi.	79
Şekil 5.17. Kanat Kök ve Uç Kısımına Etki Eden Coriolis Kuvvetleri ve Yönleri ...	79
Şekil 5.18. Santrifüj Pompalamanın (Centrifugal Pumping) Dönen Bir Rüzgar Türbini Kanadı Üzerindeki Etkisi	80
Şekil 5.19. Akış Analizi İçin Tanımlanan Bölgeler	82
Şekil 5.20. Türbülanslı Akışı Modellemek İçin Kullanılan Yaklaşımlar	84
Şekil 5.21. 3 Boyutlu Türbülans girdapları	84
Şekil 5.22. Büyük Türbülans Simülasyonu ile türbülans simülasyonları	85
Şekil 5.23. Özel Türbülans Modelleriyle Türbülans girdapları	86
Şekil 5.24. RANS Tabanlı Modeller	86
Şekil 5.25. Kanat koordinat sistemi	93
Şekil 5.26. Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden kuvvetler.....	94
Şekil 5.27. Kanat azimuth, koniklik ve eğim açıları	95
Şekil 5.28. Aerodinamik yüklerden kaynaklanan kanat eğilmesi	96
Şekil 5.29. Yerçekimi yüklerinden kaynaklanan kanat eğilmesi	97
Şekil 5.30. Qblade HAWT rotor blade modülü ve kanat modelinin oluşturulması.	110
Şekil 5.31. Qblade Rotor BEM Simulation modülüyle C_p ve elde edilebilecek güç büyüklüklerinin belirlenmesi.....	110
Şekil 5.32. Qblade Multi Parameter Simulation modülüyle elde edilebilecek güç büyüklüklerinin belirlenmesi.....	111
Şekil 5.33. Turbine BEM Simulation modülüyle kanattan elde edilebilecek 1 yıllık enerji miktarının belirlenmesi	112
Şekil 5.34. Kanatta Kullanılan Aerofoiller	114
Şekil 5.35. Aerofoillerin Aerodinamik Performansının Değerlendirilme İşlemleri	114
Şekil 5.36. Akış Analizi İçin Oluşturulan Aerofoil ve Akış Ortamı Modeli	115
Şekil 5.37. Akış Analizi İçin aerofoil etrafında oluşturulan ağ yapısı	115
Şekil 5.38. Oluşturulan Ağ Yapılarının Skewness Parametreleri	116
Şekil 5.39. Oluşturulan Ağ Yapılarının Orthogonal Quality Parametreleri.....	116
Şekil 5.40. Aerofoilin akış analizi için kullanılan türbülans modelleri.....	117
Şekil 5.41. Akış analizinde kullanılacak akışkan türü	117
Şekil 5.42. Analiz İçin Tanımlanan Sınır Koşulları	118
Şekil 5.43. Kanadın Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi İşlemleri	119
Şekil 5.44. Kanat Katı Modeli.....	120
Şekil 5.45. Akış Ortamı Katı Modeli	121
Şekil 5.46. Fluent Yazılımında Oluşturulan Farklı Ağ Yapıları	122
Şekil 5.47. HAD'da Ağ Yapısının Kalitesinin Belirlenmesinde Kullanılan Parametreler	122
Şekil 5.48. Oluşturulan Ağ Yapısının Özellikleri	124
Şekil 5.49. Problemin Çözümü İçin Tanımlanan Sınır Koşulları	126
Şekil 5.50. Farklı Kesitler İçin Tanımlanan Tasarım Değişkenleri	135
Şekil 5.51. Bir Ankastre Kirişin Tasarım Optimizasyonu Parametreleri	136
Şekil 5.52. Optimizasyon için seçilen aerodinamik tasarım parametreleri	137
Şekil 6.1. Kanat katı modeli.....	142
Şekil 6.2. Belirlenen farklı tasarım durumları için güç katsayısı ve uç-hız oranı değişimi	143
Şekil 6.3. Belirlenen farklı tasarım durumları için güç ve rüzgar hızı değişimi	144
Şekil 6.4. Farklı türbülans modellerine göre S833 aerofoilin etrafında oluşan basınç dağılımları	152

Şekil 6.5. Farklı türbülans modellerine göre S834 aerofoilinin etrafında oluşan basınç dağılımları	154
Şekil 6.6. Farklı türbülans modellerine göre S835 aerofoilinin etrafında oluşan basınç dağılımları	156
Şekil 6.7. Farklı türbülans modellerine göre S833 aerofoilinin etrafında oluşan rüzgar hızları	158
Şekil 6.8. Farklı türbülans modellerine göre S834 aerofoilinin etrafında oluşan rüzgar hızları.....	159
Şekil 6.9. Farklı türbülans modellerine göre S835 aerofoilinin etrafında oluşan rüzgar hızları.....	160
Şekil 6.10. S833 airfoilinin farklı türbülans modellerin göre basınç katsayısı	161
Şekil 6.11. S834 airfoilinin farklı türbülans modellerin göre basınç katsayısı	162
Şekil 6.12. S835 airfoilinin farklı türbülans modellerin göre basınç katsayısı	163
Şekil 6.13. 30 m/s'lik Rüzgar Hızında Kanadın Etrafında Oluşan Hız Dağılımı	164
Şekil 6.14. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.1$ kesiti etrafındaki hız dağılımları	166
Şekil 6.15. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.2$ kesiti etrafındaki hız dağılımları	167
Şekil 6.16. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.5$ kesiti etrafındaki hız dağılımları	169
Şekil 6.17. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.75$ kesiti etrafındaki hız dağılımları ..	170
Şekil 6.18. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.95$ kesiti etrafındaki hız dağılımları ...	171
Şekil 6.19. 30 m/s'lik Rüzgar Hızında Kanat Yüzeyinde Etki Eden Basınç Dağılımı	173
Şekil 6. 20. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.1$ kesitine etki eden basınçlar	175
Şekil 6.21. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.2$ kesitine etki eden basınçlar	177
Şekil 6. 22. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.5$ kesitine etki eden basınçlar	178
Şekil 6.23. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.75$ kesitine etki eden basınçlar	179
Şekil 6.24. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.95$ kesitine etki eden basınçlar	180
Şekil 6.25. Response Surface Optimization işlemiyle belirlenen kanadın optimum tasarım parametreleri.....	184
Şekil 6.26. Maksimum zorlanma koşullarında kanadın toplam şekil değişimi.....	185
Şekil 6.27. Kanatta oluşan normal gerilmeler.....	185
Şekil 6.28. Kanatta oluşan kayma gerilmeleri	186
Şekil 6.29. Kanatta oluşan eşdeğer gerilmeler (Von Mises).....	187
Şekil 6.30. Maksimum zorlanma durumunda kanadın Tsa-i Wu kırılma endeksileri	187

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Kurulu Güçleri.....	21
Çizelge 3.2. Seçilmiş Yıllarda Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü Yüksek olan Ülkeler..	23
Çizelge 3.3. Ülkelerin Denizüstü (Offshore) Rüzgar Türbin Kapasiteleri.....	24
Çizelge 3.4. Dünyada Mevcut Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü ve Gelecek Tahminleri	28
Çizelge 3.5. Çeşitli Ekonomik Parametrelerle Rüzgar Enerji.....	29
Çizelge 4.1. Rotor büyüklüğüne göre rüzgar türbinleri	38
Çizelge 4.2. Kanatta Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	51
Çizelge 5.1. NREL Tarafından Rüzgar Türbinleri İçin Geliştirilen Aerofoiller	59
Çizelge 5.2. Uç-Hız Oranı (λ) Seçiminin Rüzgar Türbin Özelliklerine Etkisi	63
Çizelge 5.3. Basit Yük Modeli için Tasarım Yükleme Durumları	99
Çizelge 5.4. IEC Türbin Sınıfları	99
Çizelge 5.5. Yükleme Durumu H İçin Kuvvet Katsayıları (C_f)	104
Çizelge 5.6. IEC 61400-2 Standardına Göre Eşdeğer Gerilmeler	106
Çizelge 5.7. IEC 61400-2 Standardına Göre Kısmi Emniyet Katsayıları.....	106
Çizelge 5.8. IEC 61400-2 Standardına Göre Malzeme Karakterizasyonu İçin Kısmi Emniyet Faktörleri (U_m).....	106
Çizelge 5.9. Dedebuzağı Tepesindeki rüzgar hızlarına ait Weibull dağılımı parametreleri.....	112
Çizelge 5.10. Oluşturulan Ağ Yapılarının Yoğunluk ve Sıklık Parametreleri.....	123
Çizelge 5.11. Optimizasyon için seçilen aerodinamik tasarım parametreleri.....	138
Çizelge 6.1. 1 m'lik kanadın belirlenen aerodinamik tasarım parametreleri	141
Çizelge 6.2. Kanadın AEP 100'e en iyi aerodinamik performans göstergeleri	145
Çizelge 6.3. Kanadın AEP 0'a göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri ...	146
Çizelge 6.4. Kanadın AEP 50'ye göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri	146
Çizelge 6.5. AEP 60'a göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri.....	147
Çizelge 6.6. AEP 70'e göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri.....	147
Çizelge 6. 7. Kanadın mekanik tasarım parametrelerinin kanat performansına etkisi	149
Çizelge 6.8. Kanadın tasarım optimizasyonu için belirlenen tasarım noktaları.....	183
Çizelge 6.9. Kanat kompozit yapısı	184
Çizelge 6.10. Tasarım doğrulaması hesaplamaları için kullanılan parametreler	188
Çizelge 6.11. IEC 61400-2 standardına göre belirlenen kuvvet ve momentler	189
Çizelge 6.12. IEC 61400-2 standardına göre belirlenen gerilmeler.....	189

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

İş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan enerji evlerde, iş yerlerinde, eğitimde, sağlıkta, ulaşımda, sanayide kısacası hayatın her alanında yaygın bir şekilde kullanılan, vazgeçilmez bir olgu haline gelmiştir. Enerji üretiminde çeşitli kaynaklardan yararlanılmakta olup söz konusu kaynaklar kullanım sonunda tükenebilirlik ya da yenilenebilirlik durumuna göre yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal bir çevrim sürecinde aynen kalabilen, kullanılmasına rağmen azalmayan veya tükenmeyen kaynaklar **yenilenebilir enerji kaynakları**; bir kez kullanıldığında kendini yenileyemeyen kaynaklar ise **yenilenemez enerji kaynakları** olarak değerlendirilmektedir. Kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerji birer **yenilenemez enerji kaynakları** iken; hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi ve dalga enerjisi ise **yenilenebilir enerji kaynaklarıdır**.

Artan nüfus miktarı ve refah düzeyinin yükselmesi nedeniyle enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan **yenilenemez enerji kaynaklarının** çevreye verdiği zararlar nedeniyle ülkeler bu kaynakların yerini alacak **yenilenebilir enerji kaynaklarının** kullanımını için çalışmalar yürütmektedir. En önemli **yenilenebilir enerji kaynaklarından** birisi olan **rüzgar enerjisi**, güneş radyasyonunun yeryüzünü farklı ısıtmasından kaynaklanmakta olup rüzgar enerjisinden faydalanmak için rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinleri genel olarak kanatlar, gövde ve kule şeklinde 3 temel elemandan oluşan bir yapı ve gövde içerisinde bulunan dişli kutusu, düşük ve yüksek hızlı shaft, elektrik jeneratörü, kanat döndürme mekanizması, anemometre ve rüzgar gülü gibi çeşitli alt bileşenlerden meydana gelmektedir. Rüzgar enerji santrallerinin çalışma prensibi kinetik enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi döngüsüne dayanmaktadır. Rüzgar türbinlerinde rüzgarın kinetik enerjisi kanatlar yardımıyla alınıp mekanik enerjiye dönüştürülerek düşük hızlı shaft, dişli kutusu ve yüksek hızlı shaft üzerinden jeneratöre iletilmektedir. Jeneratör ise mekanik enerjiyi kullanarak elektrik enerjisi üretimi gerçekleştiren kısımdır.

Rüzgar türbinlerinde enerji üretim zincirinin ilk halkası kanattır. Günümüzde büyük boyutlarda kanatlar ve rüzgar türbinleri geliştirilerek rüzgarın enerjisinden daha fazla yararlanılmak istenilmektedir. Kanat, akışkan kaynaklı yüklemelere maruz kaldığından tasarımında akışkanlar mekaniği ve katı cisimler mekaniği konuları birlikte değerlendirmeye alınması gerekmektedir. Kanat rüzgarın enerjisinden en fazla yararlanmayı sağlayacak aerodinamik özelliklere ve kullanım sırasında maruz kalılabilecek farklı koşullar için gerekli dayanıma sahip olmalıdır. Bu nedenle kanat tasarımının aerodinamik ve mekanik açıdan ele alınması gerekmektedir.

Kanat genel olarak dış yapı veya kabuk yapı ve iç destek elemanlarından oluşmaktadır. Dış yapı kanadın dış geometrisini veya aerodinamik formunu oluşturmakta olup bu geometri rüzgarın enerjisinden en fazla yararlanılmayı sağlayacak en uygun geometri şeklindedir. Rüzgar türbinlerinin kullanım ömrü boyunca kanada etki edebilecek rüzgar kaynaklı aerodinamik yükler, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri, kanadın dönme hareketinden kaynaklanan santrifüj yükleri ve işletme koşullarından kaynaklanan çeşitli yüklerle maruz kaldıkları görülmektedir. Kanadın iç destek elemanları kanadın bu yüklerle karşı gerekli dayanıma sahip olmasını sağlamaktadır.

Kanadın dışı farklı büyüklüklerdeki dairesel kesitlere ve aerofoil olarak isimlendirilen özel aerodinamik kesitlere sahip düzgün olmayan geometrik bir yapıdır. Bu geometriyi karakterize eden aerofoillerin bulunduğu konumlar, aerofoillerin büyüklüğünü ifade eden profil giriş hattı uzunluğu veya veter boyları ve aerofoillerin açısız konumunu gösteren bağlama açısı veya hatve açısı gibi parametreler kanadın aerodinamik tasarım parametreleri olarak kabul edilmektedir. Kanadın dış yapısının ve iç destek elemanlarının boyutları da kanat uzunluğu boyunca değişmekte olup söz konusu boyutlar kanadın mekanik tasarım parametreleri olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatların tasarımına odaklanılmıştır. Tez çalışması kapsamında küçük boyutlu rüzgar türbinlerinde kullanılan kanadın aerodinamik ve mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kanadın özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla aerodinamik performansı ve mekanik davranışı incelenmiş, elde edilen sonuçlara göre de tasarım optimizasyonu yapılmıştır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Günümüzde farklı tip ve büyüklüklerde çeşitli rüzgar türbin tasarımları bulunmasına rağmen yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinleri yatay eksenli 3 kanatlı önden rüzgar alan sistemlerdir. Günümüzde rüzgar türbinlerinden üretilen enerjinin artırılması ve enerji üretim maliyetlerinin azaltılması istenilmektedir. Bu amaçla da büyük boyutlardaki kanatlar ve rüzgar türbinleri geliştirilerek üretilen enerji miktarının artırılması ve yatırım maliyetlerinin azaltılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada yatay eksenli 3 kanatlı rüzgar türbinlerinde kullanılan ve bu sistemlerde enerji üretim zincirinin ilk halkası olan kanat incelenmiştir. Bu tez çalışmasıyla kanadın tasarımı aerodinamik ve mekanik açıdan değerlendirilmiş olup 1 m boyundaki uygun aerodinamik ve mekanik özelliklere sahip kanadın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kanadın aerodinamik tasarımı için Kanat Elemanı (KE) Teorisi, Kanat Elemanı Momentum (KEM) Teorisi gibi çeşitli teoriler ve yaklaşımlardan yararlanılmıştır. Sonlu Hacimler Metodu (SHM) ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) gibi metodlardan yararlanılarak kanadın aerodinamik performansı (farklı rüzgar hızlarındaki kanattan elde edilebilecek güç miktarı, farklı rüzgar hızlarında kanat yüzeyinde oluşan basınçlar ve kanat etrafındaki rüzgar hızları) ve mekanik davranışı (kanatta oluşan şekil değişimleri veya deformasyonlar ve gerilmeler) incelenmiştir. Ayrıca kanadın aerodinamik performansı ve mekanik davranışı dikkate alınarak optimizasyon çalışması yürütülmüş ve kanat tasarımı iyileştirilmeye çalışılmıştır.

1.3. Tez Düzeni

Bu çalışma 8 bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın **ilk bölümünde** yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri ve rüzgar türbin kanatlarıyla ilgili genel bilgiler verilmiş olup çalışmanın amacı ve tez düzeni ele alınmıştır. **İkinci bölümde** rüzgar türbin kanatlarının tasarım ve optimizasyonu ile performans analizi ile ilgili önceki çalışmalar özetlenmiştir. **Üçüncü bölümde**, yenilenebilir enerji kaynakları ve rüzgar türbinlerinin dünya genelindeki ve Türkiye'deki durumuyla ilgili bilgiler verilerek konunun önemi vurgulanmıştır.

Dördüncü bölümde rüzgar türbinleri, rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi, tarihsel gelişimi, rüzgar türbin çeşitleri veya sınıflandırılması, rüzgar türbinlerini oluşturan elemanlar ve günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatlar ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde, kanadın tasarımı aerodinamik ve mekanik açıdan ele alınmıştır. Kanadın dış yapısını karakterize eden **aerodinamik tasarım parametreleri**, aerodinamik davranışın değerlendirilmesi için geliştirilmiş olan **Kanat Elemanı Teorisi, Kanat Elemanı Momentum Teorisi** gibi aerodinamik teoriler ve kanat aerodinamik tasarım metodolojisi kanadın **aerodinamik tasarımı** kısmında incelenmiştir. Kanadın dış yapısının ve iç destek elemanının boyutları olarak ifade edilen kanadın **mekanik tasarım parametreleri**; kanada etki eden yükler, kanadın zorlanma halleri ile kanatta oluşan gerilmeler ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission, IEC) IEC 61400-2 standartlarına göre **kanadın tasarım gereksinimleri** ile birlikte kanadın **mekanik tasarımı** kısmında değerlendirilmiştir. Bu kısımda ayrıca kanadın farklı rüzgar hızlarındaki **aerodinamik performansını** ve **mekanik davranışını** incelemek için kullanılan teori ve yaklaşımlar da verilmiştir. Bu kısımda son olarak kanadın **aerodinamik performansı** ve **mekanik davranışı** kullanılarak gerçekleştirilen **optimizasyon** çalışması da izah edilmiştir.

Yedinci bölümde tez çalışmasıyla gerçekleştirilen kanat tasarımı, aerodinamik performans analizleri, mekanik davranış analizleri ve kanadın optimizasyonu ile ilgili elde edilen temel bulguların yer aldığı **bulgular** ve **tartışma** kısmı yer almaktadır. **Sekizinci** ve son **bölüm** ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve konu ile ilgili önerilerin verildiği **sonuç** ve **öneriler** kısmından oluşmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Rüzgar türbinleri; Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Akışkanlar Mekaniği, Aerodinamik, Malzeme Bilgisi, Mukavemet, Makina Elemanları gibi alanları ilgilendirmektedir. Bu konuda birçok çalışma yapılmış olup bu kısımda seçilmiş çalışmalar 5 bölüme ayrılarak aşağıda sunulmuştur.

2.1. Rüzgar Türbinleri ve Kanat Teknolojisi ile İlgili Çalışmalar

(Veers vd., 2003), rüzgar enerjisi ile ilgili temel bilgilerin değerlendirildiği çalışmada rüzgarın oluşumu, rüzgardan enerji elde edilmesi, bu amaçla kullanılan rüzgar türbinleri, rüzgar türbinlerinin geçmişteki ve ilgili dönemdeki durumu, rüzgar türbin ekonomisi, günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin tasarım parametreleri (kanat sayısı, güç kontrol sistemi, enerji üretim ve iletim sistemi) ve çeşitli amaçlarla, farklı iklim koşullarında kullanılan rüzgar türbinleri hakkında bir derleme çalışması yapılmışlardır. Bu çalışmada, rüzgar türbin teknolojisindeki gelişmelerin rüzgar türbini kurulum maliyetlerini azalttığından, rüzgar santrallerinin fosil yakıtlı enerji üretim teknolojileri ile rekabet edebilir hale geldiğinin altı çizilmiştir.

(Darwish vd., 2020), rüzgar enerjisi sistemleri ve teknolojisi ile günümüzdeki gelişmeler ve gelecek beklentileri hakkında değerlendirme yapmışlardır. Günümüzde 289 milyar dolara ulaşan yenilenebilir enerji yatırımlarının, 1341 milyar dolar seviyesine yükseldiği belirtilen çalışmada söz konusu yatırımların fosil yakıtlar için yapılan yatırımları geride bıraktığı ifade edilmektedir. Ayrıca 2018 yılı itibariyle dünyada yenilenebilir enerji sektöründeki istihdamın 11 milyona ulaştığı belirtilmiştir. 2018 yılında 599 GW olan dünyadaki rüzgar enerji santrali kurulu gücünün 2019 yılında %7 artarak 645 GW'a yükseldiği de not edilmiştir. Bu çalışmada, 2030 yılında dünyadaki rüzgar enerjisi kurulu gücünün 2110 GW'a ulaşmasının ve toplam enerji santrali kurulu gücünün %20'sinin rüzgar santrallerinden oluşmasının beklendiği ifade edilmektedir. Bu durumun 2.4 milyon kişilik ek istihdam sağlayacağı 3.3 milyar ton CO₂ emisyonu azalışı anlamına geldiğinin de altı çizilmektedir. Bu çalışmada gelecekte deniz üstü rüzgar santrallerine daha fazla yönelimin beklendiği de vurgulanmıştır.

(Enevoldsen, 2019), büyük ticari rüzgar türbin teknolojisinin son 35 yıldaki gelişimi değerlendirilmiştir. Rüzgar türbini güç üretim kapasitesi, rotor boyutları, kule yüksekliği, türbinin çalışmaya başladığı rüzgar hızı ve en yüksek güç üretimi sağladığı rüzgar hızı şeklindeki parametrelerin 35 yıllık değişimi bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Yapılan çalışmada, son 35 yılda rüzgar türbinlerinde kule yüksekliği ve rotor boyutlarının yaklaşık iki

kat, rüzgar türbini güç üretim kapasitesinin ise yaklaşık 8 kat arttığı belirtilmektedir. Ayrıca rüzgar türbin teknolojisinin gelecekteki gelişimin ve rüzgar türbinleri (karasal ve denizüstü) boyutlarındaki artışın devam edeceğinin öngörüldüğü de not edilmektedir.

Günümüzde rüzgar türbin teknolojisindeki gelişim trendi türbin güç üretim kapasitesi, türbin boyutları ve kule yüksekliklerindeki artış şeklindedir. (McKenna, 2016), literatür çalışmaları, Avrupa'daki rüzgar enerjisi uzmanlarının görüşleri dikkate alınarak büyük ölçekli rüzgar türbin teknolojisindeki söz konusu gelişim sürecinde yaşanan zorlukları değerlendirmiştir. Bu çalışmada büyük ölçekli rüzgar türbinlerinin gelişiminde sosyal kabullenme, nakliye ve kurulum zorlukları, rüzgar enerjisi için ekonomik ve politik desteğin orta vadeli sürdürülebilirliği şeklinde sıkıntılar olduğunun altı çizilmiştir. Ayrıca rüzgar türbin boyutlarındaki artışla birlikte cam elyaf kompozitlerin yerine karbon elyaf kompozit malzemeye yönelme şeklinde bir durum olduğu, kulelerin yine çelik ve beton malzeme kullanılarak inşa edilmesinin beklendiği ifade edilmektedir.

2.2. Kanat Tasarımıyla İlgili Çalışmalar

(Habali ve Salah, 2000), küçük ölçekli rüzgar türbinleri için aerofoil seçimi ve kanadın aerodinamik tasarımı değerlendirilmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, 5m uzunluğundaki küçük ölçekli rüzgar türbin kanadının aerofoil seçimi ile aerodinamik tasarımı ve cam elyaf kompozit malzeme kullanılarak mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kanat 15 kW'lık bir rüzgar türbinine yerleştirilerek söz konusu kanadın çalışma koşullarının 10 katı büyüklüğündeki yüklemelere dayanabildiği, güç katsayısının ise 0.412 olduğu belirlenmiştir.

(Schubel vd., 2012), rüzgar türbin kanat tasarımı ile güncel durumun değerlendirildiği bir derleme yapmışlardır. Yapılan çalışmada rüzgar türbinlerinde kanat tasarımının mevcut durumunu ve günümüzde en yaygın kullanılan türbin çeşidi olan yatay eksenli rüzgar türbinleri ele alınmıştır. Modern yatay eksenli rüzgar türbinlerine ait aerodinamik tasarım prensipleri ve kanat tasarım yükleri gibi mekanik tasarım parametreleri detaylı olarak irdelenmiştir. Bu kapsamda gelecekte rüzgar türbin kanadı tasarımlarında boyutların büyümesi, yeni aerofoillerin ve uç geometrilerinin geliştirilmesi, tasarımlarda farklı malzemeler kullanılması gibi değişimlerin beklendiği de ifade edilmiştir.

Rüzgar türbin kanat teknolojisindeki genel gelişim trendi boyutlardaki büyüme ve tasarımda artan karmaşıklık şeklindedir. (Rasuo vd., 2014) çalışmasında yeni rüzgar türbin kanadı geliştirilme adımları, tasarım doğrulama amacıyla yapılan analizler ve testlerle ilgili bir derleme yapılmıştır. Bu amaçla kompozit malzemelerden yapılmış kanat için tasarım, üretim, rüzgar enerjisi standartları, mekanik davranış analizi için yapılan deneysel çalışmalar

değerlendirilmiştir. Kompozit kanadın statik ve dinamik analizi ile yorulma performansının incelenmesi için yapılan deneysel çalışma metodolojisi ve tasarım doğrulama için kullanılan IEC 61400 gibi belirlenen standartlara göre yapılan işlemler incelenmiştir.

(**Chaudhary ve Roy, 2015**), küçük ölçekli bir rüzgar türbin kanadının tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda uygun kanat sayısı, uç – hız oranı ve katılık oranına sahip kanat geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, kanadın aerodinamik performansının belirlenmesi amacıyla Kanat Elamanı Momentum Teorisi kullanılmış olup kök ve uç kayıpları, sürüklenme katsayısı ve türbin ardındaki iz bölgeleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmayla 3,5 ve 7 kanatlı rüzgar türbin tasarımı yapılmış olup söz konusu türbinlerin güç katsayıları sırasıyla 0.46, 0.5 ve 0.48 olarak belirlenmiştir.

(**Scappatici vd., 2016**), 1 m uzunluğundaki küçük ölçekli yatay eksenli bir rüzgar türbin kanadının tasarım, üretim ve doğrulama işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Kanadın mekanik davranışını incelemek için ANSYS yazılımı ve enjeksiyon kalıplama yazılımından yararlanmışlardır. Bu çalışma kapsamında tasarımı yapılan kanat üretilerek rüzgar tüneli testleri de gerçekleştirilmiştir. Rüzgar tüneli testleri sırasında kanadın mekanik davranışını değerlendirebilmek amacıyla kanat yüzeyine gerinim ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Bu çalışmada nümerik ve deneysel sonuçların birbirine yakın değerlerde olduğu tespit edilmiş olup kanadın laboratuvar ortamındaki tasarımından pazara sunulmasına kadarki süreçle ilgili bütünsel bir yöntem ortaya koymaktadırlar.

(**Suresh ve Rajakumar, 2020**), kırsal kesimlerde kullanılacak 2 kW kapasiteli, küçük ölçekli bir rüzgar türbin kanadının aerodinamik tasarımını yapmışlardır. Bu kapsamda, çeşitli aerofillerin aerodinamik performansı Qblade yazılımından yararlanılarak değerlendirilmiş ve tasarımı yapılacak kanat için en uygun aerofoilin SD 7080 olduğu belirlenmiştir.

2.3. Kanat Aerodinamik Performansı ile İlgili Çalışmalar

(**Villalpando vd., 2011**), NACA 63-415 aerofoilin farklı hücum açılarındaki aerodinamik performansını incelemişlerdir. Bu amaçla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı olan Fluent'den yararlanılarak farklı türbülans modellerine (S-A, RNG k- ϵ , SST k- ω ve REM türbülans modelleri) göre kanadın aerodinamik performansı değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda aerofoilin aerodinamik performans analizi için en uygun türbülans modelinin SST k- ω olduğu belirlenmiştir.

(**Papadakis vd., 2014**), hücum kenarı düzleştirilmiş eliptik şekilli aerofoillerin aerodinamik performansını HAD'den yararlanılarak değerlendirmişlerdir. Aerodinamik performans analizleri için SST k ω türbülans modeli ve SA türbülans modelleri kullanılmıştır.

Bu çalışma sonucunda SST $k\omega$ ve SA türbülans modelleriyle benzer aerodinamik performansın elde edilebildiği belirtilmiş olup bu çalışmanın geliştirilmesi için DES ve LES türbülans modelleri kullanılarak yeni analizlerin yapılması önerilmiştir.

(Alpman, 2015), 2 farklı, küçük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbin kanadının (NREL faz VI kanadı ve bu kanadın aerodinamik optimizasyonu sonucu geliştirilmiş kanat) 7, 10, 15 ve 20 m/s'lik rüzgar hızları ve fırtına durumu (extreme gust) ile rüzgarın yönü değiştirdiği durumdaki aerodinamik performansını değerlendirilmiştir. Bu kapsamda NUMECA yazılımının FINE-TURBO modülünden yararlanılarak belirtilen koşulları için yapılan HAD analizlerinde S-A türbülans modeli kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda, aerodinamik kuvvetler, rüzgar hızındaki değişim kadar hızlı şekilde değişim gösterdiği, kanadın çeşitli kısımlarında kullanılan farklı aerofoillerin düzensiz rüzgar koşullarında dinamik yük değişimlerine neden olabildiği belirlenmiştir.

(Bukala vd., 2015), rüzgar türbinlerinin verimliliğini etkileyen önemli parametreleri incelemiştir. Bu kapsamda rüzgar hız dağılımı, rüzgar kesmesi, türbülanslı rüzgar, kanadın uç-hız oranı, türbinin kurulacağı saha, kule yüksekliği değerlendirilmiştir. Bu çalışmayla rüzgar türbinin aerodinamik ve genel veriminin artırılması için artan kule yüksekliğinin yanında gelişmiş ve hafif kanadın kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

(Hasan vd., 2017), küçük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbin kanadın aerodinamik performansını Kanat Elemanı Momentum (KEM) Teorisi ve HAD'dan yararlanarak değerlendirmişlerdir. KEM Teorisi analizleri için Qblade yazılımı; HAD analizleri için ise ANSYS CFX yazılımı kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, kanadın güç katsayısı KEM ile 0.47, HAD ile 0.43 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kanat tasarımı ile ilgili sonraki çalışmalarda Akışkan Yapı Etkileşim (Fluid Structure Interface, FSI) analizlerinin ve optimizasyon tekniklerinin kullanılması önerilmiştir.

(Khalafallah vd., 2017), kanat eğrilik eğim başlangıç noktasının ve eğrilik doğrultusunun kanadın aerodinamik performansına etkisini incelemiştir. Bu amaçla, 0.9 m uzunluğundaki kanadın HAD'den yararlanılarak türbinden elde edilen güç ve itki katsayıları belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda arkaya eğimli kanat geometrisinin düz kanat geometrisinde göre daha fazla güç üretimi sağlayabileceği belirtilmiştir. Ancak arkaya eğimli kanat geometrisine kanadın deformasyon sonucu kuleye çarpabileceği, bu nedenle tasarımda bu durumun da göz önünde bulundurulması gerektiği not edilmiştir.

(Kaya vd., 2018), HAD'den yararlanarak ön ve arkaya eğimli kanat geometrisinin yatay eksenli rüzgar türbin kanadının aerodinamik performansına etkisini incelemiştir. Bu kapsamda, 0.9 m uzunluğundaki bir kanat esas alınarak kanadın eğim yönü, eğimin başlangıç

konumu ve kanat uç konumunun kanadın aerodinamik performansına etkisi incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda, öne eğimli kanat geometrisinin kanadın aerodinamik performansını iyileştirebileceği ifade edilmiştir.

(**Tenghiri vd., 2018**), 3.5 m rotor yarıçapına sahip 11 kW güç üretilen küçük ölçekli bir rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla profil giriş hattı uzunlukları ile hatve açıları belirlenerek optimum kanat geometrisi elde edilmiştir. Ayrıca tasarımı yapılan kanadın aerodinamik performansı Qblade yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda sonraki çalışmalar için rüzgar türbinlerinin çalışmaya başladığı rüzgar hızları ile ilgili çalışma yapılması önerilmiştir.

(**Peric vd., 2020**), DTU 10 MW denizüstü rüzgar türbini kanadı ve karasal Meksiko kanadının KEM Teorisi ve HAD yöntemleriyle aerodinamik performansını değerlendirmişlerdir. KEM Teorisi analizleri Qblade yazılımından yararlanılarak yapılmış olup bu analizlerde Prandtl Uç Düzeltmesi kullanılmıştır. HAD analizleri ise S-A, SST k- ω ve transition SST türbülans modelleri kullanılarak ANSYS Fluent yazılımında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda KEM Teorisiyle aerodinamik performans analizlerinde 10-12 m/s gibi düşük rüzgar hızları ile sınırlı olacak şekilde doğru sonuçlar alınabildiği; HAD kullanılarak ise SST k- ω türbülans modeliyle geniş bir aralık için doğru sonuçlar elde edilebileceği ifade edilmiştir.

(**Shourangiz- Haghighi vd., 2020**), rüzgar türbinlerinin performansının iyileştirilmesi için HAD'den yararlanılarak gerçekleştirilen literatür çalışmaları hakkında bir derleme çalışması yapılmıştır. Bu amaçla, HAD'de kullanılan ağ yapıları, sınır koşulları, türbülans modelleri, çözüm algoritmaları, optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonları, algoritmalar incelenmiş bu konunun gelecekte olması öngörülen durumu ifade edilmiştir.

2.4. Kanat Mekanik Davranışıyla İlgili Çalışmalar

(**Amano vd., 2013**), kanat geometrisinin kanat performansına etkisini incelemiştir. Bu kapsamda, düz kanat ve eğrisel bir kanat geometrisinin aerodinamik performansı ve mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Aerodinamik performans analizi için HAD ve SST k ω türbülans modelleri kullanılmıştır. Mekanik davranış analizi için ise ANSYS yazılımından yararlanılarak farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan şekil değişimleri, gerilmeler (Von Mises gerilmeleri) ve kanadın modları değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, 5-12 m/s aralığındaki rüzgar hızlarında eğrisel kanat geometrisi kullanılarak daha yüksek güç üretimi sağlanırken; 12-20 m/s aralığındaki rüzgar hızlarında ise düz kanattan daha fazla güç elde edilebileceği belirlenmiştir.

Bu çalışmayla eğrisel kanat modların ve eşdeğer gerilmelerin düz kanatlardan sırasıyla % 11 ve % 13 daha düşük olduğu da tespit edilmiştir.

(**Barnes vd., 2015**), 1 MW'lık rüzgar türbinine ait 30 m uzunluğundaki kanadın hafifletilmek suretiyle düşük rüzgar hızlarına sahip konumlarda kullanılması amacıyla mekanik tasarım iyileştirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla kanadın iç destek elemanı için tasarım optimizasyonu ile kanadın ağırlığının azaltılması ve düşük rüzgar hızlarında anma gücüne ulaşması hedeflenmiştir. Kanatta cam elyaf epoksi kompozit malzeme kullanıldığı, kanada aerodinamik yüklerle birlikte yerçekimi yüklerinin etki ettiği esas alınarak, IEC standartlarına uygun yükleme koşulları oluşturulmuş kanadın mekanik davranışı ANSYS yazılımında gerçekleştirilmiştir. İç destek elemanı olan kirişe ait kiriş perdesi (spar cap) ve kiriş (web) için en uygun boyutlar belirlenerek kanat daha düşük rüzgar hızlarında anma gücüne erişebilecek hale getirilmiştir.

(**Menegozzo vd., 2018**), olağanüstü yükleme durumunun yatay eksenli rüzgar türbinine etkilerini numerik olarak değerlendirmişlerdir. Bu amaçla ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak NREL faz VI rüzgar türbininin 3 boyutlu daimi olmayan HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan aerodinamik performans analizi ve mekanik davranış analizleri için IEC 61400-2 standardı dikkate alınmıştır. Aerodinamik performans analizi için SST k- ω türbülans modeli kullanılarak aerodinamik tork, eğilme momenti, eksenel yüklemeler ve basınç dağılımları belirlenmiştir. Bu çalışmanın geliştirilmesi için aerodinamik analiz kodlarının kullanılması, stall kaynaklı titreşim yüklemeler, normal olmayan çalışma koşulları ve yorulma analizlerinin yapılması önerilmiştir.

(**Tarfaoui vd., 2018**), 48 m uzunluğundaki kompozit rüzgar türbin kanadının mekanik davranışını Sonlu Elemanlar Metodundan yararlanan ABAQUS yazılımını kullanarak değerlendirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında 5 farklı kanat kirişinin, 25 m/s'lik rüzgar hızındaki rüzgar hızına maruz kaldığı koşullardaki kanadın mekanik davranışı şekil değişimi (deformasyonu), gerilmeler ve Tsai-Hill yaklaşımıyla kompozit yapıdaki hasar durumu değerlendirilerek en uygun yapı belirlenmiştir.

(**Husaru vd., 2018**), 3 kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinlerine ait 1630 cm uzunluğundaki bir kanadın burulma ve eğilme rijitliğini değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda Sonlu Elemanlar Metodunu kullanan ANSYS Workbench yazılımından yararlanılarak mekanik davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme ve burulma yüklemeleri şeklindeki 2 farklı senaryo için yapılan analizler sonucunda kanatta oluşan şekil değişimi ve Von Mises eşdeğer gerilmeleri belirlenmiştir.

(Zahariea vd. 2019), 10 kW kapasiteli küçük ölçekli bir rüzgar türbin kanadının aerodinamik performansını ve mekanik davranışını değerlendirmiştir. Ayrıca, açık kaynak bir yazılım olan Qblade kullanılarak kanattaki uç ve kök kayıplarının kanadın aerodinamik performansına etkisi de değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında 3 farklı kanat yapısı (katı dolu kesitli kanat, iç destek elemanı kullanılmayan belirli bir et kalınlığına ve kesit alanına sahip kanat ve iç destek elemanı kullanılan belirli bir et kalınlığına sahip kesit alanlı kanat) için mekanik davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada KEM teorisinin temel kabulleri nedeniyle Qblade yazılımıyla yapılan aerodinamik performans analizlerinden sınırlı şekilde doğru sonuçlar alınabileceği belirtilmiş olup sonraki çalışmalarda HAD gibi daha hassas metodların veya deneysel yöntemlerin kullanılması önerilmiştir.

(Tenghiri vd., 2019), 11 kW'lık küçük ölçekli rüzgar türbin kanadının mekanik tasarım ve mekanik davranış analizini gerçekleştirilmişlerdir. Bu amaçla kanatta oluşan gerilmeler ve kanadın yorulmasının değerlendirilmesi amacıyla IEC 61400-2 standardında kullanılan basit yük modeli ANSYS Workbench yazılımı ve FAST-MLife tasarım kodu kullanılarak kanadın tasarım doğrulaması yapılmıştır.

(Agarwala vd., 2020), NREL'in 5MW'lık kanadının mekanik açıdan tasarımının iyileştirilmesi için kanadın uç deformasyonu, gerinim (strain) ve titreşim analizleri gerçekleştirilmişlerdir. SEM ve mekanik tasarım döngüsünden yararlanılarak yapılan analizler sonucunda NREL 5MW kanadının dayanımında değişiklik olmadan kütlesi % 7.2 hafifletilmiştir.

2.5. Kanadın Optimizasyonu İlgili Çalışmalar

(Aceves vd., 2012), kompozit rüzgar türbin kanatlarının tasarımı için amaç fonksiyonu ve kısıtlar kullanılarak yapılan tasarım optimizasyonu metodolojisinden yararlanarak 1.5 m uzunluğundaki kanadın tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tasarım optimizasyonu için kanadın 8 m/s'lik rüzgar hızındaki normal çalışma ve 50 m/s'lik fırtına koşullarındaki davranışı dikkate alınmıştır. Kanada etki eden aerodinamik yüklemeleri belirlemek için kanat 25 dilime ayrılarak her bir dilimdeki aerofoiller için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Kanatta kullanılan malzeme için sadece cam elyaf, sadece karbon elyaf ve cam elyaf/karbon elyaf karışımı epoksi kompozit şeklindeki 3 farklı malzeme durumu değerlendirilmiştir. Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla Sonlu Elemanlar Metodunun kullanıldığı MSC Marc yazılımı kullanılmıştır. Kanadın aerodinamik ve santrifüj yüklere maruz kaldığı kabul edilerek kanatta oluşan gerilme şekil değiştirmelerden yararlanılarak kanat mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

(Fuglsang ve Madsen, 1999), yatay eksenli rüzgar türbinlerinin tasarımı için nümerik, disiplinlerarası optimizasyon metodu uygulanmışlardır. Bu çalışmada, yorulma durumu, sınır yüklemeler ve yıllık enerji üretim miktarları dikkate alınarak enerji maliyetinin minimum seviyede tutulması amaçlanmıştır. Yapılan aerodinamik hesaplamalar için Kanat Elemanı Momentum Teorisi kullanılmış, mekanik davranış analizi için ise kanat kiriş olarak modellenmiştir. Bu çalışmada, iki farklı senaryo değerlendirilmiş olup birinci senaryoya göre enerji üretim maliyeti % 3.5 azaltılırken, ikinci senaryoya göre %7 azaltılmıştır.

(Benini and Toffolo, 2002), stall kontrollü bir yatay eksenli rüzgar türbini için çok boyutlu optimizasyon çalışması yapmışlardır. Bu kapsamda Kanat Elemanı Teorisinin kullanıldığı aerodinamik model ve çok boyutlu evrimsel algoritmalarla yararlanılarak rüzgar türbinlerinden elde edilebilecek enerji miktarı ve enerji maliyeti arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, birim enerji maliyetlerinin düşürülmesi için büyük boyutlu, yüksek yıllık güç üretimine sahip, düşük ağırlıkta rüzgar türbinleri kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, kanattan elde edilebilecek yıllık birim enerji miktarının iyileştirilmesi için küçük boyutlu rüzgar türbinlerine ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Optimum sonucun elde edilebilmesi için iki durum arasında pareto optimizasyonu yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

(Xudong vd., 2009), kanadın tasarımı için aerodinamik ve aeroelastik kodlardan yararlanılan bir model önermişlerdir. Bu modelde, Kanat Elemanı Momentum Teorisi ve Shen'in Yeni Uç Düzeltme Modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada, enerji üretim maliyetinin azaltılması amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Optimizasyon için kanat geometrisini oluşturan profil kiriş hattı uzunluğu, hatve açısı ve malzeme boyutları tasarım değişkeni olarak değerlendirilmiştir. Oluşturulan modelin doğrulanması için önceden deneysel çalışmaları yapılmış olan Mexico türbini, Tjaereborg türbini ve NREL 5 MW türbini kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda geliştirilen modelle enerji üretim maliyetlerinin azaltılabileceği ifade edilmiştir.

(Hu ve Rao, 2011), rüzgar türbin performansının iyileştirilmesi ve üretim maliyetlerinin minimum seviyede tutulabilmesi amacıyla kullanılan parametrelerin (kanat ve rotor boyu, uç-hız oranı, kanat hatve açısı, pitch açısı gibi) optimizasyonunu Taguchi Metodundan yararlanarak gerçekleştirmişlerdir. Kanadın aerodinamik optimizasyonu için kanat kök kısmındaki profil kiriş hattı uzunluğu, kanat geometrisini oluşturan dört farklı hatve açısı, kanat sayısı, kanat açısız hızı, kanat pitch açısı, rotor yarıçapı ve göbek yüksekliği şeklindeki 10 farklı değişken dikkate alınmıştır. Bu çalışma sonucunda türbinden elde edilebilecek güç 25.76 kW' dan 27.79 kW' a yükseltilmiştir (Türbinlerden elde edilebilecek güç % 9.6 artırılmıştır).

(**Hu vd., 2013**), 2 MW'lık yatay eksenli rüzgar türbinine ait kompozit kanadın tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, belirlenen sınır çalışma koşullarındaki mekanik davranışı ve kullanımı ömrü boyunca maruz kalacağı düşünülen yorulma yükleri için gerekli mekanik özelliklere sahip hafif ve ekonomik kanat tasarımı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma tasarım problemlerinin matematiksel olarak tanımlanarak ve optimize edildiği bir model sunmakta olup bu çalışmada kullanılan modelin havacılık ve otomotiv sanayine de uygulanabileceği ifade edilmektedir.

(**Chen vd., 2013**), 31 m uzunluğundaki 2 MW'lık bir kanadın kompozit malzemeler kullanılarak mekanik tasarımı gerçekleştirilmişlerdir. Bu amaçla Shen'in Uç Düzeltmesi kullanılarak düzeltilmiş KEM Teorisinden yararlanan RFOIL yazılımıyla kanat yüzeyine etki eden basınçlar belirlenmiştir. Daha sonra ise kanadın mekanik tasarımı kullanılacak optimizasyon problemi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu olarak kanat ağırlığının azaltılması, tasarım değişkenleri olarak ise kanat dış kabuk yapısının malzeme kalınlığı ile iç destek yapısının konumu ve malzeme kalınlığı belirlenmiştir. Kanadın tasarım optimizasyonu işlemi için Sonlu Elemanlar Metodu ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarn Optimization) metodları birleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda iki farklı optimum kanat yapısı belirlenmiştir.

(**Dal Monte vd. 2013**), ABD merkezli Sandia Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen 7.2 m uzunluğundaki AOC 15/50 kompozit kanadın mekanik tasarımının iyileştirilmesi için yapısal optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda ANSYS ve Matlab yazılımlarını kullanılarak E-cam epoksi kompozit malzeme kullanılan kanadın uç deformasyonu ve kanat ağırlığının, kanadın mukavemetinden ödün vermeden azaltılması amaçlanmıştır. Yapısal optimizasyon için Flapwise Rijitliği, Edgewise Rijitliği ve Burulma Rijitliği parametrelerinden yararlanılarak kanadı oluşturan malzemelerin kanat mekanik davranışına etkisi belirlenmiş ve genetik algoritmalar kullanılarak optimum kanat yapısı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda AOC 15/50 kanat ağırlığının % 8.29, Flapwise yönündeki deformasyonun % 12.04 azaltıldığı, Edgewise deformasyonunun ise % 2.92 arttığı belirlenmiştir.

(**Ning vd., 2014**), rüzgar türbinlerinde optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonları ve kısıtları değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda, kanadın aerodinamik performansı, mekanik davranışı ve maliyet için literatürdeki çalışmalarda kullanılan parametreler incelenmiştir. Bu çalışmada rüzgar türbinlerinin optimizasyonu için, güç aktarma organları ve kulenin dahil olduğu modeller kullanılarak kanadın aerodinamik performansı ile ağırlığı arasında ilişki kurulabileceğinden, kanadın optimizasyonu için gelişmiş maliyet modellerine ihtiyaç

duyulduğu vurgulanmıştır. Bu modeller sayesinde malzeme ve üretim maliyetlerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilebileceği belirtilmiştir.

(**Pourrajabian vd., 2014**), küçük ölçekli rüzgar türbin kanadının aerodinamik tasarım ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, 0.5 kW, 0.75 kW ve 1 kW güç üretebilen küçük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbinleri esas alınarak kanat geometrisini oluşturan profil giriş hattı uzunluğu ve hatve açıları şeklindeki parametrelerden yararlanılmıştır. Bu çalışmada, amaç fonksiyonu olarak türbinin düşük rüzgar hızlarındaki performansı ve çalışmaya başlama durumu kullanılmış olup genetik algoritmalar ve Kanat Elemanı Momentum Teorisinden yararlanılarak en iyi başlama performansına sahip, maksimum güç üretimi sağlayan kanat geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır. Rüzgar türbininin başlama performansı için (Wood, 2001) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda, düşük rüzgar hızlarında daha büyük profil giriş hattı uzunluğu ve hatve açısı değerleriyle daha iyi performans elde edilebileceği belirlenmiştir.

(**Chehoury vd., 2015**), rüzgar türbinlerinin performasyon optimizasyonu için kullanılan optimizasyon teknikleri ve stratejileri ile ilgili bir derleme sunmuşlardır. Bu amaçla rüzgar türbinlerinin optimizasyonu için kullanılan amaç fonksiyonları, tasarım sınırları veya kısıtlar, gerçekleştirirken optimizasyon için kullanılan aerodinamik performans yaklaşımları ve mekanik davranış analiz modelleri ve yazılımları ile optimizasyon için kullanılan algoritmalar değerlendirilmiştir.

(**Barnes ve Morozov, 2016**), 30 m uzunluğundaki bir rüzgar türbin kanadının iç destek elemanları için tasarım optimizasyonu gerçekleştirmiş olup kanadın hafifletilerek ve mevcut tasarımın iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Bu çalışmada kanadın Sonlu Elemanlar Metoduyla mekanik davranışının değerlendirilmesi için ANSYS yazılımı ve kanat malzemesi olarak cam elyaf epoksi kompozit kullanılmıştır. Ayrıca kanada etki eden aerodinamik yüklerin belirlenmesi amacıyla HAD'den yararlanılmıştır. Tasarım optimizasyonu genetik algoritmalar kullanılarak Matlab ve ANSYS yazılımlarında gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon için amaç fonksiyonu kanat ağırlığının azaltılması, tasarım değişkenleri ise kanat iç destek elemanı sayısı, konumu ve boyutları olacak şekilde belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda tek iç destek elemanı için kanat kütlelerinin %7.4, çift iç destek elemanı için ise %7.2 azaltıldığı ifade edilmiştir.

(**Shen vd., 2016**), 600 W kapasiteli, küçük ölçekli rüzgar türbinine ait düz olmayan geometri bir kanadın optimizasyon çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, mikrogenetik algoritmalar ve Lifting Surface yöntemlerinden yararlanılmıştır. Amaç fonksiyonu, kanattan elde edilebilecek güç miktarının ve kanadın başlangıç performansının iyileştirilmesi olarak tanımlanmıştır. Tasarım değişkenleri; profil giriş hattı uzunlukları, hatve

açıları ve bunların belirli bir eğimli yörüngede bulunan konumları (sweep and lean blade) olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, kanattan elde edilebilecek güç miktarının iyileştirilmesi ve kanadın başlangıç performansının iyileştirilmesi şeklindeki iki amaç fonksiyonunun kanat geometrisine doğrudan etki ettiği belirlenmiştir. Güç miktarının iyileştirilmesi için daha büyük profil kiriş hattı uzunluğu, yüksek koniklik, düşük hatve açısı gerekirken, profil kiriş hattı uzunluğu arttıkça rotorun açısız atalet momentinin arttığı, bu durumun ise rotorun başlangıç performansının kötüleşmesine yol açtığı belirlenmiştir. Ayrıca hatve açısının azalması shaftın aerodinamik başlama torkunu düşürmekte bu nedenle de rotorun başlama performansı kötüleşmektedir. Başlangıç performansı dikkate alındığında ise elde edilecek güç miktarı azalmaktadır. Bu çalışma sonucunda, kısa profil kiriş hattı uzunluğunun kanadın atalet momentini düşürdüğü, daha geniş hatve açısının yüksek tork, düşük uç- hız oranı sağlayarak başlangıç performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir.

(**Pourrajabian vd. 2016**), küçük ölçekli rüzgar türbin kanadı için çalışmaya başlama durumunu dikkate alan aerodinamik ve mekanik tasarım metodolojisi geliştirmişlerdir. Kanadın çalışmaya başlama durumunu ve kanattan elde edilebilecek güç amaç fonksiyonu, kanadın müsaade edilebilir gerilmeleri ise kısıt olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda çalışmaya başlama durumu ve elde edilebilecek güç büyüklüğünü hesaplayabilmek için KEM teorisi; kanadın gerilme ve şekil değişimini hesaplamak için ise kiriş teorisinden yararlanılmış ve genetik algoritmalar kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda kanadın iç ve dış geometrik büyüklüklerinin kanadın çalışmaya başlama durumuna doğrudan etki ettiği belirlenmiştir.

(**Dal Monte vd., 2017**), AOC15/50 rüzgar türbin kanadı için aerodinamik ve mekanik tasarım parametrelerini dikkate alarak kanat tasarım optimizasyonu yapmışlardır. Kanadın aerodinamik performans analizi için Padova Üniversitesi tarafından geliştirilen S.O.C.R.A.T.E. Algoritması; mekanik davranış analizi için ise SEM'den yararlanan ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Optimizasyon için tasarım değişkeni olarak kanadı oluşturan aerofoillere ait profil kiriş hattı uzunluğu, Hatve açısı ve kanat bileşenlerinin kalınlıkları kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi genetik algoritmalarla yararlanarak gerçekleştirilmiştir ve AOC 15/50 kanadının aerodinamik performansı iyileştirilirken (10 m/s rüzgar hızında kanattan üretilen güç %44 artırılırken) mekanik davranış parametresi olan kanat deformasyonu da azaltılmıştır. Sonraki çalışmalar için farklı malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar yürütülmesi ve BEM Teorisi yerine HAD'den yararlanılması önerilmiştir.

(**Afshar vd, 2017**), mikro rüzgar türbin kanadının iç ve dış bileşenlerinin tasarım ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, türbinin güç katsayısı ve çalışmaya

başlama zamanından oluşan amaç fonksiyonu, kanatta oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler ise kısıtlar olarak değerlendirilmiştir. Kanadın aerodinamik performansının değerlendirilmesi amacıyla Kanat Elemanı Momentum Teorisinden yararlanılmış olup genetik algoritmalar kullanarak kanadın optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda kanadın geometrik büyüklüklerinden yararlanarak kanadın güç katsayısının ve çalışmaya başlama performansının iyileştirilebileceği belirlenmiştir.

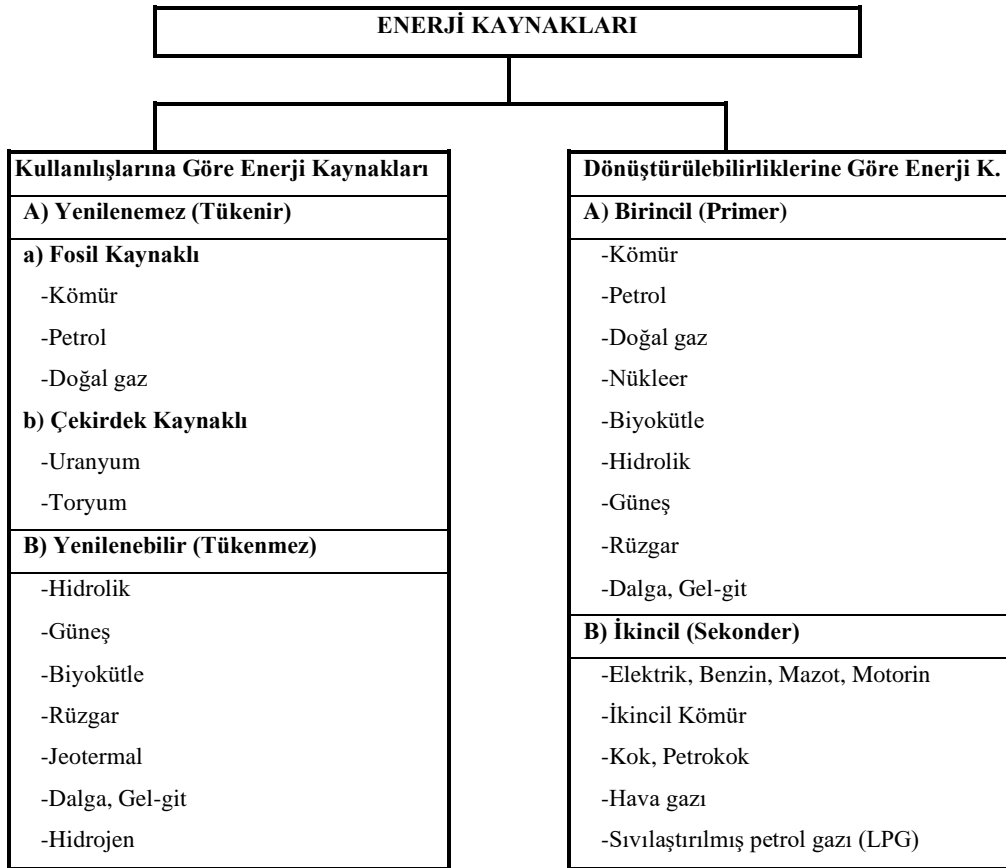
(Pourrajabian vd., 2019), katı ve belirli bir et kalınlığına sahip küçük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbin kanadının tasarımı ve genetik algoritmalarla yararlanarak optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, kanadın güç katsayısı ve çalışmaya başlama durumunu iyileştiren en uygun kanat geometrisini belirlemeye çalışılmıştır. Ayrıca çeşitli ağaç malzemelerle ilgili değerlendirmeler yapılarak, kanat için en uygun ağaç malzeme de tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada laminer akış koşulları dikkate alınmış olup türbülanslı akış koşulları dikkate alınarak da değerlendirme yapılması önerilmiştir.

(Zhu vd., 2020), okyanus akıntı türbinlerinde kullanılacak bir kanat için Kanat Elemanları Momentum Teorisinden yararlanarak tasarım gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, kanadın profil giriş hattı uzunlukları ve hatve açıları genetik algoritmalarla yararlanarak optimize edilmiştir. Bu çalışmada, kanadın %75'lik konumundaki aerofoilin kanadın performansına doğrudan katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

3. ENERJİ VE ÇEŞİTLERİ

İş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan **enerji** günlük hayatta her alanda yaygın bir şekilde kullanılmakta olup mekanik (potansiyel ve kinetik), ısı, elektrik, kimyasal ve nükleer gibi değişik türlerde bulunabilmekte, uygun yöntemlerle bir türden diğerine dönüşebilmekte ve farklı şekillerde sınıflandırılabilir (Kaya, 2014; Kaya ve Koç, 2015).

Enerji üretiminde çeşitli kaynaklardan yararlanılmakta olup bu kaynaklar kullanılışlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre iki ana gruba ayrılabilir. Kullanılışlarına göre enerji kaynakları **yenilenebilir** ve **yenilenemez enerji kaynakları**; dönüştürülebilirliklerine göre ise **birincil** ve **ikincil enerji kaynakları** olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Enerji kaynakları (Kaya, 2014; Kaya ve Koç, 2015)

Enerji kaynaklarının dönüştürülebilirliklerine göre yapılan sınıflandırmaya göre herhangi bir değişim ya da dönüşüm uğramamış kaynaklar **birincil (primer) enerji kaynağı**; birincil enerji kaynağının dönüşümü sonucu elde edilen enerji kaynakları ise **ikincil (sekonder) enerji kaynağı** olarak tanımlanmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre petrol, taş kömürü, linyit, doğalgaz, hidrolik, nükleer ve jeotermal gibi enerji kaynakları **birincil enerji kaynağı** iken; elektrik,

benzin, hava gazı ve sıkıştırılmış petrol gazı (LPG) gibi enerji kaynakları ise **ikincil enerji kaynağıdır**.

Başka bir sınıflandırma şekli ise enerji kaynaklarının kullanım sonunda tükenebilirlik ya da yenilenebilirlik durumu dikkate alınarak yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre doğal bir çevrim sürecinde aynen kalabilen, kullanılmasına rağmen azalmayan, tükenmeyen enerji kaynaklarına **yenilenebilir enerji kaynakları**; bir kez kullanıldığında kendini yenileyemeyen enerji kaynakları ise **yenilenemez enerji kaynakları** olarak değerlendirilmektedir. **Yenilenemez enerji kaynakları** kendi arasında fosil ve çekirdek kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılmakta olup kömür, petrol ve doğal gaz fosil kaynaklı yenilenemez enerji kaynakları; uranyum ve toryum ise çekirdek kaynaklı yenilenemez enerji kaynakları grubunda yer almaktadır. Hidrolik, güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle ve dalga enerjisi ise **yenilenebilir enerji kaynaklarıdır** (Kaya, 2014; Kaya ve Koç, 2015).

3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Rüzgar Enerjisi

Önceki kısımda da belirtildiği gibi, doğal bir çevrim sürecinde aynen kalabilen, kullanılmasına rağmen azalmayan, tükenmeyen enerji kaynakları **yenilenebilir enerji kaynakları** olarak bilinmekte olup güneş, rüzgar, akarsular, yer kabuğunun ısı ve bitkiler **yenilenebilir enerji kaynaklarıdır**. Bu kaynakları elektrik enerjisi, ısı enerjisi, kimyasal enerji veya mekanik enerji gibi kullanılabilir enerji çeşitlerine dönüştürmek için **yenilenebilir enerji teknolojileri** geliştirilmiştir. Söz konusu kaynaklar ve teknolojiler aşağıda özetlenmiştir [NREL, 2001; Kaya, 2014, Kaya ve Koç, 2015].

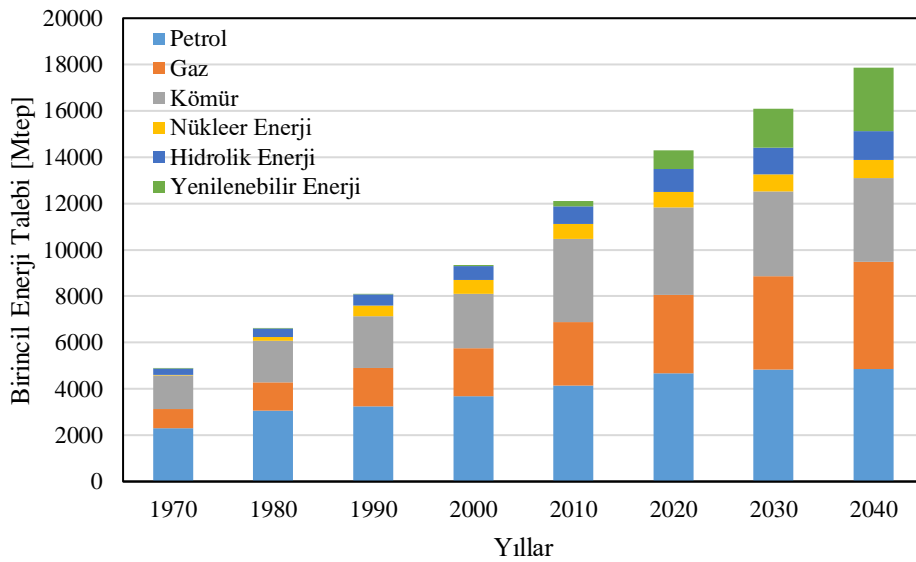
- En yaygın kullanılan **yenilenebilir enerji kaynağı** türü olan **hidrolik enerjiden** yararlanmak için **hidroelektrik santraller (HES)** kullanılmaktadır. Bu santraller, nehirler üzerine inşa edilen barajlar vasıtasıyla rezervuarda su biriktirmek, biriken suyun potansiyel enerjisini türbinde elektrik enerjisine dönüştürme prensibiyle elektrik enerjisi üretmektedir.
- Yerkürenin doğal ısısından kaynaklanan bir **yenilenebilir enerji kaynağı** olan **jeotermal enerji** yer kabuğunun derinliklerinde birikmiş olan basınç altındaki sıcak akışkan (su buharı, gaz) ve sıcak kuru kayaların içerdiği termal enerji olarak tanımlanmaktadır. Bu enerji ısıtma amacıyla veya elektrik üretimi amacıyla kullanılabilen olup elektrik enerjisi üretilen tesisler **Jeotermal Enerji Santrali (JES)** olarak bilinmektedir.
- Güneşin çekirdeğinde bulunan hidrojen gazını helyuma dönüştüren füzyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan çok güçlü bir enerji kaynağı olan **güneş enerjisi**

güneş ışınları vasıtasıyla dünyamıza gelmektedir. Bu enerjiden yararlanmak için güneş kollektörleri, güneş santralleri ve güneş pilleri (fotovoltaik piller) gibi teknolojiler geliştirilmiştir. Bu teknolojiler sayesinde güneş enerjisi, ısı enerjisi olarak doğrudan ya da elektrik enerjisine dönüştürülerek dolaylı olarak kullanılabilir.

- İçerisinde karbonhidrat bileşikleri bulunan bitkisel ve hayvansal kökenli maddelerden elde edilen enerji kaynakları kullanılarak üretilen enerji **biyokütle enerjisi** olarak bilinmektedir. Biyokütle kaynakları kullanılarak biyoetanol, biyodizel ve biyogaz gibi yakıtlar elde edilebilmektedir. Biyoetanol ve biyodizel çeşitli bitkiler veya hayvansal yağlar kullanılarak üretilen bir yakıt türü; organik maddelerin (bitkisel ve hayvansal atıklar, şehir ve endüstriyel atıklar) oksijensiz ortamda fermantasyonu sonucu elde edilen bir bileşik olan biyogazdan ise biyogaz tesislerinde elektrik enerjisi üretilmektedir. Ayrıca, petrolden elde edilen çeşitli kimyasallar veya malzemeler biyokütle enerji kaynaklarından yararlanılarak da elde edilebilmektedir.
- Güneş radyasyonunun yer yüzeylerini eşit şekilde ısıtmaması sonucunda çıkan havanın yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hareketi rüzgar olarak tanımlanmakta olup rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji, mekanik enerji veya elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılabilir. Mekanik enerji genel olarak evlerde ve çiftliklerde sulama amacıyla kullanılabilir. **Rüzgar enerjisinden** yararlanılarak elektrik enerjisi üretmek amacıyla ise **Rüzgar Enerjisi Santralleri (RES)** kullanılmaktadır.
- Rüzgarın deniz ve okyanus yüzeylerindeki hareketinden kaynaklanan dalgalanma hareketinden yararlanılarak rüzgar türbinlerine benzer şekilde elektrik enerjisi üretilmekte olup bu sistemler **dalga enerjisi** sistemleri olarak bilinmektedir. Bu sistemlerde akışkan olarak rüzgar yerine dalganın kinetik enerjisi kanat tarafından alınmakta ve sistemi oluşturan diğer elemanlar vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.
- Dünya ve Ay arasındaki çekim kuvvetinden kaynaklanan gel-git (**Med-Cezir**) olayından yararlanarak enerji üretmek amacıyla okyanusun koy şeklindeki sahiline bir baraj yapılır. **Med** esnasında yükselen suyun türbinden geçerek barajı doldurması; **cezir** esnasında ise barajdaki suyun tekrar türbinden geçerek denize geri dönmesi esnasında türbin vasıtasıyla alınan suyun kinetik enerjisi elektrik enerjisine

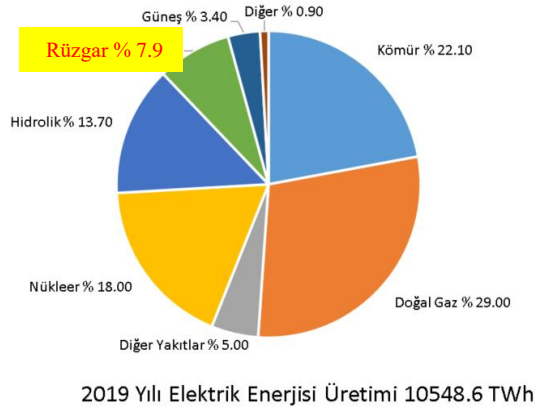
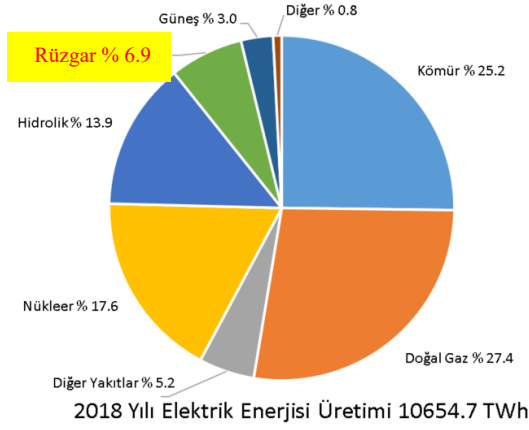
dönüştürülerek elektrik enerjisi üretilen sistemler **Med-Cezir Enerjisi** sistemleri olarak bilinmektedir.

Ülkeler artan nüfus, toplumların refah seviyelerinin yükselmesi ve teknolojik gelişmeler nedeniyle artan enerji talebini karşılamak için yukarıda da belirtilen yenilenebilir enerji sistem veya teknolojilerinden daha fazla yararlanmaya çalışmaktadır. 1970 ve 2020 yılları arasında yakıt türüne göre dünyadaki milyon ton eşdeğer petrol cinsinden (Mtep) birincil enerji talebi ve 2020 ile 2040 yılları arasındaki talep miktarları Şekil 3.2’de verilmiştir. 1970’li yıllarda yok denecek kadar az olan **yenilenebilir enerji kaynaklarına** olan talebin yıllar içerisinde giderek arttığı ve gelecekte de artması beklenmektedir.



Şekil 3.2. Seçilmiş yıllarda birincil enerji talep miktarları [Mtep] (BP, 2019)

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları yaygın olarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Teşkilatı’na (OECD) üye ülkelerde 2018 ve 2019 yıllarında elektrik enerjisi üretim miktarı ve bu enerjiyi üretmek için kullanılan kaynaklar Şekil 3.3’de verilmiştir. **OECD** ülkelerindeki toplam elektrik enerjisi üretiminin 2018 ve 2019 yıllarında sırasıyla 10654.7 TWh ve 10548.6 TWh olarak gerçekleştiği görülmektedir. Elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde 2018 yılında % 6.9 olan **rüzgar enerjisi** kullanım oranının 2019 yılında % 7.9’a yükseldiği görülmektedir.



Şekil 3.3. OECD ülkelerinde 2018 ve 2019 yıllarında elektrik enerjisi üretimi (IEA, 2019)

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak enerji üretimi yapan santral kurulu güçlerinin seçilmiş yıllarındaki değişimi Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgeden 2010 yılında 1226.853 GW olan toplam yenilenebilir enerji santrali kapasitesinin yıllar içinde artarak 2019 yılı itibariyle 2536.853 GW’a yükseldiği görülebilmektedir. Hidroelektrik santrallerden sonra en fazla kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı olan **rüzgar türbin santrali** kurulu gücünün ise 2010 yılında 180.85 GW iken 2019 yılında 622.704 GW’a yükseldiği de çizelgeden takip edilebilmektedir.

Çizelge 3.1. Yenilenebilir enerji santrallerinin kurulu güçleri (IRENA, 2020)

Santral Türü	2010	2015	2018	2019
Hidroelektrik Santral [GW]	1024.833	1210.496	1297.465	1310.292
Rüzgar Santrali [GW]	180.85	416.827	563.820	622.704
Güneş Santrali [GW]	41.542	221.993	488.752	586.434
Jeotermal Enerji Santrali [GW]	9.992	1.814	13.249	13.931
Okyanus Enerji Santrali [GW]	0.250	0.513	0.529	0.531
Biyoyakıt Kapasitesi [GW]	65.626	96.822	117.740	123.802
Katı Biyoyakıt ve Atıklar [GW]	54.251	78.753	96.170	101.138
Sıvı Biyoyakıtlar [GW]	1.857	2.419	3.211	3.211
Biyogaz [GW]	9.518	15.650	18.359	19.453
Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi [GW]	1226.853	1846.060	2361.061	2536.853

3.2. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Ülkeler her geçen gün yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanmak istemektedir. Ülkelerin daha fazla yararlanmak istediği yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de rüzgar enerjisidir. Ülkeler rüzgar enerjisi potansiyeline göre rüzgar enerjisi santrali yatırımları yapmakta ya da özel teşebbüsler üzerinden rüzgar santrali kurulu güçlerini artırmaya çalışmaktadır. Ülkelerin rüzgar enerjisi kurulu güçlerinin seçilmiş yıllardaki değişimi ve gelecekteki durumu ile ilgili tahminler bu kısımda incelenmiştir.

Seçilmiş yıllarda **karasal** (onshore) **rüzgar santrali** kurulu gücü en yüksek olan ülkeler 2019 yılı kapasitelerine göre sıralanarak Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelgeden 2019 yılı itibariyle **rüzgar enerjisi** kurulu gücü en yüksek olan ülkenin 210478 MW ile Çin olduğu görülmektedir. 2006 yılında 65 MW olan Türkiye’nin **karasal rüzgar enerjisi** kurulu gücünün 2018 yılında 7005 MW seviyesine yükseldiği, 2019 yılı sonu itibariyle ise 7591 MW olduğu da çizelgeden izlenebilmektedir.

Çizelge 3.2. Seçilmiş yıllarda rüzgar enerjisi kurulu gücü yüksek olan ülkeler [MW] (IRENA, 2020)

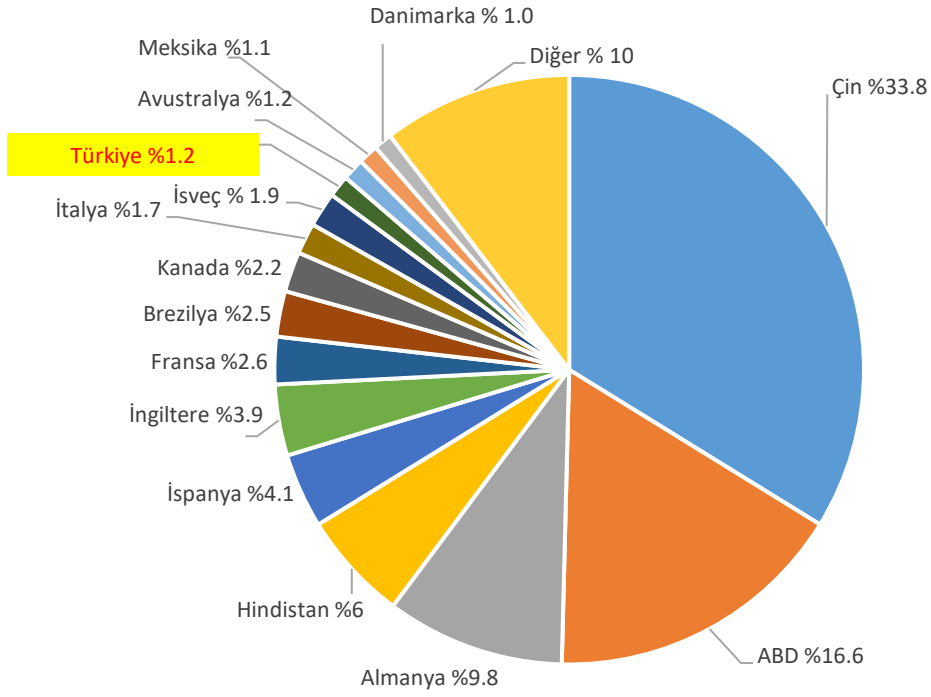
Sıra	Ülke	Yıllar					Toplam Kapasite İçindeki Oran (2019) (%)
		2006	2010	2015	2018	2019	
1	Çin	2599	29633	131048	184665	210478	33.8
	Avrupa Birliği (AB)	48122	84398	141519	179105	191412	30.7
2	ABD	11603	39135	72573	94417	103584	16.6
3	Almanya	20622	26903	44580	58843	60822	9.8
4	Hindistan	6270	13184	25088	35288	37505	6.0
5	İspanya	11630	20693	22943	23405	25553	4.1
6	İngiltere	1963	5421	14306	21770	24128	3.9
7	Fransa	1589	5912	10298	14900	16260	2.6
8	Brezilya	237	927	7633	14833	15364	2.5
9	Kanada	1460	3967	11214	12816	13413	2.2
10	İtalya	2123	5794	9137	10230	10758	1.7
11	İsveç	571	2017	5819	7300	8888	1.4
12	Türkiye	65	1320	4503	7005	7591	1.2
13	Avustralya	-	1864	4234	5818	7272	1.2
14	Meksika	-	519	3271	4875	6591	1.1
15	Danimarka	3140	3802	5077	6121	6117	1.0
16	Polonya	153	1108	4886	5766	5917	1.0
17	Portekiz	1716	3796	4937	5172	5233	0.8
18	Hollanda	-	2237	3391	4393	4463	0.7
19	İrlanda	-	1390	2451	3676	4172	0.7
20	Japonya	-	2294	2808	3667	3786	0.6
21	Belçika	-	1069	2176	3261	3780	0.6
22	Yunanistan	-	1298	2091	2877	3547	0.6
23	Avusturya	-	1106	2489	3133	3159	0.5
24	Romanya	-	389	3130	3032	3040	0.5
25	Norveç	-	425	867	1710	2444	0.4
Toplam Kapasite		-	180850	416276	563820	622704	100.0

Ülkelerin seçilmiş yıllardaki **denizüstü rüzgar santrali** kurulu güçleri Çizelge 3.3'de verilmiştir. Çizelgeden 2010 yılında 3056 MW olan dünyadaki toplam denizüstü rüzgar santrali kapasitesinin 2019 yılı itibariyle 28308 MW'a yükseldiği görülmektedir. 2019 yılı itibariyle denizüstü rüzgar santrali kurulu gücü en yüksek olan ülkelerin sırasıyla 9945 MW ile İngiltere 7507 MW ile Almanya ve 5930 MW ile Çin şeklinde olduğu da çizelgeden izlenebilmektedir.

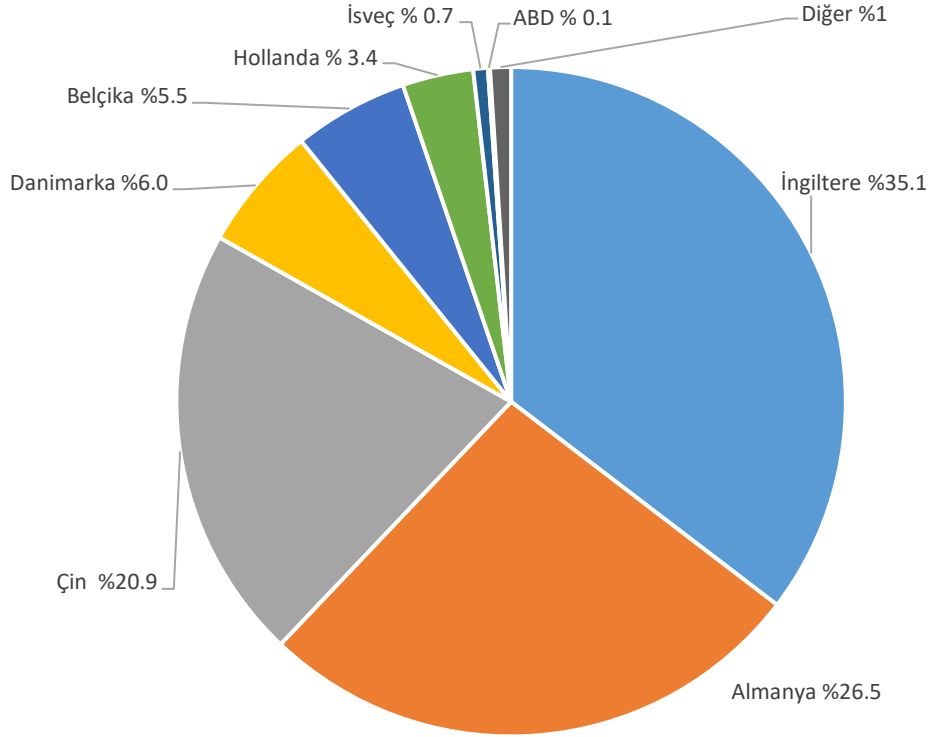
Çizelge 3.3. Ülkelerin denizüstü (offshore) rüzgar türbin kapasiteleri [MW] (IRENA, 2020)

Kıta	Ülke	2010	2015	2018	2019	Toplam Kapasite İçindeki Oran (2019) (%)
Avrupa		2931	10966	18766	21984	77.7
	Avrupa Birliği (AB)	2928	10944	18764	21982	77.7
	İngiltere	1341	5093	8217	9945	35.1
	Almanya	80	3283	6396	7507	26.5
	Danimarka	868	1271	1701	1701	6.0
	Belçika	197	712	1186	1556	5.5
	Hollanda	228	357	957	957	3.4
	İsveç	163	213	203	203	0.7
Asya		125	722	4833	6295	22.2
	Çin	100	559	4588	5930	20.9
Amerika		-	0	29	29	0.1
	ABD	-	0	29	29	0.1
Dünya Toplam		3056	11717	23629	28308	100.0

2019 yılı itibariyle dünyadaki **karasal** (onshore) ve **denizüstü** (offshore) **rüzgar enerjisi** kurulu güçlerinin ülkelere göre dağılımları Şekil 3.4’de verilmiştir. Şekilden 2019 yılı itibariyle dünyadaki **karasal rüzgar enerjisi** kurulu gücünün %33.8’inin Çin, % 16.6’sının ABD ve % 9.8’inin Almanya’da olduğu görülmektedir. Dünyadaki **karasal rüzgar santrali** kurulu gücünün %1.2’sinin Türkiye’de bulunduğu da görülmektedir. **Denizüstü rüzgar santralleri** kurulu gücünün % 35.1’inin İngiltere, % 26.5’inin Almanya, % 20.9’unun ise Çin’de bulunduğu da şekilden izlenebilmektedir. Türkiye’de 50 m yükseklikteki karasal rüzgar enerji potansiyelinin 5.3 GW olmasına rağmen, Türkiye’de henüz bir denizüstü rüzgar santrali bulunmamaktadır.



a) Karasal Rüzgar Santralleri

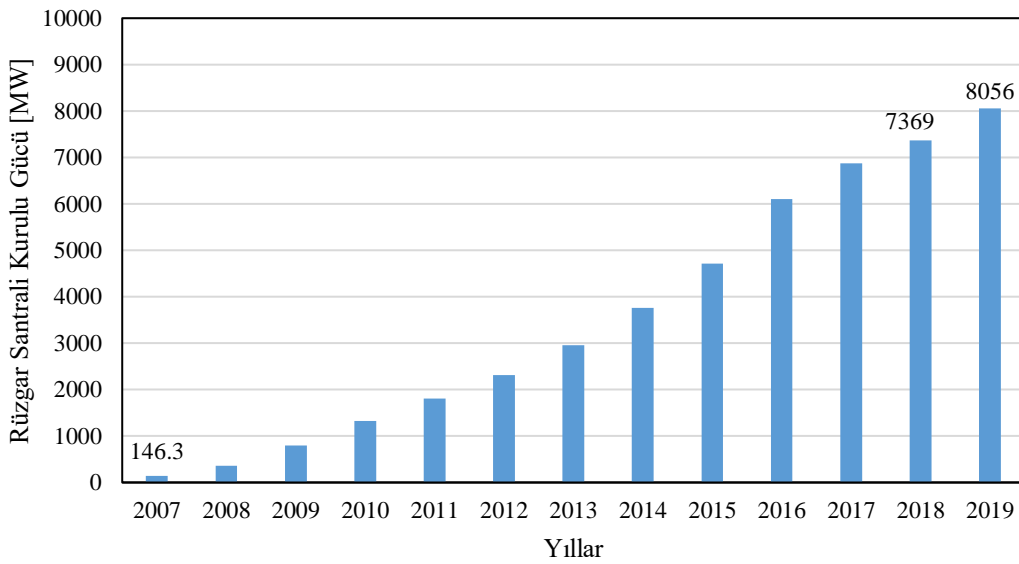


b) Denizüstü Rüzgar Santralleri

Şekil 3.4. Ülkelerin karasal ve denizüstü rüzgar santrali kapasiteleri (2019) (IRENA, 2020)

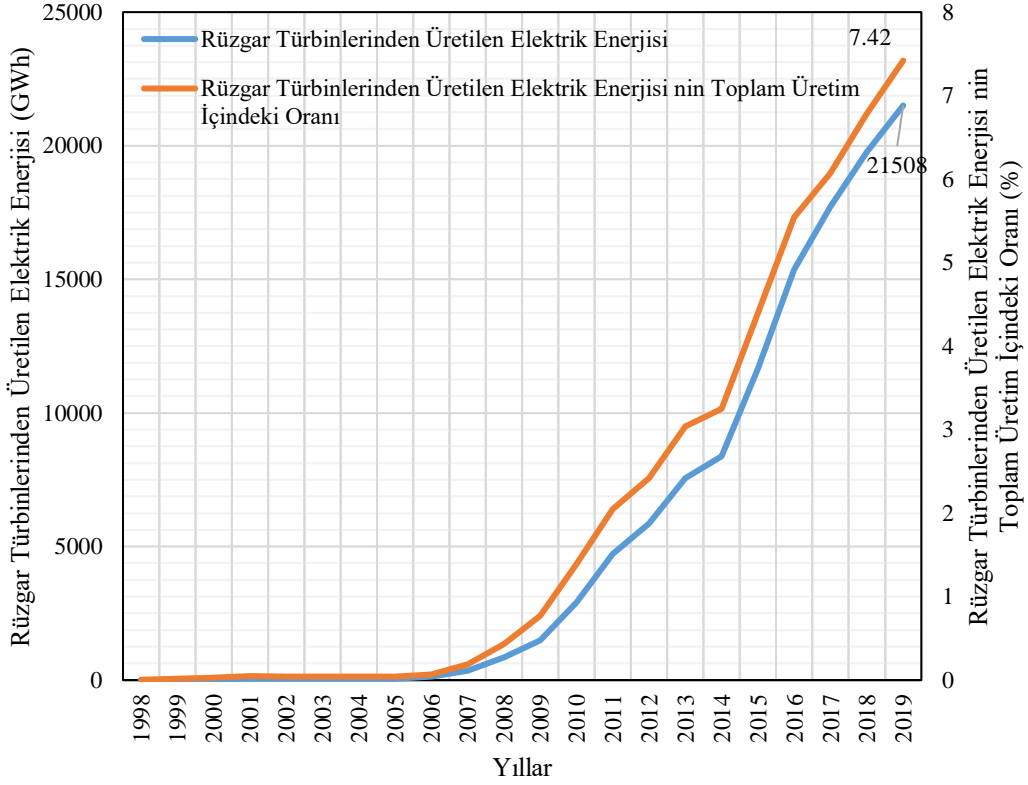
Türkiye Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne (MİGM) göre 6.5 m/s ve üzerindeki rüzgar hızı esas alındığında Türkiye'nin **karasal rüzgar enerjisi potansiyeli** 13.1756 GW, **denizüstü rüzgar potansiyeli** ise 17.393 GW'dır. Rüzgar enerji santralleri yatırımlarının ekonomik olabilmesi için 50 m yükseklikte ortalama 7 m/s'lik rüzgar hızı olması gerektiği kabul edilmektedir. Bu nedenle Türkiye'nin **karasal rüzgar enerjisi potansiyeli** 48 GW, **denizüstü rüzgar potansiyeli** ise 5.3 GW olarak kabul edilmektedir.

Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu gücünün 2007 yılı ve 2019 yılı aralığındaki değişimi Şekil 3.5'de verilmiştir. 2007 yılında 146.3 MW olan Türkiye'nin **rüzgar santrali kurulu gücünün** 2019 yılında 8056 MW seviyesine yükseldiği şekilden izlenebilmektedir.



Şekil 3.5. Türkiye'nin rüzgar santrali kurulu gücü [MW] (Kaya ve Koç 2020; TUREB, 2019)

1998 ve 2019 yılı arasında Türkiye'de rüzgar enerjisi santrallerinden üretilen elektrik enerjisi miktarları ve söz konusu üretimin toplam üretim içindeki oranı Şekil 3.6'da verilmiştir. 1998 ve 2006 yılları arasında düşük seviyede olan rüzgar türbinlerinden üretilen elektrik enerjisi miktarının 2006 yılından sonra hızlı bir şekilde artarak 2019 yılı sonunda 21508 GWh'e yükseldiği şekilden izlenebilmektedir. Benzer şekilde rüzgar santrallerinden üretilen elektrik enerjisinin toplam üretim içindeki oranı da 2006 yılından sonra hızlı bir şekilde artmış ve 2019 yılı Temmuz ayı itibarıyla % 7.42 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.6. Türkiye’de rüzgar santrallerinde üretilen elektrik enerjisi (Kaya ve Koç 2020; TUREB, 2019)

2018 yılında dünyadaki toplam karasal ve denizüstü rüzgar türbini kurulu gücü ve 2030 ve 2050 yılı tahminleri Çizelge 3.4’de verilmiştir. 2018 yılında dünyadaki toplam 542 GW’lık rüzgar türbini kurulu gücün 231 GW’lık kısmının içinde Çin’in de bulunduğu Asya kıtasında ve 2050 yılı için öngörülen 5044 GW’lık karasal rüzgar enerjisi kurulu gücünün 2646 GW’ının da Asya kıtasında bulunacağını öngörüldüğü de çizelgeden izlenebilmektedir. 2018 yılında denizüstü rüzgar santralleri en fazla olan kıtanın Avrupa olmasına rağmen 2030 ve 2050 yıllarında Asya olmasının beklendiği de çizelgeden takip edilebilmektedir.

Çizelge 3.4. Dünyada mevcut rüzgar enerjisi kurulu gücü ve gelecek tahminleri (IRENA, 2019)

Rüzgar Türbini	Yıllar	Kuzey Amerika	Güney Amerika	Avrupa	Orta Doğu ve Afrika	Asya	Okyanusya	Dünya
Karasal (Onshore) (GW)	2018	107	25	164	6	231	7	542
	2030	330	71	215	84	1067	19	1786
	2050	1146	182	483	525	2646	62	5044
Denizüstü (Offshore) (GW)	2018	0	0	19	-	5	0	23
	2030	23	1	78	-	126	1	228
	2050	164	5	215	-	613	3	1000

Toplam yatırım maliyeti, birim elektrik enerjisi üretim maliyeti, ortalama yıllık yatırım miktarı, rüzgar türbini kapasite faktörü ve rüzgar enerjisi sektörü tarafından sağlanan istihdam gibi rüzgar enerjisiyle ilgili çeşitli ekonomik parametrelerin 2010 ve 2018 yılı bilgileriyle 2030 ve 2050 yılı tahminleri Çizelge 3.5’de verilmiştir. Çizelgedeki toplam yatırım maliyeti ve birim elektrik enerjisi üretim maliyeti sırasıyla 1 kW’lık rüzgar türbini kurulumu ve rüzgar türbinlerinden yararlanılarak 1 kWh’lik elektrik enerjisi üretimi için katlanılması gereken maliyeti ifade etmektedir. Çizelgedeki kapasite faktörü ise bir yıl içerisinde rüzgar türbininden üretilen enerjinin, santralin bir yıl boyunca nominal güçte çalışarak üretebileceği enerjiye oranı olarak ifade edilmektedir. Söz konusu büyüklük rüzgar türbinlerinden ne ölçüde faydalanılabildiğini veya türbin verimliliğini gösteren bir büyüklüktür.

Karasal ve denizüstü rüzgar türbinlerine ait toplam yatırım ve birim enerji üretim maliyetlerinin 2030 ve 2050 yıllarında azalmasının; söz konusu santraller için yapılan yıllık ortalama yatırım miktarlarının ise artmasının beklendiği çizelgeden izlenebilmektedir. 2010 yılında % 27 olan **karasal rüzgar türbini kapasite faktörünün** 2050 yılında % 32-%58’e; % 38 olan **denizüstü rüzgar türbini kapasite faktörünün** ise % 43-%59’a yükselmesinin beklendiği de çizelgeden izlenebilmektedir. Ayrıca 2010 ve 2018 yıllarında sırasıyla 0.75 milyon ve 1.12 milyon olan rüzgar enerjisi sektörü tarafından sağlanan istihdamın 2030 yılında 3.74 milyon 2050 yılında ise 6.06 milyona yükselmesi de beklenmektedir.

Çizelge 3.5. Çeşitli ekonomik parametrelerle rüzgar enerjisi (IRENA, 2019)

Parametre	Rüzgar Türbin Çeşidi	2010	2018	2030	2050
Toplam Yatırım Maliyeti (dolar/kW)	Karasal	1913	1497	800-1350	650-1000
	Denizüstü	4572	4353	1700-3200	1400-2800
Birim Enerji Üretim Maliyeti (dolar/kWh)	Karasal	0.08	0.06	0.03-0.05	0.02-0.03
	Denizüstü	0.16	0.13	0.05-0.09	0.03-0.07
Yıllık Ortalama Yatırım (Milyar Dolar/Yıl)	Karasal	57	67	146	211
	Denizüstü	4.2	19.4	61	100
Kapasite Faktörü (%)	Karasal	27	34	30-55	32-58
	Denizüstü	38	43	36-58	43-59
İstihdam (Milyon)		0.75	1.12	3.74	6.06

4. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar türbinleri (Şekil 4.1), rüzgar enerjisini mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olup elde edilen mekanik enerjiden sulama, kesme, biçme, öğütme, sıkıştırma ve yağ çıkarma gibi amaçlarla; elektrik enerjisi ise evlerde, işyerlerinde, eğitimde, sağlıkta, ulaşımda, sanayide kısacası tüm yaşam alanlarında elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılmaktadır (Çelik, 2012).

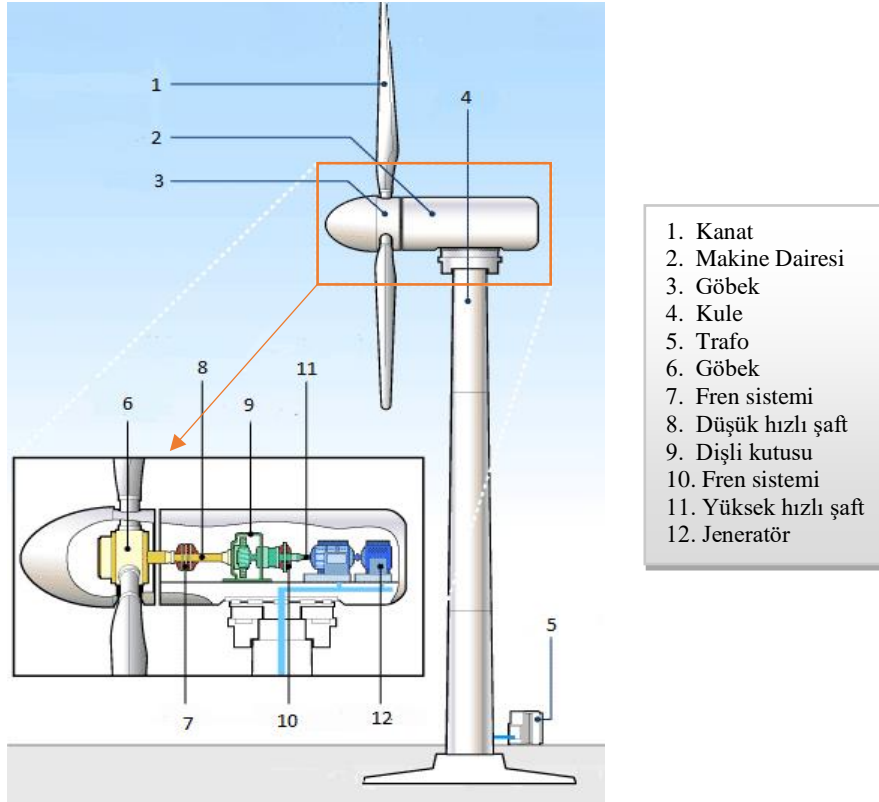


Şekil 4.1. Farklı tip ve büyüklükte rüzgar türbinleri (Kaya, 2014)

Bu bölümde **rüzgar türbinleri** ve **teknolojisi** ele alınmış olup genel olarak rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi, rüzgar türbinleri ve teknolojilerinin tarihsel gelişimi, rüzgar türbin sınıflandırılması konuları değerlendirilmiştir. Ayrıca günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinleri ve bu türbinlerde enerji üretim zincirinin ilk halkası olan kanat ile ilgili bilgiler özetlenmiştir.

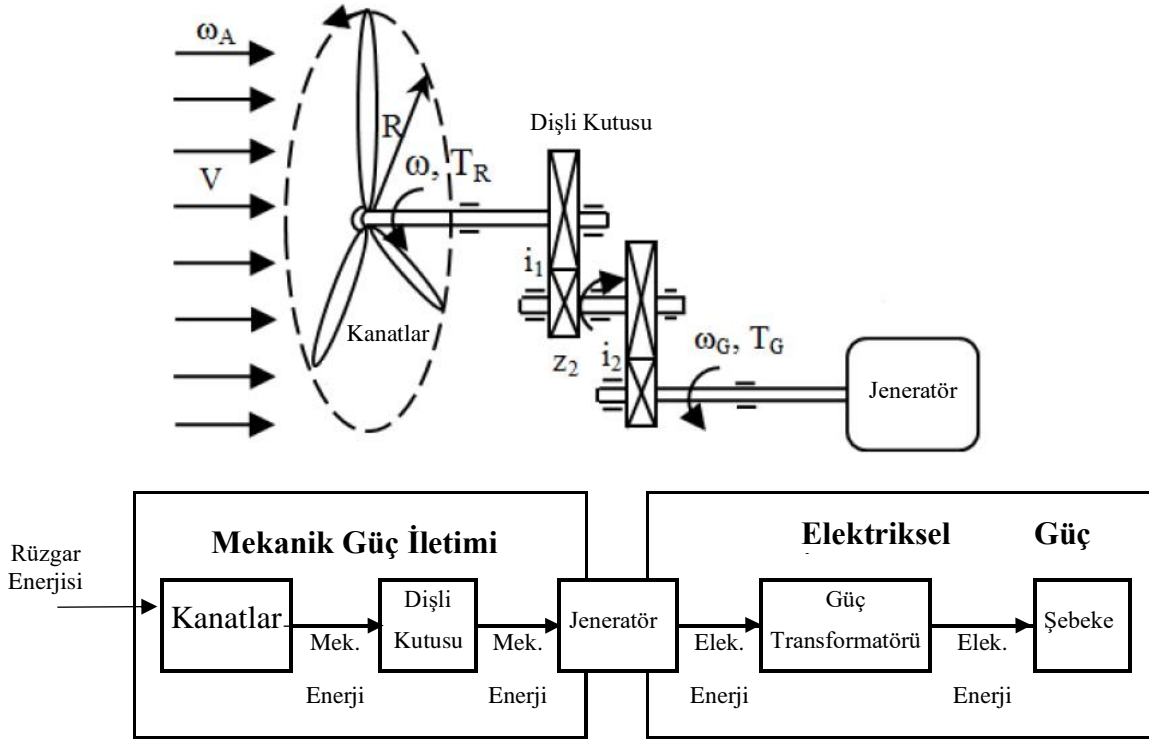
4.1 Rüzgar Türbinleri ve Çalışma Prensibi

Rüzgar türbinleri kanatlar, ana gövde veya nasel (nacelle) ve kule olmak üzere 3 temel elemandan oluşmaktadır. Rüzgar türbinlerinde ana gövde içerisinde de çeşitli mekanik ve elektriksel elemanlar bulunmaktadır. **Yatay eksenli rüzgar türbinlerini** oluşturan temel elemanlar ve bu elemanların alt eleman veya bileşenleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Rüzgar türbinlerinde, pervane kanatları ve göbek arasında kalan kısma rotor olarak bilinmektedir



Şekil 4.2. Yatay eksenli rüzgar türbinini temel elemanları ve alt elemanları (Kaya ve Koç, 2015)

Elektrik enerjisi üretimi yapılan rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi genel olarak kinetik enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi döngüsüne dayanmaktadır. Buna göre kanatlar vasıtasıyla alınan mekanik enerjiye dönüştürülen rüzgarın kinetik enerjisi düşük hızlı şafta iletilir. Düşük hızlı şafta gelen mekanik enerji, dişli kutusu yardımıyla dönüş hızı artırılıp momenti azaltılarak yüksek hızlı şaft üzerinden jeneratöre iletilmektedir. Jeneratör ünitesinde ise söz konusu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Tipik bir rüzgar türbininde elektrik enerjisi üretim aşamaları Şekil 4.3’de verilmiştir.



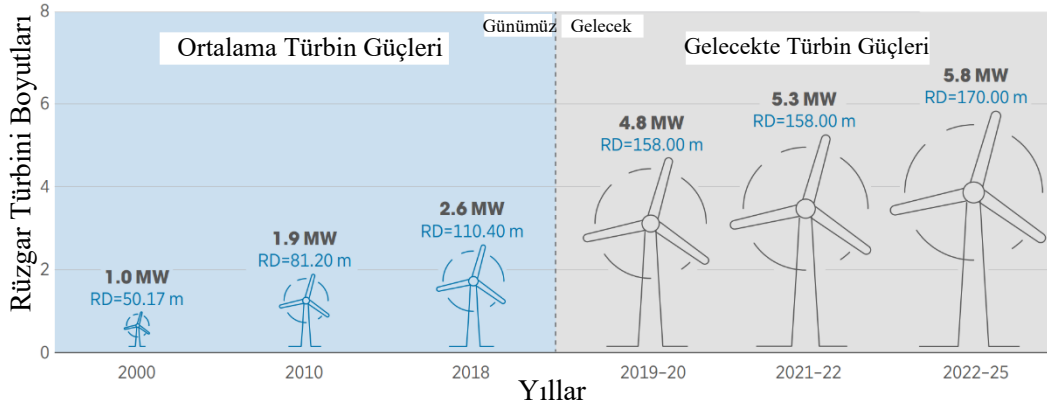
Şekil 4.3. Rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisi üretimi (Şenel, 2012; Şenel ve Koç, 2020)

Eski dönemlerden itibaren rüzgar gücünden yararlanmak amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Rüzgar gücünün yel değirmenlerinde buğday gibi tahılların öğütülmesinde; yelkenli gemilerde ise hareket sağlamak amacıyla kullanımı şeklindeki uygulamalar rüzgar enerjisinin kullanımı ile ilgili ilk örnekler olarak karşımıza çıkmakta olup bu durum eski dönemlerden günümüze kadar rüzgar gücünden yararlanmak amacıyla çeşitli yöntemlerin kullanıldığını göstermektedir (Hayli, 2001; Yerebakan, 2001).

Elektrik enerjisinin keşfinden sonra rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme çalışmaları başlamıştır. Elektrik enerjisi üretimi amacıyla ilk rüzgar türbini 1891 yılında Dane Poul Lacour tarafından geliştirilmiş ancak o dönemde yaygınlaşmamıştır. 1970'lerin başlarında diğer enerji kaynaklarının üretim maliyetlerindeki artış, rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimini gündeme getirmiştir. 1990'ların sonundan itibaren rüzgar türbinlerinin kullanımı giderek artmış ve rüzgar türbinleri günümüzün önemli enerji üretim santrallerinden biri haline gelmiştir (Yılmaz, 2008).

Rüzgar türbinlerinin yaygınlaşması ve teknolojik gelişmeler rüzgar türbinlerinin daha verimli ve güvenilir hale gelmesini sağlamıştır. Rüzgar türbinleri 2000'li yıllarda ortalama 1 MW kapasiteli sistemler iken (rotor çapı, RD 50.17 m), 2018 yılında ortalama 2.6 MW kapasite ve üzeri büyüklükte sistemler (rotor çapı, RD 110.4 m) olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ayrıca 2022-2025 yılları arasında rüzgar türbinlerinin ortalama 5.8 MW'lık sistemler olması da beklenmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Rüzgar türbin boyutlarının yıllar içindeki değişimi [IRENA, 2019]

Günümüzde rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla farklı tip ve özelliklerde çeşitli rüzgar türbinleri geliştirilmiş olup söz konusu türbinler aşağıda özetlenmiştir.

4.2 Rüzgar Türbin Çeşitleri veya Sınıflandırılması

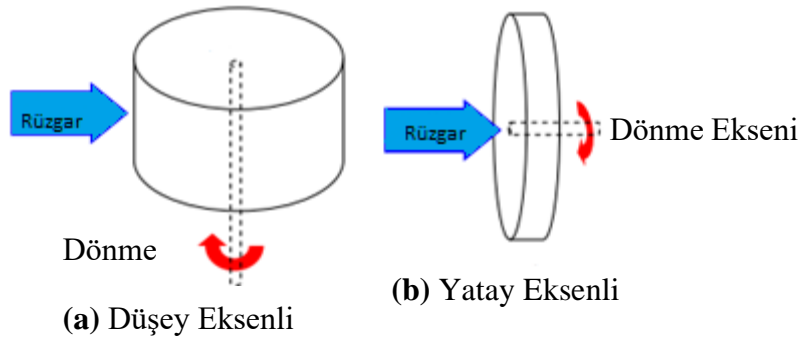
Günümüzde farklı teknolojiler kullanılan çeşitli rüzgar türbinleri bulunmakta olup genel olarak rüzgar türbinleri (RT) dönme eksenine, rotor büyüklüğüne, üretilecek güç büyüklüğüne, rüzgar alışı yönüne, türbinlerin çalıştığı rüzgar hızına, güç kontrol sistemine, rotor dönüş hızına ve kullanım yerine göre sınıflandırılabilir. Şekil 4.5'de genel olarak rüzgar türbin sınıflandırması verilmiştir (Kaya, 2014).



Şekil 4.5. Rüzgar türbinleri sınıflandırılması (Kaya, 2014)

4.2.1 Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri

Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri yatay eksenli ve düşey eksenli rüzgar türbinleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 4.6a'da düşey eksenli, Şekil 4.6b'de yatay eksenli rüzgar türbinini şematik olarak gösterilmiştir.

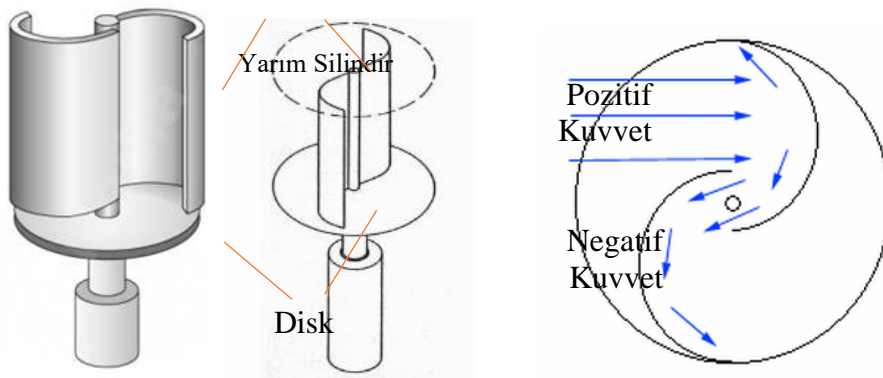


Şekil 4.6. Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri (Schubel ve Crossley, 2012)

a) Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu tip türbinlerde türbin düşey ekseninde ve rüzgarın geliş yönüne dik olarak konumlandırılmıştır. Bu türbinler bütün doğrultulardan gelen rüzgarları alabilmekte ve düşük rüzgar hızlarında enerji üretim amacıyla kullanılabilir. Günümüzde Darrieus ve Savanius rüzgar türbinleri olarak bilinen iki farklı Düşey Eksenli Rüzgar Türbini (DERT) bulunmaktadır.

İlk olarak Sigurd Savonius tarafından 1924 yılında geliştirilen **Savonius düşey eksenli rüzgar türbini** herhangi bir yönde esen rüzgarı alabilecek aerodinamik yapıya sahip olması sayesinde kolay harekete geçmekte ve yüksek tork (moment) üretimi sağlayabilmektedir. Bu türbinler iki yatay disk arasında yerleştirilen ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış “kanat” adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır (Şekil 4.7).

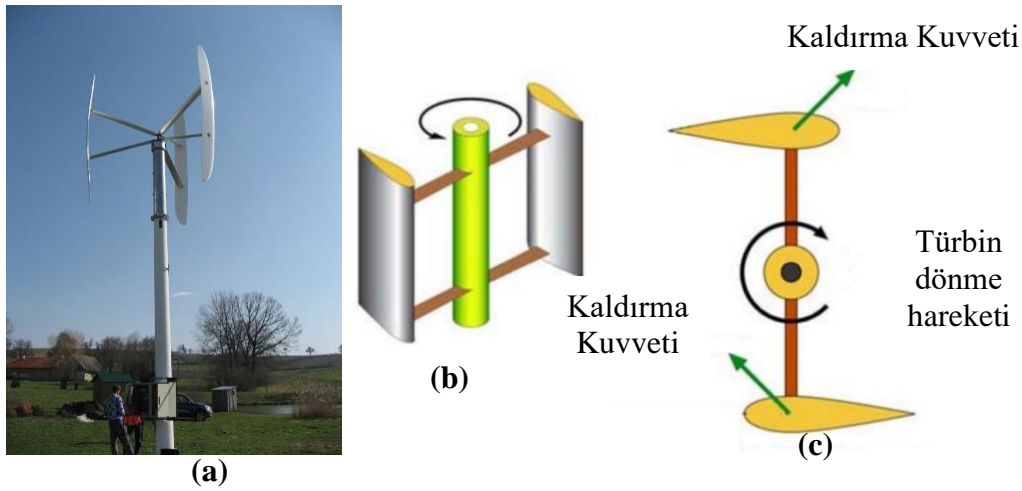


Şekil 4.7. Savonius düşey eksenli rüzgar türbini (Şenel 2012)

Söz konusu türbinlerde gelen rüzgarın etkisiyle, çarkı döndüren moment silindirin iç kısmında pozitif, dış kısmında ise negatif büyüklüktedir. Bu türbinlerde pozitif momentin negatif momentten büyük olması sayesinde pozitif moment yönünde bir dönme hareketi elde edilebilmektedir. Bu türbinlerin çeşitli üstünlükleri bulunmasına rağmen aerodinamik

performanslarının düşük olması nedeniyle günümüzde tarımsal sulama ile sınırlı kalmış uygulama alanına sahiptir (Karadağ, 2009).

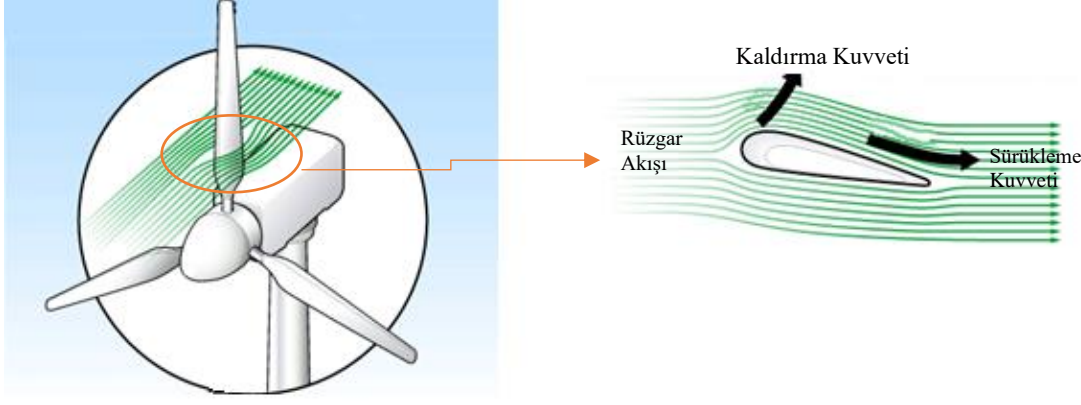
Darrieus düşey eksenli rüzgar türbini ilk kez Georges Darrieus tarafından 1927 yılında geliştirilmiş olup bu türbin, türbin mili etrafında uzun eksenli bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmiş kanatlardan oluşmaktadır. Bu türbinler rüzgarın etkisiyle kanat yüzeyleri arasında oluşan basınç farkından yararlanılarak dönme hareketi elde edilmesi prensibiyle çalışmaktadır (Şekil 4.8). Söz konusu rüzgar türbinleri, güç katsayısının düşük olması nedeniyle güç üretiminde tercih edilmemektedir (Karadağ, 2009).



Şekil 4.8. Darrieus düşey eksenli rüzgar türbini (Kaya, 2014)

b) Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT), kanatların rüzgara dik yönde konumlandığı sistemlerdir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kanat, aerofoil veya damlaform olarak isimlendirilen özel aerodinamik profil kesitlere sahiptir. Söz konusu aerodinamik profiller kanat alt ve üst yüzeyi arasında basınç farkı oluşturarak rüzgar türbinlerinden enerji üretilmesini sağlayan kaldırma kuvvetini oluşturmaktadır. Yatay eksenli üç kanatlı bir rüzgar türbini ve bu kanadın profili ve etrafındaki hava hareketi Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Yatay eksenli rüzgar türbinleri ve kaldırma kuvveti oluşumu (Kaya, 2014)

Yatay eksenli rüzgar türbinleri kanat sayısına göre, tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgar türbinleri (Şekil 4.10) olmak üzere dört gruba ayrılabilir (Kaya, 2014).

- **Tek kanatlı rüzgar türbinleri** sistemin toplam ağırlığının azaltılması amacıyla geliştirilmiştir. Bu türbinler, kanat üzerine etki eden yükleri azaltmak ve kanat hareketinin pürüzsüz olmasını sağlamak amacıyla kanatlar karşı ağırlıkla dengelenmektedir. Bu türbinlerde dönme hızı yüksek olup aşırı gürültülü çalışmaları da bilinmektedir.
- **İki kanatlı rüzgar türbinleri** üç kanatlı türbin maliyetlerinin azaltılması amacıyla geliştirilmiştir. Bu türbinlerde, rotora bağlı iki kanat olduğundan tek kanatlı türbinlere göre daha iyi dengeleme sağlanmıştır. Kanat dönüş hızı üç kanatlı rüzgar türbinlerine göre yüksek olduğundan bu türbinler üç kanatlı rüzgar türbinlerinden daha gürültülü çalışmaktadır.
- Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinleri olan **üç kanatlı rüzgar türbinlerinde**, kanatlar birbirine göre 120°'lik açılarda bulunmakta olup bu konumlandırma sayesinde kanatlar etki eden yükleri birbirlerini dengeleyebilmektedir. Bu türbinler tek kanatlı ve çift kanatlı türbinlerden daha düşük hızlarda çalıştığından bu türbinler daha az gürültüye sebep olmaktadır.
- **Çok kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri** rüzgar türbinlerinin gelişmemiş ilk örnekleri olarak kabul edilmektedir. Bu türbinler; sulama, tahıl öğütme ile ağaç kesme gibi yüksek tork veya momente ihtiyaç duyulan sistemlerde kullanılmaktadır. Bu türbinler ayrıca tek, çift ve üç kanatlı türbinlere göre daha düşük hızda ve gürültülü çalışmaktadır.



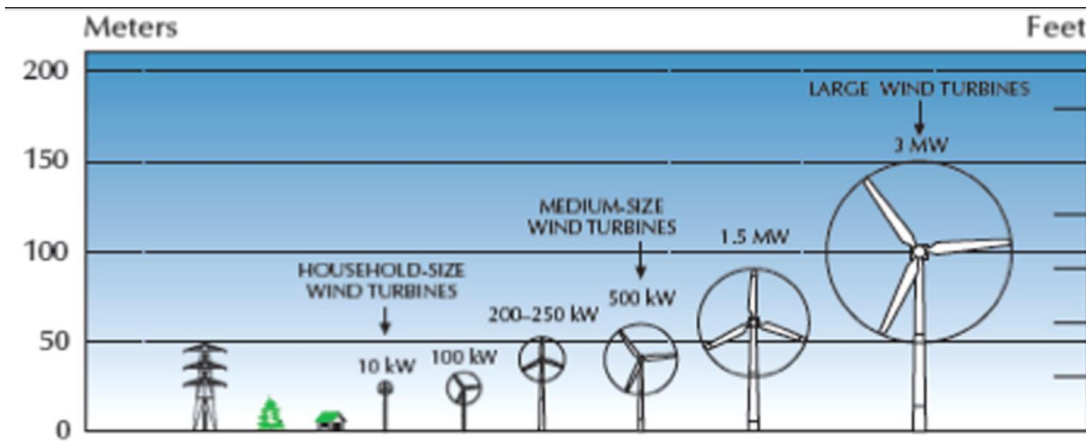
Şekil 4.10. Kanat sayısına göre yatay eksenli rüzgar türbinleri (Kaya, 2014).

4.2.2 Rotor büyüklüğüne göre rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri rotor büyüklüğüne (rotor çapı) göre de sınıflandırılabilir (Çizelge 4.1). Tipik bir büyük ölçekli ticari rüzgar türbini 50-100 m rotor çapına sahip 1 MW-3 MW aralığında güç kapasiteli sistemler iken; küçük ölçekli ticari rüzgar türbinleri 10-20 m rotor çapına sahip 25-100 kW aralığında güç kapasiteli sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 4.11).

Çizelge 4.1. Rotor büyüklüğüne göre rüzgar türbinleri (Tummala, 2016)

Türbin Tipi		Rotor Büyüklüğü (m)	Süpürme Alanı (m ²)	Güç Kapasitesi (kW)
Küçük Ölçekli	Mikro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.004-0.25
	Mini	1.25-3	1.2-7.1	0.25-1.4
	Ev Tipi	3-10	7-79	1.4-16
Küçük Ölçekli Ticari		10-20	73-314	25-100
Orta Ölçekli Ticari		20-50	314-1963	100-1000
Büyük Ölçekli Ticari		50-100	1963-7854	1000-3000



Şekil 4.11. Küçük, orta ve büyük ölçekli rüzgar türbinleri (Tummala, 2016)

Rüzgar türbin seçimi için türbin kurulumu yapılacak konumun rüzgar potansiyeli veya kaliteli rüzgar alıp alamama durumu, yerleşim yerlerine yakınlık durumu, şebekeye bağlantı durumu gibi çeşitli kriterlerden yararlanılmaktadır. Ticari amaçlı rüzgar çiftlikleri için rüzgar potansiyeli yüksek olan konumlar seçildiği için buralarda büyük ölçekli rüzgar türbinleri tercih ediliyorken; düşük rüzgar potansiyeline sahip konumlarda ise küçük ölçekli rüzgar türbinleri tercih edilmektedir. Ayrıca şebekeye bağlantı yapılamayan veya yapılması zor olan yerlerde özellikle de kırsal kesimlerde küçük ölçekli rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

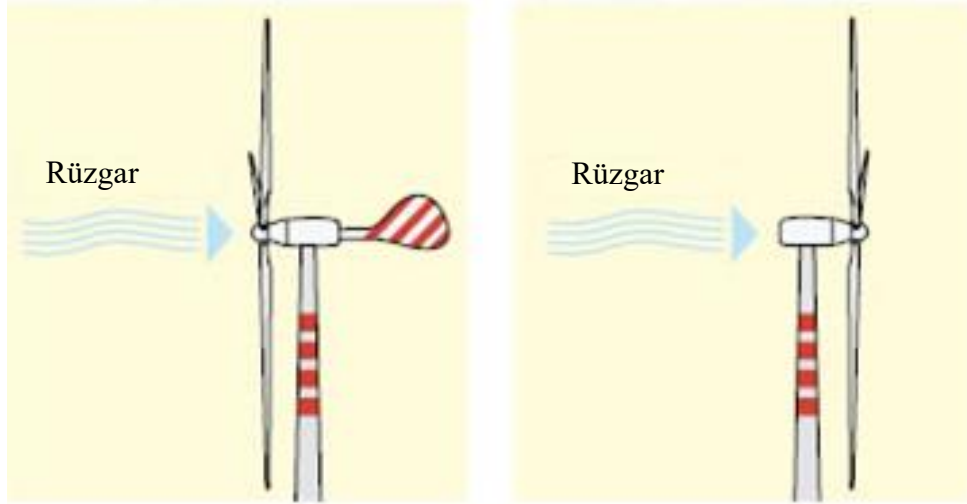
4.2.3 Rüzgar alış yönüne göre rüzgar türbinleri

Rüzgar alış yönüne göre rüzgar türbinleri önden ve arkadan rüzgarlı rüzgar türbinleri (Şekil 4.11) olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Karadağ, 2009).

- **Önden rüzgarlı rüzgar türbinlerinde** (Şekil 4.12a) kanatlar ve gövde rüzgara yönelmiştir. Bu türbinlerde kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelemesinden (Kulenin etkisiyle rüzgarın enerjisini kaybetmesi durumu) etkilenmemektedir. Bu türbinlerde rüzgara doğru yönelmenin sağlanabilmesi için kanat eğim (yaw) mekanizmasından

yararlanılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli önden rüzgar alan sistemler tercih edilmektedir.

- **Arkadan rüzgarlı rüzgar türbinlerinde** (Şekil 4.12b) kanat kulenin arkasında konumlandırıldığından kule gölgelemesi nedeniyle türbinden alınabilecek güç önden rüzgar alan sistemlere göre daha düşüktür.



(a) önden rüzgarlı

(b) arkadan rüzgarlı

Şekil 4.12. Rüzgar alışı yönüne göre rüzgar türbinleri (Kaya, 2014)

4.2.4 Rüzgar hızına göre rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri çalışma hızlarına göre **düşük hızlarda çalışan rüzgar türbinleri** ve **yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinleri** olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Karadağ, 2009).

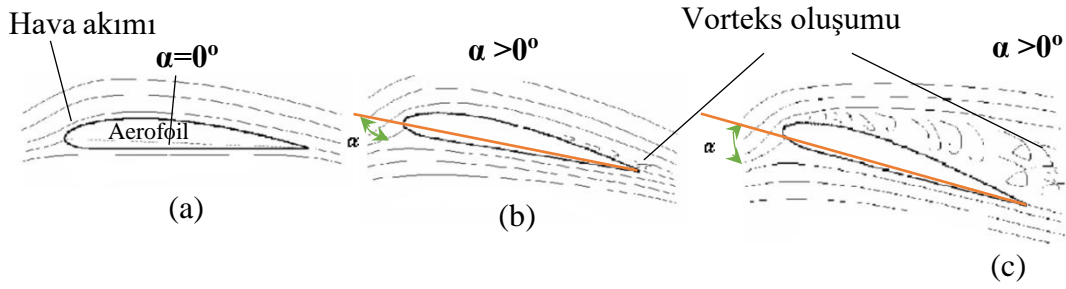
- **Düşük hızlarda çalışan rüzgar türbinleri** ilk olarak 1870'li yıllarda ABD'de geliştirilmiş olup bu türbinlerin kanat sayıları 12 ile 24 arasında değişmekte, türbin rotor çapı ise 5 ile 8 m arasında olmaktadır. Bu türbinler 2-3 m/s'lik rüzgar hızlarında kendiliğinden çalışmaya başlamaktadır. Bu tip türbinlerin elektrik üretim verimleri düşük olduğundan uygulamaları sulama amaçlı kullanım ile sınırlı kalmıştır.
- **Yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinlerinde** kanat sayısı 1 ile 4 arasında değişmektedir. Bu türbinlerde kanat sayısı arttıkça türbin verimi de yükselmektedir. Ancak üç kanattan fazla sayıda kanat olması durumunda, türbin maliyetlerini de önemli ölçüde artırdığından çok kanatlı türbinler tercih edilmemektedir. Bununla birlikte üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri de bu tip türbinlerin tercih edilmesinde önemli bir etkidir. Yüksek verimleri nedeniyle günümüzde elektrik üretimi amacıyla kullanılan rüzgar türbinleri yüksek hızlarda çalışan sistemlerdir.

4.2.5 Güç kontrol sistemine göre rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinlerinin genel olarak maksimum enerji üretimi yapılan minimum rüzgar hızı olarak tanımlanan **nominal hız**da çalışması istenmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinde, türbinin nominal hızlarında çalışmasını sağlamak amacıyla kanat hareket (pitch) mekanizması ve türbin eğim (yaw) mekanizmasından yararlanılmaktadır. Bu mekanizmalardan türbin eğim mekanizması, rüzgarın yön değiştirdiği durumlarda gövde ve kanatların rüzgar yönüne yönelmesi; kanat hareket mekanizması ise gelen rüzgarın şiddetine göre, kanadın açısal konumunu değiştirerek elde edilebilecek güç miktarının ayarlanabilmesini ve yüksek rüzgar hızlarında türbin elemanlarının zarar görmesinin engellemesini sağlamaktadır.

Rüzgar türbinlerinde **stall** ve **pitch** kontrol sistemleri gibi güç kontrol sistemlerinden yararlanılmakta olup bu sistemler aşağıda özetlenmiştir (Emniyetli, 2007; Aktepe, 2013).

- Küçük güçteki rüzgar türbinlerinde **stall kontrol sistemleri** kullanılmakta olup bu türbinlerde kanadın açısal konumunu değiştiren bir mekanizma bulunmamakta, kanat yüksek rüzgar hızlarında açısal konumunu rüzgar etkisiyle değiştirecek şekilde tasarlanmaktadır.
- Bu sistemlerde normal çalışma esnasında, rüzgar, kanat yüzeyini yalayarak (Şekil 4.13a) geçmekte olup bu durumda profilin üst ve alt yüzeyi arasında basınç farkı oluşarak kanat hareket etmektedir. Rüzgar hızının yüksek olduğu durumlarda ise kanadın hücum açısı artmakta (Şekil 4.13b) akım çizgileri kanat yüzeyinden ayrılarak girdap veya vorteksler (4.13c) oluşmaktadır. Bu olay **stall** olarak bilinmektedir. Söz konusu kontrol sistemi kullanılan türbinlerde kanat rüzgar nominal hızın üzerine çıktığında hücum açısı (α) artırılarak kanadın **stall etkisine** girmesi ve bu durumdan yararlanılarak güç kontrolünün sağlanması prensibiyle çalışmaktadır.



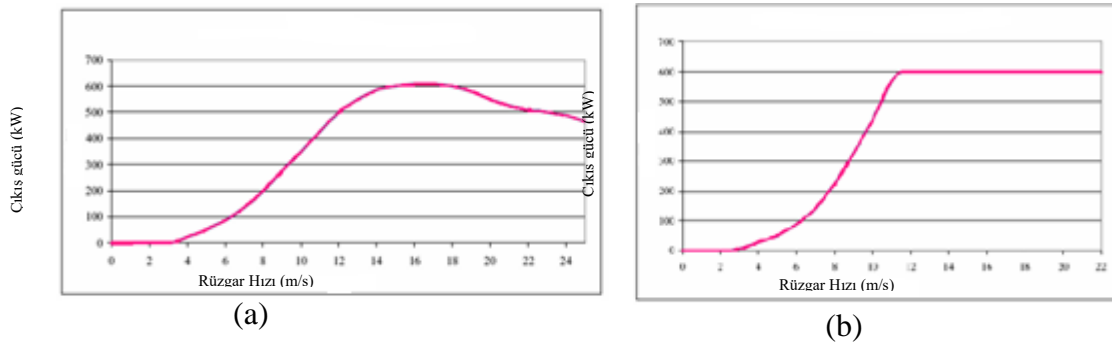
Şekil 4.13. Aerofoilde Stall Olayı (Kaya, 2014)

- **Pitch kontrollü türbinlerde** kanat döndürme (pitch) mekanizması bulunmakta olup bu mekanizma sayesinde kanat kendi eksenini etrafında dönebilmektedir (Şekil 4.14)



Şekil 4.14. Pitch kontrol sistemiyle kanat hareketi (Kaya, 2014)

- **Pitch kontrollü**, tüm rüzgar şartlarında türbin çıkış gücü ayarlanarak enerji üretimi artırılabilindiğinden bu sistemler **stall kontrollü** sistemlere göre gelişmiş sistemler olarak kabul edilmektedir. Günümüzde yüksek güç üretimi sağlayan büyük boyutlardaki ticari rüzgar türbinlerinde yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı **pitch kontrol mekanizması** kullanılmaktadır. **Stall kontrollü** türbinlerin temel avantajı hareketli parçalara sahip olmamaları ve karmaşık bir kontrol sistemine ihtiyaç duyulmaması şeklindedir (Karadağ, 2009). **Stall kontrollü** ve **pitch kontrollü** rüzgar türbinlerine ait karakteristik güç eğrileri Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Stall kontrollü (a) ve pitch kontrollü (b) türbinlerde güç eğrileri (Karadağ, 2009)

4.2.6 Rotor dönüş hızına göre rüzgar türbinleri

Rotor dönüş hızına göre rüzgar türbinleri **sabit hızlı** ve **değişken hızlı rüzgar türbinleri** olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Karadağ, 2009; Şenel, 2012).

- **Sabit hızlı rüzgar türbinleri** nominal rüzgar hızında, nominal güce ulaşmayı sağlayan sabit dönüş hızında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tip sistemler şebeke bağlantılı pek çok rüzgar türbininde kullanılmaktadır.
- **Değişken hızlı rüzgar türbinleri** sabit hızlı türbinlerden farklı olarak geniş bir hız aralığında verimli bir şekilde çalışabilmektedir. Bu türbinler, genelde kanat döndürme (pitch) sistemi ile birlikte kullanılmaktadır.

4.2.7 Kullanım yerine göre rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri kullanım yerindeki şebekeye bağlantı durumuna **şebeke bağlantılı** ve **şebeke bağlantısı olmayan** rüzgar türbinleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Karadağ, 2009).

- Rüzgar türbinlerinden üretilen elektriğin şebekeye aktararak kullanıcıya ulaştırıldığı sistemler **şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri** olarak bilinmektedir. Bu türbinler küçük ölçekli ve yüksek talep olan bölgelerin ihtiyaçlarının karşılanması için kullanılabilir. Günümüzde ticari olarak kullanılan büyük ölçekli rüzgar santralleri elektrik şebekesine bağlı, birden fazla rüzgar türbininden oluşan rüzgar türbin çiftlikleri şeklindedir.
- **Şebeke bağlantısı olmayan rüzgar türbinleri** elektrik dağıtım sistemine bağlı olmayan genellikle kırsal kesimlerde tercih edilen sistemlerdir. Bu türbinlerin güç kapasitesi 1-100 kW aralığında değişebilmekte olup söz konusu sistemler tarımsal sulama amaçlı ve küçük çaptaki konutların elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılabilir.

Günümüzde **yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbinleri** yaygın olarak kullanıldığından bu çalışmada söz konusu türbinler ele alınarak türbinleri oluşturan elemanlar incelenmiştir.

4.3 Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Elemanları

a) Kanat

Kanat, rüzgarın kinetik enerjisini alarak mekanik enerjiye çeviren, rüzgar türbinlerindeki enerji üretim zincirinin ilk halkası olan elemandır. Bu çalışmada rüzgar türbin kanadı detaylı olarak ele alınmakta olup kanat ile ilgili ilave bilgiler sonraki bölümlerde sunulmuştur.

b) Göbek

Rüzgar türbinlerinde kanatların yerleştirildiği veya bağlandığı parça göbek (hub) olarak isimlendirilmektedir. Göbek, kanatlardan aldığı gücü güç aktarım organlarına iletmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde Şekil 4.16'da verilen farklı geometrik şekillere sahip göbekler kullanılmaktadır.



Şekil 4.16. Yatay eksenli rüzgar türbinleri için farklı göbek elemanlar (Demirci, 2011)

c) Gövde/Makina Dairesi

Gövde veya Makine Dairesi rotor ve kule arasında bulunan, rüzgar türbinlerini oluşturan ve mekanik elemanları dış etkilerden koruyan bileşendir. Ayrıca bu eleman mekanik elemanlarda oluşan gürültünün azaltılmasını da sağlamaktadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde makine dairesi içerisinde düşük hızlı şaft, dişli kutusu, yüksek hızlı şaft, fren, jeneratör ve kontrol ünitesi gibi çeşitli elemanlar bulunmakta olup bu elemanlar aşağıda özetlenmiştir (DNV, 2002).

d) Düşük Hızlı Şaft ve Yüksek Hızlı Şaft

Rüzgar türbinlerinde düşük hızlı şaft ve yüksek hızlı şaft olmak üzere iki farklı şaft veya mil kullanılmaktadır. **Düşük hızlı şaft** kanatlardan alınan mekanik enerjiyi dişli kutusuna ileten eleman; **yüksek hızlı şaft** ise dişli kutusundan alınan enerjiyi jeneratöre ileten elemandır. Şaft rüzgar türbin güç kapasitesine ve çalışma koşullarına göre düşük karbonlu veya yüksek karbonlu çelik gibi farklı malzemeler kullanılarak imal edilebilmekte, akma dayanımı ve sertliğinin artırılması için çeşitli ısıl işlemlere tabi tutulabilmektedir (Şenel, 2012).

e) Dişli kutusu

Dişli kutusu, düşük hızlı (ana) şaft ile yüksek hızlı şaft arasında bulunan ana şafttaki düşük hız ve yüksek torku (momenti), yüksek hız ve düşük torka dönüştürerek torkun yüksek hızlı şaft üzerinden jeneratöre iletilmesini sağlayan elemandır. Rüzgar türbinlerinde dişli kutusu olarak çok kademeli alın dişli çark veya planet dişli mekanizması kullanılmaktadır (Şenel, 2012).

f) Fren

Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızı belli bir seviyenin üzerine çıktığında kanatlar ve mekanik elemanlara etki eden yük artmakta dolayısıyla türbin elemanları normalden daha fazla zorlanmaya maruz kalmaktadır. Bu durumda elemanlara zarar vermemek için sistemi yavaşlatmak veya durdurmak amacıyla frenleme sistemlerinden yararlanılmakta olup bu amaçla mekanik frenler kullanılmaktadır (Karadağ, 2009).

g) Jeneratör

Rüzgar türbinlerindeki mekanik enerji, jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmekte olup bu amaçla **senkron (alternatör)**, **indüksiyon (asenkron)** ve **doğru akım (DC) jeneratörler** kullanılmaktadır (Karadağ, 2009; Emniyetli, 2007).

h) Kontrol kutusu

Rüzgar türbinlerinde türbinin çalışma koşullarını sürekli olarak takip ederek eğim (yaw) mekanizmasını yönlendiren bir kontrol ünitesi ve kontrol kutusu bulunmaktadır. Kontrol kutusu herhangi bir aksaklık veya sorun olması durumunda (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) rüzgar türbinini kapatılarak türbin operatörüne sinyal gönderen eleman olarak da bilinmektedir (Karadağ, 2009).

ı) Anemometre

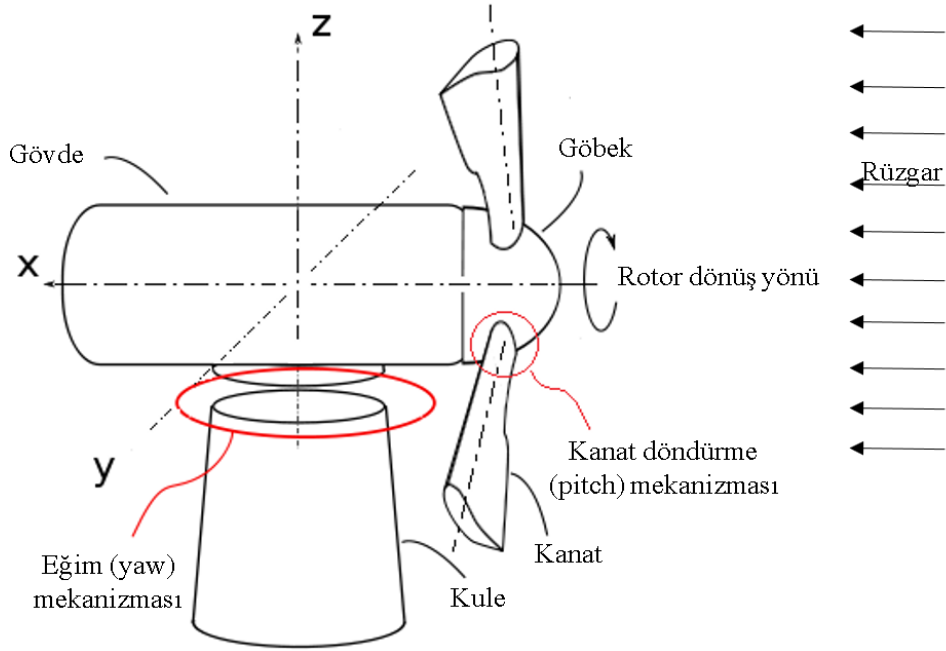
Rüzgar türbinleri belirli rüzgar hızlarında devreye girmekte ve belirli rüzgar hızlarında türbini korumak amacıyla devreden çıkarılmaktadır. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinde gelen rüzgarın hızını belirleyebilmek için anemometre olarak bilinen rüzgar hız ölçüm aletinden yararlanılmaktadır (Yerebakan, 2001).

i) Rüzgar gülü

Rüzgar türbinlerine gelen rüzgarın yönünü belirleyerek eğim (yaw) mekanizması yardımıyla türbinin rüzgara karşı yönelmesini sağlamak amacıyla rüzgar güllerinden yararlanılmaktadır (Emniyetli, 2009).

j) Eğim (yaw) Mekanizması

Rüzgar türbinlerinde, rüzgardan en iyi şekilde yararlanabilmek için türbin ve elemanlarının rüzgar yönünde olması gerekmektedir. Rüzgar gülünden alınan yön bilgisine göre türbinin istenilen yönde döndürülmesini sağlamak amacıyla türbin **eğim** veya **yaw mekanizmasından** yararlanılmaktadır (Karadağ, 2009). Şekil 4.17’de kanat ve türbin kontrol mekanizmaları gösterilmiştir.



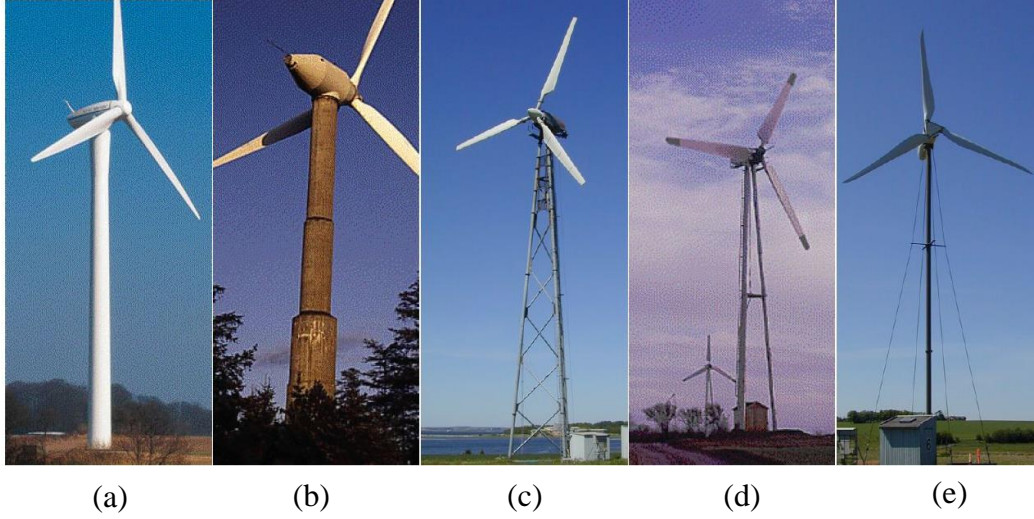
Şekil 4.17. Rüzgar türbinlerinde kontrol mekanizmaları (Kaya, 2014)

Ayrıca rüzgar türbinlerinde kanadın istenilen açısall pozisyona getirilmesi için şekilde de gösterilen **pitch kontrol sistemleri** olarak bilinen türbin kontrol mekanizmasından da yararlanılmaktadır.

k) Kule

Kanatlar ve makine dairesinden oluşan yapının belli bir yükseklikte tutulabilmesi için kule olarak bilinen eleman kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde boru şeklindeki çelik kule (a), boru şeklindeki beton kule (b), kafes kule (c), üç ayaklı kule (d) ve halatla tutturulmuş kule (e) şeklinde farklı kule yapıları kullanılabilir (Şekil 4.18). Günümüzde yatay eksenli modern rüzgar türbinlerinde boru şeklindeki çelik kuleler kullanılmakta olup bu kuleler belirli

uzunluklarda üretilen boru şeklindeki flanşlı bölmelerin civatalar vasıtasıyla birbirlerine tutturulmasıyla elde edilmektedir (DNV, 2002).



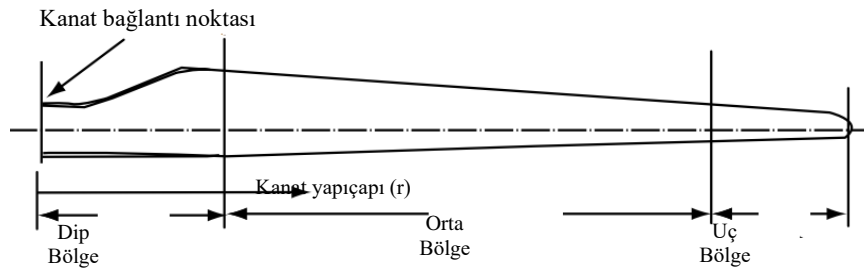
Şekil 4.18. Rüzgar türbinlerinde kullanılan kule yapıları (DNV,2002)

4.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Kanatları

4.4.1 Kanat yapısı ve malzeme

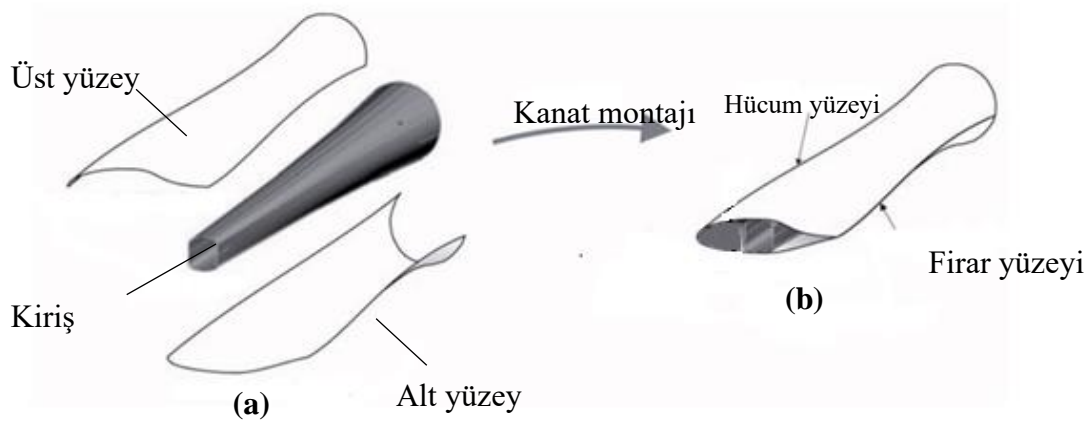
Aerodinamik ve yapısal fonksiyonuna göre rüzgar türbin kanadı (Şekil 4.19) aşağıda belirtilen üç kısımdan oluşmaktadır (Schubel ve Crossley, 2012; Kaya, 2014).

- **Kanat dip bölgesi**, kök kısmı veya bağlantı noktası ile kanadın aerofoil şeklini aldığı kısım arasında kalan bölge olup bu kısım kanatta en fazla zorlanmaya maruz kalan bölge olarak bilinmektedir.
- **Kanat orta bölgesi**, kanadın güç üretiminde en önemli bölge olarak bilinmekte olup bu kısmın tasarımında aerodinamik özellikler ön planda tutulduğu bilinmektedir.
- **Kanat uç bölgesi**, kanadın güç üretimi için önemli diğer bir bölgedir. Bu kısım ince/narin bir tasarıma sahiptir. Kanatta güç üretimi sırasında oluşan kayıplar ve gürültüyü azaltmak amacıyla bu kısımda çeşitli uç geometrileri de kullanılmaktadır.



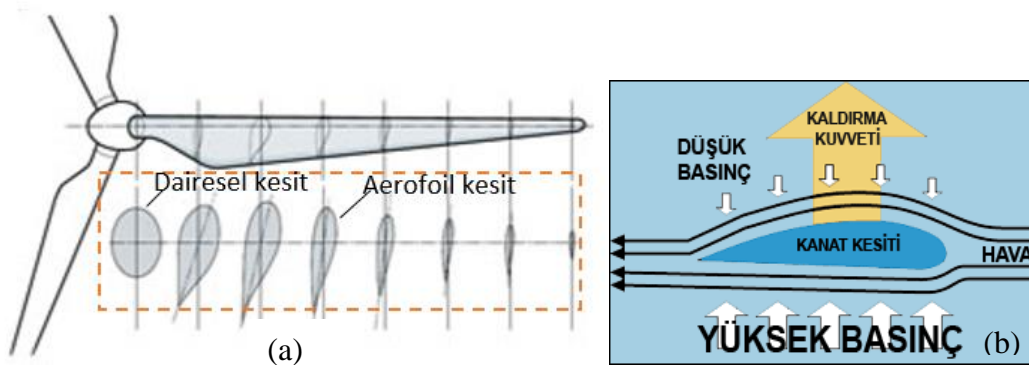
Şekil 4.19. Yatay eksenli rüzgâr türbin kanadı, kanat bölgeleri (Höyland, 2010; Kaya, 2014)

Rüzgâr türbinlerinde enerji üretim zincirinin ilk halkası olan kanat, rüzgârdan maksimum enerjisinin alınmasını sağlayan aerodinamik forma ve kullanım ömrü boyunca maruz kalabileceği etkilere karşı yeterli dayanıma sahip olmalıdır. Bu amaçla kanat, dış yapı (kabuk yapı) ve kiriş olmak üzere iki ana bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenlerden dış yapı, kanadın aerodinamik formunu veya geometrisini oluşturmaktadır olup, bu bileşen üst yüzey ve alt yüzey olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Kiriş ise kanada etki eden yükler karşısında kanadın gerekli dayanımını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Kaya, 2014). Şekil 4.20’de yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat ve bileşenleri verilmiştir.



Şekil 4.20. Yatay eksenli rüzgar türbin kanadı ve bileşenleri (Schubel, 2012)

Kanadın aerodinamik formu farklı büyüklüklerde dairesel kesit ve aerofoil olarak bilinen özel kesit profillerinin birleşiminden oluşmaktadır (Şekil 4.21a). Kanat, bağlantı noktasına veya kök kısmına yakın bölgelerde dairesel kesit; diğer bölgelerde ise farklı büyüklüklerdeki aerofoil kesitlere sahiptir. Aerofoiller, bir kiriş hattı üzerinde ve altında tanımlanmış 2 özel eğrinin oluşturduğu şekil olup bu eğrilerden üst eğrinin eğrilik yarıçapı alt eğrininkinden küçüktür. Bu durum aerofoilin her iki yüzeyinde farklı akışkan hızları ve basınç farkları ortaya çıkmasını sağlayarak aerofoilin alt kısmından üst kısmına doğru bir kaldırma kuvveti oluşturmaktadır (Şekil 4.21b).



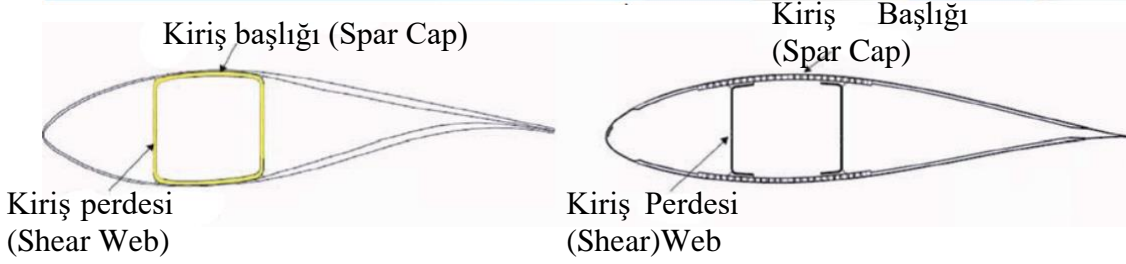
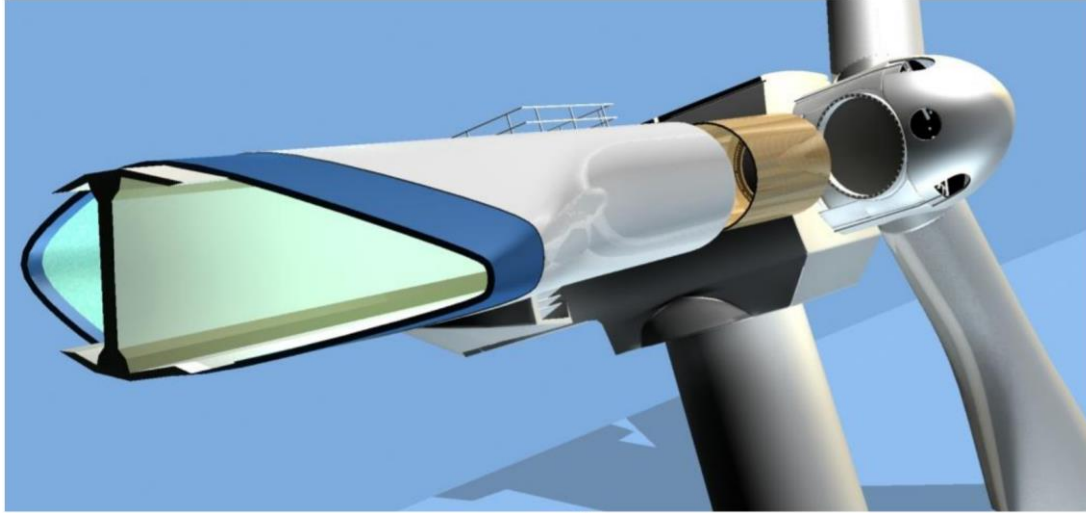
Şekil 4.21. Kanat aerodinamik formunu oluşturan profiller ve kaldırma kuvveti oluşumu (Kaya, 2014)

Aerofoiller sadece rüzgar türbin kanatlarında değil bütün havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Çeşitli kuruluşlar tarafından geliştirilen farklı aerofoiller, orjin ülkesi ve kullanılan kod veya kısaltmalar aşağıda belirtilmiştir (Kaya, 2014).

- Delft University of Technology (Hollanda) – DU
- NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı - ABD) – SERI-S
- İsveç Havacılık Araştırmaları Enstitüsü – FFA-W
- Althaus ve Wortmann (Almanya)– FX
- Riso Ulusal Laboratuvarı (Danimarka) – RISO
- Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (ABD) -NACA

Rüzgar türbin kanatlarında düşük reynolds sayılarında çalışan aerofoiller kullanılmakta olup bu amaçla geliştirilen aerofoillerden birisi de NREL SERİ (S Series) aerofoilleridir. Bu çalışmada da NREL S series aerofoilleri kullanılmış olup söz konusu aerofoillerle ilgili ilave bilgiler ilerleyen kısımlarda verilecektir.

Kanat yapısında kullanılan **destek yapı** veya **kanat kirişi**, dış yapıdan alınan yükleri göbeğine ileten eleman olup bu eleman kanada gerekli dayanımı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarında farklı geometrik şekillerde kiriş yapıları kullanılmaktadır (Şekil 4.22).

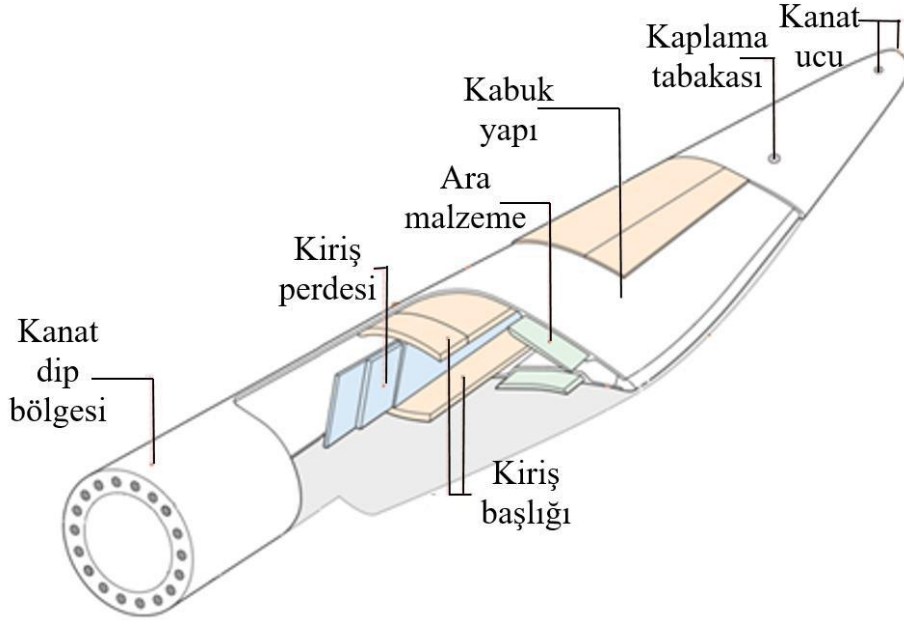


Şekil 4.22. Kanatta kullanılan kiriş yapılar (Höyland, 2010; Kaya, 2014)

Rüzgâr türbin kanadının tasarımı için önemli parametrelerden birisi de kullanılan malzemedir. Kanatta kullanılan malzemelerin aşağıda belirtilen özelliklere sahip olması istenmektedir.

- Kanada etki eden yüklere karşı gerekli dayanımı sağlayabilecek özellikte olması,
- Kanada etki eden yerçekimi kuvvetlerinin azaltılması amacıyla düşük yoğunluklu olması,
- Kanat tekrarlanan değişken yüklere maruz kaldığından yorulma ömrünün uzun olması şeklindedir.

Kanat farklı bileşenlerden oluşan kompozit yapı şeklindedir. Kanat kompozit yapısı farklı et kalınlıklarında, farklı fiber yönelime sahip, malzemelerin biraraya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan tipik bir yatay eksenli rüzgar türbin kanadı ve kanadın yapısını oluşturan malzemeler Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.23. Yatay eksenli rüzgar türbini kanadı ve yapısı (Kaya, 2014).

Rüzgâr türbin kanatlarında çelik, alüminyum, titanyum, cam veya karbon takviyeli kompozit malzemeler ve ağaç kullanılabilir. Çizelge 4.2’de söz konusu malzemelerin özgül ağırlık, kopma mukavemeti, elastiklik modülü ve yorulma mukavemeti gibi seçilmiş mekanik özellikleri ile özgül kırılma mukavemeti, özgül elastiklik modülü gibi malzemenin etki eden yükler karşısında şekil değiştirmeden kalma yeteneği olarak bilinen rijitlik parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kanatta kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri (Hau, 2006; Kaya, 2014)

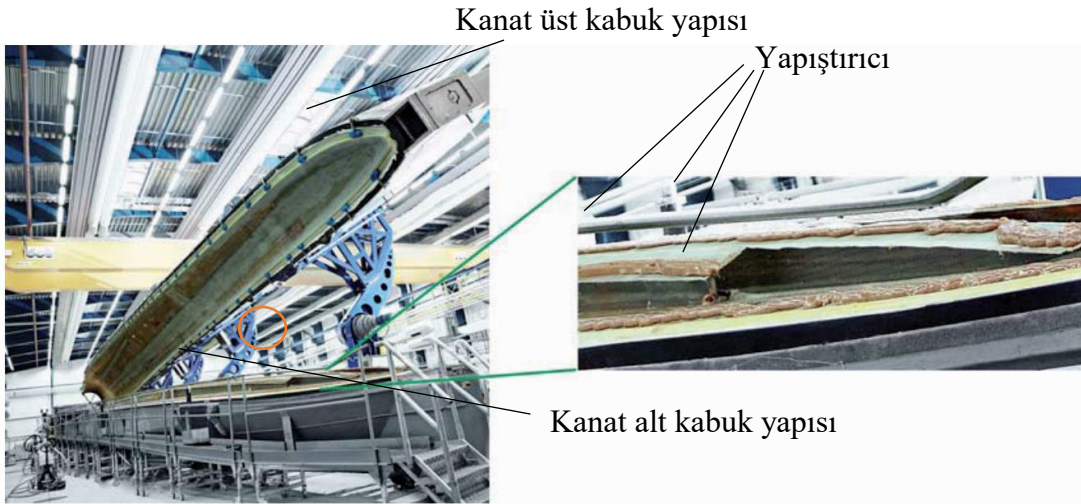
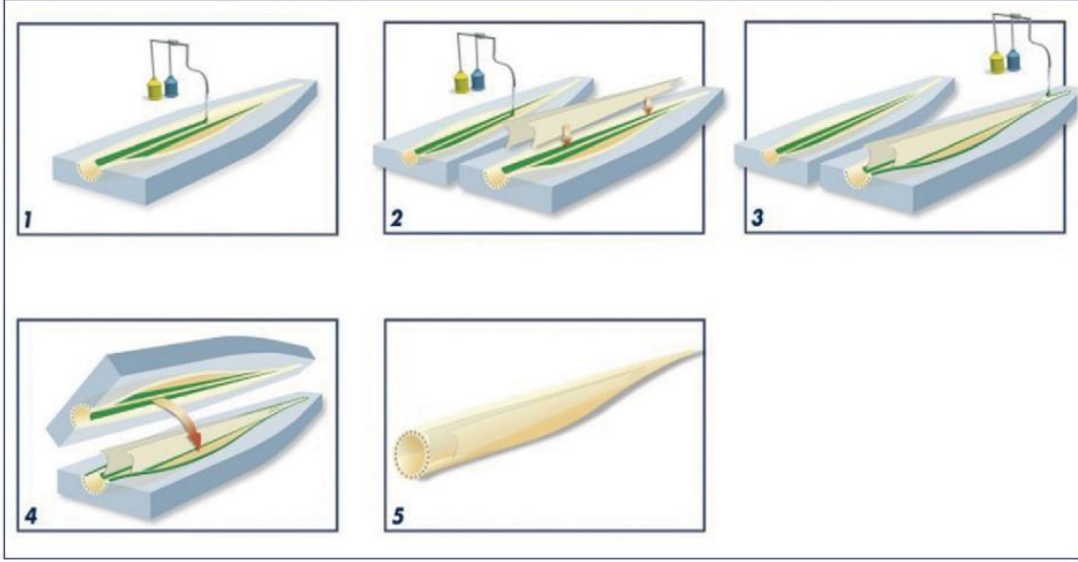
	Özgül ağırlık (γ) g/cm ³	Kopma Mukavemeti (σ_K) N/mm ²	Elastiklik modülü (E) kN/mm ²	Özgül kırılma mukavemeti σ_K/γ km	Özgül elastiklik modülü (E/ γ) 10 ³ km	Yorulma mukavemeti $\pm \sigma_A$ 10 ⁷ N/mm ²
Çelik (St52)	7,85	520	210	6,6	2,7	60
Alüminyum alaşımı (AlZnMgCu)	2,7	480	70	18	2,6	40
Alüminyum alaşımı (AlMg5)	2,7	236	70	8,7	2,6	20
Titanyum alaşımı	4,5	900	110	20	2,4	-
Cam fiber/epoksi kompozit	1,7	420	15	24,7	0,9	35
Karbon fiber/epoksi kompozit	1,4	550	44	39	3,1	100
Aramid fiber/epoksi kompozit	1,25	450	24	36	1,9	-
Ağaç (Sitka Spruce)	0,38	≈65	≈8	≈17	≈2,1	≈20
Ağaç/Epoksi kompozit	0,58	≈75	≈11	≈13	≈1,9	≈35

Günümüzde rüzgar türbin kanatlarında yaygın olarak iki ya da daha fazla malzemenin birleşimiyle elde edilen **kompozit malzemeler** kullanılmaktadır. **Kompozit malzemeler**, bu malzemeyi oluşturan bileşenlerin kompozit yapı öncesinde sahip olmadığı özelliklerin bu malzemeleri birleştirilerek elde edilmesi şeklindedir.

Kompozit malzeme, matris ve takviye malzemesi olmak üzere en az iki bileşenden oluşmaktadır. Takviye malzeme yük taşıyıcı görev üstlenmekte, etrafında bulunan matris yapı ise takviye elemanları bir arada tutmakta ve desteklemektedir. Kompozit malzeme yapısında köpük, balsa ağacı gibi çekirdek malzemeler de kullanılabilir. Günümüzde rüzgar türbin kanatlarında yaygın olarak cam elyaf epoksi kompozitler kullanılmaktadır. Büyük boyutlardaki rüzgâr türbinlerinde (5 MW ve üzerinde güce sahip türbinler) sadece karbon fiber veya cam fiber ile karbon fiberin birlikte kullanıldığı hibrit kompozit yapılar da kullanılabilir.

4.4.2. Kanat imalatı

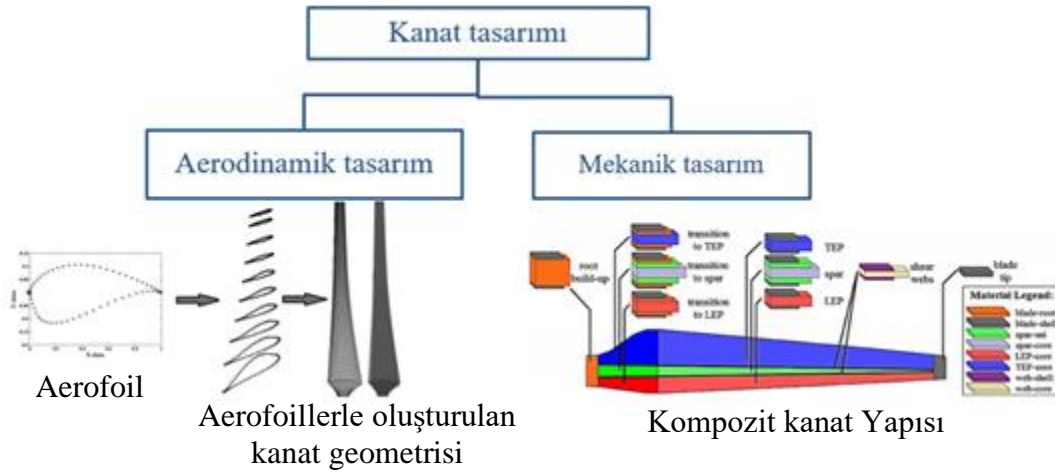
Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi kanat alt ve üst olmak üzere iki dış (kabuk) yapı ve bunların ortasında bulunan bir destek elemandan oluşmaktadır. Kanadın imalatı temelde söz konusu yapılar üretildikten sonra uygun yapıştırıcı kullanılarak kanadı oluşturan bileşenlerin biraraya getirilmesi veya montajı işlemidir. Kanadın imalatı için yapılan işlemler Şekil 4.24’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Kanadın imalatı (Subrahmanian ve Dubouloz, 2009; Höyland, 2010)

5. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIM VE OPTİMİZASYONU

Rüzgarın kinetik enerjisinin kanat tarafından en faydalı şekilde alınabilmesi ve kanadın çalışma koşullarında maruz kalabileceği etkilere karşı gerekli dayanıma sahip olabilmesi için kanadın belirli aerodinamik ve mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Kanadın **aerodinamik özellikleri** türbinden elde edilecek güç miktarını; **mekanik özellikleri** ise rüzgar türbinine ait elemanların çalışma koşullarındaki mekanik dayanımını belirlediğinden, kanat tasarımının **aerodinamik tasarım** ve **mekanik tasarım** olmak üzere iki farklı açıdan ele alınması gerekmektedir (Şekil 5.1). Kanadın **aerodinamik tasarımıyla** kanat dış yapısı veya aerodinamik formu; **mekanik tasarımıyla** ise kanadı oluşturan kabuk yapı, kiriş gibi elemanların boyutları ve kanadı oluşturmak amacıyla kullanılan malzemeler belirlenmektedir. Rüzgar türbin performansının iyileştirilmesi için kanat aerodinamik tasarım parametreleri ve mekanik tasarım parametrelerinin optimizasyonunun da gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.1. Kanadın aerodinamik ve mekanik tasarımı [Kaya ve Koç, 2019]

Tez çalışması kapsamında 1 m'lik kanadın aerodinamik ve mekanik tasarımı, aerodinamik performans analizi ve mekanik davranış analizi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak kanadın aerodinamik performansı ve mekanik davranışı dikkate alınarak optimizasyon yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan işlemler aşağıda özetlenmiştir.

- Kanat Elemanı Momentum Teorisinden yararlanılarak 1 m'lik kanadın aerodinamik tasarım parametreleri belirlenmiş ve aerodinamik ön tasarımı gerçekleştirilmiştir.

- Kanat Elemanı Momentum Teorisini kullanarak aerodinamik tasarım ve performans analizleri gerçekleştirmek için kullanılan Qblade yazılımından yararlanılarak ön tasarımı yapılan kanadın aerodinamik performansı değerlendirilmiştir.
 - Kanat Elemanı Momentum Teorisindeki sınırları/eksiklikleri gidermek için Kanat Elemanı Momentum Teorisinde Shen'in Kök ve Uç Düzeltmesi, Shen'in 3 Boyutlu Düzeltmesi (Himmelskamp Etkisi) Hernandez ve Crespo'nun Reynolds Sayısı Sürüklenme Düzeltmesi ve Aerofoil İnterpolasyonu/Kesit İnterpolasyonu düzeltmeleri yapılmıştır.
 - Kanat Elemanı Momentum Teorisindeki sınırlar/eksiklikler giderilerek ön tasarımı yapılan kanadın aerodinamik performansı değerlendirilmiştir.
- Aerodinamik performans analizi sonuçları dikkate alınarak kanattan daha fazla enerji üretilmesini sağlayan, düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayan kanat tasarımının belirlenmesi için aerodinamik optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Bu kapsamda kanadın ön tasarımıyla belirlenen aerodinamik tasarım parametreleri esas alınarak kanadın aerodinamik performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır.
- Qblade yazılımının QFEM modülünden yararlanılarak kanadın mekanik tasarımı için ön tasarım çalışması yapılmış ve kanadın et kalınlığının kanat uzunluğu boyunca değişimi incelenmiştir.
- Farklı türbülans modelleri için yapılan HAD analizleri sonucu kanatta kullanılan aerofoillerin aerodinamik performansı değerlendirilmiştir.
- Aerodinamik optimizasyon sonucu belirlenen aerodinamik tasarım parametreleri dikkate alınarak kanadın aerodinamik geometrisi veya formu oluşturulmuş ve farklı türbülans modelleri için yapılan HAD analizleriyle, kanadın aerodinamik performansı değerlendirilmiştir.
- Kanadın ön mekanik tasarımı sonucunda belirlenen mekanik tasarım parametreleri kullanılarak kanat geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan kanat geometrisi için HAD ve FEM metodlarının birleştirildiği akışkan yapı etkileşim (FSI) analizleri gerçekleştirilerek kanadın mekanik davranışı belirlenmiştir.
- Mekanik davranış analiz sonuçları dikkate alınarak gerekli dayanıma sahip, hafif ve ekonomik kanat tasarımının belirlenmesi amacıyla yapısal optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Bu kapsamda kanadın ön mekanik tasarım parametreleri esas alınmıştır.
- Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) Tarafından Küçük ölçekli rüzgar türbinleri için geliştirilen IEC 61400-2 standartları dikkate alınarak kanadın tasarım doğrulaması yapılmıştır.

5.1. Kanadın Aerodinamik Tasarımı

Rüzgar türbinlerinin temel fonksiyonu havanın kinetik enerjisini önce mekanik enerjiye ve daha sonra elektrik enerjisine dönüştürmektir. Rüzgar türbininin performansı genel olarak türbinin aerodinamik tasarım parametreleri ve kanat aerodinamik formuna bağlıdır. Rüzgar türbini ve kanadın **aerodinamik tasarımı** için ihtiyaç duyulan temel parametreler, aerodinamik teoriler ve yaklaşımlar, kanadın aerodinamik tasarımı ve performans analizi konuları ele alınmıştır.

5.1.1. Temel Aerodinamik Tasarım Parametreleri

Tez çalışması kapsamında yürütülecek **aerodinamik tasarıma** altyapı oluşturması amacıyla bu kısımda akışkanlar mekaniği, aerodinamik ve akışla ilgili karakteristik özellikler özetlenmiştir.

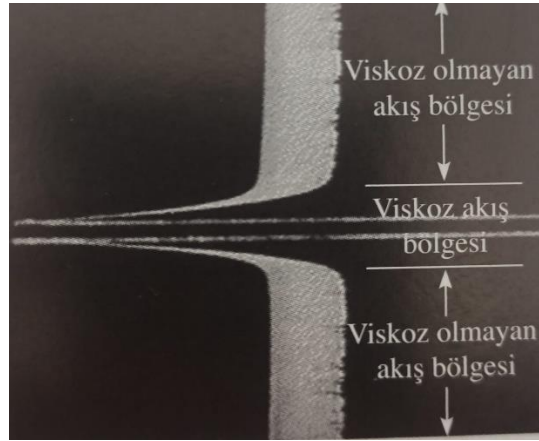
Katı ve sıvı haldeki akışkanların durağan haldeki ve hareket halindeki davranışları ve söz konusu akışkanların diğer akışkanlar ve katılarla oluşturdukları sınır etkileşimleri ile ilgilenen bilim dalı **Akışkanlar Mekaniği**dir. Gazların, özellikle havanın uçak, roketler, otomobiller ve rüzgar türbinleri gibi cisimlerin etrafındaki yüksek ve düşük hızlı akışı **aerodinamik** alanı tarafından incelenmektedir.

Akışkanlar Mekaniği, uçakların hareket etmesi (uçması veya gitmesi), denizaltıların, roketlerin, jet motorlarının, rüzgar türbinlerinin çalışması, biyomedikal cihazların ve elektronik elemanların soğutulması, su, ham petrol ve doğalgazın taşınması gibi uygulamaların tasarım ve analizi için kullanılan önemli bir bilim dalıdır. Uygulamada çeşitli akış tipleriyle karşılaşılmaktadır. Akış tiplerini inceleyebilmek için söz konusu akışların bazı ortak özelliklerini (Viskoz-Viskoz olmayan Akış, Sıkıştırılabilir-Sıkıştırılmaz Akış, Laminer-Türbülanslı Akış) dikkate alarak çeşitli sınıflandırmalar yapılabilmekte olup söz konusu sınıflandırmalar özetlenmiştir.

İki akış tabakasının birbirine göre bağıl hareket sırasında aralarında sürtünme kuvveti olduğundan, daha yavaş hareket eden tabaka, hızlı tabakayı yavaşlatmaya çalışmaktadır. Akışa karşı oluşan bu iç direnç, akışkanın iç yapışkanlığının bir ölçüsü olan ve viskozite olarak bilinen akışkan özelliği ile ölçülmektedir. Viskozite sıvılarda moleküller arasındaki çekim kuvvetlerinden, gazlarda ise moleküllerin çarpışmalarından kaynaklanmaktadır. Uygulamada viskozitesi olmayan bir akışkan bulunmadığından her akış için bir dereceye kadar viskoz etkiler söz konusudur. Sürtünme etkilerinin önemli olduğu akış **Viskoz Akış** olarak adlandırılmaktadır. Tipik olarak katı yüzeylerden uzak bölgelerde viskozite terimlerinin ihmalî sonuçların doğruluğunu önemli derecede etkilemeden analizi basitleştireceği kabul

edilmektedir. Bu nedenle uygulamada viskoz kuvvetlerin atalet ve basınç kuvvetlerine göre çok küçük olduğu bölgelerde **Viskoz Olmayan Akış** bölgeleri kavramından yararlanılmaktadır.

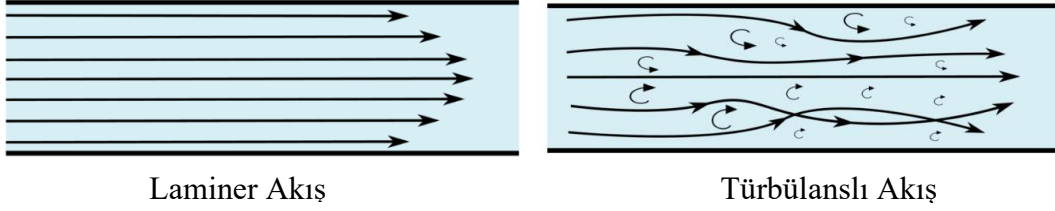
Uniform hızlı bir akışkan akımına paralel olarak yerleştirilen düz bir plakanın etrafındaki **viskoz** ve **viskoz olmayan akış bölgeleri** Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekildeki plakanın her iki tarafına yapışan ve viskoz etkilerin önemli olduğu plaka yüzeyine yakın ince tabaka **viskoz akış bölgesi**; plakanın her iki tarafında plakanın varlığından etkilenmeyecek kadar uzakta bulunan akış bölgeleri ise **viskoz olmayan akış bölgesi** olarak bilinmektedir.



Şekil 5.2. Viskoz ve Viskoz olmayan akış bölgeleri [Çengel ve Cimbala, 2008]

Bir akış, akış boyunca yoğunluğun değişimine göre **sıkıştırılabilir** ya da **sıkıştırılmaz** akış olarak sınıflandırılabilir. Yoğunluğun akış boyunca her yerde yaklaşık sabit kaldığı durumda akışın **sıkıştırılmaz** olduğu kabul edilmektedir. Bir akış sıkıştırılmaz kabul ediliyorsa, akışkanın hacmi akışkanın hareketi boyunca değişmemektedir. Sıvıların yoğunluğu sabit olduğundan sıvı akışları genellikle **sıkıştırılmaz** olarak değerlendirilmektedir. Gaz akışlarında ise yoğunluk farkı görülebilmekte olup genellikle yoğunluk farkının %5 in altında olduğu durumlardaki akış **sıkıştırılmaz** olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla hava ile ilgili sıkıştırılabilirlik etkileri yaklaşık **100 m/s**'nin altındaki hızlarda ihmal edilebilmekte, söz konusu akışlar **sıkıştırılmaz** olarak kabul edilebilmektedir.

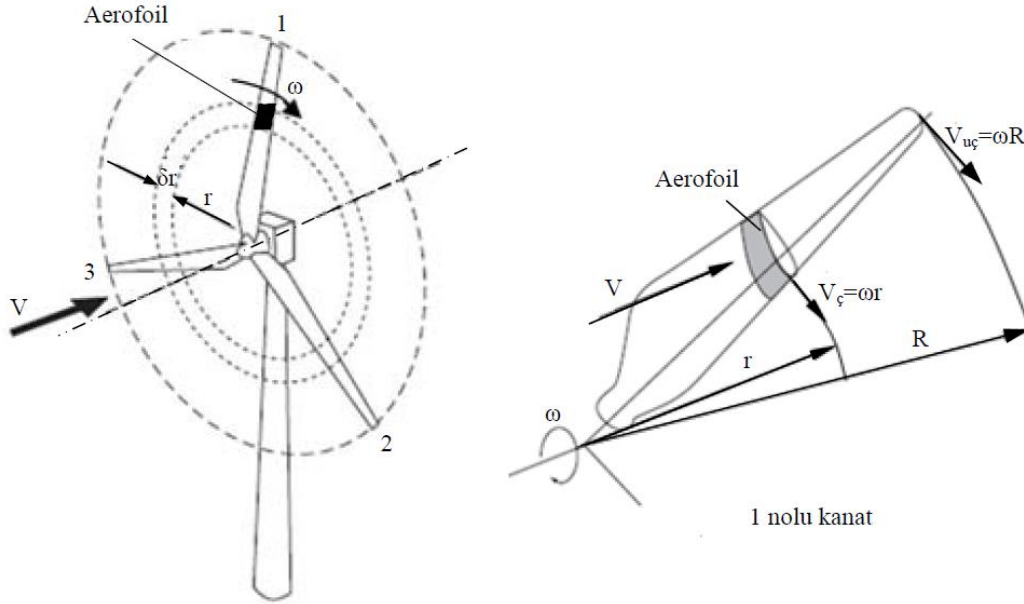
Bazı akışlar düzenli ve çalkantısız iken; bazıları ise oldukça düzensiz ve çalkantılıdır. Çalkantısız akışkan tabakalarıyla karakterize edilen düzenli akış hareketi **laminer akış** olarak bilinmektedir. Yağlar gibi yüksek viskoziteli akışkanların düşük hızlı akışı genellikle **laminer**dir. Yüksek hızlarda görülen ve hız çalkantılarıyla nitelendirilen düzensiz akış hareketi ise **türbülanslı akış** olarak adlandırılmaktadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Laminer ve türbülanslı akış

Bir akış alanındaki hız dağılımı, akış hızı temel boyutlarının sadece birine, her ikisine veya her üçüne göre değişiyorsa bu akışın sırasıyla 1, 2 ya da 3 boyutlu olduğu söylenebilmektedir. Tipik akışların üç boyutlu hareketi söz konusu olduğundan akışkan hızı 3 yönde de değişebilmekte olup bu durumdaki akış **üç boyutlu akış** olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte hızın belirli yöndeki değişimi diğer yönlerdeki değişimlere göre daha küçük ve ihmal edilebilir büyüklükte de olabilmektedir. Bu gibi durumlarda ise akış, analizin daha kolay yapılabilceği şekilde **bir** ya da **iki boyutlu akış** olarak da kabul edilebilmektedir.

Tipik bir **yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbini** ve bu türbine ait kanat Şekil 5.4'de verilmiş olup burada, V rüzgar hızı(m/s), ω kanat açısai hızı (rad/s), R kanat yarıçapı, r aerofoilin kanat üzerindeki konumu, $V_{uç}$ kanat uç hızını (m/s) göstermektedir.



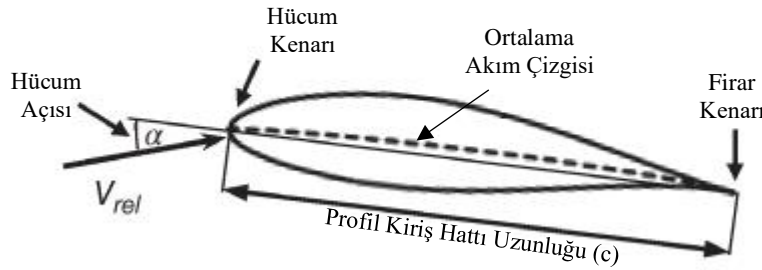
Şekil 5.4. Tipik bir yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbini ve kanat (Şenel, 2012)

Kanatın aerodinamik tasarımı için çeşitli parametrelerden yararlanılmakta olup söz konusu parametreler aşağıda verilmiştir.

- **Rüzgârdan Alınan Güç (N)**; rüzgâr hızı (v), havanın yoğunluğu (ρ) ve kanadın süpürme alanına (A) bağlı olup aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$N = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5.1)$$

- Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını etkileyen temel parametrelerden birisi **kanat sayısı**dır. Kanat sayısı arttıkça türbinden elde edilecek güç miktarı ve türbin verimliliği yükselmekte iken, kanadın açısız hızı azalmaktadır. Bununla birlikte kanat sayısı arttıkça türbin maliyetleri de yükselmektedir. Yatay eksenli üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde kanatların birbirine göre 120°'lik açısız konumda bulunmasının sağladığı kanada etki eden yüklerin birbirlerini dengeleyebilme durumu, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinin ekonomik olması ve estetik uygunluğu bu türbinleri günümüzde yaygın olarak kullanılır hale getirmiştir.
- Rüzgâr türbin kanatları **aerofoil** olarak bilinen özel aerodinamik profillerden oluşmakta olup aerofoiller üst eğri ve alt eğri olmak üzere iki farklı eğrinin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Üst ve alt eğrinin başlangıç noktaları **hücum kenarı**; son noktaları ise **fırar kenarı** olarak isimlendirilmektedir. Üst ve alt eğri arasındaki yatay mesafe **profil giriş hattı uzunluğu** (veter uzunluğu) olarak bilinmektedir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Aerofoil ve fiziksel büyüklükleri [Schmitz, 2019]

Bu profiller rüzgârın sahip olduğu enerjinin kanat tarafından alınmasını sağlayan aerodinamik kuvvetlerin oluşumunu sağladığından **uygun aerofoil seçimi** de önemli bir aerodinamik tasarım parametresi olarak kabul edilmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri düşük reynolds hızlarında çalışan sistemler olduğundan söz konusu türbinlere ait tasarım gereksinimleri genel havacılık uygulamalarında kullanılanlardan farklıdır. Bu nedenle söz konusu **aerofoiller** havacılık uygulamalarında kullanılan **aerofoillerden** yararlanılarak şekillendirilmiş

özgün tasarımlardır. Amerikan Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory, NREL) tarafından rüzgar türbinleri için geliştirilen özel **aerofoiller** Çizelge 5.1’de verilmiştir.

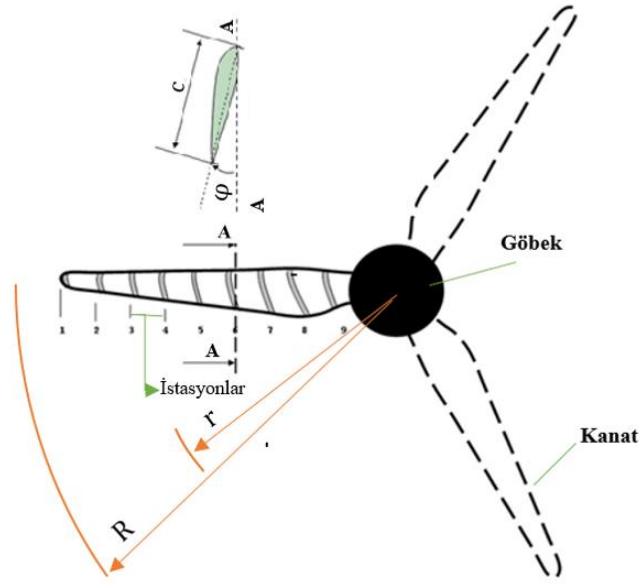
Çizelge 5.1. NREL tarafından rüzgar türbinleri için geliştirilen aerofoiller [Somers, 2005]

Türbin Rotor Yarıçapı (R)	Kök Bölgesi	Orta Bölge	Uç Bölgesi
1–3 m	S835	S833	S834
3–10 m	S823	-	S822
10–20 m	S804	S801	S802
	S804	S801	S803
	S807	S805	S806
	S807	S805A	S806A
	S808	S805A	S806A
20–30 m	S821	S819	S820
	S811	S809	S810
	S814	S812	S813
20–40 m	S815	S812	S813
	S814	S825	S826
	S815	S825	S826
30–50 m	-	-	S829
	S818	S816	S817
40–50 m	S818	S830	S831
	S818	S830	S832
	S818	S827	S828

- Kanadın **aerodinamik tasarımı** için önemli olan parametlerden birisi de **kanat geometrisidir**. Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi kanat farklı büyüklüklerde ve farklı açısız pozisyonlarda yerleştirilmiş dairesel veya aerofoil kesitli kısımlardan oluşmaktadır. Tipik bir yatay eksenli 3 kanatlı rüzgar türbini ve bu türbine ait bir kanat üzerinde rüzgar türbinlerine ait aerodinamik tasarım parametreleriyle kanat geometresini oluşturmak için kullanılan parametreler Şekil 5.6’da verilmiştir.

•

Burada; “r” kanadın belirlenen istasyon noktasının kanat göbeğine olan uzaklığı, “R” rotor yarıçapı, “c” kanat elemanına ait kanat profil kirişi uzunluğu veya veter uzunluğu ve “φ” hatve açısı veya bağlama açısıdır. Kanadın aerodinamik formunu oluşturan sözü edilen parametreler bir sonraki kısımda verilecek olan aerodinamik teorilerden yararlanılarak belirlenmektedir.



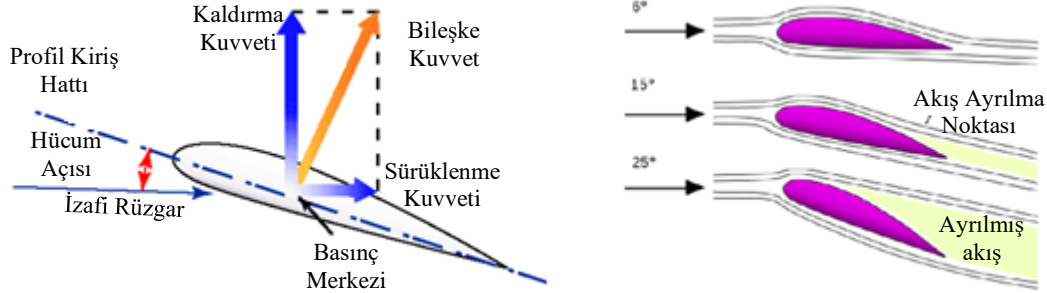
Şekil 5.6. Yatay eksenli 3 kanatlı rüzgar türbinleri için, kanat ve aerodinamik tasarım parametreleri [Kaya, 2012]

Aerofoillerin boyutları ve açısız pozisyonu, istenilen aerodinamik performans, maksimum rotor gücü ve dayanım gibi parametreler dikkate alınarak belirlenmektedir. Şekil 5.7’de rüzgarın etkisiyle kanatta oluşan aerodinamik kuvvetler verilmiş olup, **aerofoilde** rüzgara dik yönde **Kaldırma Kuvveti (Lift)**, rüzgar yönünde ise **Sürüklenme Kuvveti (Drag)** oluşmaktadır. **Aerofoilde** oluşan kaldırma kuvveti rüzgarın enerjisinin kanatlar tarafından alınmasını sağlamaktadır.

Rüzgar kanada yüksek hücum açılarıyla geldiğinde kanatta oluşan kaldırma kuvveti (Lift) de artmaktadır (Şekil 5.7). Ancak çok yüksek hücum açılarında kanat bir kararsızlık/düzensizlik durumu olarak da bilinen **Stall** durumuna geçmektedir. Bu aerodinamik olarak istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle kanadı oluşturan aerofoil kesitlerin maksimum gücün elde edilmesini sağlayacak açısız pozisyonda (optimum hücum açısında) konumlandırılması gerekmektedir [Khaled, M., 2017].

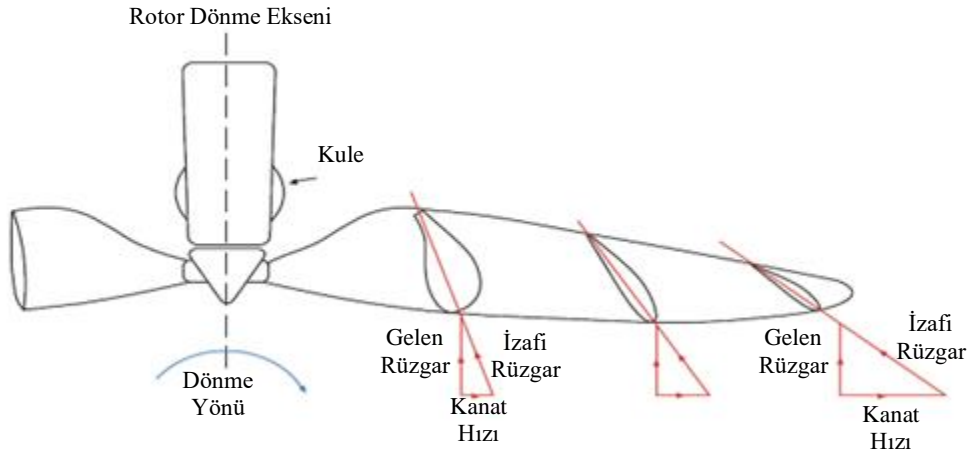
Aerofoiller, kaldırma kuvveti sürüklenme kuvvetinden çok daha büyük olacak şekilde tasarlanmış özel profillerdir. Fakat yüksek hücum açılarında özellikle de **Stall** durumunda sürüklenme kuvveti önemli miktarda artmaktadır. Bu nedenle aerofoil açısız pozisyonu belirlenirken en yüksek kaldırma kuvvetinin elde

edilebilmesinin yanında, sürüklenme kuvvetinin düşük düzeyde olması göz önünde bulundurulmalı; aerofoil **en uygun/optimum kaldırma kuvveti/sürüklenme kuvveti oranına** sahip olacak şekilde konumlandırılmalıdır.



Şekil 5.7. Aerofoilde aerodinamik kuvvetlerin oluşumu ve farklı açısız pozisyonlar için aerofoilin davranışı [Khaled M., 2017]

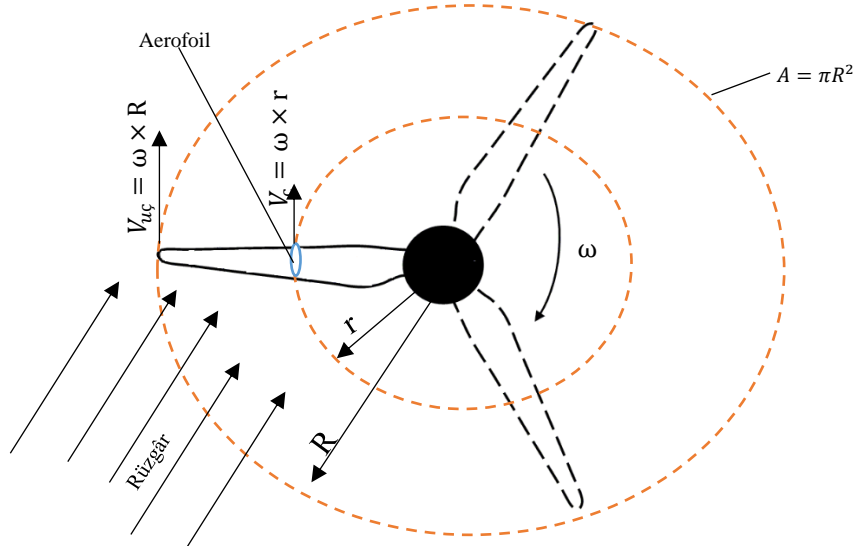
Kanadın kök kısmından uç kısmına doğru, relatif (izafi) rüzgar hızı da yükselmektedir. Bu nedenle kanat kök bölgesi yakınlarındaki aerofillerin, hatve açısı veya bağlama açısı uç kısmına doğru giderek azalmaktadır. Başka bir ifadeyle kanat uzunluğu boyunca aerofoilin açısız pozisyonu değişmekte olup kanat hatve açısı kanadın kök bölgesinde 10-20° aralığı iken, uç bölgesinde ise yaklaşık 0° olmaktadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Kanat uzunluğu boyunca aerofoilin açısız konumunun değişimi [Khaled, M., 2017]

- **Uç-hız Oranının (λ) Seçimi** Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansının belirlenmesinde önemli parametrelerden birisi olan **uç-hız oranı**; kanat uç hızının ($V_{uç} = \omega \times R$) rüzgâr hızına ($V_{rüzgâr}$) oranıdır (Şekil5.9).

$$\lambda = \frac{V_{uç}}{V_{rüzgâr}} = \frac{\omega \times R}{V_{rüzgâr}} \quad (5.2)$$



Şekil 5.9. Rüzgar türbinlerinde uç-hız oranı [Kaya, 2012]

Uygun uç-hız oranı (λ) seçiminde verimlilik, moment (tork), dayanım, aerodinamik özellikler ve ses/gürültü göz önünde bulundurulmalıdır (Çizelge 5.2). Rüzgar türbinlerinin verimi, **uç-hız oranının** (λ) artmasıyla yükseltilebilir (Gasch ve Twele, 2002). **Uç-hız oranındaki** (λ) artış aynı zamanda yükselen ses, aerodinamik kuvvetler ve santrifüj kuvvetler kaynaklı gerilmelere de neden olmaktadır.

Yüksek uç-hız oranı (λ) için düşük profil giriş hattı uzunluğuna ihtiyaç duyulmakta olup bu durumda da kanat dar bir geometri şeklinde olmaktadır. Ayrıca bu durum azalan malzeme kullanımı ve düşük üretim maliyetlerinin ortaya çıkmasını da sağlayabilmektedir. Şekil 5.10'da uç-hız oranına göre farklı kanat geometrileri verilmiştir.

Santrifüj ve aerodinamik kuvvetler yüksek uç-hız oranıyla (λ) ilişkilidir. Artan kuvvetler kanadın yapısal bütünlüğünün korunma zorluğu, kanatta hasar veya kırım oluşması gibi olumsuz durumlar anlamına gelmektedir.

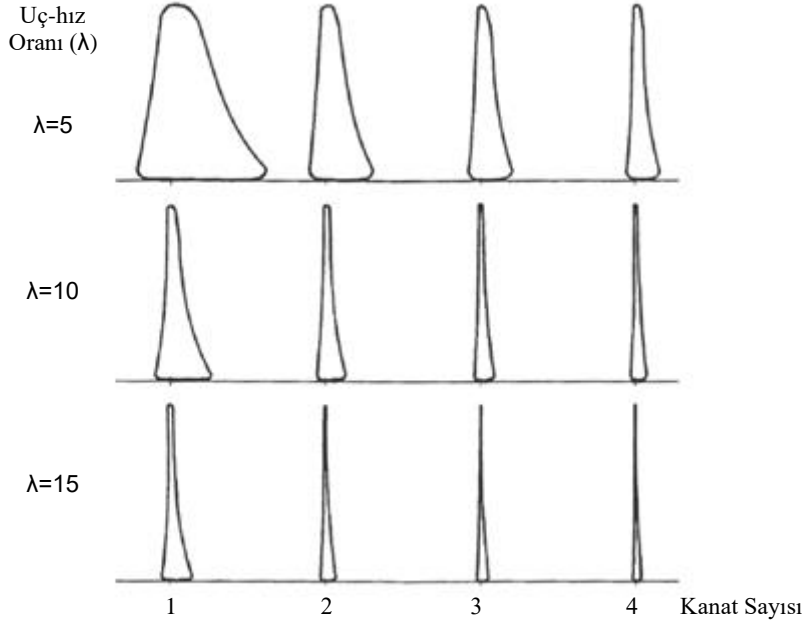
Çizelge 5.2. Uç-hız oranı (λ) seçiminin rüzgar türbin özelliklerine etkisi [Schubel ve Crossley, 2012]

Parametre	Düşük Uç-hız Oranı	Yüksek Uç-hız Oranı
Uç-Hız Oranı Değeri	1-2 aralığındaki uç-hız oranı düşük olarak kabul edilir	10'dan yüksek olan uç-hız oranları yüksek olarak kabul edilir.
Kullanım Yeri	Geleneksel rüzgar türbinleri ve sulama amaçlı kullanılan rüzgar türbinleri	Tek ve iki kanatlı prototip rüzgar türbinleri
Tork	Uç-hız oranı azaldıkça tork artar	Uç-hız oranı arttıkça tork azalır
Verimlilik	Yüksek tork nedeniyle oluşan akış ayrılmaları nedeniyle 5 ve altındaki uç-hız oranlarında verim önemi ölçüde azalır.	Uç-hız oranı 8'in üstünde olduğunda verim önemli ölçüde artmaktadır.
Santrifüj Kuvvet Kaynaklı Gerilmeler	Uç-hız oranı azaldıkça gerilmeler azalır	Uç-hız oranı arttıkça gerilmeler artar
Aerodinamik Kuvvet Kaynaklı Gerilmeler	Uç-hız oranı azaldıkça gerilmeler azalır	Uç-hız oranı arttıkça gerilmeler artar
Katılık Oranı	Uç-hız oranı azaldıkça katılık oranı artar	Uç-hız oranı arttıkça katılık oranı azalır
Aerodinamik Karakter	Basit	Karmaşık
Ses	Uç-hız oranının yaklaşık 6. dereceden kuvveti orantılıdır	

Uç-hız oranı arttıkça kanadın aerodinamik tasarımının önemi de artmaktadır. Yüksek rüzgar hızları için tasarlanan bir kanat minimum tork ve düşük açısız hız oluşumunu sağlamaktadır.

Ses, uç-hız oranının (λ) yüksek mertebeden kuvveti ile orantılı olacak şekilde değişmektedir (Gasch ve Tvele, 2002; Oerlemans, vd. 2006). Modern yatay eksenli rüzgar türbinleri için 2 kanatlı türbinlerde uç-hız oranı genellikle 9-10 arasında; 3 kanatlı türbinlerde ise 6-9 arasında değişmektedir (Hau, 2006). Bu oranlar literatürde de belirtilen rüzgarın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü için verimli olarak belirlenmiş değerlerdir.

Kanat sayısı ve uç-hız oranına (λ) göre kanat geometresinin değişimi Şekil 5.10'da verilmiştir. Şekilden kanat sayısı ve uç-hız oranı (λ) arttıkça kanat geometresinin daha ince bir geometriye sahip olduğu izlenebilmektedir.



Şekil 5.10. Kanat Sayısı ve uç-hız oranına göre farklı kanat geometrileri (Schubel ve Crossley, 2012)

Güç Katsayısı (C_N) Rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr gücünün hangi oranda kanatlar tarafından alındığının ya da türbin verimliliğinin ifade edilmesinde **Güç Katsayısı**'ndan yararlanılmaktadır. Güç Katsayısı genel anlamda kanatlar tarafından rüzgârdan alınan gücün (N_R) rüzgâr gücüne (N_0) oranıdır (Kaya, 2014).

$$C_N = \frac{\text{Rüzgârdan alınan Güç}}{\text{Rüzgâr gücü}} = \frac{N_R}{N_0} \quad (5.3)$$

Katılık Oranı (σ): Kanatların kapladığı alanın (A_b), kanatların dönme hareketinde süpürdüğü alana (Süpürme Alanı, A) oranı **Katılık Oranı (σ)** olup aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir (Kaya, 2014).

$$\sigma = \frac{A_b}{A} \quad (5.4)$$

Katılık Oranı, boyutsuz bir parametre olup yatay eksenli tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde bu oran düşükken; üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde bu oran daha yüksek değerler olmaktadır (Burton ve ark. 2001).

Rüzgâr türbinlerinde; hava ile kanatlar arasındaki etkileşimin değerlendirilebilmesi amacıyla çeşitli aerodinamik teoriler geliştirilmiş olup bu teoriler bir sonraki kısımda özetlenmiştir.

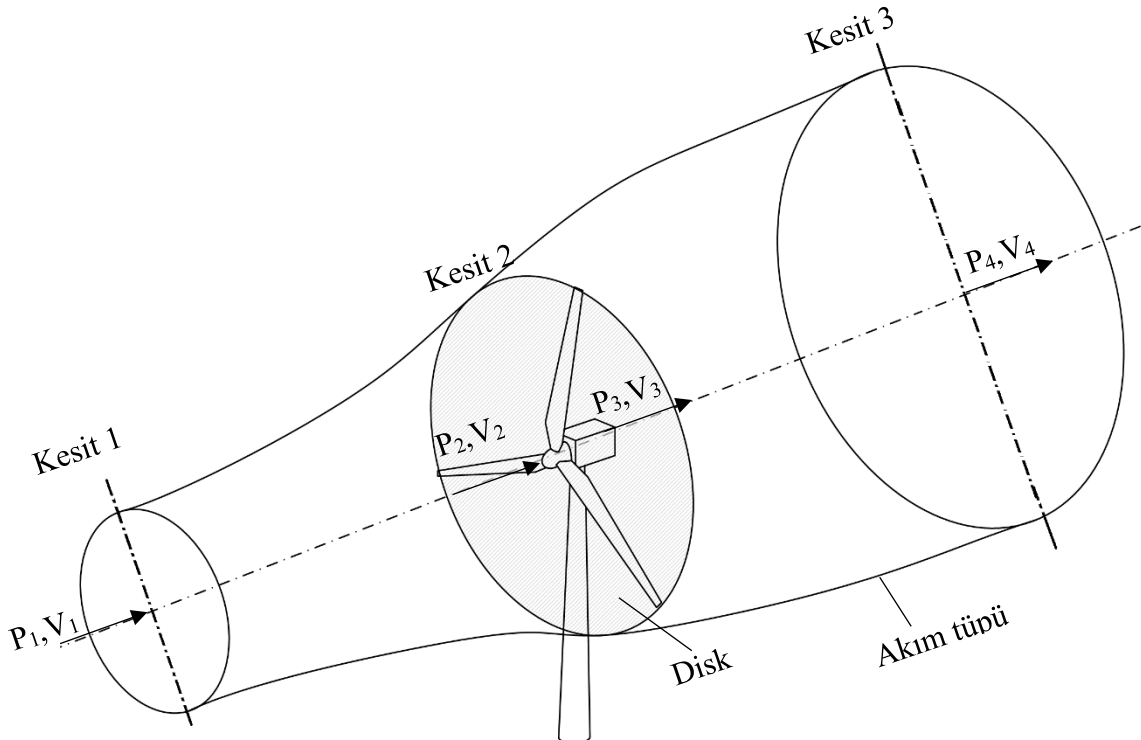
5.1.2. Aerodinamik Teoriler ve Yaklaşımlar

Rüzgâr türbinlerinde; hava ile kanatlar arasındaki etkileşimin değerlendirilmesi amacıyla **Lineer Momentum Teorisi**, **Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi**, **Kanat Elemanı Teorisi** ve **Kanat Eleman Momentum Teorisi** gibi çeşitli aerodinamik teoriler geliştirilmiştir. Ayrıca söz konusu etkileşimin değerlendirilmesi amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden (**HAD**) de yararlanılabilmektedir. Bu teori ve yaklaşımlar kanadın tasarım ve performans analizi için de kullanılmakta olup sözü edilen teori ve yaklaşımlar aşağıda verilmiştir.

5.1.2.1. Bir Boyutlu (Lineer) Momentum Teorisi

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri için en basit aerodinamik model olan **Bir Boyutlu (Lineer) Momentum Teorisinde** (Actuator Disc Model), etrafında hava hareketi bulunan ve üzerinde sonsuz sayıda kanat olduğu kabul edilen diskin performansı değerlendirilmiştir (Şekil 5.11). Söz konusu diskin önündeki akış kesit alanı, arkasındaki kesit alanından küçük olarak kabul edilen bu modelde sıkıştırılmaz, homojen, kararlı, bir boyutlu ve viskoz olmayan akış dikkate alınmakta, sürtünmeler ve girdap etkisi ihmal edilmektedir (Manwell, 2002; Schmitz, 2019).

Söz konusu modelde, kanadın yeterince önündeki rüzgâr hızı (V_1), statik basınç (P_1); kanadın yeterince arkasındaki rüzgâr hızı (V_4), statik basınç (P_4); kanat girişindeki rüzgâr hızı (V_2), statik basınç (P_2); kanat çıkışındaki rüzgâr hızı (V_3), statik basınç (P_3) olarak verilmiştir.



Şekil 5. 11. Bir Boyutlu Lineer Momentum Teorisi için disk modeli (Kaya, 2014)

Bu teoriye göre; rotor diskinin hemen önü ve arkası arasında ani basınç değişimi oluşmakta, akış yönündeki bu ani basınç değişimi nedeniyle de diskte bir **İtki Kuvveti** (F , Thrust Force) oluşmaktadır.

Bu teoride; momentumun korunumu ve Bernoulli denklemlerinden yararlanılarak belirlenen **İtki Kuvveti** (F) ve **Güç** (N) sırasıyla aşağıdaki denklemlerden yararlanarak belirlenmektedir.

$$F = 2\rho V_1^2 a(1 - a)A \quad (5.5)$$

$$N = 2\rho V_1^3 a(1 - a)^2 A \quad (5.6)$$

Burada ρ havanın yoğunluğu, A , 2 nolu kesitin yüzey alanı ve a , aksel indüksiyon faktörüdür (Manwell, 2010; Kaya, 2014). **Eksenel indüksiyon faktörü** boyutsuz bir büyüklük olup bu faktörün belirlenmesinde aşağıda verilen denklemler kullanılmaktadır. Denklem 5.8 ve 5.9'a göre açısal indüksiyon faktörü 0.5'den büyük olduğunda veya 1'e eşit olduğu durumlarda **Lineer Momentum Teorisi** geçerli olamamaktadır (Schmitz, 2019).

$$a = 1 - \frac{V_2}{V_1} \quad (5.7)$$

$$V_2 = (1 - a)V_1 \quad (5.8)$$

$$V_4 = (1 - 2a)V_1 \quad (5.9)$$

Bu modele göre türbinin **İtki Kuvveti Katsayısı** (C_F) ve **Güç Katsayısı** (C_N) aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenebilmektedir.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho V_1^2 A} = 4a(1 - a) \quad (5.10)$$

$$C_N = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho V_1^3 A} = 4a(1 - a)^2 \quad (5.11)$$

Rotor **itki kuvvetinin** genellikle mümkün olduğunca küçük tutulması istenmektedir. Rotor gücü (N) rüzgar hızının küpü ve rotor/disk yarıçapının karesiyle orantılıdır. Bu nedenle rotorun güç üretimi için önemli olan parametreler, ilk olarak rüzgar hızı ikinci olarak ise rotor yarıçapıdır.

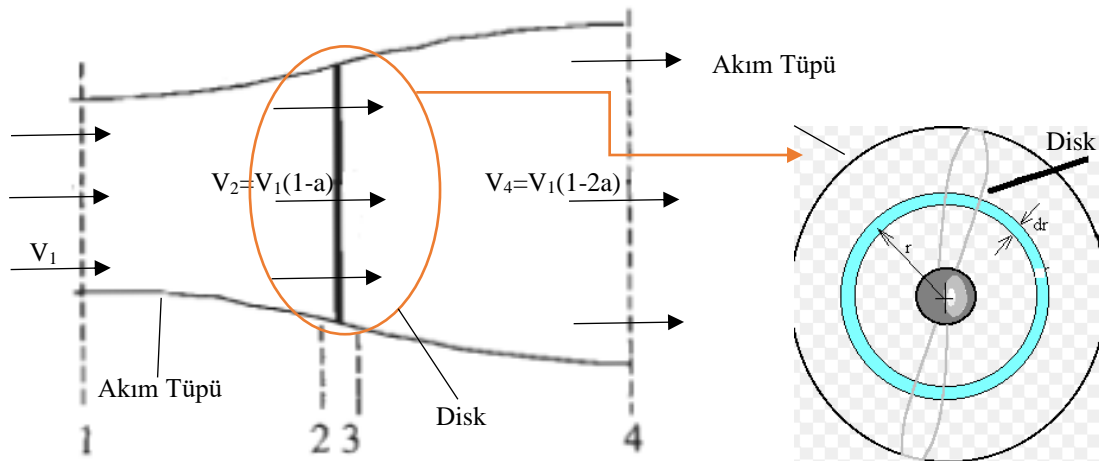
Lineer Momentum Teorisiyle yatay eksenli rüzgâr türbinlerden elde edilebilecek, **Betz Limiti** olarak da bilinen, maksimum güç katsayısı (C_{Nmax}) 16/29 veya 0.5926 olarak belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle **Lineer Momentum Teorisinde** sonsuz kanatçıktan oluşan diskten yararlanılarak gelen rüzgar veya havanın enerjisinin 2/3'ü alınabilmektedir. Bu değer teorik bir değer olup uygulamada yatay eksenli bir rüzgâr türbininin performansı deney koşullarındaki türbinlerin sonlu sayıda kanattan oluşması, kayıplar ve kanada etki eden sürüklenme kuvveti nedeniyle hiçbir zaman bu değere ulaşamamaktadır (Manwell, 2010; Kaya, 2014).

5.1.2.2. Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi

Lineer Momentum Teorisinde sürtünme kayıpları ile girdap akımları ihmal edildiğinden rüzgâr türbininin aerodinamik performansını değerlendirmek amacıyla **Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi** geliştirilmiştir. Bu teoride, akım tüpü içerisine yerleştirilen ve sonsuz kanatçıktan oluştuğu kabul edilen disk ve etrafındaki havanın dönme hareketi de dikkate alınarak diske etkileyen kuvvet ve moment değerlendirilmiştir (Şekil 5.12). Şekilde 1 nolu kesit akım tüpüne giriş kesiti, 4 nolu kesit ise çıkış kesiti; 2 ve 3 nolu kesitler ise diskin hemen önü ve arkasındaki kesitler olarak değerlendirilmektedir.

Lineer Momentum Teorisiyle rotorun itki kuvveti katsayısı ve basınç katsayısı açısall indüksiyon faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. **Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisinde** ise ω açısal hızıyla dönen diskin etrafındaki akış için açısal momentum ve kinetik enerji değişimi de dikkate alınmaktadır. Disk etrafındaki akış dönmeleri, rotor diskinin açısal hareketi ile oluşan tork nedeniyle meydana gelmekte olup bu durum maksimum teorik güç katsayısında bir miktar kayıplara neden olmaktadır. **Dönen Disk Elemanı için Momentum Teorisinde** aksenal indüksiyon faktörünün (a) yanında açısal indüksiyon faktörü (a') ve uç-hız oranı (λ) şeklindeki iki parametre de kullanılmaktadır.

Dairesel akım tüpünde; m akışkanının kütlesi (kg), r akım tüpünün ortalama yarıçapı (m), ω üzerinde kanatların bulunduğu diskin dönüş hızı (rad/s), Ω rüzgârın bulunduğu dairesel akım tüpünün dönüş hızı (rad/s) olmak üzere; rüzgârın etkisiyle ω açısal hızıyla dönen diskte oluşan Tork (T) ve Güç (N) aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir.



Şekil 5.12. Dönen Disk Modeli İçin Momentum Teorisi için geliştirilen model (Kaya, 2014)

$$T = 4\pi\rho V_1\omega \int_0^R a' (1-a)r^3 dr \quad (5.12)$$

$$N = 4\pi\rho V_1\omega^2 \int_0^R a' (1-a)r^3 dr \quad (5.13)$$

Burada a' açısasal indüksiyon faktörü olarak bilinen boyutsuz bir büyüklük olup aşağıdaki bağıntıdan yararlanılarak belirlenmektedir.

$$a' = \frac{\Omega}{2\omega} \quad (5.14)$$

Bu teoride bir başka büyüklük olan uç-hız oranından (λ) da yararlanılmaktadır. Bu parametre r yarıçaplı rotorun ucundaki hava hızının akım tüpüne giren havanın hızına oranı olup aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_1} \quad (5.15)$$

Ayrıca a, a' ve λ arasında aşağıda belirtilen eşitlikler söz konusudur.

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \lambda^2 \quad (5.16)$$

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (5.17)$$

Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisine göre dönen diskin Tork katsayısı (C_T) ve Güç katsayısı (C_N) aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenebilmektedir.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_1^2 AR} = \frac{8}{\lambda^3} \int_0^R a' (1-a) \lambda^3 d\lambda \quad (5.18)$$

$$C_N = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho V_1^3 A} = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^R a' (1-a) \lambda^3 d\lambda \quad (5.19)$$

Lineer Momentum Teorisi ve **Dönen Disk Elemanı için Momentum Teorisi** yatay eksenli rüzgar türbinlerinin performans sınırlarının belirlenmesinde kullanılan temel yaklaşımlar olarak kabul edilmektedir.

5.1.2.3. Kanat Elemanı Teorisi

Rüzgâr türbinlerinde, kanada etki eden kuvvetlerin belirlenmesi amacıyla bir başka aerodinamik teori olan **Kanat Elemanı Teorisi** geliştirilmiştir. **Lineer Momentum Teorisi** ve **Dönen Disk Elemanları için Momentum Teorisinde** rotor son derece küçük ince yüzeyler olarak tanımlanıyorken; **Kanat Elemanı Teorisinde** ise, disk süpürme alanında yayılmış kanat geometrisi dikkate alınmaktadır. Bu teoriye göre farklı dilim elemanların birleştirilmesiyle kanat geometrisi elde edilmektedir. **Kanat Elemanı Teorisinde** aşağıda belirtilen çeşitli kabuller yapılmıştır.

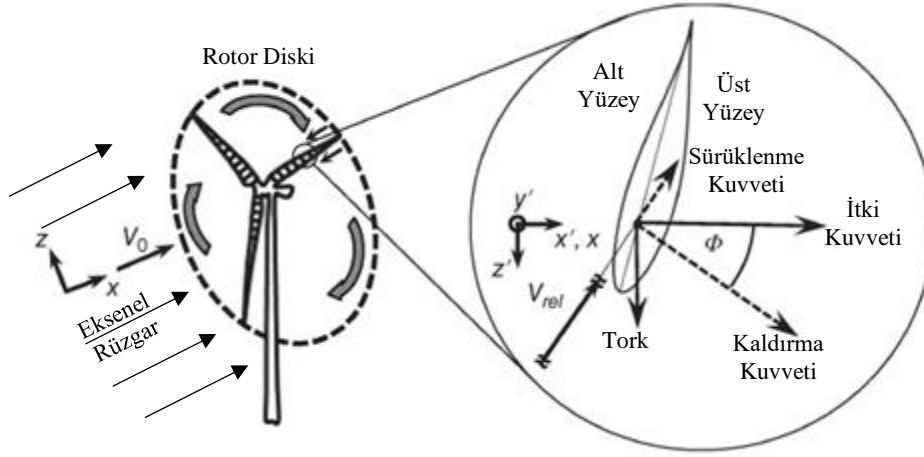
- Bu teoride her bir kanat elemanının, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini oluşturan 2 boyutlu aerofoil kesitlerden oluştuğu kabul edilmektedir.
- Gelen rüzgar hızının her zaman uniform/kararlı (steady) olduğu ve radyal doğrultuda akışın olmadığı kabul edilmektedir.
- Kanat elemanlarının birbirlerinden bağımsız olduğu kabul edilmektedir.

Şekil 5.13’de yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar türbini ve bu türbine ait bir kanat kesiti (aerofoil) verilmiştir. **Kanat Elemanı Teorisine** göre şekildeki kanat üzerinde oluştuğu kabul edilen kuvvet ve momentler aşağıda izah edilmiştir.

Kaldırma kuvveti : Gelen izafi akışa dik yönde oluşan kuvvet

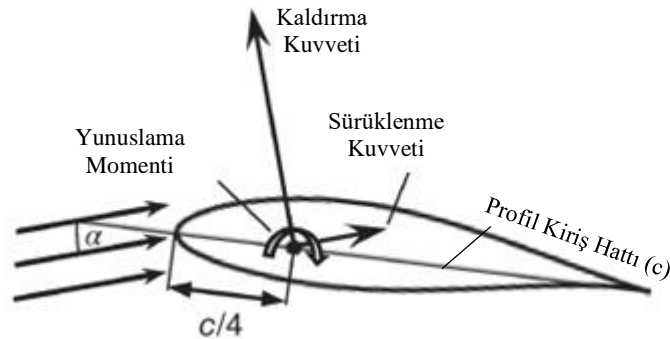
Sürüklenme kuvveti: Gelen izafi akış yönünde oluşan kuvvet

Yunuslama Momenti: Aerofoilin profil hattı uzunluğunun $\frac{1}{4}$ ’ünde oluşan **(Pitching moment)** moment



Şekil 5.13. Kanat Elemanı Teorisine göre kanat kesitinde oluşan kuvvet ve momentler [Schmitz, 2019]

Kaldırma kuvveti sadece belirli bir hücum açısında (α) profil kiriş hattı uzunluğuna dik olmaktadır (Şekil 5.14). Dolayısıyla rüzgar türbin rotoru için kaldırma ve sürüklenme kuvveti doğrultuları kanat geometrisinden bağımsızdır. Kaldırma kuvveti kanat elemanına gelen yerel rüzgar açısına bağlı olarak değişmektedir. **Yunuslama Momenti** ise gelen rüzgar hızıyla birlikte aerofoilin hücum açısını azaltarak sıfıra yaklaşıncı bir etkiye sahiptir.



Şekil 5. 14. Kanat Elemanı Teorisine Göre kanat kesitinde oluştuğu kabul edilen kuvvet ve momentler [Schmitz, 2019]

Kanat Elemanı Teorisine göre aerofoile etki eden izafi rüzgar hızının (V_{rel}) büyüklüğünün belirlenmesinde aşağıdaki denklemden yararlanılmaktadır.

$$V_{rel}(r) = V_0 \sqrt{(1-a)^2 + (1+a'(r))^2 \lambda_r^2} \quad (5.20)$$

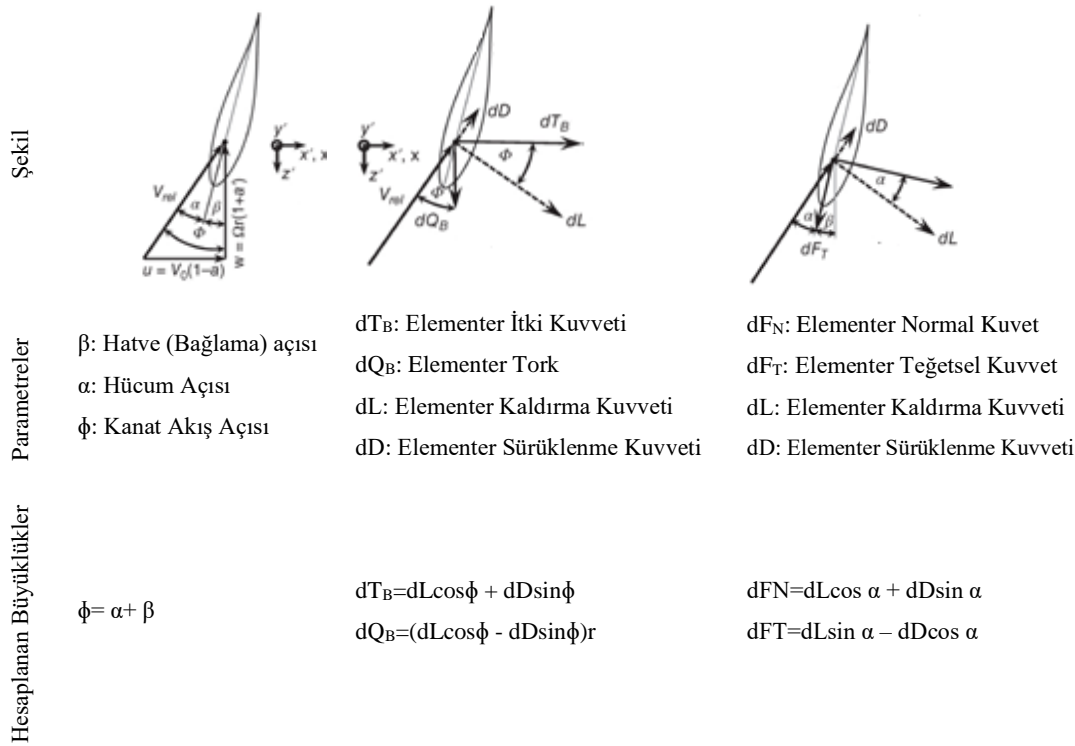
Burada λ_r aerofoilin r konumundaki uç hız oranı (λ) olarak bilinen yerel uç hız oranı olup $r/R \cdot \lambda$ formülünden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

Aerofoillere ait Kaldırma ve Sürüklenme Kuvveti Katsayısı ile Pitching Moment katsayısı yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmekte olup sözü edilen katsayılar belirli Reynolds (Re) sayıları ve hücum açısına (α) bağlı olarak verilmektedir. Reynolds sayısı ise aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$Re_c = \frac{\rho V_{rel} c}{\mu} \quad (5.21)$$

Burada ρ akışkan yoğunluğu, V_{rel} izafi rüzgar hızı, c profil kiriş hattı uzunluğu, μ ise akışkanın dinamik viskozitesidir.

Kanat elemanı üzerindeki hızlar ve kanat elemanında oluşan İtki Kuvveti, Tork, Normal ve Teğetsel Kuvvetler Şekil 5.15’de verilmiştir.



Şekil 5.15. Kanat Elemanı Teorisine göre kanatta oluşan kuvvetler [Schmitz, 2019]

İtki Kuvveti ve Tork ağırlıklı olarak kanat kesitindeki Kaldırma Kuvveti (dL) tarafından oluşturulmaktadır. Rotordaki güç üretimine katkı sağlamayan Sürüklenme Kuvveti rotor itki kuvvetini artırması ve güç üretimini sağlayan kesitteki torku azaltması bakımından iki yönlü kayba neden olan büyüklük olarak değerlendirilmektedir (Schmitz, 2019).

5.1.2.4. Kanat Elemanı Momentum Teorisi

Kanat Elemanı Momentum Teorisi (KEM), rüzgar enerjisi topluluğunda temel tasarım ve analiz yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu teori, kanat elemanı teorisi ve disk modeli için momentum teorisinin birleştirilmesiyle elde edilmekte, kanadın iki boyutlu aerodinamik formu dikkate alınarak kanadın aerodinamik performansı değerlendirilebilmektedir.

Kanat Elemanı Momentum Teorisi, rüzgar türbini tasarım ve analizi için uygun bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. **Kanat Elemanı Momentum Teorisi** hesaplamalarında teğetsel ve açısız indüksiyon faktörleri ve aerofoillere ait kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi aerodinamik karakteristik parametrelerden yararlanılması bu yaklaşımın güçlü yönleri olarak kabul edilmektedir.

Günümüzde kullanılan masaüstü bilgisayarların standart hesaplama kaynakları ve işlem gücü **Kanat Elemanı Momentum Teorisi** çözüm algoritmaları kullanılarak rüzgar türbinlerinin aerodinamik tasarım ve analizinin kısa bir sürede gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır. Bu teoriye göre kanat uzunluğu boyunca konumlanmış iki boyutlu aerodinamik kesit elemanların birleştirilmesiyle kanat geometrisinin elde edildiği belirtilmektedir. Her bir eleman aerodinamik profiline özgü kaldırma, sürüklenme ve moment katsayısı elemanın uzunluğu(c) ve açısız pozisyonu (ϕ) gibi parametrelerin kullanıldığı analitik bağıntılardan yararlanılarak temsil edilmektedir. Bu sayede de standart bilgisayar gücüyle farklı özelliklere sahip kanatların aerodinamik performansının değerlendirilebileceği basit ve güvenilir çözümler elde edilebilmektedir.

Dönen Disk Elemanı için Momentum Teorisinde kademelendirilmiş birim kanat elemanında oluşan İtke Kuvveti (F) ve Torkun (T) belirlenmesinde aşağıdaki bağıntılardan yararlanıldığı önceki kısımlarda belirtilmiştir.

İtke Kuvveti

$$dF = 4a(1 - a)\rho V_0^2 \pi r dr \quad (5.22)$$

Tork

$$dT = 4a'(1 - a)\rho V_0 \pi r^3 \omega dr \quad (5.23)$$

Kanat Elemanı Teorisiyle kanadın belirli kesitlerinde bulunan kanat elemanlarına etki eden **İtke Kuvveti** ve **Tork**'un belirlenebilmesi için ise aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

İtke Kuvveti

$$dF = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (c_l \cos \emptyset + c_d \sin \emptyset) c dr \quad (5.24)$$

Tork

$$dT = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (c_l \sin \emptyset - c_d \cos \emptyset) c r dr \quad (5.25)$$

Burada B kanat sayısı, ρ yoğunluk, V_{rel} izafi rüzgar hızı, c_l kaldırma kuvveti katsayısı c_d sürüklenme kuvveti katsayısı, \emptyset akış açısı, ve c profil giriş hattı uzunluğudur.

Dönen Disk Elemanları için Momentum Teorisi ve Kanat Elemanı Teorilerinin birleştirildiği **Kanat Elemanı Momentum Teorisinde (KEM)** ise kanada etki eden **İtke Kuvveti** ve **Torkun** belirlenmesi için Denklem 5.22 ile 5.24 ve Denklem 5.23 ile 5.25 eşitlenerek sırasıyla Denklem 5.26 ve 5.27 elde edilmektedir.

İtke Kuvveti Eşitliği

$$dF = 4a(1 - a)\rho V_0^2 \pi r dr = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (c_l \cos \emptyset + c_d \sin \emptyset) c dr \quad (5.26)$$

Tork Eşitliği

$$dT = 4a'(1 - a)\rho V_0 \pi r^3 \omega dr = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (c_l \sin \emptyset - c_d \cos \emptyset) c r dr \quad (5.27)$$

Yukarıda belirtilen Denklem 5.26 ve 5.27 iki bilinmeyenli (a ve a') iki eşitlik şeklindedir. Söz konusu denklemler trigonometrik bağıntılardan yararlanılarak aşağıdaki gibi de düzenlenebilmektedir.

İtke Kuvveti Eşitliği

$$4aF = \sigma'(1 - a)(c_l \cos \emptyset + c_d \sin \emptyset) / \sin^2 \emptyset \quad (5.28)$$

Tork Eşitliği

$$4a'F = \sigma'(1 - a')(c_l \sin \emptyset - c_d \cos \emptyset) / (\sin \emptyset \cos \emptyset) \quad (5.29)$$

Burada σ' , yerel katılık oranı olup $Bc/2\pi r$ formülü kullanılarak belirlenmektedir. c_l kaldırma kuvveti katsayısı, c_d sürüklenme katsayısı, \emptyset ise kanat açısıdır.

KEM teorisi hesaplamalarında yukarıda belirtilen denklemler kullanılmakta ve denklemlerdeki a ve a' parametrelerine belirli değerler verilerek iteratif işlemler sonucu gerçek a ve a' 'ne ulaşılarak **kanadın aerodinamik performansı** değerlendirilebilmektedir.

Dönen Disk Elemanları İçin Momentum Teorisi ve birbirinden bağımsız kanat elemanlarının sağladığı basit formülasyon **KEM Teorisinin** basitliğinin ve hesaplama

verimliliğinin en önemli göstergesi olarak kabul edilmektedir. Ancak **KEM Teorisini** oluşturan teorilerde yapılan kabuller nedeniyle **KEM Teorisinin** dikkate alamadığı/değerlendiremediği çeşitli durumlar/fiziksel etkiler söz konusudur. Bu etkiler kısaca aşağıda belirtilmiştir.

- Dönen bir sistem için radyal doğrultuda akışın olmadığı varsayımı nedeniyle **KEM Teorisi ile 3 boyutlu akış etkilerini** dikkate alabilmek mümkün değildir.
- Kanat kesitin etrafındaki akışlarda **akış iplikçiklerinin ayrılması** ve **Stall olayı** KEM teorisi tarafından belirlenemeyen bir durumdur.
- Kanat kesitinde meydana gelen **akış ayrılması** ve **Stall**'ın kanadın dönme hareketi nedeniyle **gecikmeye uğradığı (Stall gecikmesi-Stall delay)** literatürdeki çalışmalarda not edilmektedir.
- KEM ve bu teoriyi oluşturan alt teoriler de kanada gelen havanın uniform kararlı (steady) olduğu kabul edilmektedir. Ancak kanada gelen havanın kararsız olabildiği, söz konusu akışlarda **türbülansların** meydana gelebileceği de literatürdeki çalışmalarda belirtilmektedir.

5.1.2.4. Kanat Elemanı Momentum Teorisi Düzeltme Modelleri

Sözü edilen hususların etkilerini azaltabilmek, **KEM Teorisi** kullanılarak yapılan değerlendirmelerde daha hassas sonuçlar elde edebilmek için çeşitli düzeltmelerden yararlanılmaktadır. Uç ve kök kayıp düzeltme modelleri ve Stall gecikmesi için geliştirilen **düzeltilme modelleri** aşağıda özetlenmiştir.

I) Uç ve Kök Kayıp/Düzeltilme Modelleri

Kanat Elemanı Momentum Teorisinde (KEM) kanat geometresinin belirli radyal konumlara/kesitlere yerleştirilmiş 2 boyutlu aerofoil kesitlerden oluştuğu kabul edilmiştir. Kanadın uç ve kök kısımlarında daha yüksek basınçlı olarak aerofoilin alt yüzeyine sürterek geçen hava akımı iplikçikleri kanat yüzeyinden ayrılarak kanadın üst yüzeyindeki düşük basınçlı hava akımı iplikçiklerinin arasına karışmaktadır. Bu nedenle de kanatta uç ve kök girdapları oluşmakta, söz konusu girdaplar ise ters yönlü akışlar ve akış ayrılmalarına neden olmaktadır.

Uç ve kök kayıpları, radyal yönde akış iplikçiklerinin sapmasına neden olarak kanadın uç ve kök kısımlarındaki elemanların aksenal indüksiyon faktörlerini (a) azaltmakta, hücum açısını (α) düşürmekte ve sonuç olarak aerodinamik kaldırma kuvveti ve kesitteki itki kuvveti ve tork/güçü olumsuz yönde etkilemektedir.

KEM Teorisi hesaplamalarında kanat kök ve uç kayıplarını değerlendirebilmek amacıyla çeşitli uç ve kök kayıp/düzeltilme faktörleri geliştirilmiş olup bu modeller aşağıda özetlenmiştir.

a) Prandtl Uç Düzeltmesi

Uç düzeltmesi kavramı ilk olarak Prandtl tarafından ortaya atılmış olup Betz'in (1919) Lineer Momentum Teorisi yaklaşımına ek olarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda üzerinde sonsuz kanatçık bulunduğu kabul edilen rotor diski ile gerçek koşullardaki sonlu kanat sayısına sahip bir rotor arasındaki fark dikkate alınmaktadır.

Prandtl uç düzeltmesine göre kanadın uç kısmındaki kayıpların aşağıdaki denklemde de ifade edildiği gibi, kanat sayısı (B), uç-hız oranı (λ), rotora gelen akış açısı ve rotorun uç mesafesinin bir fonksiyonu kullanılarak elde edilen basit bir ifadeden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$F_B(r) = \frac{B\Gamma_B}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-\frac{B}{2} \sqrt{(1 + \lambda^2)(1 - r/R)} \right) \right] \quad (5.30)$$

Burada B kanat sayısı, Γ_B B sayıda kanada sahip rotor sirkülasyonu, Γ_∞ sonsuz sayıda kanada sahip rotor sirkülasyonudur.

b) Glauert Uç Düzeltmesi

Prandtl'in yaklaşımı, 2-3 kanatlı rüzgar türbinleri yerine 4-8 kanatlı pervaneler için daha uygun olarak not edilmektedir. Ayrıca, Prandtl, düzlemsel girdap tabakalarının aşağı yönde sabit bir aksel hızda ilerlediklerini kabul etmektedir. Bu yaklaşım rotor yükünün Betz (1919) tarafından varsayıldığı kadar ideal olmadığı durumlarda, hesaplamalardan sağlıklı sonuçlar elde edilememektedir.

KEM hesaplamalarını daha iyi hale getirebilmek için Glauert tarafından aşağıda belirtilen **Glauert uç düzeltmesi** eşitliği önerilmektedir.

$$F_T(r) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-\frac{B}{2} \frac{1-r/R}{r/R} \frac{1}{\sin\phi(r)} \right) \right] \quad (5.39)$$

Glauert'in Uç Düzeltmesi, kök kayıp/düzeltilme faktörü olarak da kullanılabilir olup bu amaçla aşağıda belirtilen denklemden yararlanılmaktadır.

$$F_R(r) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-\frac{B}{2} \frac{r/R - r_{kök}/R}{r_{kök}/R} \frac{1}{\sin\phi(r)} \right) \right] \quad (5.40)$$

Glauert'in toplam uç-kök düzeltmesi ($F(r)$) ise aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir. Burada $F_R(r)$ **Glauert Kök Kayıp Düzeltmesi**, $F_T(r)$ ise **Glauert uç kayıp düzeltmesidir**.

$$F(r) = F_R(r) F_T(r) \quad (5.41)$$

Bu teori bugün, rüzgar türbin rotorlarının tasarım ve analizi için kullanılıyor olmasına rağmen, bu teorinin rotorun ucu yakınlarındaki yüklemeyi doğru bir şekilde temsil edemediğinin altı çizilmektedir.

Yapılan değerlendirmelerde söz konusu uç düzeltmesinin, yüksek yüklemeye maruz kalan rüzgar türbini kanatları için kanat ucu yüklerini yüksek olarak tahmin ettiği not edilmektedir.

c) Yeni Uç Düzeltme Faktörü

Prandtl ve **Glauert**'in **Uç Düzeltmelerinde** profil kiriş hattı uzunluğu gibi kanat geometrik özelliğini temsil eden bir parametre bulunmadığından söz konusu düzeltme faktörleri rotor kanadının gerçek geometrik şeklini dikkate almamaktadır.

Shen'in **Yeni Uç Düzeltme Faktöründe** ise aerofoili oluşturan koordinatlar dikkate alınarak belirlenen yüklemeler kanat uzunluğu boyunca uygulanmaktadır. Bu sayede de söz konusu düzeltme modelinin gerçek kanat şeklini esas alması sağlanmaktadır.

Shen vd. [9], geliştirdikleri yeni uç düzeltme faktörüyle sadece momentumu değil, aynı zamanda kanat elemanlarına etki eden kuvvetleri de düzelten Glauert'in F faktörü ile birlikte kullanılan bir F1 faktörünü önermiştir.

$$F_1(r) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-g \frac{B}{2} \frac{1-r/R}{r/R} \frac{1}{\sin \theta(r)} \right) \right] \quad (5.42)$$

Sözü edilen düzeltme faktöründe aşağıdaki denklemle belirlenen g katsayısından yararlanılmaktadır.

$$g = \exp(-c_1(B \lambda - c_2)) + 0.1 \quad (5.43)$$

Burada c_1 ve c_2 ampirik olarak belirlenmiş katsayılar olup NREL faz VI kanadı için $c_1 \approx 0.125$ ve $c_2 = 21$ 'dir.

d) Geliştirilmiş Glauert Uç Düzeltmesi - Schmitz Düzeltme Modeli

Uç düzeltmeleri genel olarak uç-hız oranı, kanat pitch açısı, uç aerofoilinin karakteristik özellikleri ve uç şekliyle ilgilidir. Yüksek yüklere maruz kalan rüzgar türbin kanatlarında uç yük tahminlerinin iyileştirilmesi için geliştirilen yöntemlerle birlikte çözüme ulaşma zamanı ve maliyeti de artmaktadır. Schmitz ve arkadaşları basit genel bir çözüme ulaşmak amacıyla başka bir uç kayıp modeli olan **Geliştirilmiş Glauert Uç Düzeltmesini** geliştirmiştir. Bu modelde Shen'in yaklaşımından da esinlenerek Glauert'in Uç Düzeltme faktörüne g fonksiyonu adapte

edilmiştir. Söz konusu model kullanılarak elde edilen Glauert'in geliştirilmiş Uç Düzeltme Modeli katsayısı ve bu modelde kullanılan g fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$F_T(r) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-g(r) \frac{B}{2} \frac{1-r/R}{r/R} \frac{1}{\sin \phi(r)} \right) \right] \quad (5.44)$$

$$g(r) = -\frac{2}{B} \frac{1-r/R}{r/R} \sin \phi(r) \ln \left[\frac{\pi}{2} \frac{F(r)}{F_R(r)} \right] \quad (5.45)$$

Yukarıda belirtilen uç kayıp modelleriyle ilgili çalışmalar günümüzde de araştırmalar yapılan aktif bir alandır. Tez konusu kapsamında yapılan çalışmalarda KEM teorisi hesaplarını iyileştirebilmek için Shen'in yeni uç düzeltme faktöründen yararlanılmıştır.

II) Kanadın Dönme Hareketi Etkileri ve Düzeltme Modelleri

Kanadın dönme hareketinin sonucunda Stall Gecikmesi (Stall Delay) ve Coriolis Etkisi ve Dönme Büyümesi (Rotational Augmentation) gibi çeşitli etkiler ortaya çıkabilmektedir. Bu etkiler aşağıda verilmiştir.

a) Stall Gecikmesi

Rüzgar türbin kanatları ve aerefoiller için yüksek hücum açılarının söz konusu olduğu durumlarda, aerofoilin üst yüzeyindeki sınır tabakaya ters basınç gradyanının uzun süreli etki etmesi durumunda, akış iplikçiklerinde ayrılma ve **Stall** olayı görülebilmektedir. **Stall** olayı önceki kısımlarda da belirtildiği gibi yüksek hücum açılarında kanatta meydana gelen bir kararsızlık/düzensizlik durumudur.

Kanadın maruz kalabileceği etkiler nedeniyle Stall olayının gerçekleşmesinde gecikme olabilmektedir. **KEM Teorisi** tarafından tespit edilemeyen bir başka husus da sözü edilen **stall gecikmesidir** (Stall Delay).

Literatürdeki çalışmalarda **Stall gecikmesinin** kanadın dönme hareketinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı not edilmiş olup bu kısımda dönme hareketinin etkileri ve stall gecikmesi olayı değerlendirilmiştir.

Dönen bir kanatta aerodinamik yüklerin artışı ile ilgili ilk çalışma Himmelskamp tarafından helikopter kanatları üzerinde gerçekleştirilmiş olup bu etki literatürdeki çalışmalarda **Himmelskamp Etkisi** olarak da bilinmektedir. Söz konusu çalışmada dönme hareketinin bir sonucu olarak ortaya çıkan santrifüj kuvvetler ve Coriolis kuvvetlerinden kaynaklanan aerodinamik yük artışı olduğu iddia edilmiştir.

Kanat dönme hareketinin kanadın etrafındaki akış iplikçikleri ayrılmasını geciktirdiği veya önlediği helikopter kanadı için 1963 yılında Banks ve Gadd tarafından yapılan başka bir

çalışmayla belirlenmiştir. Bu çalışmada bu durumun sınır tabakaya etki eden ters basınç gradyanındaki azalma/hafiflemeden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Benzer teorik çalışma, McCroskey ve Yaggy (1968) ve McCroskey (1971) tarafından döner kanatlı uçaklar için de gerçekleştirilmiş, aynı durumun döner kanatlı uçaklar için de geçerli olduğu belirtilmiştir.

Stall Gecikme Modelleri

Stall gecikmesinin Himmelskamp tarafından 1940'ların sonlarında keşfedilmesinden sonra, bu olgunun değerlendirilmesi için çalışmalar yürütülmüştür.

Rüzgar türbin kanatlarında Coriolis Kuvvetlerinden kaynaklanan stall gecikmesi durumu Himmelskamp tarafından tahmin edilemediğinden, KEM analizleri için çeşitli stall gecikme modelleri geliştirilmiştir. Sözü edilen düzeltme modelleri tipik olarak deneysel çalışmalardan üç boyutlu ve dönen rüzgar türbinleri için gerçekleştirilen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinden yararlanılarak elde edilmiştir.

Stall gecikmesi modelleri aşağıda belirtilen amaçlarla kullanılmaktadır.

- **KEM teorisi** hesaplamalarına 3 boyutlu dönme etkilerini dahil edebilmek için,
- Dönme artışına bağlı olarak artan yükler kanat mekanik davranışı için önem arz ettiğinden,
- Maliyetli ve zahmetli Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinden kaçınmak için tasarım aşamasında etkili ve güvenilir bir stall-gecikme modeline ihtiyaç duyulduğundan,
- Sabit kanat pitch açısına sahip küçük ölçekli stall kontrollü rüzgar türbinlerinde anma gücünü kontrol edebilmek için,
- İç kısımlardaki istasyonlarda genel olarak daha yüksek hücum açılarının görüldüğü pitch kontrollü rüzgar türbinlerinin tasarım ve performans analizlerini iyileştirmek için,

Stall Gecikme Modelleri

Yapılan çalışmalar sonucu çeşitli Stall Gecikme modelleri geliştirilmiş olup söz konusu modellerden bazıları aşağıda verilmiştir.

-Snell 1991,1992,1993a,b

-Corrigan and Schillings, 1994 ve sonrasında geliştirilen Tongler and Selig, 1997

-Du Selig 1998, 2000 (Snel'in çalışmalarından yararlanılarak geliştirilmiştir).

-Chaviaropoulos and Hansen (2000)

- Dumitrescu et al (2007,2013)
- Eggers et al (2003)
- Lindenburg (2003,2004)
- Dewler and Schmitz (2013-2015)

KEM teorisindeki 3 boyutlu etkileri değerlendirmek amacıyla yukarıda da belirtilen stall gecikme modelleri geliştirilmiş olup bu alan aktif bir çalışma alanı olarak kabul edilmektedir. Yürütülen tez çalışması kapsamında kanadın aeredinamik performans analizlerinde stall gecikmesi etkisinin değerlendirilebilmesi amacıyla Snell tarafından geliştirilmiş düzeltme modelinden yararlanılmıştır.

b) Coriolis Etkisi

Dönme hareketinin, rüzgar türbin kanadı için de ayrılma noktasını geciktirici etkisinin olduğu Du ve Selig (1998, 2000) tarafından yapılan çalışmayla tespit edilmiştir. Madsen ve Rasmussen (1988) rüzgar türbini kanatları için önceden belirtilen stall gecikmesinin aslında **Coriolis etkisi** ve **santrifüj etkinin** birleşiminden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir.

Coriolis Etkisi ve Santrifüj Etki

Literatürdeki çalışmalarda **Himmelskamp Etkisine** katkıda bulunan iki ana unsurun;

- (i) Sınır tabakasındaki Coriolis kuvvetleri
- (ii) Santrifüj Pompalama/etkileri (Centrifugal Pumping)

olduğu kabul edilmektedir. Bu kısımda söz konusu iki etki değerlendirilmiştir.

Coriolis Etkisi, su ve hava gibi akışkan maddelerin yer kürenin yüzeyi üzerinde hareket ederken bükülüp savrulmasına sebep olan akıntı olayı olarak tanımlanmaktadır. Coriolis Etkisi, dönen bir referans düzlemdeki akışkanın, hareketine dik doğrultuda etki eden düzlemsel kuvvetle ilişkili bir büyüklüktür.

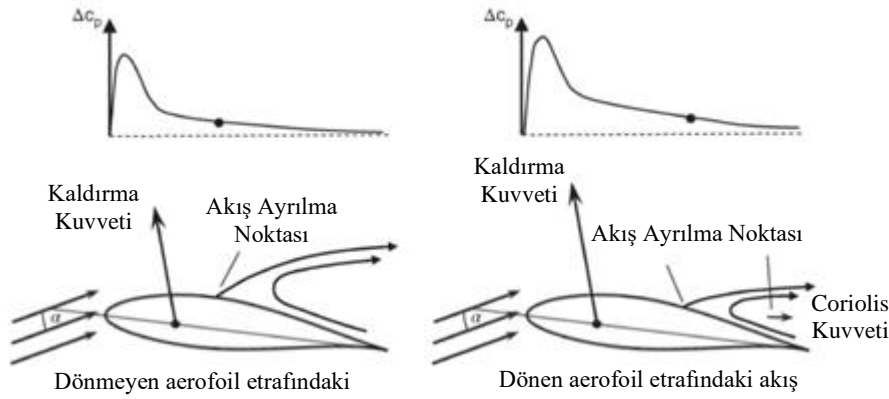
Coriolis Kuvveti aşağıdaki denklemden yararlanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\vec{F}_{Co} = -2m\vec{\omega}\vec{V}_{rel} \quad (5.46)$$

Burada, **m** sıvı miktarının kütesini, **ω** dönen referans çerçevesinin açısal hızı ve **V_{rel}** dönen sisteme göre akışkanın izafi hız vektörünü temsil etmektedir.

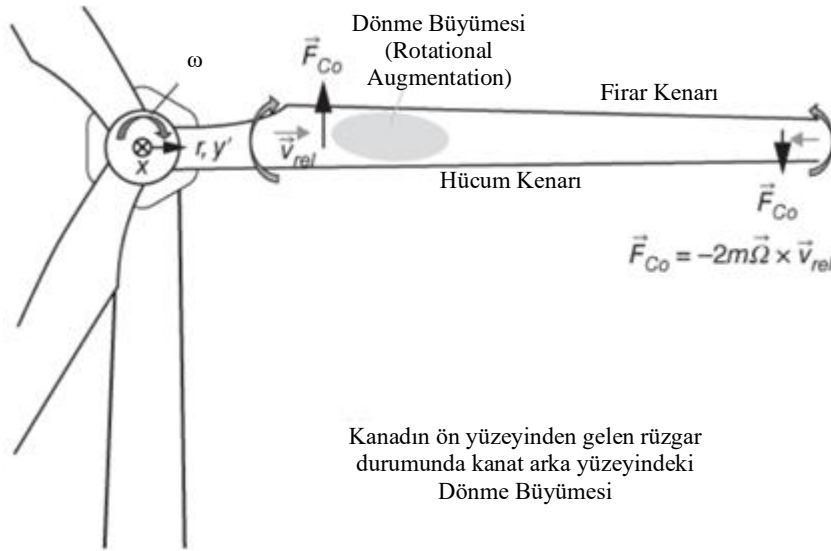
Dönen ve dönmeyen rüzgar türbinine ait kanat kesitinde/aerofoilde **Coriolis kuvveti etkisi** Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekil 5.16a'da, önemli miktarda akış ayrılmasına sahip bir aerofoilin etrafındaki akış hareketi görülebilmektedir. Şekil 5.16b'de ise aerofoilin firar kenarına doğru etki eden bir Coriolis kuvveti, pratik olarak sınır tabakasındaki akışkana faydalı basınç gradyanı

eklemeyle eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Böylelikle söz konusu hücum açısı için akış ayrılmasına neden olan ters basınç gradyanını etkili bir şekilde azaltmaktadır.



Şekil 5.16. Kanat iç kısımlardaki kesitlerinde coriolis kuvvetinin sınır tabaka kaldırma dinamikleri üzerindeki etkisi.

Dönme hareketi sonucunda kanatta oluşan **Coriolis Kuvvetleri** Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Kanadın kök kısmındaki Coriolis Kuvvetleri kanadın hücum kenarından firar kenarına doğru yönelmişken; uç kısımdaki kuvvetler ise tam ters yönde oluşmaktadır.



Şekil 5.17. Kanat kök ve uç kısmına etki eden Coriolis Kuvvetleri ve yönleri [Schmitz, 2019]

Kök girdabının oluşumunda radyal akış, kanadın alt yüzeyinden (basınç yüzeyinden) üst yüzeyine (emme yüzeyi) doğru yönelmiş iken; uç girdabında ise tam tersi durum geçerlidir. Bu nedenle de **Coriolis Kuvveti**, kanadın iç kısımlarındaki sınır tabakası akışını hızlandırırken; ucuna yakın kısımlardaki sınır tabaka akışını yavaşlatmaktadır.

c) Dönme Büyümesi

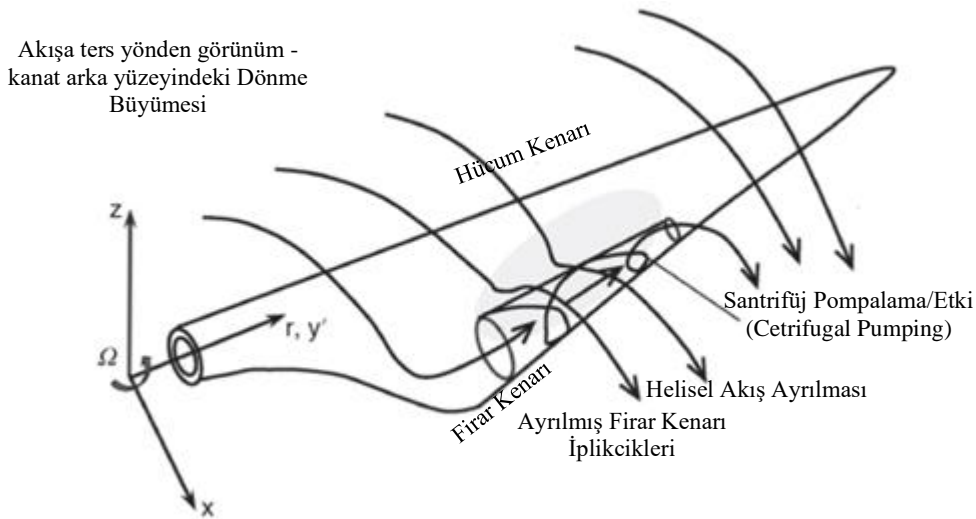
Rüzgar türbini kanatlarında **Dönme Büyümesi (Rotational Augmentation)** olarak ifade edilen başka bir fiziksel olay da gerçekleşmektedir. Dönen rüzgar türbin kanatlarında meydana

gelen Stall gecikmesinin bir sonucu olarak kanadın iç kısımlarındaki kesitlerde (kanat kök ve uç bölgesi hariç kısımlarda) oluşan kaldırma kuvveti önemli derecede artmaktadır. Şekil 5.17’de önden rüzgar alan bir türbinde oluşan **dönme büyümesi** olayı da görülmekte olup bu büyüklük aerofoilin arka yüzünden ön yüzüne doğru oluşmaktadır.

Coriolis Kuvvet Etkisi, Dönme Büyümesi (Rotational Augmentation) ve Stall Gecikmesi olaylarını tek başına açıklayamamaktadır. Bu nedenle, söz konusu gözlemleri destekleyen ek bir fiziksel etkiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Dönen bir referans düzlemdeki akış için, sınır tabakasındaki akışkana etki eden merkezkaç kuvveti genel olarak diğer akışlar üzerinde ölçülebilir bir etkiye sahip değildir. Merkezkaç kuvveti, kanat üzerindeki ayrılma bölgelerini kanat çevresinden daha ileriye uzatarak **Santrifüj Pompalama/Etki (Centrifugal Pumping)** olarak da bilinen bir etkiyi tahrik etmektedir.

Akış ayrılması ve Stall ilk olarak kanadın kök ve uç kısımlarında meydana gelmektedir. Akış ayrılması gerçekleştiğinde, tipik bir radyal akış oluşmakta ve ayrılan akış iplikçikleri kanat yarıçapı boyunca dışarıya doğru yayılmaktadır. Söz konusu radyal akış kendi başına kaldırma kuvveti oluşumunu artıran Coriolis Kuvveti etkisini uzatmakta ve akış iplikçiklerinin ayrılma bölgesi için bir sınırlayıcı olarak etki etmektedir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Santrifüj pompalamanın (centrifugal pumping) dönen bir rüzgar türbini kanadı üzerindeki etkisi [Schmitz, 2019]

Rüzgar enerjisi topluluğunda, genel olarak **Dönme Büyümesi** ve **Stall Gecikmesinin Santrifüj Pompalamadan (Centrifugal Pumping)** kaynaklandığı konusunda fikir birliği vardır. Bu kapsamda, bazı araştırmacılar, Coriolis Etkisinin rüzgar türbini kanatlarındaki **Santrifüj Pompalama (Centrifugal Pumping)** için baskın bir etkisinin olduğunu varsaymaktadır

[Lindenburg, 2004; Carcangiu vd., 2007]. **Dönme Büyümesi** olgusu ve **Stall Gecikmesi** rüzgar enerjisi topluluğu tarafından araştırmaların devam ettiği aktif bir çalışma alanıdır.

Dönme Büyümesi ve **Stall Gecikmesi** etkileri KEM Teorisi tarafından belirlenemeyen fiziksel olaylardır. Bu durumun üstesinden gelebilmek amacıyla çeşitli düzeltme modelleri geliştirilmiş olup bir sonraki bölümde bu modeller anlatılmıştır.

5.1.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğiyle Akış Analizi

I) Laminer Akış Analizi

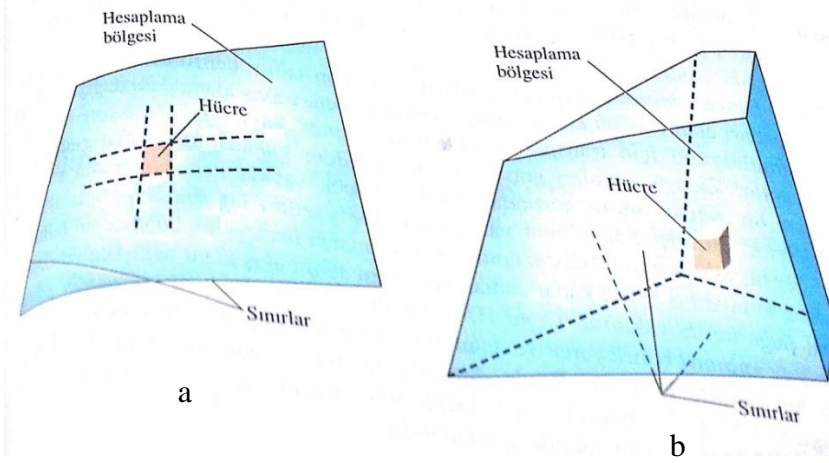
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) doğadaki akışkan davranışının incelenmesinde kullanılan sayısal analiz metodudur (Yılmaz, 2009). **Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği**'nden yararlanılarak rüzgar türbin kanadının yüzeyinde oluşan basınç dağılımları, kanadın etrafındaki havanın hareketi ve hız büyüklüğü gibi akışla ilgili karakteristik özellikler değerlendirilebilmektedir.

Akışkanlar mekaniğinde viskoz, sıkıştırılmaz, serbest yüzey etkileri olmayan Newton tipi akışkanın daimi, laminer akışı için; Süreklilik Denklemi(Korunum Denklemi) ve Navier Stokes Denklemi olmak üzere iki farklı hareket denkleminde yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada, tasarımı yapılan kanadın etrafındaki hava hareketinin incelenmesi amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden yararlanılarak akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğiyle yapılan analizin temel prensipleri aşağıda izah edilmiştir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğiyle (HAD) akışın diferansiyel denklemlerini çözmek için genel olarak aşağıda belirtilen adımlar takip edilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2008).

- 1- Aerodinamik performansı değerlendirilmek istenilen **hesaplama bölgesi** seçilir ve bu bölgede **ağ yapısı** oluşturularak hesaplama bölgesi **hücre** olarak bilinen çok sayıda küçük elemanlara bölünür. İki boyutlu analiz için bu hücreler alanlar şeklinde (Şekil 5.19a); üç boyutlu analiz için ise söz konusu hücreler hacimler şeklindedir (Şekil 5.19b). Buradaki her bir hücre Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerinin çözüldüğü küçük kontrol hacimleridir. Bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizinin niteliği büyük oranda oluşturulan ağın niteliğine bağlı olduğundan oluşturulacak ağın niteliği yüksek olmalıdır.



Şekil 5. 19. Akış analizi için tanımlanan bölgeler (Çengel ve Cimbala, 2008)

- 2- İki boyutlu akış için hesaplama bölgesinin her bir **kenarı**; üç boyutlu akış için her bir **yüzeyi** için sınır şartları tanımlanır.
- 3- Akış analizinde kullanılacak **akışkan türü** (su, hava, benzin vb.) ve özellikleri (sıcaklık, yoğunluk, viskozite vb.) belirlenir.
- 4- Sayısal parametreler ve çözüm algoritmaları seçilir. Sayısal parametreler ve çözüm algoritmaları hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için geliştirilen yazılımlarda da mevcuttur. Akışkan analizinin türüne göre (akış analizi, termal analiz vb.) uygun algoritma ve sayısal parametreler program tarafından veya kullanıcı tarafından seçilir.
- 5- Hesaplama bölgesindeki her bir hücreye ait akış alanı değişkenleri için başlangıç değerleri belirtilir. Bu değerler problemin çözümü için sınır koşullarıdır. Bu değerlerin doğru olup olmaması sonucu değiştirmemekte, çözüme ulaşmada kullanılacak iterasyon sayısını dolayısıyla da çözüme ulaşma zamanını etkilemektedir. Bu nedenle, çözüme yakın başlangıç değeri belirlenerek çözüme ulaşmada kullanılacak iterasyon sayısı ve çözüm zamanı azaltılabilmektedir.
- 6- **Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği**yle akış analizinde, yukarıda belirtilen başlangıç değerlerinden başlanarak, Süreklilik denklemi ve Navier-Stokes denklemlerinin ayrık formları her bir hücre için iteratif (döngüsel) olarak çözülür. Navier-Stokes denkleminin tüm terimleri toplandığında, **artık** (residual) olarak tanımlanan bir parametre hesaplanmakta olup bu parametre çözüm bölgesindeki her bir hücre için sıfır olduğunda çözüm elde edilmektedir. Ancak hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerinde bu toplam nümerik hata nedeniyle hiçbir zaman sıfır olamamakta, iterasyonlar yapıldıkça bu değer azalmaktadır (çözüme yakınsanmaktadır). Bu değer belirlenen, kabul edilebilir hata miktarından az

olduğunda çözüme yakınsanmış ve **Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği**yle akış analizi işlemi tamamlanmış olur.

- 7- Çözüme yakınsandığında elde edilen hız ve basınç gibi akış alanı değişkenleri birleştirilerek grafiksel olarak çizilmekte ve analiz edilmektedir.
- 8- Son olarak, yakınsamış çözüm kullanılarak değerlendirme yapılmak istenilen alan veya hacme ait incelenmek istenilen aerodinamik parametreler hesaplanmaktadır.

II) Türbülans Modelleri ve Türbülanslı Akış Analizi

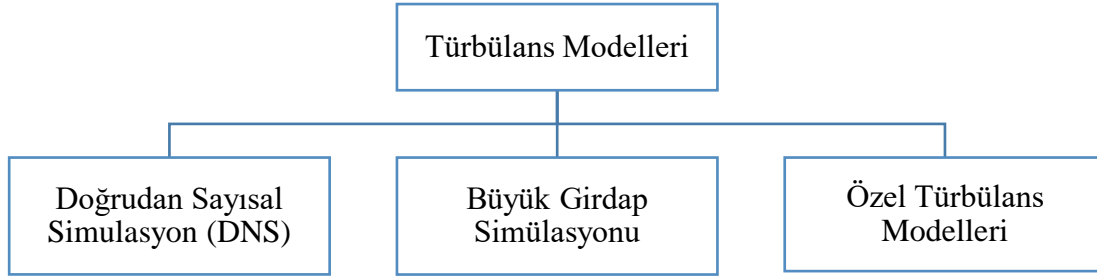
a) Türbülanslı Akış Analizi

Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi, doğadaki akışlar laminer veya türbülanslı olabilmektedir. **HAD** analizlerinde, laminer akış analizleri uygun ağ yapısı oluşturularak kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Ancak mühendislik uygulamalarında karşımıza çıkan türbülanslı akışların doğrudan simülasyonları bilgisayarlardaki kapasite sınırlamalarından dolayı kolaylıkla gerçekleştirilememektedir. Bu nedenle, bu tür akışların simülasyonlarını mümkün kılacak çeşitli türbülans modelleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar kapsamında, gelişmiş karışım ve türbülans difüzyonunu modelleyen ilave transport denklemlerinden yararlanmaktadır. Bu denklemler, kütle ve momentum denklemleriyle birlikte kullanılarak türbülanslı akış analizleri gerçekleştirilebilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2008).

Bir türbülanslı akışta, tüm yönlerde türbülans girdapları adı verilen gelişigüzel, girdaplı ve çevrintili yapılar ortaya çıkmaktadır. Türbülanslı akışla ilgili temel zorluk akış alanının ince özelliklerinin sürekli olarak daimi olmaması ve akışın üç-boyutlu olmasıdır. Türbülanslı akışın **HAD** simülasyonları, ortalama olarak akış alanının daimi olduğu durumlarda bile laminer akış simülasyonlarından daha zordur.

b) Türbülans Modelleri

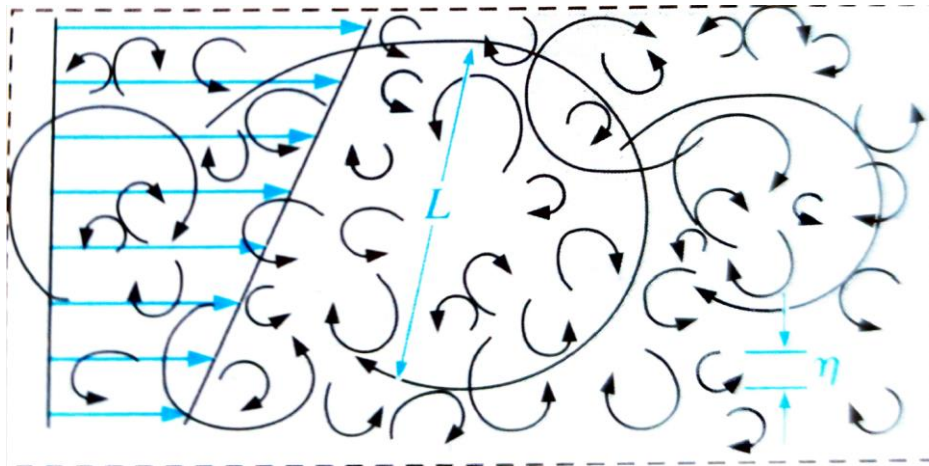
Türbülanslı akışı modellemek için; Doğrudan Numerik Simülasyon (DNS), Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) ve geliştirilmiş özel türbülans modelleriyle simülasyon şeklinde 3 farklı yaklaşım bulunmaktadır (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. Türbülanslı akışı modellemek için kullanılan yaklaşımlar [Çengel ve Cimbala, 2008]

Bazı HAD hesaplamaları, türbülanslı akışın tüm ölçeklerinin daimi olmayan hareketini çözmek için bir girişimin yapıldığı **Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation DNS)** adı verilen bir teknik kullanılmaktadır.

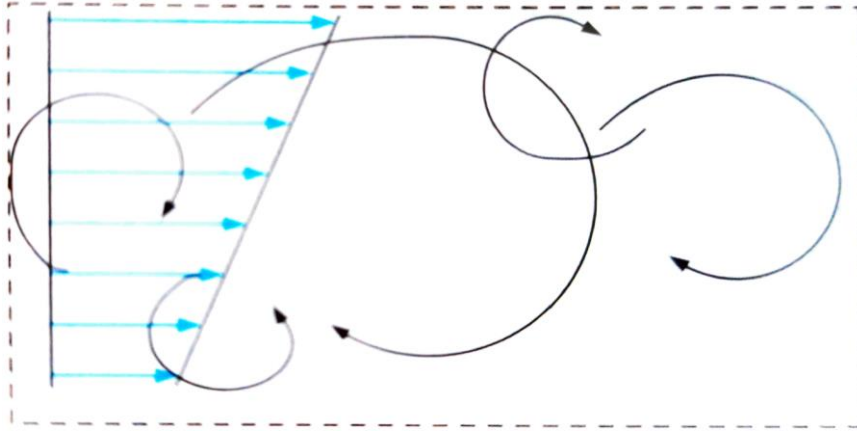
En büyük ve en küçük girdaplar arasında birkaç merteye büyüklük ve zaman ölçeği farkı olabilmekte (Şekil 5.21'de $L \gg \eta$) ve Reynolds sayısı ile birlikte bu farklar daha da büyümektedir. Reynolds sayısı büyüdükçe türbülanslı akışların DNS hesaplamaları daha da güçleşmekte ve DNS çözümleri için aşırı derecede ince, tamamen üç-boyutlu ağlar, büyük bilgisayarlar ve çok uzun CPU zamanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tam ölçekli bir uçak üzerindeki akış şeklindeki yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akışlar için DNS analizlerini günümüz bilgisayarları ile yapabilmek mümkün değildir. Bilgisayarların gelişmesi günümüzde görülen bu olağanüstü hız ile devam etse bile, bu durumun yakın gelecekte değişmesi beklenmemektedir.



Şekil 5.21. 3 Boyutlu türbülans girdapları [Çengel ve Cimbala, 2008]

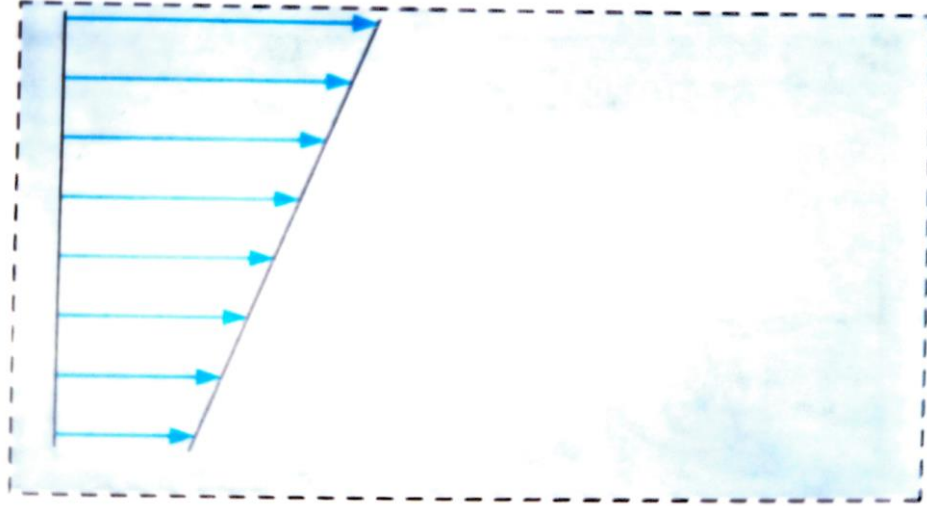
Mühendislik uygulamalarında yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akış alanlarının simülasyonunu yapmak için, bazı basitleştirici kabuller yapmak gerekmektedir. Bu amaçla DNS'nin bir altındaki seviye olan **Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation, LES) Metodu** geliştirilmiştir. Bu yöntem ile türbülans girdaplarının büyük ölçekli daimi

olmayan özellikleri çözülmekte, küçük ölçekli ve yitirgen eğilimli türbülans girdapları ise modellenmektedir (Şekil 5.22). Burada temel kabul küçük türbülanslı girdapların izotropik olduğu şeklindedir. Başka bir ifadeyle, bu yaklaşımda türbülanslı akış alanına bakılmaksızın, küçük girdapların koordinat sisteminin yerleştirilme biçiminden bağımsız olduğu ve her zaman istatistiksel olarak benzer ve tahmin edilebilir şekilde davrandığı kabul edilmektedir. Akış alanındaki en küçük girdapları çözme ihtiyacını ortadan kaldırdığı için **LES**, **DNS**'nin kullandığı bilgisayar kaynaklarından çok daha azını kullanır. Buna rağmen, günümüz teknolojisiyle uygulamadaki mühendislik analizi ve tasarımı için ihtiyaç duyulan bilgisayar gereksinimlerin karşılanması zor olduğu literatürdeki çalışmalarda belirtilmektedir.



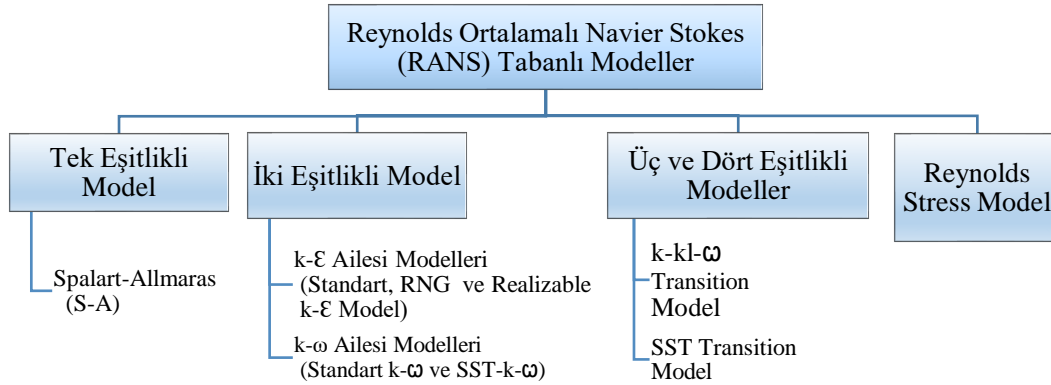
Şekil 5.22. Büyük türbülans simülasyonu ile türbülans simülasyonları [Çengel ve Cimbala, 2008]

DNS ve LES mühendislik uygulamalarında kullanılmadığından, bazı **özel türbülans modelleri**yle tüm daimi olmayan türbülans girdaplarını modellemek için çalışmalar yürütülmüştür. Bu amaçla geliştirilen modellerde hiçbir türbülans girdabının, daimi olmayan özelliklerini çözmek için bir girişimde bulunulmamış, türbülans girdaplarının yol açtığı artan karışım ve difüzyonu dikkate almak için çeşitli matematiksel modellerden yararlanılmıştır (Şekil 5.23). Söz konusu türbülans modellerini kullanırken daimi Navier-Stokes Denklemi, Reynolds-ortalama Navier-Stokes (Reynolds-averaged Navier-Stokes RANS) Denklemiyle yer değiştirmektedir. Söz konusu modeller RANS tabanlı modeller olarak da bilinmektedir.



Şekil 5.23. Özel türbülans modelleriyle türbülans girdapları [Çengel ve Cimbala, 2008]

Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için tek eşitlikli model olan Spalart-Almaras (S-A), İki eşitlikli model olan k - ϵ ailesi (Standart k - ϵ , RNG k - ϵ ve Realizable k - ϵ) ve k - ω ailesi (Standart k - ω , SST k - ω) modelleri ile üç ve dört eşitlikli k - kl - w Transition Model, SST Transition Model ve Reynolds Stress Model gibi akış modelleri kullanılmaktadır (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. RANS tabanlı modeller

Söz konusu akış modelleriyle ilgili literatürde bulunan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir (ANSYS Inc, 2013; Özdoğan ve ark., 2016; Schmitz, 2019).

1) Spalart-Almaras (S-A) Modeli

Havacılık uygulamaları için belirli bir düzenin olmadığı (unstructured) uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilen **Spalart-Almaras (S-A)** modeli, düşük reynolds sayılı uygulamalar için kullanılan bir akış modelidir.

S-A Modeli, duvarla sınırlandırılmış (wall-bounded) akışlar, ani olmayan akış ayrılmaları veya orta düzey akış ayrılmaları (mild separation) ve devirdaim şeklindeki akışın bulunduğu sistemlerde ekonomik ve hassas sonuçlar verebilmektedir.

S-A Modeli, akıştaki ayrılmalar ve türbülans yoğunluğunun modellenmesi konusunda zayıf bir model olarak değerlendirilmektedir.

2) k-ε Ailesi Modelleri

k-ε Ailesi Modelleri (Standart k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε) kabul edilebilir bir hassasiyetle farklı akış türlerinin modellenenebildiği ekonomik akış modellerindedir. Bu modeller yüksek reynolds sayılı akışların modellenmesinde kullanılabilir.

k-ε Modellerinde, türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerjinin yutulma miktarı (ε) için taşınım eşitliklerini modellemeye dayanan yarı ampirik iki eşitlikli bir modeldir. Bu modelde türbülans viskozitesinin, türbülans hızı ve uzunluk ölçeği ile orantılı olduğu kabul edilir. Bu hız ve uzunluk ölçekleri türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun yutulma miktarından (ε) elde edilir. k ve ε transport denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$k: \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (5.47)$$

$$\epsilon: \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5.48)$$

Burada P_k , türbülans üretim hızı olup esasen Reynolds gerilmelerinin bir fonksiyonudur. $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$, $C_{1\epsilon} = 1.44$ ve $C_{2\epsilon} = 1.92$, geniş bir türbülans aralığı için belirlenmiş ampirik model sabitleridir.

RNG k-ε Model matematiksel teknikler kullanılarak anlık Navier-Stokes denklemlerinden türetilmiş olup yeniden normalleştirme grup metodları (renormalization group methods) olarak adlandırılır. Bu model, **standart k-ε modelle** aynı formda olmasına rağmen k ve ε eşitliklerinde ek terimler içermekte ve bu ek terimler ani gerilmeli akışlarda iyileştirmeler sağlamaktadır. **RNG k-ε model** ayrıca dönme veya girdap'ın (swirl) türbülansa etkisini de içermektedir. Bu model dönmeli olan akışlarda standart **k-ε modelle** göre daha doğru sonuçlar verebilmektedir.

Realizable (Gerçeklenebilir) k-ε Model, türbülans viskozite için yeni bir formül içermesi ve yutulma miktarı (ε) için yeni bir denklem kullanılması bakımından **standart k-ε modelden** iki önemli farklılığa sahiptir. Bu model düzlemsel ve dairesel kesitli jetlerin yayılım hızlarının daha doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayabilmektedir. Aynı zamanda dönme, güçlü basınç gradyanlarındaki sınır tabakalar, ayrılmalar ve devirdaim şeklindeki akışlar için

iyi bir performans sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar ayrılmanın olduğu akışlar ve karmaşık ikincil akış özellikli akışlar için **Realizable k-ε** modelinin, k-ε modelleri arasında en iyi performansı sağladığını göstermektedir.

k-ε Modelleriyle sınır tabaka yakınındaki akış davranışının doğru bir şekilde modellenebilmesi için bu modellerle birlikte geliştirilmiş sınır tabaka seçeneği (enhanced wall treatment) de kullanılabilir.

k-ε Modelleri akım çizgilerinde güçlü eğrilikler bulunan sistemler, dönüşlü akış bulunan sistemler, akış ayrılması bulunan sistemler ve düşük reynolds sayılı akışların modellenmesi için uygun model değildir.

Genel olarak, ε tabanlı denkleme dayalı türbülans modellerinin, kanat profilleri için ayrılmanın başlangıcına ilişkin gecikmiş tahminlerde bulunduğu ve dolayısıyla yüksek hücum açıları için akış ayırma miktarını düşük olarak öngördüğü kabul edilmektedir.

3) k-ω Ailesi Modelleri

k-ω Ailesi Modelleri, k-ε Modellerinden daha popüler bir model olup sınır tabaka yakınındaki akışın daha doğru bir şekilde modellenmesinde kullanılabilir.

k-ω Ailesi Modellerinde bulunan k türbülans kinetik enerjisi, ω ise türbülansın boyutunu gösteren özgül türbülans yayılım katsayısıdır. **k** ve **ω** transport denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$k: \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma^* \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5.49)$$

$$\omega: \frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (5.50)$$

Denklemlerde model sabitleri $\alpha = 0.556$, $\beta = 0.075$, $\beta^* = 0.090$ ve σ , $\sigma^* = 0.500$ şeklindedir.

k-ω Ailesi Modelleri düşük reynolds sayılı akışlarda da kullanılabilen bir model olup akışkanların sıkıştırılabilirlik etkisinin de dikkate alınabildiği bir akış modelidir.

k-ω Ailesi Modelleri, k-ε Modellerinin sınır tabakadaki davranışından daha hassas sonuçlar sağlayabilmektedir.

k-ω Ailesi Modelleri arasında en yaygın kullanılan ve bu çalışmaya da konu olan akış modeli **SST k-ω Modelidir**. Bu model k-ω tabanlı türbülans modelinin SST formülasyonu, daha önce açıklanan k-ε ve k-ω türbülans modellerinin en iyi özelliklerini birleştirmektedir. Sınır tabakanın alt kısımlarında k-ω modeli ek sönmüleme işlevlerine ihtiyaç duymadan düşük Re sayıları için problemin çözümünü sağlamaktadır.

SST formülasyonu daha sonra serbest akışta bir k-ε tipi modele geçmekte ve böylece k-ω tipi modellerin serbest akış koşullarına duyarlılığını önlemektedir. Ortaya çıkan SST k-ω

tabanlı türbülans modeli, ters basınç gradyanlarında ve ayrılmış akışta güvenilir bir davranış sergilemektedir.

Bu modele ait k ve ω transport denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$k: \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5.51)$$

$$\omega: \frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5.52)$$

SST k - ω modeli, durgunluk bölgeleri ve güçlü ivmeye sahip bölgeler gibi büyük türbülans seviyesine sahip bölgelerde normalden daha yüksek türbülans seviyeleri üretmektedir. Ancak bu eğilim, k - ϵ ve k - ω modelinden daha az seviyededir.

Rüzgar enerjisi topluluğunda, çözüm doğruluğu ve hesaplama maliyeti arasında iyi bir uyum sağladığından dolayı yalnızca iki denklemlilik türbülans modellerine odaklanılmıştır. SST k - ω türbülans modeli, rüzgar enerjisi bilimi topluluğu tarafından yaygın olarak kullanılan iki denklemlilik türbülans modelidir.

Türbülans modellerinin, akışın diferansiyel denklemlerini çözülebilmesi için birer tamamlayıcı denklem oldukları ve bunların büyük ölçüde deneysel sabitlere dayalı yaklaşımlar olduğunu vurgulamaktadır. Ancak hiçbir türbülans modeli genel olmadığından benzer akışlarda iyi sonuç verseler bile özellikle akış ayrılmasının ve tutunmasının ve/veya büyük ölçekli daimi olmama durumunun söz konusu olduğu genel türbülanslı akış modeli bulunmamaktadır. Bu nedenle geliştirilen her türbülans modeli akış alanına uygulandığında fiziksel olarak doğru çözümler vermemektedir.

Türbülanslı akışa ait HAD çözümleri, yalnızca hesaplamalarda kullanılan türbülans modelinin uygunluğu ve geçerliliği kadar iyidir. Laminer akışlara HAD'ı uygularken ağı inceltmek suretiyle simülasyonun fiziksel doğruluğunu çoğunlukla iyileştirebilmektedir. Türbülans modellerini kullanan türbülanslı akış HAD analizleri için ise durum bu şekilde değildir. İnceltmiş bir ağ daha iyi sayısal doğruluk sağlarken; çözümün doğruluğu her zaman türbülans modelinin fiziksel doğruluğu ile sınırlı kalmaktadır.

Hesap çizelgeleri gibi her yerde bulunmamalarına veya matematiksel çözümler kadar kolay kullanılmamalarına karşın, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları sürekli olarak gelişmekte ve giderek yaygınlaşmaktadır. Geçmişte bu yazılımlar, kendi programlarını yazan

ve süper bilgisayarları kullanan uzman bilim insanları tarafından kullanılmaktayken; günümüzde ise sayısız özelliklerle donatılmış ticari HAD yazılımları ve kolay kullanımlı arayüzlere sahip kişisel bilgisayarlar kullanılarak makul bir fiyata uygun çözümler elde edilebilmekte ve tüm mühendislik disiplinlerinde kullanılabilir. Türbülans modellerini kullanan HAD programları çalıştırırken yeteri kadar ince bir ağ oluşturduğundan ve tüm sınır şartlarının doğru şekilde tanımlandığından emin olunmalıdır. Ancak sonuç, ağın ne kadar iyi olduğuna veya sınır şartlarınızın ne kadar geçerli olduğuna bakılmaksızın kullanılan türbülans modeli kadar iyi olabilmektedir. Bilgisayarlar daha hızlı ve daha güçlü olmaya devam ettikçe, karmaşık mühendislik sistemlerinin tasarlanması ve analizinde HAD'ın daima artan bir rol üstleneceği öngörülmektedir.

Tek eşitlikli modelden dört eşitlikli modele doğru gidildikçe türbülans modelleme hassasiyeti artmakta, türbülans modeli karmaşıklaşmakta ve çözüm zorlaşmakta olup en uygun çözüm için gerekli türbülans modelinin, deneme yanılma yoluyla belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada kanat etrafındaki akışın modellenmesi için **Laminer akış, Spalart-Almaras (S-A) Modeli, Realizable k-ε Modeli ve SST k-ω Modeli** kullanılmıştır.

5.1.4. Kanadın Aerodinamik Tasarım Adımları

Kanadın aerodinamik tasarımı için yapılması gereken işlemler aşağıda verilmiştir [Manwell, 2002; Khaled, 2017]

- **Rüzgar Türbini Gücünün Belirlenmesi**

Tasarımı yapılması planlanan belirli boyuttaki bir **rüzgar türbininin gücü** aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir (Hau, 2006).

$$N = C_p \eta \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (5.53)$$

Burada N güç, C_p türbinin güç katsayısı, η elektriksel ve mekanik verim, R rotor yarıçığı, v ise rüzgar hızı şeklindedir.

- **Türbinin Uç Hız Oranının (λ) Seçimi**

Uç hız oranı mekanik enerji üretmek amacıyla kullanılan türbinlerde 1 ile 3 aralığında, elektrik üretmek amacıyla kullanılan türbinlerde ise 4 ile 12 aralığında seçilmektedir. Bu oranı elektrik üretmek amacıyla kullanılan yatay eksenli, iki kanatlı rüzgar türbinlerinde 9-10; üç kanatlı türbinlerinde ise 6-8 arasında olmaktadır (Kaya, 2014; Schubel ve Crossley, 2012).

Tez çalışması kapsamında yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbine ait 1 m'lik kanadın tasarım ve imalatının yapılması planlandığından kanadın uç hız oranı (λ) 7 olarak seçilmiştir (Schubel ve Crossley, 2012).

- **Kanat Sayısının (B) Seçimi**

Rüzgar türbinlerinde maliyet, verimlilik, dayanıklılık kriterlerine göre en optimum kanat sayısı 3 olarak belirlendiğinden kanat sayısı (B) 3 olarak alınmaktadır.

- **Seçilen Uç Hız Oranına Uygun Aerofoil Seçimi**

Günümüzde havacılıkta ve rüzgar türbinlerinde çeşitli aerofoiller kullanılmaktadır. Literatürde National Advisory Committee For Aeronautics (NACA) aerofoillerinin havacılık uygulamaları için daha uygun olduğu belirtildiğinden rüzgar türbinleri için Amerikan Enerji Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından NREL S seri aerofoilleri geliştirilmiştir (Somers, 2005).

Bu çalışma kapsamında rüzgar türbinlerinde kullanılan 1 m'lik kanat tasarımı yapıldığından 1 m'lik kanat için NREL tarafından önerilen S835, S833 ve S834 aerofoilleri seçilmiştir. Literatürdeki çalışmalar ve NREL'in aerofoil katalog bilgileri dikkate alınarak S835 aerofoili kanat uzunluğunun % 20'lik kısmına, S 833 aerofoili % 75'lik kısmına, S834 aerofoili ise % 95'lik kısmına yerleştirilmiştir. Diğer kısımlar ise iki kesit arasında geçiş kesitlerinden oluşmaktadır (Somers, 2005).

- **Seçilen Aerofoilin Kaldırma ve Sürüklenme (C_L Ve C_D) Katsayılarının Belirlenmesi**

Aerofoillerin C_L ve C_D katsayıları farklı Reynold sayıları için yapılan deneysel çalışmalar ile belirlenmektedir.

Bu çalışma kapsamında S835, S834 ve S833 aerofoillerine ait kaldırma katsayıları NREL'in aerofoil katalogları incelenerek belirlenmiş olup söz konusu aerofoillerin kaldırma ve sürüklenme kuvveti katsayıları sırasıyla S835 için 1.2 ve 0.06, S833 için 1.1 ve 0.05, S834 için ise 1 ve 0.0375 olarak belirlenmiştir (www.wind.nrel.gov.tr).

- Kanat uzunluğu boyunca kanadın bağlama açısı (ϕ) ve veter boylarının (c) belirlenmesi

Kanat Elemanı Momentum Teorisine göre kanat kesitlerindeki bağlama açısı (ϕ) ve veter boyları (c) aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir (Manwell, 2010; Khaled 2017).

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3\lambda_r}\right) \quad (5.54)$$

$$c = \frac{8\pi r \sin \phi}{3B C_L \lambda_r} \quad (5.55)$$

Bu çalışma kapsamında 1 m'lik kanadın aerodinamik tasarımı seçilen aerodinamik tasarım parametrelerinden yararlanılarak belirlenmiş olup söz konusu parametreler ve bu parametreler kullanılarak oluşturulan kanat katı modeli Bulgular ve Tartışma kısmında verilmiştir.

5.2. Kanadın Mekanik Tasarımı

Kanat, kullanım ömrü boyunca çeşitli etkilere maruz kalmakta olup rüzgâr türbinleri ve kanatların öngörülen kullanım ömrü boyunca sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi beklenmektedir. Kanat tasarımı, önceki kısımda verilen aerodinamik tasarımın yanında kanadın çalışma koşullarına dayanımını esas alan mekanik tasarımı da içermektedir. Bu bölümde kanadın mekanik tasarımı ele alınmıştır.

Kanadın mekanik tasarımı; mekanik tasarımı için kullanılan temel mekanik tasarım parametreleri, kanadın IEC 61400-2 standartlarına göre tasarım gereksinimleri ve tez çalışması kapsamında geliştirilen 1 m'lik kanadın mekanik tasarımı için kullanılan mekanik tasarım adımları şeklinde değerlendirilen üç aşamada gerçekleştirilmektedir.

5.2.1. Temel Mekanik Tasarım Parametreleri

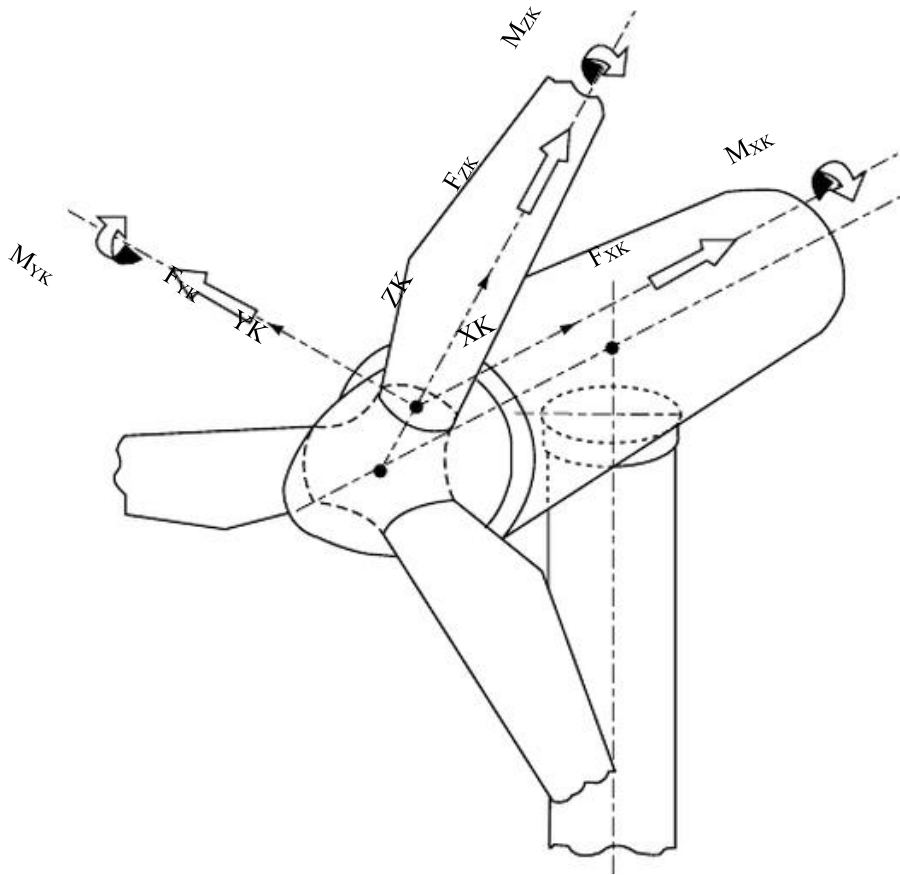
Kanadın mekanik tasarımında kanada etki eden yükler, kanadın zorlanma halleri ve gerilmeler gibi çeşitli parametrelerden yararlanılmakta olup sözü edilen parametreler aşağıda özetlenmiştir.

5.2.1.1. Kanada Etki Eden Yükler

Rüzgâr türbin kanatları, rüzgârın neden olduğu **aerodinamik yükler**, kanadın ağırlığından kaynaklanan **yerçekimi yükleri**, kanadın hareketinden kaynaklanan **santrifüj yükleri**, kanadın ve türbinin yön değiştirmesinden kaynaklanan **jiroskop yüklerine** maruz kalmaktadır. Rüzgâr

türbinleri bu kuvvetlerin etkileri yanında aşırı soğuk veya sıcak, güneş radyasyonu, erozyon ve deprem gibi etkilere de maruz kalmaktadır. Ayrıca kanat **yaw mekanizması hareketi** ve oluşabilecek çeşitli hatalara da maruz kalabilmektedir (Kaya, 2014).

Kanada etki eden kuvvetleri ve kanadın zorlanma hallerini değerlendirebilmek için kanat koordinat sistemi tanımlanmıştır (Şekil 5.25). Kanat koordinat sisteminde XK, YK ve ZK koordinat düzlemlerini, F_{XK} , F_{YK} ve F_{ZK} ilgili yönlerdeki kuvvetleri M_{XK} , M_{YK} ve M_{ZK} ise ilgili eksenlerde etki eden momentleri belirtmektedir. Kanada etki eden yüklerden; aerodinamik yükler için **a**, yerçekimi yükleri için **y**, atalet (santrifüj) yükleri için ise **s** indisleri kullanılmıştır.



Şekil 5.25. Kanat koordinat sistemi (Liu ve ark., 2010)

a) Aerodinamik Yükler

Kanat, rüzgârdan kaynaklanan **kaldırma kuvveti** ve **sürükleme kuvveti** olmak üzere iki aerodinamik kuvvete maruz kalmakta olup bu kuvvetler aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir (DNV, 2002).

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho c U^2 \quad (5.56)$$

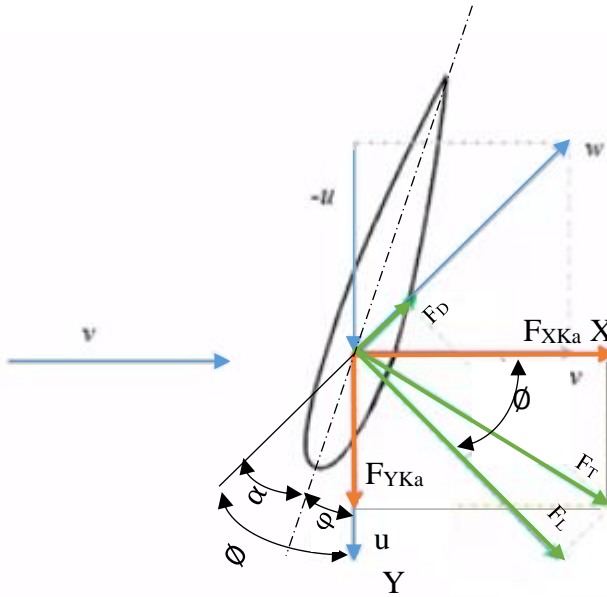
$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho c U^2 \quad (5.57)$$

Burada C_L kaldırma kuvveti katsayısı, C_D sürüklenme kuvveti katsayısı, ρ havanın yoğunluğu, c aerofoil profil kiriş hattı uzunluğu, U ise izafi rüzgâr hızıdır. C_L ve C_D katsayıları farklı Reynolds sayıları ve farklı hücum açıları için gerçekleştirilen deneylerle belirlenmektedir (DNV, 2002).

Kanada etki eden toplam aerodinamik kuvvet, sözü edilen kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvvetinin bileşkesi alınarak belirlenmektedir.

$$F_T = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \quad (5.58)$$

Kanat koordinat sisteminde bileşke aerodinamik kuvvet, normal kuvvet (F_{XKa}) ve teğetsel kuvvet (F_{YKa}) olmak üzere iki bileşenden oluşmakta olup söz konusu bileşenler Şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5. 26. Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden normal ve teğetsel kuvvetler

Kanat koordinat sisteminde normal kuvvet (F_{XKa}) ve teğetsel kuvvet (F_{YKa}) aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir.

$$F_{XKa} = \frac{1}{2} \rho c U^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \quad (5.59)$$

$$F_{YKa} = \frac{1}{2} \rho c U^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (5.60)$$

Burada ϕ kanat açısı olarak isimlendirilmekte olup hücum açısı (α) ve bağlama açısının (φ) toplamıdır (Liu, 2010; Kaya, 2014).

b) Yerçekimi Yükleri

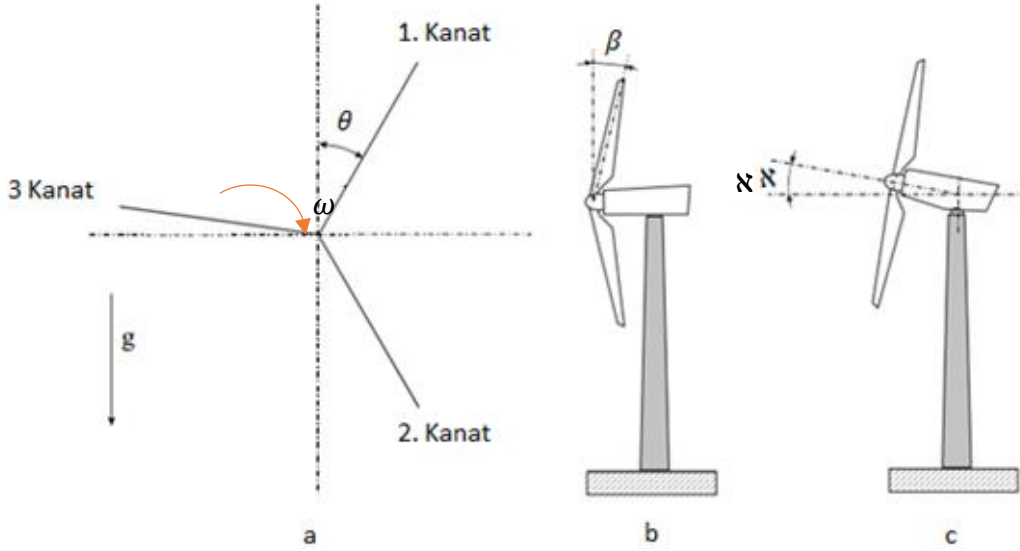
Kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri türbin boyutlarının karesi ile orantılı olarak değişmektedir. Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden yerçekimi yükleri aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$F_{XKy} = \bar{m} g \cos \theta \sin \beta \cos \aleph \quad (5.61)$$

$$F_{YKy} = \bar{m}g \sin \theta \cos \aleph \quad (5.62)$$

$$F_{ZKy} = \bar{m}g \cos \theta \cos \beta \cos \aleph \quad (5.63)$$

Burada \bar{m} birim kanat kesit kütlesi, g yerçekimi ivmesi, θ kanat **azimuth açısı**, β rotor **koniklik açısı**, \aleph ise **kanat eğim açısı**dır. Kanat **azimuth açısı** (θ), kanadın saat yönünde dönüşü sırasında kanat ile kanadın düşey konumu arasında kalan açı (Şekil 5.27a), Koniklik açısı (β), kanat ile düşey düzlem arasındaki açı (Şekil 5.27b), Eğim açısı (\aleph) ise rüzgâr türbininin kanatlar ve gövdenin yatay düzlemle yaptığı açıdır (Şekil 5.27c) (Liu 2010; Kaya 2014).



Şekil 5. 27. Kanat azimuth, koniklik ve eğim açıları (Kaya, 2014)

c) Atalet Yükleri (Santrifüj Yükleri)

Kanadın kendi eksenini etrafındaki dönme hareketi nedeniyle oluşan atalet yükleri, kanat koordinat sisteminde F_{XKs} ve F_{ZKs} bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden F_{ZKs} santrifüj çekme kuvveti, F_{XKs} ise santrifüj kesme kuvveti olarak bilinmektedir. Söz konusu bileşenler aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir (Schubel ve Crossley, 2012).

$$F_{ZKs} = \bar{m}\omega^2 r \cos \beta \quad (9)$$

$$F_{XKs} = \bar{m}\omega^2 r \sin \beta \quad (10)$$

Burada \bar{m} birim kanat kesit kütlesi, ω kanadın açısal hızı, r kanat kesitinin kanat kök kısmına olan uzaklığı, β ise koniklik açısıdır.

Ayrıca kanadın dönme açısındaki (pitch mekanizmasının hareketi) ve yönelme açısındaki değişimler (yaw mekanizmasının hareketi) nedeniyle kanatta jiroskop kuvvetleri de oluşabilmektedir. Bu kuvvetlerin büyüklüğünün azaltılması için kanadın dönme açısı ve yönelme açısındaki değişimin yavaş yavaş yapılması (saniyede 0.5° gibi) önerilmektedir.

Rüzgâr türbin kanatları türbinin işletme döneminde meydana gelebilecek hatalar nedeniyle de çeşitli yüklemelere maruz kalabilmektedir. Ancak bu kuvvetler küçük olduğundan genellikle ihmal edilmektedir (Hau, 2006).

Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden toplam yükler, aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir (Liu, 2010).

$$F_{XK} = F_{XKa} + F_{XKy} + F_{XKs} \quad (5.66)$$

$$F_{YK} = F_{YKa} + F_{YKy} \quad (5.67)$$

$$F_{ZK} = F_{ZKy} + F_{ZKs} \quad (5.68)$$

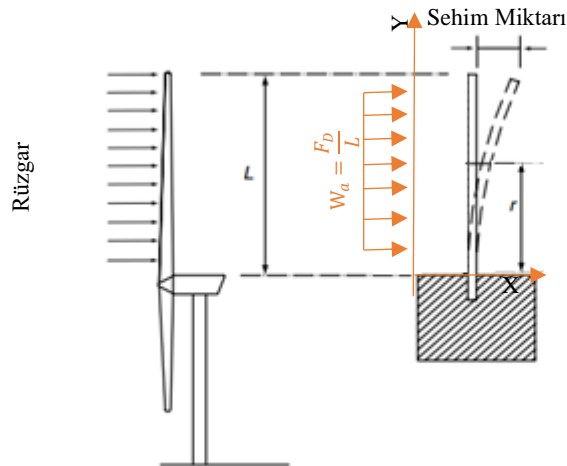
Kanat koordinat sistemine göre kanada, XK yönünde aerodinamik yükler, yerçekimi yükleri ve santrifüj yükleri, YK yönünde aerodinamik yükler ve yerçekimi yükleri, ZK yönünde ise yerçekimi yükleri ve santrifüj yükler etki etmektedir.

5.2.1.2. Rüzgar Türbin Kanadının Zorlanma Halleri ve Gerilmeler

Rüzgar türbin kanatları yukarıda belirtilen kuvvet etkileri nedeniyle çeşitli zorlanmalara maruz kalmaktadır. Söz konusu zorlanma halleri bu kısımda verilmiştir.

a) Aerodinamik Yükler Nedeniyle Oluşan Eğilme (Flapwise Bending)

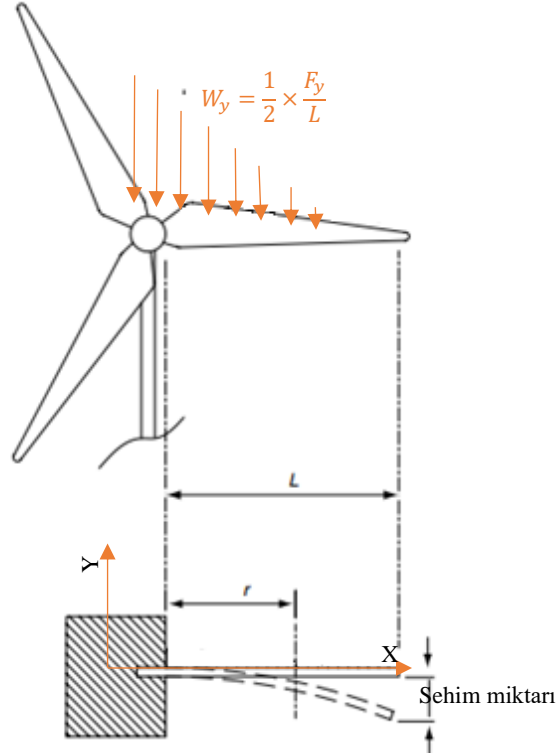
Rüzgar türbin kanatları, kanadın hücum kenarına etki eden aerodinamik yükler nedeniyle eğilme momentine maruz kalmaktadır (Şekil 5.28).



Şekil 5.28. Aerodinamik yüklerden kaynaklanan kanat eğilmesi (Schubel ve Crossley, 2012)

b) Yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme (Edgewise Bending)

Kanat, kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri nedeniyle de eğilme momentine maruz kalmaktadır (Şekil 5.29).



Şekil 5.29. Yerçekimi yüklerinden kaynaklanan kanat eğilmesi (Schubel ve Crossley, 2012)

5.2.2. IEC 61400-2 Standartına Göre Kanadın Tasarımı

Küçük ölçekli rüzgar türbinleri için geliştirilen IEC emniyet standardı (IEC 61400-2) ve Germanischer Lloyd tasarım kılavuzları (GL [1]), tasarımcılar için çeşitli zorluklara neden olmasına rağmen aynı zamanda güvenli tasarım imkanı sunmaktadır. Bu çalışmada yatay eksenli 3 kanatlı rüzgar türbinlerine ait 1 m uzunluğundaki kanat ele alındığından bu çalışma kapsamında IEC 61400-2 standardından yararlanılmıştır.

50 kW'dan daha düşük nominal güce karşılık gelen, 200 m²'den daha düşük süpürme alanına sahip rüzgar türbinleri, IEC 61400-2 standardında, küçük ölçekli türbin olarak ifade edilmektedir. Söz konusu standarda göre, 2 m² veya daha küçük rotor süpürme alanına sahip türbinler mikro türbin olarak tanımlanmakta olup bu türbinlerin sertifikasyonu kuleden bağımsız olarak gerçekleştirilmektedir. 2m²'den büyük rotor süpürme alanına sahip rüzgar türbinler için ise kule ve türbinin birlikte değerlendirilmesi ve sertifikalandırılması gerekmektedir.

IEC 61400-2’de, rüzgar türbini ve elemanlarının emniyet durumunun kontrolü için aşağıda belirtilen 3 farklı yöntemden birisi kullanılarak değerlendirilme yapılması istenmektedir [IEC 61400-2; Wood, 2011].

1) Basit Yük Modeli (Simple Load Model, SLM)

Bu yöntem ana yükler için anlaşılır ve basitleştirilmiş denklemleri yüksek güvenlik faktörleriyle birleştiren bir yaklaşımdır. **Basit Yük Modeli (SLM)** ana yükleme durumları ve yüksek **güvenlik faktörleri (U_f ve U_m)** sayesinde, basit ve anlaşılır tasarım metodolojisi olarak kabul edilmektedir.

2) Aero-elastik Modelleme

Bu yöntem, rüzgar yönündeki değişiklikler ve fırtına gibi zor koşullardaki rüzgar parametrelerinin dağılımı şeklindeki girdiler nedeniyle oluşan rüzgar türbini yüklerinin bilgisayar ortamında hassas bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, **Bladed** gibi programlar kullanılarak büyük ölçekli rüzgar türbinleri için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Aero-elastik modelleme yöntemiyle ilgili temel sorun, bu yaklaşımı kullanan yazılımların yüksek maliyetli olması ve bu yöntemin uygulanabilmesi için ihtiyaç duyulan yüksek zamandır. Bu nedenle **Aeroelastik** modelleme, küçük ölçekli rüzgar türbinleri için tercih edilmemektedir.

3) Deneysel Yük Ölçümleri

Bu yöntem rüzgar türbini ve elemanlarının emniyet durumu kontrolü için kullanılabilir bir yöntemdir. İlk iki metodoloji tasarım aşamasında kullanılabilirken; bu yöntem alan testi gerektiren, yapılması ve değerlendirilmesi için zamana ihtiyaç duyulan bir yaklaşım olduğundan küçük ölçekli rüzgar türbinleri için uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmemektedir.

5.2.3.1. Küçük Ölçekli Rüzgar Türbini İçin Basit Yük Modeli

Basit Yük Modeli (SLM), göbeğe sabitlenmiş iki veya daha fazla kanadı olan yatay eksenli rüzgar türbinlerine uygulanabilmektedir. Söz konusu model küçük ölçekli rüzgar türbinleri için geliştirilmiş özgün bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu model büyük ölçekli rüzgar türbinleri için yapılan karmaşık ve pahalı aeroelastik modelleme yaklaşımına alternatif olarak geliştirilmiştir (Wood, 2011).

Basit yük modelinden yararlanarak rüzgar türbinlerinde emniyet durumunun kontrolü için 6 farklı tasarım durumu ve 10 yükleme durumu tanımlanmış olup söz konusu tasarım ve yükleme durumlar Çizelge 5.3’de verilmiştir. Bu yükleme durumları normal çalışma koşullarında ortaya çıkabilecek etkileri, normal çalışma koşullarında meydana gelebilecek hataları, yüksek rüzgar hızları ve bakım zamanlarında türbinin kapatılması, park pozisyonuna alınmasını ve rolantide çalıştırılmasını tanımlamaktadır. Basit yük modeli kapsamında türbinin taşınması, montajı, bakımı ve tamiraty gibi diğer koşulları içinde yükleme durumu tanımlanmıştır. Çizelgede ayrıca belirtilen yükleme durumları için rüzgar hızları da belirtilmiştir.

Çizelge 5.3. Basit Yük Modeli için tasarım yükleme durumları [IEC 61400-2; Wood, 2011]

Tasarım Durumu	Yükleme Durumu	Tanımlama	Rüzgar Hızı
I- Güç Üretimi	A	Normal İşletme Koşulları	
	B	Yaw Mekanizmasının Hareketi	$V_{\text{tasarım}}$
	C	Yaw Mekanizması Hatası	$V_{\text{tasarım}}$
	D	Maksimum İtki Kuvveti	$2.5 V_{\text{tasarım}}$
II- Güç Üretiminde Hata	E	Maksimum Dönme Hızı	
	F	Yük Aktarmında Kısa Devre	$V_{\text{tasarım}}$
III- Kapatma	G	Kapatma (Frenleme)	$V_{\text{tasarım}}$
IV- Yüksek Rüzgar Yükleri	H	Park Edilmiş Durum İçin Rüzgar Yükleme	V_{maks50}
V- Hata Koşullarında Park	I	Park Edilmiş Durumda Maksimum Rüzgar Yüküne Maruz Kalma	V_{ref}
VI-Nakliye, Montaj, Bakım ve Onarım	J	Üretici Tarafından Tanımlanacaktır	

IEC 61400-2 standardına göre basit yük modeli kullanılarak türbinin analizi için türbin sınıfının seçilmesi gerekmekte olup referans rüzgar hızı ve ortalama rüzgar hızına göre söz konusu sınıflar Çizelge 5.4’de verilmiştir. Çizelgedeki referans rüzgar hızı (V_{ref}) belirli bir konum için 10 dk arayla ölçülen ortalama rüzgar hızı; ortalama rüzgar hızı (V_{ort}) belirli bir göbek yüksekliği için yıllık ortalama rüzgar hız büyüklüğüdür.

Çizelge 5.4. IEC 61400-2 standartına göre türbin sınıfları [IEC 61400-2]

Sınıf	I	II	III	IV
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	30
V_{ort} (m/s)	10	8.5	7.5	6

Basit Yük Modeliyle türbinin analizi için, aşağıdaki parametrelerin belirlenmesi veya seçilmesi gerekmektedir.

- Tasarım Açısal Hızı, $\omega_{n,tasarım}$ (Tasarım açısal hızı aerodinamik analiz sonucu belirlenmektedir.)
- Tasarım Rüzgar Hızı, $V_{Tasarım} = 1.4V_{ort}$ (V_{ort} ortalama rüzgar hızı)
- Tasarım Şaft Torku (Momenti) $T_{Tasarım}$
Tasarım torku ($T_{Tasarım}$) aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir.

$$T_{Tasarım} = \frac{30N_{Tasarım}}{\eta\pi\omega_{n,tasarım}} \quad (5.69)$$

Burada $N_{tasarım}$ türbin gücü, η rotor ile elektrik çıkışı arasındaki bileşenlerin verimi (Denklem 5.70), $\omega_{n,tasarım}$ ise tasarım açısal hızıdır.

$$\eta = \left\{ \begin{array}{l} (0.6 + 0.005 N_{tasarım}) \\ 0.7 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} N_{tasarım} < 20 \text{ kW} \\ N_{tasarım} > 20 \text{ kW} \end{array} \right\} \quad (5.70)$$

- Maksimum Yaw Oranı, $\omega_{yaw,maks}$
 $\omega_{yaw,maks}$ maksimum yaw oranı olup kanadın izdüşüm alanına ($A_{izdüşüm} = \pi R^2$) göre aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$\omega_{yaw,max} = \left\{ \begin{array}{l} 3 - 0.01 (A_{izdüşüm} - 2) \\ 3 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} A_{izdüşüm} > 2 \text{ m}^2 \\ A_{izdüşüm} \leq 2 \text{ m}^2 \end{array} \right\} \quad (5.71)$$

a)Yükleme Durumu A: Normal İşletme Koşulları

İlk yükleme durumu olan normal işletme koşulları kapsamında, türbinin normal çalışma koşullarındaki yorulma davranışı değerlendirilmektedir. Bu yükleme durumunda, nadiren meydana geldiği varsayılan, normal olmayan çalışma koşullarının, yorulma ömrüne dolaylı olarak katkıda bulunduğu kabul edilmektedir. Bu bölümdeki hesaplamalarda, tasarıma ait açısal hız ve tork değerlerinin 0.5 katı ile 1.5 katı aralığındaki değişimlere ait maksimum yükler (peak-to-peak loads) tanımlanmaktadır.

Merkezkaç yükleri (ΔF_{Zk}) aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir.

$$\Delta F_{Zk} = 2m_k R_{km} \omega_{n,tasarım}^2 \quad (5.72)$$

Burada M_k kanat kütlesi R_{km} kanadın kütle merkezinin yarıçapı, $\omega_{n,tasarım}$ ise tasarım açısal hızıdır.

Aşağıdaki iki denklem ise sırasıyla lead-lag momenti (ΔM_{xk}) (dönme yönünde) ve flapwise momentini (ΔM_{yk}) vermektedir.

$$\Delta M_{xk} = T_{Tasarım}/B + 2m_k g R_{km} \quad (5.73)$$

$$\Delta M_{yk} = \lambda_{Tasarım} T_{Tasarım}/B \quad (5.74)$$

Burada B kanat sayısı, g yerçekimi ivmesi, $\lambda_{tasarım}$ tasarım uç-hız oranıdır.

Bu momentler, kanat kökünde en düşük mukavemete sahip olan kısma uygulanmaktadır.

Aşağıdaki denklemler, türbin şaftına etki eden peak to peak yorulma yüklerini ($\Delta F_{x-şaft}$) vermektedir. Bu yükün ilk olarak şaft yatağında ortaya çıktığı kabul edilmektedir.

$$\Delta F_{x-şaft} = 3 \lambda_{tasarım} T_{Tasarım}/(2R) \quad (5.75)$$

$$\Delta M_{x-şaft} = T_{Tasarım} + 2m_r g e_r \quad (5.76)$$

$$\Delta F_{zk} = 2m_r g L_{rk} + \frac{R}{9} \Delta F_{x-şaft} \quad (5.77)$$

Burada m_r rotor kütlesi ve e_r rotor eksantrikliği (aksi belirtilmedikçe 0.005R alınmalıdır), L_{rk} rotor merkezi ile kanat arasındaki mesafedir.

b) Yükleme Durumu B: Yaw Mekanizması Hareketi

Bu yükleme durumunda kanat köküne etki eden maksimum eğilme momenti M_{yk} değerlendirilmekte olup sözü edilen momentin belirlenmesi için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$M_{yk} = m_k \omega_{yaw maks}^2 L_{rt} R_{km} + 2\omega_{yaw maks} I_k \omega_{n,tasarım} + \frac{R}{9} \Delta F_{x-şaft} \quad (5.78)$$

Merkezkaç	Peryodik	Rüzgar kesmesi
Yükleri	Jiroskobik	yükleri
	Yükler	

Burada L_{rt} rotor merkezi ile yaw mekanizması dönme merkezi arasındaki mesafe, I_k ise kanadın atalet momentidir. Maksimum yaw değişim oranı denklem 5.71'den yararlanılarak, $\Delta F_{x-şaft}$ ise denklem 5.75'den yararlanılarak belirlenmektedir. Burada ilk terim merkezkaç yüklerini, ikinci terim periyodik jiroskopik yükün genliğini, üçüncü terim ise rüzgar kesmesi yüklerini ifade etmektedir.

İki kanatlı türbinler için şaft yükü

$$M_{şaft} = 4\omega_{yaw,maks} \omega_{n,tasarım} I_k + m_r g L_{rb} + \frac{R}{9} \Delta F_{x-şaft} \quad (5.79)$$

Üç veya daha fazla kanatlı rüzgar türbinleri için Şaft yükü ise;

$$M_{şaft} = B\omega_{yaw,maks} \omega_{n,tasarım} I_k + m_r g L_{rb} + \frac{R}{9} \Delta F_{x-şaft} \quad (5.80)$$

denkleminde yararlanılarak belirlenmekte olup burada B kanat sayısıdır.

Kanatlar dikey olduğunda, kanadın kendi eksenine etrafındaki ataleti (I_k) yaw eylemsizlik (atalet) momentine neredeyse hiçbir katkıda bulunmamakta; yatay durumda olduğunda ise en

yüksek seviyeye çıkmaktadır. Atalet momentindeki değişim kanat ve şafttaki maksimum yükleri, önemli miktarda değiştirmektedir.

c) Yükleme Durumu C:Yaw Hatası

Bu yükleme durumu RT ortalama bir sapma hatasıyla çalıştığı durumda meydana gelmektedir. Basitlik açısından, bu yük durumu tek bir sapma hatasını dikkate almaktadır. Sapma hatası, kanatlar üzerinde aşağıda belirtilen eğilme momentine neden olmaktadır.

$$M_{yk} = \frac{1}{8} \rho A_{izdüşüm} C_{l\ maks} R^3 \omega_{n, tasarım}^2 \left[1 + \frac{4}{3\lambda_{tasarım}} + \left(\frac{1}{\lambda_{tasarım}} \right)^2 \right] \quad (5.81)$$

burada ρ yoğunluk, $A_{izdüşüm}$ kanat izdüşüm alanı ve $C_{l, maks}$ maksimum kaldırma kuvveti katsayısıdır. Hiçbir değer belirtilmemişse, $C_{l, max} = 2.0$ kabul edilebilmektedir.

d) Yükleme Durumu D- Maksimum İtki Kuvveti

Maksimum itki kuvveti analizi durumu rüzgar hızının karesiyle orantılı olarak değişen tartışmalı bir yükleme durumu olarak kabul edilmektedir. Bu durumda yüksek rüzgar hızları, yüksek rüzgar yüklerine neden olabilmektedir. IEC 61400-2'ye göre bu durumdaki yükler için aşağıdaki denklemden yararlanılmaktadır.

$$F_{x-şaft} = 3.125 C_T \rho V_{ort}^2 \pi R^2 \quad (5.82)$$

Burada C_T , 0.5 olarak alınan itki katsayısıdır.

II) Güç Üretiminde Hata

e) Yükleme Durumu E- Maksimum Dönme Hızı

Yüksek açısal hızlarda kanatlardaki ve özellikle kanat göbeğindeki merkezkaç yükü önemli derecede artabilmektedir. Bu durumda, kanat köküne etki eden merkezkaç yükü (F_{zk}) aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{zk} = m_k \omega_{n, maks}^2 R_{km} \quad (5.83)$$

Küçük kanat dengesizlikleri nedeniyle şaftta oluşan eğilme momenti ($M_{şaft}$) ise aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir.

$$M_{şaft} = m_r g L_{rb} + m_r e_r \omega_{n, maks}^2 L_{rb} \quad (5.84)$$

f) Yükleme Durumu F- Yük Aktarımında Kısa Devre

Jeneratörün çıkış terminallerinde doğrudan bir kısa devre meydana geldiğinde, kısa devre torku olarak bilinen jeneratör torkundaki artışın bir sonucu olarak türbin şaftında büyük bir moment oluşmaktadır. Şaft ve kanatta torktaki söz konusu artıştan kaynaklanan momentler aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$M_{x-\text{saft}} = G T_{\text{tasarım}} \quad (5.85)$$

$$M_{x,k} = M_{x-\text{saft}}/B \quad (5.86)$$

Burada G jeneratör için tork ve kısa devre torku arasındaki oranla ilişkili bir sayısal faktör olup aksi belirtilmedikçe 2.0 olarak alınmaktadır.

g) Yükleme Durumu G - Kapatma (Frenleme)

Bu yükleme durumu, aktarma organlarında mekanik veya elektriksel frenleme bulunan türbinler için geçerlidir. Bu yükleme durumundaki değerlendirmeler için frenleme sistemi tarafından üretilen ekstra moment olan M_{fren} ölçülmeli veya hesaplanarak belirlenmelidir. Ayrıca, fren sistemi yüksek hızlı şaftta etki ediyorsa, M_{fren} dişli oranı ile çarpılmalıdır.

Şaft momenti aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$M_{x-\text{saft}} = M_{\text{fren}} + T_{\text{tasarım}} \quad (5.87)$$

Kapanmadan kaynaklanan kanat yükü ise aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$M_{xk} = \frac{M_{x-\text{saft}}}{B} + m_k g R_{km} \quad (5.88)$$

$M_{x-\text{saft}}$ değeri denklem 5.85 kullanılarak belirlenmektedir.

IV) Yüksek Rüzgar Yükleri

h) Yükleme Durumu H- Park Edilmiş Durum için Rüzgar Yükleme

Bu yükleme durumu, park halindeki, yani rotoru güç üretmeyen bir türbine etki eden yükleri dikkate almaktadır. Park halindeki kanat tanımlaması için kanatların hareketsiz kalmasına da gerek yoktur. Yükler, 50 yıllık en yüksek rüzgar hızı olan U_{e50} rüzgar hızı kullanılarak hesaplanmaktadır.

Hareketsiz bir rotor üzerindeki ana yükler sürüklenmeden kaynaklanmakta olup aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$M_{yk} = \frac{1}{4} C_d \rho U_{50}^2 A_{izdüşüm} R \quad (5.89)$$

Burada U_{e50} belirlenen konumdaki 50 yıllık en yüksek rüzgar hızı, C_d sürüklenme katsayısı olup kanatlar dönüyorsa 1.5 olarak alınabilmektedir.

Bu yükleme durumu kapsamında rüzgar yönündeki değişimler nedeniyle kanatlardaki oluşan kaldırma kuvvetinden kaynaklanan M_{yB} de aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$M_{yk} = \frac{1}{6} C_{l,max} \rho U_{50}^2 A_{izdüşüm} R \quad (5.90)$$

Burada C_l kaldırma kuvveti katsayısı olup mevcut bir değer yoksa, en büyük değer olarak 2 alınabilmektedir.

Kanatlar üzerindeki rüzgar yükünün neden olduğu itki kuvveti aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$F_{x-şaft} = \frac{1}{2} B N C_d \rho U_{e50}^2 A_{izdüşüm} \quad (5.91)$$

Dönen bir rotor için,

$$F_{x-şaft} = 0.17 N A_{izdüşüm} \lambda_{e50}^2 \rho U_{e50}^2 \quad (5.92)$$

Buradaki λ_{e50} 50 yıllık en yüksek rüzgar hızı durumu için uç-hız oranıdır (λ) (Denklemler 5.93).

$$\lambda_{e50} = \omega_{n,maks} \pi R / (30 U_{e50}) \quad (5.93)$$

Bu yükleme durumu, yukarıda hesaplanan türbin üzerindeki itki yükü nedeniyle kule temelindeki oluşan maksimum eğilme momentini de kapsamaktadır. Aynı temel denklem elde edilen, makine dairesi ve kule gibi tüm türbin bileşenleri üzerindeki rüzgar yükünü de içermelidir.

$$F = \frac{1}{2} C_f \rho U_{e50}^2 A_{izdüşüm} \quad (5.94)$$

Burada C_f Çizelge 5.5'de verilen kuvvet katsayısıdır.

Çizelge 5.5. Yükleme Durumu H İçin Kuvvet Katsayıları (C_f) [IEC 61400-2; Wood, 2011]

Karakteristik Uzunluk	Geometri				
	Dairesel	Sekizgen	Kare	Kaldırma Kuvveti Oluşmayan Cisim veya 90°'lik Aerofoil	Kaldırma Kuvveti Oluşan Aerofoil
<0.1 m	1.3	1.3	1.5	1.5	2
> 0.1 m	0.7	1.2	1.5	1.5	2

V) Hata Koşullarında Park

I) Yükleme Durumu I - Park Edilmiş Kanatta Maksimum Rüzgar Yükü Maruziyeti

Bu yükleme durumu, yaw mekanizmasında meydana gelebilecek bir arıza olasılığını dikkate almaktadır. Bu durum, türbinin en elverişsiz konumunda en yüksek rüzgar hızına maruz kalmasına neden olabilmektedir.

$$F = \frac{1}{2} C_f \rho U_{ref}^2 A_{izdüşüm} \quad (5.95)$$

Aerofoiller için öngörülen projeksiyon alanı, kanat kuşbakışı görünüş alanı olarak alınmaktadır. C_f ise yine Çizelge 5.5'ten yararlanılarak belirlenmektedir.

VI) Nakliye, Bakım ve Onarım

J) Yükleme Durumu J - Nakliye, Montaj, Bakım ve Onarım

Normal çalışma aralığı dışındaki aşağıda belirtilen tüm koşullar bu yükleme durumu kapsamında değerlendirilmektedir.

- Nakliye sırasındaki yerçekimi yüklemeleri
- Özel araç/gereçlerin neden olduğu yükler
- Kurulum sırasındaki rüzgar yükleri
- Türbini konumuna kaldırmakla ilgili yüklemeler
- Montaj sırasında kulenin yatay birleştirildikten sonra düşey olarak konumlandırılması durumundaki yüklemeler
- Destek yapısıyla ilişkili yükler

Türbinin yerleştirilmesi nedeniyle kulenin tabanında oluşan eğilme momenti aşağıdaki denklemden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$M_{kule} = 2(m_{kule\ toplam} + \frac{m_{kaldırma}}{2})\rho L_{lt} \quad (5.96)$$

Burada m_{kule} kulenin toplam kütlesi, $m_{kaldırma}$ kaldırma noktası ile kule yüksekliği arasındaki mesafede bulunan kule kütlesi, L_{lt} kaldırma noktası ile kule yüksekliği arasındaki mesafedir.

5.2.3.2. Eşdeğer Gerilmeler ve Emniyet Katsayıları

Rüzgar türbin ve elemanlarının emniyet kontrolü için hesaplanan yüklerin müsaade edilebilir malzeme dayanım limitleriyle karşılaştırılarak değerlendirme yapılması gerekmektedir. IEC 61400-2 standardına göre gerilme analizi için kısmi emniyet katsayıları kullanılmaktadır.

a) Eşdeğer gerilmeler

Basit yük modeli hesaplamalarından belirlenen kuvvet ve momentler nedeniyle yük taşıyan shaft ve kanat gibi önemli bileşenler üzerinde oluşan nihai eşdeğer gerilmeleri belirleyebilmek için Çizelge 5.6'da verilen denklemlerden yararlanılmaktadır.

Çizelge 5.6. IEC 61400-2 standardına göre gerilmeler [IEC 61400-2]

Yükleme Durumu	Kanat Kök Kısım Kesiti		Şaft
	Dairesel	Dikdörtgen	
Eksenel Yükleme	$\sigma_{zk} = \frac{F_{zk}}{A_k}$	$\sigma_{zk} = \frac{F_{zk}}{A_k}$	$\sigma_{x-şaft} = \frac{F_{x-şaft}}{A_k}$
Eğilme Gerilmesi	$\sigma_{Mk} = \frac{\sqrt{M_{xk}^2 + M_{yk}^2}}{W_k}$	$\sigma_{Mk} = \frac{M_{zk}}{W_{zk}} + \frac{M_{yk}}{W_{yk}}$	$\sigma_{M-şaft} = \frac{M_{şaft}}{W_{şaft}}$
Kesme Yüğü	İhmal Edilebilir	İhmal Edilebilir	$\zeta_{M-şaft} = \frac{M_{şaft}}{W_{şaft}}$
Eşdeğer Gerilme	$\sigma_{esk} = \sigma_{zk} + \sigma_{Mk}$		$\sigma_{es} = \sqrt{(\sigma_{x-şaft} + \sigma_{M-şaft})^2 + 3\zeta_M^2}$

b) Kısmi Emniyet Katsayıları

IEC 61400-2 standardına göre yapılan değerlendirmelerde, kullanılan analiz yöntemine bağlı olarak kısmi emniyet katsayıları kullanılmaktadır. Sözü edilen kısmi emniyet katsayıları Çizelge 5.7’de verilmiştir. Ayrıca IEC 61400-2 standardına göre malzeme karakterizasyonu için başka bir kısmi güvenlik katsayısı da kullanılmaktadır (Çizelge 5.8). Bu faktörler malzeme özelliklerinin % 95 olasılık ve % 95 güven düzeyinde tahmin edilebilmesi için kullanılan düşük güvenlik faktörleridir.

Çizelge 5.7. IEC 61400-2 standardına göre kısmi emniyet katsayıları [IEC 61400-2]

Yükleme Metodu	Emniyet Katsayısı	
	Yorulma Yükleri (U_f)	Sınır Yükleme (U_f)
Basit Yük Modeli	1	3
Aeroelastik Modelleme	1	1.35
Ekstrapolasyonlu Yük Ölçümü	1	3

Çizelge 5.8. IEC 61400-2 standardına göre malzeme karakterizasyonu için kısmi emniyet faktörleri (U_m) [IEC 61400-2]

Analiz Türü	Tam Karakterizasyon	Minimum Karakterizasyon
Yorulma Dayanımı	1.25	10
Sınır Yükleme Dayanımı	1.1	3

5.2.3.3. IEC 61400-2 Standardına Göre Tasarım Kontrolü

IEC 61400-2 Standardına göre tasarım doğrulaması için kanadın maksimum gerilme analizi ve yorulma analizi gerçekleştirilmektedir. Kanadın normal çalışma koşullarındaki davranışının değerlendirilmesi için yorulma analizi yapılmaktadır. Çalışma koşullarından yaw mekanizmasının hareketi sonucu türbinin yön değiştirmesi, yüksek rüzgar hızlarında ortaya çıkan maksimum itki kuvveti yüklemesi ve türbinde meydana gelebilecek hatalar sonucu oluşabilecek etkiler için ise sınır yükleme analizi gerçekleştirilmektedir (Çizelge 5.9).

Çizelge 5.9. Basit Yük Modeli için tasarım yükleme durumları [IEC 61400-2; Wood, 2011]

Tasarım Durumu	Yükleme Durumu	Tanımlama	Analiz Tipi
I- Güç Üretimi	A	Normal İşletme Koşulları	Maksimum Gerilme Analizi
	B	Yaw Mekanizmasının Hareketi	
	C	Yaw Mekanizması Hatası	
	D	Maksimum İtki Kuvveti	
II- Güç Üretiminde Hata	E	Maksimum Dönme Hızı	
	F	Yük Aktarmında Kısa Devre	
III- Kapatma	G	Kapatma (Frenleme)	
IV- Yüksek Rüzgar Yüğü	H	Park Edilmiş Durum İçin Rüzgar Yükleme	
V- Hata Koşullarında Park	I	Park Edilmiş Kanatta Maksimum Rüzgar Yüğü Maruziyeti	
VI- Nakliye, Montaj, Bakım ve Onarım	J	Üretici Tarafından Tanımlanmaktadır	

a) Maksimum Gerilme Analizi

IEC 61400- Standardına göre bileşenlerin tasarımının güvenli kabul edilebilmesi için, Çizelge 5.6'dan yararlanarak hesaplanan eşdeğer gerilmelerin ($\sigma_{eş}$), müsaade edilebilir malzeme gerilme sınırından (σ_{em}), daha düşük olmalıdır ($\sigma_{eş} < \sigma_{em}$).

Müsaade edilebilir malzeme gerilme sınırının (σ_{em}) belirlenebilmesi için ise aşağıdaki denklemden yararlanılmaktadır (IEC 61400-2; Wood, 2011).

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_{Akma}}{v_f v_m} \quad (5.97)$$

burada σ_{Akma} , malzeme sınır akma dayanımı, v_f Çizelge 9.7'da verilen kısmi emniyet faktörü, v_m ise Çizelge 9.8'de verilen malzeme karakterizasyonu için kullanılan kısmi emniyet faktörüdür.

b) Yorulma Analizi

Basit yük modelinde tanımlanan yükleme durumu A, türbin bileşenlerindeki yorulma hasarının değerlendirilmesini gerektirmektedir. IEC 61400-2'de bu değerlendirmenin yapılması için Miner Kuralı kullanılmakta olup bu kurala göre, bir bileşenin, hesaplanan yük tekrarına ulaştığında hasara uğradığı kabul edilmektedir (IEC 61400-2; Wood, 2011).

Bu değerlendirmeye göre yorulma analizi için aşağıdaki formüllerden yararlanılmaktadır.

$$\text{Hasar Durumu} = \sum_i \frac{n_i}{N_{\text{tekrar}}(U_f U_{msi})} \leq 1 \quad (5.98)$$

Burada n_i , yorulma yükü tekrar sayısı, N_{tekrar} , denklem 5.97'de yükler ve malzemeler için güvenlik faktörü kullanılarak hesaplanan gerilme için yük tekrar sayısı, s_i ortalama ve tekrarlı gerilme seviyelerinin etkilerini içeren yorulma tekrar yüklerinin gerilme seviyeleri, paydada yer alan parantez içindeki terim ise birleşik gerilme düzeyidir.

Basit yük modelinde yorulma yükü tekrar sayısı aşağıdaki denklemden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

$$n = N \omega_{n, \text{tasarım}} T_d / 60 \quad (5.99)$$

Burada T_d , türbinin saniye cinsinden tasarım ömrüdür.

IEC 61400 standardı son olarak, bileşenlerde yükleme altında oluşan deformasyonların emniyeti tehlikeye atmamasını sağlamak amacıyla tasarımcının kritik deformasyon analizi yapmasını da istemektedir. Buradaki en kötü durum, kanatların yük etkisi altında oluşan deformasyon sonucunda kanatların kuleye çarpması şeklinde gerçekleşebilmektedir.

5.3. Kanadın Performans Analizleri

Tasarımı yapılan 1 m'lik kanadın aerodinamik performansının ve mekanik davranışının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kısımda kanadın aerodinamik performansını incelemek ve mekanik davranışını değerlendirmek için yapılan işlemler verilmiştir.

5.3.1. Aerodinamik Performans Analizleri

Rüzgar türbinlerinde, kanadın aerodinamik performansının değerlendirilmesi amacıyla Aerodinamik Teorilerden, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden (HAD) ve geliştirilen özel yazılımlardan yararlanılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, tasarımı yapılan 1 m'lik kanadın aerodinamik performansı KEM Teorisi ve HAD'den yararlanılarak incelenmiştir. KEM Teorisi ve HAD ile kanadın aerodinamik performans analizinin esasları aşağıda özetlenmiştir.

5.3.1.1. KEM Teorisi ile Kanadın Aerodinamik Performansının İncelenmesi

KEM Teorisiyle kanadın aerodinamik performansını incelemek için çeşitli kodlar ve yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan birisi olan Qblade Berlin Teknik Üniversitesi'nden Hermann Föttinger tarafından rüzgar türbinleri için geliştirilmiş bir yazılımdır. Bu yazılım yatay eksenli ve düşey eksenli rüzgar türbin ve teknolojilerin eğitimi, tasarım ve simülasyonu için geliştirilmiştir. Bu yazılımla kanat tasarımı ve kanat performansı arasındaki ilişki açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir (Hansen, 2013).

Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi, KEM Teorisine göre havanın akışı 2 boyutlu olarak kabul edilmekte olup bu teoriye göre 3 boyutlu akış etkileri dikkate alınmadığından ve bu teoriyle hassas sonuçlar alınamamaktadır. KEM Teorisiyle elde edilebilecek sonuçların iyileştirilmesi amacıyla çeşitli düzeltmeler geliştirilmiştir. Qblade yazılımında aşağıda verilen düzeltmeler yapılarak KEM Teorisi kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları iyileştirilebilmektedir.

- Prandtl Uç Kayıp Düzeltmesi
- Prandtl Kök Kayıp Düzeltmesi
- Shen' In Yeni Uç Kayıp Düzeltmesi
- Shen'in Yeni Kök Kayıp Düzeltmesi
- Snell'in 3 Boyutlu Etki Düzeltmesi (Himmelskamp Etkisi)

KEM teorisi Uç/Kök Düzeltmeleri ve dönme hareketinin etkisi (Himmelskamp etkisi) gibi düzeltmeler önceki kısımlarda izah edilmiştir.

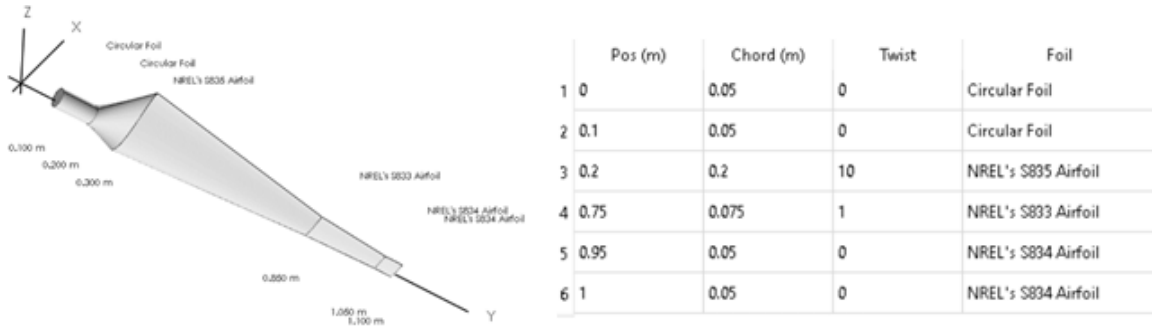
Tez çalışması kapsamında Shen'in Kök ve Uç Düzeltmesi, Snell'in 3 Boyutlu Etki Düzeltmesi ve Kesit İnterpolasyonu Düzeltmesi yapılarak 1 m'lik kanadın aerodinamik performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Qblade yazılımından kanadın aerodinamik performans analizi aşağıda izah edilmiştir.

Qblade yazılımından aşağıda belirtilen 5 modülden yararlanılarak aerodinamik performans analizi yapılabilmektedir.

- HAWT Rotor Blade Modülü
- X Foil
- Rotor BEM Simulation Modülü
- Multi Parameter Simulation Modülü
- BEM Simulation Modülü

Yukarıda belirtilen modüller kullanılarak yapılabilecek işlemler aşağıda verilmiştir.

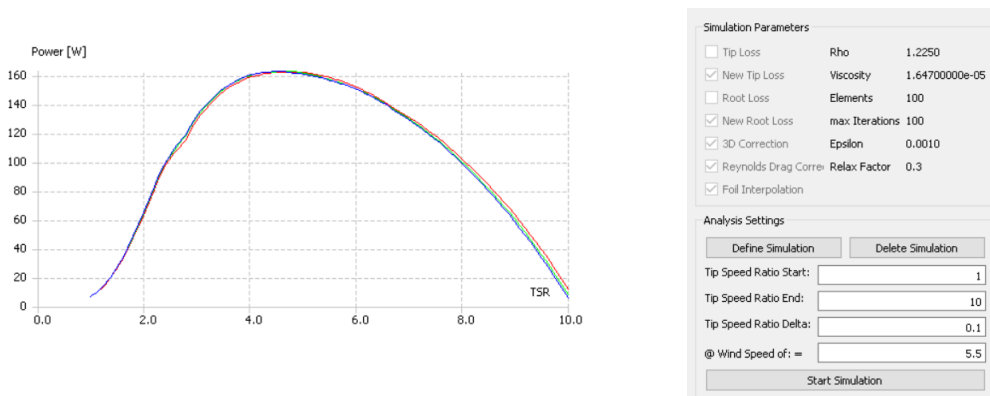
1- Qblade yazılımının **HAWT Rotor Blade Modülü**yle tanımlanan aerodinamik tasarım parametrelerinden (x,c,q,aerofil tipi) yararlanılarak kanat katı modeli oluşturulmaktadır (Şekil 5.30).



Şekil 5.30. Qblade HAWT rotor blade modülü ve kanat modelinin oluşturulması

Kanatın aerodinamik performans analizi için gerekli olan kanat katı modeli **Qblade HAWT Rotor Blade Modülünden** yararlanılarak oluşturulmuştur.

2- **Qblade Rotor BEM Simulation Modülü**yle Kanat Elemanı Momentum Teorisinden yararlanılarak belirli uç-hız oranı ve rüzgar hızları için yapılan analizler sonucunda kanadın C_p değeri ile elde edilen güç büyüklüklerinin uç-hız oranına göre değişimi belirlenebilmektedir (Şekil 5.31).

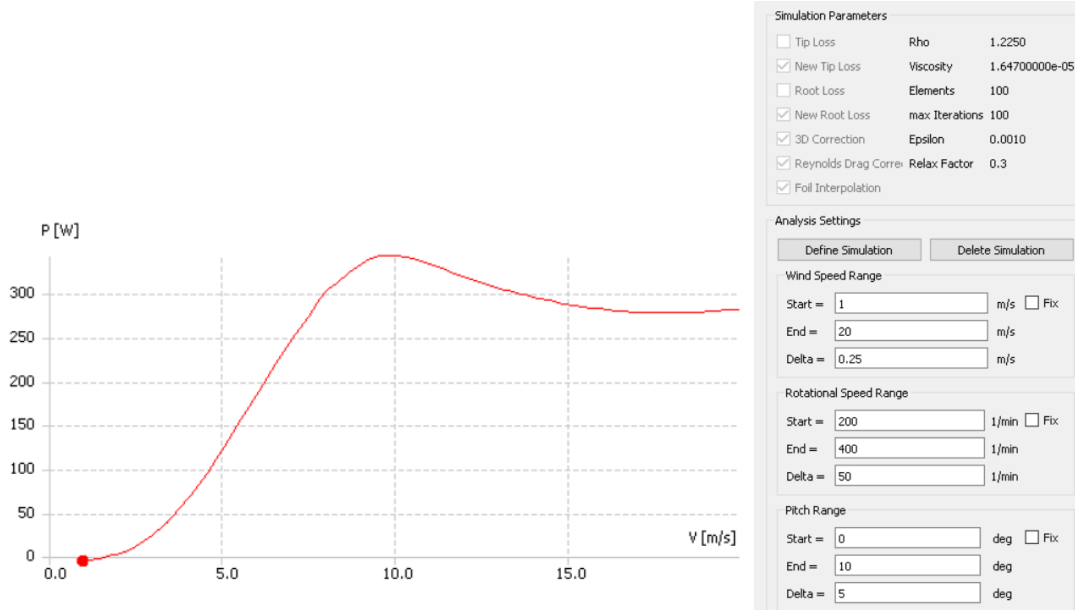


Şekil 5.31. Qblade Rotor BEM Simulation modülüyle C_p ve belirlenmesi

Kanatı modelleyen kanadın belirlenen rüzgar hızlarında 1-10 aralığındaki uç-hız oranları için C_p değerleri ve Güç büyüklükleri **Rotor BEM Simulation Modülü** kullanılarak elde edilmiştir.

3- **Qblade Multi Parameter Simulation Modülü**yle, belirli rüzgar hızları kanat açılma hızı ve kanat pitch açısı için kanattan elde edilebilecek güç büyüklükleri

belirlenebilmektedir. Bu modülden yararlanılarak kanadın güç üretimine başladığı rüzgar hızı (V_{cut-in}) ve kanadın maksimum güç üretimini sağlayan rüzgar hızı (V_{rated}) büyüklükleri de tespit edilebilmektedir (Şekil 5.32).

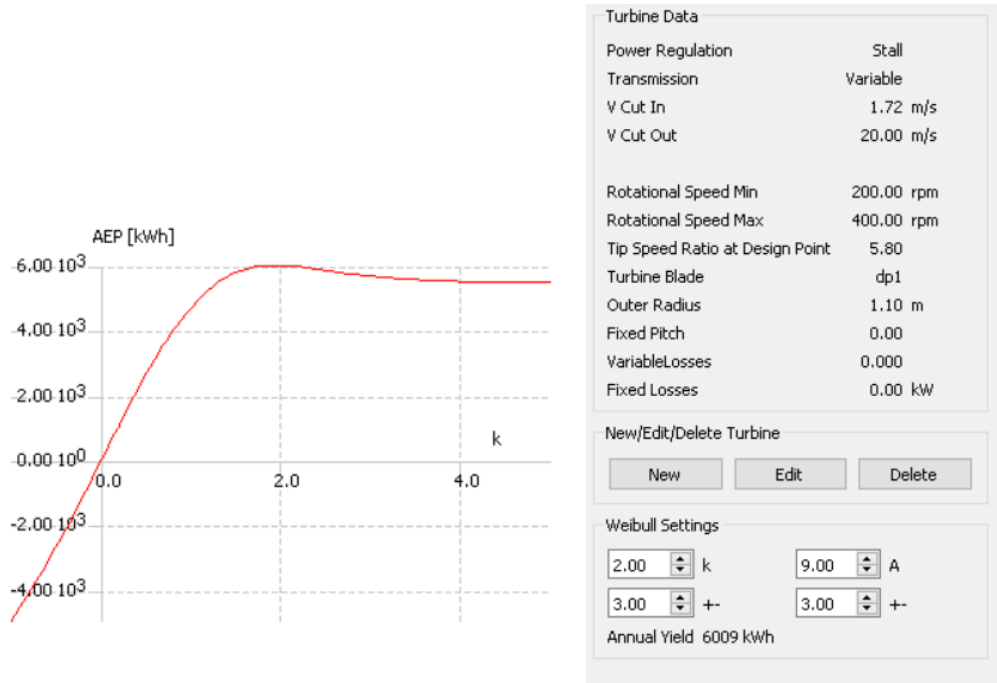


Şekil 5.32. Qblade Multi Parameter Simulation modülüyle elde edilebilecek güç büyüklüklerinin belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında, katı modeli oluşturan ve Rotor BEM Simulation Modülü analizleri yapılan 1 m'lik kanadın Multiparameter Simulation Modülü analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde 1-20 m/s'lik rüzgar hızlarında, 200 ile 400 dev/dk'luk dönüş hızına sahip kanadın aerodinamik performansı incelenerek kanattan elde edilen güç büyüklükleri belirlenmiştir.

4- Qblade Turbine BEM Simulation Modülü kullanılarak türbinden elde edilebilecek yıllık enerji miktarı (Annual Energy Production (AEP)) tespit edilebilmektedir (Şekil 5.33).

Kanattan elde edilebilecek yıllık enerji üretim miktarının belirlenebilmesi için rüzgar türbinin kurulması planlanan konumdaki en az 1 yıllık rüzgar hız ölçümü verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgar türbinine gelen rüzgar hızı bilgileri, rüzgar ölçümlerinde yaygın bir şekilde kullanılan Weibull dağılımı şeklinde yazılıma tanımlanmaktadır. Weibull dağılımı k ve A şeklindeki parametrelerle karakterize edilmektedir. Bu durum rüzgarla ilgili karakteristik özelliklerin belirli bir zaman aralığındaki değişiminin değerlendirilmesini ve konum bazlı elde edilebilecek enerji miktarının tespit edilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.33.Turbine BEM Simulation modülüyle kanattan elde edilebilecek 1 yıllık enerji miktarının belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında tasarımı yapılan kanat kullanılarak elde edilebilecek enerji miktarının belirlenmesi amacıyla Qblade **BEM Simulation Modülünden** yararlanılmıştır. Bu amaçla OMÜ Kurupelit Kampüsü Dede buzağı Tepesinde yapılan rüzgar ölçümleri kullanılarak Weibull dağılım parametreleri belirlenmiş (Çizelge 5.10) ve yazılıma tanımlanarak türbinden elde edilebilecek enerji miktarı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.10. Dede buzağı Tepesindeki rüzgar ölçümlerine ait Weibull dağılımı parametreleri [Özgönel ve Thomas, 2012; Ataseven, 2019]

	Vort	A	k
Ağustos 09	5.05	5.65	1.85
Eylül 09	4.82	5.37	2.14
Ekim 09	5.44	6.26	2.23
Kasım 09	1.27	0.89	1.00
Aralık 09	4.85	5.17	1.29
Ocak 10	7.27	7.46	1.28
Şubat 10	6.63	7.58	1.74
Mart 10	6.78	6.70	1.26
Nisan 10	4.74	5.42	2.05
Mayıs 10	4.38	4.81	1.59
Haziran 10	5.13	5.32	1.25
Temmuz 10	6.00	6.46	1.47
Ağustos 10	5.02	5.66	1.75
Eylül 10	4.97	5.32	1.55
Ortalama	5.47	5.58	1.60

Bu kısımda, Qblade yazılımından yararlanılarak tasarımı yapılan 1 m'lik kanadın aerodinamik performans analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde KEM Teorisi, Shen'in Yeni Kök ve Uç Kayıp Düzeltmeleri, Snell'in 3 Boyutlu Etki Düzeltmesi ve OMÜ Dedebezağı tepesine ait 1 yıllık rüzgar hız ölçümleri kullanılmıştır. Bu kısımda yapılan işlemler neticesinde aşağıdaki sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır.

- KEM teorisinde Shen'in 3 boyutlu kök ve uç kayıp düzeltmeleri ve Snell'in 3 boyutlu etki düzeltmesi yapılarak kanadın aerodinamik performans analiz sonuçları iyileştirilmiştir.
- Kanattan elde edilecek enerjinin belirlenmesi için Weibull dağılımından yararlanılarak rüzgar türbininden belirlenen konumda rüzgar türbininden elde edilebilecek yıllık enerji miktarları belirlenebilmektedir.

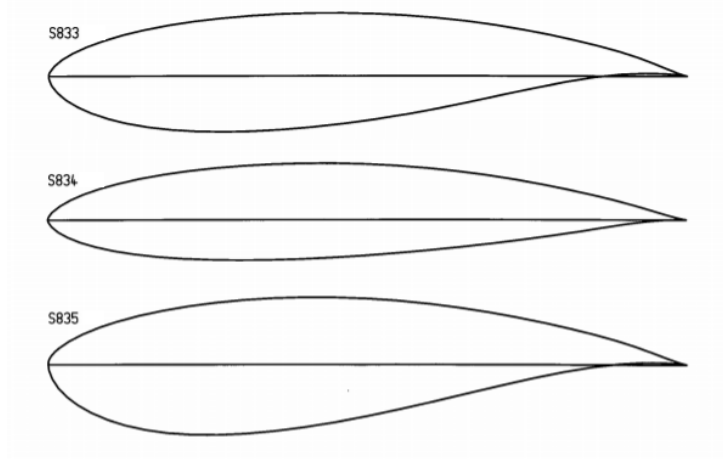
5.3.1.2. HAD ile Kanadı Oluşturan Aerofoil Kesitlerin ve Kanadın Etrafındaki Akışın İncelenmesi

Günümüzde sayısal yöntem ve yaklaşımla çözümlene yapan çeşitli Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programları mevcuttur. ANSYS Workbench yazılımı içerisinde bulunan FLUENT paket programı da bu amaçla kullanılan yazılımlardan birisidir. FLUENT, akışkan hareketleri, ısı transferi, partikül hareketleri, yanma gibi çok farklı akışkan davranışını değerlendirebilmektedir. Bu yazılım, akış davranışına ait, kısmi diferansiyelli temel denklemleri Sonlu Hacimler Metodu'ndan yararlanılarak cebirsel denklem takımına dönüştürmekte ve çeşitli modeller kullanarak çözüm üretmektedir (Özdoğan ve ark., 2016).

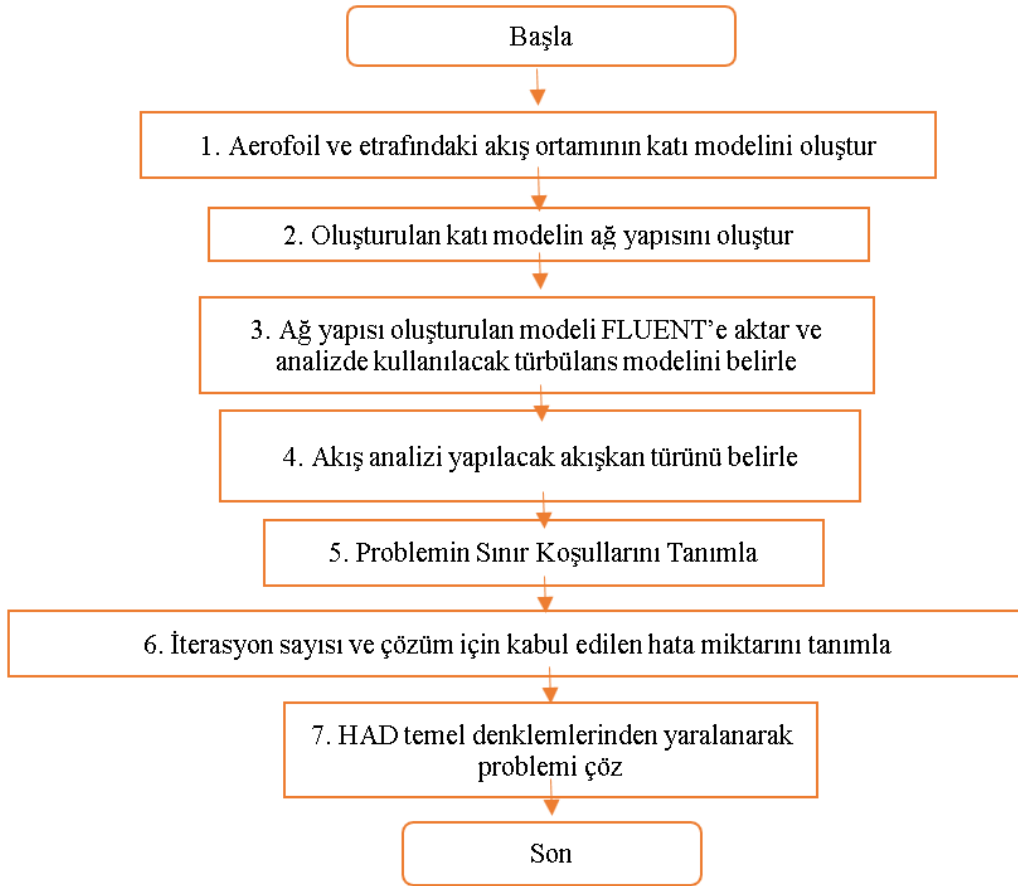
Tez çalışması kapsamında Fluent yazılımı kullanılarak kanat geometrisini oluşturan üç farklı aerofoilin ve kanadın aerodinamik performansı incelenmiştir. Bu amaçla Laminer Akış Modeli, Spalart-Allmaras (S-A), Realizable k- ϵ ve SST k- ω Türbülans Modelleri kullanılarak akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda Fluent yazılımından yararlanarak aerofoilin ve kanadın aerodinamik performansı değerlendirmek amacıyla yapılan işlemler verilmiştir.

D) HAD İle Kanadı Oluşturan Aerofoillerin Aerodinamik Performansının İncelenmesi

Kanatta kullanılan NREL S835, S833 ve S834 aerofoillerinin (Şekil 5.34) aerodinamik performansı farklı türbülans modelleri esas alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar NREL tarafından yayımlanan kataloglardaki ilgili aerofoillerin deneysel basınç katsayıları ile karşılaştırılarak yapılan numerik çalışmaların doğrulanması ve uygun türbülans modelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Fluent yazılımından yararlanarak aerofoillerin aerodinamik performansının değerlendirilmesi için yapılan işlemler Şekil 5.35'de özetlenmiştir.



Şekil 5.34. Kanatta Kullanılan Aerofoiller [Somers, 2005]

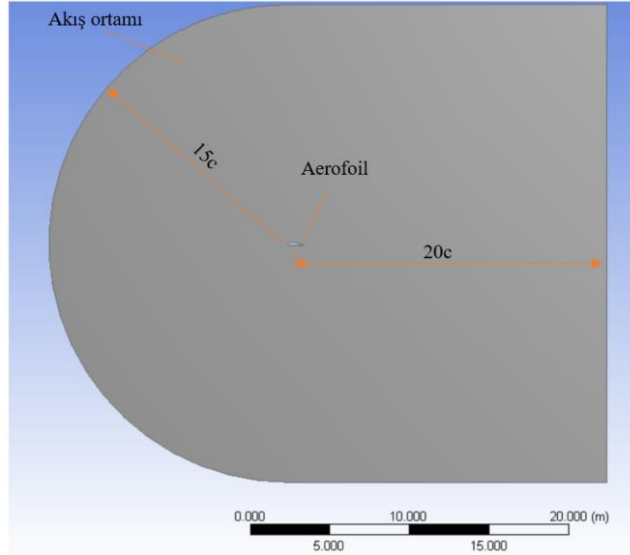


Şekil 5.35. Aerofoillerin Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi İşlemleri

1. Aerofoil ve etrafındaki akış ortamı katı modelinin oluşturulması

Kanadı oluşturan aerofoillerin (S835, S833 ve S834) aerodinamik performansının değerlendirilebilmesi için ilk olarak **aerofoil** ve **aerofoil etrafındaki akış ortamı katı modellerinin oluşturulması** gerekmektedir. Bu katı modeller **ANSYS Workbench** yazılımının **Design Modeler** modülünden yararlanılarak oluşturulmuştur. S835 aerofoili ve

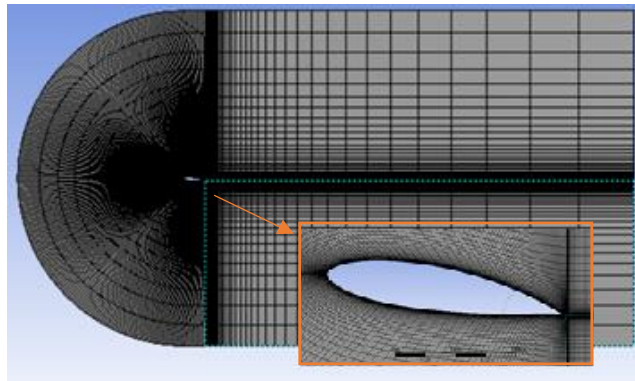
etrafındaki akış ortamının katı modeli Şekil 5.36’da verilmiştir. Şekildeki gri renkli kısımlar aerofoilin etrafındaki akış ortamını göstermektedir. Aerofoilin etrafındaki akış ortamının boyutları literatürdeki bilgilere uygun olarak, aerofoil öncesi uzunluk, aerofoil profil giriş hattı uzunluğunun (c) 15 katı, aerofoil sonrası uzunluk ise 20 katı, aerofoilin üst ve alt kısmı da yine 15 kat olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.36. Akış Analizi İçin Oluşturulan Aerofoil ve Akış Ortamı Modeli

2. Ağ Yapısının Oluşturulması

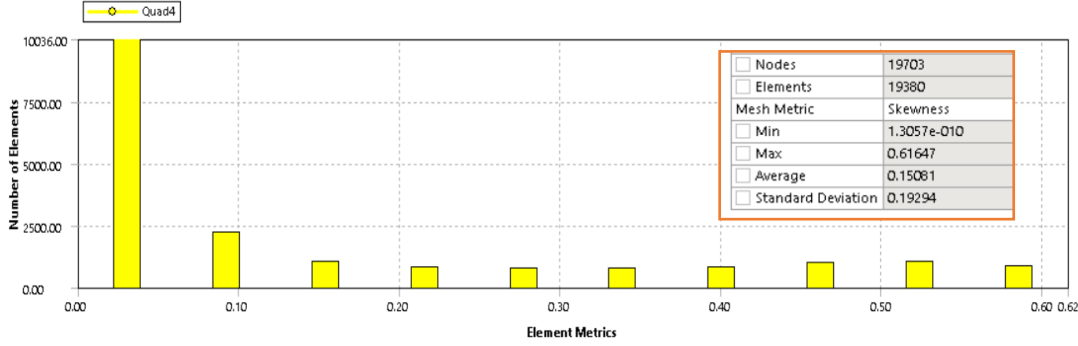
Aerofoil etrafındaki akışın incelenebilmesi için ikinci olarak **aerofoil etrafındaki akış ortamında uygun ağ yapısının oluşturulması** gerekmektedir. Bu amaçla aerofoil etrafındaki akış ortamının ağ yapısı oluşturulmuş olup (Şekil 5.37) bu ağ yapısı 19703 eleman, 19380 düğüm noktasından oluşmaktadır.



Şekil 5.37. Akış Analizi İçin aerofoil etrafındaki akış ortamında oluşturulan ağ yapısı

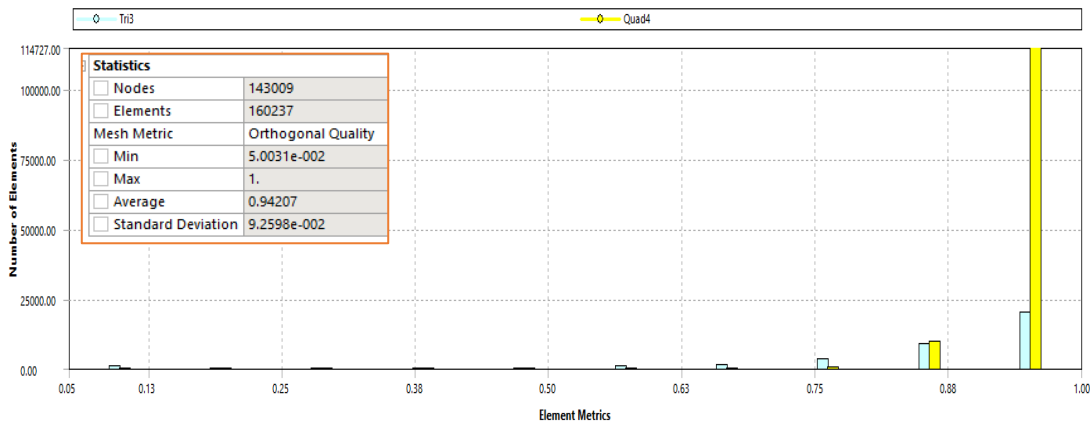
Ağ yapısının kalitesinin değerlendirilmesi için **Skewness** ve **Orthogonal Quality** parametreleri kullanılmakta olup söz konusu parametreler Şekil 5.38 ve Şekil 5.39’da verilmiştir.

Skewness veya çarpıklık, ağ yapısının kalitesini gösteren parametrelerden birisi olup yapının ne kadar ideal olduğunu (eşkenar ve eş açılı yapıda başka bir ifadeyle ne kadar eşit bir dağılım gösterdiğini) ölçmektedir. Oluşturulan ağ yapısının uygun olması için bu parametrenin 0'a yakın olması istenmektedir. Şekil 5.38'de oluşturulan ağ yapısının ortalama Skewness, parametresinin 0.15081, standart sapmasının ise 0.19294 olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 38. Oluşturulan Ağ Yapılarının Skewness Parametreleri

Ağ yapısının kalitesini ölçmek için kullanılan diğer bir parametre olan Orthogonal Quality ağ yapısındaki iki komşu elemanın birbirine ortogonalliğini değerlendirmektedir. Bu parametre 0 ile 1 arasında değişmekte olup söz konusu parametrenin 0'a yaklaşması ortogonallikten uzaklaştığı; 1'e yaklaşılması ise ortogonalliğe yaklaşıldığı anlamına gelmektedir. HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısına ait Orthogonal Quality parametresinin 1'e yakın olması istenmektedir. Şekil 5.39'dan oluşturulan ağ yapısının ortalama Orthogonal Quality parametresinin 0.94207 ve standart sapmasının ise 0.092598 olduğu görülebilmektedir.

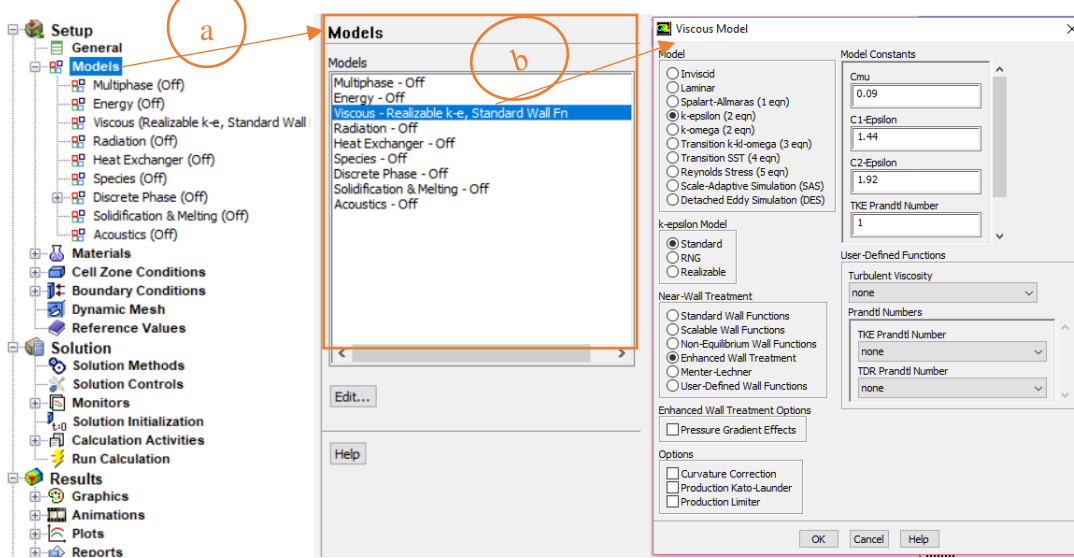


Şekil 5.39. Oluşturulan Ağ Yapılarının Orthogonal Quality Parametreleri

3. Analiz Modeli Seçimi

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra **FLUENT** yazılımından yararlanılarak aerofoilin aerodinamik performansı değerlendirilmesi için analiz yapılacak türbülans modeli seçilmelidir.

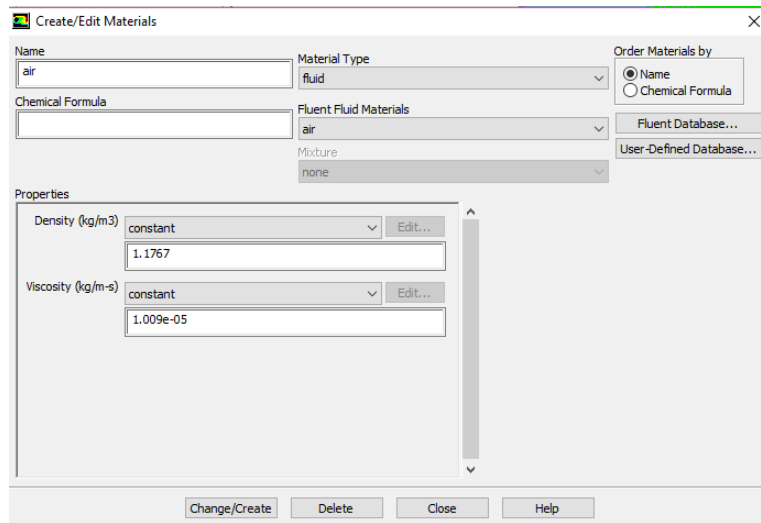
Bu amaçla Models sekmesinin (Şekil 5.40a) altındaki Viscous Model kısmından (Şekil 5.40b) aerofoilin akış analizi için kullanılan türbülans modeli seçilir. Bu çalışmada, Laminer akış, S-A, Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri seçilerek analizler yapılmıştır.



Şekil 5.40. Aerofoilin akış analizi için kullanılan türbülans modelleri

4. Akış Analizinde Kullanılacak Akışkan Türünün Belirlenmesi

Akış analizinde kullanılacak **akışkan türü** (su, hava, benzin vb.) ve özellikleri (sıcaklık, yoğunluk, viskozite vb.) belirlenir. Akış analizinde kullanılan aerofoilin etrafındaki havaya ait yoğunluk ve viskozite bilgileri Şekil 5.41’de görüldüğü gibi programda tanımlı olan veriler olarak belirlenmiştir.

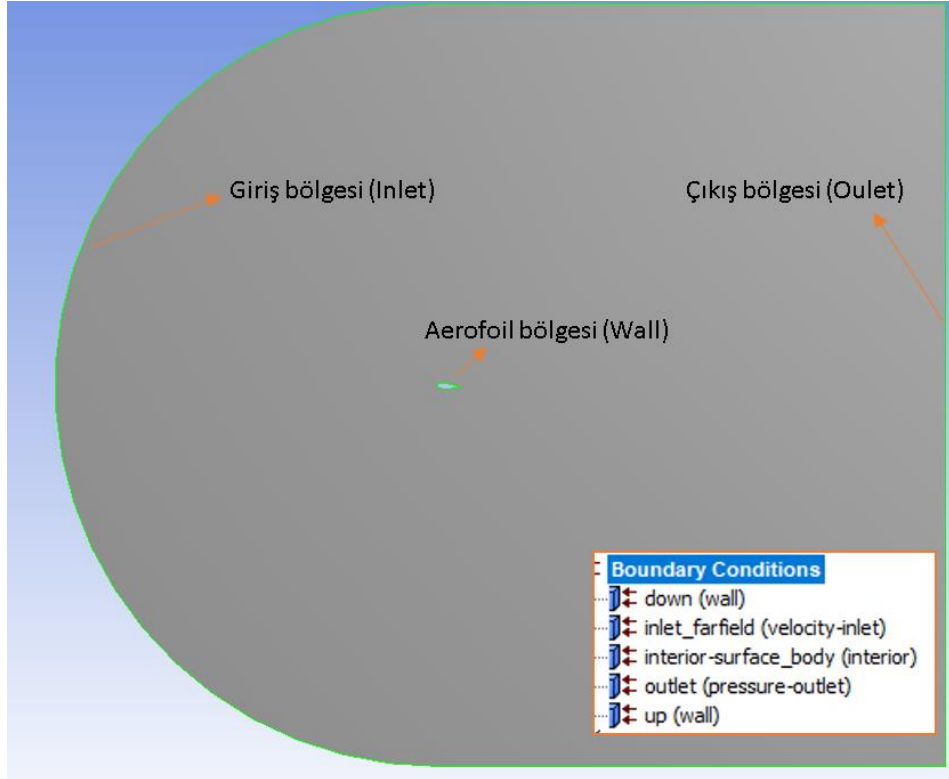


Şekil 5.41. Akış analizinde kullanılacak akışkan türü

5. Sınır Koşullarının Tanımlanması

Akışkan türünün belirlenmesinden sonraki adım ise problemin sınır koşullarının tanımlanmasıdır. Sınır koşulları problemin çözümünde kullanılan başlangıç değerleri olup

yapılan iteratif işlemler için ilk olarak bu değerlerden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, sınır koşulları literatürdeki çalışmalara uygun olarak, havanın akış ortamına girdiği sol taraftaki eğrisel kısım havanın akış ortamına **giriş bölgesi inlet**, akış ortamının sağ tarafındaki düz kısım **çıkış bölgesi outlet**, akış ortamının ortasındaki **aerofoil bölgesi** ise **wall** olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.42).



Şekil 5.42. Analiz İçin Tanımlanan Sınır Koşulları

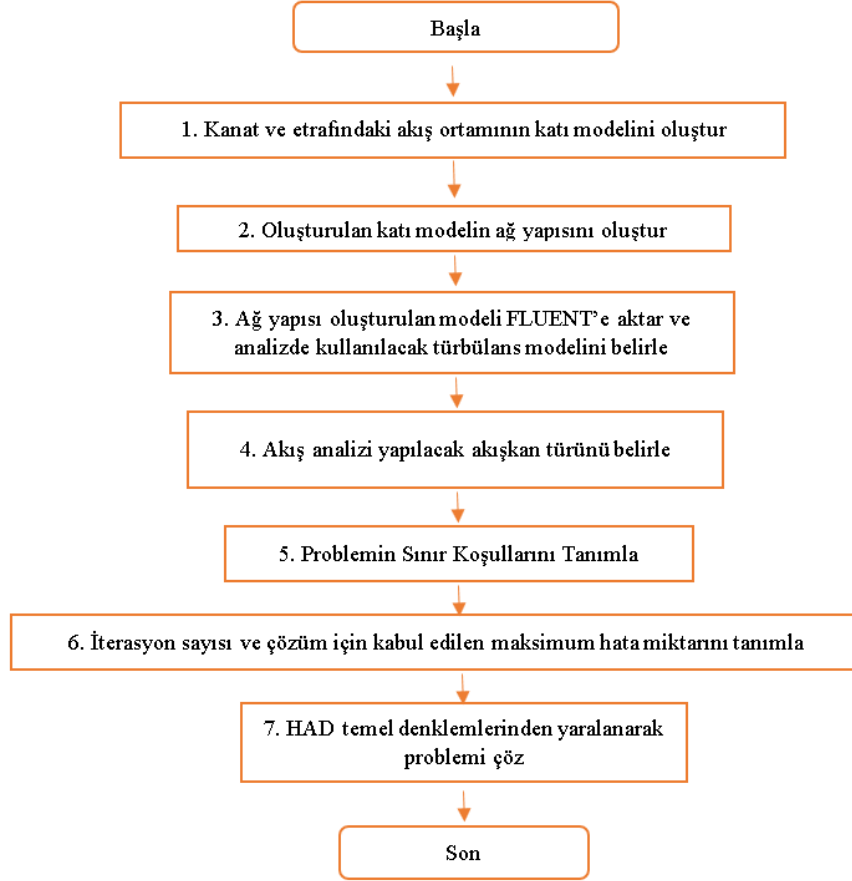
6. İterasyon Sayısı, Çözüm İçin Kabul Edilen Hata (Artık) Miktarının Tanımlanması ve Problemin Çözümü

Sınır koşulları tanımlandıktan sonra, analize başlanabilmesi için çözüme ulaşmada kullanılacak maksimum iterasyon sayısı ve çözüm için kabul edilebilecek **artık** veya **hata miktarı** tanımlanmaktadır. Bu çalışmada maksimum iterasyon sayısı 5000, çözüme ulaşmada kullanılacak artık veya hata büyüklüğü ise 1×10^{-6} olarak belirlenmiş olup bütün iterasyonlar tanımlanan artık büyüklüğüne ulaşıldığında veya 5000 iterasyondan sonra analiz sonlandırılacak şekilde yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, kanatta kullanılan 3 farklı aerofoilin seçilen türbülans modellerine göre aerodinamik performans analizleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar bulgular ve tartışma kısmında sunulmuştur.

B) HAD ile Kanadın Aerodinamik Performansının İncelenmesi

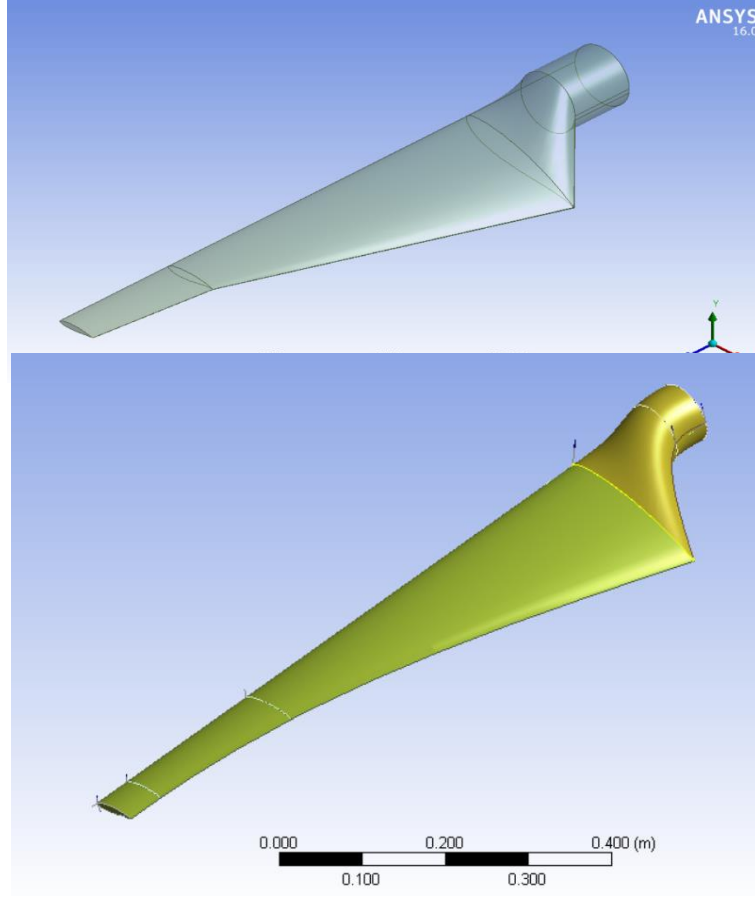
Tasarımı yapılan kanadın aerodinamik performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden (HAD) yararlanılarak da değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan işlemler Şekil 5.43’de özetlenmiştir.



Şekil 5.43. HAD ‘den yararlanılarak kanadın aerodinamik performansının değerlendirilmesi

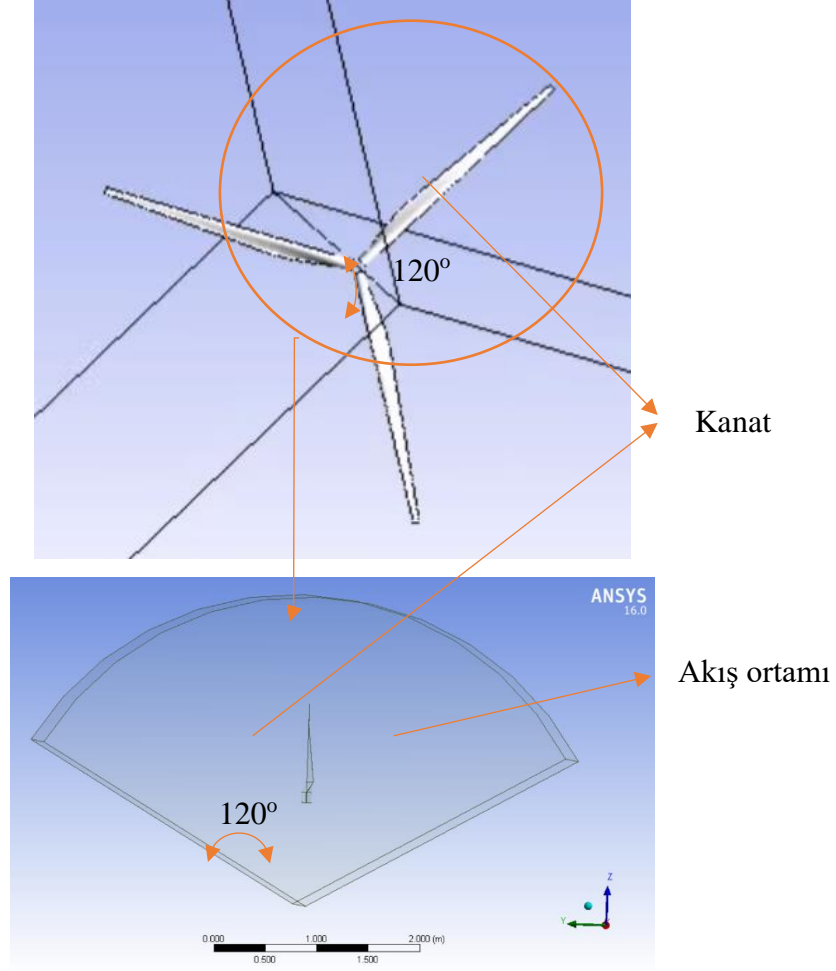
1. Kanat ve etrafındaki akış ortamı katı modelinin oluşturulması

Bu çalışmada kanadın aerodinamik tasarım parametrelerinden yararlanılarak **kanat** ve kanadın etrafındaki **akış ortamının katı modeli** oluşturulmuştur. Oluşturulan kanadın etrafındaki akış ortamının katı modeli Şekil 5.44’de verilmiştir.



Şekil 5.44. Kanat Katı Modeli

Kanadın etrafındaki akış ortamının katı modeli oluşturulurken bir kanat ve etrafındaki 120° 'lik akış ortamına ait katı model oluşturulmuştur (Şekil 5.45). Katı modelin ölçüleri literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak oluşturulmuş olup akış ortamı katı modelin boyutları kanat önünde kanat uzunluğunun 10 katı arkasında ise 20 katı olacak şekildedir.

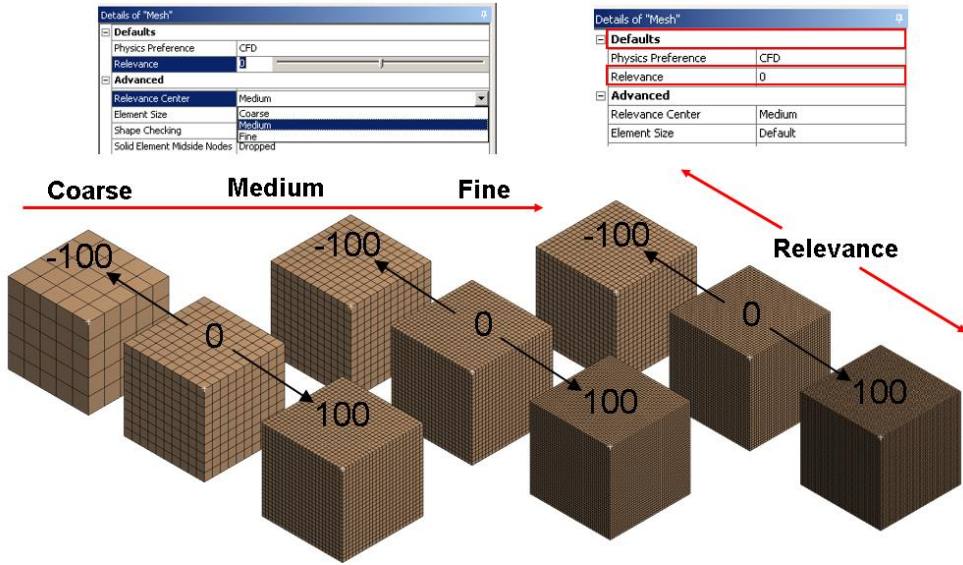


Şekil 5.45. Akış Ortamı Katı Modeli

2. Ağ Yapısının Oluşturulması

Akış ortamı katı modeli daha sonra FLUENT yazılımına aktarılarak analize başlanmakta olup bu amaçla ilk olarak aktarılan akış ortamında uygun **ağ yapısı** oluşturulmuştur.

Oluşturulan ağ yapısında kullanılan elemanların yoğunluğu çözüm hassasiyetini ve çözüme ulaşılacak zamanı doğrudan etkilemektedir. Fazla sayıda eleman ve düğüm noktası kullanılan ağ yapısıyla problem daha hassas bir şekilde çözülebilmesine rağmen; bu durumda çözüme ulaşmak için güçlü bilgisayarlara ve daha fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle uygun ağ yapısının deneme yanılma yoluyla belirlenmesi gerekmektedir. Ağ yapısı oluşturulurken ağ yapısının yoğunluğu kaba (coarse), orta (medium) ve iyi (fine) olarak seçilebilmektedir. Ayrıca relevance seçeneğiyle de ağ yapısında kullanılan elemanların sıklığı -100 ile +100 arasında olacak şekilde ayarlanabilmektedir (Şekil 5.46).



Şekil 5.46. Fluent Yazılımında Oluşturulan Farklı Ağ Yapıları (ANSYS Inc, 2013)

Ağ yapısının kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla Skewness (çarpıklık) ve Orthogonal Quality parametrelerinden yararlanılmakta olup söz konusu parametrelere göre ağ yapısının kalitesi Şekil 5.47'deki gibi değerlendirilmektedir.

Skewness:

Outstanding	Very Good	Good	Sufficient	Bad	Inappropriate
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00

Orthogonal quality:

Inappropriate	Bad	Sufficient	Good	Very Good	Outstanding
0-0.001	0.001-0.15	0.15-0.20	0.20-0.70	0.70-0.95	0.95-1.00

Şekil 5.47. HAD'da Ağ Yapısının Kalitesinin Belirlenmesinde Kullanılan Parametreler

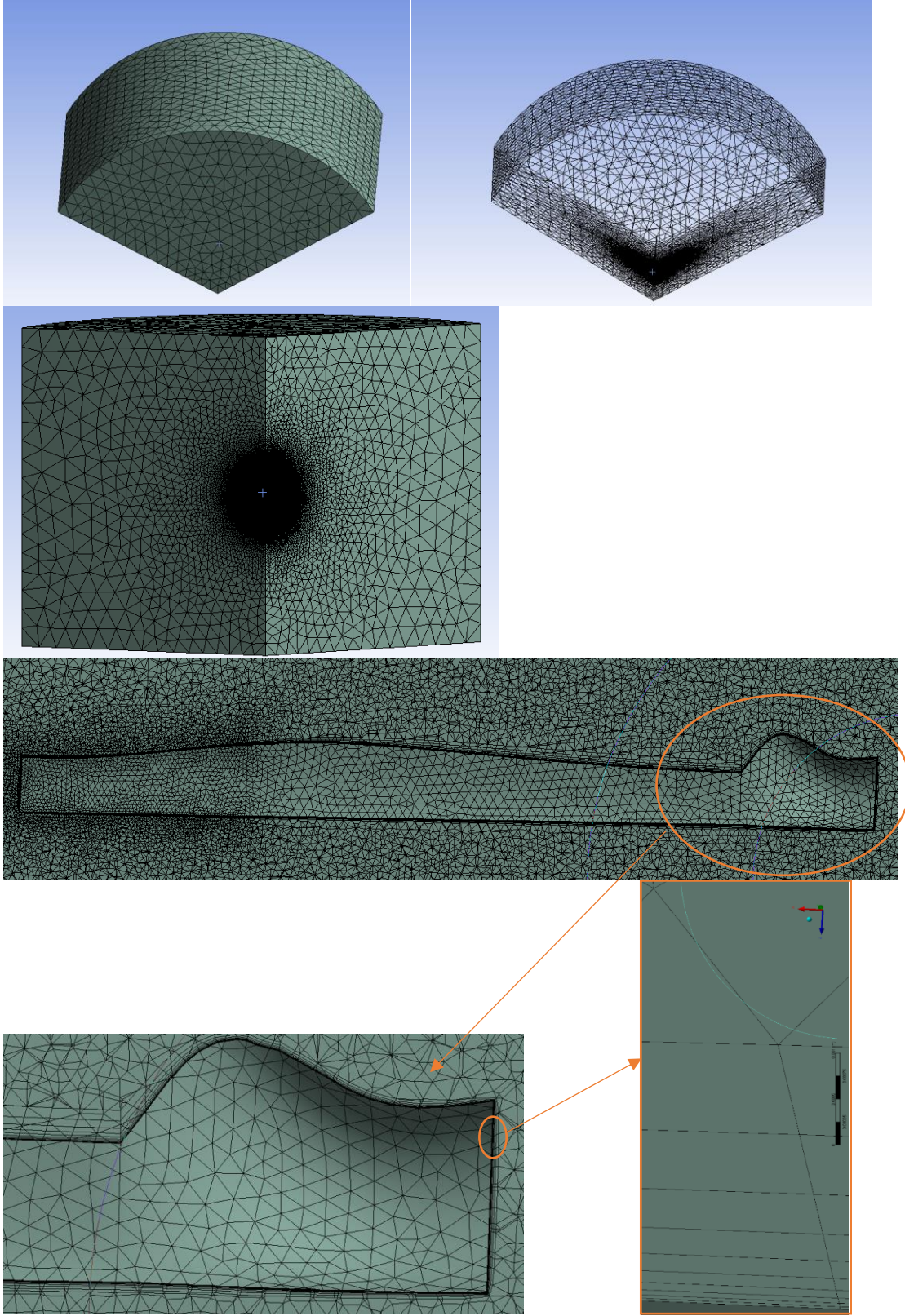
Bu çalışmada Uygun ağ yapısının belirlenmesi amacıyla ağ yapısı yoğunluğu ve sıklığı değiştirilerek farklı ağ yapıları oluşturulmuştur. Sözü edilen ağ yapılarına ait bilgiler Çizelge 5.10'da verilmiştir. Çizelgedeki ağ yapılarından en uygun ağ yapısının kaba (coarse) yoğunluğuna sahip +100 sıklık (relevance) seçeneğiyle oluşturulduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle bu ağ yapısı esas alınmış ve bu ağ yapısında çeşitli iyileştirmeler yapılarak analiz için gerekli en uygun ağ yapısı belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 5.11. Oluşturulan Ağ Yapılarının Yoğunluk ve Sıklık Parametreleri

Ağ Yapısı Yoğunluğu	Ağ Yapısı Sıklığı (Relevance)	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı	Skewness	Orthogonal Quality
Kaba (Coarse)	0	39243	220981	0.22773	0.86147
	25	51354	290429	0.22487	0.86275
	50	72818	41572	0.21984	0.86502
	75	119172	684674	0.21461	0.86756
	100	221265	1284798	0.20874	0.87047
Orta (Medium)	0	76155	427832	0.227	0.86153
	25	99187	559379	0.22395	0.86285
	50	139720	793546	0.21901	0.86533
	75	230540	1322130	0.21445	0.86751
	100	437701	2540373	0.20894	0.87017
İyi (Fine)	0	132693	741495	0.22646	0.86144
	25	174538	979947	0.22299	0.86321
	50	234304	1323781	0.21987	0.86453
	75	363495	2075829	0.21471	0.86715
	100	670624	38807755	0.2089	0.87025

Kanat etrafındaki ağ yapısı için aşağıda belirtilen işlemlerle ağ yapısının (Şekil 5.48) kalitesi iyileştirilmiştir. Yapılan düzenlemeler sonucunda oluşturulan ağ yapısı 956018 düğüm noktası ve 5464526 elemandan oluşmaktadır. Bu ağ yapısının ortalama Skewness ve Orthogonal Quality parametreleri ise sırasıyla 0.20483 ve 0.87006 şeklindedir.

- Kanadın etrafında uygun ağ yapısının oluşturulması amacıyla Face Sizing işlemiyle akış ortamındaki her bir elemanın boyutlarının en fazla 75.10 m olması sağlanmıştır.
- İnflation komutuyla kanat etrafında bir sınır tabaka tanımlanmıştır. Bu sınır tabakadaki ilk katmanın kalınlığı 10 mm olarak ayarlanmış, sınır tabakanın 10 katmandan oluşması ve kanat yüzeyinden dışarıya doğru her katmanın kalınlığının bir önceki katmanın 1.5 katı olması sağlanmıştır.



Şekil 5.48. Oluşturulan ağ yapısı ve tanımlanan sınır tabaka

3. Akış analiz tipi veya modelinin tanımlanması

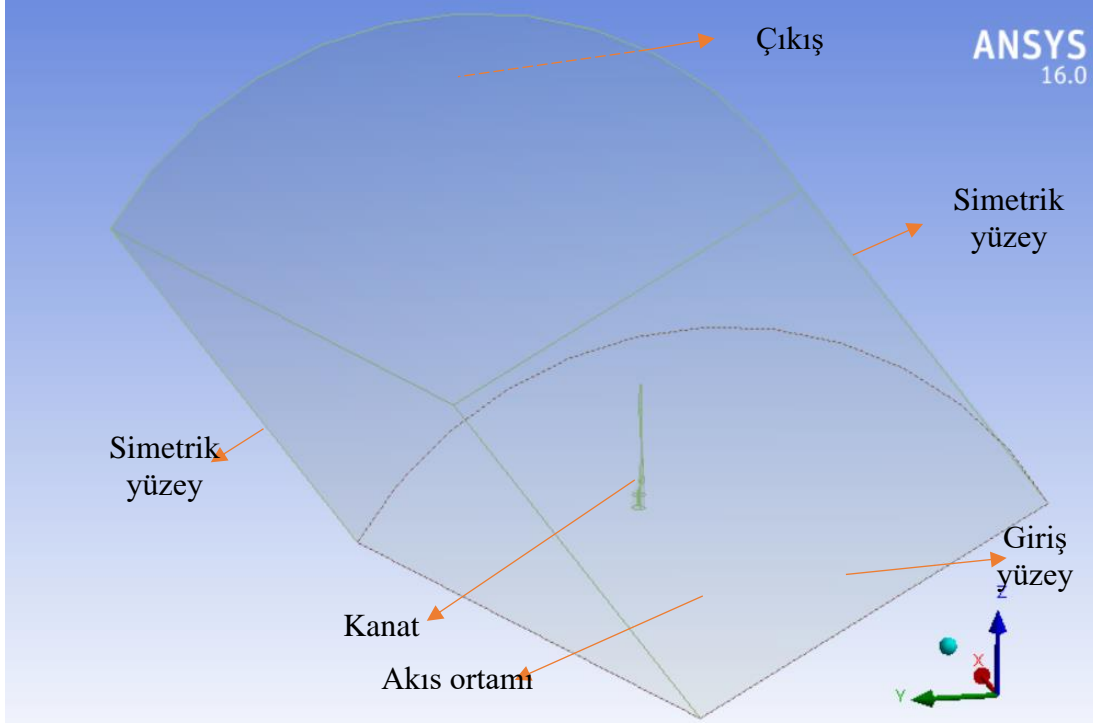
Ağ yapısı oluşturulduktan sonra analiz için türbülans modelinin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, laminar akış ile S-A, Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılarak akış analizleri gerçekleştirilmiştir.

4. Akış analizinde kullanılacak akışkan türünün belirlenmesi

Akışkan türü tanımlanması akış ortamını oluşturan akışkan türünün belirlenmesi işlemidir. Bu çalışmada, rüzgar türbinlerinin etrafındaki akış ortamında bulunan akışkan türü olarak **hava** seçilmiştir.

5. Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Akış analizi için sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada sınır koşulları literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Sınır koşulları olarak akış ortamının $-x$ yönündeki yüzeyi **giriş yüzeyi (velocity inlet)**(akışkanın akış ortamına girdiği yüzey), $+x$ yönündeki yüzeyi **çıkış yüzeyi (pressure outlet)** (akışkanın akış ortamından çıktığı yüzey), eğrisel yüzey giriş yüzeyi, diğer iki yan yüzey ise **simetrik yüzeyler** olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.49).



Şekil 5.49. Problemin Çözümü İçin Tanımlanan Sınır Koşulları

6. İterasyon Sayısı ve Hata Miktarının Tanımlanması ile Problemin Çözümü

Sınır koşulları tanımlandıktan sonra, maksimum iterasyon sayısı tanımlanarak analiz başlatılır. Bu çalışmada maksimum iterasyon sayısı 1000, çözüme ulaşmada kullanılacak artık büyüklüğü ise 1×10^{-6} olarak belirlenmiştir. Bütün iterasyonlar ya tanımlanan artık büyüklüğüne ulaşıldığında ya da 1000 iterasyondan sonra program tarafından sonlandırılmaktadır. Tez çalışması kapsamında 1 m uzunluğundaki kanadın seçilen türbülans modellerine göre analizi gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar, bulgular ve tartışma kısmında verilmiştir.

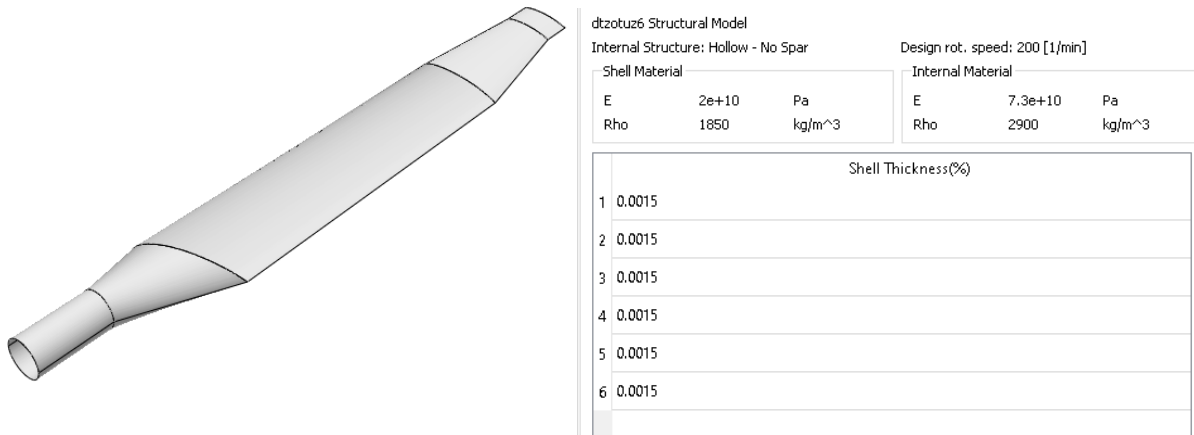
5.3.2. Kanadın Mekanik Davranışının Değerlendirilmesi

Rüzgar türbinlerinde, Qblade gibi özel yazılımlar kullanılarak veya Akışkan Yapı Etkileşimi analizi kullanılarak kanadın mekanik davranışı değerlendirilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında, tasarımı yapılan kanadın mekanik davranışı Qblade yazılımı ve Akışkan-Yapı Etkileşimi analizinden yararlanılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yapılan işlemler aşağıda verilmiştir.

5.3.2.1. Qblade Yazılımıyla Kanadın Mekanik Davranışının Değerlendirilmesi

Kanadın mekanik davranışını incelemek için Qblade yazılımının QFEM modülü kullanılabilir (Hansen, 2013). Bu kapsamda, kanadın mekanik tasarım parametreleri kullanılarak kanat modeli oluşturmakta ve kanadın belirlenen yükleme koşulları altındaki mekanik davranışı değerlendirilebilmektedir.

Kanadın mekanik tasarımı için kanat kabuk yapısı ve iç destek elemanlarının boyutları mekanik tasarım parametreleri olarak kullanılmaktadır. QFEM modülü katı kanat modeli, iç destek elemanı kullanılan kabuk yapı kanat modeli ve iç destek elemanı kullanılmayan kabuk yapı kanat modeli olmak üzere üç farklı şekilde oluşturulabilmektedir. Bu modülde kanat kabuk yapısının et kalınlıkları, iç destek elemanlarının boyutları ve konumları tanımlanarak kanat geometrisi oluşturulabilmektedir. Ayrıca kanat kabuk yapısı ve iç destek yapı bileşenine ait malzeme özellikleri tanımlanarak kanat kütlesi de belirlenebilmektedir. Şekil 5.50’de tasarımı yapılan 1 m’lik kanadın mekanik tasarım parametreleri ve bu parametreler kullanılarak oluşturulan kanat geometrisi verilmiştir.



Şekil 5.50. 1 m’lik kanadın mekanik tasarım parametreleri ve kanat geometrisi

QFEM modülüyle, aerodinamik yükler, santrifüj yükler ve yerçekimi yükleri etkisi altında kanadın mekanik davranışı değerlendirilebilmektedir. Mekanik davranış analizlerinde kanat geometrisi bir ankastre kiriş olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda önceki kısımlarda yapılan aerodinamik performans analizi sonuçlarından yararlanılmakta olup belirlenen bir rüzgar hızı için kanatta oluşan normal ve teğetsel yükler belirlenmektedir. Şekil 5.51’de 20 m/s’lik rüzgar hızında kanada etki eden normal ve teğetsel yükler gösterilmiştir. QFEM modülüyle yapılan mekanik davranış analiziyle Qblade yazılımı kullanılarak belirlenen aerodinamik yükler, belirlenen bir açışal hız nedeniyle oluşan santrifüj yükler ve kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri altındaki mekanik davranışı incelenebilmektedir.

	Radial Position(m)	Normal Loading(N)	Tangential Loading(N)
1		0.61	-0.34
2	0.10	1.73	-0.91
3	0.20	29.99	23.84
4	0.75	50.70	26.25
5	0.95	13.64	5.14
6	1.00	1.67	0.40

Şekil 5.51. 20 m/s’lik rüzgar hızında kanada etki eden normal ve teğetsel yükler

Bu çalışmada, kanadın boyutu küçük olduğundan sadece kabuk yapıdan oluştuğu kabul edilmiş olup iç destek yapı kullanılmamıştır. Bu çalışmada, tasarımı yapılan 1 m’lik kanat için gerekli dayanımı sağlayan kompozit yapının elde edilmesi amacıyla belirlenen kanat kompozit yapılar için kanatta oluşan şekil değişimleri ve gerilmeler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bulgular ve tartışma kısmında verilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışmalarla kanadın ön mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir.

5.3.2.2. Akışkan-Yapı Etkileşimi Analizleriyle Kanadın Mekanik Davranışının Değerlendirilmesi

Qblade yazılımıyla kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesinde kanat ankastre giriş olarak kabul edilmekte olduğundan yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar gerçek kanat geometrisini yansıtmamaktadır. Ayrıca Qblade ile yapılan analizlerde kanada etki eden yükler Kanat Elemanı Momentum teorisıyla belirlenmekte olup bu yükler kanat yüzeyine etki eden basınçlar şeklinde olmayıp kanadın belirlenmiş noktalarına uygulanmış tekil yükler şeklindedir. Yukarıda belirtilen nedenlerle Qblade yazılımıyla yapılan mekanik davranış analizleriyle hassas sonuçlar elde edilmediğinden kanadın mekanik davranış analizi için ek olarak **Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI)** analizleri de gerçekleştirilmiştir.

Akışkan-Yapı Etkileşimi analizleri, rüzgar türbinleri gibi akışkan kaynaklı yüklere maruz kalan sistemlerin mekanik davranışının belirlenmesi için sistemin aerodinamik performansının belirlenmesi ve bu performans dikkate alınarak sistemin mekanik davranışının değerlendirilmesi işlemidir. Şekil 5.52’de Akışkan-Yapı etkileşim analiziyle mekanik davranış analizi akımları verilmiştir.

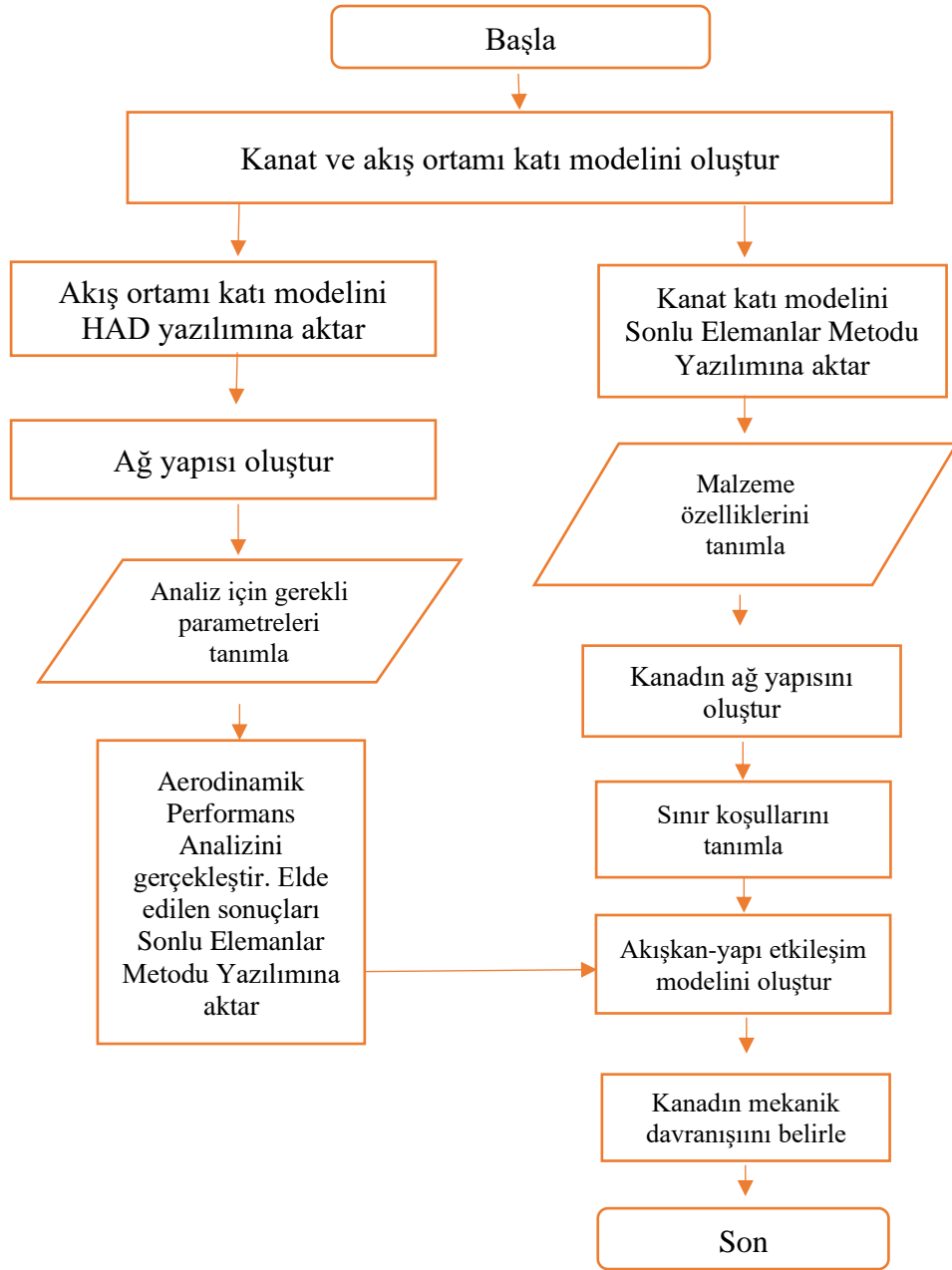
Bu kapsamda, kanadın aerodinamik performansının belirlenmesi için sonlu hacimler metodunun kullanıldığı HAD analizleri ile Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) analizleri birleştirilerek **Akışkan-Yapı Etkileşimi** analiz modeli oluşturulmuştur. **HAD** analizleri önceki kısımlarda verildiğinden aşağıda **Sonlu Elemanlar Metodu** izah edilmiştir.

Sonlu Elemanlar Metodu, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılması ve her problemin kendi içinde çözülerek tam çözümün bulunduğu çözüm yöntemi olup bu metodun üç temel niteliği

- Geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi basit geometrik alt bölgelere ayrılması,
- Her elemanın temsilinde kullanılan sürekli fonksiyonların tanımlanması,
- Problemin çözümü için istenilen değerlerin her elemanın belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerlerinin bulunması

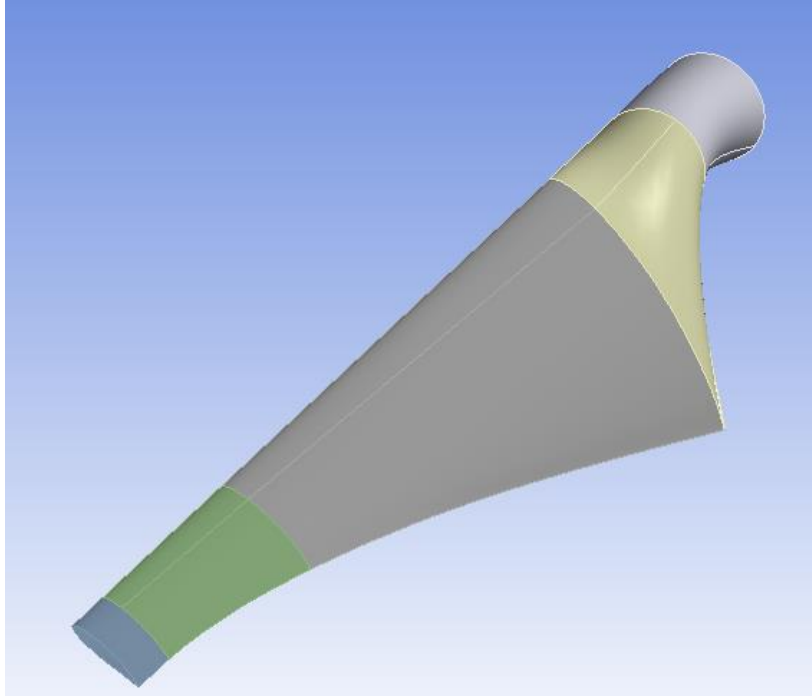
şeklindedir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

SEM analizlerinde kullanılan yaklaşım fonksiyonları olarak genellikle polinom fonksiyonlar seçilmektedir. Seçilen polinom fonksiyonun derecesi çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlı olarak değişmektedir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).



Şekil 5.52. Akışkan-Yapı Etkileşim analiziyle mekanik davranışın değerlendirilmesi (Kaya, 2014)

Akışkan-yapı etkileşim analiziyle kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi için kanat geometrisinin oluşturulması gerekmektedir. Kanat geometrisi ANSYS Workbench yazılımının Design Modeler Modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan kanat geometrisi Şekil 5.53’de verilmiştir.



Şekil 5.53. Kanat katı modeli

Kanat malzemesi olarak E-Cam epoksi kompozit malzeme kullanılmış olup Çizelge 5.12’de E-Cam epoksi malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir. Kanadın kompozit yapısı, önceki kısımlarda ön tasarımla belirlenmiş olup kanat uzunluğu boyunca değişen kompozit yapı Çizelge 5.13’de verilmiştir.

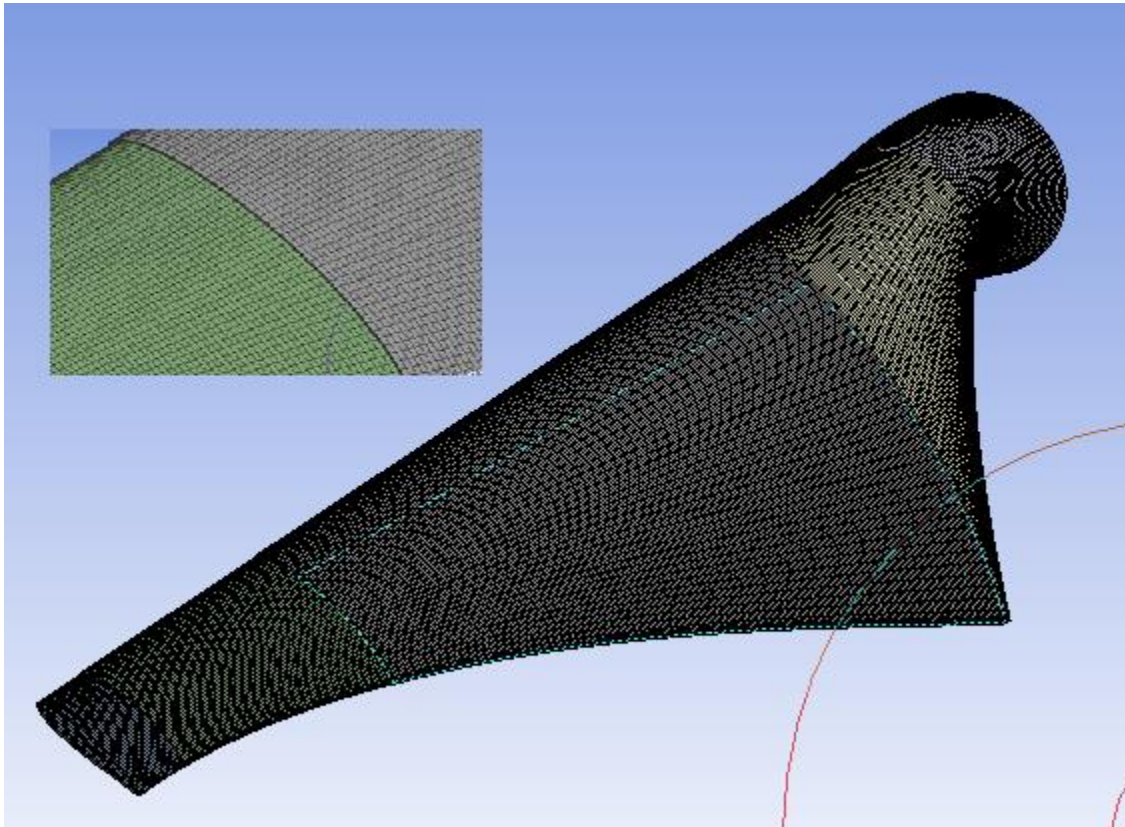
Çizelge 5.12. E-Cam epoksi kompozit malzeme özellikleri

Property	Value	Unit
Density	1850	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and...	
Young's Modulus	38670	MPa
Poisson's Ratio	0.28	
Bulk Modulus	2.9295E+10	Pa
Shear Modulus	1.5105E+10	Pa
Field Variables		
Temperature	No	
Shear Angle	No	
Degradation Factor	No	
Tensile Yield Strength	900	MPa
Compressive Yield Strength	784	MPa

Çizelge 5.13. Kompozit kanat yapısı

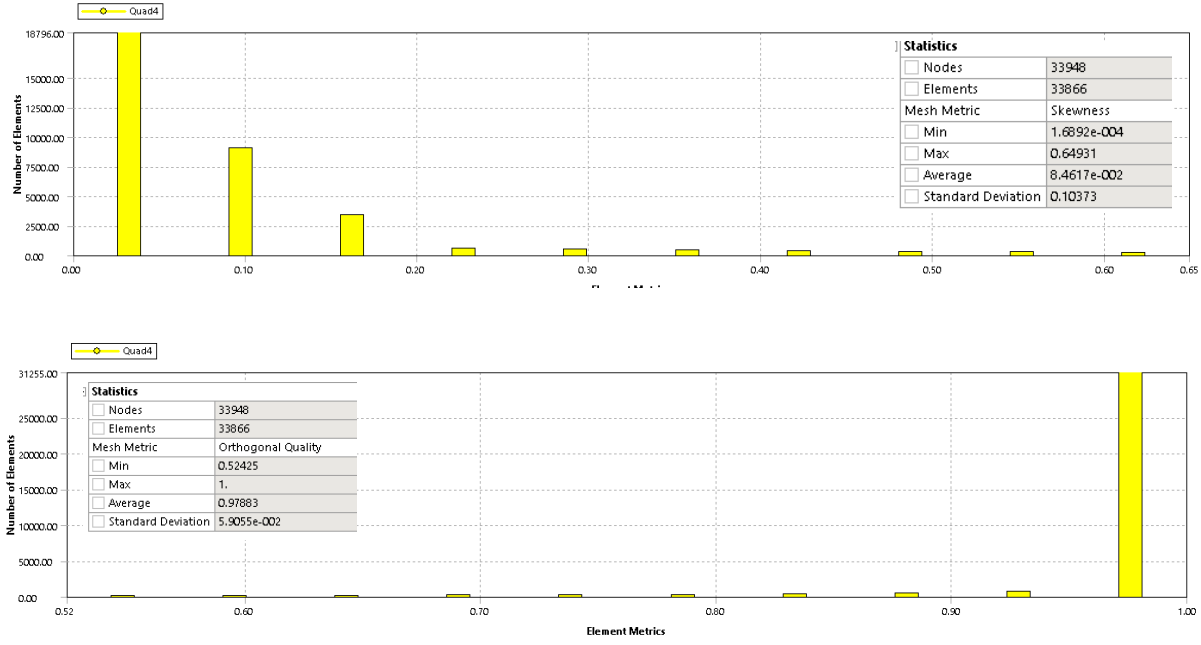
Layer	Material	Thickness (m)	Angle (°)
(+Z)			
10	Ecaml/Epoksi	0.000125	45
9	Ecaml/Epoksi	0.000125	-45
8	Ecaml/Epoksi	0.002	0
7	Ecaml/Epoksi	0.000125	-45
6	Ecaml/Epoksi	0.000125	45
5	Ecaml/Epoksi	0.000125	45
4	Ecaml/Epoksi	0.000125	-45
3	Ecaml/Epoksi	0.002	0
2	Ecaml/Epoksi	0.000125	-45
1	Ecaml/Epoksi	0.000125	45
(-Z)			

Akışkan-yapı etkileşim analizinde kanadın alt dilim elemanlarına ayrılması amacıyla kanat geometrisi için uygun ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Uygun ağ yapısının oluşturulması için Face Meshing ve Face Sizing işlemleriyle kanat yüzeyi 2.5mm boyutlarındaki dörtgen elemanlardan oluşacak şekilde tanımlanmıştır. Kanat geometrisi için oluşturulan ağ yapısı Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.54. Kanat geometrisinde oluşturulan ağ yapısı

Şekil 5.55a'da ağ yapısının Skewness parametre dağılımı verilmiştir. Şekilden Skewness parametresinin ortalama $8.4618 \cdot 10^{-2}$, standart sapmasının ise 0.10373 olduğu görülmektedir. Şekil 5.55b'de ise ağ yapısının Orthogonal Quality parametreleri verilmiştir. Orthogonal Quality parametresinin 0.97883 , standart sapmasının ise $5.9055 \cdot 10^{-2}$ olduğu da şekilden izlenebilmektedir.

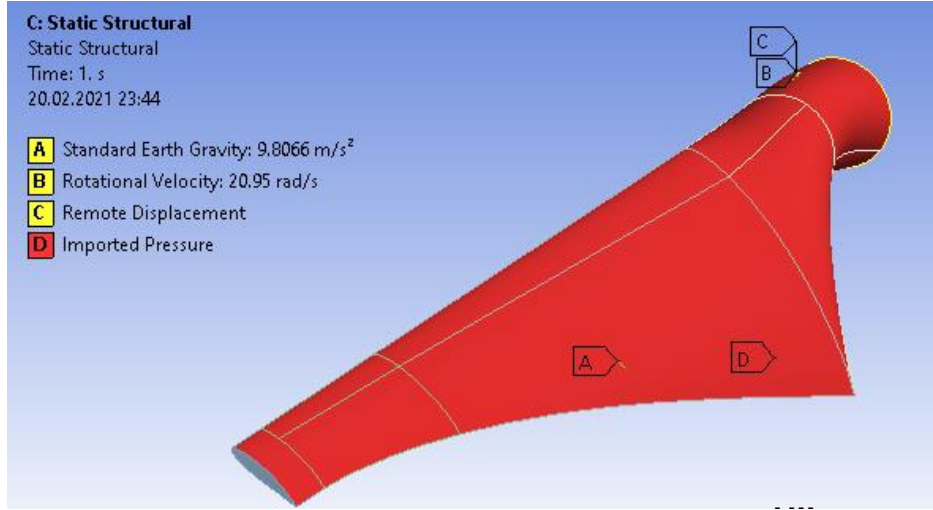


Şekil 5.55. Ağ yapısının Skewness ve Orthogonal Quality parametreleri

Akışkan-yapı analiziyle kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla modele aşağıda belirtilen tanımlamalar yapılmıştır (Şekil 5.56).

- Yerçekimi yüklerinin değerlendirilebilmesi amacıyla modele yerçekimi ivmesi (Standart Earth Gravity) tanımlanmıştır.
- Santrifüj yüklerin değerlendirilmesi amacıyla modele kanadın 200 dev/dk'ya karşılık gelen 20.95 rad/s 'lik açısal hız (Rotational Velocity) tanımlanmıştır.
- Kanat C ile gösterilen kök noktasından gövdeye sabitlendiği tanımlanmıştır.
- Akışkan-Yapı Etkileşimi analiziyle kanada etki eden yerçekimi yüklerini değerlendirebilmek amacıyla HAD analiziyle belirlenmiş olan kanat yüzeyine etki eden basınçlar (imported pressure) modele basınç yükü olarak tanımlanmıştır.

Modele yapılan tanımlamalar sonucunda kanada etki eden aerodinamik, yerçekimi ve santrifüj yüklemeler sonucunda Akışkan-Yapı etkileşimi analiziyle kanat mekanik davranışının değerlendirilmesine imkan sağlanmıştır. Oluşturulan model kullanılarak kanadın mekanik davranışı değerlendirilmiş olup elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma kısmında verilmiştir.



Şekil 5.56. Kanada yapılan yüklemeler

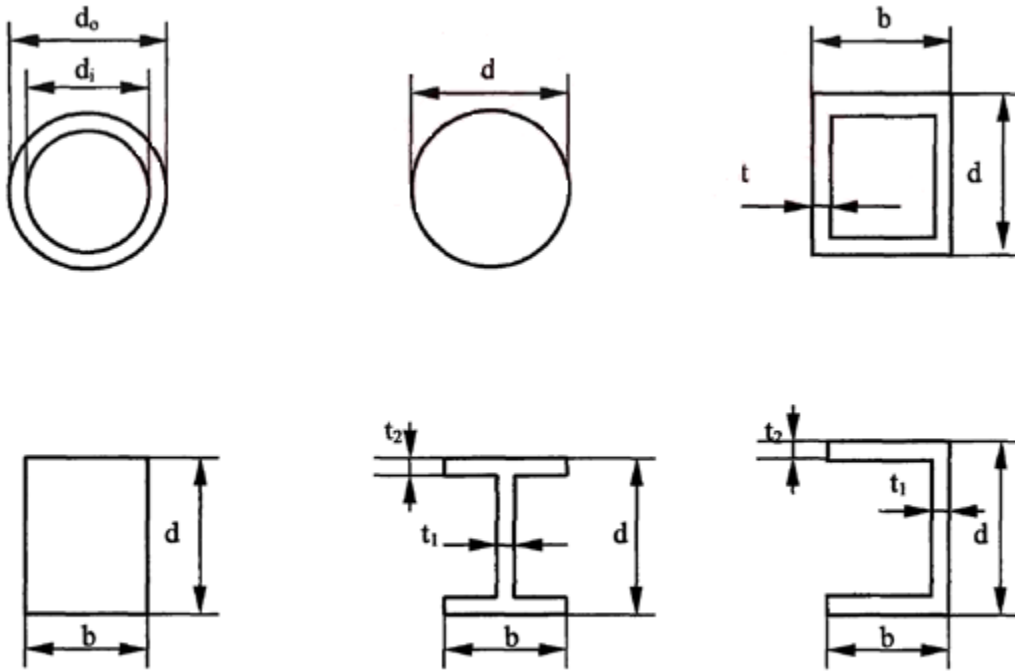
5.4. Kanadın Optimizasyonu

5.4.1. Optimizasyon ve Temel Optimizasyon Parametreleri

Optimizasyon sözcüğü, en iyi anlamına gelen Latince bir isim olan optimum sözcüğünden türetilen, bir problemin mümkün çözümleri arasından en iyisinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır.

Optimizasyon problemlerinde en uygun çözümün belirlenebilmesi için problemin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla bazı kavramlardan yararlanılmakta olup söz konusu kavramlar aşağıda ifade edilmiştir (Mert, 2001).

Tasarım Değişkeni: Bir sistemin tasarımını tanımlamak için seçilen parametrelere veya değişkenlere tasarım değişkeni denir. Şekil 5.57’de farklı kesitler için tanımlanan tasarım değişkenleri verilmiştir.



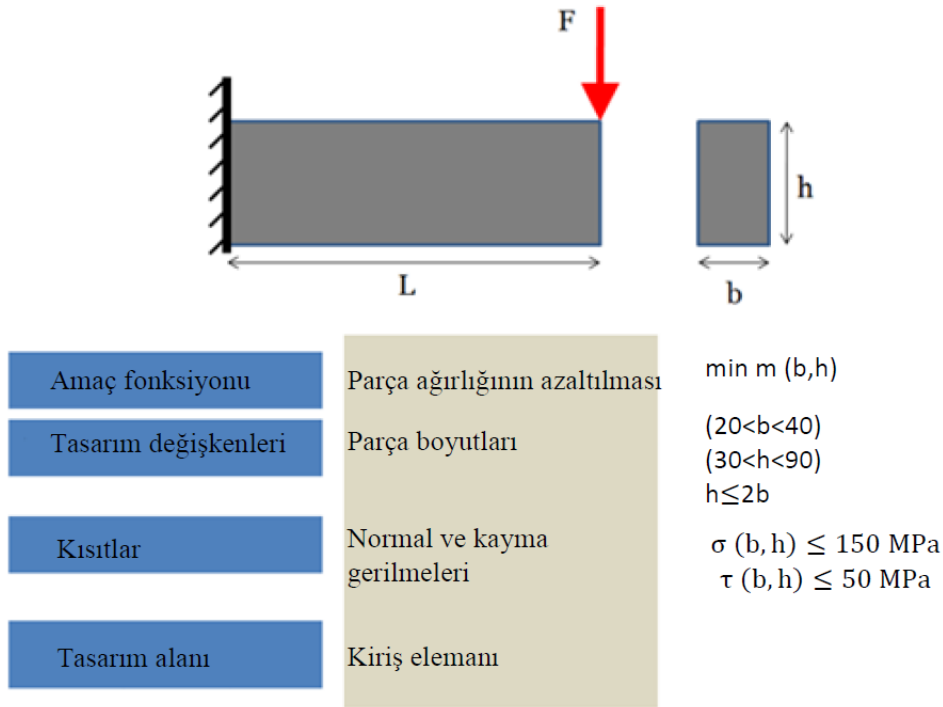
Şekil 5.57. Farklı Kesitler İçin Tanımlanan Tasarım Değişkenleri (Mert, 2001)

Tasarım Sınırlamaları: Bir optimizasyon probleminin tasarım değişkenlerine bağlı olarak tanımlanan ve sisteme ait gerilme, frekans, boyut, deformasyon, sıcaklık vb. büyüklük sınırlarını belirten ifadelerdir. Başka bir ifadeyle tasarım sınırlamaları veya kısıtlar tasarım probleminin çözümü için sağlanması gereken koşullardır (Mert, 2001).

Hedef Fonksiyonu: Bir sistem için farklı kriterlere uygun pek çok tasarım alternatifi olabilmektedir. Tasarım sonucunda elde edilmek istenilen hedefe ulaşmak için kullanılan fonksiyon hedef fonksiyonu veya amaç fonksiyonu olarak tanımlanır. Bir optimizasyon

problemi için hedef fonksiyonu, minimum maliyet, minimum ağırlık, minimum enerji gideri, maksimum dayanım, maksimum performans, maksimum kâr olabilmektedir.

Şekil 41’de bir ankastre kirişin tasarım optimizasyonu problemi üzerinde yukarıda belirtilen optimizasyonla ilgili kavramlar izah edilmiştir.



Şekil 5.58. Bir Ankastre Kirişin Tasarım Optimizasyonu Parametreleri (Kaya, 2014)

Kanat geometrisini oluşturan aerodinamik tasarım parametreleri çeşitli aerodinamik teorilerden yararlanılarak belirlenmektedir. Bu çalışmada kanadın aerodinamik performansının iyileştirilmesi için aerodinamik kriterlere göre optimizasyon ve gerekli dayanıma sahip hafif kanat geometrisinin belirlenebilmesi için mekanik tasarım parametrelerine göre optimizasyon şeklinde iki farklı optimizasyon işlemi yürütülmüştür.

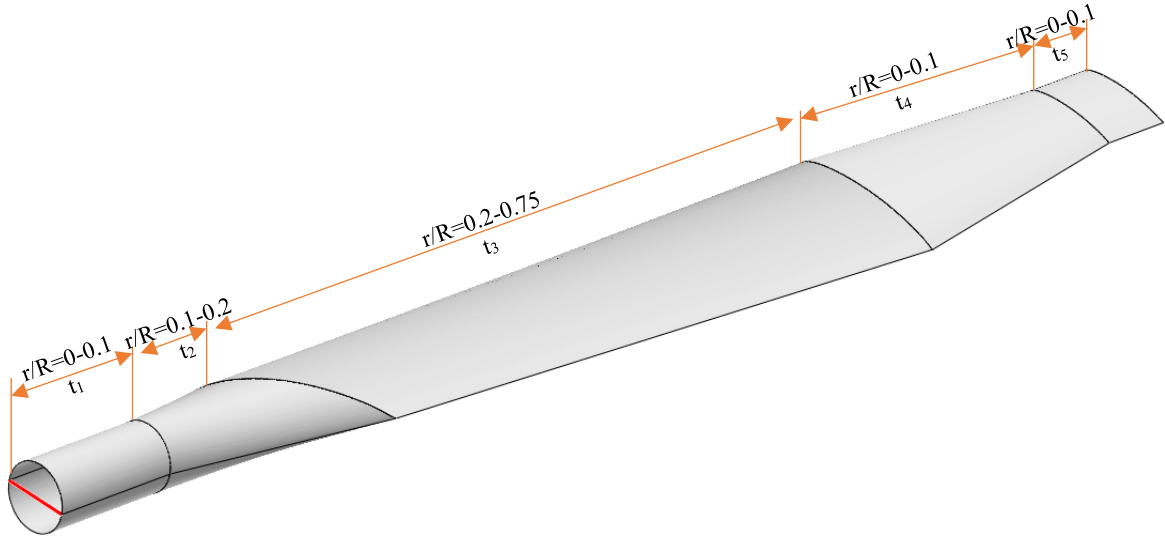
Çizelge 5.14. Optimizasyon için kullanılan girdi ve çıktılar

	Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Artış Miktarı	Değişken Sayısı
Girdi	c ₁	0.15	0.3	0.05	4
	c ₂	0.075	0.125	0.025	3
	c ₃	0.05	0.075	0.01	4
	φ ₁	10	25	5	4
	φ ₂	0	1	0.5	3
	φ ₃	0° olarak kabul edildi			
	X ₁	0.2	0.4	0.1	3
	X ₂	0.75 olarak kabul edildi			
	X ₃	0.95 olarak kabul edildi			
Çıktı	Enerji (AEP) (kWh)	1000	3000		
	Kanatta güç üretimine başlanılan rüzgar hızı V cut in (m/s)	1	3.5		

Belirlenen farklı tasarım değişkenleri ve bunların kombinasyonları için analizler yapılarak optimizasyon işlemi için gerekli enerji üretim miktarı ve kanadın güç üretimine başladığı rüzgar hızları şeklindeki çıktılar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bulgular ve tartışma kısmında verilmiştir.

5.4.3. Kanadın Mekanik Davranışına Göre Optimizasyonu

Tez çalışması kapsamında kanadın mekanik tasarımının gerçekleştirilmesi için ön tasarım ile belirlenen tasarım geometrisi esas alınarak tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarım optimizasyonu için Şekil 5.60'da verilen kanadın et kalınlıkları (t_1 , t_2 , t_3 , t_4 ve t_5) tasarım değişkeni olarak tanımlanmış gerekli dayanıma sahip, hafif kanat geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.60. Kanadın mekanik tasarım parametreleri

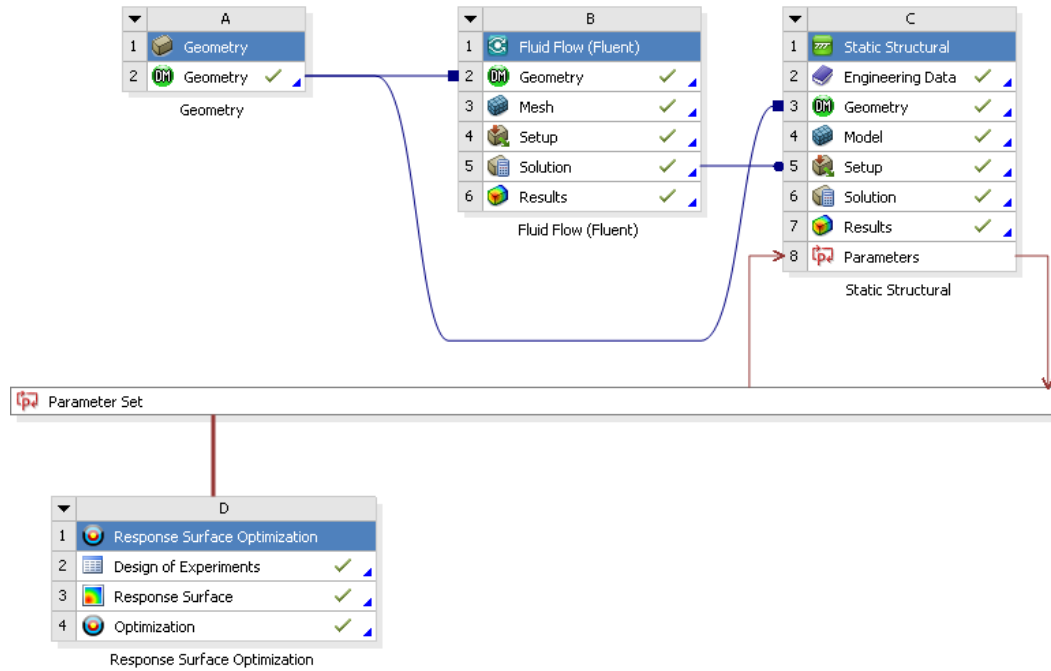
Kanadın tasarım optimizasyonu ile uygun kanat geometrisini belirleyebilmek amacıyla kanat uzunluğu boyunca kanadın et kalınlığının değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda ön tasarımla belirlenen et kalınlıkları esas alınarak kanadın gerekli dayanıma sahip, hafif kanat geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır. Çizelge 5.15'de kanadın tasarım optimizasyonu için kullanılan tasarım parametreleri ve bu parametrelerin değişimi verilmiştir.

Çizelge 5.15. Kanadın mekanik tasarım parametreleri ve bu parametrelerin değişimi

Parametre	Değişim				
	0.025	0.02	0.015	0.01	0.008
t_1	0.025	0.02	0.015	0.01	0.008
t_2	0.02	0.015	0.01	0.008	0.006
t_3	0.01	0.008	0.006		
t_4	0.008	0.006	0.004		
t_5	0.006	0.004	0.003		

Gerekli dayanıma sahip, hafif kanat geometrisinin belirlenmesi amacıyla kanadın en yüksek zorlama koşullarındaki mekanik davranışı dikkate alınmıştır. Bu amaçla kanadın

mekanik davranışını belirlemek için kullanılan akışkan-yapı etkileşimi modeline Response Surface Optimization Modülü eklenerek optimasyon işlemi yapılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda aranılan uygun geometrinin belirlenmesi amacıyla kanadın en yüksek zorlama koşullarında kanatta oluşan şekil değişimi, eşdeğer gerilmeler, kanadın tsai-wu endeksi ve kanadın ağırlığı çıktı olarak değerlendirilmiştir. Kanadın şekil değişiminin, kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin, kanadın tsai-wu endeksinin ve kanat ağırlığının minizasyonu için optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen sonuçlar bulgular ve tartışma kısmında verilmiştir.



Şekil 5.61. Kanadın tasarım optimizasyon modeli

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 1 m uzunluğundaki kanadın tasarım ve performansı aerodinamik ve mekanik açıdan ele alınmıştır. Bu kapsamda kanadın aerodinamik tasarımı, aerodinamik performans analizi gerçekleştirildikten sonra kanadın aerodinamik performansının iyileştirilmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ayrıca kanadın mekanik tasarımı gerçekleştirilerek çalışma koşullarındaki mekanik davranışı akışkan-yapı etkileşim analizleriyle değerlendirilmiştir. Son olarak ise yapılan tasarımın IEC 61400-2 standartlarına göre tasarım doğrulaması yapılmıştır.

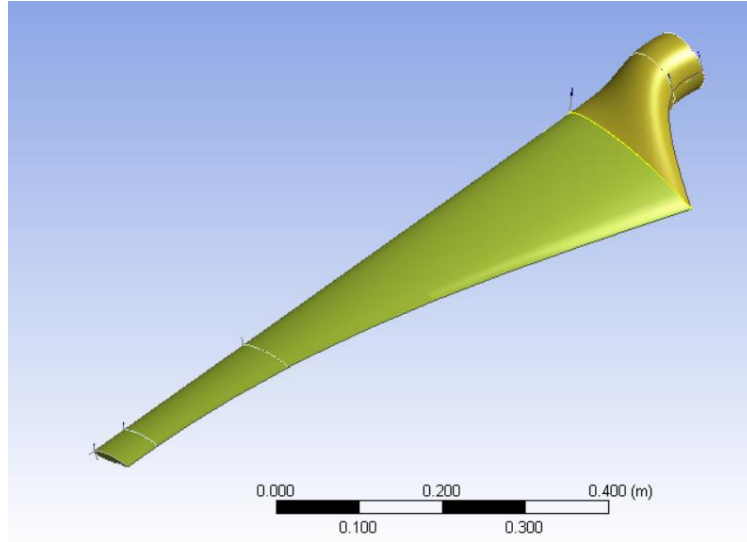
6.1. Kanadın Aerodinamik Tasarımı

Kanadın aerodinamik tasarımı için bazı tasarım parametreleri (kullanılan aerofoil, aerofoilin konumları, aerofoilin profil giriş hattı uzunluğu ve hatve açısı gibi) belirlenmektedir. Bu çalışmada 1 m uzunluğundaki kanada ait aerodinamik tasarım parametreleri Kanat Elemanı Momentum Teorisinden yararlanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla bölüm 5.1.4’de verilen adımlar izlenmiş olup belirlenen 1 m’lik kanada ait aerodinamik tasarım parametreleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Burada kanadın aerodinamik açıdan ön tasarımı yapılmıştır. Yapılan ön tasarıma ait aerodinamik tasarım parametreleri incelendiğinde kanadın 0.2 m uzunluğundaki 2. profil istasyonunda bulunan S835 aerofoilinun 0.2095230 m uzunluğunda profil giriş hattı uzunluğunun olduğu, bu aerofoilin hatve açısının ise 18.787° olduğu çizelgeden görülebilmektedir.

Çizelge 6.1. 1 m’lik kanadın belirlenen aerodinamik tasarım parametreleri

Profil İstasyonu	r/R	r	Hatve Açısı (φ)	Profil giriş hattı uzunluğu (c, m)	Kanat kesiti/ kullanılan aerofoil
1	0.1	0.1	-	-	Dairesel kesit
2	0.2	0.2	18.78700	0.2095230	S835
3	0.3	0.3	15.44905	0.1865170	S835/S833
4	0.4	0.4	12.11111	0.1635110	S835/S833
5	0.5	0.5	8.773164	0.1405050	S835/S833
6	0.6	0.6	5.435218	0.1174990	S835/S833
7	0.7	0.7	2.097273	0.0944930	S835/S833
8	0.75	0.75	0.42830	0.0829900	S833
9	0.8	0.8	0.25926	0.0744792	S833/S834
10	0.9	0.9	0.09022	0.0659684	S833/S834
11	0.95	0.95	-0.00570	0.0617130	S834
12	1	1	-0.00570	0.0617130	S834

Kanadın 0.75 m uzunluğundaki 8. profil istasyon noktasında ise S833 aerofoilinin bulunduğu, bu aerofoilin profil giriş hattı uzunluğu ve hatve açısının ise 0.08299 m ve 0.42° olduğu da çizelgeden takip edilebilmektedir. Kanadın 2. profil istasyon noktası ile 7. profil istasyon noktası arasında ise S835 aerofoilinden S833 aerofoiline geçiş kesiti bulunmaktadır. Çizelge 6.1’de bulunan aerodinamik tasarım parametreleri kullanılarak Kanat Katı Modeli oluşturulmuş olup Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kanat katı modeli

6.2. Qblade Yazılımıyla Kanadın Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi

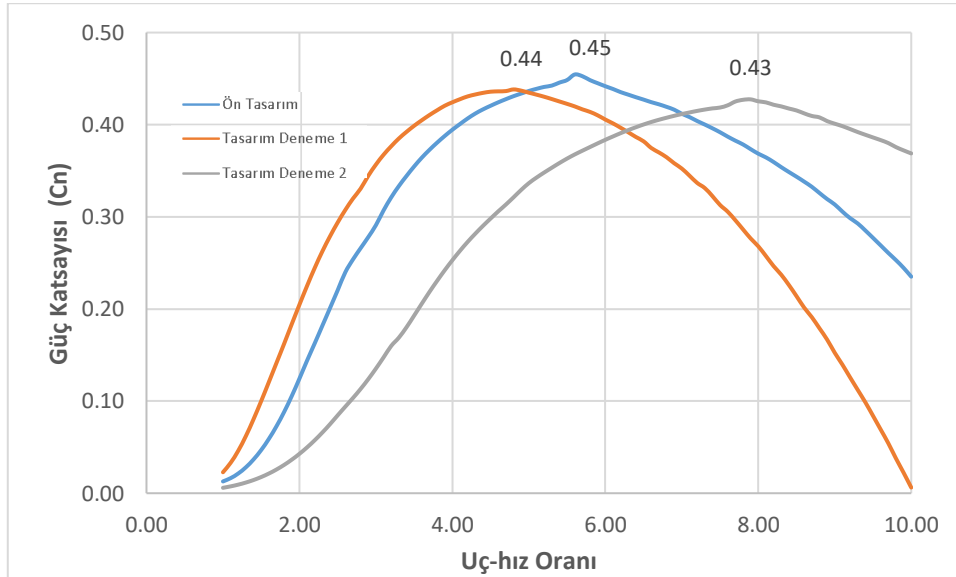
Bu çalışmada, ön tasarımı yapılan kanadın aerodinamik performansının iyileştirilmesi amacıyla Qblade yazılımıyla analizler yapılmıştır. Kanadın aerodinamik tasarım parametrelerine göre kanadın aerodinamik performansı da farklılık göstermektedir. Ön tasarım, tasarım deneme 1 ve tasarım deneme 2 şeklindeki üç farklı tasarım durumuna ait tasarım parametreleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Belirlenen tasarım durumları için kanadın aerodinamik tasarım parametreleri

Parametre	Ön Tasarım	Tasarım Deneme 1	Tasarım Deneme 2
c_1 (m)	0.2095230	0.15	0.25
c_2 (m)	0.08299	0.075	0.1
c_3 (m)	0.0617130	0.05	0.075
φ_1 (°)	18.787	10	30
φ_2 (°)	0.42830	0.25	1
φ_3 (°)	-0.00570	0	0

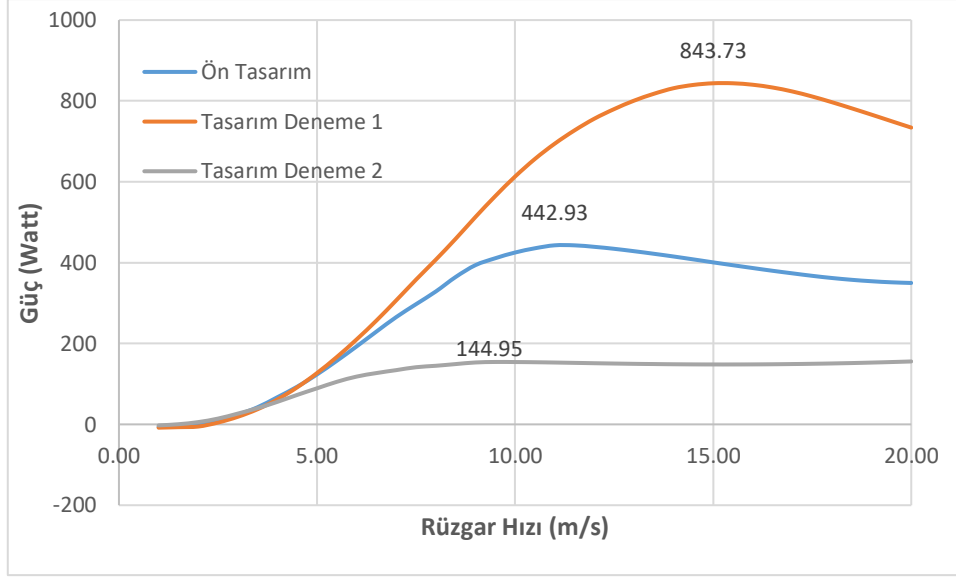
Bu çalışmada kanadın aerodinamik performans analizleri için ön tasarım, tasarım deneme 1 ve tasarım deneme 2 şeklindeki 3 farklı tasarım durumu için aerodinamik performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Farklı tasarım durumlarında kanadın güç katsayısı ve uç-hız oranı değişimi Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekilden güç katsayısı en yüksek olan tasarım durumunun ön tasarım (0.45), en düşük olan tasarım durumunun ise tasarım deneme 2 (0.43) olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2. Belirlenen farklı tasarım durumları için güç katsayısı ve uç-hız oranı değişimi

Farklı rüzgar hızlarında sözü edilen tasarım durumları için elde edilebilecek güç büyüklükleri Şekil 6.3’de verilmiştir. Ön tasarım, tasarım deneme 1 ve tasarım deneme 2 için elde edilebilecek güç büyüklüklerinin sırasıyla 442.93 Watt, 843.73 Watt ve 144.95 Watt olduğu Şekil 6.3’den görülebilmektedir.



Şekil 6.3. Belirlenen farklı tasarım durumları için güç ve rüzgar hızı değişimi

Kanadın aerodinamik tasarım parametreleri, kanadın aerodinamik performansına doğrudan etki etmektedir. Ön tasarım durumunda kanatta en yüksek güç üretimi 11.5 m/s'lik rüzgar hızında yapılabilmektedir, tasarım deneme 1 için bu değer 15 m/s, tasarım deneme 2 için ise 9.5 m/s olarak gerçekleşmiştir.

Tasarım yapılan kanat kullanılan rüzgar türbininin çalışmaya başladıkları rüzgar hızları incelendiğinde, ön tasarım için 1.45 m/s olan rüzgar türbininin çalışmaya başladıkları rüzgar hızının tasarım deneme 1 ve tasarım deneme 2 durumları için sırasıyla 2.25 m/s ve 1.175 m/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca yapılan analizlerle kanadın aerodinamik tasarım parametrelerinin, elde edilebilecek enerji miktarının ön tasarım, tasarım deneme 1 ve tasarım deneme 2 için sırasıyla 2494 kWh, 2581 kWh ve 1840 kWh olduğu belirlenmiştir.

Yapılan aerodinamik performans analizleri değerlendirildiğinde, aerodinamik tasarım parametrelerinin kanadın çalışmaya başladığı rüzgar hızı, anma gücüne ulaştığı rüzgar hızı, kanattan elde edilebilecek güç büyüklüğü ve kanattan elde edilebilecek enerji değerlerini doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, ön tasarımı yapılan kanadın aerodinamik performansının iyileştirilmesi için aerodinamik optimizasyon çalışması yapılmalıdır.

6.3. Kanadın Aerodinamik Kriterlere Göre Optimizasyonu

Bu çalışmada düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayan ve yüksek enerji üretimi sağlayan rüzgar türbin tasarımının belirlenmesi için aerodinamik kriterlere göre optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu amaçla önceki bölümde verilen tasarım değişkenleri için Qblade yazılımında analizler yapılarak belirlenen tasarım durumlarında elde edilebilecek yıllık enerji miktarları (AEP) ve rüzgar türbininin çalışmaya başladığı rüzgar hızı (V_{cutin}) belirlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda elde edilen aerodinamik performans göstergeleri AEP'ye göre sıralanarak (AEP 100) Çizelge 6.2'de verilmiştir. x_1 , c_1 , φ_1 , c_2 , φ_2 , c_3 parametrelerinin sırasıyla 0.2 m, 0.3 m, 20°, 0.1m, 1° ve 0.075m olduğu durumda AEP'nin 2603 kWh, V_{cutin} 'in ise 2.051 m/s olduğu çizelgeden görülebilmektedir.

Çizelge 6.2. Kanadın AEP 100'e en iyi aerodinamik performans göstergeleri

x_1	c_1	φ_1	c_2	φ_2	c_3	AEP (kwh)	V_{cutin} (m/s)
0.2	0.3	20	0.1	1	0.075	2603	2.051
0.2	0.3	20	0.1	1	0.07	2600	2.042
0.2	0.3	20	0.125	1	0.075	2600	2.11
0.2	0.3	20	0.125	1	0.07	2599	2.101
0.2	0.3	20	0.1	0.5	0.075	2594	2.064
0.2	0.3	25	0.1	0.5	0.075	2593	2.281
0.2	0.3	20	0.1	0.5	0.07	2591	2.054
0.2	0.25	20	0.125	1	0.07	2591	2.066
0.2	0.25	20	0.125	1	0.075	2591	2.076

Aerodinamik performans kriterleri V_{cutin} değerlerine göre (AEP 0) küçükten büyüğe göre sıralandığında (Çizelge 6.3) x_1 , c_1 , φ_1 , c_2 , φ_2 , c_3 değerlerinin sırasıyla 0.2 m, 0.15m, 10°, 0.075m, 1° ve 0.05 olduğunda V_{cutin} 'in 1.648 m/s, AEP'nin ise 2326 kWh olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3. Kanadın AEP 0'a göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri

x1	c1	φ_1	c2	φ_2	c3	AEP (kwh)	Vcut in (m/s)
0.2	0.15	10	0.075	1	0.05	2326	1.648
0.2	0.15	15	0.075	1	0.05	2323	1.663
0.2	0.15	10	0.075	0.5	0.05	2350	1.678
0.2	0.15	10	0.075	1	0.06	2370	1.681
0.2	0.15	15	0.075	0.5	0.05	2316	1.684
0.2	0.15	15	0.075	1	0.06	2364	1.692
0.2	0.15	15	0.075	0	0.05	2323	1.707
0.2	0.15	10	0.075	0.5	0.06	2366	1.712
0.2	0.15	10	0.075	0	0.05	2316	1.714

Rüzgar türbinlerinden düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayan (Vcutin'i düşük olan) ve yüksek enerji üretimi sağlayan sistemler olması istenmektedir. Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3 incelendiğinde AEP'nin artırılması amaç fonksiyonu olarak kabul edildiğinde AEP artarken Vcutin'in de arttığı; Vcutin'in düşük olması istendiğinde ise AEP de düşük seviyede kalmaktadır. Bu çalışmada AEP ve Vcutin arasında denge oluşturmak için AEP ve Vcutin değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla 0 ve 1 olarak kabul edilerek boyutsuzlaştırma yapılmıştır. Yapılan boyutsuzlaştırma işleminden sonra her bir tasarım noktası için AEP/Vcutin oranı belirlenmiş ve bu değerlere göre sıralama yapılmıştır. Çizelge 6.4'de AEP/Vcutin oranına göre en iyi olan 10 tasarım noktası verilmiştir. Burada AEP ve Vcutin değerleri için herhangi bir ağırlık faktörü kullanılmamış olup her iki parametrenin de eşit ağırlıkta etkili olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 6.4. Kanadın AEP 50'ye göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri

x1	c1	φ_1	c2	φ_2	c3	AEP (kwh)	Vcut in (m/s)
0.2	0.2	15	0.075	1	0.06	2463	1.744
0.2	0.2	10	0.075	0.5	0.07	2529	1.801
0.2	0.2	15	0.075	1	0.07	2476	1.769
0.2	0.2	15	0.1	1	0.06	2520	1.819
0.2	0.2	15	0.1	1	0.07	2547	1.844
0.2	0.2	15	0.1	1	0.075	2546	1.857
0.2	0.2	15	0.1	0.5	0.07	2539	1.87
0.2	0.25	15	0.1	1	0.07	2566	1.894
0.2	0.25	15	0.1	1	0.075	2569	1.906

Rüzgar türbininden elde edilebilecek enerji miktarının daha fazla olduğu durumlar (AEP'nin % 60, Vcutin'in % 40 olduğu durum AEP60 ve AEP'nin % 70, Vcutin'in % 30 olduğu durum AEP70) için de benzer boyutsuzlaştırma işlemi sonucu AEP/Vcutin oranlarına

göre en iyi tasarım noktası belirlenmeye çalışılmıştır. AEP 60 ve AEP70 için en iyi tasarım noktaları belirlenerek sırasıyla Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.5. AEP 60'a göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri

x1	c1	φ_1	c2	φ_2	c3	AEP (kwh)	Vcut in (m/s)
0.2	0.2	15	0.1	1	0.07	2547	1.844
0.2	0.25	15	0.1	1	0.07	2566	1.894
0.2	0.2	10	0.075	0.5	0.07	2529	1.801
0.2	0.25	15	0.1	1	0.075	2569	1.906
0.2	0.2	15	0.1	1	0.075	2546	1.857
0.2	0.2	15	0.1	1	0.06	2520	1.819
0.2	0.2	15	0.1	0.5	0.07	2539	1.87
0.2	0.2	15	0.125	1	0.07	2559	1.923
0.2	0.25	15	0.1	1	0.06	2534	1.869

Çizelge 6.6. AEP 70'e göre en iyi aerodinamik performans göstergeleri

x1	c1	φ_1	c2	φ_2	c3	AEP (kwh)	Vcut in (m/s)
0.2	0.25	15	0.1	1	0.07	2566	1.894
0.2	0.25	15	0.1	1	0.075	2569	1.906
0.2	0.3	20	0.1	1	0.075	2603	2.051
0.2	0.3	20	0.1	1	0.07	2600	2.042
0.2	0.2	15	0.1	1	0.07	2547	1.844
0.2	0.2	15	0.1	1	0.075	2546	1.857
0.2	0.25	20	0.1	1	0.07	2581	2.007
0.2	0.2	10	0.075	0.5	0.07	2529	1.801
0.2	0.2	15	0.125	1	0.07	2559	1.923

Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'dan x1, c1, φ_1 , c2, φ_2 ve c3 aerodinamik tasarım parametrelerinin sırasıyla 0.2 m, 0.25 m, 15°, 0.1 m, 1°, ve 0.07 m olduğu tasarım durumunda AEP ve Vcutin değerlerinin sırasıyla 2566 kWh ve 1.894 m/s olduğu görülmektedir. Yapılan aerodinamik tasarım, performans analizi ve optimizasyon çalışmaları sonucunda, düşük hızlarda çalışmaya başlayan ve en yüksek seviyede enerji üretimi sağlayan kanat tasarımı için x1, c1, φ_1 , c2, φ_2 ve c3 aerodinamik tasarım parametrelerinin sırasıyla 0.2 m, 0.25 m, 15°, 0.1 m, 1°, ve 0.07 m olarak belirlenmiştir.

6.4. Kanadın Mekanik Tasarımı

Kanadın aerodinamik tasarım parametreleri belirlendikten sonra mekanik tasarım parametrelerinin (kanat dış yapısı ve iç destek elemanlarının boyutları) de belirlenmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında, tasarımı yapılan kanat küçük boyutlarda olduğundan kanatta iç destek elemanı olmadığı kabul edilerek boyutlandırma işlemi yapılmıştır. Kanadın mekanik tasarım parametrelerinin belirlenmesi için Qblade yazılımının QFEM modülünden yararlanılmış olup deneme yanılma ile kanat mekanik tasarım parametreleri(kanat uzunluğu boyunca değişen et kalınlıkları) belirlenmeye çalışılmıştır. Kanadın ön mekanik tasarımında farklı et kalınlıkları için kanadın mekanik davranışı değerlendirilerek boyutlandırma işlemi yapılmıştır. Ön mekanik tasarım işleminde kanat kütlelerinin minimum seviyede olması, kanatta oluşan deformasyon ve eşdeğer gerilemelerin düşük mertebede olması amaçlanmıştır.

Çizelge 6.7’de farklı kanat mekanik tasarım parametreleri için kanadın 20 m/s’lik rüzgar hızındaki deformasyonu ve kanatta oluşan maksimum eşdeğer gerilme büyüklüğü verilmiştir. Çizelgeden kanadın et kalınlığı 1.5mm olduğu durumda kanat ağırlığının 0.117408 kg olduğu, 20 m/s’lik rüzgar hızında kanatta X yönünde 13.98 mm’lik, Z yönünde ise 74.16mm’lik deformasyon oluştuğu görülmektedir. Ayrıca söz konusu durumda kanatta oluşan en büyük eşdeğer gerilmenin 382.76 MPa olduğu da çizelgeden izlenebilmektedir.

Ön tasarımda amaç kanat mekanik tasarım parametreleri için yaklaşık değerleri belirlemek olduğundan kanat ön mekanik tasarımı kanatta oluşan eşdeğer gerilemeler 50 MPa’ın altına düştüğü durumda sonlandırılmıştır. Çizelge 6.7’den kanadın t1, t2, t3, t4 ve t5 et kalınlıklarının sırasıyla 0.015 m, 0.012 m, 0.008 m, 0.005 m ve 0.003 m olduğu durumda kanat kütlelerinin 0.539153 kg, kanatta x yönünde oluşan deformasyonun 0.00257882 m, z yönünde oluşan deformasyonun ise 0.0124171 m olduğu görülmektedir. Ayrıca sözü edilen durumda kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin büyüklüğünün 49.73 MPa olduğu da çizelgeden izlenebilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda kanadın t1, t2, t3, t4 ve t5 et kalınlıkları sırasıyla 0.015 m, 0.012 m, 0.008 m, 0.005 m ve 0.003 m olarak belirlenmiştir. Bu kısımda yapılan işlemlerde Qblade yazılımından yararlanılmış olup Qblade yazılımında yapılan QFEM analizlerinde kanat ankastre giriş olarak kabul edilerek analizler yapılmaktadır. Bu nedenle belirlenen ön tasarım parametreleri kullanılarak kanat katı modeli oluşturulacak ve kanadın akışkan yapı etkileşim analiziyle belirlenen gerçek çalışma koşullarına yakın durumdaki kanat mekanik davranışı için tasarım optimizasyonu gerçekleştirilecektir.

Çizelge 6. 7. Kanadın mekanik tasarım parametrelerinin kanat performansına etkisi

t1 [m]	t2 [m]	t3 [m]	t4 [m]	t5 [m]	Kanat Kütlesi [Kg]	Deformasyon X [m]	Deformasyon Z [m]	Maksimum Eşdeğer Gerilme [MPa]
0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.117408	0.0139846	0.0741611	382.76
0.003	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.118511	0.012127	0.0614387	273.58
0.003	0.003	0.0015	0.0015	0.0015	0.120674	0.0106299	0.052674	212.25
0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.231578	0.00704362	0.0374905	192.79
0.004	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.119236	0.0112971	0.0568527	233.74
0.004	0.003	0.0015	0.0015	0.0015	0.1214	0.00990427	0.0492781	183.35
0.004	0.003	0.003	0.0015	0.0015	0.195127	0.00826943	0.0391383	181.83
0.004	0.004	0.0015	0.0015	0.0015	0.122822	0.00928716	0.0461167	163.5
0.004	0.004	0.003	0.0015	0.0015	0.19655	0.00779253	0.0365309	162.76
0.004	0.004	0.003	0.003	0.0015	0.229091	0.00663667	0.0332299	153.96
0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.233725	0.00622314	0.0333536	156.03
0.005	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.119971	0.0106168	0.0535725	204.88
0.005	0.003	0.0015	0.0015	0.0015	0.122134	0.0093208	0.0468488	162.46
0.005	0.003	0.003	0.0015	0.0015	0.195862	0.0078916	0.036843	162.59
0.005	0.003	0.003	0.003	0.0015	0.228403	0.00664331	0.0334437	153.43
0.005	0.004	0.0015	0.0015	0.0015	0.123556	0.00874428	0.0439981	145.44
0.005	0.004	0.003	0.0015	0.0015	0.197284	0.0073567	0.0345148	145.97
0.005	0.004	0.003	0.003	0.0015	0.229825	0.00631456	0.031392	138.43
0.005	0.004	0.003	0.003	0.003	0.234459	0.0060678	0.0306885	136.81
0.005	0.005	0.0015	0.0015	0.0015	0.124996	0.00827524	0.0418224	132.74
0.005	0.005	0.003	0.0015	0.0015	0.198723	0.00698254	0.0327159	133.51
0.005	0.005	0.003	0.003	0.0015	0.231264	0.00603747	0.0297908	127.1
0.005	0.005	0.003	0.003	0.003	0.235899	0.00581185	0.0291309	125.7
0.005	0.005	0.004	0.0015	0.0015	0.248386	0.00640951	0.0296021	131.99
0.005	0.005	0.004	0.003	0.0015	0.280929	0.00560641	0.027232	126.1
0.005	0.005	0.004	0.003	0.003	0.285564	0.00541196	0.0267011	124.81
0.005	0.005	0.004	0.004	0.0015	0.302755	0.00517371	0.0260162	122.55
0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.30739	0.00500766	0.0255613	121.37
0.005	0.005	0.005	0.003	0.0015	0.329106	0.00525457	0.0254273	124.66
0.005	0.005	0.005	0.003	0.003	0.33374	0.00508361	0.0249762	123.46
0.005	0.005	0.005	0.004	0.0015	0.350932	0.00487279	0.024387	121.36
0.005	0.005	0.005	0.004	0.003	0.355567	0.00472543	0.0239983	120.31
0.006	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.120706	0.010048	0.0510761	182.7
0.006	0.003	0.0015	0.0015	0.0015	0.122869	0.00884238	0.045	146.43
0.006	0.003	0.003	0.0015	0.0015	0.196597	0.00742462	0.0350817	147.72
0.006	0.003	0.003	0.003	0.0015	0.229138	0.00636028	0.031847	139.73
0.006	0.003	0.003	0.003	0.003	0.233772	0.0061085	0.0311187	138.01
0.006	0.004	0.0015	0.0015	0.0015	0.124291	0.00830165	0.0423824	131.55
0.006	0.004	0.003	0.0015	0.0015	0.198019	0.00699522	0.0329663	132.98
0.006	0.004	0.003	0.003	0.0015	0.23056	0.00604346	0.0299754	126.38

Çizelge 6.7. Kanadın mekanik tasarım parametrelerinin kanat performansına etkisi (devamı)

t1 [m]	t2 [m]	t3 [m]	t4 [m]	t5 [m]	Kanat Kütlesi [Kg]	Deformasyon X [m]	Deformasyon Z [m]	Maksimum Eşdeğer Gerilme [MPa]
0.006	0.004	0.003	0.003	0.003	0.235195	0.00581618	0.0293005	124.94
0.006	0.004	0.004	0.0015	0.0015	0.247684	0.00641851	0.0297543	131.62
0.006	0.004	0.004	0.003	0.0015	0.280255	0.00561021	0.027337	125.57
0.006	0.004	0.004	0.003	0.003	0.28486	0.00541442	0.0267951	124.24
0.006	0.004	0.004	0.004	0.0015	0.302051	0.00517515	0.0260946	121.92
0.006	0.004	0.004	0.004	0.003	0.306686	0.00500807	0.0256302	120.71
0.006	0.005	0.0015	0.0015	0.0015	0.125731	0.00786159	0.0403758	120.39
0.006	0.005	0.003	0.0015	0.0015	0.199459	0.00664015	0.0313231	121.88
0.006	0.005	0.003	0.003	0.0015	0.232	0.00577683	0.0285083	116.24
0.006	0.005	0.003	0.003	0.003	0.236634	0.0055691	0.0278727	115.01
0.006	0.005	0.004	0.0015	0.0015	0.249124	0.00610791	0.028257	120.84
0.006	0.005	0.004	0.003	0.0015	0.281665	0.00537228	0.0259854	115.66
0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.286299	0.00519282	0.0254763	114.51
0.006	0.005	0.004	0.004	0.0015	0.303491	0.00497285	0.0248281	112.52
0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.308125	0.00481771	0.0243927	111.47
0.006	0.005	0.005	0.0015	0.0015	0.2973	0.00568483	0.0261692	119.42
0.006	0.005	0.005	0.003	0.0015	0.329841	0.00504298	0.0242173	114.6
0.006	0.005	0.005	0.003	0.003	0.334476	0.00488478	0.0237861	113.54
0.006	0.005	0.005	0.004	0.0015	0.351667	0.00468966	0.0232306	111.66
0.006	0.005	0.005	0.004	0.003	0.356302	0.00455255	0.0228698	110.68
0.006	0.006	0.004	0.003	0.0015	0.283106	0.00516924	0.0248819	107.76
0.006	0.006	0.004	0.003	0.003	0.287741	0.0050031	0.0243981	106.75
0.006	0.006	0.004	0.004	0.0015	0.304932	0.00479893	0.0237898	105.01
0.006	0.006	0.004	0.004	0.003	0.309567	0.00465543	0.0233769	104.08
0.006	0.006	0.005	0.0015	0.0015	0.298742	0.00545193	0.0250386	111.13
0.006	0.006	0.005	0.003	0.0015	0.331283	0.00485943	0.0231824	106.9
0.006	0.006	0.005	0.003	0.003	0.335917	0.00481261	0.0227731	105.96
0.006	0.006	0.005	0.004	0.0015	0.353109	0.0045311	0.0222527	104.31
0.006	0.006	0.005	0.004	0.003	0.357744	0.00440321	0.0219016	103.44
0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.359204	0.00412887	0.0203393	90.28
0.008	0.008	0.005	0.004	0.003	0.362069	0.00389537	0.0190241	80.93
0.008	0.008	0.006	0.004	0.003	0.411366	0.00371123	0.0197525	80.5
0.008	0.008	0.006	0.005	0.003	0.4322445	0.00352219	0.0174086	79.04
0.01	0.008	0.006	0.005	0.003	0.4339	0.00334709	0.0164672	71.11
0.01	0.01	0.006	0.005	0.003	0.436753	0.00319625	0.0156367	65.29
0.01	0.01	0.008	0.005	0.003	0.532705	0.00296046	0.014935	64.7
0.012	0.01	0.008	0.005	0.003	0.534151	0.00283609	0.0136586	59.39
0.012	0.012	0.008	0.005	0.003	0.536988	0.00272803	0.0130895	55.37
0.015	0.012	0.008	0.005	0.003	0.539153	0.00257882	0.0124171	49.73

6.5. HAD ile Kanadın Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi

6.5.1. Aerofoilin Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi

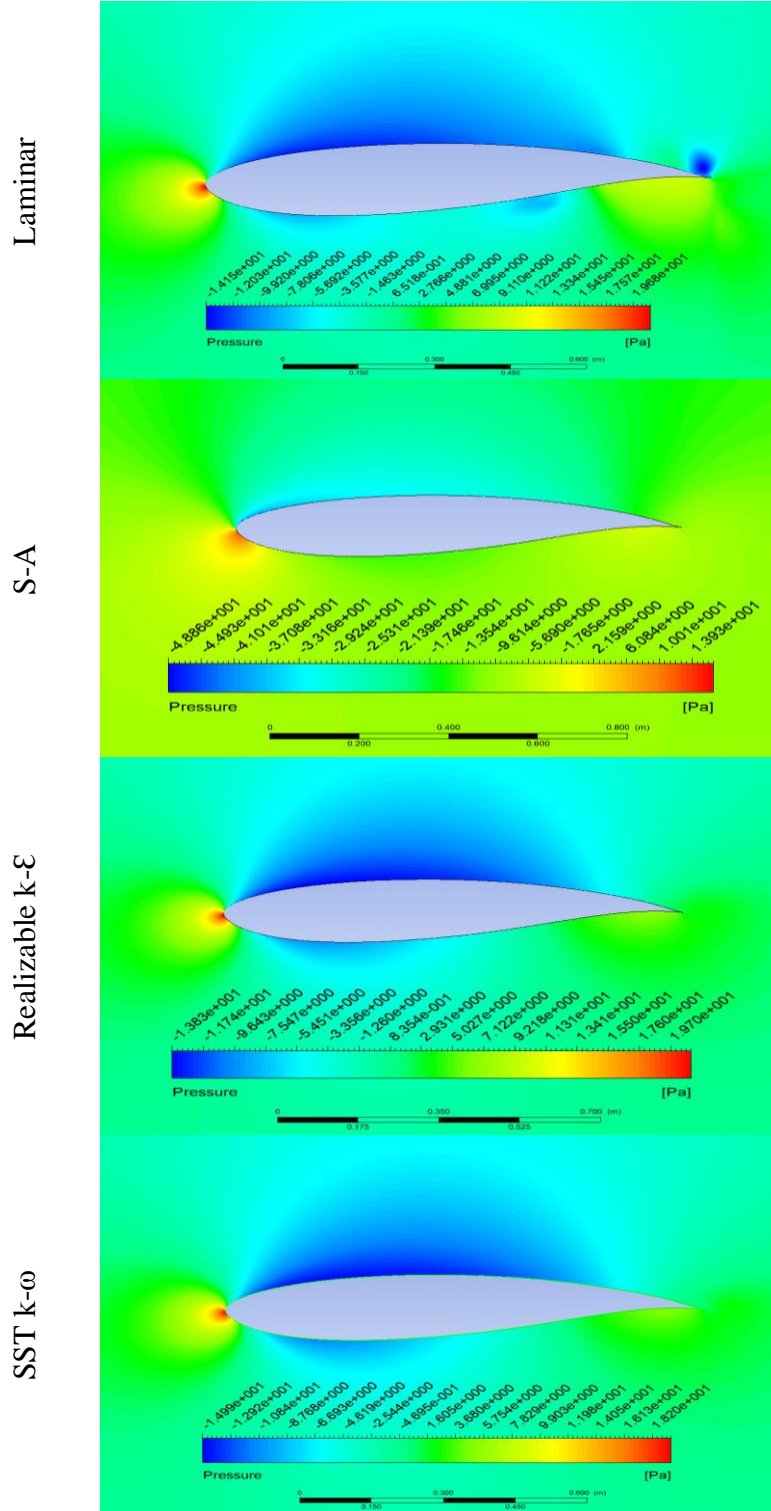
Bu çalışmada, tasarımı yapılan 1 m'lik kanadı oluşturmada kullanılan S833, S834 ve S835 aerofoillerinin aerodinamik performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan analizlerde, **Laminar akış** ile **Spalart-Allmaras (S-A)**, **Realizable k- ϵ** ve **SST k- ω** türbülans modelleri esas alınarak, S833, S834 ve S835 aerofoillerinin, aerodinamik performansı incelenmiştir.

Şekil 6.4'de seçilen akış/türbülans modeline göre S833 aerofoilin etrafındaki basınç dağılımları verilmiştir. Şekilde en yüksek pozitif basınçlar kırmızı ile, negatif basınçlar ise mavi renk ile gösterilmektedir. Aerofoilde en yüksek pozitif basınçların aerofoilin hücum kenarında; en yüksek negatif basınçların ise aerofoilin üst yüzeyinde orta bölümlerde olduğu şekilden görülebilmektedir.

Şekilde, en yüksek pozitif ve negatif basınç büyüklükleri arasında farklılıklar olduğu da gözlemlenebilmektedir. Laminer akış modeli için en yüksek pozitif basınç 19.68 Pa, en yüksek negatif basınç ise -14.15 Pa olarak belirlenmiştir.

S-A, Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modellerine göre sözü edilen basınç büyüklükleri arasında farklılıklar bulunmaktadır. Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modellerinde en yüksek pozitif basınçlar sırasıyla 19.70 Pa ve 18.20 Pa iken; negatif basınçlar -13.83 Pa ve -14.99 Pa olarak belirlenmiştir. S-A türbülans modelinde ise en yüksek pozitif basınç 13.93 Pa iken, en yüksek negatif basınç -48.86 Pa olarak bulunmuştur.

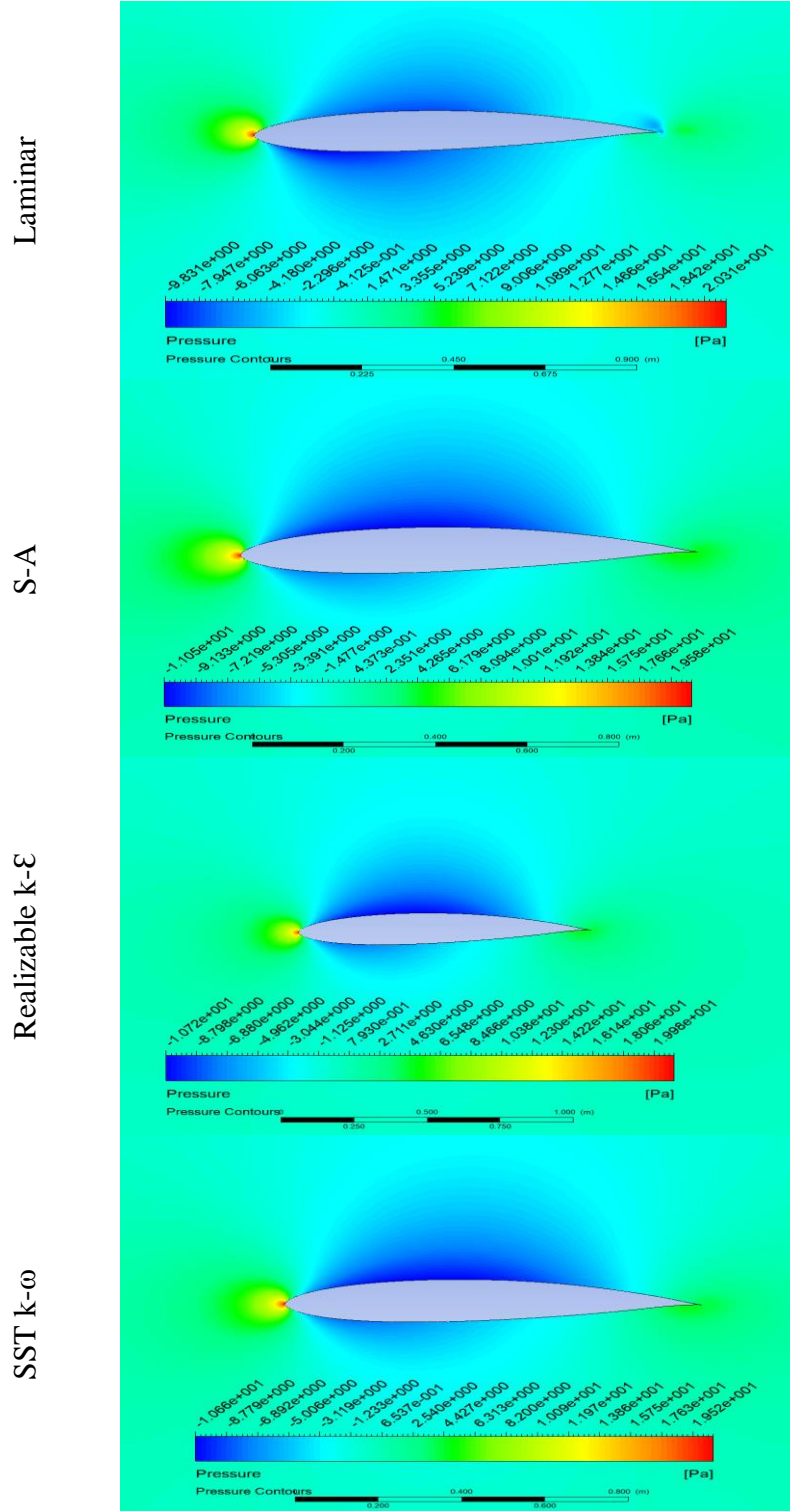
S833



Şekil 6.4. Farklı türbülans modellerine göre S833 aerofoilinin etrafında oluşan basınç dağılımları

Seçilen akış/türbülans modellerine göre S834 aerofoilinin etrafındaki basınç dağılımları da incelenmiştir (Şekil 6.5). Laminer akış koşulları için yapılan analizde en yüksek pozitif basınç 20.31 Pa olurken; en yüksek negatif basınç -9.831 Pa olarak gerçekleşmiştir.

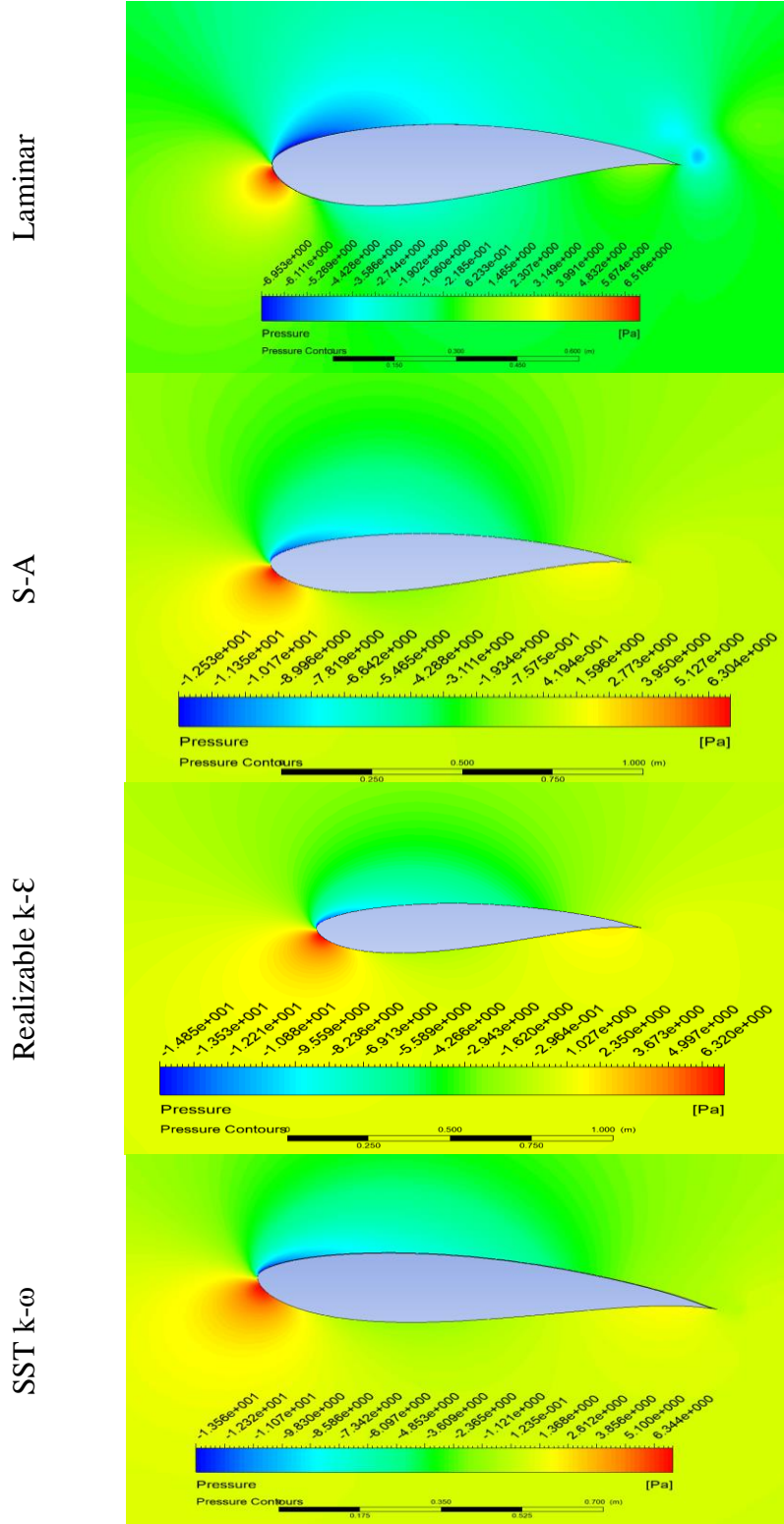
S-A, Realizable **k- ϵ** ve **SST k- ω** türbülans modellerine göre yapılan analizlerde en yüksek pozitif ve negatif basınçların birbirine yakın değerlerde olduğu şekilden görülmektedir. S-A, Realizable **k- ϵ** ve **SST k- ω** türbülans modellerine göre en yüksek pozitif basınçlar sırasıyla 19.58 Pa, 19.98 Pa ve 19.52 Pa; en yüksek negatif basınçlar ise -11.05 Pa, -10.72 Pa ve -10.66 Pa olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 6.5. Farklı türbülans modellerine göre S834 aerofoilinin etrafında oluşan basınç dağılımları

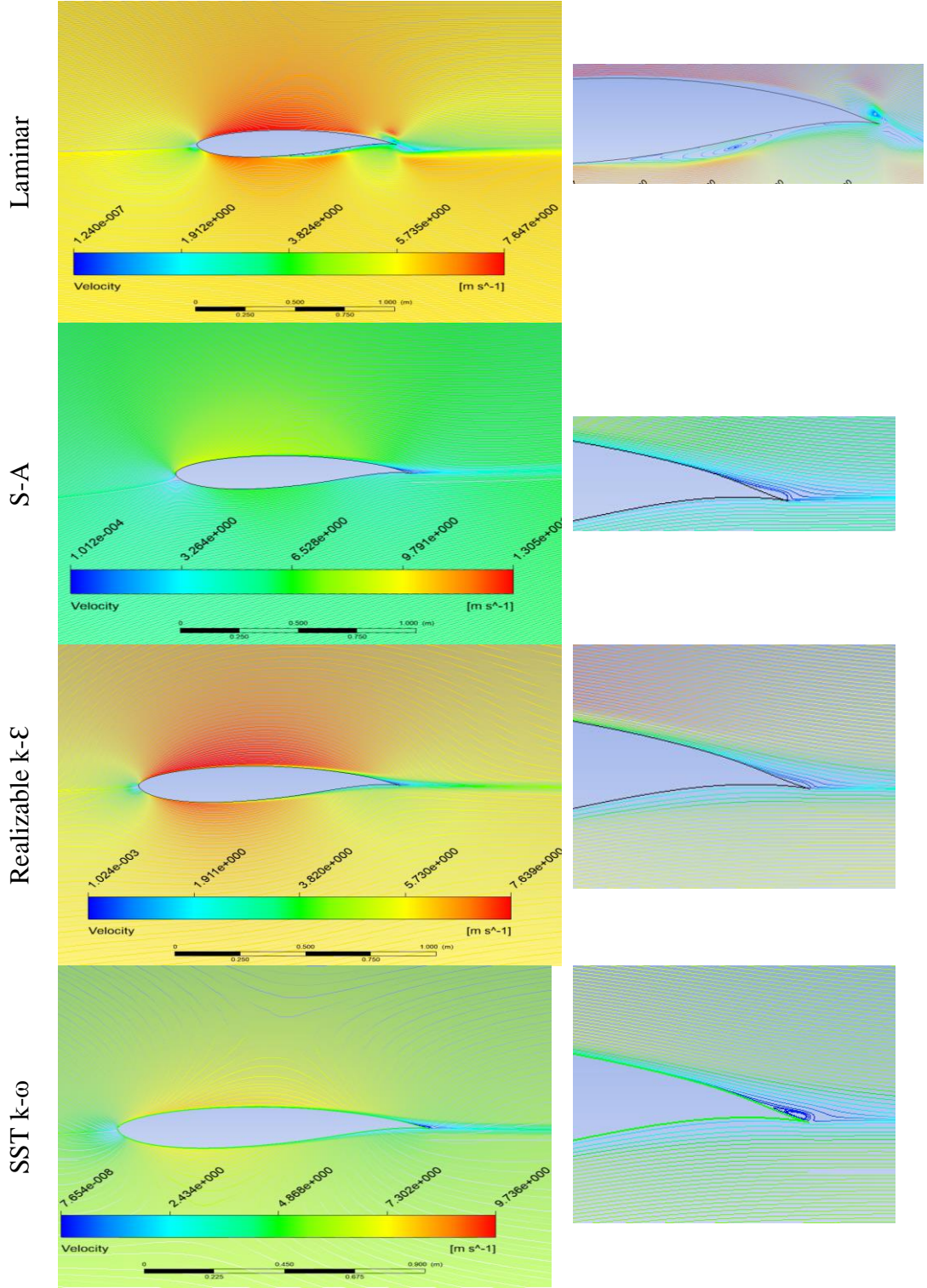
Seçilen akış/türbülans modellerine göre S835 aerofoilinin etrafında oluşan basınçlar Şekil 6.6'da verilmiştir. Aerofoillerin alt yüzeyinin hücum kenarına yakın kısmında en yüksek pozitif basınçların; üst yüzeyinin hücum kenarına yakın kısımlarında ise en yüksek negatif basınçların olduğu şekilden görülebilmektedir. Laminar akış koşullarında en yüksek pozitif basınç 6.516 Pa, en yüksek negatif basınç ise -6.953 Pa olarak belirlenmiştir.

S-A, Realizable **k- ϵ** ve SST **k- ω** türbülans modelleri esas alınarak yapılan analizlerde en yüksek pozitif ve negatif basınçların birbirine yakın değerlerde olduğu şekilden görülebilmektedir. S-A, Realizable **k- ϵ** ve SST **k- ω** türbülans modellerine göre en yüksek pozitif basınçlar sırasıyla, 6.304 Pa, 6.32 Pa ve 6.344 Pa; en yüksek negatif basınçlar ise -1.253 Pa, -1.485 Pa ve -1.356 Pa olarak belirlenmiştir.



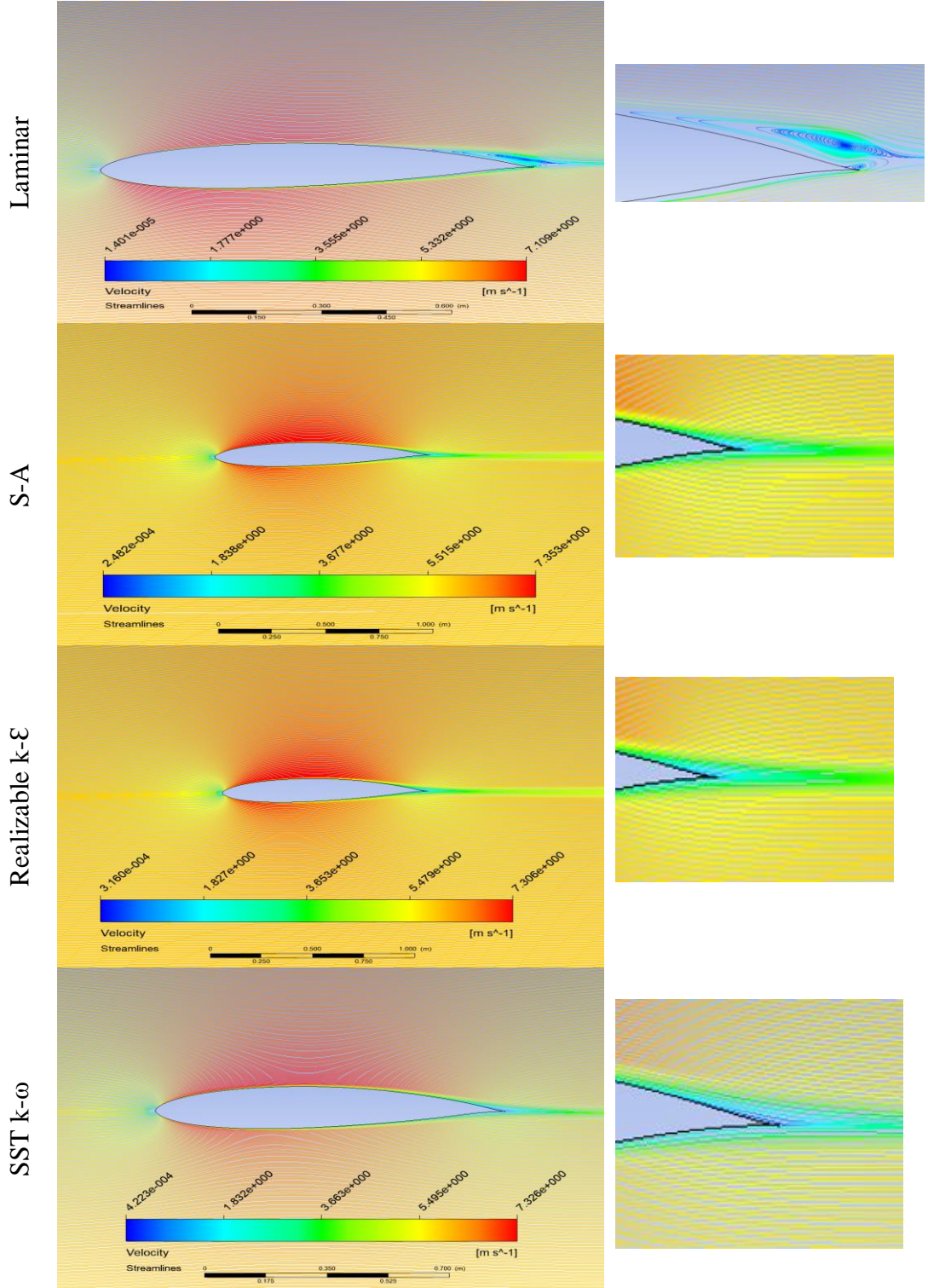
Şekil 6.6. Farklı türbülans modellerine göre S835 aerofoilinin etrafında oluşan basınç dağılımları

Aerofoillerin aerodinamik performansının değerlendirilmesi amacıyla yapılan analizler sonucunda aerofoillerin etrafındaki rüzgar hızları da belirlenmiştir. Seçilen türbülans modellerine göre S833 aerofoilin etrafındaki rüzgar hızları Şekil 6.7’de verilmiştir. Şekilde yüksek rüzgar hızları kırmızı, düşük rüzgar hızları ise mavi renkle gösterilmiştir. Laminer akış koşulları esas alındığında; aerofoilin üst yüzeyinde en yüksek rüzgar hızlarının, firar kenarında ise en düşük rüzgar hızlarının hatta girdap akımlarının oluştuğu görülmektedir.

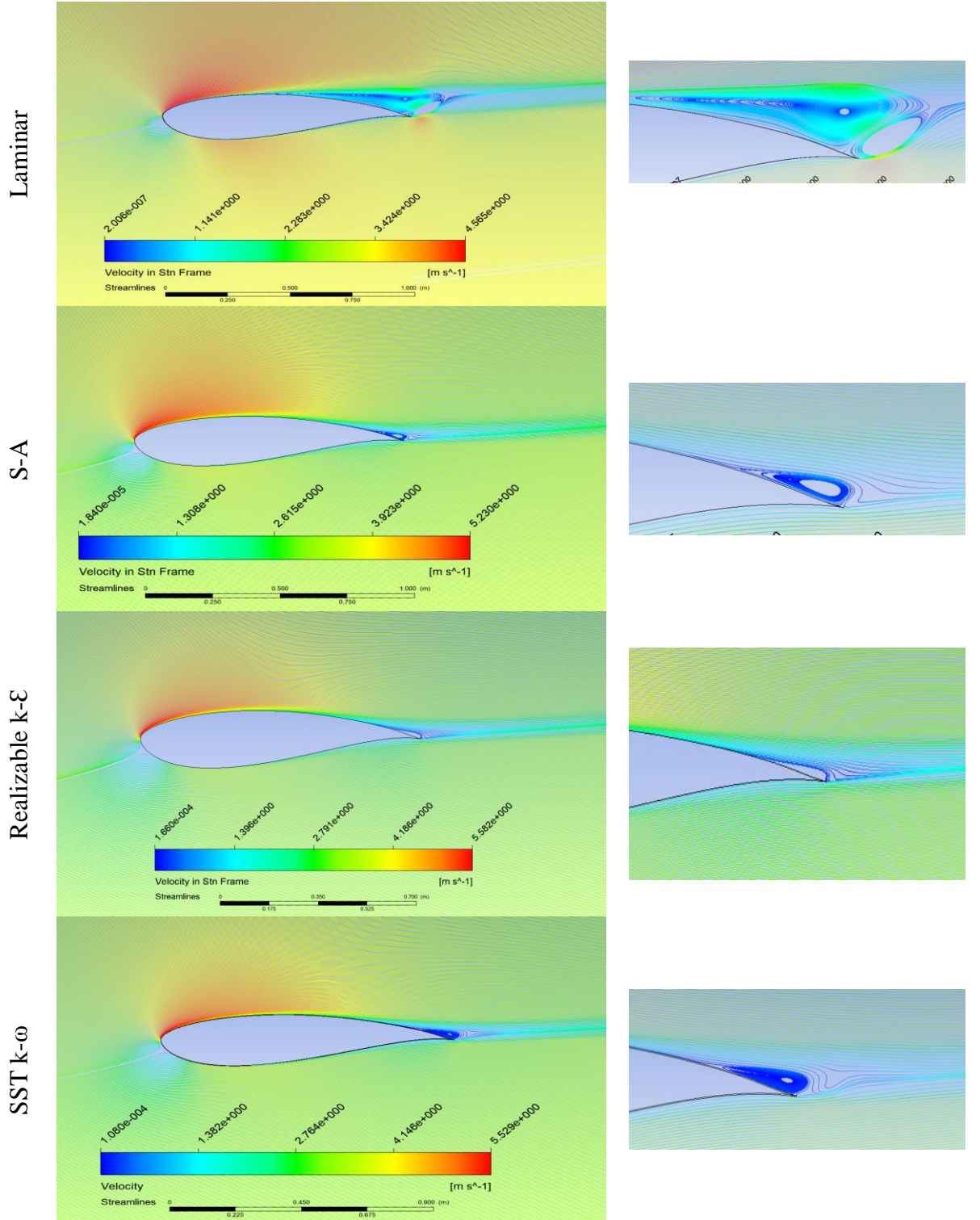


Şekil 6.7. Farklı türbülans modellerine göre S833 aerofoilinin etrafında oluşan rüzgar hızları

S834



Şekil 6.8. Farklı türbülans modellerine göre S834 aerofoilinin etrafında oluşan rüzgar hızları

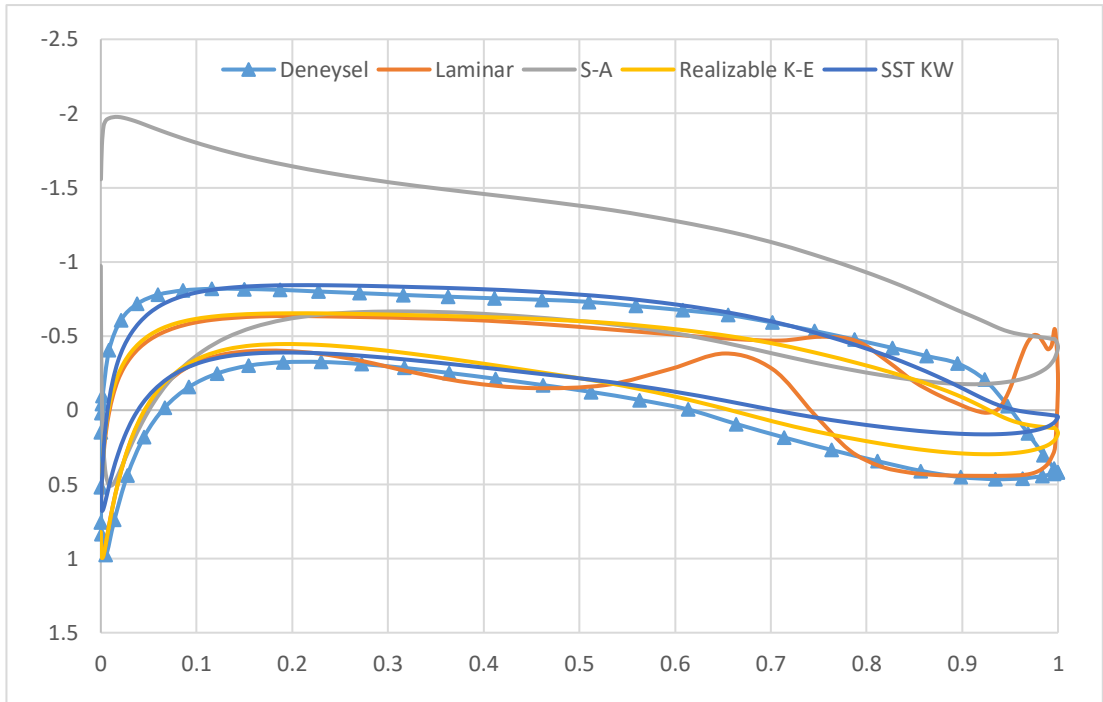


Şekil 6.9. Farklı türbülans modellerine göre S835 aerofoilin etrafında oluşan rüzgar hızları

Aerofoillerin aerodinamik performans analizlerinin doğrulanması ve en uygun türbülans modelinin bulunabilmesi amacıyla aerofoilin etrafındaki basınç katsayıları belirlenmiş ve literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 6.10'da

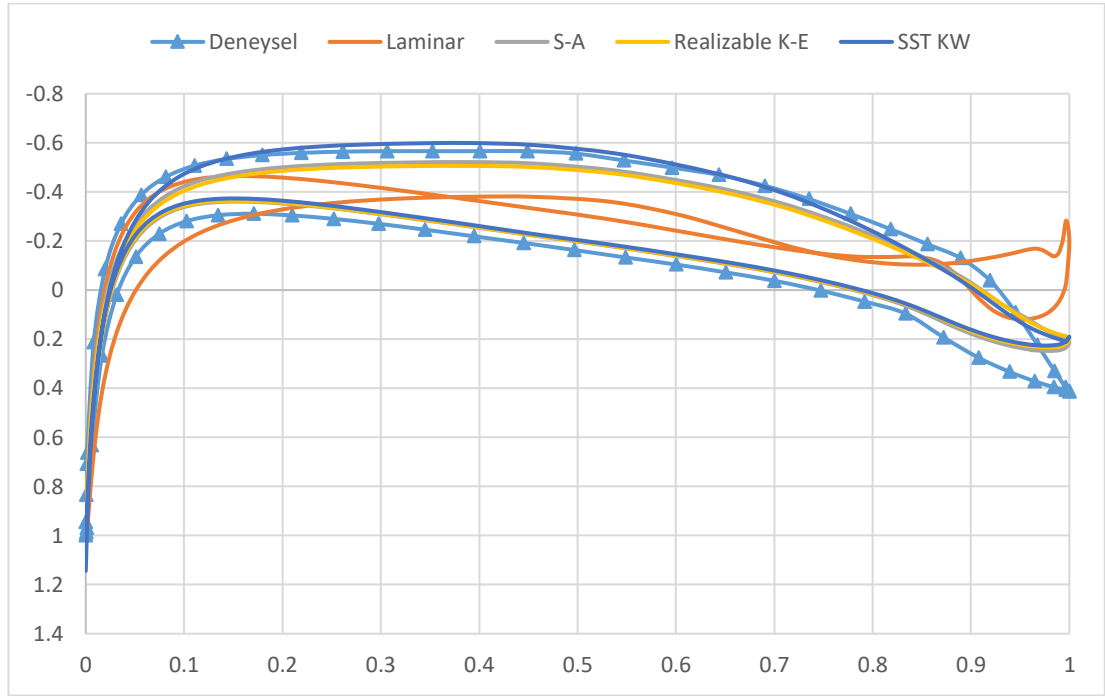
seçilen akış/türbülans modelleri esas alınarak belirlenen basınç katsayıları ile deneysel basınç katsayıları verilmiş olup şekildeki negatif basınç katsayıları aerofoilin üst yüzeyine, pozitif ve düşük değerlerdeki negatif basınç katsayıları ise alt yüzeyine aittir.

Şekilden Laminer akış koşulları ve S-A türbülans modelleri için belirlenen basınç katsayılarının deneysel değerlerden farklı olduğu görülmektedir. Realizable **k-ε** ve **SST k-ω** türbülans modellerine ait basınç katsayılarının deneysel verilerle uyumlu olduğu belirlenmiş olup deneysel verilere en uygun türbülans modelinin **SST k-ω** türbülans modeli olduğu şekilden görülmektedir. Ancak **SST k-ω** türbülans modeli aerofoilin firar kenarındaki basınç katsayılarının deneysel sonuçlardan farklı olduğu görülmekte olup bu durumun ise türbülans modelinin eksiklik/sınırlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



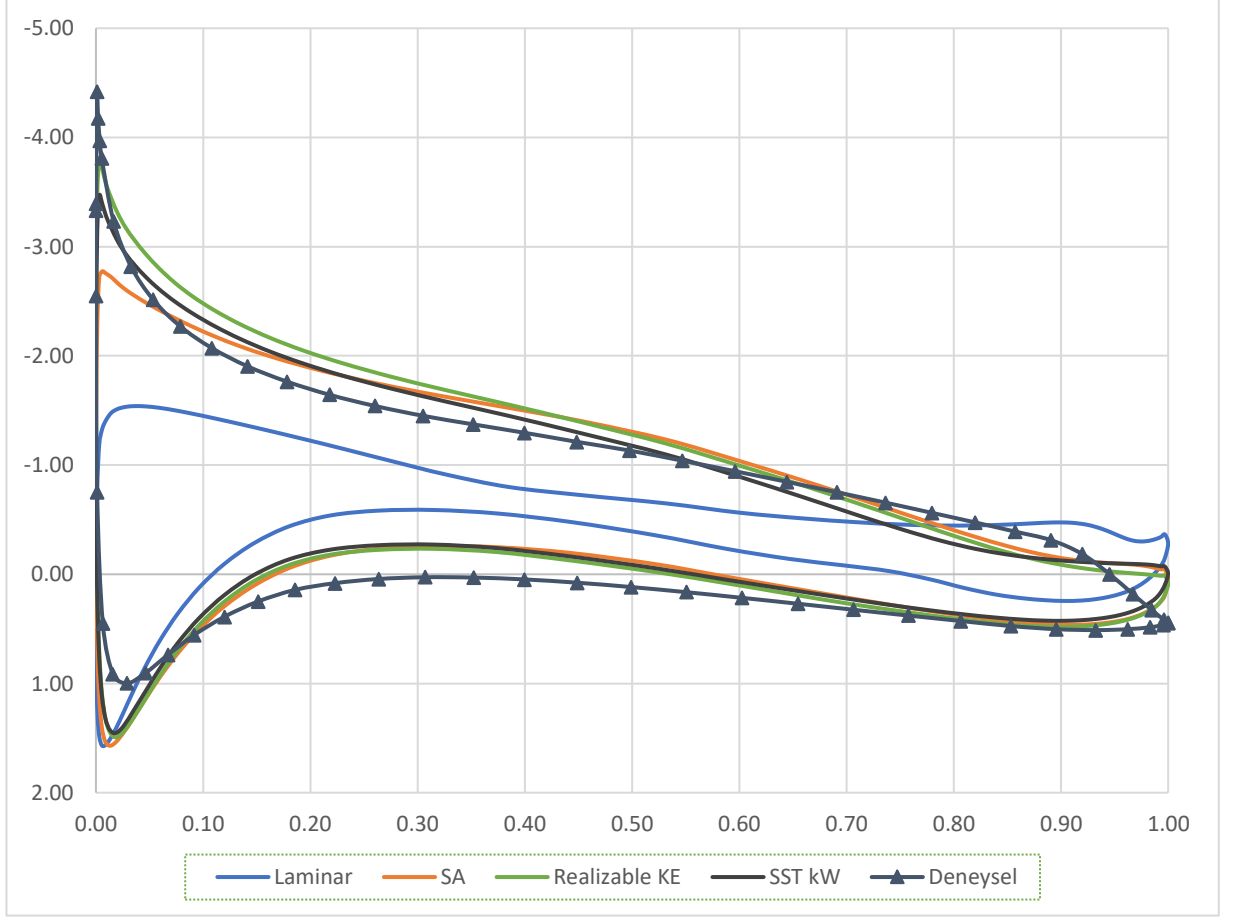
Şekil 6.10. S833 aerofoilin farklı türbülans modellerine göre basınç katsayısı

Seçilen akış/türbülans modellerine göre belirlenen S834 aerofoilinin etrafındaki basınç katsayıları ve literatürdeki deneysel basınç katsayıları Şekil 6.11’de verilmiştir. S-A, Realizable $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$ türbülans modellerine ait basınç katsayılarının aerofoilin firar kenarı haricinde benzer bir davranış gösterdiği şekilden görülebilmektedir. Firar kenarındaki farklılık durumunun türbülans modellerinin eksiklik/sınırlamalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sözü edilen türbülans modelleri arasında deneysel basınç katsayılarına en yakın değerlerin SST $k-\omega$ türbülans modeline ait olduğu da şekilden gözlemlenebilmektedir.



Şekil 6.11. S834 aerofoilinin farklı türbülans modellerine göre basınç katsayısı

Seçilen akış/türbülans modellerine göre belirlenen S835 aerofoilinin etrafındaki basınç katsayıları ve literatürdeki deneysel basınç katsayıları Şekil 6.12’de verilmiştir. S-A, Realizable $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$ türbülans modellerine göre belirlenen basınç katsayılarının aerofoilin firar kenarı haricindeki kısımlarda deneysel verilerle benzer davranış gösterdiği şekilden gözlemlenebilmektedir. Aerofoilin firar kenarındaki farklılığın da yine türbülans modelinin eksiklik/sınırlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Türbülans modellerine ait basınç katsayıları incelendiğinde deneysel verilere en yakın değerlerin SST $k-\omega$ türbülans modeline ait olduğu da şekilden görülebilmektedir.

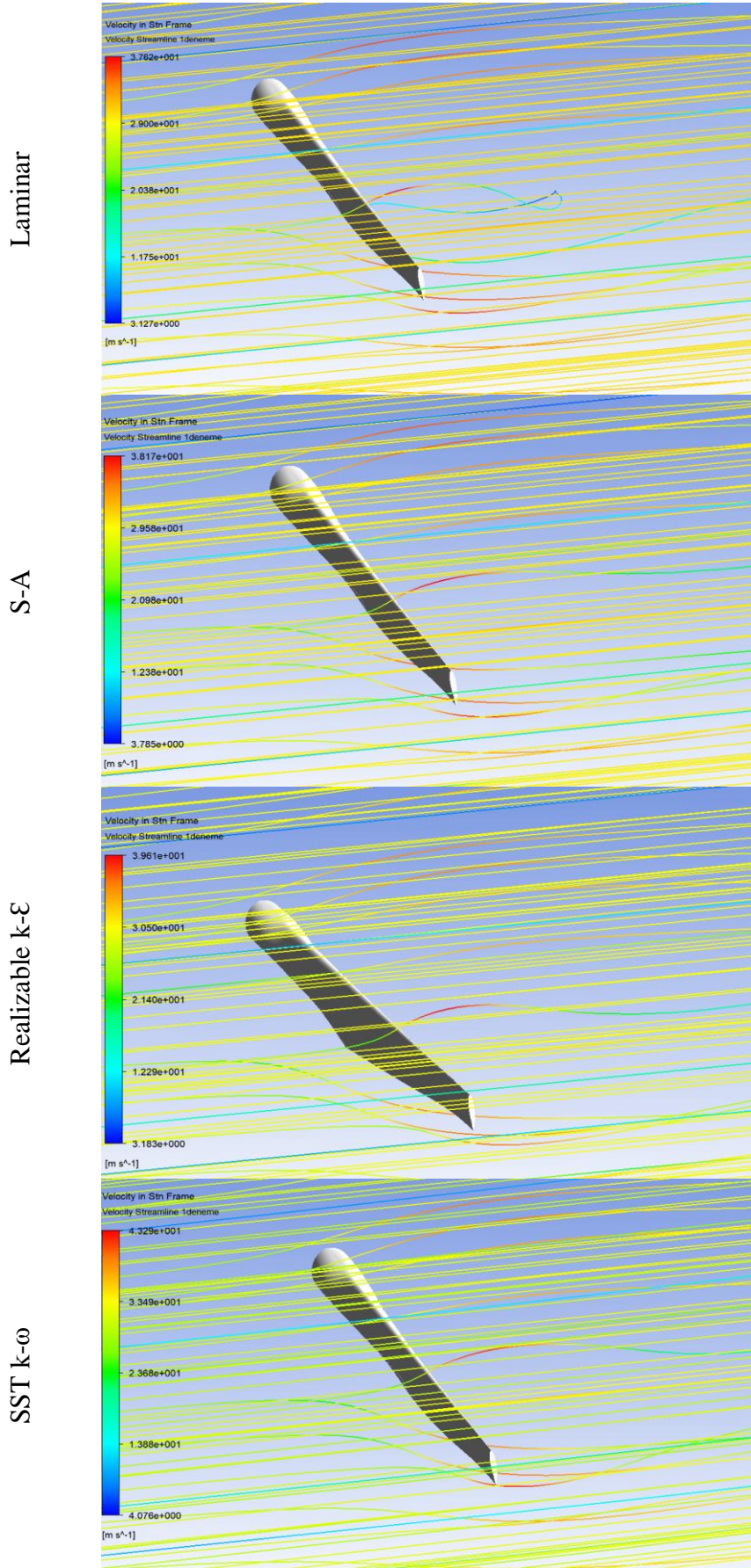


Şekil 6.12. S835 aerofoilinin farklı türbülans modellerine göre basınç katsayısı

6.5.2. Kanadın Aerodinamik Performansının Değerlendirilmesi

Seçilmiş akış/türbülans modelleri için 30 m/s'lik rüzgar hızında yapılan analizler sonucunda belirlenmiş olan kanat etrafındaki hava hareketi/rüzgar hızları Şekil 6.13'de verilmiştir. Şekildeki rüzgar hızları akım iplikcikleri şeklinde verilmiş olup akım iplikcik rengi rüzgar hız büyüklüğünü göstermektedir. Kırmızı renkli akım iplikcikleri yüksek rüzgar hızlarını gösterirken, mavi renkli iplikcikler ise düşük seviyedeki rüzgar hızlarını temsil etmektedir.

Farklı akış/türbülans modelleri esas alındığında kanat etrafındaki rüzgar hızlarında farklılıklar olduğu şekilden görülebilmekte olup Laminar akış esas alındığında kanat etrafındaki rüzgar hızları 37.62 ms ile 3.127 m/s arasında değişirken, **S-A** türbülans modeline için 38.17 m/s ile 3.785 m/s, **Realizable k- ϵ** türbülans modeli için 39.61 m/s ile 3.183 m/s ve **SST k- ω** türbülans modeli için ise 43.29 m/s ile 4.078 m/s arasında değişmektedir.

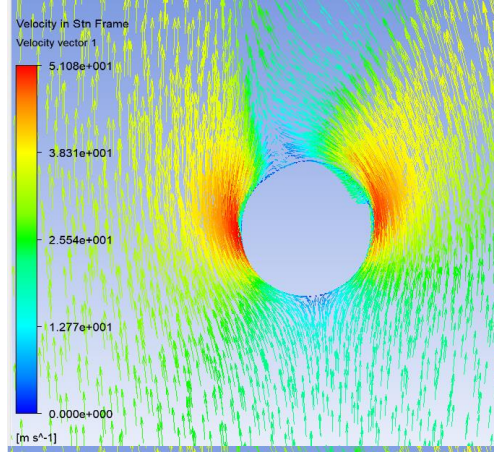


Şekil 6.13. 30 m/s'lik Rüzgar Hızında Kanadın Etrafında Oluşan Hız Dağılımı

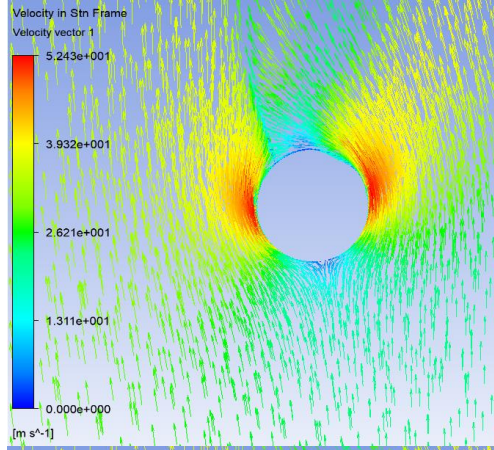
Kanadın etrafındaki rüzgar hızları Şekil 6.13'den tam olarak belirlenemediğinden kanadın belirli uzunluktaki noktalarından ($r/R=0.1, 0.2, 0.5, 0.75$ ve 0.95 m) alınan kesitler üzerinde kanat kesiti etrafındaki rüzgar hızları verilmiştir. Seçilmiş akış/türbülans modelleri esas alınarak belirlenmiş olan kanadın 0.1 m uzunluğundaki kesit etrafındaki rüzgar hızları Şekil 6.14'de verilmiştir. Şekilden kanat kesiti etrafındaki havanın hareketi görülebilmekte olup kanat etrafındaki rüzgar hızları her bir rengin belirli bir büyüklüğe karşılık geldiği rüzgar hız vektörleri şeklinde verilmiştir. Şekildeki kırmızı renkli vektörler yüksek rüzgar hızlarını gösterirken, mavi renkli vektörler ise düşük rüzgar hızlarını temsil etmektedir. Seçilen akış/türbülans modelleri esas alınarak yapılan analizlerle kanadın hücum ve firar kenarlarına ait kesitlerde yüksek rüzgar hızlarının olduğu görülmektedir.

Seçilmiş akış/türbülans modelleri esas alınarak belirlenen, kanadın 0.2 m uzunluğundaki kesiti etrafındaki rüzgar hızları Şekil 6.15'de verilmiştir. Yapılan analizler yine 30 m/s'lik rüzgar hızında gerçekleştirilmiştir. Şekilden kanat kesitinin etrafındaki hava hareketi ve rüzgar hızlarının büyüklükleri farklı renklerle gösterilmiş olup kırmızı renkli vektörler yüksek rüzgar hızlarını; mavi renkli vektörler ise düşük rüzgar hızlarını temsil etmektedir. Farklı akış/türbülans modelleri için yapılan analizlerde kanat kesiti etrafında farklı büyüklüklere sahip rüzgar hızlarının olduğu şekilden görülebilmektedir. Ayrıca aerofoilin üstündeki kısımda türbülans akımlarının olduğu da gözlemlenebilmektedir.

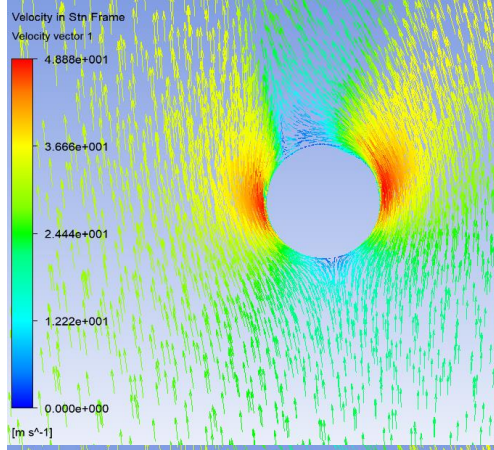
Laminar



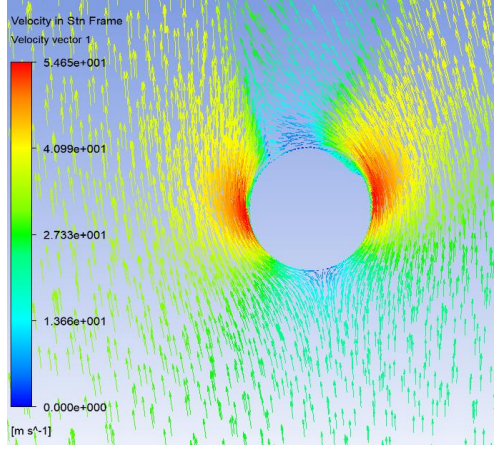
S-A



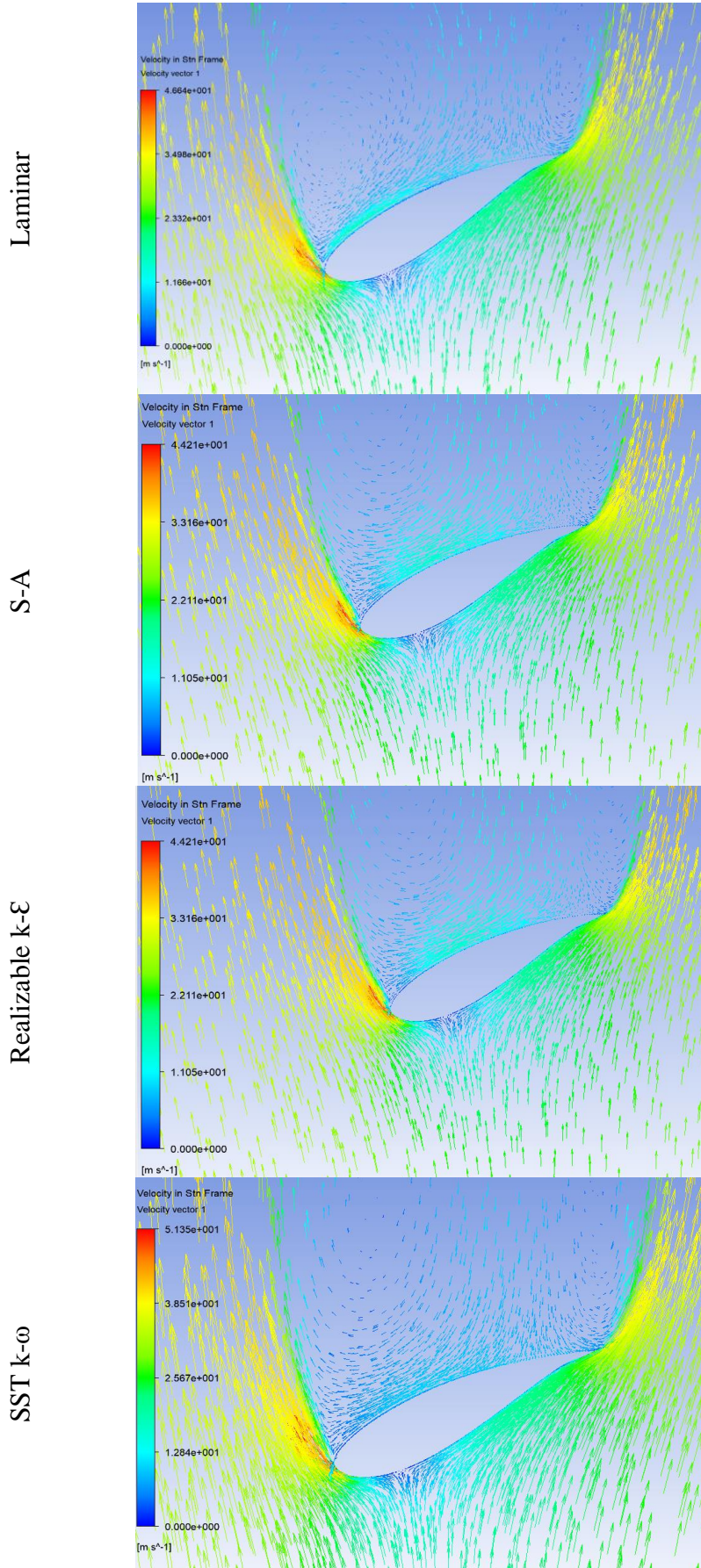
Realizable k-ε



SST k-ω

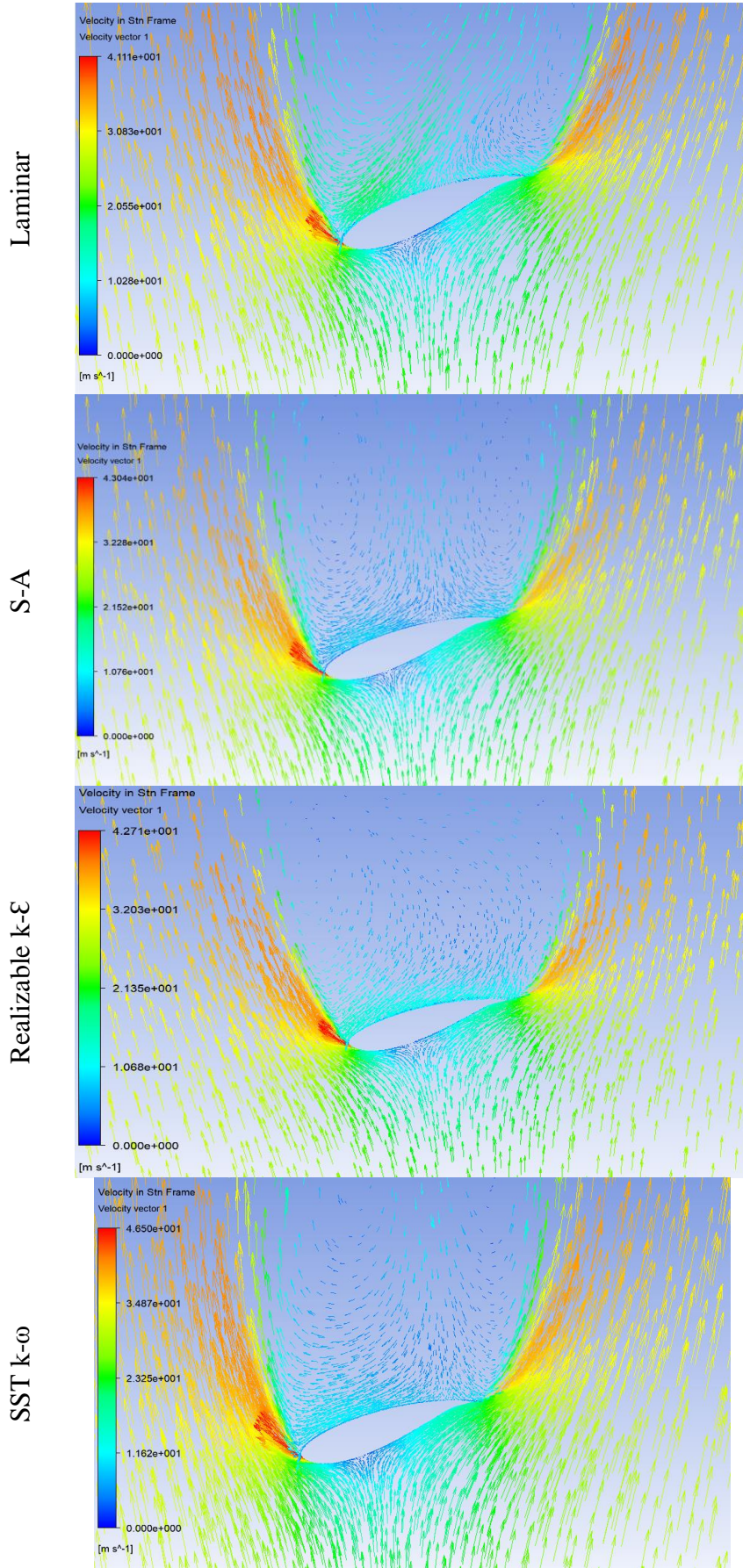


Şekil 6.14. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.1$ kesiti etrafındaki hız dağılımları

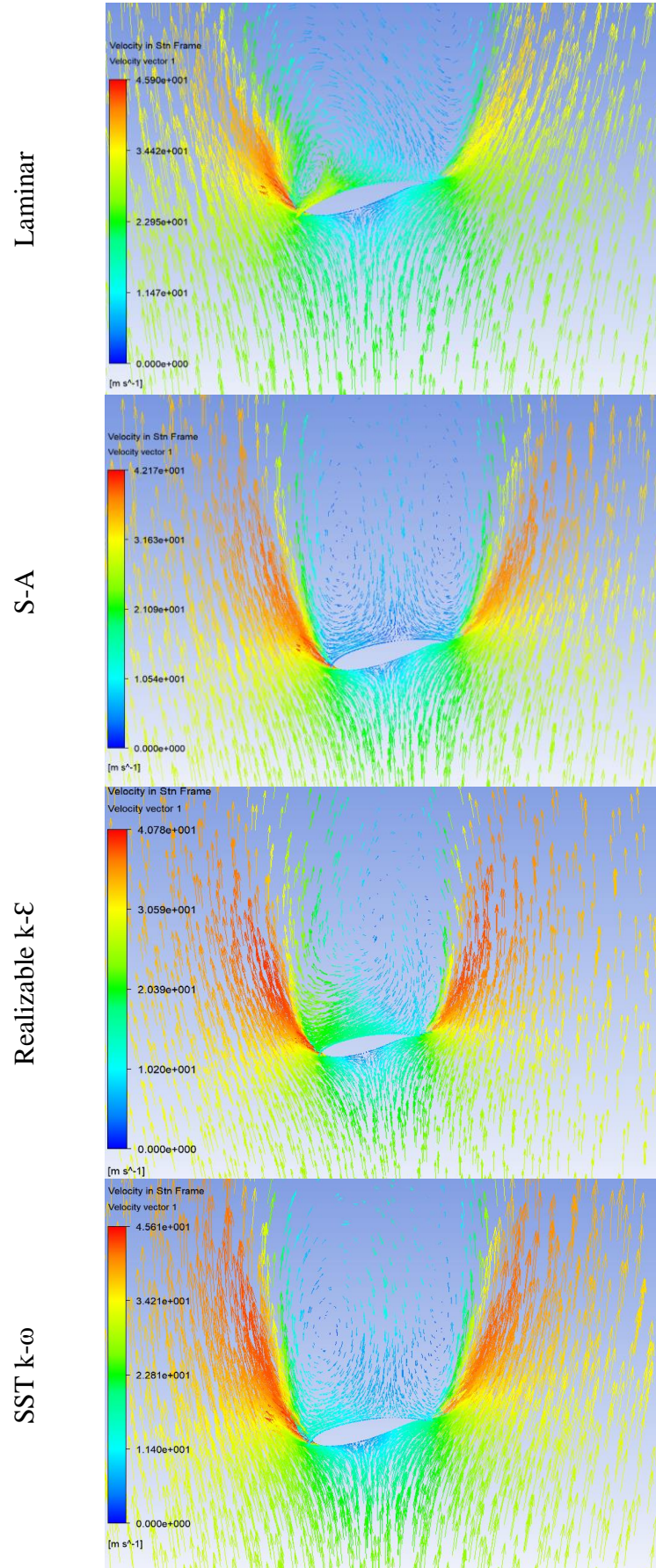


Şekil 6.15. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.2$ kesiti etrafındaki hız dağılımları

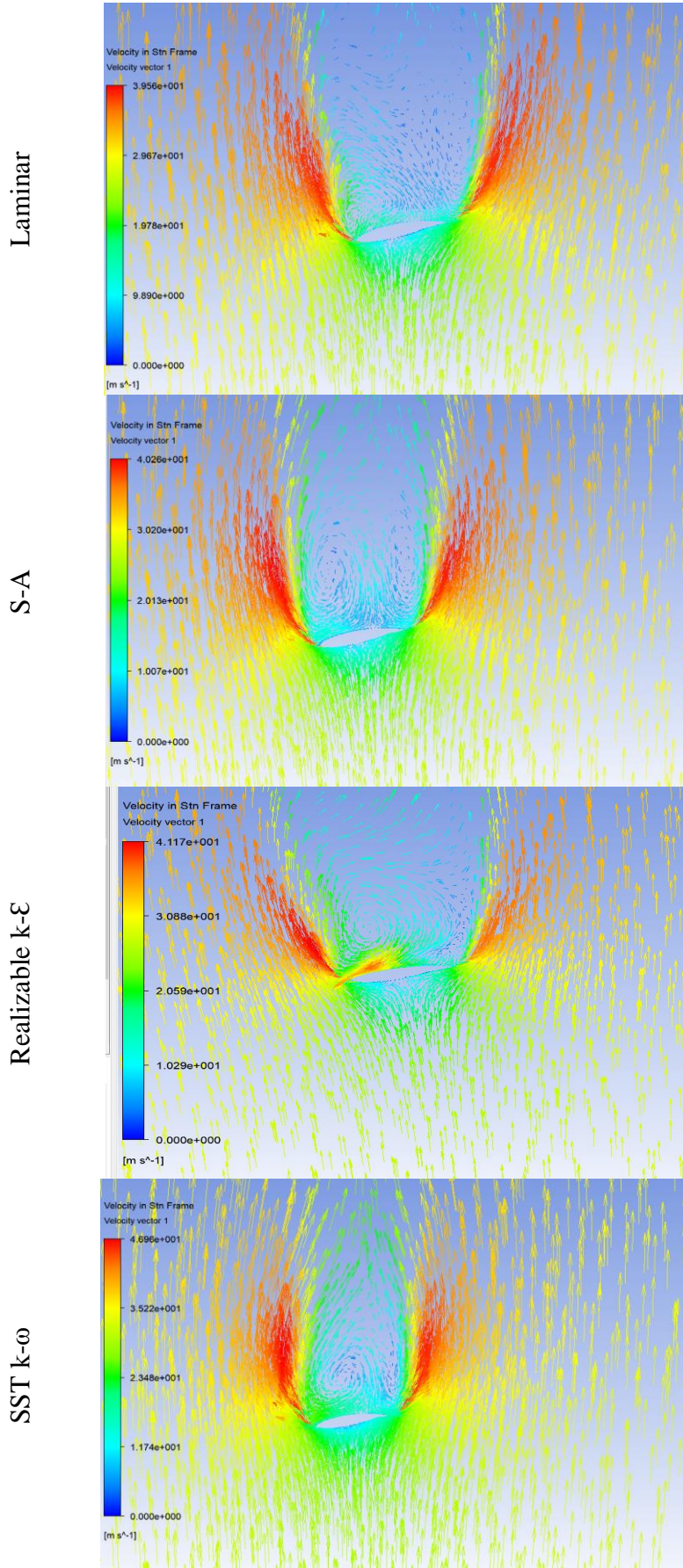
Seçilen akış/türbülans modelleri için kanadın belirlenen konumlarındaki kesitlerinin etrafındaki hava hareketi de incelenmiştir. Kanadın 0.5 m, 0.75 m ve 0.95 m'lik konumlarındaki hava hareketi ve rüzgar hızlarının büyüklükleri sırasıyla Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de sunulmuştur. Kanadın belirlenen konumları etrafındaki hava hareketi incelendiğinde kanadın hücum ve firar kenarlarında yüksek rüzgar hızlarının oluştuğu görülebilmektedir. Kanadın 0.5 m'lik konumda bulunan kanat kesitinden kanat ucuna doğru gidildikçe kanat etrafındaki rüzgar hızlarının arttığı da şekillerden gözlemlenebilmektedir.



Şekil 6.16. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.5$ kesiti etrafındaki hız dağılımları



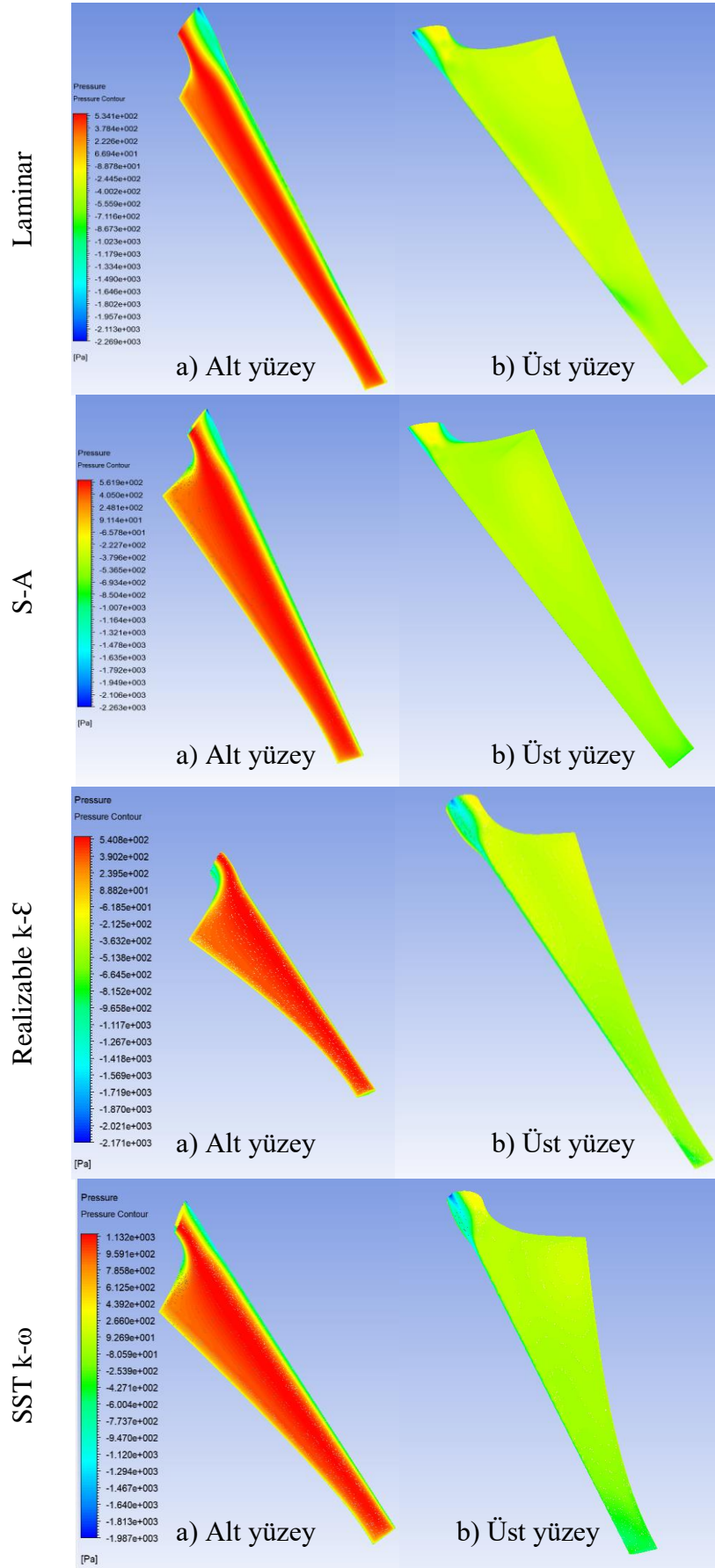
Şekil 6.17. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.75$ kesiti etrafındaki hız dağılımları



Şekil 6.18. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.95$ kesiti etrafındaki hız dağılımları

30 m/s'lik rüzgar hızında seçilmiş akış/türbülans modelleri için yapılan analizlerle belirlenen kanada etki eden basınçlar Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekildeki her bir türbülans modeli için verilen basınç dağılımlarında kanadın üst ve alt yüzeyi ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekildeki her bir renk farklı büyüklükteki basınçları göstermekte olup kırmızı renk ile gösterilen basınçlar yüksek pozitif basınçları; mavi renk ile gösterilen basınçlar ise yüksek negatif basınçları temsil etmektedir.

Farklı akış/türbülans modelleri esas alındığında, kanadın yüzeyine etki eden basınçların farklı büyüklüklerde olduğu gözlemlenebilmektedir. Laminar akış için 53.41 Pa ve -226.9 Pa olan en yüksek pozitif ve negatif basınçların, S-A Türbülans modelinde 56.19 Pa/-226.3 Pa, Realizable k- ϵ türbülans modelinde 54.08 Pa/-217.1 Pa ve SST k ω türbülans modelinde 113.2 Pa/-198.7 Pa olduğu şekilden izlenebilmektedir.



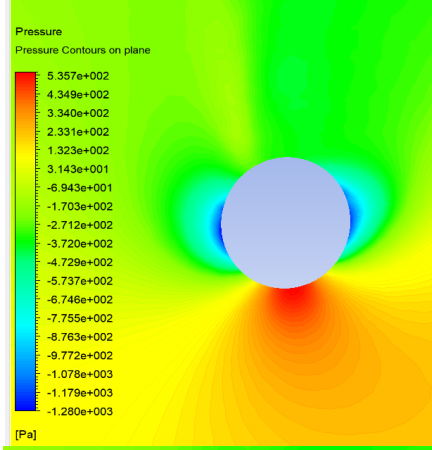
Şekil 6.19. 30 m/s'lik Rüzgar Hızında Kanat Yüzeyinde Etki Eden Basınç Dağılımı

Kanat etrafındaki rüzgar hızları için olduğu gibi, kanat yüzeyine etki eden basınçlar için de Şekil 6.16'da verilen büyüklükler net bir şekilde görülememektedir. Bu nedenle kanadın belirli uzunluğundaki noktalardan ($r/R=0.1$ m, 0.2 m, 0.5 m, 0.75 m ve 0.95 m) alınan kesitler üzerinde kanat kesiti etrafındaki basınçların değişimi incelenmiştir.

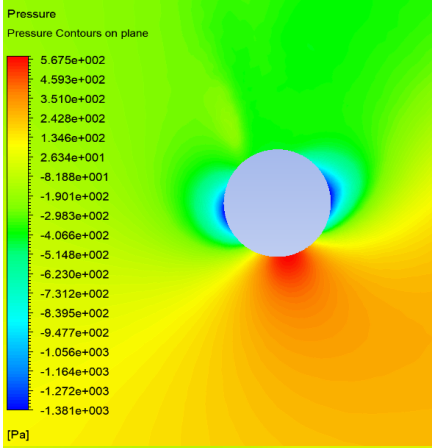
Seçilen akış/türbülans modelleri esas alınarak belirlenmiş olan kanadın 0.1 m uzunluğundaki kesiti etrafındaki basınçlar Şekil 6.20'de verilmiştir. Şekilde kanat kesiti etrafındaki basınçlar basınç değerine göre farklı renklerle gösterilmiş olup en yüksek pozitif basınçlar kırmızı; en yüksek negatif basınçlar ise mavi renk olarak verilmiştir.

Şekildeki basınçlar incelendiğinde kanat kesitinin alt kısmında en yüksek pozitif basınçların, yan kısımlarında ise en yüksek negatif basınçların olduğu gözlemlenebilmektedir. Farklı akış/türbülans modellerine göre benzer türde ancak farklı büyüklüklerde basınçlar oluşmaktadır. SST K- ω türbülans modeline göre en yüksek pozitif ve negatif basınçların sırasıyla 1138.0 Pa ile -980.1 Pa olduğu da şekilden görülmektedir.

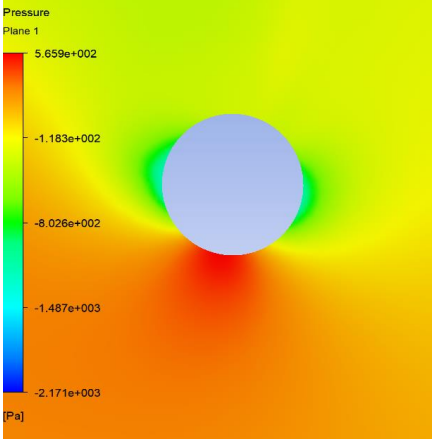
Laminar



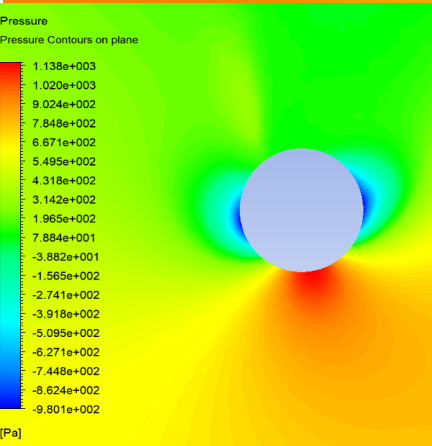
S-A



Realizable k-ε



SST k-ω

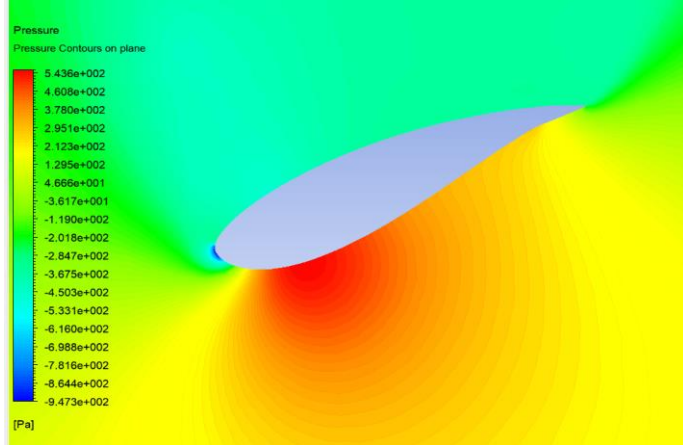


Şekil 6. 20. 30 m/s'lık rüzgar hızında $r/R=0.1$ kesitine etki eden basınçlar

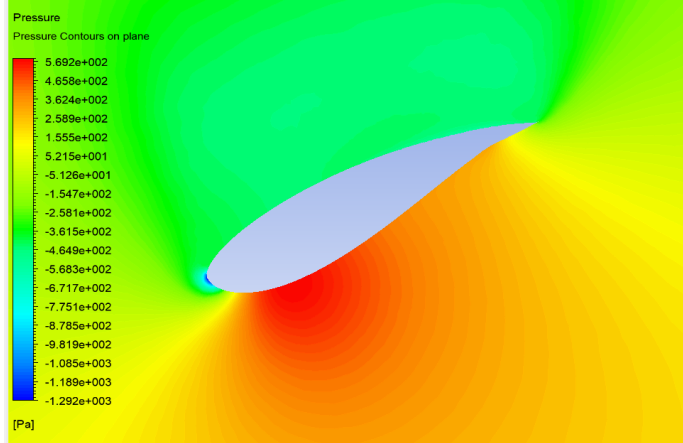
Seçilen akış/türbülans modelleri esas alınarak yapılan analizlerden yararlanılarak kanadın 0.2 m, 0.5 m, 0.75 m ve 0.95 m'lik konumları için aerofoil etrafındaki oluşan basınçlar belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'de sunulmuştur.

Belirlenen konumlardaki basınç dağılımları incelendiğinde kanat kesitinin alt kısımlarında pozitif basınçların, üst kısımlarında ise negatif basınçların olduğu gözlemlenebilmektedir. Kanadın alt yüzeyinde pozitif, üst yüzeyinde ise negatif basınçların oluşması beklenen bir davranış olup bu durum kanattan güç üretimini sağlamaktadır.

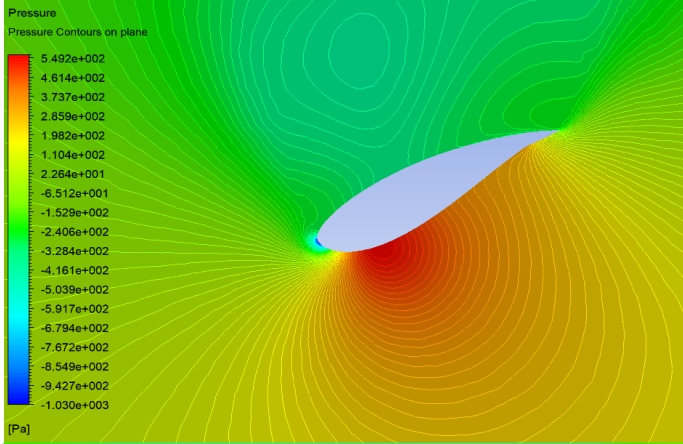
Laminar



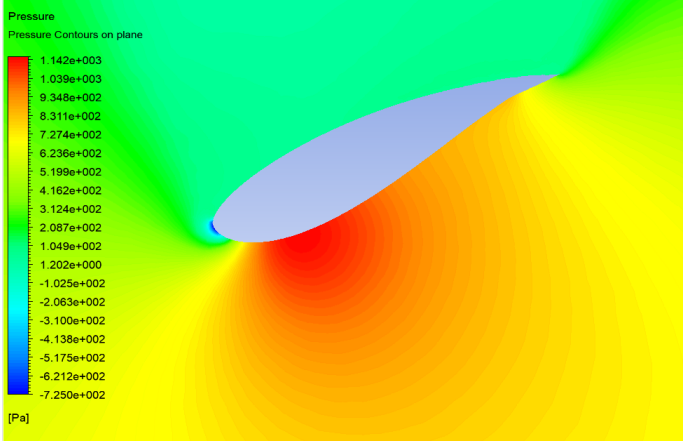
S-A



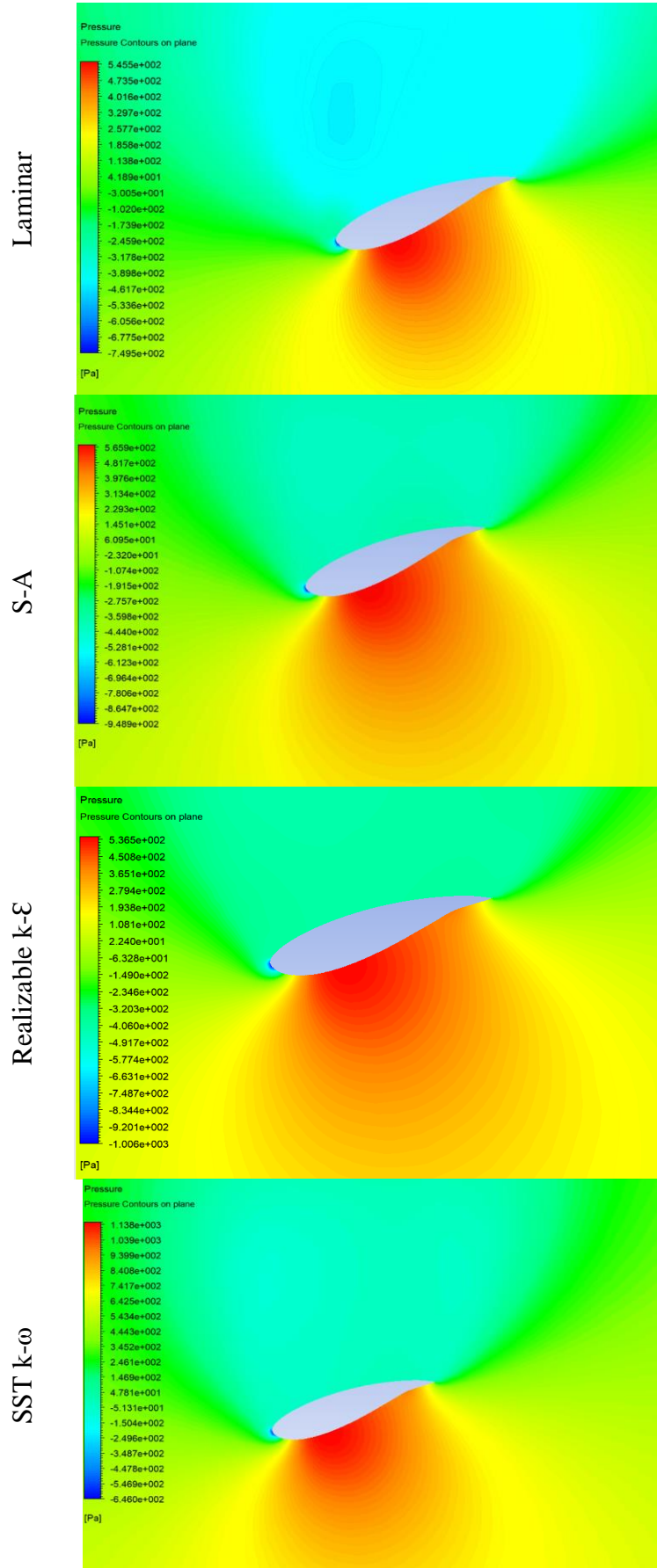
Realizable k-ε



SST k-ω

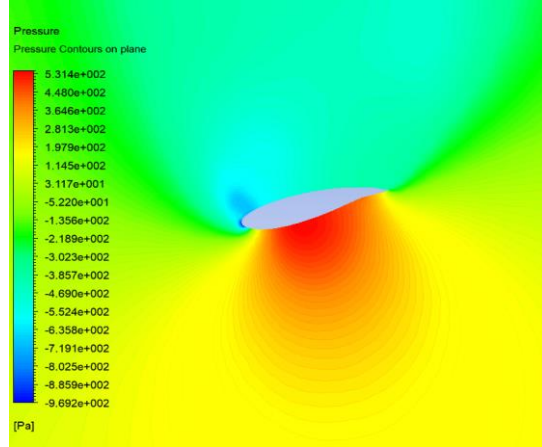


Şekil 6.21. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.2$ kesitine etki eden basınçlar

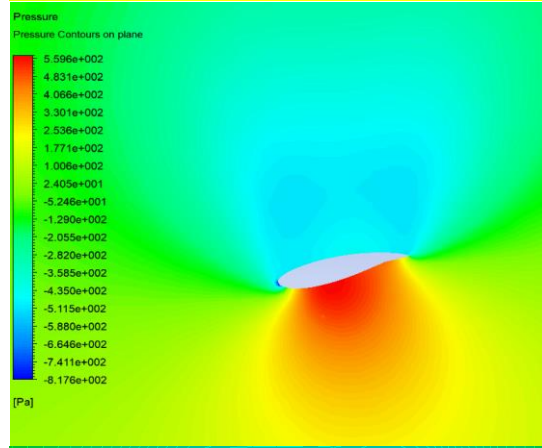


Şekil 6.22. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.5$ kesitine etki eden basınçlar

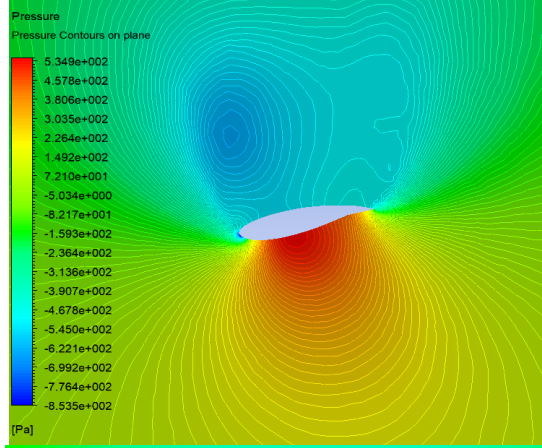
Laminar



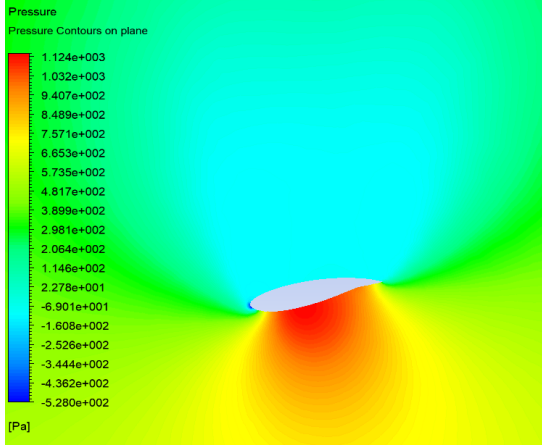
S-A



Realizable k-ε

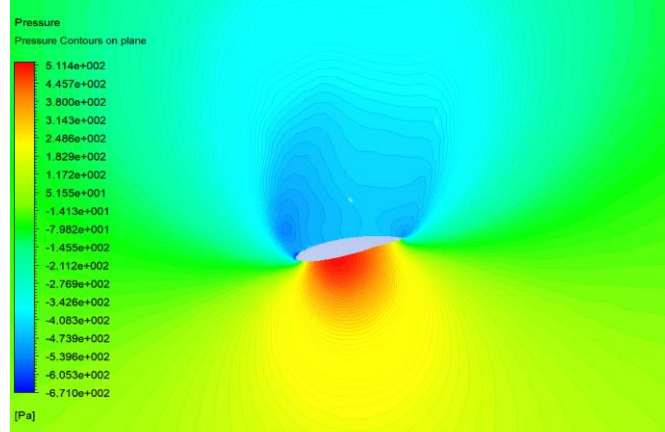


SST k-ω

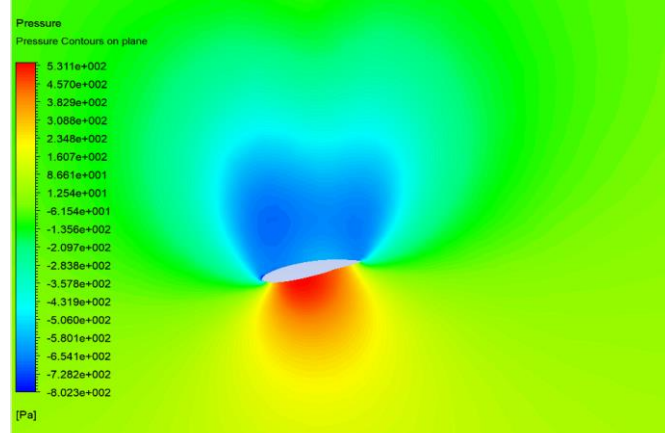


Şekil 6.23. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.75$ kesitine etki eden basınçlar

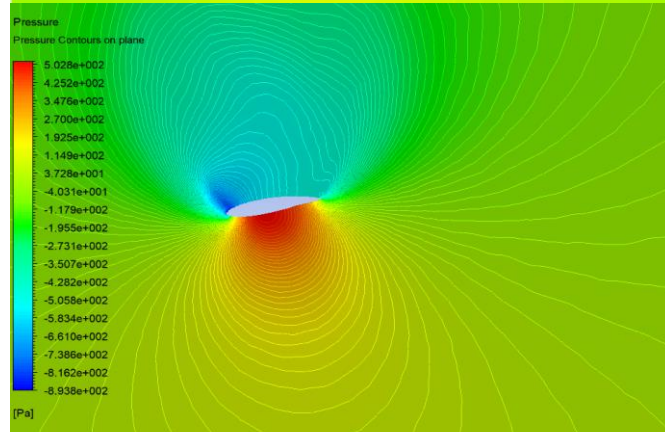
Laminar



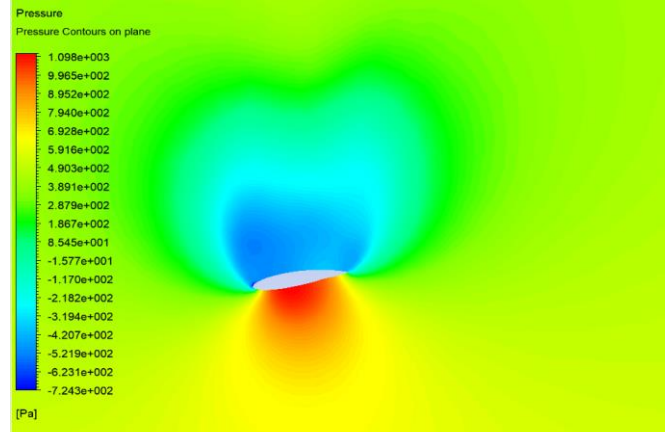
S-A



Realizable k-ε



SST k-ω



Şekil 6.24. 30 m/s'lik rüzgar hızında $r/R=0.95$ kesitine etki eden basınçlar

Yapılan aerofoillerin ve kanadın aerodinamik performans analizleri sonucunda literatürdeki çalışmalarla da uyumlu olarak kanadın aerodinamik performansının değerlendirilebilmesi için en uygun türbülans modelinin SST k- ω türbülans modeli olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle kanadın mekanik davranışı ve tasarım optimizasyonu için kullanılacak olan akışkan-yapı etkileşimi analizlerinde SST k ω türbülans modeli esas alınarak aerodinamik performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.6. Kanadın Mekanik Davranış Analizi ve Optimizasyonu

Önceki kısımlarda kanadın aerodinamik tasarım, performans analizi ve optimizasyonu sonucunda kanadın aerodinamik tasarım parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca Qblade yazılımında yapılan analizlerle de kanadın ön mekanik tasarımı yapılarak kanat uzunluğu boyunca kanadın et kalınlıkları belirlenmiştir. Bu bölümde ise kanadın ön mekanik tasarım parametreleri kullanılarak akışkan-yapı etkileşimi analizleri yapılmış ve kanadın maksimum zorlanma koşullarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Daha sonra ise akışkan-yapı etkileşim modeline Response Surface Optimization Modülü eklenerek kanadın tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Response Surface Optimization işleminde kanadın belirlenen tasarım değişkenleri ve mekanik davranışı dikkate alınarak optimizasyon yapılmaktadır. Bu kapsamda kanadın tasarım optimizasyonu için belirlenen tasarım noktaları ve bu tasarım noktalarında kanadın mekanik davranışı Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Kanadın tasarım optimizasyonu için belirlenen tasarım noktaları

Et Kalınlığı 0-0.1 (m)	Et Kalınlığı 0.1-0.2 (m)	Et Kalınlığı 0.2-0.75 (m)	Et Kalınlığı 0.75- 0.95 (m)	Eşdeğer Gerilme (Von Mises) (Pa)	Toplam Şekil Değişimi (m)	Tsai- Wu Kriteri	Ağırlık (0-01) (kg)	Ağırlık (01-02) (kg)	Ağırlık (02- 075) (kg)	Ağırlık 075-095 (kg)
0.0105	0.0105	0.008	0.006	4.16E+07	0.002614	1.43E-07	0.40212	0.544711	2.01955	0.26878
0.006	0.0105	0.008	0.006	1.16E+08	0.002829	3.96E-07	0.22978	0.544711	2.01955	0.26878
0.015	0.0105	0.008	0.006	2.29E+07	0.002528	7.26E-08	0.57445	0.544711	2.01955	0.26878
0.0105	0.006	0.008	0.006	4.16E+07	0.002916	1.43E-07	0.40212	0.311264	2.01955	0.26878
0.0105	0.015	0.008	0.006	4.16E+07	0.002501	1.43E-07	0.40212	0.778159	2.01955	0.26878
0.0105	0.0105	0.006	0.006	4.16E+07	0.003214	1.42E-07	0.40212	0.544711	1.514663	0.26878
0.0105	0.0105	0.01	0.006	4.16E+07	0.002249	1.43E-07	0.40212	0.544711	2.524438	0.26878
0.0105	0.0105	0.008	0.004	4.16E+07	0.002735	1.42E-07	0.40212	0.544711	2.01955	0.179186
0.0105	0.0105	0.008	0.008	4.16E+07	0.002558	1.43E-07	0.40212	0.544711	2.01955	0.358373
0.007331	0.007331	0.006592	0.004592	7.95E+07	0.003369	2.77E-07	0.28076	0.380316	1.664005	0.205688
0.013669	0.007331	0.006592	0.004592	2.67E+07	0.00318	8.63E-08	0.52348	0.380316	1.664005	0.205688
0.007331	0.013669	0.006592	0.004592	7.95E+07	0.003104	2.77E-07	0.28076	0.709107	1.664005	0.205688
0.013669	0.013669	0.006592	0.004592	2.67E+07	0.002916	8.64E-08	0.52348	0.709107	1.664005	0.205688
0.007331	0.007331	0.009408	0.004592	7.95E+07	0.00271	2.77E-07	0.28076	0.380316	2.375095	0.205688
0.013669	0.007331	0.009408	0.004592	2.67E+07	0.002518	8.66E-08	0.52348	0.380316	2.375095	0.205688
0.007331	0.013669	0.009408	0.004592	7.95E+07	0.002453	2.77E-07	0.28076	0.709107	2.375095	0.205688
0.013669	0.013669	0.009408	0.004592	2.67E+07	0.002263	8.67E-08	0.52348	0.709107	2.375095	0.205688
0.007331	0.007331	0.006592	0.007408	7.95E+07	0.003257	2.77E-07	0.28076	0.380316	1.664005	0.331872
0.013669	0.007331	0.006592	0.007408	2.67E+07	0.003068	8.66E-08	0.52348	0.380316	1.664005	0.331872
0.007331	0.013669	0.006592	0.007408	7.95E+07	0.00299	2.77E-07	0.28076	0.709107	1.664005	0.331872
0.013669	0.013669	0.006592	0.007408	2.67E+07	0.002803	8.67E-08	0.52348	0.709107	1.664005	0.331872
0.007331	0.007331	0.009408	0.007408	7.95E+07	0.002591	2.77E-07	0.28076	0.380316	2.375095	0.331872
0.013669	0.007331	0.009408	0.007408	2.67E+07	0.002399	8.69E-08	0.52348	0.380316	2.375095	0.331872
0.007331	0.013669	0.009408	0.007408	7.95E+07	0.002332	2.78E-07	0.28076	0.709107	2.375095	0.331872
0.013669	0.013669	0.009408	0.007408	2.67E+07	0.002143	8.69E-08	0.52348	0.709107	2.375095	0.331872

Response Surface Optimization işlemiyle tasarım noktalarındaki mekanik davranış göstergeleri dikkate alınarak en uygun tasarım noktaları belirlenebilmektedir. Şekil 6.25’de Response Surface Optimization işlemiyle belirlenen optimum tasarım parametreleri verilmiştir.

Candidate Points					
	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 2 (verified)	Candidate Point 3	Candidate Point 3 (verified)
P26 - 0-01 Thickness (m)	0.01		0.015		0.01
P27 - 01-02 Thickness (m)	0.006		0.006		0.008
P28 - 02-075 Thickness (m)	0.006		0.006		0.006
P30 - 075-095 Thickness (m)	0.004		0.004		0.004
P11 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	★★ 4.5313E+07	★★ 2.2929E+07	★★ 2.2935E+07	★★ 4.5315E+07	★★ 4.5321E+07
P12 - Total Deformation Maximum (m)	×× 0.0036055	×× 0.0035008	×× 0.0035568	×× 0.0034515	×× 0.0034718
P13 - User Defined Result 2 Maximum	★ 1.5579E-07	★★ 7.2233E-08	★★ 7.2187E-08	★ 1.5582E-07	★ 1.5582E-07
P15 - 0-01 Mass (kg)	= 0.38297	×× 0.57445	×× 0.57445	= 0.38297	= 0.38297
P17 - 01-02 Mass (kg)	★★ 0.31127	★★ 0.31127	★★ 0.31126	★★ 0.41502	★★ 0.41502
P19 - 02-075 Mass (kg)	★★ 1.5148	★★ 1.5149	★★ 1.5147	★★ 1.5148	★★ 1.5147
P23 - 075-095 Mass (kg)	★★ 0.17919	★★ 0.17919	★★ 0.17919	★★ 0.17919	★★ 0.17919

Şekil 6.25. Response Surface Optimization işlemiyle belirlenen kanadın optimum tasarım parametreleri

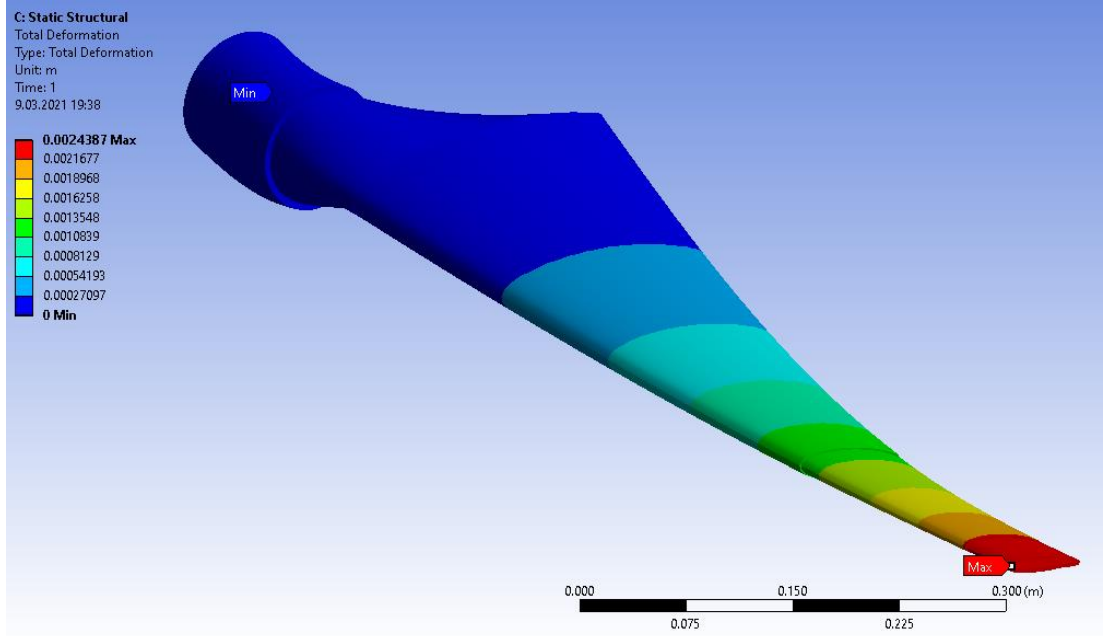
Tez çalışmasında 3 nolu tasarım noktası esas alınarak kanadın 30 m/s'lik rüzgar hızına karşılık gelen maksimum zorlanma koşullarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

Yapılan mekanik davranış analizi için Çizelge 6.9'da verilen literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak belirlenen uygun kompozit yapısı kullanılmıştır. Söz konusu yapı ANSYS Workbench yazılımına tanımlanarak kanadın akışkan-yapı etkileşim analizleri gerçekleştirilmiş ve kanadın maksimum zorlanma koşullarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.9. Kanat kompozit yapısı

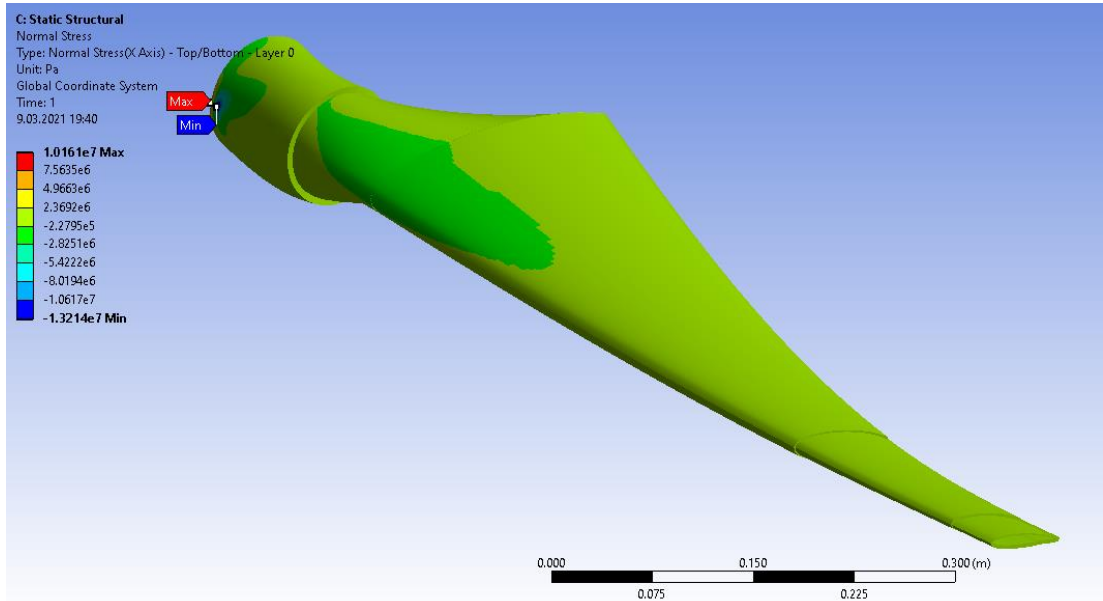
Konum (m)	Kanat Kompozit Yapısı	Et Kalınlığı (m)
0-0.1	$[(\pm 45)_2/0_6/(\pm 45)_2]_s$	0.01
0.1-0.2	$[(\pm 45)_2/0_4/(\pm 45)_2]_s$	0.008
0.2-0.75	$[(\pm 45)/0_4/(\pm 45)]_s$	0.006
0.75-0.95	$[(\pm 45)/0_2/(\pm 45)]_s$	0.004
0.95-1	$[(\pm 45)/0_1/(\pm 45)]_s$	0.003

Akışkan yapı etkileşim analiziyle kanadın maksimum zorlanma koşullarındaki deformasyonu belirlenerek Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan şekil değişiminin kanadın kök kısmından uç kısmına doğru arttığı ve uç kısmında 0.438 mm olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda kanadın uç deformasyonunun kanat uzunluğunun % 10'unu geçmemesi gerektiği belirtilmekte olduğundan kanadın maksimum zorlanma koşullarındaki davranışının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir.



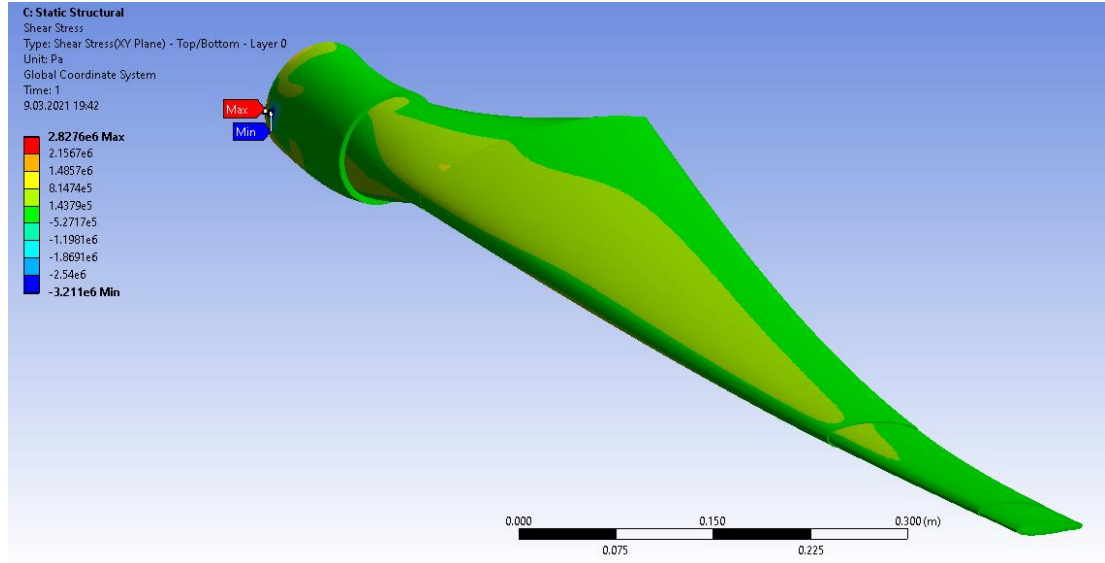
Şekil 6.26. Maksimum zorlanma koşullarında kanadın toplam şekil değişimi

Maksimum zorlanma koşullarında kanatta oluşan normal gerilmeler Şekil 6.27’de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan maksimum normal gerilmenin 10.16 MPa (çekme gerilmesi) ve 13.14 MPa basma gerilmesi şeklinde kanadın kök kısmına yakın kısımlarda oluştuğu görülmektedir.



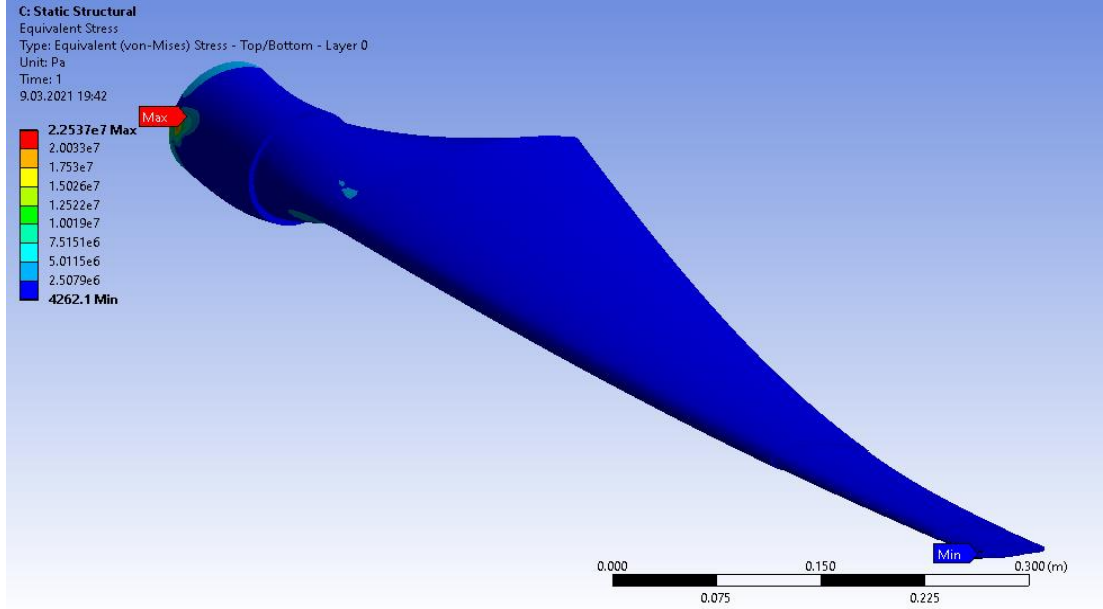
Şekil 6.27. Kanatta oluşan normal gerilmeler

Maksimum zorlanma koşullarında kanatta oluşan kayma gerilmeleri Şekil 6.28’de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan maksimum kayma gerilmesinin 2.827 MPa ve -3.211 MPa şeklinde kanadın kök kısmına yakın kısımlarda oluştuğu görülmektedir.



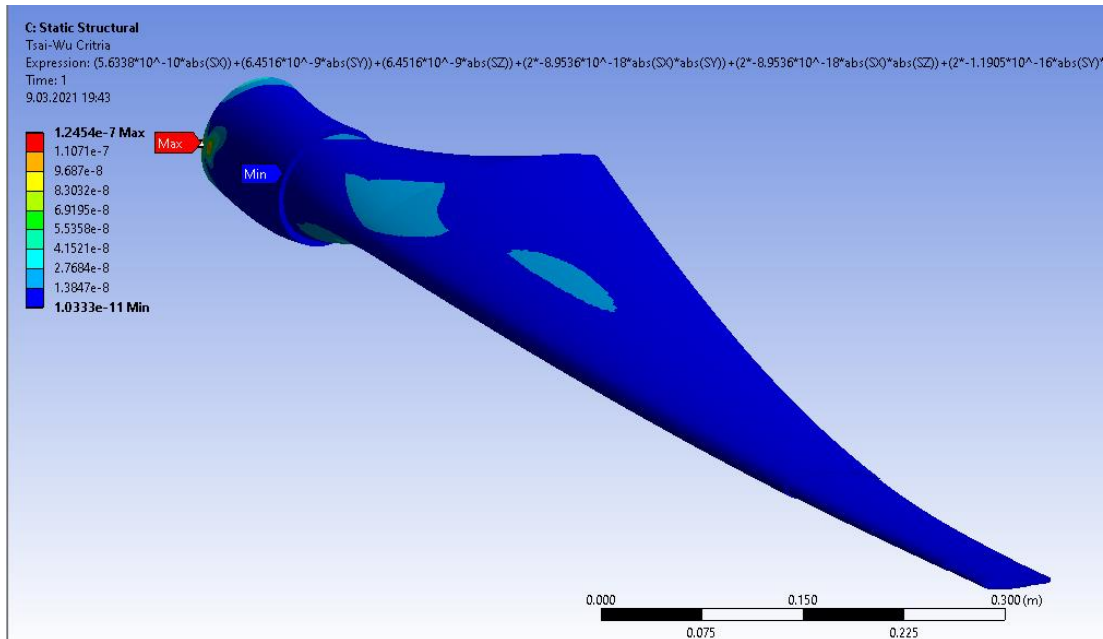
Şekil 6.28. Kanatta oluşan kayma gerilmeleri

Maksimum zorlanma koşullarında kanatta oluşan Von Mises eşdeğer gerilmeleri Şekil 6.29’da verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan maksimum eşdeğer gerilmenin 22.537 MPa büyüklüğünde kanadın kök kısmına yakın yerlerde oluştuğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda E-Cam epoksi için sınır malzeme dayanımının 215 MPa olduğu belirtilmiştir. Kanatta oluşan 22.537 MPa’lık eşdeğer gerilmeler sınır malzeme sınırının yaklaşık % 10’una karşılık geldiğinden yapılan tasarımın gerekli dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.29. Kanatta oluşan eşdeğer gerilmeler (Von Mises)

Kompozit kanat yapıda hasar kontrolü için kanadın Tsa-i Wu kırılma endeksleri de incelenmiştir (Şekil 6.30). Şekilden kanadın Tsa-i Wu kırılma endeksinin en yüksek 1.245×10^{-7} en düşük ise 1.033×10^{-11} değerlerinde olduğu görülmektedir. Tsa-i Wu kriterine göre kırılma endeksi değeri 1'den büyük olduğunda yapıda hasar oluştuğu kabul edilmektedir. Yapılan analiz sonucunda belirlenen kırılma endekslerine göre kanadın maksimum zorlanma koşullarında gerekli dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.30. Maksimum zorlanma durumunda kanadın Tsa-i Wu kırılma endeksleri

6.7. IEC 61400-2 Standardına Göre Kanadın Tasarım Doğrulaması

Tez çalışması kapsamında son olarak yapılan aerodinamik ile mekanik tasarım ve optimizasyon işlemleri sonucunda belirlenen ve akışkan yapı etkileşimi analiziyle maksimum zorlanma koşullarındaki mekanik davranışı değerlendirilen kanadın IEC 61400-2 standardına göre tasarım doğrulaması yapılmıştır.

Tasarım doğrulaması hesaplamaları için gerekli olan parametreler ile kanada ait büyüklükler akışkan-yapı etkileşimi analizi için kullanılan ANSYS Workbench yazılımı ve literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak belirlenmiş ve Çizelge 6.10'da sunulmuştur.

Çizelge 6.10. Tasarım doğrulaması hesaplamaları için kullanılan parametreler

Parametre	Büyükük	Birim
Havanın Yoğunluğu	1.225	kg/m ³
Yerçekimi ivmesi	9.81	m/s ²
Referans rüzgar hızı	30	m/s
Ortalama rüzgar hızı	6	m/s
Kanat sayısı	3	
Kanat yarıçapı	1	m
Kanat yüzey alanı	0.25625	m ²
Sürüklenme Katsayısı (Cd)	1.5	-
Maksimum Kaldırma Kuvveti Katsayısı (Cl)	2	-
İtme Kuvveti Katsayısı (Ct)	0.5	-
Maksimum rotor açısız hızı	400	dev/dk
Tasarım için rotor açısız hızı	200	dev/dk
Kanat Atalet Momenti	0.13776	kgm ²
Kanat Kütlesi	1.9125	kg
Rotor kütlesi	6	kg
Kanat ağırlık merkezi ile rotor açısı arasındaki mesafe	0.3579	m
Rotor merkezi ile yataklar arasındaki mesafe	0.026	m
Dışli oranı	1	
Tasarım yükü	580	Watt
Tasarım uç-hız oranı	4.9	-
Kanat kök kısmı kesit alanı	0.00785	m ²

IEC 61400-2 Standardına göre yapılan değerlendirmelerde incelenen koşullarda kanada etki eden kuvvet ve momentler hesaplanarak Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.11. IEC 61400-2 standardına göre belirlenen kuvvet ve momentler

Yükleme Durumu	Kuvvet/Moment	Büyüklik
Normal İşletme Koşulları	Fzk (N)	600.94
	Mxk (Nm)	28.11
	Myk (Nm)	71.91
	Fx şaft (N)	323.60
	Mxşaft (Nm)	44.21
	Mşaft (Nm)	54.91
Yaw Mekanizmasının Hareketi	Myk(Nm)	54.69
	Mşaft (Nm)	84.00
Yaw Mekanizması Hatası	Myk (Nm)	45.25
Maksimum İtke Kuvveti	Fxşaft (N)	216.48
Maksimum Dönme Hızı	Fzk (N)	1201.19
	Mşaft (Nm)	0.92
Yük Aktarımında Kısa Devre	Mxşaft (Nm)	88.05
	Mxk (Nm)	29.35
Kapatma (Frenleme)	Myk (Nm)	105.94
	Fxşaft (N)	635.66

IEC 61400-2 Standardına göre yapılan değerlendirmelerde incelenen koşullarda kanatta oluşan gerilmeler belirlenerek Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12. IEC 61400-2 standardına göre belirlenen gerilmeler

Yükleme Durumu	Eşdeğer Gerilme (MPa)	
	Kanat	Şaft
Normal İşletme Koşulları	0.58	
Yaw Mekanizmasının Hareketi	0.358	54.75
Yaw Mekanizması Hatası		
Maksimum İtke Kuvveti	0.296	
Maksimum Dönme Hızı	0.0441	
Yük Aktarımında Kısa Devre	6.668	49.71
Kapatma (Frenleme)	0.69	89.45

IEC 61400-2 Standardına göre yapılan değerlendirmelerde kanadın emniyet durumunun incelenebilmesi için emniyet gerilmeleri belirlenmekte ve belirlenen çalışma koşullarında kanatta oluşan gerilmeler emniyet gerilmeleriyle karşılaştırılmaktadır. Rüzgar türbin kanadı için E-Cam epoksi malzeme, şaft için ise çelik kullanılmıştır. Bu malzemelerin IEC 61400-2 standardına göre maksimum dayanımlarının sırasıyla 65.22 MPa ve 106.1 MPa değerlerini aşmaması gerektiği belirtilmektedir. IEC 61400-2 standardına göre belirlenen mukavemet değeri yukarıda belirtilen sınır mukavemet değerlerinden düşük seviyede olduğundan yapılan kanat tasarımının IEC 61400-2 Standardına göre gerekli özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbinlerinde enerji üretim zincirinin ilk halkası olan kanadın tasarımı aerodinamik ve mekanik açıdan ele alınmıştır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerine ait 1 m uzunluğundaki kanadın aerodinamik ve mekanik tasarımı ile kanadın aerodinamik performans analizleri ve mekanik davranış analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan aerodinamik tasarım ve aerodinamik performans analizi çalışmalarında Düzeltilmiş Kanat Elemanı Momentum Teorisi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden; mekanik tasarım ve mekanik davranış analizi çalışmalarında ise küçük ölçekli rüzgar türbinleri için Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından geliştirilen IEC 61400-2 standardı ve Sonlu Elemanlar Metodu'ndan yararlanılmıştır.

Bu çalışmada ayrıca optimizasyon işlemleri de yapılmış olup düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayan, anma gücü yüksek, gerekli mekanik dayanıma sahip, hafif kanat geometrisine ait tasarım parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra söz konusu parametreler kullanılarak kanat modeli oluşturulmuş ve kanadın aerodinamik performansı ve mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıda verilmiştir

1. Dünyada ve Türkiye'de enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük oranda yenilenemez enerji kaynaklarının tercih edilmekte olmasına rağmen son yıllarda yenilebilir enerji kaynakları ve rüzgar enerjisine kullanımına yönelik bir eğilim olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerjiden daha fazla yararlanmak konusunda bilinçlenme oluştuğunu göstermektedir.
2. Bu çalışma kapsamında ilk olarak 1 m'lik kanadın ön aerodinamik tasarımı yapılmış olup bu tasarımla 11 m/s'lik rüzgar hızında 442.93 Wattlık güç elde edilebileceği belirlenmiştir.
3. Bu çalışma kapsamında, kanadın aerodinamik tasarım parametrelerinin kanadın aerodinamik performansına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ön tasarıma ait aerodinamik tasarım parametrelerinin artırılması (tasarım deneme 1) ve azaltılması (tasarım deneme 2) sonucunda belirlenen 3 farklı durum için yapılan analizlerle elde edilebilecek enerji miktarının ön tasarım, tasarım deneme 1 ve tasarım deneme 2 için sırasıyla 2494 kWh, 2581 kWh ve 1840

kWh olduğu belirlenmiştir. Ayrıca söz konusu aerodinamik tasarım parametrelerinin kanadın çalışmaya başladığı rüzgar hızı ve rüzgar türbininin anma gücüne ulaştığı rüzgar hızına da etki ettiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada ön tasarımı yapılan kanadın aerodinamik performansının iyileştirilmesi için aerodinamik optimizasyon çalışması yapılmıştır.

4. Kanadın aerodinamik optimizasyonu için, Qblade yazılımında analizler yapılarak yapılarak belirlenen tasarım durumlarında elde edilebilecek yıllık enerji miktarları (AEP) ve rüzgar türbininin çalışmaya başladığı rüzgar hızları (V_{cutin}) belirlenmiştir. Yapılan optimizasyonu çalışması sonucunda, x_1 , c_1 , ϕ_1 , c_2 , ϕ_2 ve c_3 aerodinamik tasarım parametrelerinin sırasıyla 0.2 m, 0.25 m, 15° , 0.1 m, 1° , ve 0.07 m olduğu tasarım durumunda AEP ve V_{cutin} değerlerinin sırasıyla 2566 kWh ve 1.894 m/s olduğu tespit edilmiştir. Aerodinamik optimizasyonu sonucunda kanattan elde edilecek enerji miktarı yaklaşık % 3 (2494 kWh den 2566 kWh'e) yükselirken, kanadın çalışmaya başladığı rüzgar hızının yaklaşık % 0.5 (1.882 m/s'den 1.894 m/s'ye) artmıştır.
5. Bu çalışmada kanadın mekanik tasarımı için Qblade yazılımından yararlanılarak analizler yapılmış ve kanadın ağırlığı ile 20 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan deformasyonlar ve eşdeğer gerilmeler dikkate alınarak kanadın ön mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kanadın t_1 , t_2 , t_3 , t_4 ve t_5 et kalınlıkları sırasıyla 0.015 m, 0.012 m, 0.008 m, 0.005 m ve 0.003 m olarak belirlenmiştir.
6. Qblade yazılımında yapılan analizlerde kanat ankastre kiriş olarak kabul edildiğinden kanadın akışkan yapı etkileşim analiziyle belirlenen gerçek çalışma koşullarına yakın durumdaki kanat mekanik davranışı dikkate alınarak kanadın tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.
7. Akışkan yapı etkileşim analizleri için S833, S834 ve S835 aerofoillerinin aerodinamik performansı ve kanat için farklı akış/türbülans modellerine göre akış analizleri (**Laminar akış** ile **Spalart-Allmaras (S-A)**, **Realizable k- ϵ** ve **SST k- ω** türbülans modelleri) yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda analiz için en uygun türbülans modelinin **SST k- ω** türbülans modeli olduğu belirlenmiştir.

8. Akışkan yapı etkileşim analiziyle kanadın IEC 61400-2 standardına göre en faz zorlanamaya maruz kaldığı 30 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan şekil değişimleri, kanatta oluşan gerilmeler ve kanadın Tsai-Wu kriteri dikkate alınarak kanadın mekanik davranışı değerlendirilmiştir.
9. Kanadın mekanik davranışı dikkate alınarak boyutlandırılması için akışkan-yapı etkileşim analizine Response Surface Optimization modülü eklenerek kanadın tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Response Surface Optimization işlemi sonucunda kanadın t1, t2, t3, t4 ve t5 et kalınlıkları sırasıyla 0.01m, 0.008m, 0.006m, 0.004m ve 0.003m olarak belirlenmiştir.
10. Tez çalışmasında belirlenen meknaik tasarım parametreleri alınarak kanadın 30 m/s'lik rüzgar hızına karşılık gelen maksimum zorlanma koşullarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Mekanik davranış analizi için kanat kompozit malzeme olarak katman katman modellenmiş ve gerçek kanat modeli için kanadın mekanik davranışı değerlendirilmiştir.
11. Kanadın mekanik davranış analizinde, 30 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan şekil değişiminin kanadın kök kısmından uç kısmına doğru arttığı ve uç kısmında 0.438 mm olduğu belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda kanadın uç deformasyonunun kanat uzunluğunun % 10'unu geçmemesi gerektiği belirtilmekte olduğundan kanadın maksimum zorlanma koşullarındaki davranışının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir.
12. Kanatta oluşan normal gerilmeler dikkate alındığında oluşan maksimum normal gerilmenin 10.16 MPa (çekme gerilmesi) ve -13.14 MPa basma gerilmesi şeklinde kanadın kök kısmına yakın kısımlarda oluştuğu belirlenmiştir. Kayma gerilmeleri esas alındığında ise kanatta oluşan maksimum kayma gerilmesinin 2.827 MPa ve -3.211 MPa şeklinde kanadın kök kısmına yakın kısımlarda oluştuğu gözlemlenmiştir.
13. Kanatta hem normal hem de kayma gerilmeleri oluştuğundan Kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi amacıyla kanatta oluşan normal ve kayma gerilmeleri gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi teorik olarak tek başına yapacağı düşünülen eşdeğer gerilmeler de değerlendirilmiştir. Kanatta oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmeleri incelendiğinde en yüksek eşdeğer gerilmenin 22.537 MPa olduğu belirlenmiş olup bu gerilme büyüklüğü E-Cam epoksi malzemenin sınır dayanımı olan 215 MPa'ın yaklaşık % 10'una karşılık geldiğinden yapılan tasarımın gerekli dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

14. Rüzgar türbin kanatları gibi kompozit veya **anizotropik** malzemelerde ise malzeme özellikleri doğrultudan bağımsız düşünülmemekte yani malzeme bütün doğrultularda aynı özelliklere sahip olamamaktadır. Anizotropik malzemelerde **Hill, Hofmann, Maksimum Gerilme, Maksimum Şekil Değişirme ve Tsai-Wu** gibi çeşitli kırılma varsayımlarından yararlanılmakta olup bu çalışmada rüzgar türbin kanatlarının mekanik davranışının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan Tsai-Wu kriteri kullanılmıştır. Tsai-Wu kriterine göre yapıda kırılma (hasar) olup olmayacağı belirlenmesi amacıyla bir **Kırılma İndeksi (KI)** kullanılmakta olup yapının güvenilir olabilmesi için bu endeksin 1'i geçmemesi istenmektedir. Bu çalışmada en yüksek kırılma endeksinin 1.1245×10^{-7} olduğu belirlendiğinden yapılan tasarımın Tsai-Wu kriterine göre de güvenilir olduğu tespit edilmiştir.
15. Tez çalışması kapsamında son olarak kanadın IEC 61400-2 standardına göre tasarım doğrulaması yapılmıştır. IEC 61400-2 standardına göre kanadın mekanik dayanımının 65.22 MPa ve şaftın dayanımının ise 106.1 MPa değerlerini aşmaması gerektiği belirlenmiş olup yapılan hesaplamalar sonucunda kanat ve şaftta oluşan gerilmelerin belirlenen sınır değerlerden daha düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle kanat tasarımının IEC 61400-2 Standardına göre gerekli özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir.
16. Tez çalışması kapsamında, düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayan, anma gücü yüksek, gerekli mekanik dayanıma sahip, hafif kanat tasarımı yapılmıştır. Ayrıca kanadın en yüksek zorlanma koşullarına karşılık gelen 30 m/s'lik rüzgar hızındaki mekanik davranışı ve IEC 61400-2 standardına göre tasarım kontrolü yapılmıştır.

İleride yapılacak çalışmalar için öneriler

1. Bu çalışmada kanadın Qblade yazılımıyla aerodinamik performans analizleri gerçekleştirilmiş olup Shen'in kök ve uç düzeltmesi ve Snell'in 3 boyutlu etki düzeltmesi kullanılmıştır. Bu çalışmanın geliştirilmesi için belirlenen düzeltmelerden farklı düzeltmeler ve farklı yazılımlar kullanılarak kanadın aerodinamik performans analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.
2. Bu çalışmada yapılan analizlerde **SST k- ω** türbülans modeli kullanılmış olup bu çalışmanın geliştirilmesi için daha iyi işlem gücüne sahip bilgisayarlarla

farklı türbülans modelleri dikkate alınarak kanadın aerodinamik tasarım ve performans analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

3. Bu çalışma ile belirlenen sonuçların yapılacak deneysel çalışmalarla geliştirilmesi de tavsiye edilmektedir.
4. Bu çalışma kapsamında 1 m'lik kanat tasarımı yapılmış olup kanat malzemesi olarak E-Cam epoksi kullanılır. Bu çalışmanın geliştirilmesi için farklı boyutlardaki kanat tasarımlarının yapılması ve E-Cam epoksi dışında farklı malzemelerin araştırılması da önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aceves, C.M., Sutcliffe, M.P.F., Ashby, M.F., Skordos, A. A. and Roman, C.R.(2012). Design methodology for composite structures: a small low air-speed wind turbine blade case study, *Materials and Design*. 36. 296-305.
- Afshar, P.A.N., Gooya, M., Hosseini, S.V. and Pourrajabian, A. (2017). Starting improvement of micro-wind turbines operating in low wind speed regions, *International Journal of Green Energy*. 14(11). 868-877.
- Agarwala, R. and Chin R.A. (2020). Structural design and analysis of a redesigned wind turbine blade, *International Journal of Ambient Energy*. 2162-8246 (In Press).
- Aktepe, İ. (2013). *Rüzgar türbin kanadının optimal tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Alpman, E. (2015). Aerodynamic performance of small – scale horizontal axis wind turbines under two different extreme wind conditions, *Journal of Thermal Engineering* . 1(3). 420-432.
- Amano, R., Avdeev, I., Malloy, R. and Shams, M.Z. (2013). Power, structural and noise performance tests on different wind turbine rotor blade designs, *International Journal of Sustainable Energy*. 32(2). 78-95.
- ANSYS Inc 2013, Turbulence Modeling Using ANSYS Fluent, Theory Guide.
- Ataseven, M.S., 2019. *Samsun ilindeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve farklı rüzgâr türbinleri kullanılarak enerji analizlerinin araştırılması*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun.
- Barnes, R.H., Morozov, E.V. and Shankar, K.(2015). Improved methodology for low wind speed specific wind turbine blades, *Composite Structures*. 119. 677-684.
- Barnes, R.H. and Morozov, E.V. (2016). Structural optimisation of composite wind turbine blade structures with variations of internal geometry configuration, *Composite Structures*. 152.158-167.
- Benini, E. and Toffolo, A. (2002). Optimal design of horizontal- axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation, *Journal of Solar Energy Engineering*. 124. 357-363.

- BP Energy Outlook – URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>, Erişim Tarihi: 22.03.2020.
- Bukala, J., Damaziak, K., Kroszczyński, K., Krzeszowiec, M. and Malachowski, J. (2015). Investigation of Parameters Influencing the Efficiency of Small Wind Turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 146. 29-38.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook*, England:John Wiley&Sons Ltd.
- Chaudhary, M.K. and Roy, A. (2015). Design&optimization of a small wind turbine blade for operation at low wind speed, *World Journal of Engineering*. 12(1). 83-94.
- Chehouri, A., Younes, R., Ilınca, A. and Perron, J. (2015), Review of performance optimization techniques applied to wind turbines, *Applied Energy*. 142. 361-388.
- Chen,J., Wang, Q., Shen, W.Z., Pang,X., Li, S. and Guo, X. (2013). Structural optimization study of composite wind turbine blade, *Materials and Design*. 46. 247-255.
- Çelik, S. N. (2012). *Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığının azaltılmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M. (2008). *Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları*. Çeviri Editörü: Tahsin Engin, İzmir: İzmir Güven Bilimsel Kitabevi.
- Dal Monte, A., Castelli, M.R. and Benini, E. (2013). Multi-objective structural optimization of A HAWT composite blade, *Composite Structures*. 106. 362-373.
- Dal Monte,A., Betta, S.D., Costelli, M.R. and Benini, E. (2017). Proposal for a coupled aerodynamic-structural wind turbine blade optimization, *Composite Structures*. 159. 144-156.
- Demirci, S. (2011). *Rüzgar türbin göbeğinin yapısal tasarım ve optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.
- DNV (2002). *Guidelines for design of wind turbines*, Second Edition, ISBN 87-550-2870-5, Denmark.
- Fuglsang, P. and Madsen, H.A. (1999). Optimization method for wind turbine rotors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 80. 191-206.

- Future of Wind, Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-economic Aspects, IRENA, October 2019, URL: <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>, Erişim Tarihi: 22.03.2020.
- Gasch, R., Twele, J. (2002). *Wind power plants*, Solarpraxis: Berlin, Germany,.
- Habali, S.M. and Salah, I.A.(2000). Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics part 1: design of the blade and root, *Energy Conversion & Management*. 41. 249-280.
- Hasan, M., El-Shahat, A. and Rahman, M. (2017). performance investigation of three combined airfoils bladed small scale horizontal axis wind turbine by BEM and CFD analysis, *Journal of Power and Energy Engineering*. 5. 15-27.
- Hau, E. (2006). *Wind turbines fundamentals, technology, application, economics*. Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Hayli, S. (2001). Rüzgar enerjisinin önemi dünyada ve türkiye'deki durumu, *Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*. 11(1). 1-26.
- Höyland, J. (2010). *Challenges for large wind turbine blades, phd thesis*, Norwegian University of Science and Technology.
- Hu, W., Park, D. and Choi, D. (2013). Structural optimization procedure of a composite wind turbine blade for reducing both material cost and blade weight, *Engineering Optimization*. 45(12). 1469-1487.
- Hu, Y. and Rao, S. S. (2011). Robust design of horizontal axis wind turbines using taguchi method, *Journal of Mechanical Design*. 133. 111009. 1-15.
- Husaru, D.E. and Barsanescu, P.D. (2018). Numerical analysis for prototype blade of horizontal wind axis turbine in ANSYS static structural, The 8th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 444. 062010.
- IEA – International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook, November 2019, URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>, Erişim Tarihi: 22.03.2020.
- IEC 61400-2:2013, Wind turbines - Part 2: Small Wind Turbines, International Electrotechnical Commission (IEC), URL: <https://webstore.iec.ch/publication/5433>, Erişim Tarihi: 05.09.2020
- IRENA 2020, Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, URL: [irena.org/-](https://www.irena.org/)

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/

2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf, Erişim Tarihi:
23.03.2020.

- Karadağ, H.I. (2009). *Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisinin önemi ve rüzgar türbin tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kaya, K. and Koç, E. (2019). An investigation on mechanical behaviour of horizontal axis wind turbine (HAWT) blade with various wind speed, *1 st International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials*, 22-23 August 2019, Ankara.
- Kaya, K. (2014). *Rüzgar türbin kanadının mekanik tasarım esasları*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun.
- Kaya, K., Koç., E. (2015). Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat profil tasarımı ve üretim esasları, *Mühendis ve Makine*. 56. 670. 38-48.
- Kaya, K., Koç., E. (2021). The State of Energy in the World and Turkey – Wind Energy, 5th International Anatolian Energy Symposium, 24-26 March 2021, Karadeniz Technical University, Trabzon/Turkey
- Kaya, M.N., Kose, F., Ingham, D., Ma, L. and Pourkashanian, M. (2018). Aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine with forward and backward swept blades, *Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics*. 176. 166-173.
- Khalafallah, M.G., Ahmed, A.M. and Eman, M.K. (2017). CFD study of some factors affecting performance of HAWT with swept blades, *International Journal of Sustainable Energy*. 36(5). 489-501.
- Khaled, M. (2017). *The effect of blade geometry and configuration on horizontal axis wind turbine performance*, Msc Thesis, Zazazig University, Faculty of Engineering, Mechanical Power Engineering Department.
- Liu, X., Zhang, X., Li, G., Chen, Y., & Ye, Z. (2010). Dynamic response analysis of the rotating blade of horizontal axis wind turbine, *Wind Engineering*. 34(5). 543-560.
- Manwell, J.F., McGowan, J. G., Rogers, A.L. (2002). *Wind turbine explained, theory design and application*, John Wiley&Sons, England.

- Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglu, G., Nayeri, C.N. and Paschereit, C.O. (2013). QBLADE: An Open Source Tool For Design and Simulation of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3 (3)264-269.
- Menegozzo, L., Dal Monte, A., Benini, E. and Benato, A. (2018). Small wind turbines: a numerical study for aerodynamic performance assesment under gust conditions, *Renewable Energy*. 121. 123-132.
- Ning, S. A., Damiani, R. and Moriarty, P. J. (2014). Objectives and constraints for wind turbine optimization, *Journal of Solar Energy Engineering*. 136. 041010, 1-12.
- Oerlemans, S., Sijtsma, P., Lopez, B.M. (2006). Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*. 299. 869–883.
- Özdoğan, M, Sungur, B., Namlı, L., Topaloğlu, B., Durmuş, (2016). Farklı en-boy oranlarına sahip binaların etrafındaki akışın sayısal çözümünde türbülans modellerinin etkisinin karşılaştırmalı araştırılması, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 12(3). 585-595.
- Özgönenel, O. And Thomas, D. W. P. (2012). Short-term wind speed estimation based on weather data. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 20(3), 335–346.
- Papadakis, G., Voutsinas, S., Sieros, G. and Chaviaropoulos, T. (2014). CFD aerodynamic analysis of non- conventional airfoil sections for very large rotor blades, *IOP Publishing Journal of Physics : Conference Series*, The Science of Making Torque From Wind 2012. 555. 012104, 1-11.
- Peric, B.M., Simonovic, A.M. and Vorkopic, M.D. (2020). Comparative analysis of numerical computational techniques for determination of the wind turbine aerodynamic performances, *Thermal Sciences* (In Press).
- Pourrajabian, A., Afshar, P.A.N., Ahmadizadeh, M. and Wood, D. (2016). Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade, *Renewable Energy*, 87, 837-848.
- Pourrajabian, A., Dehghan, M., Javed, A. and Wood, D. (2019). Choosing an appropriate timber for a small wind türbine blade: a comparative study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 100.1-8.

- Pourrajabian, A., Ebrahimi, R. and Mirzaei, M. (2014). Applying micro scales of horizontal axis wind turbines for operation in low wind speed regions, *Energy Conversion and Management*. 87. 119-127.
- REN21- Renewables 2019- Global Status Report- REN21, URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf, Erişim Tarihi: 22.03.2020.
- Scappatici, L., Bartolini, N., Castellani, F., Astolfi, D., Garinei, A. and Pennicchi, M. (2016). Optimizing the design of horizontal – axis small wind turbines: from the laboratory to market, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 154. 58-68.
- Schmitz, S. (2019). *Aerodynamics of wind turbines - a physical basis for analysis and design*, Wiley.
- Schubel, P. J., ve Crossley, R. J. (2012). Wind turbine blade design, *Energies*. 5. 3245-3449.
- Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X. and Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades, *Energy Conversion and Management*. 119. 266.
- Shourangiz- Haghighi, A., Haghnegahdar, M.A., Wang, L., Mussetta, M., Kollios, A. and Lander, M. (2020). State of the art in the optimisation of wind turbine performance using CFD, *Archives of Computational Methods in Engineering*. 27. 413–431.
- Somers, D.M., 2005, The S833, S834, and S835 Airfoils Subcontract Report NREL/SR-500-36340, National Renewable Energy Laboratory (NREL), URL: https://wind.nrel.gov/airfoils/Documents/S833,S834,S835_Design.pdf.
- Subrahmanian, K.P. ve Dubouloz, F., 2009. Adhesives for Bonding Wind Turbine Blades, *Reinforced Plastics*.
- Suresh, A. and Rajakumar, S. (2020). Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications , *Materials Today: Proceedings*. 23. 16-22.
- Şenel, M.C. (2012). *Rüzgar türbinlerinde güç iletim mekanizmalarının tasarım esasları – Dinamik Davranış*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun.

- Şenel, M. C. and Koç, E. (2020). The dynamic behaviour of the conventional power transmission mechanism in horizontal axis wind turbines, *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*. 41(5). 653-662.
- Tarfaoui, M., Naxhtane, M., Khadimallah, H. and Saifaoui, D. (2018). Simulation of mechanical behaviour and damage of a large composite wind turbine blade under critical loads, *Applied Composite Materials*. 25. 237-254.
- Tenghiri, L., Khalil, Y., Abdi, F. and Bentamy, A. (2018). Optimum design of a small wind turbine blade for maximum power production, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 161. 012008.
- Tenghiri, L., Khalil, Y., Abdi, F. and Bentamy, A. (2019). Structural design and analysis of a small wind turbine blade using simple load model, FAST-mlife codes and ANSYS ncode designlife, *Wind Engineering*. 1-18.
- Topçu, M., Taşgetiren, S., 1998. Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ders Kitapları*, Yayın No:007, Denizli.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K. Indraja, V. and Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 56. 1351-1371.
- Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu - Ocak 2020, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TUREB), URL: <https://tureb.com.tr//yayin/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2020/128>, Erişim Tarihi: 15.09.2020
- Veers, P. S., Ashwill, T. D., Sutherland, H. J., Laird, D. L., Lobitz, D. W., Griffin, D. A., Mandell, J. F., Musial, W. D., Jackson, K., Zuteck, M., Miravete, A., Tsai, S. W. and Richmond, J. L. (2003). Trends in the design, manufacture and evaluation of wind turbine blades, *Wind Energy*. 6. 245–259.
- Villalpando, F., Reggio, M. and Ilınca, A. (2011). Assessment of turbulence models for flow simulation around a wind turbine airfoil, *Modelling and Simulation in Engineering*. 714146. 8.
- Wood, D. (2011). Small wind turbines analysis, design and application, Springer,
- Xudong, W., Shen, W.Z. , Zhu, W.J., Sorensen, J.N. and Jin, C. (2009). Shape optimization of wind turbine blades, *Wind Energy*. 12. 781-803.

ÖZ GEÇMİŞ



Kadir KAYA, 01.02.1988 tarihinde İçel’de doğdu. Osmancık Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında mezun oldu. 2014 yılında OMÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans programını 2014 yılında tamamladı. 2012 yılından bu yana Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapan Kadir KAYA, iyi derecede İngilizce bilmektedir. Temel ilgi alanları, Konstrüksiyon ve İmalat, Kompozit Malzemeler, Sonlu Elemanlar Metodu ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğidir (21.03.2021).

İletişim Bilgileri

E mail : kadir.kaya@omu.edu.tr

kkaya19@msn.com

Telefon : 0505 5015755

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4273-6684>.

Yayımlanmış Çalışmalar:

1. Kaya, K. and Koç, E., 2019. An Investigation on Mechanical Behaviour of Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade With Various Wind Speed, 1 st International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials, 22-23 August 2019, Ankara.
2. Kaya, K., Koç., E. (2021). The State of Energy in the World and Turkey – Wind Energy, 5th International Anatolian Energy Symposium, 24-26 March 2021, Karadeniz Technical University, Trabzon/Turkey