

**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ DİKEY EKSENLİ RÜZGAR
TÜRBİNLERİNİN SAYISAL ANALİZİ**

Nisan Esin MUTLU GÜNHAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ DİKEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SAYISAL
ANALİZİ**

Nisan Esin MUTLU GÜNHAN
0000-0003-2866-6093

Doç. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ DİKEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Nisan Esin MUTLU GÜNHAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Erhan PULAT

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en hızlı gelişen rüzgar enerjisidir. Son zamanlarda fosil yakıt fiyatlarındaki artış, temiz enerji kaynaklarına yönelik talepler ve hükümet desteklerinin artmasıyla rüzgar türbinleri enerji üretimi için uygun bir teknoloji haline gelmiştir. Mevcut rüzgar santrallerinin çoğu yatay eksenli rüzgar türbinlerinden oluşur. Çünkü yatay eksenli rüzgar türbinlerinin verimliliği diğer tüm rüzgar türbinlerine göre daha yüksektir. Halen yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT), büyük boyları ve yüksek güç üretim özellikleri nedeniyle rüzgar enerjisi pazarına hakimdir. Buna karşın, dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT) de çok fazla güç üretebilir ve birçok avantaj sağlayabilir.

Bu tez, bir dikey eksenli rüzgar türbini (DERT) çeşidi olan H tipi Darrieus rüzgar türbininin düşük rüzgar hızı koşullarında farklı kanat uç hızı, farklı yunuslama açısı, farklı kanat profili ve farklı kanat sayıları için performans değerlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla sayısal analizini kapsamaktadır. 3 farklı kanat profiline sahip dikey eksenli H-Darrieus rüzgar türbininin rotor konum açısı, yunuslama açısı ve kanat sayısı parametreleri değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiş ve türbülans modeli SST (Shear Stress Support) k-W seçilerek moment değerleri ve güç katsayısının değişimi gözlenmiştir. Böylece incelenen parametreler kapsamında, küçük ölçekli dikey eksenli Darrieus rüzgar türbinlerinin hangi durumda daha verimli çalışacağı tespit edilmiştir. Analizler ANSYS Academic 2020R1 paket programıyla yapılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre, incelenen 3 farklı kanat modeline sahip H-Darrieus türbini için de belirli bir kanat uç hızı değerinde en yüksek güç katsayısına ulaşıldığı, farklı kanat profillerinde rotor konum açısının toplam moment değerini nasıl etkilediği, farklı yunuslama açılarında moment değerlerinin nasıl değiştiği ve farklı kanat sayılarına sahip türbinlerin momentleri incelenerek çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, dikey eksenli rüzgar türbinleri, Darrieus rüzgar türbini, kanat uç hızı, yunuslama açısı, kanat profili, kanat sayısı, moment değişimi, güç katsayısı

2020, ix + 90 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

NUMERICAL ANALYSIS OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES UNDER THE
EXTREME CONDITIONS

Nisan Esin MUTLU GÜNHAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Erhan PULAT

Wind energy is the fastest growing one among all of the types of renewable energy sources. Recently, by rising of fossil fuel prices, demands for clean energy sources and government support wind turbines have become the appropriate technology for power generation. Most of the wind farms use horizontal axis wind turbines. Because its efficiency is higher than all other wind turbines. Currently, horizontal axis wind turbines(HAWT) dominate the wind energy market due to their massiveness and high power generation characteristics. However, vertical axis wind turbines(VAWT) can also generate abundantly power and provide many advantages.

The thesis covers the numerical analyzes of a H-Darrieus wind turbine, a vertical axis wind turbine(VAWT) type, at different tip speed ratios, pitch angles, blade profiles and blade numbers under low wind speed conditions by using computational fluid dynamics(CFD). Analyzes were performed by using SST(Shear Stress Support) k-W turbulence model and changing the parameters; rotor position angle, pitch angle and the number of blades. Consequently, the changing in moment and power coefficient was observed and it was determined the features of the most efficient H-Darrieus wind turbine. The analyzes was made via ANSYS Academic 2020R1 package program.

Key words: Computational fluid dynamics, vertical axis wind turbines, Darrieus wind turbine, tip speed ratio, pitch angle, wing profile, blade number, moment change, power factor

2020, ix + 90 pages.

TEŐEKKÜR

Bu tez çalıőmamın hazırlanması süresince bana her konuda yardımcı olan değerli danışman hocam Doç.Dr.Erhan PULAT'a, buğünlere gelmemde büyük emeği olan aileme, tez sürecinde her zaman bana destek olan eőime ve eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm eğitmenlere teőekkür ederim .

Nisan Esin MUTLU GÜNHAN

27/11/2020

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
m	Hava akımının kütlesi (kg)
v	Hava akımının hızı (m/s)
W_{KE}	Hava akımının kinetik enerjisi (joule)
P	Hava akımının gücü (Watt)
\dot{m}	A alanından birim zamanda akan kütle (kg/s)
Q	Hacimsel debi
P	Yoğunluk (kg/m ³)
A	Rotor kanatlarının süpürdüğü alan (m ²)
$P_{Rüzgar}$	Rüzgarın gücü (W)
$P_{Spesifik}$	Spesifik güç (watt /m ²)
D	Rotor çapı (m)
H	Kule yüksekliği (m)
R	İdeal gaz sabiti (m ³ atm/K mol)
P	Mutlak basınç (1 atm)
T	Mutlak sıcaklık (K)
MA	Gazın moleküler ağırlığı (g/mol)
P_0	Referans basınç (1 atm)
V	H yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
v_0	H ₀ referans yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)
α	Sürtünme katsayısı
P_k	Rotor kanatlarının yakaladığı mekanik güç (Türbin gücü)
v_i	Rotor kanatlarının girişindeki rüzgar hızı
v_0	Rotor kanatlarının çıkışındaki rüzgar hızı
v_k	Rotor kanatları düzlemindeki rüzgar hızı
C_p	Güç katsayısı (Türbin verimi)
λ	Kanat uç-hız oranı (TSR)
θ	Rotor açısı
P_A	Kanada etkiyen basınç
P	Yoğunluk (kg/m ³)
V_a	Rüzgar hızı
F_D	Sürükleme kuvveti (N)
F_L	Kaldırma kuvveti (N)
ω	Türbinin açısal dönme hızı (rad/s)
W	Bağlı hız
R	Türbin rotor yarıçapı (m)
H	Rakım yüksekliği(m)
K	Türbülans kinetik enerjisi
M	Dinamik viskozite (kg/ms)
μ_t	Türbülans viskozitesi
SST	Shear Stress Transport
σ_k	SST k- ω Türbülans modeli sabiti
σ_ω	SST k- ω Türbülans modeli sabiti
ω	Türbülans frekansı

Kısaltmalar

Açıklama

PV	Fotovoltaik
Re	Reynolds sayısı
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
CFD	Computational Fluid Dynamics
YERT	Yatay eksenli rüzgar türbini
DERT	Dikey eksenli rüzgar türbini
HAWT	Horizontal axis wind turbine
VAWT	Vertical axis wind turbine
CO ₂	Karbondioksit
SO ₂	Kükürtdioksit
NO _x	Nitrikoksit
6DoF	Six degrees of freedom(6 serbestlik derecesi)
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Rüzgar Enerjisi.....	4
1.2.Rüzgar Enerjisi Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları.....	5
1.3.Türbin Tipleri.....	5
1.3.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT).....	6
1.3.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT)	8
1.4. Dikey Eksenli Türbinlerin Avantaj ve Dezavantajları	11
1.4.1. Avantajlar.....	11
1.4.2. Dezavantajlar.....	12
1.5.Küçük Ölçekli Rüzgar Enerjisi	12
1.6.Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	13
1.7.Rüzgar Enerjisi Hesabı.....	17
1.8.Rüzgar Hızı – Güç İlişkisi.....	20
1.9. Rüzgardan Elde Edilen Güç (Mekanik Güç)	25
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	29
2.1. Türbine Etki Eden Aerodinamik Kuvvetler	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	37
3.1. ANSYS-Fluent ve HAD (CFD) Yöntemi	37
3.2. Kullanılan Geometriler, Ağ Oluşturma ve Sınır Şartları (Geometrik Model)	39
3.3. Kullanılan Türbülans Modeli ve Bu Modelin Kısaca Tanıtılması (Matematik Model).....	46
3.4. Sayısal Yöntem	50
3.5. Ağdan Bağımsızlık Çalışması (Mesh Independency Study).....	54
3.6. ANSYS-Fluent Kullanılarak Doğrulama (Validasyon) Çalışması	58
4.BULGULAR ve TARTIŞMA.....	59
5. SONUÇ.....	86
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	6
Şekil 1.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	7
Şekil 1.3 Tek kanatlı rüzgar türbinleri	7
Şekil 1.4 İki kanatlı rüzgar türbini	8
Şekil 1.5 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	9
Şekil 1.6 Savonius Rüzgar Türbinler	10
Şekil 1.7 Darrieus Rüzgar Türbinleri	11
Şekil 1.8 2018 Yılı sonu Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı	13
Şekil 1.9 Türkiye rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı	14
Şekil 1.10 Türkiye’de rüzgar santrallerinin elektrik üretimindeki payı.....	15
Şekil 1.11 2019 yılına ait kaynak bazında kümülatif elektrik üretimi	16
Şekil 1.12 Rüzgar kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı	17
Şekil 1.13 Rüzgar hızı-güç grafiği	20
Şekil 1.14 Dikey eksenli rüzgar türbini.....	22
Şekil 1.15 Rüzgar türbininde akış durumu.....	26
Şekil 1.16 Türbin veriminin hız oranı ile değişimi	28
Şekil 2.1 Sürükleme ve kaldırma kuvvetlerinin ince, düz bir panel üzerinde gösterimi.....	344
Şekil 2.2 Yunuslama açısının kanat üzerinde gösterimi	35
Şekil 2.3 Hücum açısının kanat üzerinde gösterimi.....	36
Şekil 2.4 Türbine etki eden aerodinamik kuvvetlerin gösterimi.....	366
Şekil 3.1 Bir CFD (HAD) çalışmasında izlenmesi gereken sürecin algoritması	38
Şekil 3.2 NACA4518 kanat profili.....	40
Şekil 3.3 NACA0012 kanat profili.....	40
Şekil 3.4 NACA6412 kanat profili.....	40
Şekil 3.5 NACA 4518 profilli; 2, 3, 4 ve 5 kanat sayısına sahip Darrieus tipi rüzgar türbinlerin şematik gösterimi	41
Şekil 3.6 3 boyutlu H-Darrieus rüzgar türbini ve ölçüleri	45
Şekil 3.7 Sonlu hacimler metodunun kullandığı kontrol hacmi şematik gösterimi	51
Şekil 3.8 Çözüm yöntemleri seçimi ekran görüntüsü	53
Şekil 3.9 Belirlenen yakınsama kriterlerinin ekran görüntüsü.....	53
Şekil 3.10 Model 1 ağ yapısı.....	55
Şekil 3.11 Model 2 ağ yapısı.....	56
Şekil 3.12 Model 3 ağ yapısı.....	57
Şekil 4.1 Devir sayısı 60 rad/s de farklı rüzgar hızlarında moment değişimi	59
Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan NACA4518 profilinin sayısal çözümünün R. Lanzafame ve ark.nın çalışması ile uyumu.....	60
Şekil 4.3 Farklı kanat uç hız oranlarına (λ) göre NACA4518, NACA0012 ve NACA6412 kanatlarındaki güç katsayısının (C_p) değişimi	61
Şekil 4.4 Ağ sayısı 75000, 166000 ve 275000 iken moment değerindeki değişim	62
Şekil 4.5 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 74° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki hız dağılımı	63
Şekil 4.6 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 135° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki hız dağılımı	64

Şekil 4.7 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, NACA4518 kanatlarındaki hız dağılım konturları.....	65
Şekil 4.8 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 74° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki basınç dağılımı	66
Şekil 4.9 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 135° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki basınç dağılımı	67
Şekil 4.10 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 74° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı	68
Şekil 4.11 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 135° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı	69
Şekil 4.12 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 72° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki hız dağılımı	70
Şekil 4.13 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 136° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki hız dağılımı	71
Şekil 4.14 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, NACA0012 kanatlarındaki hız dağılım konturları.....	72
Şekil 4.15 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 72° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki basınç dağılımı	73
Şekil 4.16 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 136° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki basınç dağılımı	74
Şekil 4.17 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 72° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı	75
Şekil 4.18 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 136° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı	76
Şekil 4.19 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 56° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki hız dağılımı	77
Şekil 4.20 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 139° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki hız dağılımı	78
Şekil 4.21 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için NACA6412 kanatlarındaki hız dağılım konturları.....	79
Şekil 4.22 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 56° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki basınç dağılımı	80
Şekil 4.23 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 139° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki basınç dağılımı	81
Şekil 4.24 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 56° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı	82
Şekil 4.25 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 139° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı	83
Şekil 4.26 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için NACA4518 kanat profilinde yunuslama açısına göre moment değişimi.....	84
Şekil 4.27 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için NACA4518 kanat profilinde kanat sayısına göre moment değişimi.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Hava yoğunluğunun sıcaklık ve basınç ile değişimi.....	24
Çizelge 1.2. Sürtünme katsayısının yeryüzü karakteristiğine bağlı değişimi.....	25
Çizelge 3.1. Her Bir Model için Şartları.....	41
Çizelge 3.2. Kanat Modelleri ve Boyutları.....	43
Çizelge 3.3. λ (TSR:Tip-hız oranı) sayılarında ortalama Reynolds değerleri.....	46
Çizelge 3.4. Farklı ağ sayılarında moment değerindeki değişim.....	53
Çizelge 3.5 Doğrulama çalışması için girilen sınırşartları.....	57
Çizelge4.1Kanat profillerine ait C_l , C_d ve C_l/C_d değerleri.....	60

1. GİRİŞ

Enerji, insanların en önemli ihtiyaçlarından biridir. Hem gelişmiş ülkeler hem de gelişmekte olan ülkelere üretim, ısıtma-soğutma, ulaşım ve aydınlatma gibi ihtiyaçların karşılanması için her geçen yıl enerjiye olan ihtiyaç artmaktadır. Dolayısıyla bu gereksinimlerin giderilmesi için ülkeler yeni enerji yatırımları yapmaktadırlar.

Enerji kullanımının önemli bir kısmını fosil (Kömür, petrol ve doğal gaz vb) kaynaklar oluşturmaktadır. Bu yakıtların içerisinde bulunan karbonun yanması ile ortaya çıkan gazların çevre ve insan sağlığı açısından olumsuz etkileri atmosferde gittikçe artmaktadır. Bu da yanma sırasında ortaya çıkan CO₂ ve metan gibi sera gazlarının iklim değişikliğine yol açması sonucunu doğurur.

Ayrıca fosil kaynakların yakın gelecekte tüeneceği tahmin edilmektedir. Bununla birlikte ülkelerin nüfus artışıyla birlikte sanayi ve ekonomik gelişmeler artarken, enerjiye olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Fosil yakıtların azalması ve çevresel sorunlar, uluslararası sözleşmeler (Kyoto Protokolü vb.) gereğince CO₂ ve diğer sera gazı emisyonlarının azaltılması zorunluluğu, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı son derece arttırmıştır.

Son yıllarda küresel ısınma ile ilgili artan çevresel kaygılar ve karbon emisyonlarının zararlı etkileri rüzgar, deniz, güneş, biyokütle ve jeotermal enerji gibi temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yeni bir talep oluşturmuştur. Bunlar arasında, rüzgar ve güneş enerjisi alanında son 10 yılda oldukça hızlı bir gelişme yaşanmıştır. Her ikisi de kirliliğe sebep olmayan güç kaynaklarıdır. Hem de buna ek olarak yük merkezlerinin yakınında güç üretirler; dolayısıyla kırsal ve kentsel peyzajlarda yüksek gerilim-iletim hatlarının işletilmesi ihtiyacını ortadan kaldırırlar. Pek çok ülkede düzensizlik, özelleştirme ve yeşil enerji tüketim tercihleri, rüzgar ve fotovoltaik (PV) enerji piyasalarını artan bir hızla genişletmektedir.

Günümüzde yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda araştırmalar artarak devam etmektedir. Nükleer enerji konusu ise yapım zorlukları, maliyetlerin yüksekliği

ve radyasyon riskleri nedeniyle tartışmalara neden olmaktadır. Ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynakları konularında hem devletin hem de özel sektörün araştırmaları hızla devam etmektedir.

Enerji kaynakları genel anlamda;

- Fosil Yakıtlar (doğal gaz, kömür, petrol...)
- Nükleer enerji
- Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları

olarak sınıflandırılabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise;

- Güneş enerjisi,
- Rüzgar enerjisi,
- Jeotermal enerji,
- Hidroelektrik enerjisi,
- Biyoenerji,
- Hidrojen enerjisi,
- Dalga enerjisi ve okyanus termal enerjisi

olarak sınıflandırılır.

Bu tez çalışması dikey eksenli rüzgar türbinlerinin verimlerini etkileyen parametrelerin değiştirilmesiyle hangi durumda daha verimli bir türbin imalatı olacağı sorusuna yanıt niteliğindedir. Dikey eksenli rüzgar türbinleri ilk harekete kolay geçememekle birlikte yüksek rüzgar hızlarında verimsiz çalışmaktadır. Bunun en temel sebeplerinden biri türbinin kanadının türbin mili etrafında dönmesi sırasında rüzgarın kanadın dönüş yönüne karşı hareket etmesidir. Bu bölgede rüzgar, türbine karşı bir negatif tork bölgesi oluşturur ve türbini durdurmaya çalışır. Bu dezavantajın yanısıra DERT'lerin jeneratör, şanzıman ve diğer bileşenlerinin zeminde olması, bakımının daha kolay olmasını ve üretim, kurulum, taşıma maliyetlerinin YERT' lere göre daha düşük olmasını sağlar. Rüzgarı her yönden aldığında çalışabilmesi yine rüzgar yönünün değişken olduğu bölgelerde YERT'lere göre avantajlı olduğu bir durumdur. Ayrıca kanatları YERT'lerden daha düşük hızlarda döndüğu için oluşan gürültüyü ve bulunduğu çevredeki kuşların yaralanma riskini azaltır. Bu gibi özellikler DERT'leri kentselleşmenin hakim olduğu bölgelerde, özellikle konut, apartman gibi ortamlarda, YERT'lere göre daha elverişli

kılar. Bu çalışma DERT'lerin kentsel yaşam alanlarında kullanımının artmasını sağlayarak yüksek maliyet, büyük ebatlarda ekipman ve buna bağlı işgücüne ihtiyaç duyulan YERT'lere ihtiyaç olmadan, DERT'ler yardımıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan temiz rüzgar enerjisinin kullanımını ülkemizde yaygınlaştırmak amaçlanmıştır.

Bu tezde incelenen H-Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbini tasarımındaki gelişmeler yıllar boyunca devam etmiştir ve birçok araştırmacı, optimum tasarımı elde etmek için sayısal ve analitik yöntemler kullanarak türbinin performansını etkileyen farklı değişken ve parametreleri incelemiştir.

R.Lanzafame ve ark. (2014) tarafından bildirildiğine göre; Re (Reynolds) sayısının düşük olduğu durumlarda kanat davranışları HAD (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği) modellemelerinde en büyük problem durma probleminin hesaba katılmasıdır. Bu iyi bilinen bir sorundur ve temel olarak RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation) türbülans modellerinin ters basınç gradyanlarından kaynaklanan sınır tabaka ayrılmalarını yakalamadaki verimsizliğinden kaynaklanır. Herşeyden önce düşük Re' da sınır tabakanın önemli bir kısmının laminar olması nedeniyle klasik bir tam türbülanslı modelin kullanılması sınır tabakanın gerçek davranışını tahmin edemez. Laminar sınır tabaka aslında ters basınç gradyanlarına oldukça duyarlıdır ve bu da türbülanslı bir sınır tabakayla karşılaştırıldığında daha erken bir akış ayrılığına ve sonunda yeni başlayan derin bir duruşun fiziksel olmayan bir simülasyonunun oluşmasına neden olur. Bu nedenle DERT'lerin (Dikey eksenli rüzgar türbini) düşük Re 'da çalışması ve durma etkisi onları modellemede çok önemlidir. Dolayısıyla kalibre edilmiş bir geçiş modelinin kullanılması, kanatların aerodinamik davranışları ve DERT'lerin performansının daha iyi bir tahmininin yapılmasını sağlar. (Lagtry ve ark. 2006, Menter ve ark. 2006, Sørensen 2009, Lanzafame ve ark. 2013).

Bu çalışmalarla birlikte türbülans, kapalı alan tahminleri için daha yüksek korelasyonların asla bitmeyen hiyerarşisi haline gelmiştir. Tong (2010), Menter (1994) 'in geliştirdiği SST (Shear Stress Transport) k-W türbülans modelinin o günlerde rüzgar türbini uygulamalarında sık kullanılan model olduğunu belirtmiştir. k (birim kütle için) türbülans

kinetik enerji, w ise lokal bir frekans ölçeğini ifade eder. Fakat tüm bu ampirik türbülans modelleri sadece tam gelişmiş türbülanslı akışı tanımlar ve laminardan türbülanslı akışa geçiş bölgesini çözümleyemez.

SST k-W, standard k-W modelinin bir çeşididir. Duvarlardan uzak bölgelerde standard k- ϵ modelini, duvarlara yakın yerlerde ise orijinal Willcox modelini temel alan standard k-W modelini birleştirerek bir karışım fonksiyonu olarak birlikte kullanır. (Anonim 2017)

Lanzafame (2014), yaptığı çalışmada belirli bir aralıkta belirlediği uç hızı oranları için elde ettiği Re sayılarıyla türbülanslı bir akışı SST k-W modeliyle modelleyerek önceki yıllarda yapılan korelasyonlardan faydalanarak en doğru sonuçlara bu modelleme yoluyla ulaştığını belirtmiştir. Bu nedenle bu tezde de Lanzafame'nin kullandığı uç hızı oranları kullanılarak akışın türbülanslı olduğu tespit edilmiş ve sonrasında SST k-W modeli kullanılarak doğru tahminlerin yapılması amaçlanmıştır.

Gün geçtikçe önemi artan ve daha fazla ihtiyaç duyulan yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili bu ve benzeri çalışmalar, dikey eksenli rüzgar türbinlerinde ilk harekete geçiş kolaylığı ve daha iyi bir verim alınması bakımından önemlidir.

1.1. Rüzgar Enerjisi

Dünyada yenilenebilir enerji kullanım oranı yıllar geçtikçe artmaktadır. Bunlardan en göze çarpanları hidrolik enerji ve rüzgar enerjisidir. Rüzgarın var olduğu her yerde uygulanabilir olması, zararlı emisyonunun olmaması, dışa olan enerji bağımlılığını azaltması sayesinde rüzgar enerjisinin kullanım alanı da hızla genişlemektedir.

Rüzgar enerjisinin ana kaynağı güneştir. Güneş var olduğu sürece rüzgar olacağından rüzgar enerjisi yenilenebilir enerji kaynağı olarak adlandırılır. Güneş yeryüzünde (karalar, denizler) farklı sıcaklıklar oluşturur ve buna bağlı olarak rüzgarlar oluşur. Rüzgarın kinetik enerjisi, elektrik enerjisi veya mekanik enerji gibi diğer enerji formlarına dönüştürülebilir. Rüzgar enerjisinin en eski kullanım alanlarından biri ulaşımıdır.

Denizlerde gemileri hareket ettirmek için yelken açarak rüzgar enerjisi kullanılmıştır. Çiftçiler de su pompalamak, tahıl öğütmek için rüzgar enerjisini kullanmışlardır. 20. yüzyıldan itibaren ise elektrik üretimi için yaygın olarak rüzgar enerjisi kullanılmış ve modern rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisini elektriğe dönüştüren önemli makineler haline gelmiştir.

1.2. Rüzgar Enerjisi Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları

Rüzgar enerjisi kullanımının avantajları şunlardır:

- Çalışırken zararlı gazlar yaymadıklarından temiz bir enerji kaynağıdır.
- Rüzgarın kaynağı güneş olduğundan sonsuz bir enerji kaynağıdır. Bundan dolayı rüzgar enerjisi sürdürülebilir bir kaynaktır.
- Rüzgar türbinlerinin kurulumu kısa sürer ve işletilmesi diğer türbin tiplerine kıyasla daha kolaydır.
- Enerji üretim maliyetleri düşüktür.
- Enerji güvenilirliğine katkı sağlar.

Rüzgar enerjisi kullanımının dezavantajları şunlardır;

- Rüzgar hızı sürekli değişken olduğundan değişken miktarda enerji üretilir.
- Rüzgar türbinleri hem görüntü hem de ses kirliliğine neden olur.
- Fosil yakıtlardan elde edilen enerjiye oranla enerji üretimi daha düşüktür.
- Yatırım maliyetleri yüksektir.
- Sinyal kirliliği oluşturabilir.
- Türbin kanatları döndüğünde kuşlara zarar verebilir.

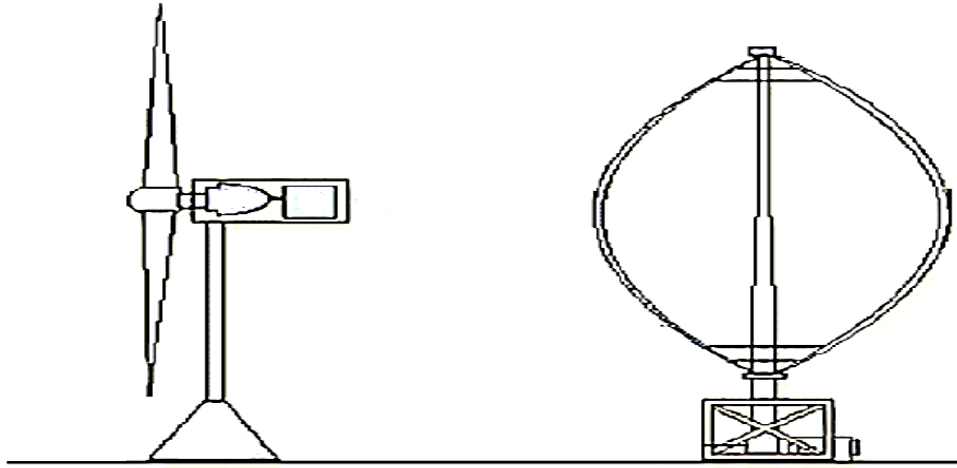
1.3. Türbin Tipleri

Rüzgar türbini rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren makinedir. Rüzgar türbinleri; türbin jeneratörü konfigürasyonu, hava akışının türbin rotoruna göre konumu, türbin kapasitesi, jeneratör sürüş modeli, güç kaynağı modu ve türbin

kurulumunun konumuna göre sınıflandırılabilir. Ancak en genel anlamda rüzgar türbinleri, dönme eksenlerine göre iki gruba ayrılır (Ghazali 2016):

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Yatay Eksenli Rüzgar Türbini (YERT) yatay şafta sahipken, Dikey Eksenli Rüzgar Türbini (DERT) dikey şafta sahiptir. Şekil 1.2 bu iki farklı rüzgar türbinini göstermektedir.



Şekil 1.1 Yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinleri (Eriksson 2006)

1.3.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT)

Yatay Eksenli Rüzgar Türbini (YERT), Şekil 1.2' de gösterildiği gibi dönme eksenini yere paraleldir. Bu rüzgar türbinleri hem açık denizde hem de karada konumlandırılmış büyük rüzgar çiftlikleri için kullanılır (Eriksson 2006).



Şekil 1.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri (deniz ve kara uygulaması)
(Eriksson 2006)

Bu türbinlerde kanat sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Ayrıca tek kanatlı (Şekil 1.3), iki kanatlı (Şekil 1.4) ve üç kanatlı (Şekil 1.2) olacak şekilde imal edilebilirler. Tek kanatlı türbinlerde dönme hızı daha yüksektir. Ancak tek kanat olmasından dolayı rotorda dönme dengesizliği oluşur. Bundan dolayı uygulama alanı bulamamıştır.



Şekil 1.3 Tek kanatlı rüzgar türbinleri
(Anonim 2017)

İki kanatlı türbinlerin rotoru, tek kanatlı türbinlere göre daha düzgün çalışır. Üç kanatlı türbinlere göre kanat maliyeti düşük olmasına rağmen ortaya çıkan dengesiz dinamik

davranışları önlemek için ilave ekipmanlar gerektirdiğinden maliyet artar ve dolayısıyla pek tercih edilmez. Yaygın olarak üç kanatlı türbinler kullanılmaktadır. Üç kanat türbinlerde dönme momenti daha düzgündür.

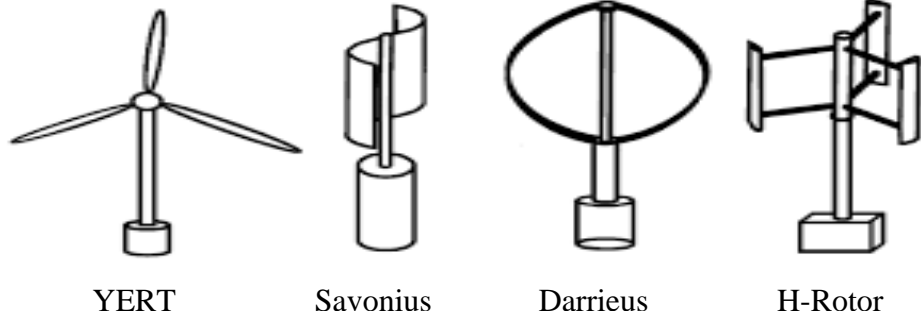


Şekil 1.4 İki kanatlı rüzgar türbini (Anonim 2019)

1.3.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT)

Dikey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin keşfi çok uzun yıllar öncesine dayanmaktadır. Yel değirmenleri tarihinin milattan önceye gittiği, o tarihlerde insanların tahıl öğütmek için basit bir dikey eksenli rüzgar türbini kullandığı belirtilmiştir. Türbin rotoru, rüzgarların itmesiyle dönen bir çerçeveye bağlıdır ve sazlık demetlerinden yapılmıştır (Mittal 2001).

Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. DERT rüzgarı her yönden kabul edebilme üstünlüğüne sahiptir. Türbinlerin vites kutusu ve jeneratör yer seviyesinde olduğundan yüksek kule ihtiyacı yoktur. Bu türbinlerin birkaç çeşidi vardır. Şekil 1.5'te en solda YERT'in yüksek kuleli diğer dikey eksenli türbinlerince jeneratör ve vites kutusu elemanlarının yer seviyesinde olduğu görülmektedir. (Eriksson ve ark. 2006)



Şekil 1.5 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (Eriksson ve ark. 2006)

Savonius rüzgar türbinleri

Dikey Eksenli bir Savonius Rüzgar Türbini şekil 1.6' da gösterilmektedir. 1922' de Finlandiyalı mühendis Sigurdj Savonius tarafından icat edilmiştir. Rotorunun tasarımı, küçük simetrik iki yarı dairesel kova şeklindedir. Sürüklenme tipi türbinler rüzgar hızından daha hızlı dönemez. Maksimum uç hızı oranı bir veya daha küçük bir değere eşittir (D'Ambrosio ve ark. 2010).



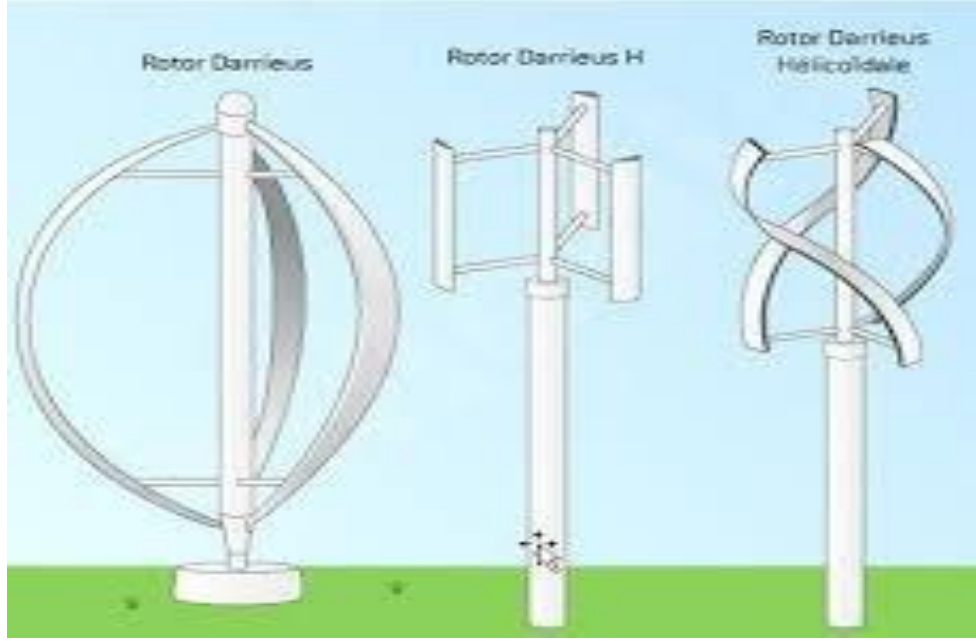
Şekil 1.6 Savonius Rüzgar Türbinleri (D'Ambrosio 2010)

Darrieus rüzgar türbinleri

Darrieus tipi Dikey Eksenli Rüzgar Türbini şekil 1.7'de gösterilmektedir. 1931'te Fransa'nın Georges Jean Marie Darrieus tarafından icat edilmiştir ve 1960'ların sonunda Kanada'da yeniden geliştirilmiştir. Darrieus DERT'ler verimli bir türbin olarak tanınmaktadır. Şanzıman ve jeneratör gibi ağır ekipmanları sabittir, zemin seviyesinde bulunur ve bu Darrieus DERT'ne bakım kolaylığı sağlar. Yüksek hızlarda çalışabilirler ve 2 ya da 3 kanatlı yapılardır. İlk hareket için Savonius bir tahrik motoruna ihtiyaç duyar (Aboufares 2015).

H-Rotor rüzgar türbinleri

Kanat yapısı H şeklinde olan dikey eksenli türbinlere H-Darrieus türbinleri denir. Normal Darrieus RT'den farkı aerodinamik profilinin düz ve kanatlarının kontrol edilebilir olmasıdır. Bunların dışında kanat yapısı helis şeklinde olan dikey eksenli türbinler ise küçük uygulamalar için geliştirilmiştir(Şekil 1.7).



Şekil 1.7 Darrieus Rüzgar Türbinleri (Özkılınç H. 2014)

1.4. Dikey Eksenli Türbinlerin Avantaj ve Dezavantajları

1.4.1. Avantajlar

- Jeneratör, şanzıman ve diğer bileşenler zemindedir. Böylece bakım için daha erişilebilir haldedir.
- Yatay eksenli türbinlere kıyasla üretim, kurulum ve nakliye maliyeti daha düşüktür.
- Türbinin etkili olması için rüzgara bakması gerekmez. Bu, rüzgar yönünün oldukça değişken olduğu bölgelerde bir avantajdır.
- Kanatlar yatay türbinlerden daha düşük hızlarda döner ve kuşların yaralanma riskini azaltır.
- Yatay eksenli rüzgar türbininden önemli ölçüde daha sessizdir.
- Sonuç olarak, dikey eksenli rüzgar türbinleri çatılarda iyi çalışır, bu da onları özellikle konut ve kentsel ortamlarda faydalı kılar.

1.4.2. Dezavantajlar

- Yatay eksenli rüzgar türbinlerinden daha az verimlidirler. Çoğu, kanatları rüzgara döndüğü için sahip oldukları ek sürtünme nedeniyle verimleri düşer.
- Zemine yakın yerlerde rüzgar hızları düşüktür. Bu türbinlerde yüzeye yakın olduklarından elde edilen güç düşüktür.
- Zemine yakın hava akışı ve diğer nesnelere titreşim sorunlarına neden olabileceği gibi türbülanslı akış oluşturabilir. Bu da çeşitli sorunlara neden olur.
- Türbini tutmak için gergi telleri gerekebilir. Gergi telleri tarım alanlarında engel oluşturabilir.

1.5. Küçük Ölçekli Rüzgar Enerjisi

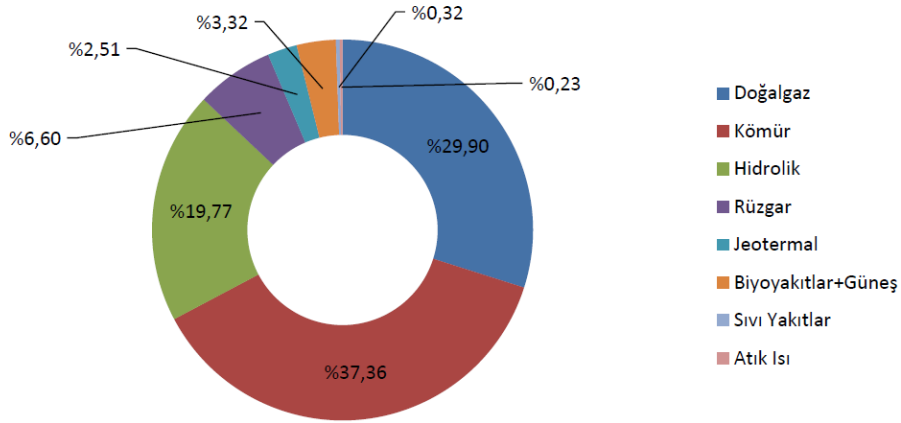
Büyük rüzgar enerjisi sistemleri, uzun iletim hatları ve büyük kurulum ekipmanları gerektirdiğinden yüksek enerji ihtiyacı olan nüfus merkezlerinden uzak olan açık deniz sahaları da dahil olmak üzere bu gibi nüfusun yoğun olduğu merkezlere uzak yerlere yapılır. Küçük türbinler, kurulum maliyetlerini azaltarak küçük güçlerde avantajlı olabilirler. Diğer yandan, küçük DERT'lerin avantajları küçük YERT'lere göre daha fazladır. Çünkü daha yüksek türbülanslı ve düşük rüzgar hızındaki kentsel alanlarda YERT'ler iyi çalışmazlar. Teğetsel hız ile serbest akış hızı arasındaki oran olarak tanımlanan YERT'nin uç hız oranı, genellikle yaklaşık 5 ila 7'dir ve bu yüksek hızda, kanatlar hava akışını keserek yüksek aerodinamik gürültü üretir, ayrıca birçok kuş bu yüksek hızlı kanatlardan kaçamayabilir. DERT'nin uç hızı oranı genellikle 1.5 ila 2'dir. DERT'nin düşük uç hızı oranıyla çalışması çok düşük aerodinamik gürültü üretir. Bundan dolayı DERT'ler kentsel kamu tesisleri ve yerleşim alanlarında rüzgar türbini kurulumunu mümkün hale getirmiştir (Howell ve ark. 2010).

Rüzgar teknolojisi ile ilgili malzeme bilimi, aerodinamik, analitik yöntemler, deney ve testler yeni rüzgar türbinlerinin oluşturulmasına katkıda bulunmuştur. Bu tez, DERT türlerinden olan Darrieus rüzgar türbininin aerodinamik performansı ve güç üretimi analizi üzerinedir. Türbinlerin aerodinamik performans çalışmaları şu yöntemlerle yapılabilir: Analitik çözüm, rüzgar tüneli testi, rüzgar alanı testi ve sayısal simülasyon yöntemi. Her ne kadar rüzgar tüneli ve rüzgar sahası testi en güvenilir teknikler olsa da,

yüksek maliyetlere ve uzun çalışma zamanına ihtiyaç duyarlar. Sayısal yöntemlerin gelişmesiyle, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) teknolojisi rüzgar türbinleri için aerodinamik performans analizi çok önemli bir araç haline gelmiştir. Bu çalışmada, verimli Darrieus rüzgar türbini simüle edilmiş, farklı kanat sayıları ve türleri incelenmiştir.

1.6. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

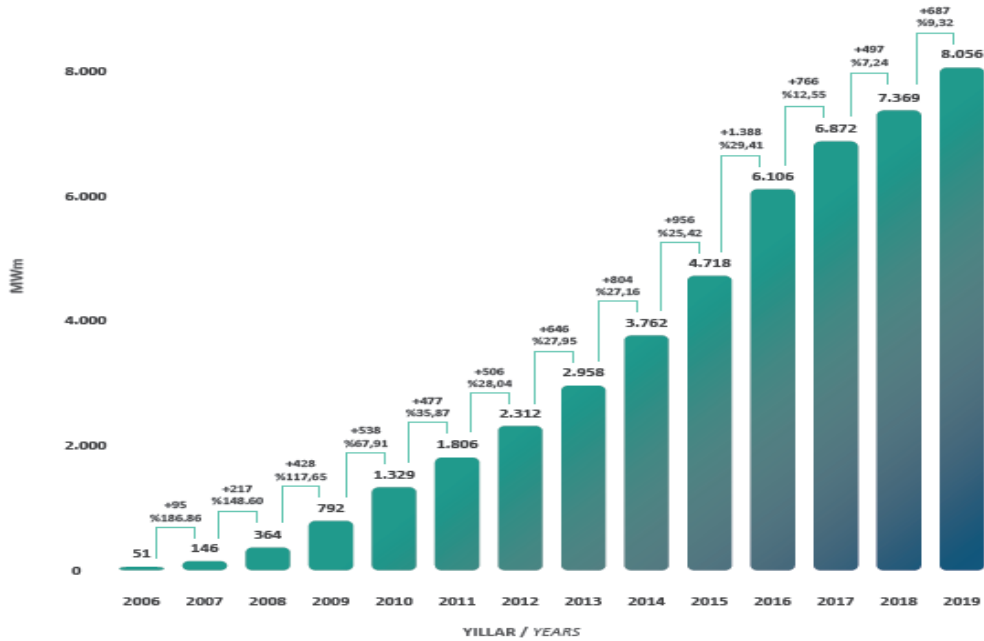
Türkiye’nin elektrik tüketimi 2018 yılında %2,06 artarak 302,8 milyar kWh, elektrik üretimi ise %2,05 oranında artarak 303,38 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir (TEİAŞ 2018). Elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı 2018 yılı itibariyle, %37,4 kömürden, %29,9’u doğal gazdan, %19,8’i hidrolik kaynaklardan, %6,6’sı rüzgardan, %2,5’i jeotermalden, %0,3’ü sıvı yakıtlardan, %3,3’ü biyoyakıtlar ve güneş enerjisinden ve %0,2’si atık ısı şeklindedir (Şekil 1.8). 2017 yılı ile kıyaslandığında hidrolik kaynaklar, kömür, jeotermal, biyoyakıtlar, rüzgar ve güneşten yararlanma oranı artarken; doğal gaz, sıvı yakıtlar ve atık ısıdan yararlanma oranında düşüş yaşanmıştır (Anonim 2019).



Şekil 1.8 2018 Yılı sonu Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı (Anonim 2019)

Türkiye'de özel sektöre açılan elektrik üretimi sektöründe özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yürürlüğe konulan yasal düzenlemeler ve sağlanan teşviklerin etkisiyle Ocak 2019 itibariyle, rüzgar santrali (RES) yapmak için 93 santralda 3,115 MW'lık ilave kapasitenin EPDK'dan lisans almış durumda olduğu biliniyor(EPDK 2019). Türkiye'deki rüzgar enerjisi kurulu gücü ise 2016 yılında 5,751 MW'a, 2017 yılında 6,516 MW'a ve 2018 yılında da 7,005 MW'a ulaşmış bulunmaktadır(Anonim 2019).

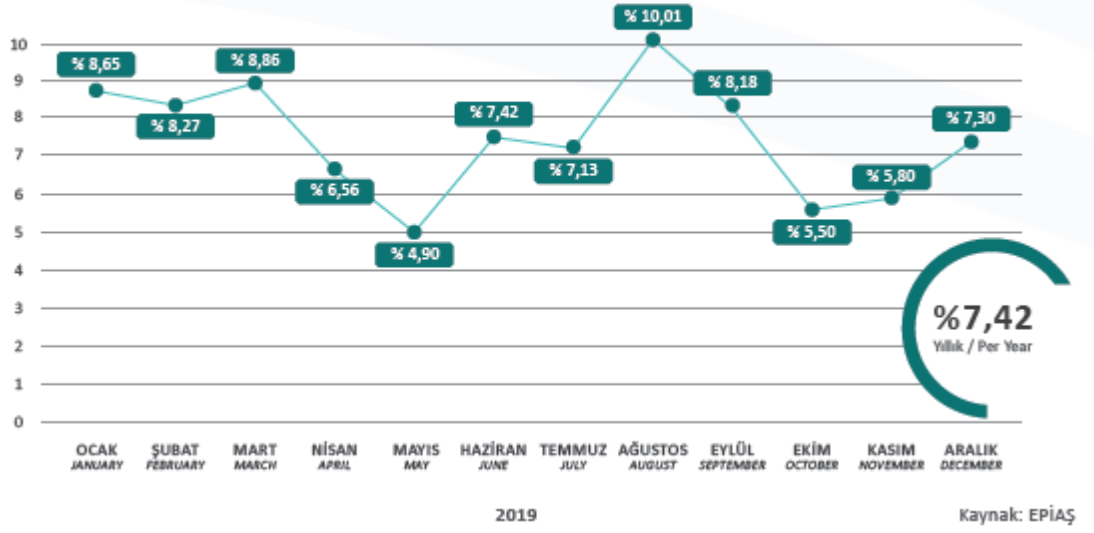
Görüldüğü üzere yenilenebilir enerji sektörü Türkiye'de yeni gelişmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji eldesi gitgide artmaktadır. Son yıllarda, Türkiye'de rüzgar enerjisi santrallerinin (RES) yaygınlaşmasına yönelik ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Şekil 1.9'da Türkiye rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılım değerleri incelenebilmektedir.



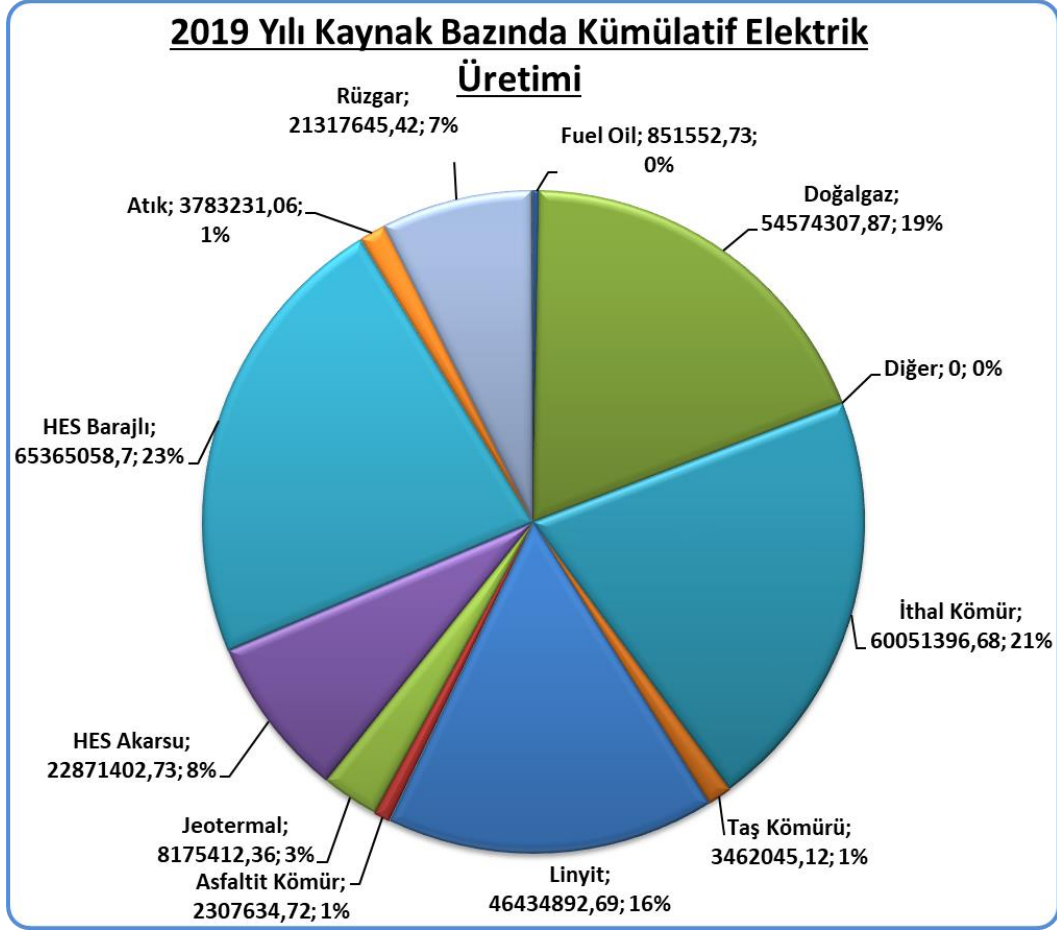
Şekil 1.9 Türkiye'de rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı (Anonim 2020)

Şekil 1.10'da Türkiye'de rüzgar santrallerinden elde edilen enerjinin 2019 yılında elektrik üretimindeki payı verilmiştir. Anlaşılacağı üzere rüzgardan elde edilen enerji ortalama %7,42 olarak tespit edilmiştir. Artan yatırımlar nedeniyle bu oranın artması

beklenmektedir. Şekil 1.11’de ise 2019 yılına ait kaynak bazında kümülatif elektrik üretimi verilmiştir.

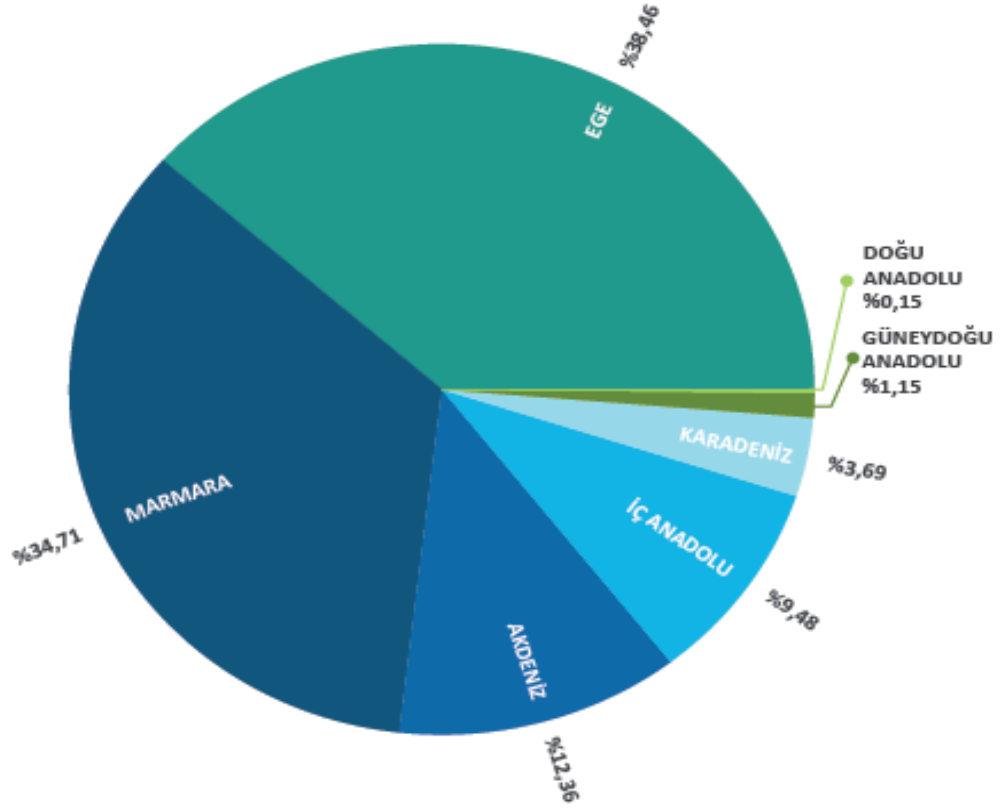


Şekil 1.10 Türkiye’de rüzgar santrallerinin elektrik üretimindeki payı (Anonim 2020)



Şekil 1.11 2019 yılına ait kaynak bazında kümülatif elektrik üretimi (Anonim 2020)

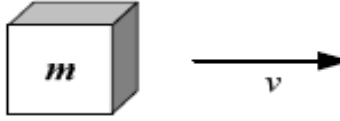
Türkiye’de rüzgar bakımından en zengin bölgeler Ege ve Marmara Bölgesi’dir. Bundan dolayı rüzgar kurulu gücü bu iki bölgede yoğunluk kazanmaktadır. Şekil 1.12’de bu durum görülmektedir(Anonim 2020).



Şekil 1.12 Rüzgar kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı (Anonim 2020)

1.7. Rüzgar Enerjisi Hesabı

Rüzgar kinetik enerjiye sahiptir. Türbinler bu enerjiyi mekanik enerjiye, ardından rotora bağlı jeneratör ise elektrik enerjisine çevirir. SI birim sistemine göre “ v ” hızı ile hareket eden “ m ” kütleli havanın kinetik enerjisi;



A 3D rectangular block with the letter 'm' inside is shown on the left. To its right is a horizontal arrow pointing to the right, with the letter 'v' centered below it.

$$W_{KE} = \frac{1}{2}mv^2 \text{ (Joule)} \quad (1.1)$$

Şeklinde hesaplanır.

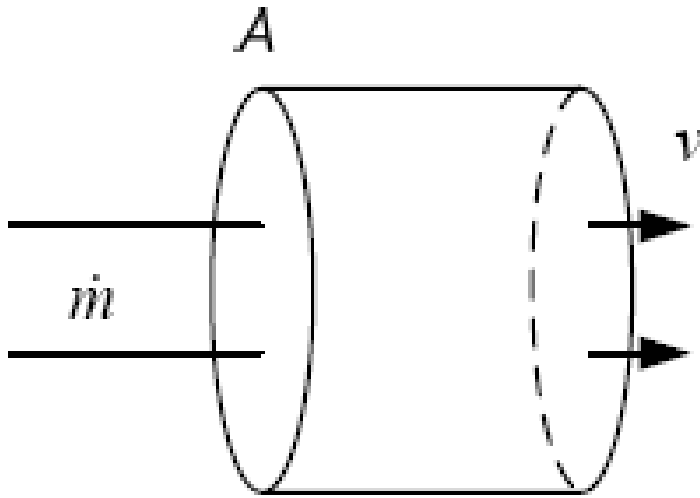
Bu şekilde hareket eden hava akımının gücü P , kinetik enerjisinin birim zamandaki değişimine eşit olacaktır.

$$P = \frac{dW_{KE}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2$$

$$\frac{dm}{dt} = \text{Birim zamanda akan kütle}$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}v^2 \quad (1.2)$$

Buradan; A alanı boyunca v hızı ile hareket eden hava kütlesinin gücü;



Hacimsel debi : $\dot{Q} = A v$ ve $\dot{m} = \rho \dot{Q}$ olduğundan;

Kütlesel debi :

$$\dot{m} = \rho A v$$

(1.3)

olarak yazılabilir.

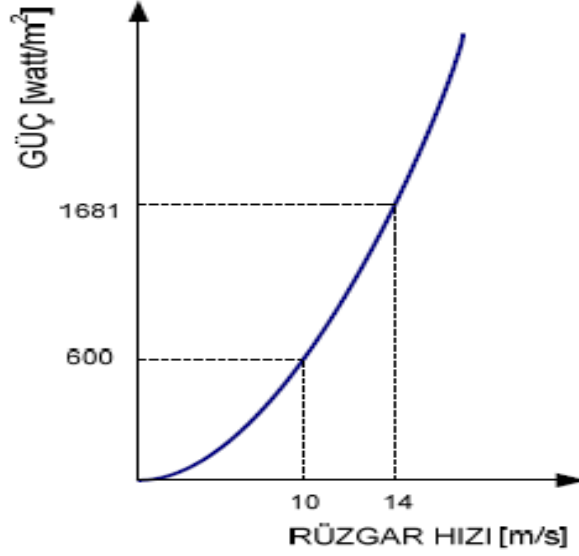
Buradan;

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

$$P_{Rüzgar} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.4)$$

olarak yazılabilir.

1.8. Rüzgar Hızı – Güç İlişkisi



Şekil 1.13 Rüzgar hızı-güç grafiği

Burada verilen güç, birim m^2 başına karşılık gelen güç olup, bu büyüklük bir bölgenin spesifik gücü olarak veya güç yoğunluğu olarak adlandırılır. Dolayısıyla bir bölgenin spesifik gücü;

$$P_{Spesifik} = \frac{P_{Rüzgar}}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (1.5)$$

olup birimi (watt / m^2)'dir.

Yukarıdaki eşitlik gereğince rüzgarın gücü;

1. hızın küpüyle ($P_{Rüzgar} \propto v^3$),
2. türbin rotorunun süpürdüğü alan ($P_{Rüzgar} \propto A$)
3. ve havanın yoğunluğu ($P_{Rüzgar} \propto \rho$) ile orantılıdır.

$P_{\text{Rüzgar}} \propto v^3$

Rüzgar hızının iki katına çıkması gücün 8 kat artması anlamına gelir. Yani rüzgâr türbininin 1 saatte 20 m/h rüzgar hızında yakaladığı enerji, 10 m/h hızında 8 saatte elde edilir.

$P_{\text{Rüzgar}} \propto A$

Yatay eksenli türbin için rotor süpürme alanı;

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (D: \text{Rotor çapı}) \quad (1.6)$$

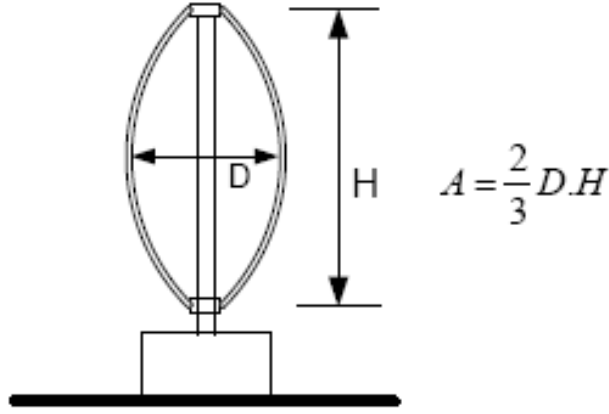
Görüldüğü üzere A alanı yatay eksenli türbinlerde rotor çapının karesi ile orantılıdır. Dolayısıyla rüzgar gücü “ D^2 ” ile orantılıdır ($P_{\text{Rüzgar}} \propto A$). Yani kanat çapı iki katına çıkarıldığında, rüzgar gücü 4 katına çıkar. Bu basit inceleme daha büyük rüzgar türbinleri ile çalışma konusunda ekonomik skala hakkında bize genel karşılaştırma imkanı verir. Bir rüzgar türbininin maliyeti yaklaşık kanat çapı ile orantılı olarak artar, halbuki güç kanat çapının karesi ile orantılıdır. Sonuç olarak daha büyük rüzgar türbinleri daha ekonomiktir.

Düşey eksenli türbin için rotor süpürme alanı:

Düşey eksenli rüzgar türbininin (rotorun) süpürdüğü alan tam dairesel olmamasından dolayı daha karmaşık bir yapı arz eder. Bu alan yaklaşık olarak:

$$A = \frac{2}{3} DH \quad (D: \text{Rotor çapı}) \quad (1.7)$$

Şeklinde ifade edilir.



Şekil 1.14 Dikey eksenli rüzgar türbini(DERT)

PRüzgar **a** **ρ**

Sıcaklığın Hava Yoğunluğuna (Air Density) Etkisi

$$\rho = \frac{P \times MA \times 10^{-3}}{R \times T} \quad (1.8)$$

Burada ρ ile ifade edilen yoğunluk bulunurken; R ideal gaz sabiti $8.2056 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3 atm}{K mol} \right]$ alınır, P mutlak basıncı 1 atm kabul edilir, T mutlak sıcaklığı Kelvin cinsinden ($K = ^\circ C + 273,15$) hesaplanırken, MA gazın moleküler ağırlığının birimi (g/mol) iken işlem yapılır.

Hava(%100)≈Nitrojen(%78,8)+Oksijen(%20,95)+Argon(%0,93)+Karbondioksit(%0,035)+Neon(%0,0018)

$$M_{A_{\text{hava}}} = 0.7808 \times 28,02 + 0,2095 \times 32 + 0,0093 \times 39,95 + 0,00035 \times 44,01 + 0,000018 \times 20,18 = 28,97 \text{ (g/mol)}$$

Rakımın (Altitude) Hava Yoğunluğuna Etkisi:

$$P = P_0 e^{-1,18575 \times 10^{-4} H} \quad (1.9)$$

Burada referans basınç yani P_0 , 1 atm kabul edilerek, rakım yüksekliği H metre cinsinden hesaba katılır.

1 atm basıncı altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi ve 15°C ' de hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile olan değişimi Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Kule Yüksekliğinin Etkisi

Rüzgar gücü, rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, rüzgar hızındaki ufak bir artış bile ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Türbini yüksek hızlı rüzgarlara maruz bırakmanın bir yolu da, türbinleri daha uzun kulelere monte etmektir. Yer seviyesinin ilk birkaç yüz metre yüksekliklerinde, rüzgar hızı yeryüzü ile olan sürtünme ve etkileşiminden dolayı oldukça fazla etkilenir. Pürüzsüz yüzeyler örneğin; durgun deniz yüzeyi rüzgara karşı oldukça düşük bir direnç gösterir. Rüzgar hızındaki değişim oranı yüksekliğin artmasıyla birlikte daha düşük seviyelerde kalacaktır. Diğer yandan yüzey rüzgarları oldukça tümsekli arazilerde, orman ve bina alanlarında oldukça düşük olacaktır.

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (1.10)$$

Burada; H yüksekliğindeki rüzgar hızı v , H_0 referans yükseklikteki rüzgar hızı v_0 ve yüzeyin yapısına bağlı olarak değişen sürtünme katsayısı da α ile gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Hava yoğunluğunun sıcaklık ve basınç ile değişimi

Sıcaklık (°C)	Hava Yoğunluğu (kg/m³)	Rakım (m)	Basınç (atm)	Hava Yoğunluğu (kg/m³)
-21	1,400	0	1,000	1,225
-18	1,384	100	0,988	1,211
-15	1,368	200	0,977	1,197
-12	1,352	300	0,965	1,182
-9	1,337	400	0,954	1,168
-6	1,322	500	0,942	1,155
-3	1,307	600	0,931	1,141
0	1,293	700	0,920	1,128
3	1,278	800	0,910	1,114
6	1,265	900	0,899	1,101
9	1,251	1000	0,888	1,088
12	1,238	1100	0,878	1,075
15	1,225	1200	0,867	1,063
18	1,213	1300	0,857	1,050
21	1,200	1400	0,847	1,038
24	1,188	1500	0,837	1,026
27	1,176	1600	0,827	1,014
30	1,165	1700	0,817	1,002
33	1,153	1800	0,808	0,990
36	1,142	1900	0,798	0,978
39	1,131	2000	0,789	0,967
42	1,120	2100	0,780	0,955

Çizelge 1.2. Sürtünme katsayısının yeryüzü karakteristiğine bağlı değişimi

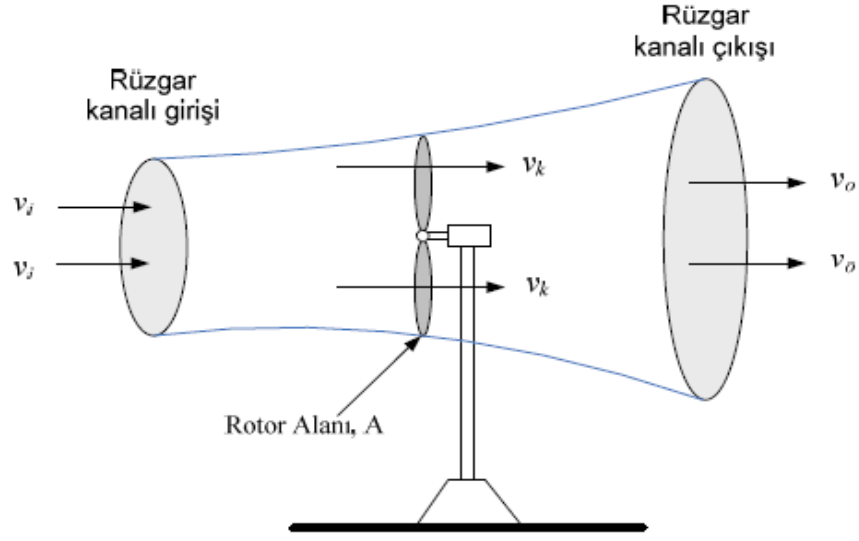
Yeryüzü Karakteristiği	Sürtünme Katsayısı, α
Pürüzsüz sert toprak, durgun su	0,10
Toprak seviyesinde uzun çimenli bölge	0,15
Toprak seviyesinin üzerinde daha uzun mahsul	0,20
Kırsal orman alanları, birçok ağaç	0,25
Ağaçlık ufak kasabalar	0,30
Uzun binalarla dolu büyük şehirler	0,40

1.9. Rüzgardan Elde Edilen Güç (Mekanik Güç)

Kanatları kesen rüzgarın tamamı rotorda mekanik güce dönüşmez. Rüzgarın kinetik enerjisinden elde edilen mekanik güç ifadesi için rotor verimi hesaplanmalıdır. Rotor kanatları tarafından yakalanan gerçek güç miktarı, rüzgar kanalı girişi ile rüzgar kanalı çıkışı hava akışları arasındaki kinetik enerjilerin farkıdır.

$$P_k = \frac{1}{2} \dot{m}(v_i^2 - v_0^2) \quad (1.11)$$

$$v_k = \frac{v_i + v_0}{2} \quad (1.12)$$



Şekil 1.15 Rüzgar türbininde akış durumu

Dönen kanatlar boyunca hareket eden havanın kütle akış oranı ortalama hız ile hava yoğunluğunun çarpımından elde edilir.

$\dot{m} = \rho A v_k = \rho A \frac{v_i + v_o}{2}$ ifadesi güç denkleminde yerine konulursa,

$P_k = \frac{1}{2} \left(\rho A \frac{v_i + v_o}{2} \right) (v_i^2 - v_o^2)$ olur. İfade düzenlenerek,

$$P_k = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 \frac{\left(1 + \frac{v_o}{v_i}\right) \left[1 - \left(\frac{v_o}{v_i}\right)^2\right]}{2}$$

$$P_k = \frac{1}{2} \rho A v_i^3 c_p \quad (1.13)$$

elde edilir.

Genel olarak:

$v_i = v$ ve $\lambda = \frac{v_o}{v}$ tanımlanırsa,

$$c_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \quad (1.14)$$

Burada c_p rotor verimi olarak bilinir. Maksimum rotor verimini bulmak için c_p 'nin λ 'ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse:

$$\frac{dc_p}{d\lambda} = \frac{1}{2}[(1 - \lambda)^2 + (1 + \lambda)(1 - 2\lambda)] = 0$$

$$\frac{dc_p}{d\lambda} = \frac{1}{2}(1 + \lambda)(1 - 3\lambda) = 0$$

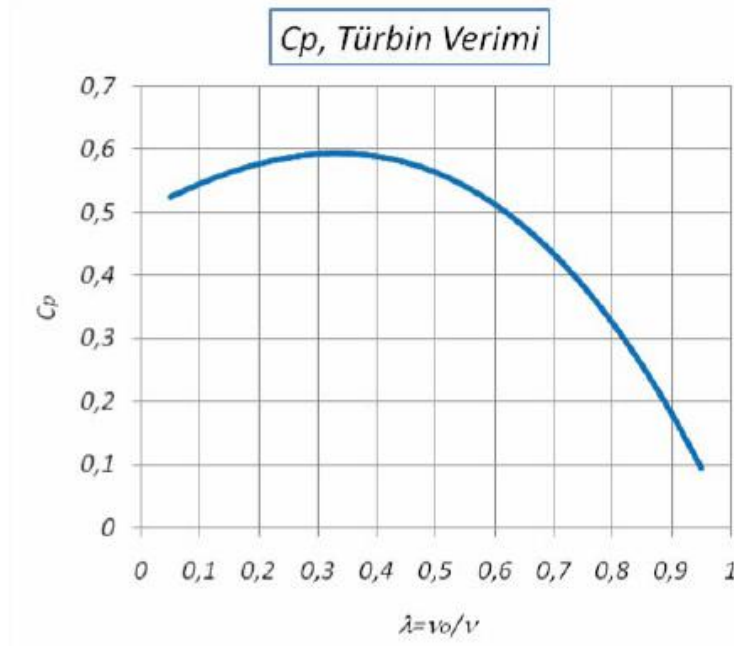
$$\lambda = -1 \quad \text{ve} \quad \lambda = \frac{v_0}{v} = \frac{1}{3}$$

$$\lambda = \frac{1}{3}$$

iken rotor verimi,

$$c_{p,max} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) = \frac{16}{27} = 0,5926 = \%59,26$$

c_p 'nin λ ile değişimi çizilir ise şekil 1.16' da gösterilen eğri elde edilir.



Şekil 1.16 Türbin veriminin hız oranı ile değişimi

Bir rüzgar türbininin verimliliğinde, türbin üzerinden geçerken rüzgarın çektiği yavaşlama ile belirlenen teorik bir sınır vardır. HAWT için sınır $16/27$ 'dir (% 59,3) ve Lanchester-Betz sınırı olarak adlandırılır (Tong 2010). VAWT için sınır $16/25$ 'tir (% 64) (Paraschivoiu 2002). Bu durumda maksimum teorik verim %59,26'dır. Bu değer pratikte 0,5' in altında kalır. Verilen bir rüzgar hızı için, rotor verimi rotor dönüş oranının bir fonksiyonudur. Eğer rotor çok yavaş dönüyor ise verim düşer, çünkü kanatları etkilemeden geçen rüzgar miktarı daha fazladır. Eğer rotor çok hızlı dönüyorsa rotor verimi yine düşer, çünkü bir kanadın neden olduğu türbülans gittikçe artan bir oranla takip eden diğer kanadı etkiler.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dünyada yenilenebilir enerji kullanım oranı yıllar geçtikçe artmaktadır. Bunlardan biri hidrolik enerji diğeri ise rüzgar enerjisidir. Rüzgarın var olduğu her yerde uygulanabilir olması, zararlı emisyonunun olmaması, dışa olan enerji bağımlılığını azaltması sayesinde rüzgar enerjisinin kullanım alanı da hızla genişlemektedir.

Rüzgar enerjisi, temiz bir enerji olduğundan iklim değişikliğine sebep olmaz ve enerji ihtiyacını gidermeye yardımcı olur. Rüzgar enerjisinin yaygınlaşması, fosil yakıtlı elektrik santrallerine olan ihtiyacı azaltır ve bunların yaydığı CO₂, SO₂, NO_x gibi zararlı emisyonları da azaltır. Enerji kaynaklarını çeşitlendirerek fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve böylece ülkelerin enerji güvenliği artar. Son yıllarda tüm ülkelerde rüzgar enerjisi kaynaklarında önemli bir artış kaydedilmiştir. Gittikçe gelişen, yenilenebilir, çevre dostu enerji kaynağı olarak görülen rüzgar enerjisinin gelecek yıllarda elektrik üretiminde daha büyük bir paya sahip olması beklenmektedir (Tong, 2010).

DERT' ler yatay eksenli türbinlerden çok daha önce geliştirilmiş gibi görünmektedir. Bunun nedenlerinden biri, DERT' nin bir tahrik milinin doğrudan rotordan zemin seviyesinde mekanik bir yüke bağlanabilmesi ve bir şanzımana duyulan ihtiyacı ortadan kaldırması gibi bir dizi doğal avantajı olmasıdır. Yüzyıllar önce rüzgar türbinlerinin geliştirilmesinde rol alan ilk öncüler, değirmen taşının dikey ekseninin DERT rotoruna kolayca bağlanabileceği bir uygulamayı tahlil öğütme işlemini gerçekleştirdiler. Geçmişte her türlü rüzgar türbininin tarihsel gelişimini detaylandıran hatırı sayılır sayıda iyi derecede derleme makalesi yayınlanmıştır (Golding 1976).

Darrieus rüzgar türbininin (Darrieus 1931) Troposkien tarafından, H ve V şekilli rotorlar olarak patentleri alınmıştır, ancak o zamandan beri hem aerodinamik hem de yapısal olarak türbini optimize etmek için diğer kanat geometrileri geliştirilmiştir. Bu nedenle, kavisli kanat şekli esas alınarak büyük türbinlerde kullanılmıştır. Darrieus türbini genellikle her dönme sırasında aerodinamik kuvvetlerin periyodik bir değişimi ile karakterize edilir. Ortaya çıkan titreşimli yüklerden kurtulmanın basit bir yöntemi, A. Gorlov (Gorlov 1998) tarafından önerilen kanadı eğme fikri, 1990'ların ortalarında patentli sarmal şekilli Darrieus türbini tasarımına gidilen yolda atılan bir adım olmuştur.

YERT' lerde olduğu gibi, Dikey eksenli rüzgar türbinleri için aerodinamik analiz yöntemlerinin de karmaşık seviyeleri vardır (Wilson 1994). DERT' lerin modellenmesine yönelik dört ana yaklaşım şu şekilde sınıflandırılmıştır(Allet ve ark 1997): Bunlar; (i) momentum modelleri, (ii) girdap modelleri, (iii) yerel dolaşım modelleri ve (iv) viskoz akışlı hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) modellerini içeren viskoz modellerdir. Analiz yöntemleri hakkındaki bibliyografik bilgiler için Abramovich (Abramovic 1987) ve Islam'ın (Islam ve ark. 2008) kaynakları incelenebilir.

Vaishnav, aerodinamik inceleme ve performans analizi için HAD modelleri kullanarak, uç hızı oranının türbin performansında önemli bir kural olduğunu ve uç hızı oranı çalışma aralığının kanat profili türüne bağılı olduğunu tespit etmiştir(Vaishnav 2007).

Bazı araştırmacılar ise türbinin malzemesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarda mevcut kullanılabilir malzemelerin mekanik özellikleri ve maliyetlerine göre karşılaştırmalar yapılmıştır(Islam 2008).

Hemen hemen tüm bu incelemeler, ilk rüzgar türbinlerinin gerçekten DERT' ler olduğunu ve bunların ilk olarak İran' da 2000 yıl önce tahıl öğütmek için kullanıldığını göstermektedir. Bu ilk rüzgar türbinleri, esasen ahşap bir çerçeve üzerinde birkaç basit kanat ve bir rotor içeren makinelerdi. Bu tür cihazlar 20. yüzyılın ikinci yarısına kadar kullanıldı(Muller 2009).

Hill tarafından yapılan çalışma küçük Darrieus türbinlerinin kendi kendine başlama kapasitesinin bir dizi yöntem ile geliştirilebilir olduğunu ortaya koymuştur. Tek sayıda kanat kullanılması, bir kanat aralığı mekanizması temin etmek ve kanat azimut açısı rotor boyunca aksenel mesafenin bir fonksiyonu olacak şekilde eğilmiş kanatların kullanılmasının etkisi kendi kendine başlama karakteristikleri üzerine yeni bir çalışma olarak eklenmiştir(Hill 2009).

Darrieus türbininin özelliklerinden biri de kendi kendine başlama kapasitesinin sınırlı olmasıdır. Bunun nedeni, düşük dönme hızlarında çoğunun kanat kaldırma kuvvetinin küçük olması ve özellikle iki kanatlı makineler için, üretilen tork ve rotor azimut açısına bakılmaksızın, rotor açılışında her bir sabit kanat için hemen hemen aynı olmasıdır. Sonuç olarak, büyük ticari makinelerin rotorunun belirli bir rüzgar hızına ulaşması için genellikle yeterince yüksek bir uç hızına kadar çalıştırılması gerekir(Tong 2010).

Rüzgar enerjisi, temiz bir enerji olduğundan iklim değişikliğine sebep olmaz ve enerji ihtiyacını gidermeye yardımcı olur. Rüzgar enerjisinin yaygınlaşması, fosil yakıtlı elektrik santrallerine olan ihtiyacı azaltır ve bunların yaydığı CO₂, SO₂, NO_x gibi zararlı emisyonları da azaltır. Enerji kaynaklarını çeşitlendirerek fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve böylece ülkelerin enerji güvenliği artar. Son yıllarda tüm ülkelerde rüzgar enerjisi kaynaklarında önemli bir artış kaydedilmiştir. Gittikçe gelişen, yenilenebilir, çevre dostu enerji kaynağı olarak görülen rüzgar enerjisinin gelecek yıllarda elektrik üretiminde daha büyük bir paya sahip olması beklenmektedir(Tong 2010).

Brown, sonlu elemanlar analizini kullanarak kanat yükünü modellemiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Makalesinde türbin tasarımının karmaşıklığı nedeniyle sonlu elemanlar analizi kullanılmasını tavsiye etmiştir. Ayrıca rezonans olmadığından ve türbininin çalışmasının güvenli olduğundan emin olmak için kanat titreşimi üzerine bir çalışma yapmıştır(Brown 2010).

Hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) türbülans modelleri hem türbin performansını tahmin etmek hem de türbin hava akışında bulunan bu karmaşık aerodinamiği simüle etmek için geliştirilmiş ve modifiye edilmiştir(Castelli 2011, Lanzafame 2014). Makalelerinde (i) türbin etrafındaki hava akışını modellemek için geçiş SST, (ii) SST k-omega, (iii) k-epsilon türbülans modellerini önermişlerdir.

Bazı araştırmacılar CFD' de akış güdümlü rotor simülasyonu geliştirmiştir(Wang 2011). Yazar makalesinde, türbinin hareketini modellemek ve rüzgar hızına bağlı olarak türbin dönüş hızını hesaplamak için 6DoF yöntemini kullanmıştır. Bu yöntemin türbinin toplam çıkış gücünü ve dönme hızını tahmin etmekte çok yararlı olduğunu ortaya koymuştur.

Castelli, makalesinde CFD kullanarak kanattaki ana üç kuvveti (i) normal kuvvet, (ii) teğetsel kuvvet ve (iii) merkezkaç kuvveti yüklemesini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmasında baskın gücün, hava akışından gelen aerodinamik kuvvet değil, dönüşten gelen merkezkaç kuvveti olduğu sonucuna varmıştır(Castelli 2013).

Lanzafame R. ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmaya göre; Re (Reynolds) sayısının düşük olduğu durumlarda kanat davranışları HAD (Hesaplama akışkanlar dinamiği) modellemelerinde en büyük problem durma probleminin hesaba katılmasıdır. Bu iyi bilinen bir sorundur ve temel olarak RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation) türbülans modellerinin ters basınç gradyanlarından kaynaklanan sınır tabaka ayrılmalarını yakalamadaki verimsizliğinden kaynaklanır. Düşük Re' da sınır tabakanın önemli bir kısmının laminer olması nedeniyle klasik bir tam türbülanslı modelin kullanılması sınır tabakanın gerçek davranışını tahmin edemez. Laminer sınır tabaka aslında ters basınç gradyanlarına oldukça duyarlıdır ve bu da türbülanslı bir sınır tabakayla karşılaştırıldığında daha erken bir akış ayrılığına ve sonunda yeni başlayan derin bir duruşun fiziksel olmayan bir simülasyonunun oluşmasına neden olur. Bu nedenle DERT'lerin (Dikey eksenli rüzgar türbini) düşük Re 'da çalışması ve durma etkisi onları modellemede çok önemlidir. Dolayısıyla kalibre edilmiş bir geçiş modelinin kullanılması, kanatların aerodinamik davranışları ve DERT'lerin performansının daha iyi bir tahmininin yapılmasını sağlar(Lagtry R.B. ve ark. 2006, Menter F.R. ve ark. 2006, Sørensen N. 2009, Lanzafame R. ve ark. 2013).

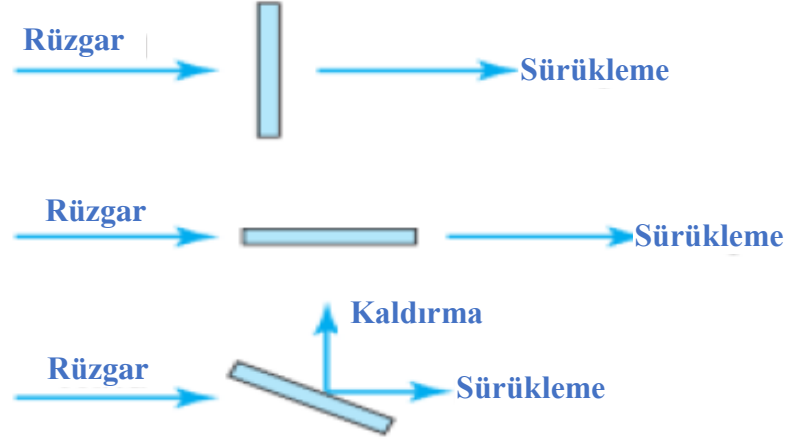
Brusca tarafından yapılan çalışmada en boy oranı ve sağlamlık parametreleri incelenmiştir. Reynolds sayısını etkileyen faktörler analiz edilerek, kanat yüksekliği ve rotor yarıçapı (en boy oranı) arasındaki oranın Reynolds sayısını ve sonuç olarak güç katsayısını etkilediği ortaya konmuştur. Daha düşük en boy oranına sahip bir türbinin, daha yüksek en boy oranına sahip bir diğer türbine göre birkaç avantajı olduğu vurgulanmıştır. Brusca, daha düşük en boy oranına sahip bir türbinin avantajlarını; daha yüksek güç katsayıları, daha kalın bir kanada sahip olmanın yapısal avantajı ve türbin rotorunun daha büyük atalet moment sonucu daha fazla kararlılığa sahip olması şeklinde sıralamıştır. Brusca ayrıca türbinin kendi kendine başlatma yeteneğini garanti eden optimum dayanıklılık aralığı önermiştir(Brusca 2014).

Alaimo makalesinde, HAD analizinde DERT'lerin 3D sonuçları ile 2D sonuçlarını karşılaştırmıştır. Makalesinde 3D simülasyonda uç girdapları üretilmesinin aerodinamik performansı büyük ölçüde azalttığı sonucuna varmıştır(Alaimo 2015).

Sonuçlar, kanat uç-hız oranı 4 olacak şekilde -2° 'lik bir yunuslama açısında C_p 'de %6,6'lık bir artış elde edileceğini gösteriyor. Ayrıca, yunuslama açısındaki bir değişikliğin, türbinin rüzgar üstü ve rüzgar altı bölgelerindeki anlık yükleri ve momentleri kaydıracağı tespit edilmiştir. Dönüş sırasında yunuslama açısı için anlık meydana gelen değişim, dinamik yunuslama kontrolünün daha sonraki çalışmalar için umut verici bir yaklaşım olduğunu destekler niteliktedir(Rezaeiha ve ark. 2017).

2.1. Türbine Etki Eden Aerodinamik Kuvvetler

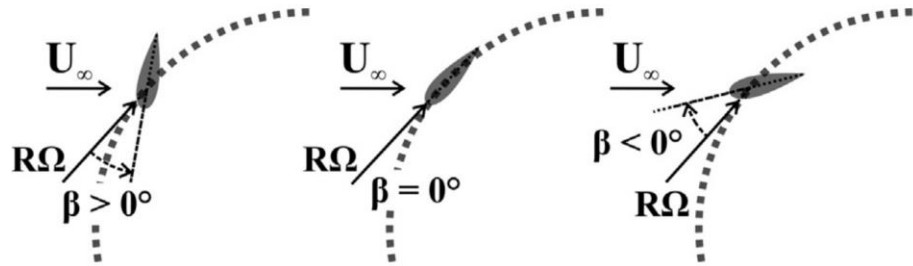
Rüzgar türbini rotor tertibatı, rüzgardan gelen kinetik enerjiyi mekanik güce ve bir elektrik çıkışına dönüştürmek için tasarlanmıştır. Rotor düzeneği, göbeği, döndürücüyü, kanatları ve kanat eğimini kontrol etmek için kullanılan tüm kapalı sistemleri içerir. Rüzgar türbini kanatları, etraflarındaki hava akışının yaklaşmakta olan rüzgara dik ve paralel reaksiyon kuvvetleri oluşturmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Yaklaşan rüzgara dik reaksiyon kuvveti sürüklenme olarak kabul edilir. Bir nesne tarafından oluşturulan kaldırma ve sürüklenme miktarı şekil, yüzey alanı ve rüzgar hızının fonksiyonudur. Rüzgara dik olarak yerleştirilmiş veya eğilmiş ince bir düz panel, herhangi bir kaldırma kuvveti olmadan sürüklenme oluşturacaktır. Rüzgara paralel eğimli aynı düz panel az miktarda sürtünme yaratacak, ancak kaldırma oluşturmayacaktır. Hem kaldırmayı hem de sürüklemeyi oluşturmak için, panel yaklaşmakta olan rüzgara açılı olarak eğimli olmalıdır(Şekil 2.1). Bu kuvvetler, bir nesnenin rüzgar içindeki etkileşiminden kaynaklandığından aerodinamik kuvvetler olarak kabul edilirler(Kilcollins 2013).



Şekil 2.1 Sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin ince, düz bir panel üzerinde gösterimi

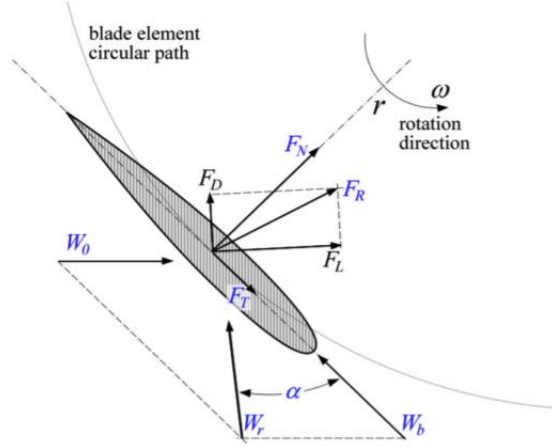
Bir kanattaki rüzgardan gelen iki aerodinamik kuvvet bileşenine kaldırma ve sürüklenme kuvveti denir. Burada kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti, söz konusu plaka üzerindeki aerodinamik kuvvetin iki bileşenidir. Aerodinamik kuvvet, kanadın yüzeyini etkileyen rüzgarın yarattığı aerodinamik basıncın bir fonksiyonudur. Bu kuvvet, kanadın yüzey alanını etkileyen rüzgarın neden olduğu basınç kullanılarak hesaplanabilir.

Şekil 2.2’de bir kanat özelinde hücum açısı, yunuslama açısı ve bağıl rüzgar hızının gösterimleri verilmiştir. Burada $R\Omega$ rüzgar bağıl hızını, U_∞ rüzgar geliş hızı, β yunuslama açısını simgelemektedir.



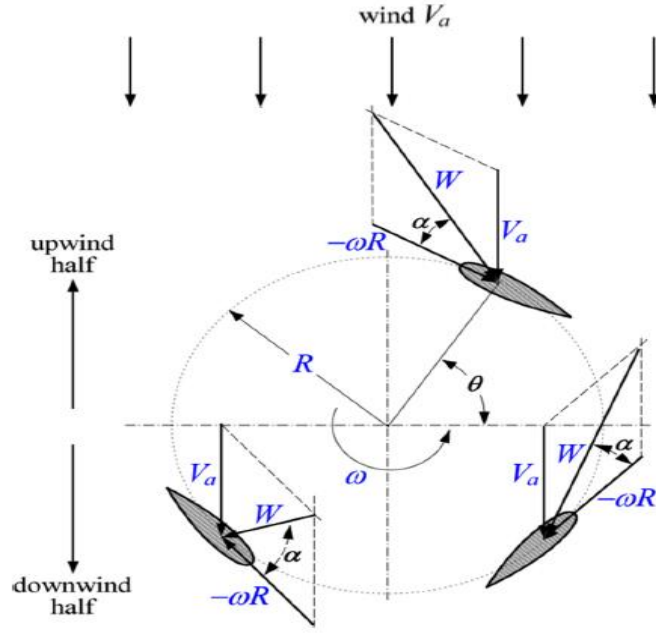
Şekil 2.2 Yunuslama açısının kanat üzerinde gösterimi(Rezaiha ve ark. 2017)

Şekil 2.3'te ise W_0 rüzgarın geliş hızını, W_b kanadın çizgisel hızını, W_r bağıl hızı, α hücum açısını, F_L kanada etkiyen kaldırma kuvvetini, F_D sürüklenme kuvvetini, F_N normal doğrultusundaki kuvveti, F_T teğetsel kuvveti, F_R bileşke kuvveti simgeler.



Şekil 2.3 Hücum açısının kanat üzerinde gösterimi(Tchakoua ve ark. 2015)

Şekil 2.4'te verilen görselde; α hücum açısını, θ konum açısını, V_a rüzgar hızını, R rotorun yarıçapını ve ω rotorun açısal hızını, W ise bağıl hızı simgeler.



Şekil 2.4 Türbine etki eden aerodinamik kuvvetlerin gösterimi(Tchakoua ve ark. 2015)

Kanada etkileyen basınç havanın yoğunluğu ve hızının karesi ile orantılıdır, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_A = 1/2\rho V_a^2 \quad (2.1)$$

Kanatta elde edilen güç ise:

$$P = F_D W \quad (2.2)$$

Şeklinde hesaplanır. Burada F_D sürüklenme kuvvetini ifade eder.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. ANSYS-Fluent ve HAD (CFD) Yöntemi

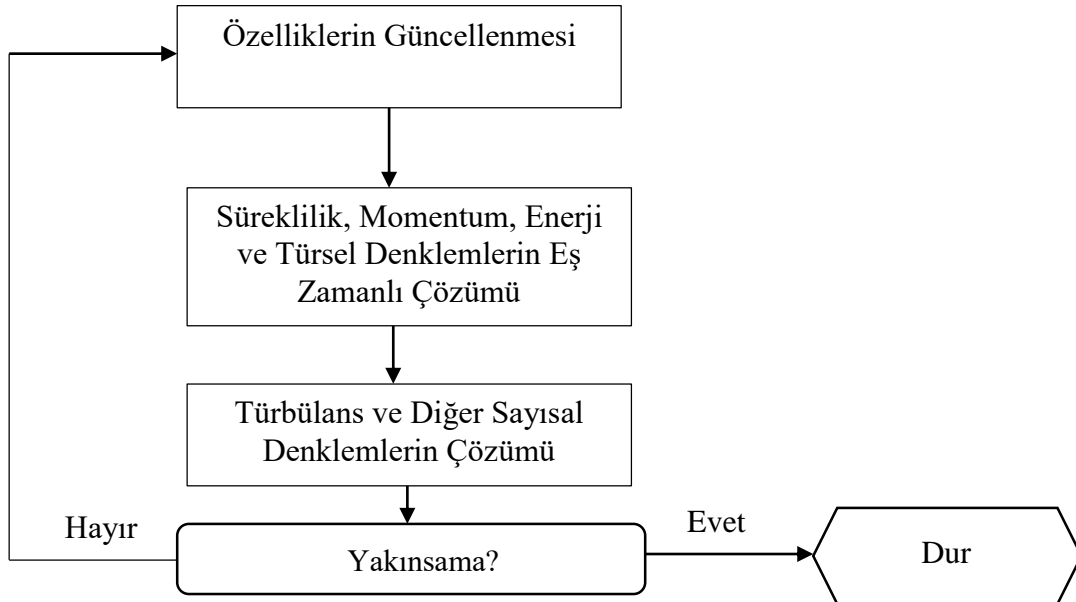
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, günümüzde endüstriyel uygulamalarda ve akademik araştırmalarda önemli bir yere hakimdir. Genelde HAD (CFD) kısaltmasıyla bilinen bu çok kullanılan çalışma alanı, başlangıçta sadece uzay ve havacılıkla ilgili ileri teknoloji mühendisliği alanlarında yaygın olarak kullanılsa da, şimdilerde kompleks problemlerin çözümünde modern mühendislik uygulamaları için de sık kullanılan bir metot olma yolunda ilerlemeye başlamıştır.

Akışkanlar mekaniği ve ısı transferi disiplinlerinden türeyen HAD, özellikle süreç, kimya, inşaat ve çevre gibi önemli konularda da ön plana çıkmaya başlamıştır. Hesaplamalı simülasyonlar yoluyla yeni ve daha iyi sistem tasarımlarının yapılması, mevcut ekipmanların iyileştirilmesi ve verimlilik artışıyla birlikte işletme maliyetlerinde de düşüş sağlanır.

Küresel ısınma ve dünyadaki nüfus artışı kaygılarıyla birlikte, enerji üretim sektörlerinde çalışan mühendisler geliştirme ve yenileme masraflarını azaltmak amacıyla artık daha fazla HAD yazılımlarına rağbet etmektedirler. Sayısal hesaplamaları temel alan bu çalışmalar, günümüzde daha çok temiz ve yenilenebilir enerji teknolojileriyle ilgili problemleri çözmek, emisyon kontrolü ve çevresel kirliliğin azaltılmasını sağlamak amacıyla sıkı yönetmelik şartlarını gerçekleştirmek için yapılır. Tüm bunların yanında hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (HAD'ın) tam olarak ne olduğu hala merak edilmektedir. Geçmiş yıllar göz önüne alınırsa, HAD'ın akışkanlar mekaniği prensiplerini yalnızca matematikle değil, aynı zamanda bilgisayar bilimleriyle de birleştiren yeni bir dal haline getirdiği anlaşılmaktadır. Akışkanlar mekaniği esasen akışkanların hareketli veya durgun hallerinin incelenmesiyle ilgilenir. HAD, daha çok akış halindeki akışkanlara ve özellikle akışın ısı transferi ve yanmalı akışlarda gerçekleşebilecek çeşitli kimyasal reaksiyonları da içeren prosesleri nasıl etkilediği konusunda yoğunlaşmıştır. Bu da terminolojide karşılaşılan ‘akışkanlar dinamiği’ kavramının oluşmasında doğrudan etkili olmuştur. Buna ek olarak akışkan hareketinin fiziksel yönleri çoğunlukla, incelenen bir prosesi tanımlayan ve HAD denklemleri olarak isim verilen kısmi diferansiyel

denklem şeklindeki temel matematiksel denklemlerle tarif edilebilir. Bu denklemlerin çözümlenmesi için bilgisayar bilimcileri tarafından ileri seviye programlama dilleri kullanılarak bilgisayar kodları ve yazılım paketleri oluşturulmaktadır(Jiuan Tu ve ark. 2018).

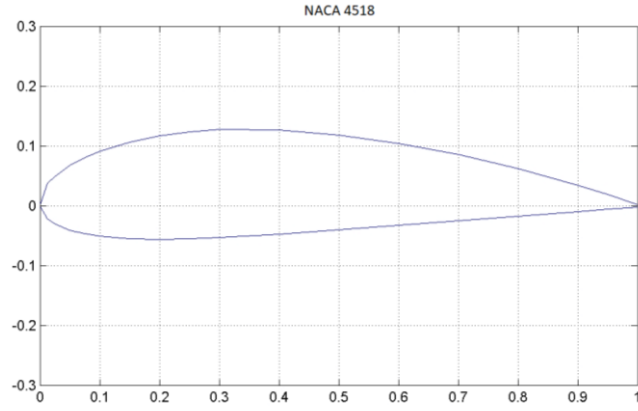
HAD paket programlardan biri olan ANSYS-FLUENT; hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerini çözüme kavuşturan denklemleri çözüme kavuşturarak, oluşturulan geometrik modelin sınır şartları doğrultusunda, bilgisayarın işlemcisini kullanarak bu tez çalışması için kullanılmıştır. Burada korunum denklemlerini sonlu hacimler metodu yaklaşımı ile numerik olarak çözmek için kullanılan ANSYS 2020R1 içerisinde mevcut olan Fluent 2020 R1 yazılımı ile çözülmüş ve sonuçlar bulgular kısmında verilmiştir. CFD (HAD) metodu kullanılarak yapılan çözümlerin doğru sonuç verebilmesi için şekil 3.1 ‘deki algoritmanın sırasıyla takip edilmesi gerekmektedir. Aksi halde verilen her bir girdiye karşı bir çıktı oluşabilir ve bu durumun doğruluğa yakınlık derecesi duruma göre farklılık gösterdiğinde çalışmalar yanlış çıktılar oluşturabilir(Oruç 2020).



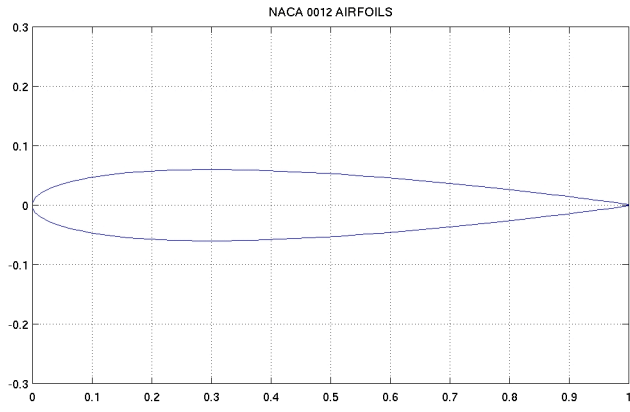
Şekil 3.1 Bir CFD (HAD) çalışmasında izlenmesi gereken sürecin algoritması (Oruç 2020)

3.2. Kullanılan Geometriler, Ağ Oluşturma ve Sınır Şartları (Geometrik Model)

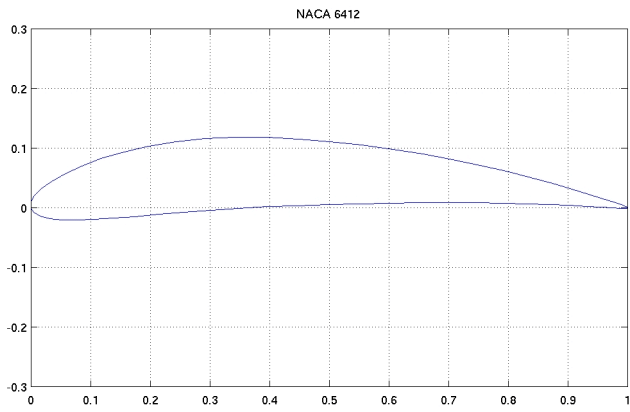
Bu bölümde türbin modellemesi anlatılmıştır. Kanat geometrisi ve analizde hangi modelin kullanıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada dikey eksenli Darrieus tipi rüzgar türbinlerinin farklı λ (kanat-uç hızı), yunuslama açısı, kanat profili ve kanat sayıları için performans değerleri HAD ile hesaplanacaktır. Sayısal analizde incelenecek olan kanat profilleri; NACA4518, NACA0012 ve NACA6412 modelleridir(Şekil 3.2, 3.3, 3.4). Kanat geometrilerinin koordinatları UIUC Airfoil Data Site ve airfoiltools.com'dan alınarak kanat profilleri daha sonra HAD analizinde kullanılmak üzere ANSYS 2020R1 paket programının Design Modeler modülüyle oluşturulmuştur. Sayısal analizi yapılacak geometriler; belirtilen kanat profillerine sahip, 3 kanatlı H-Darrieus türbinlerinin tahmini akış modellemesi için 120°'lik açıyla belirtilen 3 farklı kanat geometrisiyle oluşturularak rüzgar türbini geometrileri HAD analizinin bir sonraki adımı olan ağ yapısı oluşturmak amacıyla Ansys-Mesh modülüne aktarılmıştır. Design Modeler modülü taslak çizim tabanlı çalışan bir tasarım programı olduğundan türbin modellerinin iki boyutlu görüntüsü çizilip, üçüncü boyutta öteleme mantığı ile tasarım yapılmıştır. Bu 3 farklı kanat profiline sahip 3 türbin çiziminin ardından kanat sayısı değişkeninin H-Darrieus türbininin verimine olan etkisini gözlemlemek amacıyla, NACA 4518 profiline sahip H- Darrieus türbininden 2,3,4 ve 5 kanadı olan modeller çizilerek kanat sayısının türbinin verimine etkisi araştırılmıştır(Şekil 3.5).



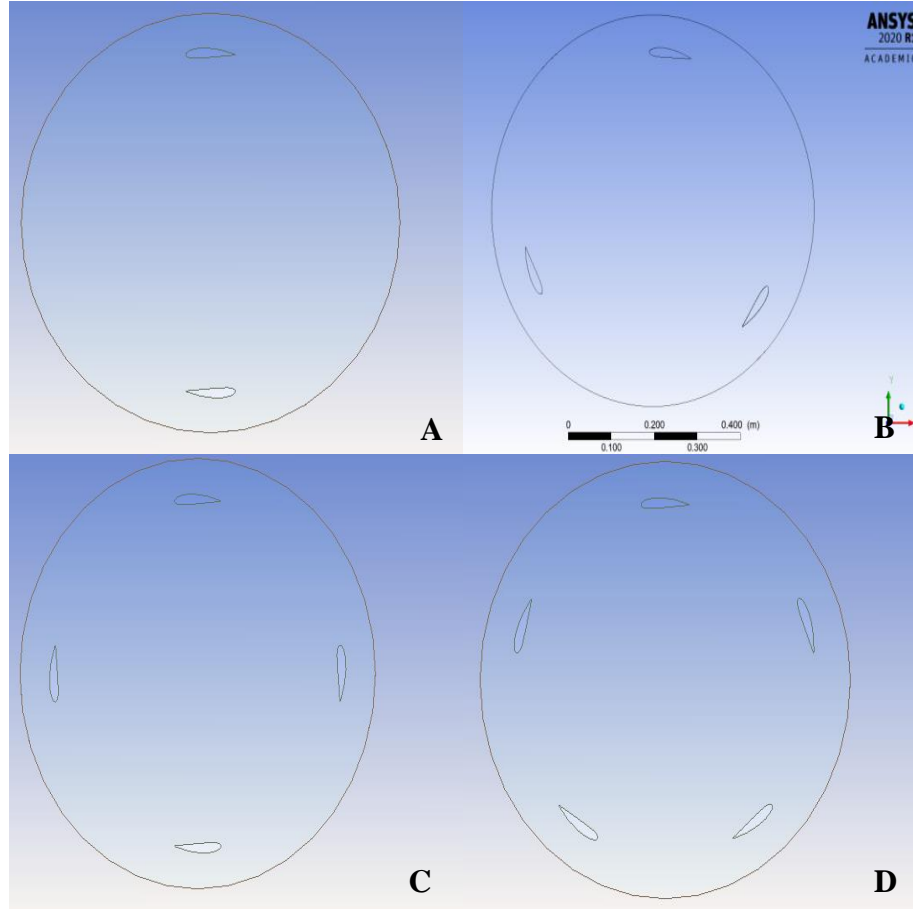
Şekil 3.2 NACA4518 kanat profili
(Anonim 2020)



Şekil 3.3 NACA0012 kanat profili
(Anonim 2020)



Şekil 3.4 NACA6412 kanat profil
(Anonim 2020)



Şekil 3.5 NACA 4518 profilli; 2, 3, 4 ve 5 kanat sayısına sahip Darrieus tipi rüzgar türbinlerin şematik gösterimi
A) 2 kanatlı gösterim **B)** 3 kanatlı gösterim
C) 4 kanatlı gösterim **D)** 5 kanatlı gösterim

Sınır şartları denklemler sistemi için son derece önemli değerler ve kabuller bütünüdür. Birçok denklem yapısı genel olarak tanımları ifade eder. Ancak sınır şartlar denklemlerdeki genel yapıyı kendi içerisinde özele indirgeyerek sistemin sayısal çözüm yöntemleri sayesinde çözümlmesine olanak sağlar. Ağ yapısında belirlenen sınır bölgelerinden sonra sıra sınır şartlarının sisteme tanıtılmasına gelir. Bu çalışmada sınır şartları çizelge 3.1’de gösterildiği gibi hava için yoğunluk $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ ve dinamik viskozite $\mu=1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ alınarak çözüm yöntemleri bu sınır şartları üzerinden ilerlemiştir.

Çizelge 3.1 Her Bir Model için Sınır Şartları

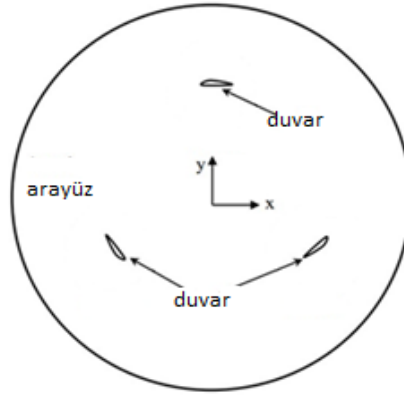
Sınır Şartları (Boundary Conditions)	Değerler
Akışkan yoğunluğu (Hava)	1,225 kg/m ³
Akışkan viskozitesi (Hava)	1.7894x10 ⁻⁵ kg/ms

Hesaplamalarda hareketli iç bölge ve sabit dış bölge olmak üzere iki parça halinde tasarlanan iki boyutlu modeller Şekil 3.4. ve 3.5'te şematik olarak gösterilmektedir. Yapılan çalışmaları deneysel çalışmalarla karşılaştırabilmek için hareketli bölgenin sınır şartlarını sağlayabilecek şekilde rüzgar türbinine benzer şekilde dikdörtgen bir bölge oluşturulmuştur. Bu bölgenin ölçüleri akışı bozmayacak şekilde hareketli rotorun çapına bağlı olarak literatüre uygun olarak Şekil 3.4'te detaylı olarak verilmiştir(Gad ve ark. 2014).

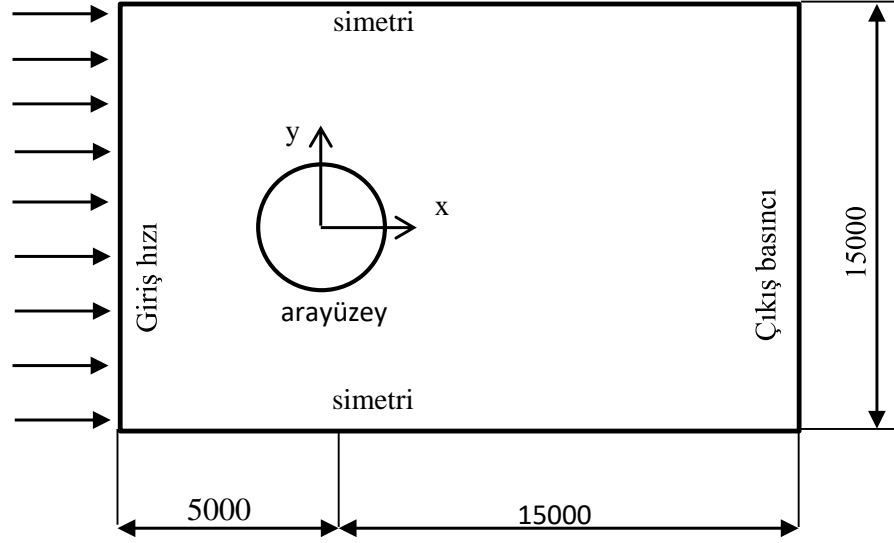
Çözümlemede kullanılan sınır şartlar her iki şekilde de gösterilmektedir. Sabit dış bölgede rüzgarın girdiği kenar giriş hızı (velocity inlet), rüzgarın çıktığı kenar çıkış basıncı (pressure outlet), ve diğer iki yan kenar simetri (symmetry) olarak seçilmiştir. Hareketli kısım ile sabit bölgenin kesiştiği kısım ara yüzey (interface) ve kanat çevreleri duvar (wall) olarak seçilmiştir.

Lanzafame (2014), doğru bir çözüm alanı (computational domain) oluşturmanın modellenmenin en önemli adımlarından biri olduğunu belirtmiş ve farklı ihtiyaçları hesaba katmak gerektiğini bildirmiştir. Çözüm alanı (solution domain) belirlenirken en önemli noktanın; rotor etrafındaki akışın doğru bir şekilde modellenmesi için alanın çok küçük olmaması, fakat ağ sayısı ve hesaplama süresini arttırmamak için çok da büyük olmaması gerektiğini vurgulamıştır. Bunların yanında çözüm alanı oluştururken ağ oluşumu açısından kaliteye ve kanatların hemen yakınındaki ilk hücre konumlanması dikkate alınmalıdır. Kanatların akışa olan etkisini gözlemleyebilmek için kanat kenarlarında çok ince bir ağ yapısı gereklidir.

Optimum değerin sağlanması için bazı testler yapılmış ve hangi hesaplama alanında optimum sonuçlara ulaşıldıysa o ölçülerde computational domain belirlenmiştir. özüm alanının geometrik ölçülerini belirlemek için literatürde bu gibi çalışmaların hangi durumda en uygun sonuçlar verdiği araştırılmış ve sonuç olarak hesaplama alanında (computational domain) akışın tam gelişmiş hale gelebilmesi için gereken giriş ve çıkış sınır şartları sırasıyla bir rüzgar türbini CFD simülasyonu için; rotor test bölgesi 10 rotor çapı kadar rüzgara karşı uzaklıkta, 14 rotor çapı kadar da rüzgar yönünde rotor test alanına uzak olacak şekilde yerleştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir(Castelli ve ark. 2011). Bu durum dikkate alınarak şekil 3.5'teki computational domain belirlenmiştir.



şekil 3.4 NACA 4518, NACA0012 ve NACA 6412 için ayrı ayrı modellenen hareketli iç bölgenin gösterimi(Dış ap 0.75 m, kanatların bulunduğu eksen 0.6m, kanat genişliği(chord) =0.1 m)

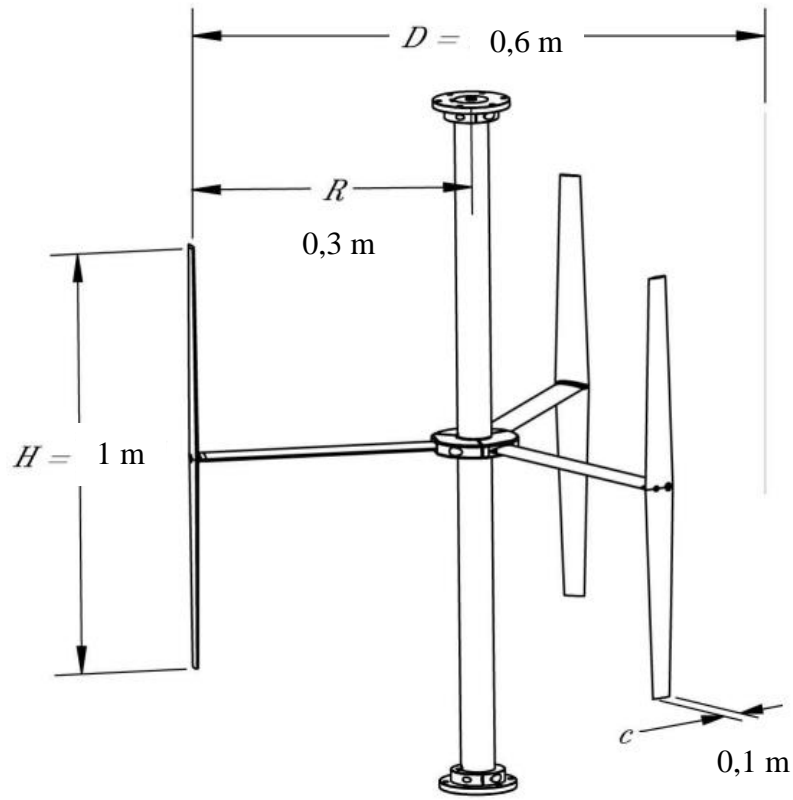


Şekil 3.5. NACA 4518, NACA0012 ve NACA 6412 için ayrı ayrı modellenen sabit dış bölgenin gösterimi (Burada dairenin çapı D olarak alınırsa; 5000 mm'nin karşısı $6D$, 15000 mm'nin karşısı $20D$ olmalı.)

Çizelge 3.2. Kanat modelleri ve boyutları

Kanat profili	Model 1: NACA 4518 Model 2: NACA 0012 Model 3: NACA 6412
Veter uzunluğu (C)	0.1 m
Rotor çapı (D)	0.6 m
Kanat yüksekliği (H)	1 m

Bu çalışmada bir H-Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbininin 2D analizi yapılmış, bu sonuçlar aynı ölçülerdeki H-Darrieus tipli dikey eksenli bir rüzgar türbininin 3 boyutlu analizine ışık tutacak bir çalışma olarak düşünülmüştür. 3 boyutlu türbin ölçüleriyle birlikte şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 3 boyutlu H-Darrieus rüzgar türbini ve ölçüleri

Cisim etrafındaki türbülanslı akışta ilk hücre boyutu ne kadar küçük olursa çözümün o kadar doğru olacağı varsayılır. Çözümde kullanılan SST k- ω yöntemi için tavsiye edilen değer $y^+ < 1$ sağlanacak şekilde kanat etrafındaki ilk mesh boyutu $3 \cdot 10^{-5}$ m olarak ayarlanmıştır. Kanat çevrelerinde dikdörtgen yapıda 1,2 kat arttırımla (growth rate) 20 kat mesh atılmıştır(inflation). Diğer kısımlar türbülans oluşumunu iyi gözlemleyebilecek şekilde üçgen mesh olarak ayarlanmıştır. Çözümün yakınsayabilmesi ve doğru değerler elde edebilmek için mesh kalitesi 0.93 olacak şekilde ayarlanmıştır.

9, 10, 11, 12, 14 ve 18 m/s +X yönünde sabit rüzgar hızları için analizler yürütülmüş ve oluşan toplam moment değerlerinden yola çıkılarak sonuçlar incelenmiştir.

Kanadın açısal hızı ise 10 farklı λ değeri için denklem 3.12'den hesaplanmıştır. Kanat ve gövde yüzeylerinde akış hızının sıfır olduğu varsayılmıştır(no slip condition). Akışkan

çıkışı basınç olarak (pressure outlet) tanımlanmış ve bağıl olarak 0 Pa alınmıştır. Türbülans tanımlama metodunda geri-dönüş türbülans yoğunluğu (Backflow turbulence intensity) %5 ve ağdalılık oranı 1 olarak alınmıştır.

NACA 4518 profiliyle yapılan ve bölüm 3.6'da anlatılan doğrulama çalışmasında referans alınan çalışma (Lanzafame 2014) doğrulanıp bu profille meshten bağımsızlık çalışması yapıldıktan sonra sonra, NACA 0012, NACA 4518 ve NACA 6412 kanat profillerinin herbiri için uygun ağ yapısı oluşturulduktan sonra sınır şartları belirlenmiştir. Modelin sol kısmında sınır şartı olarak akış giriş değeri verilmiştir (velocity inlet). Bu değerler validasyon için kullanılan TSR (kanat uç-hız oranı) değerlerini sağlayacak şekilde (8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18 m/s) hız değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. Çıkış sınır şartı olarak dış atmosfer basıncı alınmıştır (pressure outlet). Modelin alt ve üst kısmında bulunan kısımlar akıştan etkilenmeyen kısımlar olarak simetri sınır şartı olarak alınmıştır. Hareketli yüzey olarak tanımlanan bölge hareketli ağ (moving mesh) olarak tanımlanmış ve rotorun devrine bağlı olarak 60 rad/s (cell zone conditions) değeri verilmiştir. Benzer şekilde kanatların içi boş olarak kabul edilerek sınırları hareketli kaymaz duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Rotor çevresi ile kanal arasında sınır şartı olarak ara yüzey (interface) tanımlanmıştır. Bu girdilerin analizler aracılığıyla çıktıları rapor edilmiş, hangi durumda daha fazla moment elde edilip daha verimli bir dikey eksenli rüzgar türbini tasarımına yaklaşıldığı gözlemlenmiştir. Türbülans tanımlama metodunda türbülans yoğunluğu %5 ve ağdalılık oranı 1 olarak alınmıştır.

3.3. Kullanılan Türbülans Modeli ve Bu Modelin Kısaca Tanıtılması (Matematik Model)

Tüm bu çalışma kriterleri Fluent analiz programına girildikten sonra programı başlatmadan önce farklı λ kanat uç hız oranlarında yapılacak olan analizler için zaman adım aralıkları (time step size) hesaplanmıştır. Bu zaman adım aralığı, türbinin 1° döndüğü yayın radyan birimindeki uzunluğu ile hesaplanır. 1° yaklaşık olarak 0.017453292 radyana tekabül etmektedir. Analizler 10 farklı λ kanat uç hız oranında yapılmıştır. Kanat uç hız oranı, kanadın çizgisel hızının serbest hava hızına oranı olarak ifade edilir.

Çözümlerde parametre olarak λ kullanılmıştır. Ancak çözüm yapılırken türbülans modelleri kullanılacağından akışın türbülanslı olduğunu doğrulamak için her bir λ değerine karşılık Re değerleri hesaplanmış olup Çizelge 3.3’ de bu değerler verilmiştir.

Re sayıları göz önünde bulundurularak akışın türbülanslı olarak modellenmesine karar verildikten sonra hangi türbülans modellemesinin kullanılacağı karar aşamasına geçilmiştir.

Çizelge 3.3 λ (TSR: Kanat uç - hız oranı) sayılarında ortalama Reynolds değerleri

λ	0,3	0,5	0,8	1	1,28	1,5	1,6	1,8	2	2,3
Re	205376	123225	112956	92419	143763	123225	112957	102688	92419	82150

Shear Stress Transport modeli (SST) k- ω türbülans modelinin aerodinamik uygulamalar için en etkin model olduğu literatür taraması aşamasında tespit edilmiştir. Bu türbülans modeli Wilcox k- ω modeli ve k-epsilon modellerinin birlikte kullanılmasıyla uygulanır. Duvar kenarına yakın bölgelerde Wilcox modeli, sınır tabakalardan uzak serbest akış bölgelerinde k-epsilon modelinin kullanıldığı denklemler çözülür. ω spesifik yayılım katsayısını ifade eder. Bu modelin Shear Stress Transport (SST) modeli olarak adlandırılmasının sebebi; türbülans kesme gerilmesi prensiplerine türbülans viskozitesi eklenerek birlikte hesaba katılmasındandır. Bu durum SST k- ω modelini, k- ϵ modeline göre daha avantajlı bir hale getirir. Çünkü, bu model geçiş akışlarında ve ters basınç gradyanlarının dahil olduğu akışlarda k- ϵ modeline göre daha hızlı bir şekilde çözüme yaklaşma eğilimindedir (Jiyuan ve ark. 2018).

Fluent programı çözüm yaparken akış için süreklilik ve momentum denklemlerini kullanmaktadır. Analiz, bu denklemlerin iki boyutlu akış ortamına uygulanması ile yapılır. Buna istinaden X-Momentum, Y-Momentum ve Navier-Stokes süreklilik denklemleriyle birlikte, burada kullanılan SST (Shear Stress Transport) k- ω türbülans modeline ait denklemler aşağıda verilmiştir. k değişkeni türbülans kinetik enerjisini ve ω değişkeni ise türbülans frekansını ifade eder (Anonim 2017). Modele ait denklemler aşağıdaki gibidir:

Süreklilik denklemi 2 boyutta sıkıştırılamaz akış için:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

ve

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.2)$$

Olarak verilir.

k- ω türbülans modeli için denklemler:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3.3)$$

Ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3.4)$$

Şeklinde verilmiştir. Model; türbülans kinetik enerjisi k ve özgül enerji sönmleme oranı ω 'yi , taşınım denklemlerinden (bkz. denklem 3.20 ve denklem 3.21) elde eder(Anonim 2017). Burada G_k ortalama hız gradyanına bağlı olarak türbülans kinetik enerji üretimini; G_ω , ω üretimini; Γ_k ve Γ_ω , k ve ω nın etkin yayılmasını(effective diffusivity); Y_k ve Y_ω türbülansa bağlı olarak k ve ω ' nin yayınımasını; D_ω ise çapraz difüzyon terimini belirtir. S_k ve S_ω kullanıcı tarafından kullanılabilecek kaynağı belirten terimlerdir. Burada verilen semboller aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.5)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.6)$$

Burada σ_k ve σ_ω , k ve ω için türbülans Prandtl sayılarıdır(SST k- ω türbülans model sabitleri). Türbülans viskozitesi μ_t aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right]} \quad (3.7)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + (1 - F_1)/\sigma_{k,2}} \quad (3.8)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (3.9)$$

Burada S gerilme büyüklük oranıdır.

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad (3.10)$$

Burada;

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (3.11)$$

$$R_k = 6$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}$$

$$\beta_i = 0.072$$

(Yüksek Reynolds sayılı durumlarda k- ω türbülans modelinde, $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$)

Diğer değerler ilgili kaynakta açıklanmıştır(Anonim 2017).

X yönünde momentumun korunum denklemi:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (3.12)$$

Y yönünde momentumun korunum denklemi:

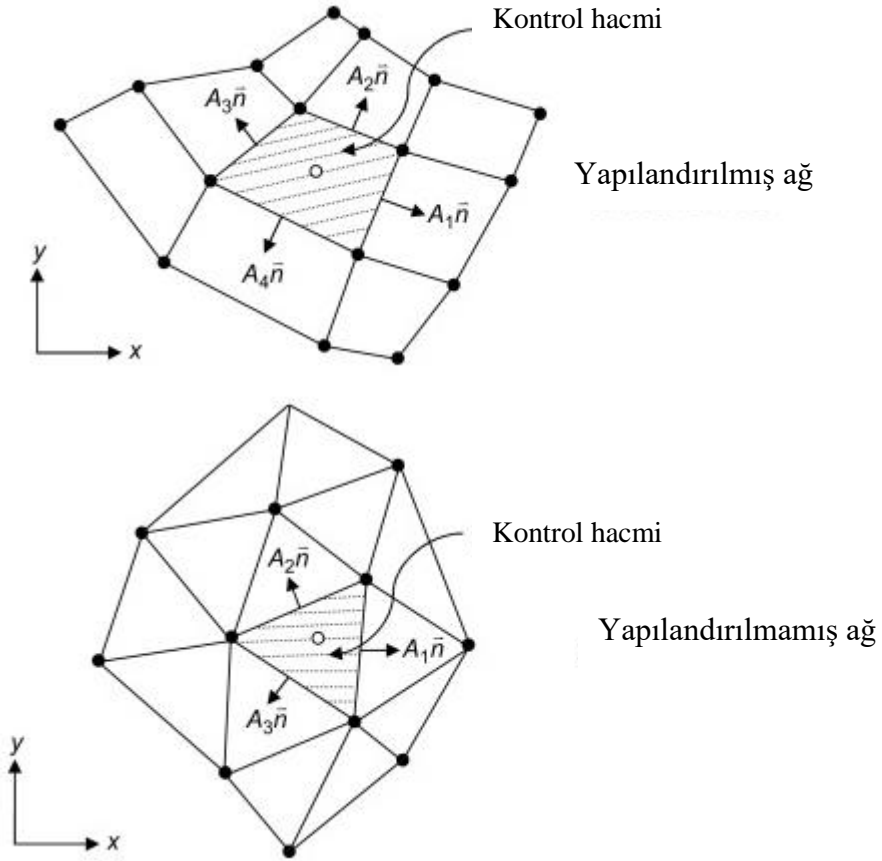
$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3.13)$$

Denklem 3.29 ve 30'da koordinatlar x,y ; hız bileşenleri u,v ; yoğunluk ρ ; basınç p ; gerilme τ ve Reynold Sayısı Re olarak ifade edilmiştir.

3.4. Sayısal Yöntem

Sınır şartlarını belirleme adımından sonraki adım çözüm algoritmaları ve türbülans modellerini belirlemek olmalıdır. Çözüm algoritmaları analiz edilen sistemler için çok önemlidir. Çünkü modelin fiziki şartlarının öngörüsü önceden doğru bir şekilde yapıldığında doğru sonuca yaklaşma olasılığı artar. Aksi halde denklem sistemleri ve çözüm algoritmaları arasındaki uyumsuzluk çözümü doğruluk kriterinden uzaklaştırıp çok daha farklı sonuçlar alınmasına neden olur, hatta bu durum bazen matematiksel olarak denklemlerin çözümünü imkansızlaştırabilir. Bu nedenle çözüm algoritmalarını seçerken sistemin fiziki şartları iyi tanınmalı ve de literatürden yardım alarak hareket edilmelidir.

Sonlu hacimler metodu ANSYS-Fluent de dahil olmak üzere ticari amaçlarla kullanılan birçok paket programın kullandığı bir çözüm yöntemidir. "Sonlu hacim" ağ (mesh) oluşturulmuş bir geometri üzerindeki her bir düğüm noktasını çevreleyen küçük bir hacmi ifade eder ve bilinmeyen değişkenlerin bu hacim boyunca(kontrol hacmi) ortalamasının alınmasıyla çözüm elde eder(Şekil 3.7). Bu tezde de CFD' de kullanılan en köklü ve en güvenilir genel amaçlı sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Sonlu hacimler metodu, sonlu farklar metodu yerine tercih edilir, çünkü bu yöntemde ağın yapılandırılması zorunlu değilken, yapılandırılmış ağ da kullanılabilir, fakat sonlu farklar metodunda yapılandırılmış ağa zorunlu olarak ihtiyaç vardır.



Şekil 3.7 Sonlu hacimler metodunun kullandığı kontrol hacmi şematik gösterimi(Norazwan ve ark. 2015)

Akışkan hareketini oluşturan kütle, momentum, enerji korunum denklemleri ve onların korunum kanunlarını integral formda gösteren kısmi diferansiyel denklemler olan Navier-Stokes denklemleri, cebirsel denklemlere dönüştürülerek belirlenen akış alanı (computational domain) içinde sayısal hesaplamalar yapılmasını sağlar. Sonlu elemanlar metodu da akış alanının, ilgili taşınım, momentum ve süreklilik denklemlerinin ayrıştırılmasıyla başlar(Eren 2010).

HAD analizleri için kullanılacak kanat profillerinin koordinat değerleri web sitesinden (airfoiltools.com) alınarak rüzgar türbininin 2 boyutlu çizimi ANSYS 2020R1 Academic Design Modeler modülü yardımı ile yapılmıştır. Analiz için sonlu hacimler metodu kullanılarak Fluent programında sıkıştırılamaz kararsız akış için Moving Mesh (hareketli ağ yapısı) ve SST (Shear Stress Transport) k- ω modeli kullanılmıştır. Bu model düşük Reynolds sayılarında türbülanslı akışlarda türbo makinalarda diğer modellerden daha

güvenilir sonuçlar vermektedir. Rüzgar türbinlerinde çözümü kolaylaştırdığı için Moving Mesh metodu sıkça kullanılmaktadır(Castelli 2011). Yakınsama kriteri olarak 10^{-4} seçilmiş, her bir λ değeri için akış kararlı hale gelene kadar programın çalışması devam ettirilmiştir. Çalışmada zaman aralığı her bir kanat profilinin 1° hareketini sağlamak üzere 2.10^{-4} s olarak ayarlanmıştır. Her 4° 'de bir kez değerler kaydedilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

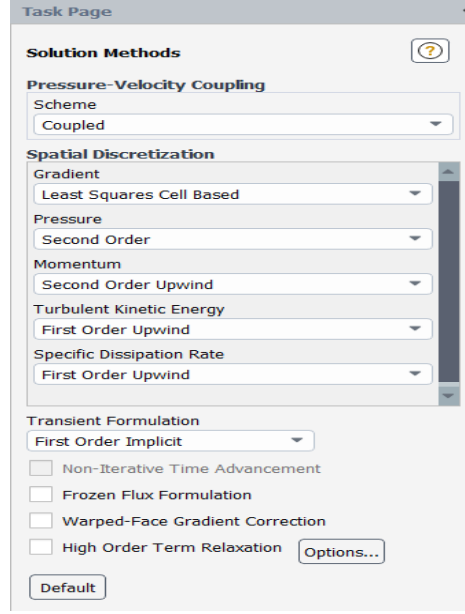
Çizelge 3.3'te gösterilen kanat ucu hızı oranına bağlı güç sayısı değerlerini en düşük hata oranı ile elde edebilmek amacıyla, ağ yapının aktarıldığı ve ANSYS Fluent'te kurulan modelde, basınç-temelli çözücü ve kararlı (steady) akış seçilmiştir(Guo ve ark. 2015, Liu ve ark. 2014).

Belirlenen geometrik modeller için seçilen çözüm yöntemleri şekil 3.8'deki gibidir.

Sırasıyla açıklanırsa:

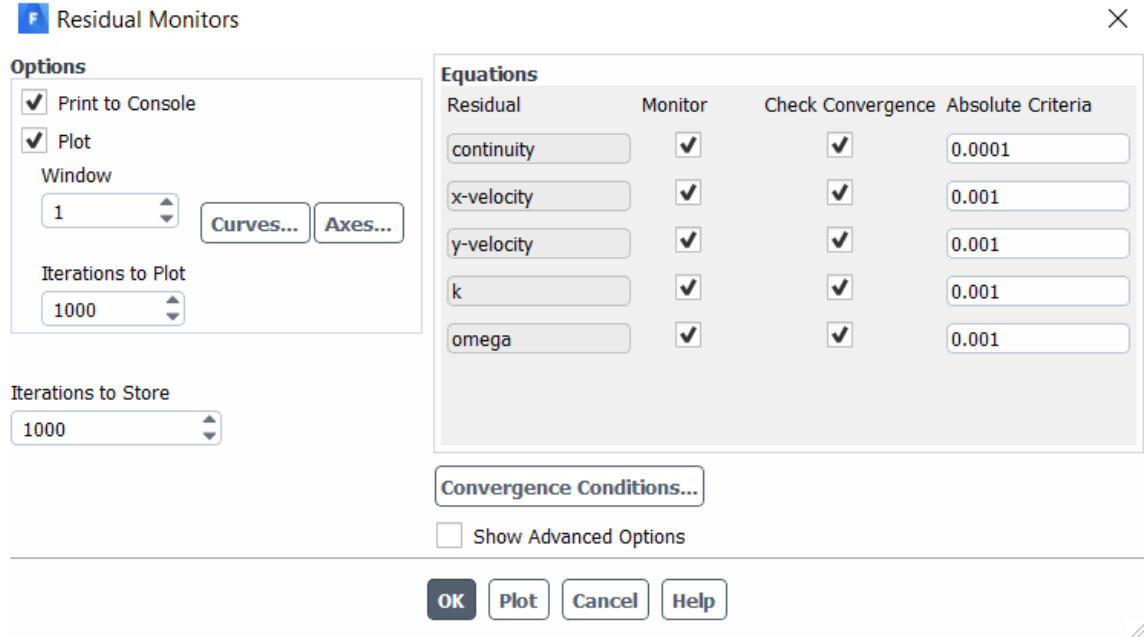
- i. Türbülans modeli: $k-\omega$ SST,
- ii. Basınç-hız eşleşmesi (pressure-velocity coupling): Coupled,
- iii. Uzaysal ayrıklaştırma (spatial discretization) başlığında:
 - a. Gradyan En Küçük Kareler Hücre Tabanlı(least squares cell based),
 - b. Basınç: 2. Derece(second order),
 - c. Momentum: 2. Derece(second order upwind),
 - d. Türbülans kinetik enerjisi: 1. Derece(first order upwind),
 - e. Özgül enerji sönmleme oranı (specific dissipation rate): 1. Derece(first order upwind)

olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.8 Çözüm yöntemleri seçimi ekran görüntüsü

Süreklilik denklemleri için yakınsama kriteri 10^{-4} , x-, y-, z- hız bileşenleri ve türbülans değişkenleri (k , ϵ veya ω) için yakınsama kriteri işlemci yükünü ve çözüm süresini düşürmek için 10^{-3} olarak belirlenmiştir.



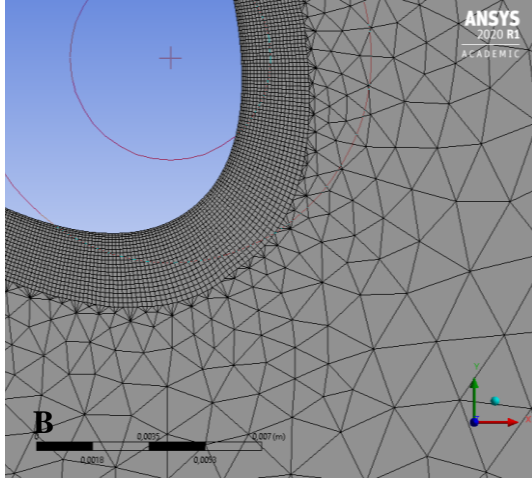
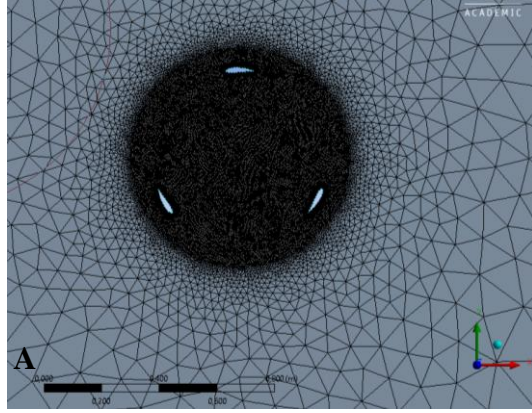
Şekil 3.9 Belirlenen yakınsama kriterlerinin ekran görüntüsü

3.5. Ağdan Bağımsızlık Çalışması (Mesh Independency Study)

Sayısal analizde 3 farklı ağ modeli kullanılmıştır. Her bir model uygun ağ yapısı ile bölüdükten sonra çözümler yapılmış ve sonuçlar ağdan bağımsız oluncaya kadar hücre sayısı arttırılmıştır. Hücre sayısı 75000, 166000 ve 275000 belirlenerek alınan sonuçlar Şekil 4.4’de konum açısının değişimine bağlı olarak moment değerinin nasıl etkilendiği grafik halinde verilmiş, Çizelge 3.4’te ise NACA4518 kanat profilinde $\lambda=2$ için ağ sayıları ve moment değerindeki değişimler gösterilmiştir. Hücre sayısı 166600 üzerine çıktığında momentteki değişim sonucu etkilemediğinden bundan sonra yapılan hesaplamalarda bu değer esas alınmıştır.

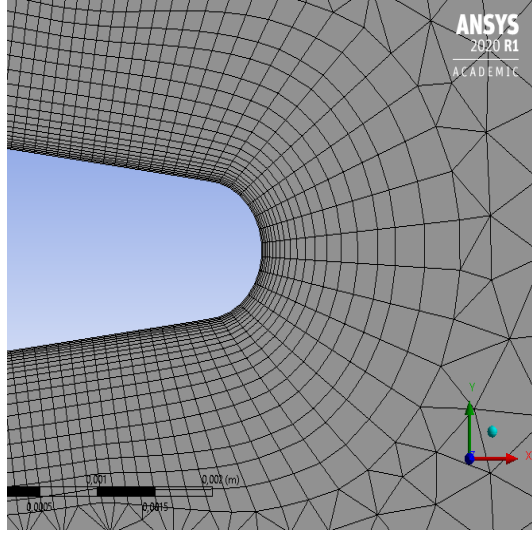
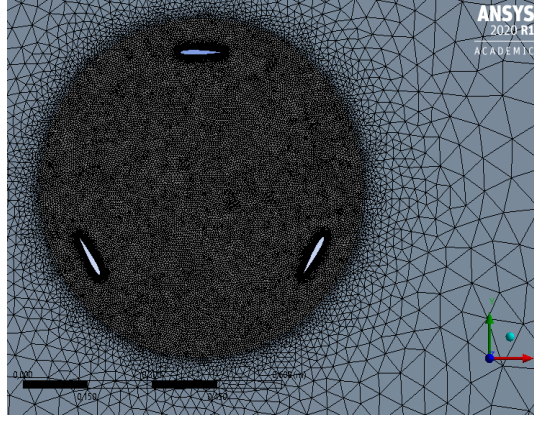
Çizelge 3.4. Farklı ağ sayılarında moment değerindeki değişim

Ağ sayısı	75000	166000	275000
Ortalama Moment Değeri [Nm]	0,52	0,31	0,30



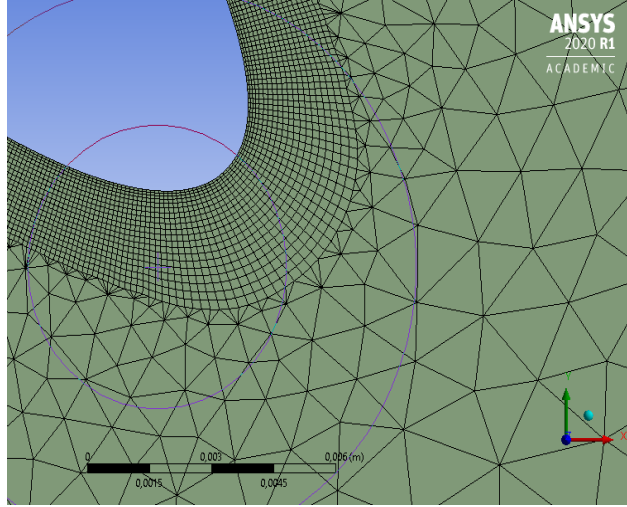
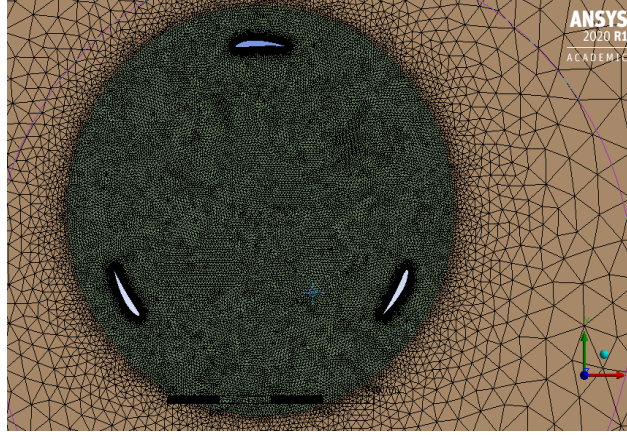
Şekil 3.10 Model 1 ağ yapısı (75000 hücre: kanat çevresinde dikdörtgen, diğer kısımlarda üçgen mesh kullanılmıştır.)

A) Rotorun oluşturulan ağ yapısı görüntüsü **B)** Kanat kenarları detaylı görünüm



Şekil 3.11 Model 2 ağ yapısı (166000 hücre: kanat çevresinde dikdörtgen, diğer kısımlarda üçgen mesh kullanılmıştır.)

A)Rotorun ağ yapısı görüntüsü **B)** Kanat kenarları detaylı görünüm



Şekil 3.12 Model 3 ağ yapısı (275000 hücre: kanat çevresinde dikdörtgen, diğer kısımlarda üçgen mesh kullanılmıştır.)

3.6. ANSYS-Fluent Kullanılarak Doğrulama (Validasyon) Çalışması

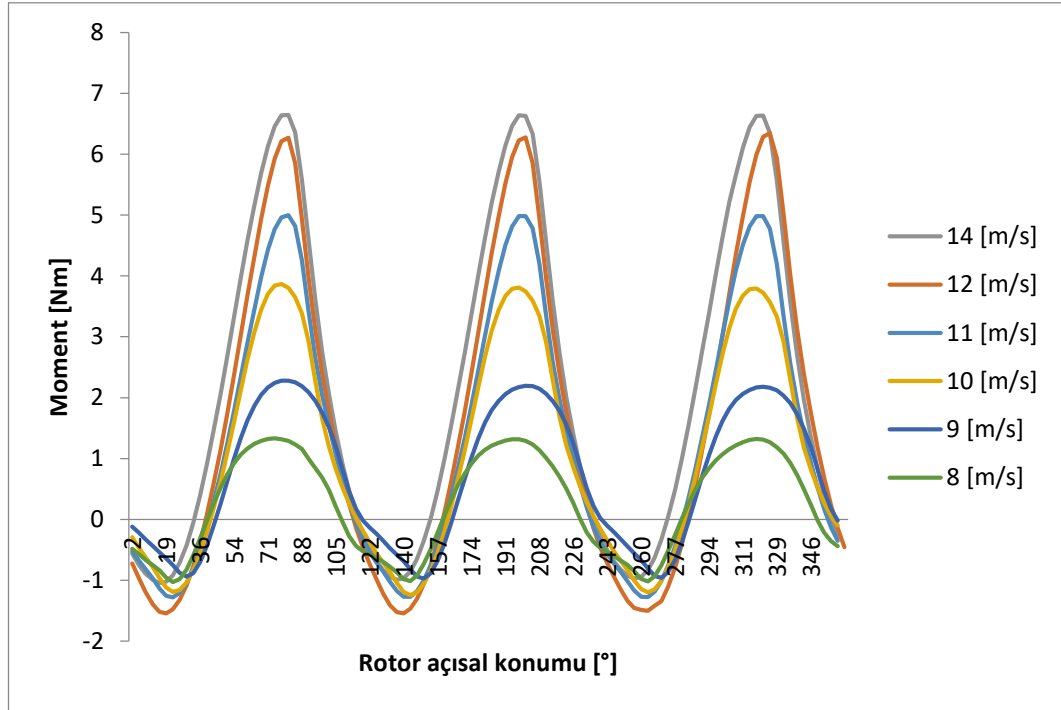
Her bir kanat profili için $\lambda=0.3-2.3$ değerleri aralığında, -5, 0, 5 ve 10 derece yunuslama açılarında moment değerleri bulunmuştur. Yapılan çalışmanın doğrulanması amacı ile daha önce Lanzafame ve ark. (2014) tarafından NACA4518 için bulunan sonuçlarla karşılaştırma yapılmış ve elde edilen değerler ile referans değerlerin uyumu tespit edildikten sonra diğer profillerin hesaplamasına geçilmiştir.

Çizelge 3.5. Doğrulama çalışması için girilen sınır şartları

Sınır Şartları (Boundary Conditions)	Değerler
Akışkan yoğunluğu (Hava)	1,225 kg/m ³
Akışkan viskozitesi (Hava)	1.7894x10 ⁻⁵ kg/ms
Rotor malzemesi	Alüminyum
Rotor yoğunluğu (Alüminyum)	2719 kg/m ³
Rotorun açısal hızı	60 rad/s
Türbülans yoğunluğu	0,05
Türbülans ölçeği	1
Rüzgar giriş hızı (Velocity inlet)	12 m/s
Çıkış basıncı (Pressure outlet)	0 Pa
Kanatlar için pürüzlülük sabiti	0,5

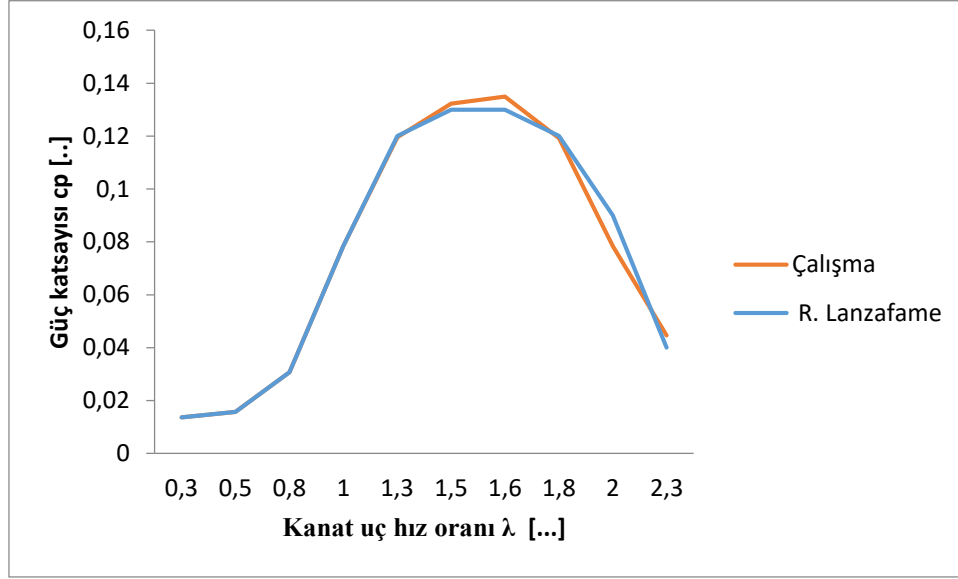
4.BULGULAR ve TARTIŞMA

Şekil 4.1’ de farklı rüzgar hızlarında rotor açılal konumuna göre momentteki değişim görölmektedir. Şekilde rüzgar hızındaki artışa bağlı olarak momentin de arttığı açıkça görölmektedir. Bununla birlikte rotor açısının 70° civarında momentin maksimum olduğu, 19° civarında momentin minimum olduğu ve bu değerlerin 120°’lik periyotlar ile tekrarlandığı görölmektedir.



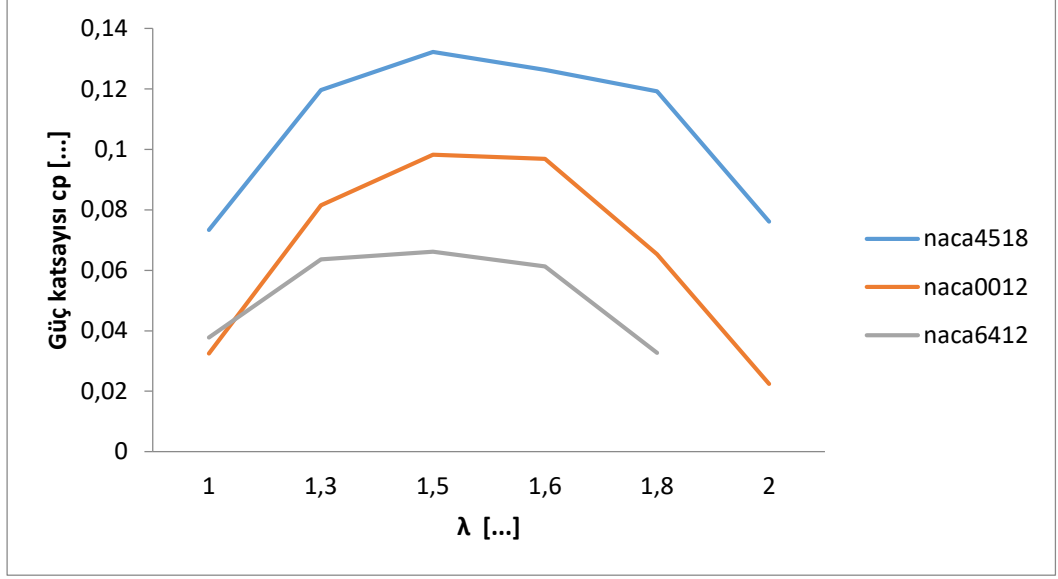
Şekil 4.1 Devir sayısı 60 rad/s de farklı rüzgar hızlarında moment değişimi

Sayısal çalışmanın hesaplarının doğru olduğuna kanaat getirebilmek için başka bir çalışma ile sonuçların uyumlu olması gerekmektedir. Bu çalışmada NACA4518 için bulunan sonuçlar ile Lanzafame ve ark. (2014) tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı. Elde edilen sonuçların Lanzafame ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışma ile uyumlu olduğu Şekil 4.2’ de görölmektedir.



Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan NACA4518 profilinin sayısal çözümünün R. Lanzafame ve ark.nın çalışması ile uyumu

Bu değerler sağlandıktan sonra λ değerlerine bağlı olarak NACA0012 ve NACA6412 profilleri için hesaplamalar yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.3' de gösterilmiştir. Şekilde NACA4518 için bulunan güç katsayısı C_p 'nin yüksek, NACA6412 için düşük olduğu görülmektedir. Bu değişimin nedeni; kanat profillerindeki kaldırma katsayısı C_l 'nin sürüklenme katsayısı C_d 'ye oranı C_l/C_d arttıkça moment değerinin düşmesidir, dolayısıyla güç katsayısı C_p azalmaktadır. Çizelge 4.1' de kullandığımız kanat profilleri için C_l ve C_d değerleri ve bu değerlerin oranları verilmektedir.

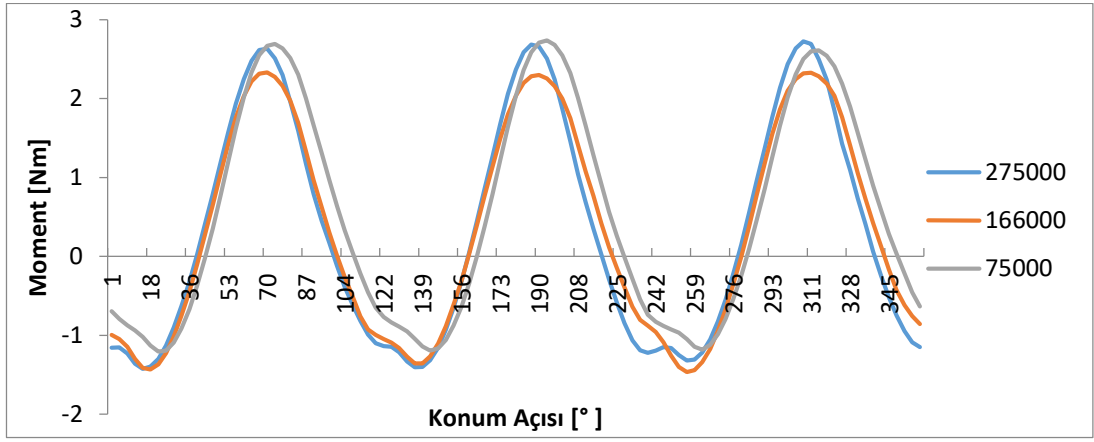


Şekil 4.3 Farklı kanat uç hız oranlarına (λ) göre NACA4518, NACA0012 ve NACA6412 kanatlarındaki güç katsayısının (C_p) değişimi

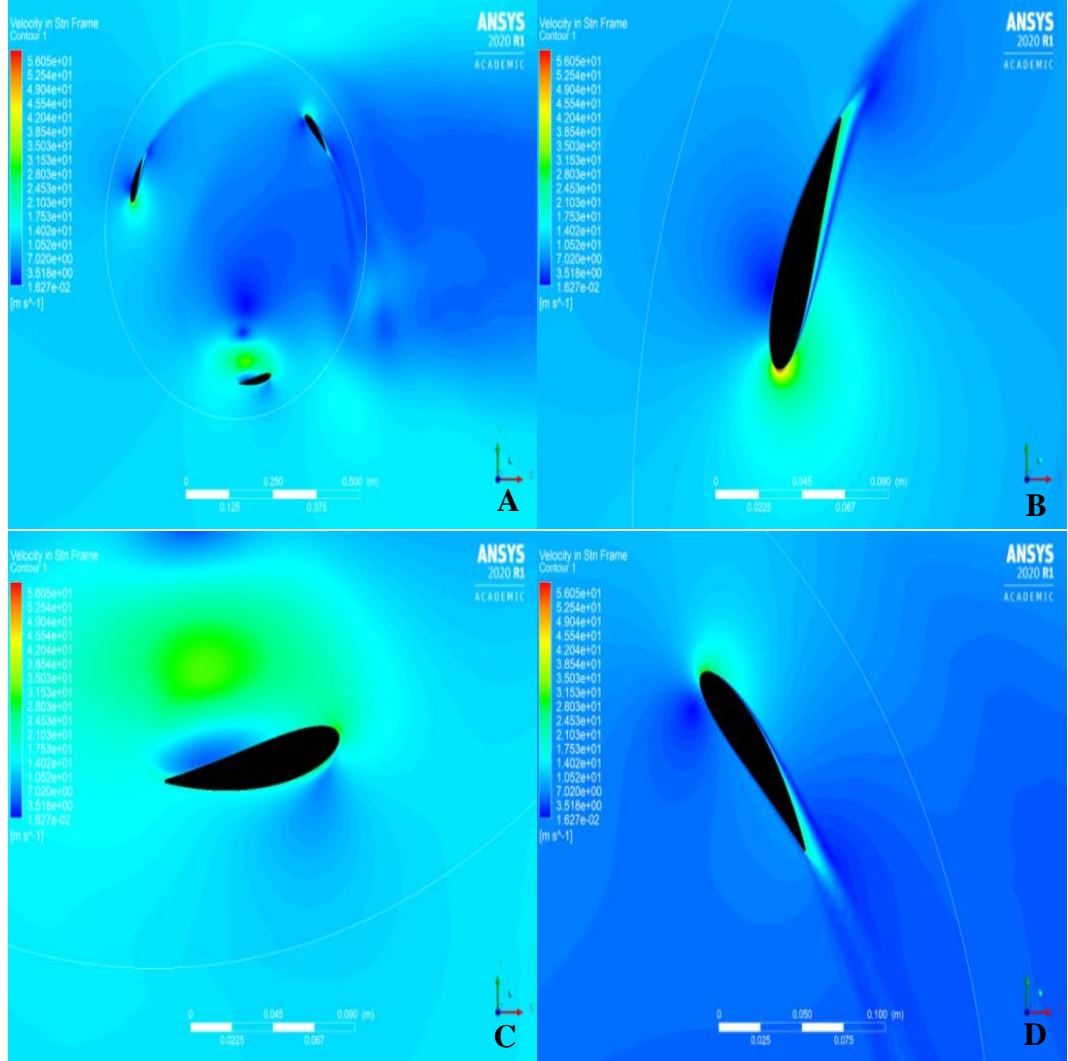
Çizelge 4.1. Kanat profillerine ait C_l , C_d ve C_l/C_d değerleri (Naca 4 digit airfoil generator)

Kanat Profili ($Re=100000$ ve 10° yunuslama açısında)	C_l	C_d	C_l/C_d
NACA 4518	0.3257	0.01843	17.50
NACA 0012	0.6798	0.02089	32.54
NACA 6412	1.2353	0.02110	58,50

Bölüm 3.5’ de bahsedilen ağdan bağımsızlık çalışmasına bağlı olarak bulunan moment değerleri Şekil 4.4’ de gösterilmiştir. 166000 hücreden daha fazlası için belirlenen 275000 hücre sayısında moment değerinde gözle görülür bir artış olmadığından sonraki hesaplamalarda 166000 hücre kullanılmıştır.



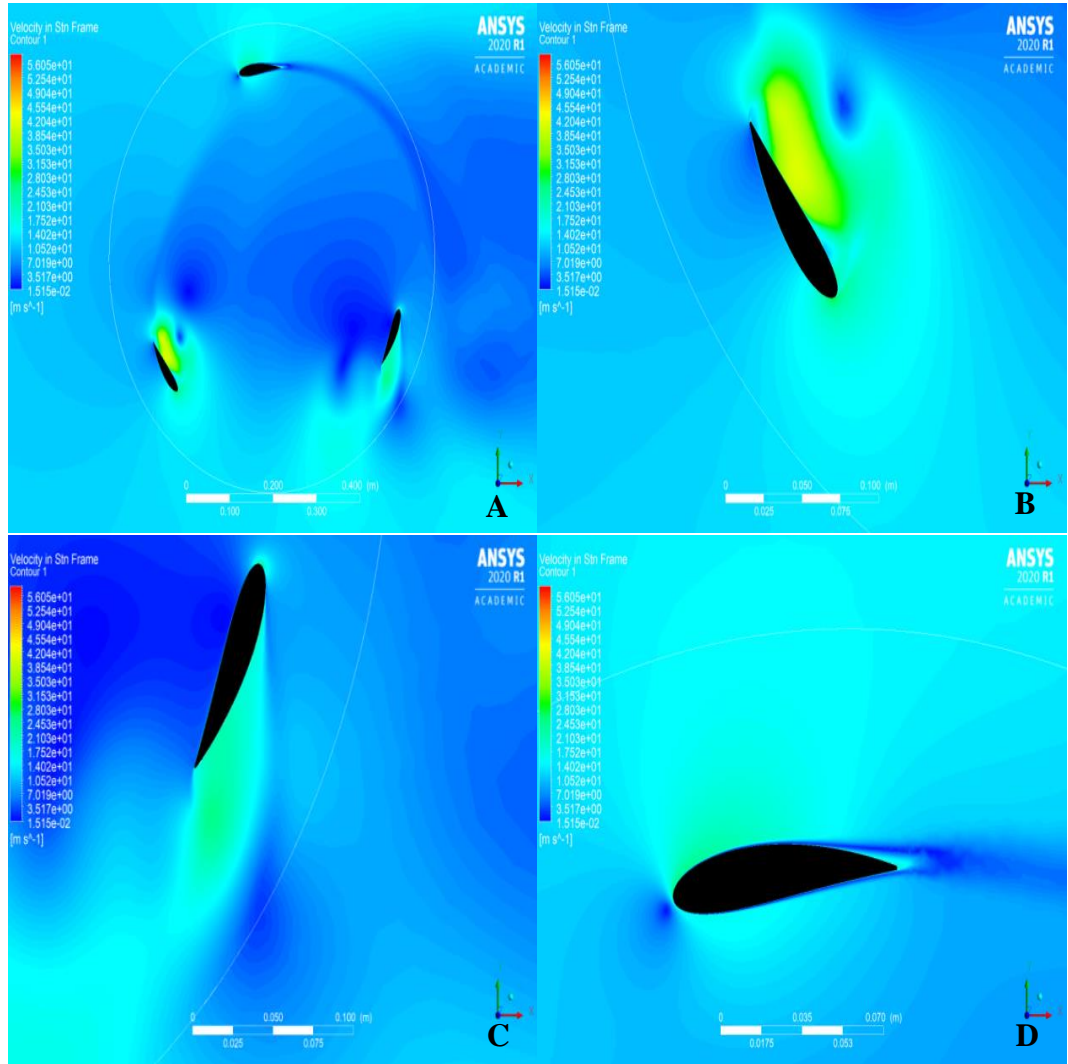
Şekil 4.4 Ağ sayısı 75000, 166000 ve 275000 iken moment değerindeki değişim



Şekil 4.5 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 74° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki hız dağılımı

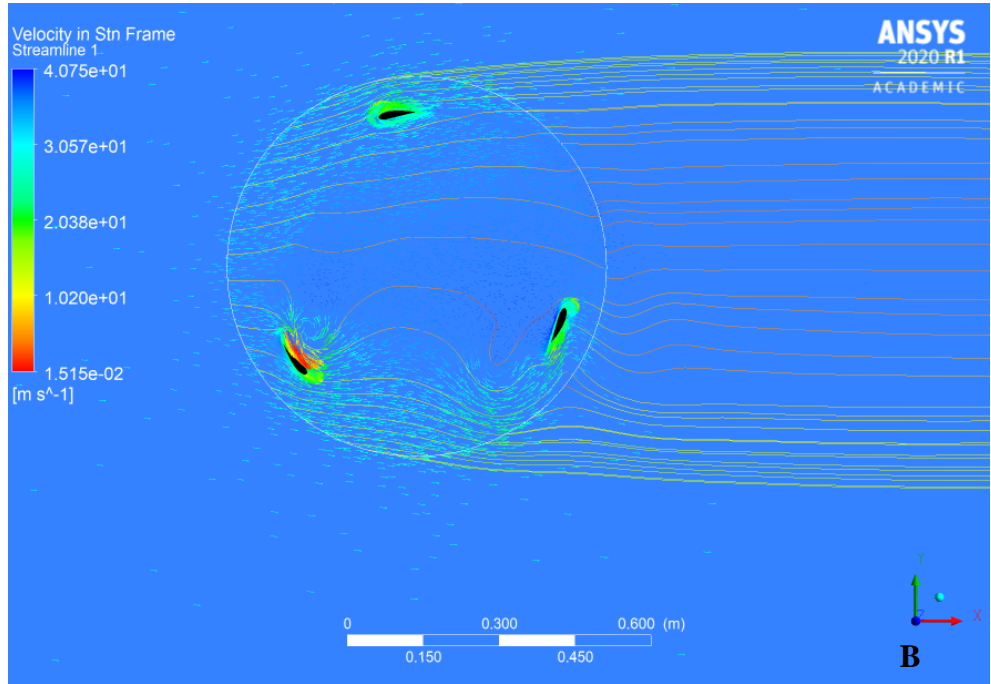
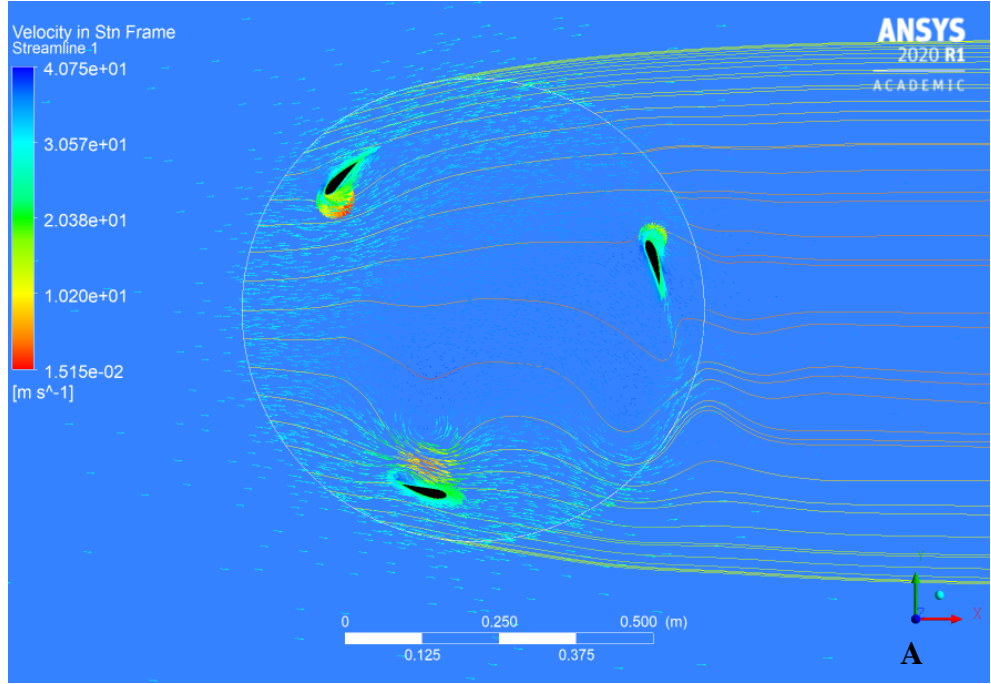
A)Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C)2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



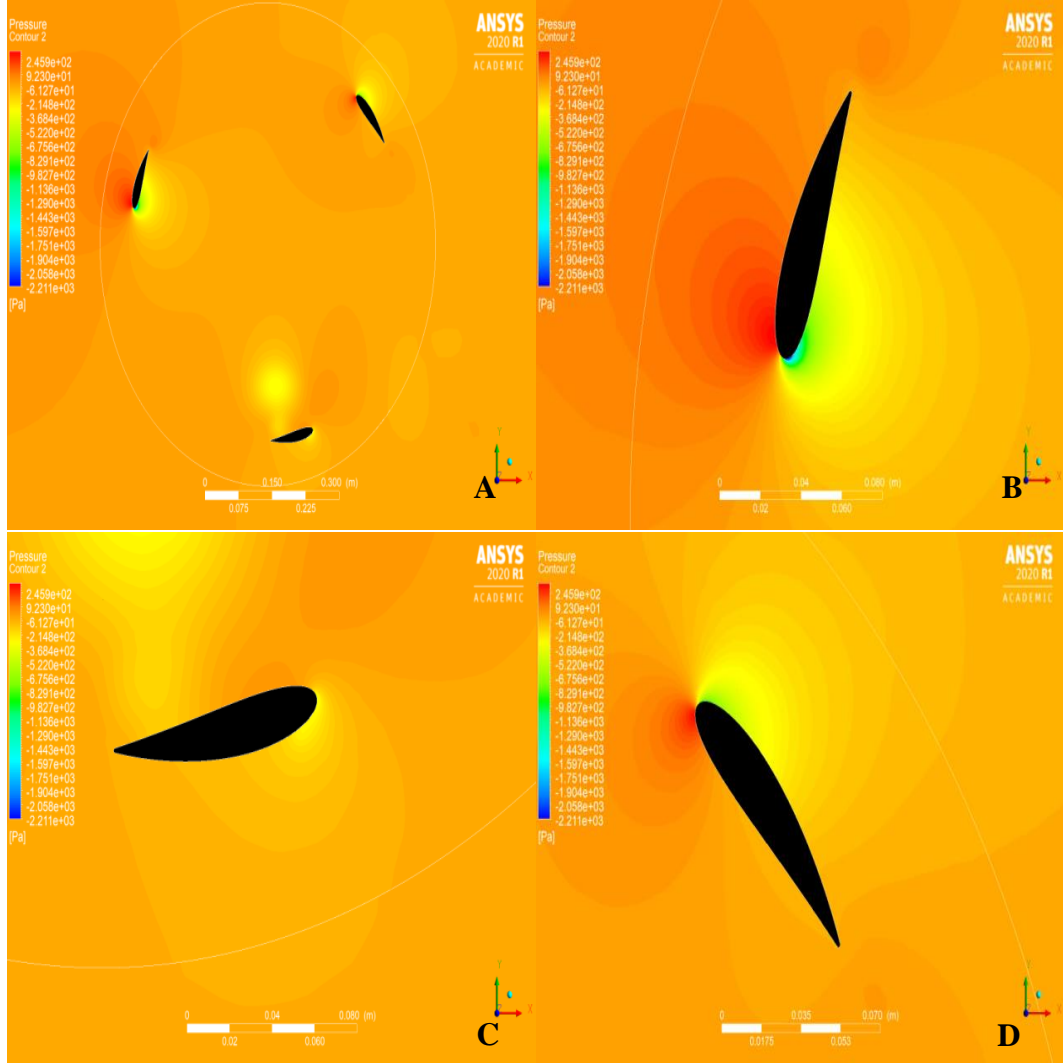
Şekil 4.6 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 135° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki hız dağılımı

- A) Komple gösterim B) 2 nolu kanat detay görünüm
C) 1 nolu kanat detay görünüm D) 3 nolu kanat detay görünüm



Şekil 4.7 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, NACA4518 kanatlarındaki hız dağılım konturları
A) 74° rotor açısında ve **B)** 135° rotor açısında

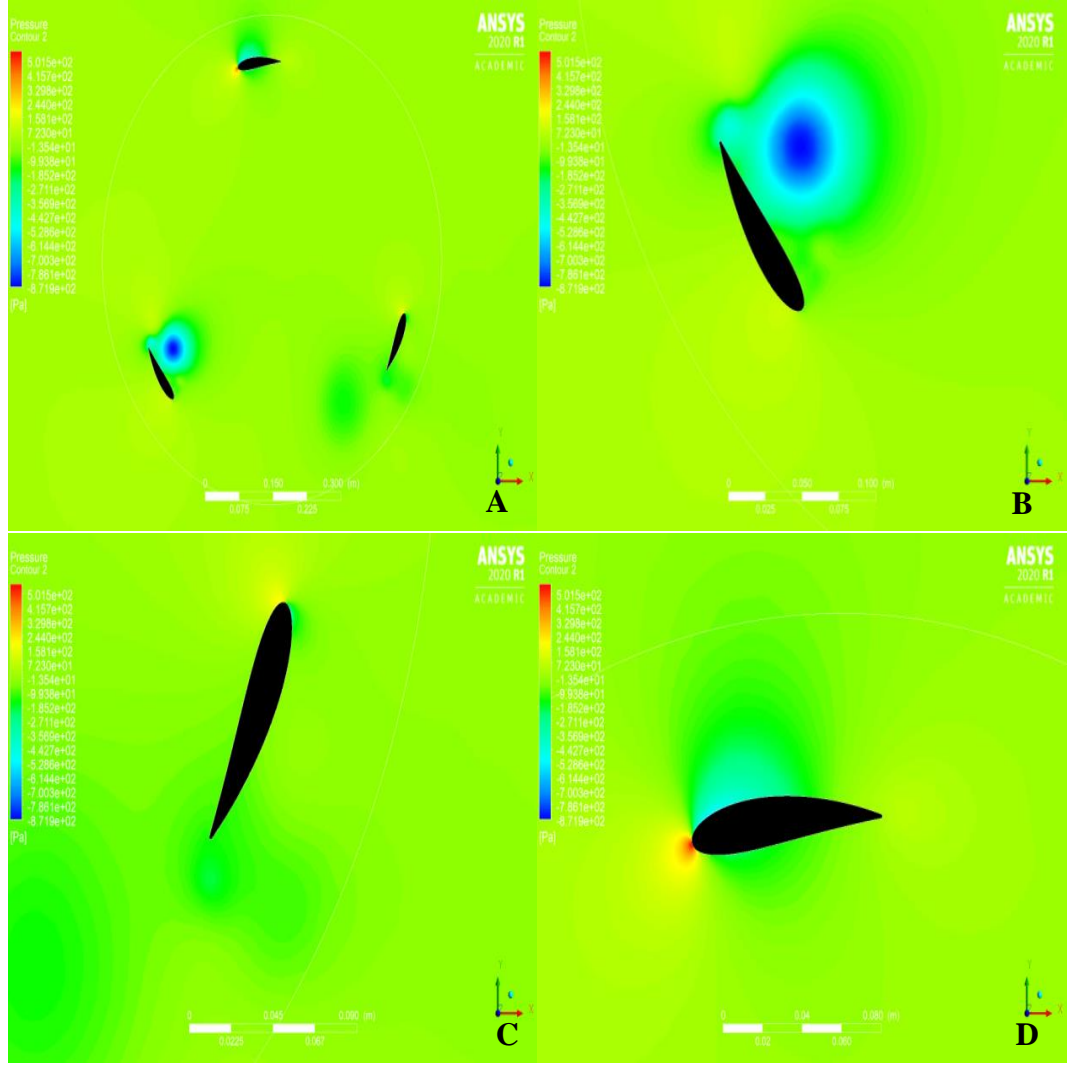
Şekil 4.7’de görüldüğü gibi rotor konum açısına göre hız profilleri değişmekte, 135° konum açısında 1. ile 2. kanat arasında ve çevrelerinde ikincil akışlar oluşmakta bu durum moment değerini olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 4.8 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 74° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki basınç dağılımı

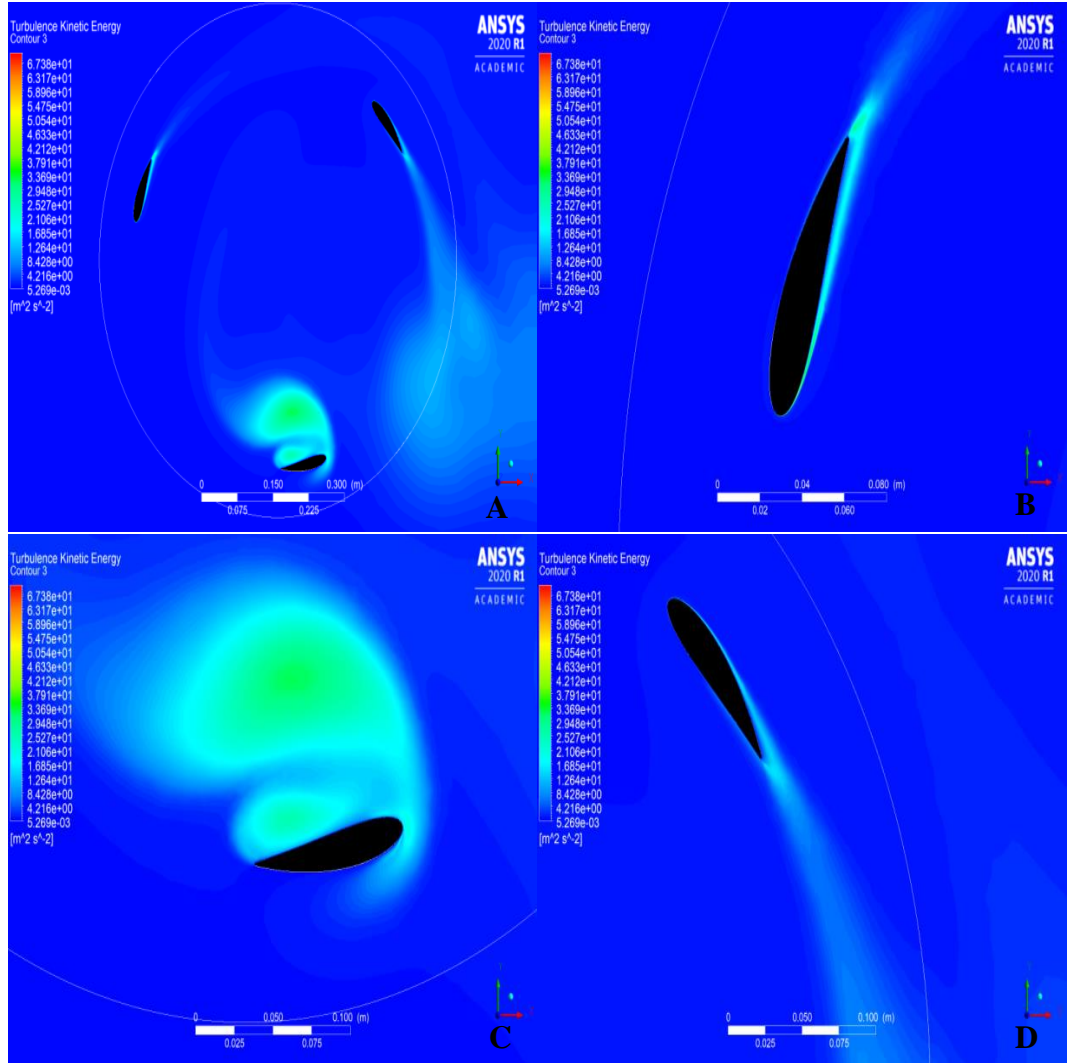
A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



Şekil 4.9 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 135° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki basınç dağılımı
A) Komple gösterim **B)** 2 nolu kanat detay görünüm
C) 1 nolu kanat detay görünüm **D)** 3 nolu kanat detay görünüm.

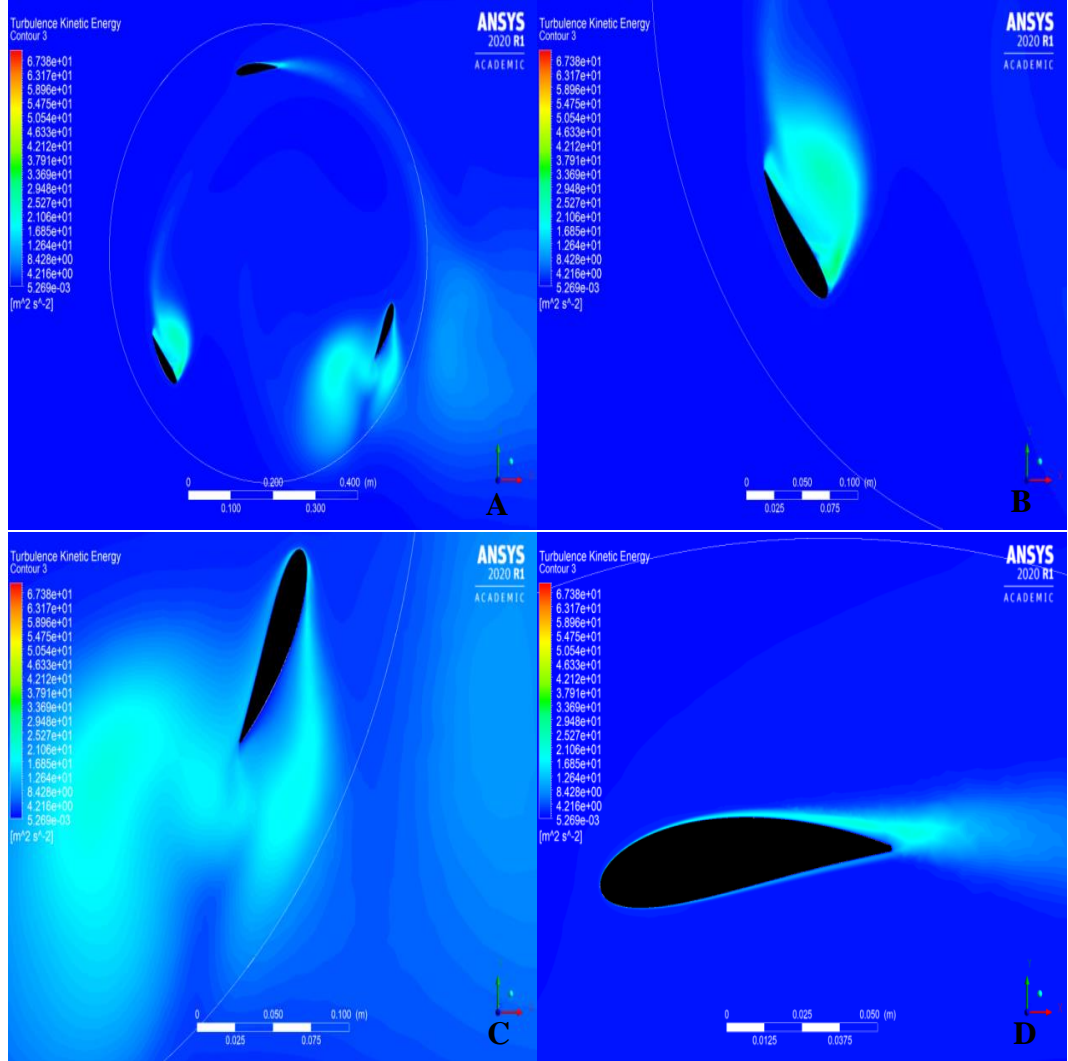
Şekil 4.8 ve 4.9 incelendiğinde kanat çevresinde oluşan basınç moment değeri düşmektedir. 135° konum açısında 2 ve 3 nolu kanat uçlarında oluşan basınç değeri 74° konum açısındaki basıncın yaklaşık 2 katı olmaktadır.



Şekil 4.10 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 74° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı

A) Komple gösterim B) 1 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm D) 3 nolu kanat detay görünüm

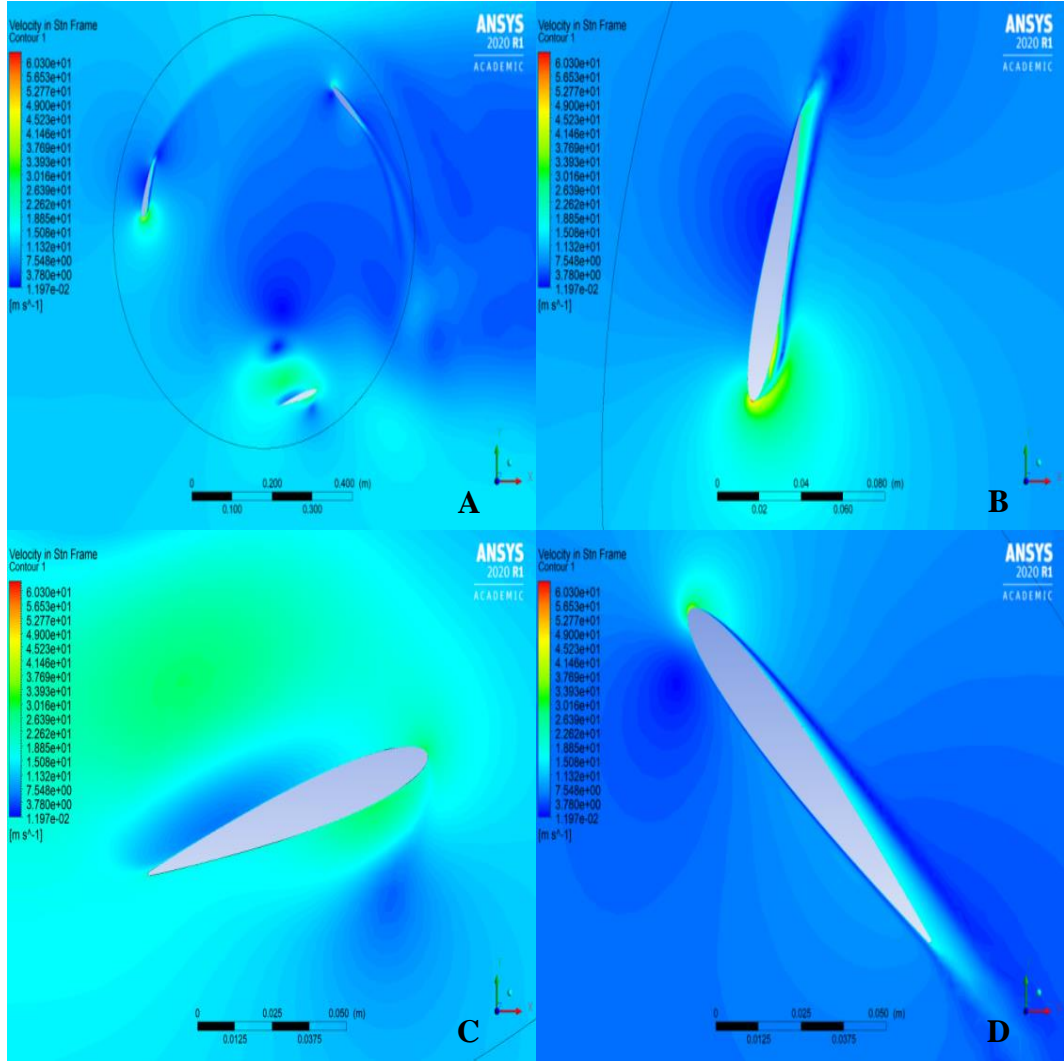


Şekil 4.11 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 135° rotor açısında NACA4518 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı

A) Komple gösterim **B)** 2 nolu kanat detay görünüm

C) 1 nolu kanat detay görünüm **D)** 3 nolu kanat detay görünüm

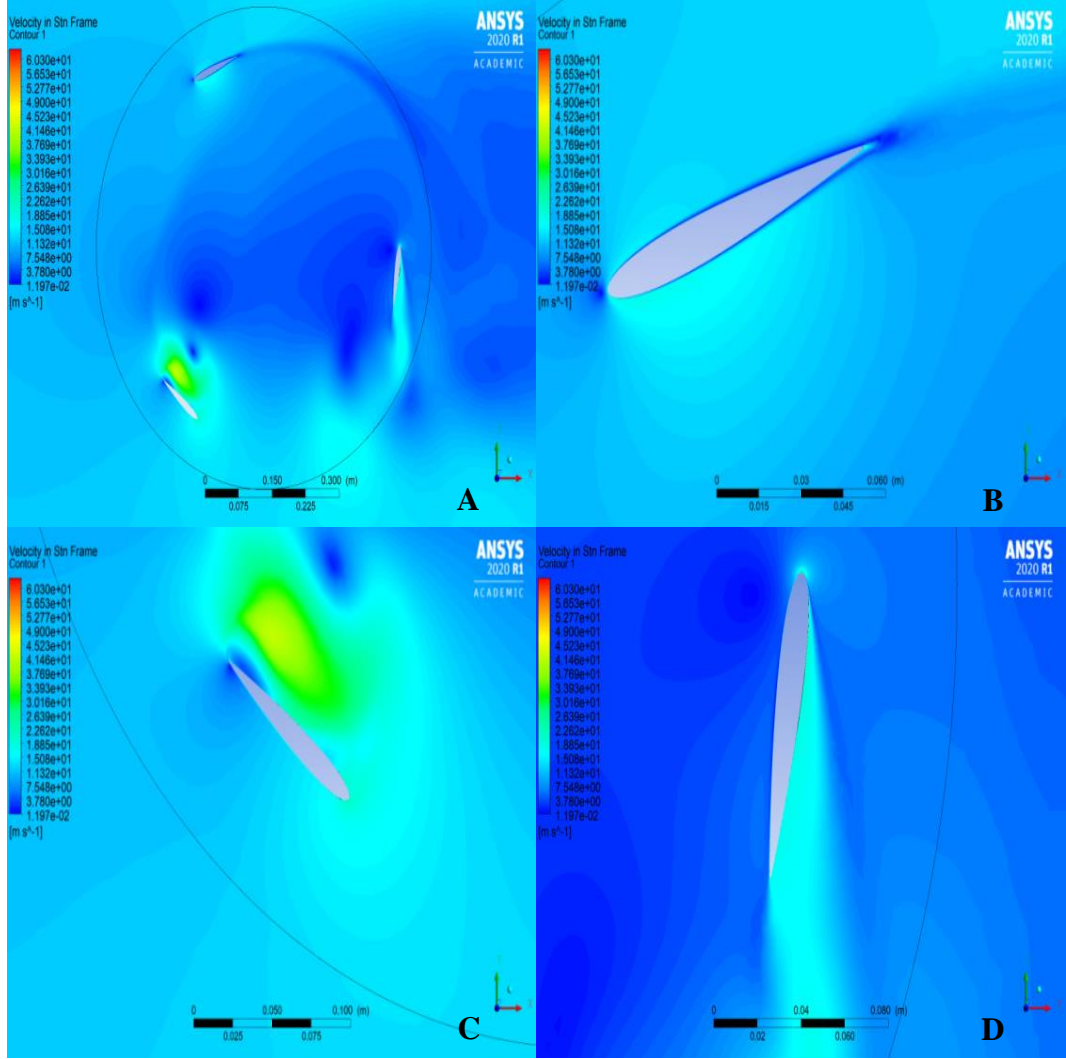
Türbülans kinetik enerjinin artışı ile momentte düşme olmaktadır. Şekil 4.11' de görüldüğü üzere 135° konum açısında 2 ve 3 nolu kanatlarda kinetik enerjinin arttığı görülmektedir.



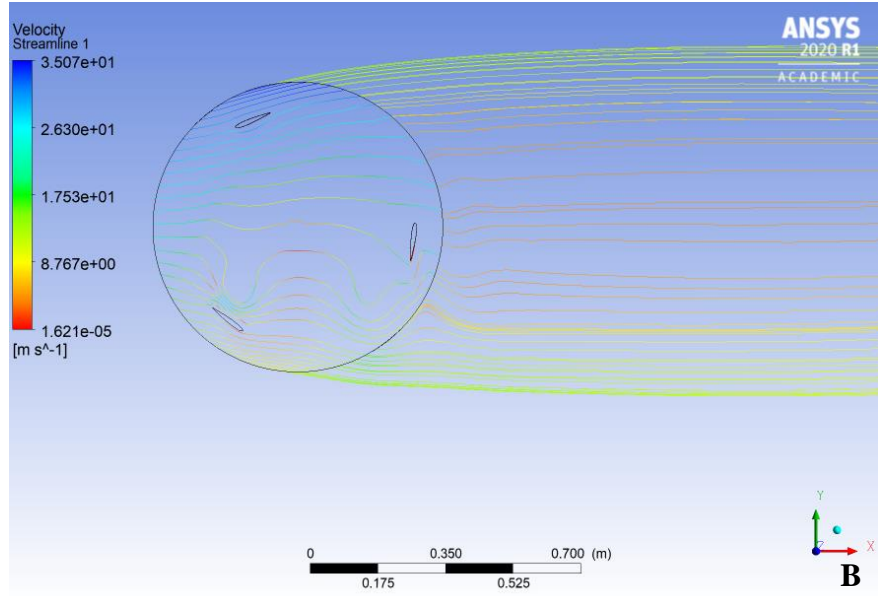
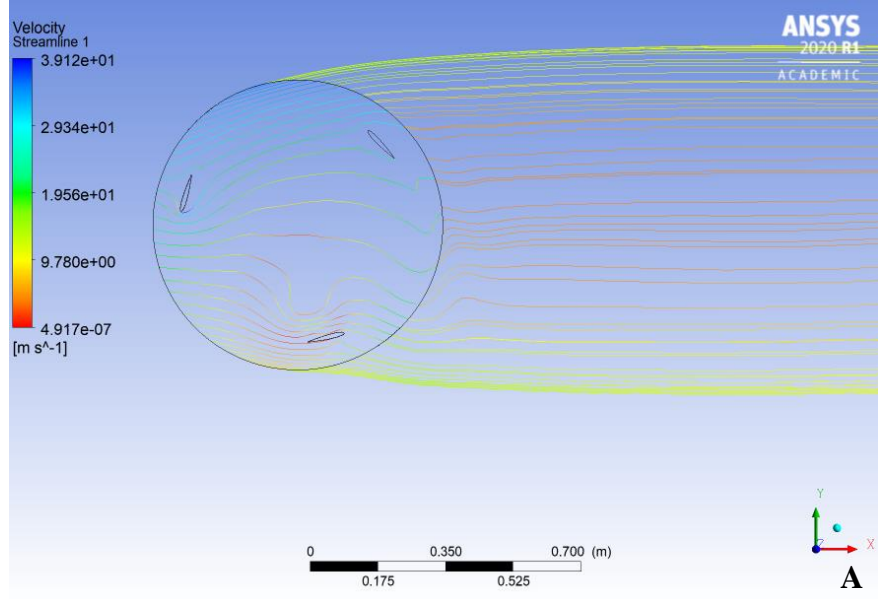
Şekil 4.12 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 72° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki hız dağılımı

A) Komple gösterim B) 1 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm D) 3 nolu kanat detay görünüm

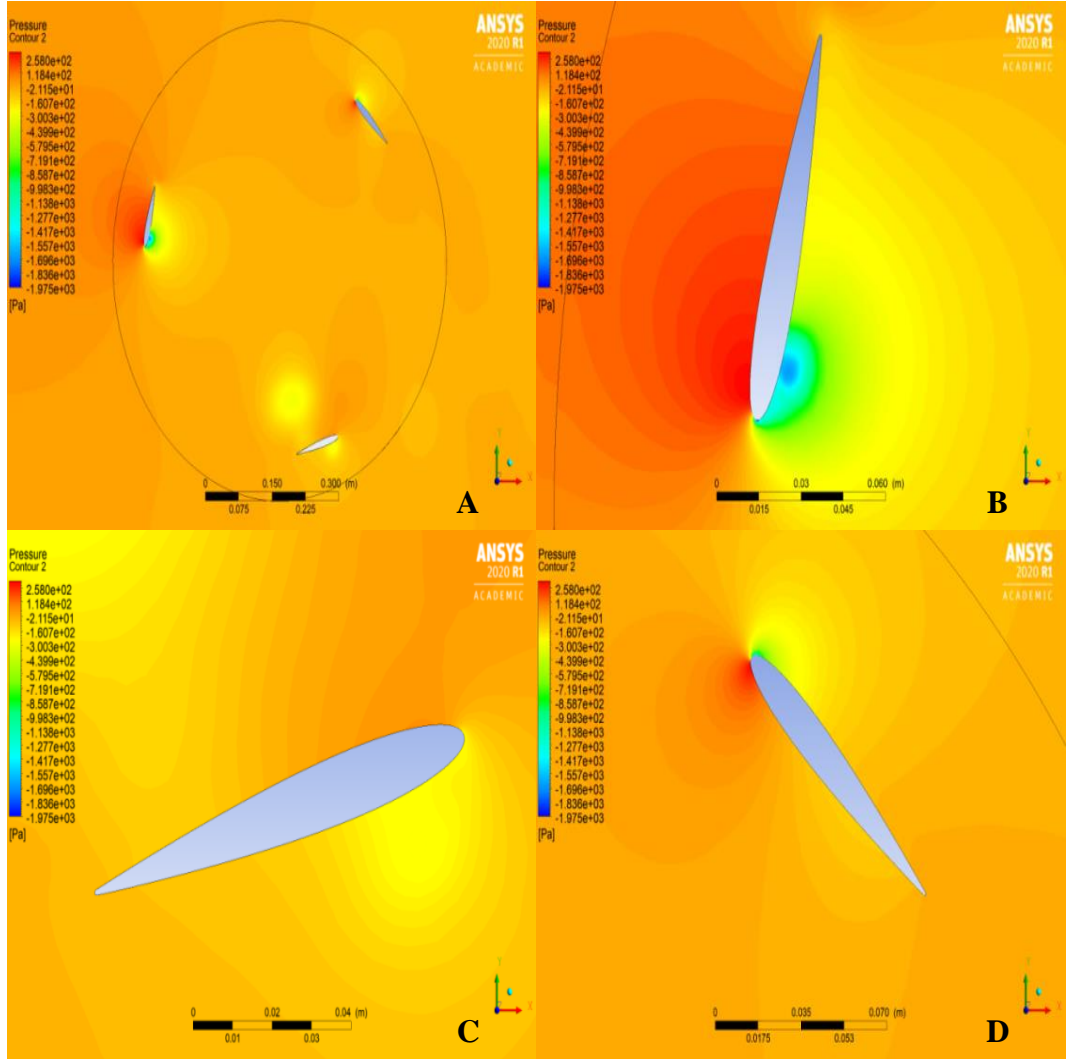


Şekil 4.13 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 136° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki hız dağılımı
A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm
C) 2 nolu kanat detay gösterim **D)** 1 nolu kanat detay gösterim



Şekil 4.14 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, NACA0012 kanatlarındaki hız dağılım konturları

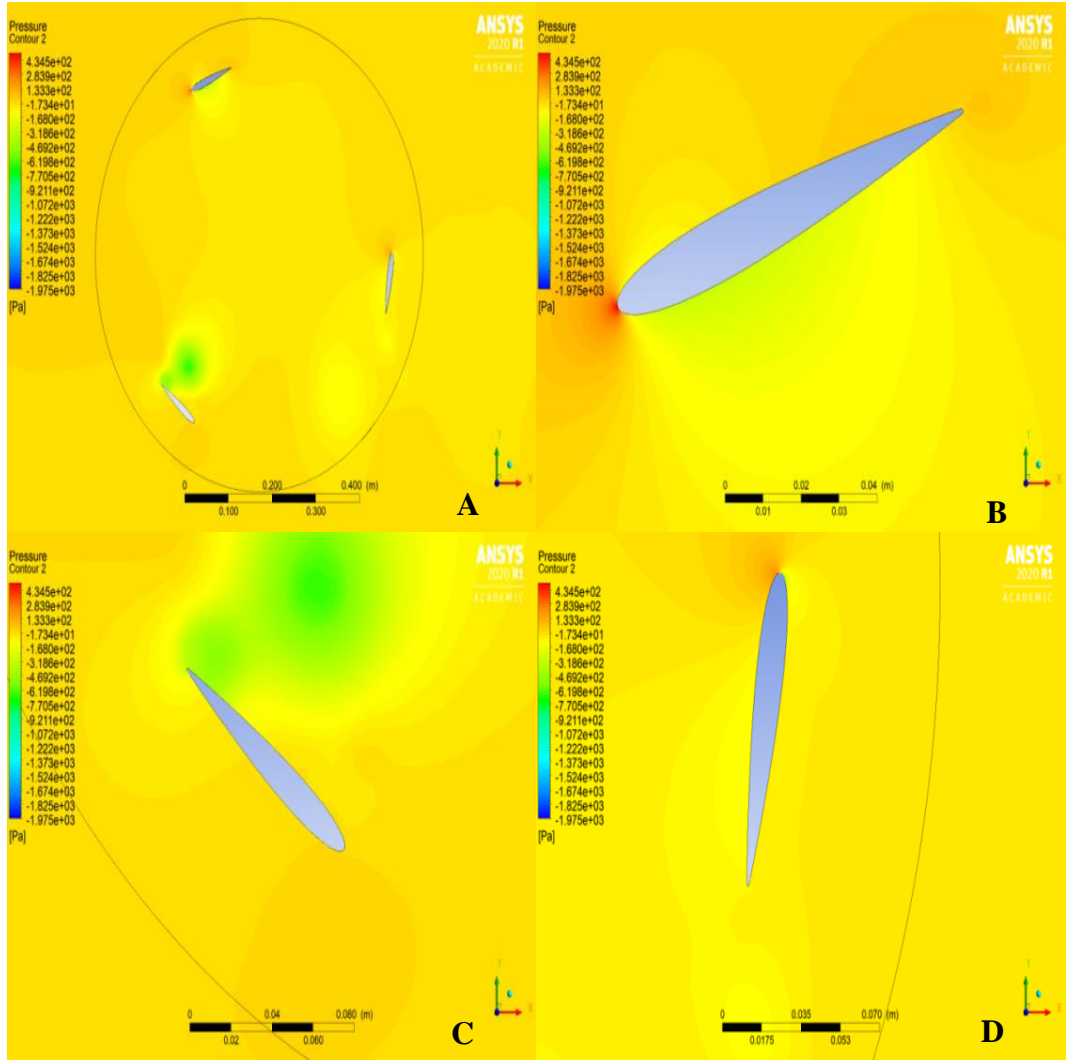
A) 72° rotor açısında ve **B)** 136° rotor açısında



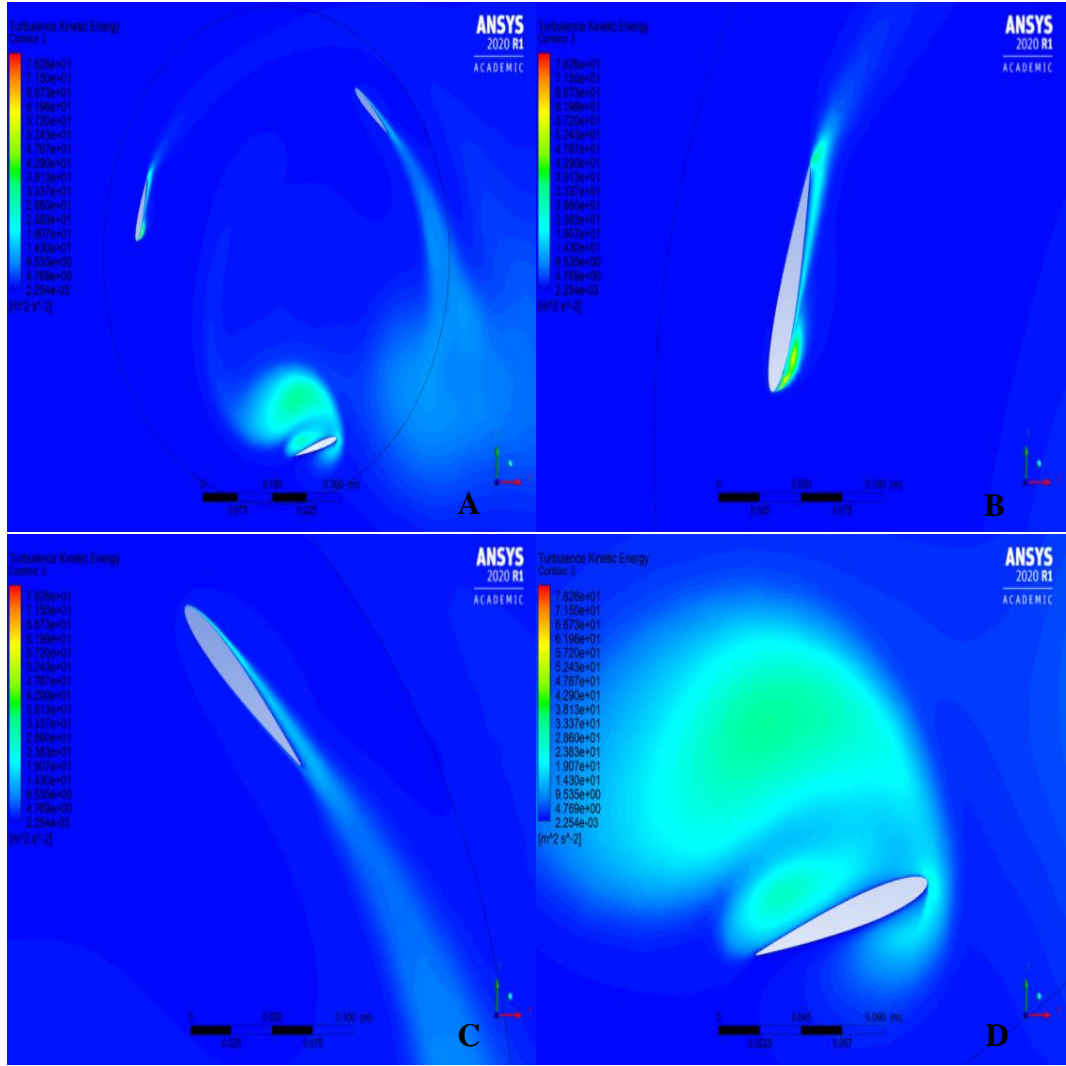
Şekil 4.15 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 72° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki basınç dağılımı

A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



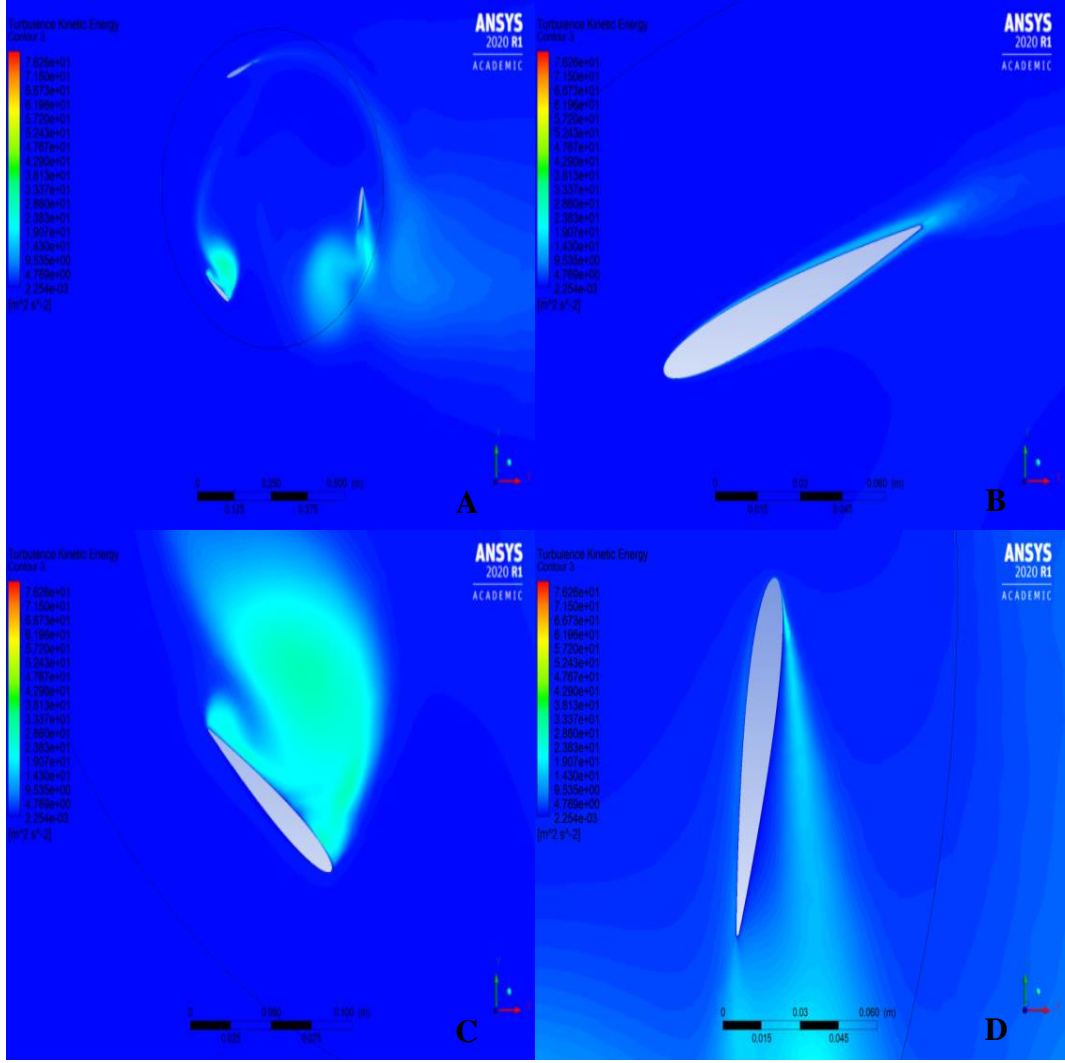
Şekil 4.16 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 136° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki basınç dağılımı
A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm **C)** 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



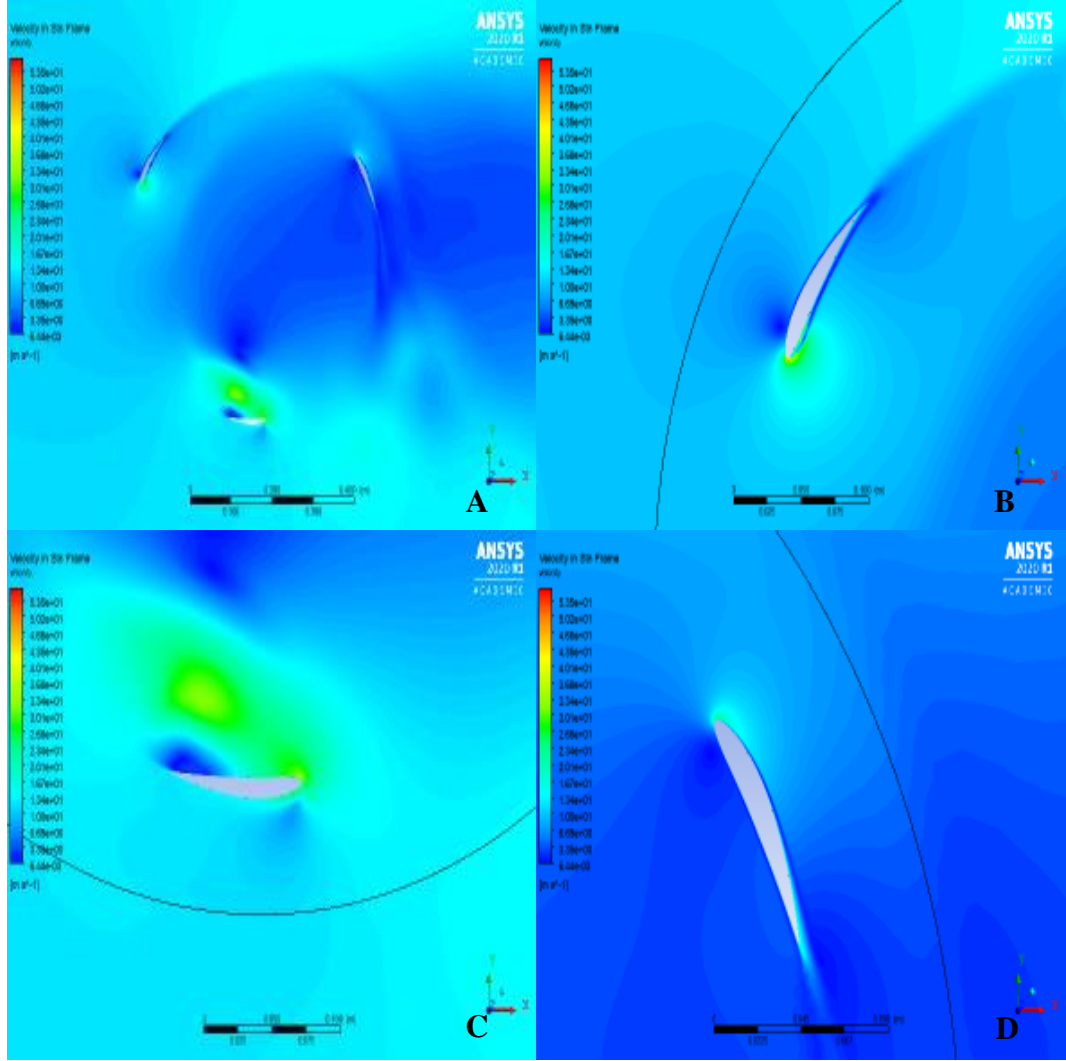
Şekil 4.17 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 72° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı

A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C) 1 nolu kanat detay görünüm **D)** 2 nolu kanat detay görünüm



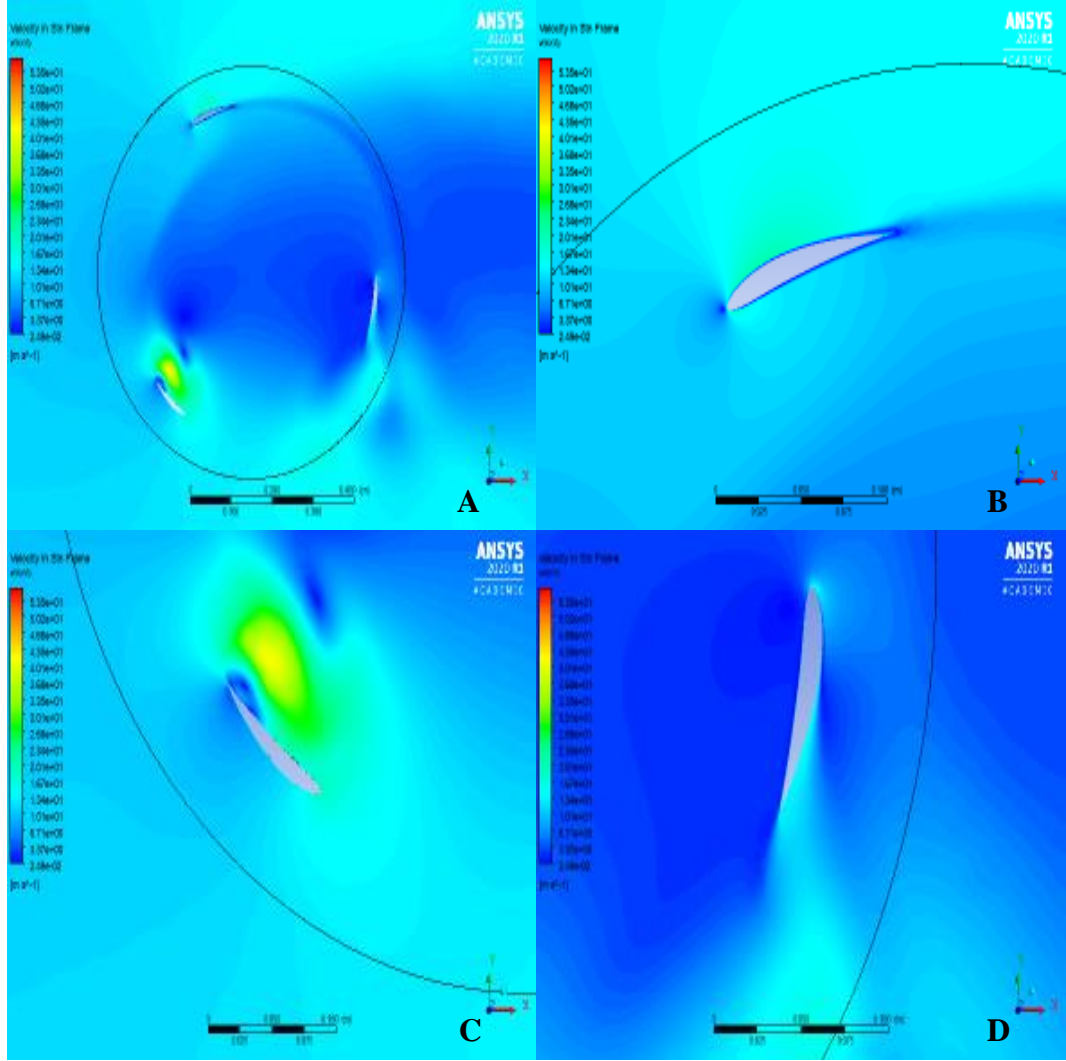
Şekil 4.18 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 136° rotor açısında NACA0012 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı
A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm
C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



Şekil 4.19 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 56° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki hız dağılımı

A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

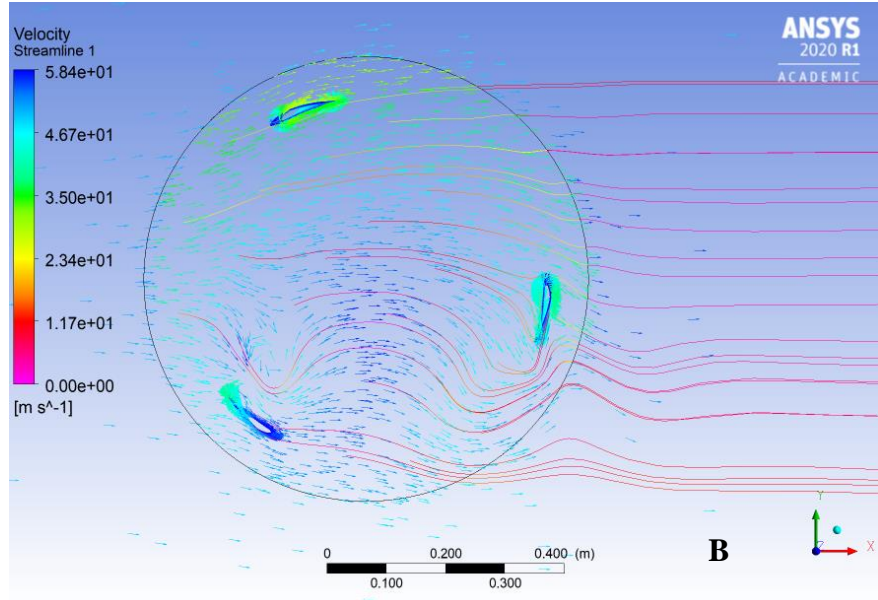
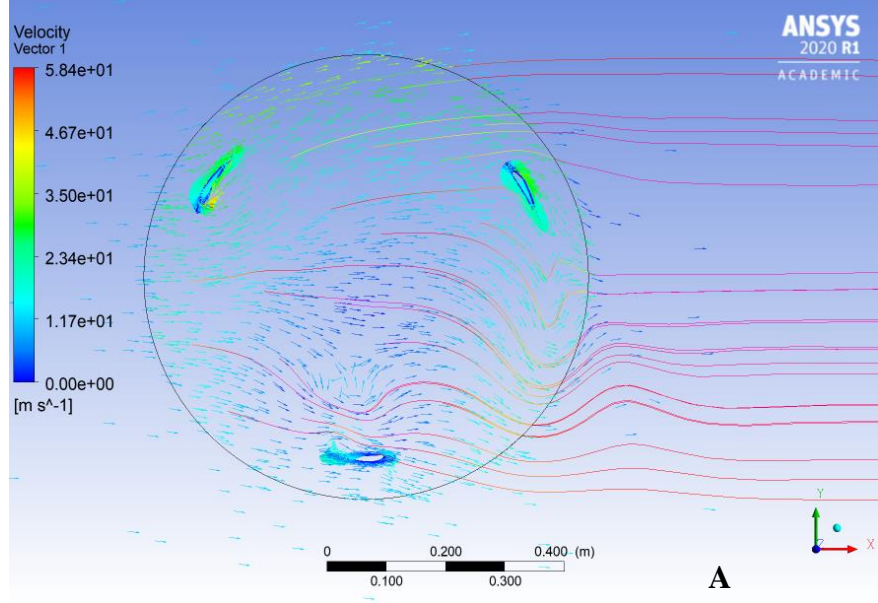
C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



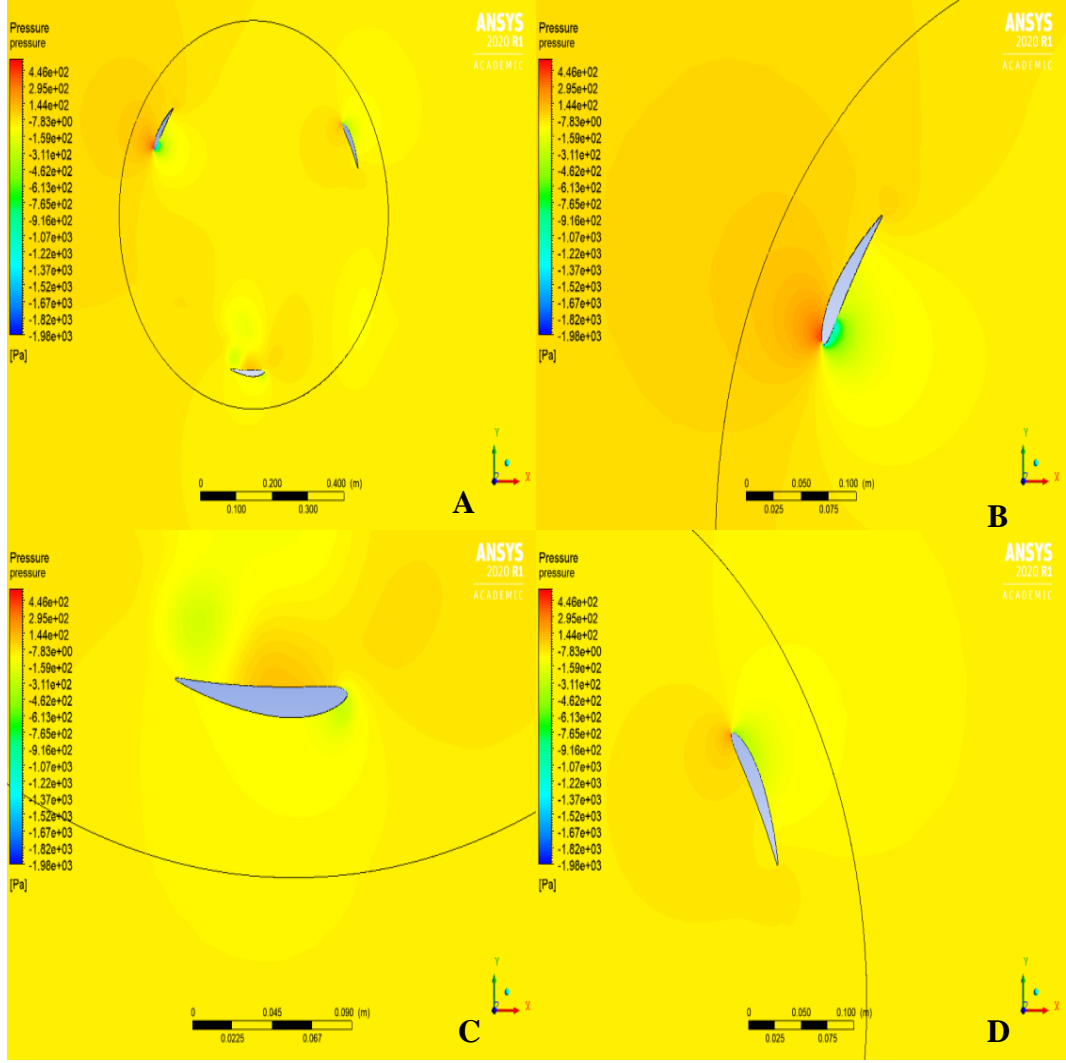
Şekil 4.20 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 139° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki hız dağılımı

A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



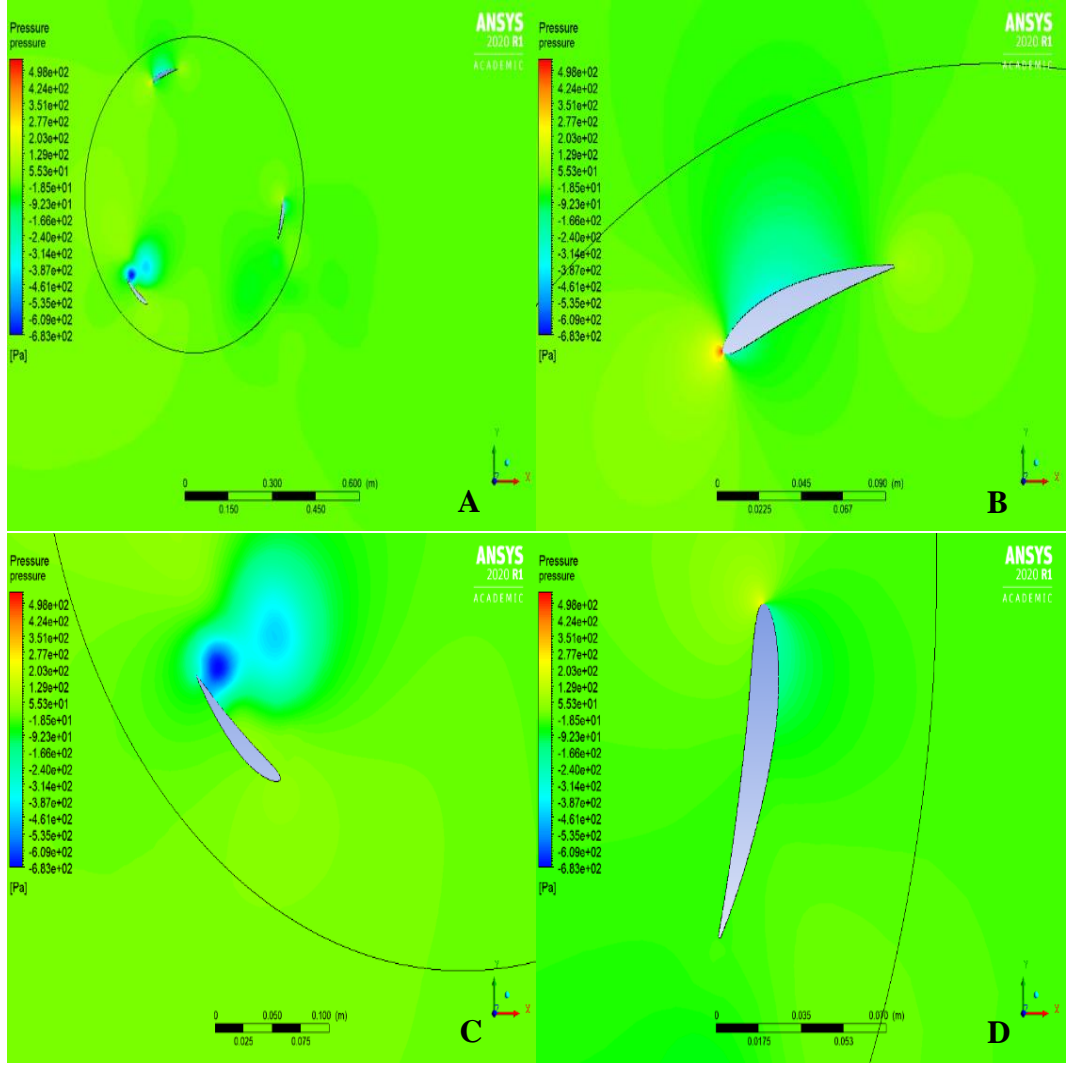
Şekil 4.21 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için NACA6412 kanatlarındaki hız dağılım konturları
A) 56° rotor açısında ve **B)** 139° rotor açısında



Şekil 4.22 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 56° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki basınç dağılımı

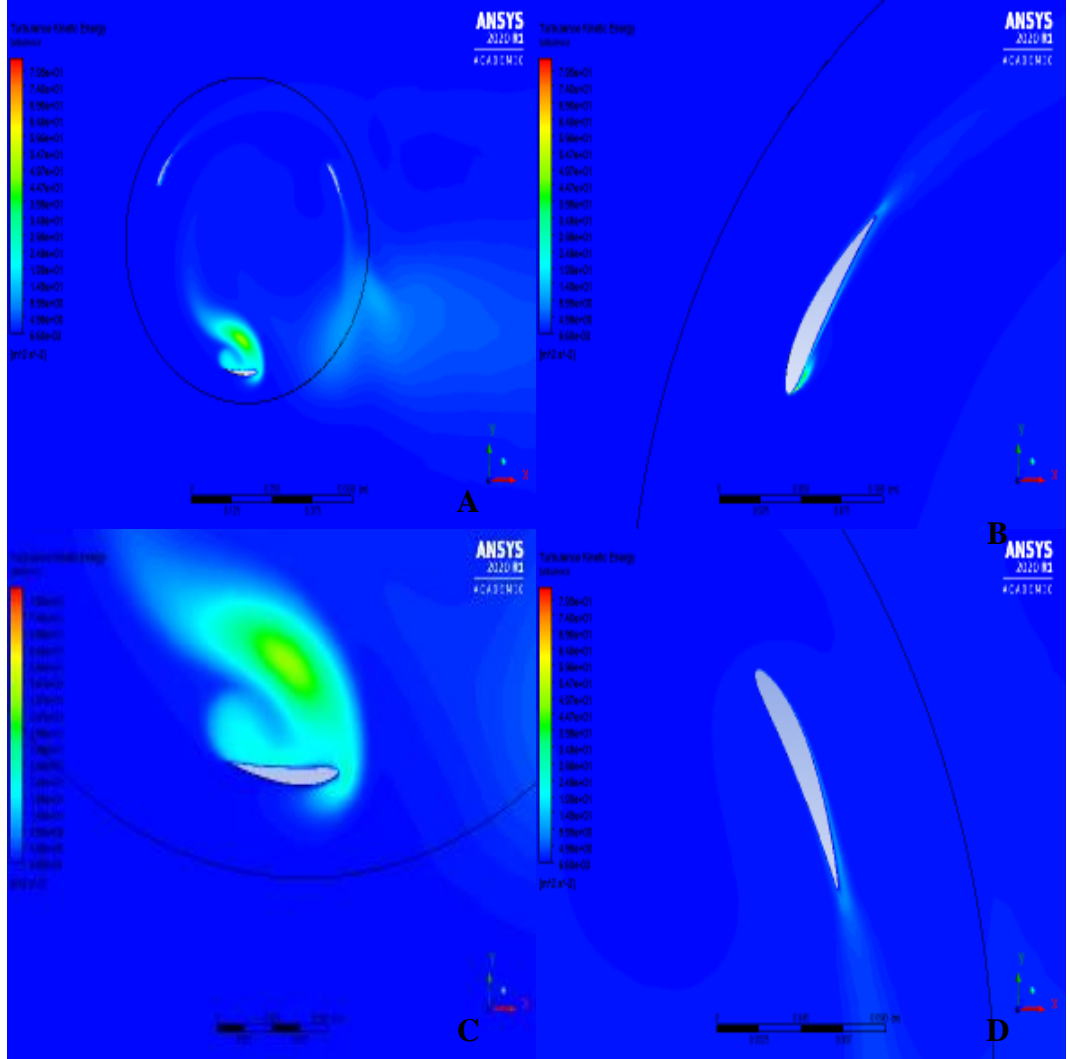
A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



Şekil 4.23 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 139° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki basınç dağılımı

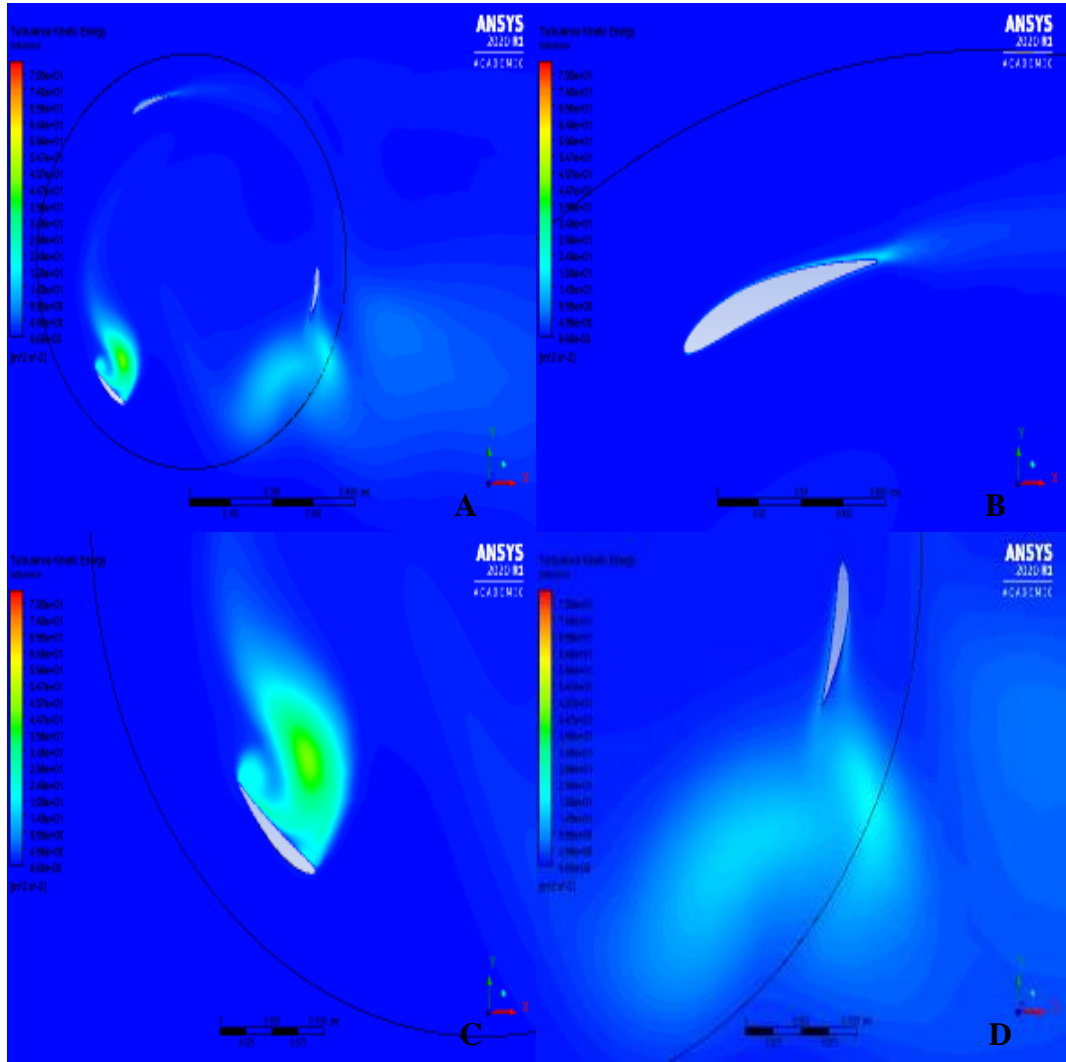
- A)** Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm
C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



Şekil 4.24 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 56° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı

A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm



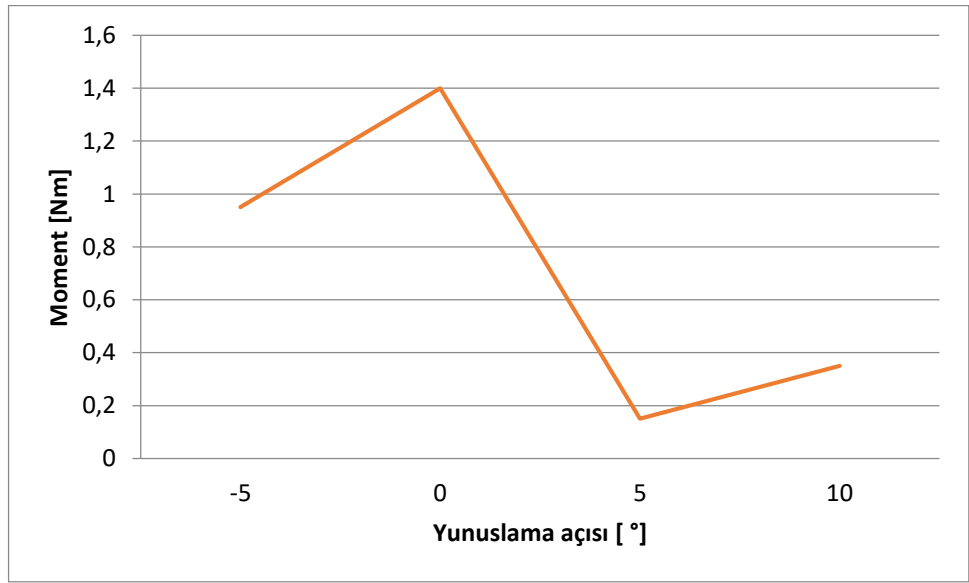
Şekil 4.25 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için, 139° rotor açısında NACA6412 kanatlarındaki türbülans kinetik enerji dağılımı

A) Komple gösterim **B)** 3 nolu kanat detay görünüm

C) 2 nolu kanat detay görünüm **D)** 1 nolu kanat detay görünüm

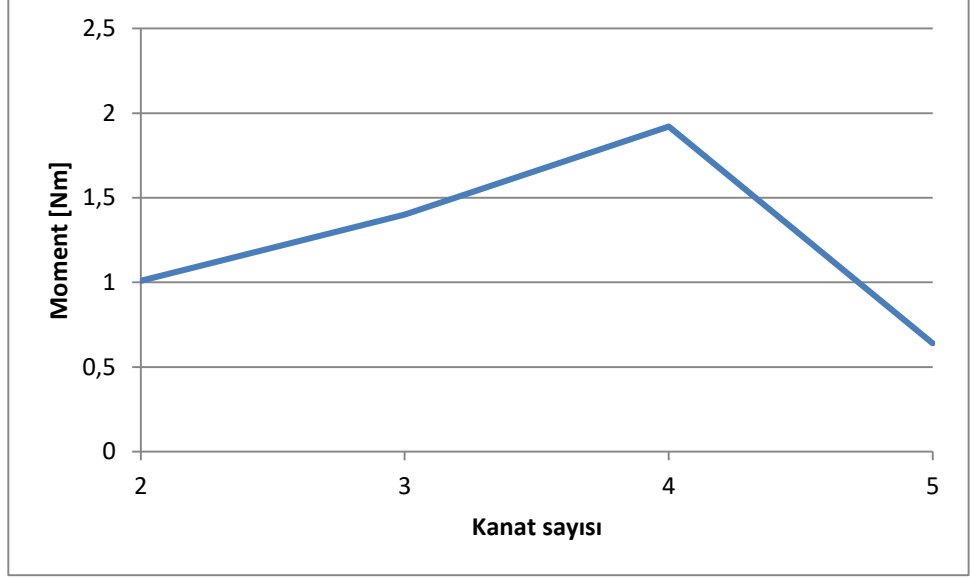
Şekil 4.5-25' de $\lambda=1.5$ değeri için üç farklı kanat profiline ait maksimum ve minimum moment değerlerini sağlayan konum açılarındaki hız vektörü, hız konturları, basınç değişimleri ve kinetik enerji değişimleri gösterilmektedir. Şekil 4.7 incelendiğinde NACA 4518 kanat profili için yüksek ve düşük moment değerlerine ait rotor açılarında hız dağılım konturları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi maksimum momentin olduğu 74° rotor açısında ikincil akışın olmadığı, 135° konum açısında ise özellikle 1 nolu kanat arkasında ikincil akışların olduğu görülmektedir. Bu ise moment değerini

olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda 135° konum açısında yine 1 nolu kanat arkasında momenti düşüren negatif basınç ve yüksek türbülans kinetik enerjileri Şekil 4.10 ve 4.11’de görülmektedir. Aynı durumlar diğer kanat profillerinde de görülmektedir. Şekil 4.8, Şekil 4.12, Şekil 4.16, Şekil 4.18, Şekil 4.22, Şekil 4.25 incelendiğinde moment değerinin en yüksek olduğu NACA 4518’de türbülans kinetik enerji en fazla $67.38 \text{ m}^2/\text{s}^2$, NACA 0012’de $75.26 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ve NACA 6412’de ise $79.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerleri görülmektedir. Türbülans kinetik enerji arttıkça moment değeri azalmaktadır.



Şekil 4. 26 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için NACA4518 kanat profilinde yunuslama açısına göre moment değişimi

Şekil 4.26’da NACA 4518 kanat profili için -5° , 0° , 5° ve 10° yunuslama açlarına bağlı olarak moment değerindeki değişimler ile ilgili sonuçlar görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi 0° yunuslama açısında en yüksek moment elde edilmiştir.



Şekil 4.27 Kanat uç hız oranı $\lambda=1.5$ için NACA4518 kanat profilinde kanat sayısına göre moment değişimi

Şekil 4.27’de NACA4518 kanat profili için 2, 3, 4 ve 5 kanat için moment değişimleri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere 4 kanat için moment değeri daha yüksek olmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi ve onun uygulamalarından biri küçük ölçekli Darrieus türbininin farklı kanat geometrileri ile kanat sayısı incelenmiş ve bunların içerisinde en verimli olan tip ve kanat sayısı tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

- ✓ Kanat profillerindeki kaldırma katsayısı C_l ' nin sürüklenme katsayısı C_d ' ye oranı C_l/C_d arttıkça moment değeri düşmekte dolayısı ile güç katsayısı C_p azalmaktadır. (bkz. Çizelge 4.1)
- ✓ λ (kanat uç-hız oranı) 1,5 iken her üç kanat modelinde de güç katsayısı C_p , maksimum değerde olmaktadır. En yüksek güç katsayısı C_p , NACA 4518 için 0.13 elde edilmiştir. (bkz. Şekil 4.3)
- ✓ Her üç kanat modeli için rotor konum açısı 50° - 70° aralığında moment değeri maksimum ve 130° - 150° aralığında minimum olmaktadır. (bkz. Şekil 4.4)
- ✓ Kanat yunuslama açısı 0° 'de en yüksek moment değeri elde edilmiştir. (bkz. Şekil 4.26)
- ✓ 4 kanatlı türbinlerde moment değeri maksimum bulunmuştur. (bkz. Şekil 4.27)

KAYNAKLAR

Ajedegba, J.O. 2008. Effect of Blade Configuration on Flow Distribution and Power Output of a Vertical Axis Wind Turbine. *Master of Science Thesis*, University of Ontario Institute of Technology, Canada.

Aboufares, G. 2015. Performance Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine Operating in Different Environmental Conditions. *Master of Science Thesis*, University of Huddersfield, UK.

Anonim, 2017. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması. <https://egitim448.wordpress.com>-(Erişim tarihi:13.07.2019).

Anonim, 2017. Shear-Stress Transport (SST) k- ω Model. <http://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf>-(Erişim tarihi: 10.09.2019).

Anonim, 2018. 2018 Türkiye Kurulu Gücünün Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri-> (Erişim Tarihi: 20.04.2019)

Anonim, 2018. Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2018-2023). [https://www.teias.gov.tr/-](https://www.teias.gov.tr/) (Erişim Tarihi: 20.04.2019).

Anonim, 2019. TEİAŞ Yük Tevzi Daire Başkanlığı, Sektör Raporları – Kurulu Güç. <http://www.teias.gov.tr/tr/sector-raporlari-> (Erişim tarihi: 28.05.2019).

Anonim, 2019. İki Kanatlı Rüzgar Türbinleri. http://www.nasa.gov/images/content/149600main_1987_05991.jpg-(Erişim Tarihi: 27.09.2019).

Anonim, 2019. Elektrik Üretimi Ve Ticareti Sektör Raporu, [https://www.euas.gov.tr/-](https://www.euas.gov.tr/) (Erişim tarihi: 29.04.2019)

Anonim, 2019. EPDK'dan lisans almış olan inşa halindeki projelerin ilerleme durumları, <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-86-3/elektriklisans-islemleri-> (Erişim tarihi: 30.04.2019).

Anonim, 2020. Türkiye rüzgar enerji istatistik raporu. [https://www.tureb.com.tr-](https://www.tureb.com.tr/) (Erişim tarihi: 28.05.2019).

Anonim, 2020. Airfoil database search (NACA 4 digit). <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit-> (Erişim tarihi: 01.06.2019).

Anonim, 2020. UIUC Airfoil Data Site https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html- (Erişim tarihi 02.06.2020).

Blazek, J. 2007. Computational Fluid Dynamics. Principles and Applications. Oxford, UK, 466 pp.

Castelli, M. R., Englaro, A., Benini, E. 2011. The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy*, 36 (8):4919-4934.

D'Ambrosio, M. and Medaglia, M. 2010. Vertical Axis Wind Turbines, *Master Thesis in Energy Engineering*, Hogskolan, Halmstad.

Eren, M. 2010. Aerodynamic analysis and performance predictions for wind turbines. *Yüksek Lisans Tezi*, T.C. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Eriksson, S., Bernhoff, H., Leijon, M. 2006. Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power, Swedish Centre for Renewable Electric Energy Conversion, Division for Electricity and Lightning Research, 1419-1434.

Gad, H.E., Abd El-Hamid A. A., El-Askary W. A., Nasef M. H. 2014. A New Design of Savonius Wind Turbine:Numerical Study. *CFD Letters*, 6(4):144-158.

Eriksson, S., Bernhoff H., Leijon, M. 2006. Evaluation of different turbine concepts for wind power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, McGraw-Hill, New York.

Ghazali A. 2016. The influence of turbine geometry on the performance of c-section vertical axis wind turbine. *Ms Thesis*. Near East University, Nicosia.

Golding E.W. 1976. The generation of electricity by wind power. London : E. & F.N. Spon ; New York : Distributed by Halsted Press. New York, USA, 332 pp.

Guo, Q., Zhou, L., Wang, Z., 2015. Comparison of BEM-CFD and full rotor geometry simulations for the performance and flow field of a marine current turbine, *Renewable Energy*, 75: 640-648.

Howell R., Qin N., Edwards J., Durrani N. 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, 35: 412–422.

Jiyuan T., Guan H.Y., Chaoqun L. 2018. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Center for Numerical Simulation and Modeling, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA, 498 pp.

Langtry R.B., Menter F.R., Likki S.R., Suzen Y.B., Huang P.G., Völker S. A. 2006. *A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables Part I: Model Formulation*. ASME Journal of Turbomachinery, 128: 413-422 pp.

Langtry R.B., Menter F.R., Likki S.R., Suzen Y.B., Huang P.G., Völker S. A. 2006. *Correlation-Based Transition Model Using Local Variables Part II: Test Cases and Industrial Applications. ASME Journal of Turbomachinery*, 128(3): 423-34.

Langtry R.B., Gola J., Menter F.R. 2006. Predicting 2D airfoil and 3D wind turbine rotor performance using a transition model for general CFD codes. 44th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, 9-12 January, Reno, Nevada.

Lanzafame R., Mauro S., Messina M. 2013. Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model. *Renewable Energy*, 52: 31-39 pp.

Lanzafame R., Mauro S., Messina M., 2014. 2D CFD Modelling of H-Darrieus Wind Turbines using a Transition Turbulence Model. *Energy Procedia*, 45: 131-140.

Liu, X., Wang, J., Tian M., Tang, Z. 2014. Efficiency and performance analysis of tidal current energy turbine basing on the unidirectional fluid-structure interaction. *Applied Mechanics and Materials*, 10: 386- 391.

Menter F. R. 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 32(8): 1598–1605.

Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. 2003. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*. Flow Turbulence and Combustion, 77: 277 – 303 pp.

Mittal, N. 2001. Investigation of Performance Characteristics of a Novel VAWT. *Thesis submitted for the M.Sc. degree*, Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK.

NACA 4 Digit Airfoil Generator. (Web sayfası: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>), (Erişim tarihi: Eylül 2019).

Özkılınc, H., 2014. Tek kanatlı rüzgar türbinleri. Türkiye. <http://hilalhavvaozkilinc.tr.gg/11-.-Hafta-Hava-Grubu.htm>-(Erişim tarihi: 13.07.2019).

Rezaeiha A., Kalkman I., Blocken B. 2017. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*, 197: 132-150.

Shepherd W., Zhang L. 2011. Electricity Generation using Wind Power, World Scientific, UK, 257 pp.

Sørensen, N. 2009. CFD modelling of laminar-turbulent transition for airfoils and rotors using the γ e $Re\theta$ model. *Wind Energy*, 12:715-33.

Tchakoua P., Wamkeue R., Ouhrouche M., Tameghe T.A., Ekemb G. 2015. *A New Approach for Modeling Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotors Using*

Electrical Equivalent Circuit Analogy: Basis of Theoretical Formulations and Model Development. Energies, 8: 10684-10717.

Tong, W. 2010. Wind Power Generation and Wind turbine design. Southampton, Boston, 725 pp.

Wilcox D.C., 1993. Turbulence modeling for CFD. California, USA, 460 pp.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nisan Esin MUTLU GÜNHAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Osmangazi/BURSA - 26.01.1994
Yabancı Dil : İngilizce - Almanca

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Özel Final Anadolu Lisesi
Lisans : Uludağ Üniversitesi / Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi / Makine Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

2016-2019: Ermetal Otomotiv ve Eşya San. Tic. A.Ş

2020-Halen : Nüve Sanayi Malz. İmalat ve Ticaret A.Ş.

İletişim (e-posta) : mutlunisan@hotmail.com