



**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DARRIEUS DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİNİN SAYISAL VE
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI, TASARLANMASI VE ÜRETİLMESİ**

**Hazırlayan
Toygun DAĞDEVİR**

**Danışman
Prof. Dr. Selahaddin Orhan AKANSU**

Yüksek Lisans Tezi

**Haziran 2015
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DARRIEUS DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI,
TASARLANMASI VE ÜRETİLMESİ**

**Hazırlayan
Toygun DAĞDEVİR**

**Danışman
Prof. Dr. Selahaddin Orhan AKANSU**

**Bu çalışma; Bilim, Sanayi ve Teknoloji bakanlığının 01354.STZ.2012-1
proje kodlu SAN-Tez projesi tarafından desteklenmiştir.**

**Haziran 2015
KAYSERİ**

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

Adı-Soyadı: Toygun DAĞDEVİR

İmza:



“Darrieus Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinin Sayısal ve Deneysel Araştırılması, Tasarlanması ve Üretilmesi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan



Toygun DAĞDEVİR

Danışman



Prof. Dr. Selahaddin Orhan AKANSU



Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

Prof.Dr. Selahaddin Orhan AKANSU danışmanlığında **Toygun DAĞDEVİR** tarafından hazırlanan **“Darrieus Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinin Sayısal ve Deneysel Araştırılması, Tasarlanması ve Üretilmesi”** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

09 / 06 / 2015

JÜRİ:

Danışman

Prof. Dr. S. Orhan AKANSU

Üye

Prof. Dr. Serol BAŞKAYA

Üye

Prof. Dr. Veyisel ÖZCEYHAN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 23/06/2015 tarih ve 2015/25-02 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

23 / 06 / 2015

Prof. Dr. Kâzım KEŞLIOĞLU
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

“Darrieus Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin İncelenmesi” adlı tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Selahaddin Orhan AKANSU’ ya teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneylerinin gerçekleştirildiği Niğde Üniversitesinde, yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU’ ya ve bölümdeki asistan arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Türbin üretimi sürecinde yoğun bir şekilde beraber çalıştığımız, maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen Şahittin AYDEMİR’ e teşekkür ederim.

Türbin elektronik devre ve kontrolü üzerinde çalışmaları bulunan Muharrem ERBAY a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ders ve tez dönemi boyunca birçok konuda yardımlarına başvurduğum değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Evrim ÖZRAHAT ve Saliha ÖZARSLAN’ a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına (Proje kodu: 01354.STZ.2012-1) ve Şahittin Aydemir Enerji Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti. ne teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Toygun DAĞDEVİR

Kayseri, Haziran 2015

DARRIEUS DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI, TASARLANMASI VE ÜRETİLMESİ

Toygun DAĞDEVİR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2015

Danışman: Prof.Dr. Selahaddin Orhan AKANSU

ÖZET

Dünya üzerinde fosil yakıtların giderek azalması, ülkeleri yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışı içine girmesini sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr, doğada bol bulunması, temiz enerji kaynağı olması, bedava olması ve en önemlisi CO₂ emisyonu olmayan enerji olması ile tercih unsuru olmuştur. Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleri vasıtasıyla kullanılabilecek enerji türlerine çevrilmektedir. Rüzgâr türbinleri ise kendi aralarında dikey ve yatay eksenli olmalarına göre sınıflandırılmaktadır.

Bu çalışmada, ilk olarak dikey eksenli bir Darrieus rüzgâr türbini için farklı kanat profilleri sayısal olarak incelenmiş ve sayısal çalışmada kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermek için uluslararası bir dergide yayınlanmış olan bir makale ile doğruluğu sağlanmıştır. Aynı sayısal metot ile farklı kanat profilleri incelenerek deneyleri yapılacak kanat profilleri seçilmiştir. Kanat profilleri belirlendikten sonra rüzgâr tüneline denemek üzere türbin modelleri üretildi. Bu türbin modellerinde hücum açısı ve değişken kesitli kanat profillerinin kombinasyonları denenmiştir. Kanat, bağlantı elemanları ve türbinin bütün mekanik özellikleri tasarlandı ve yapısal statik analizi ile dayanıklılığı analiz edildikten sonra üretimine geçildi. Elektronik kart tasarımı ile frenleme ve optimum güç elde edebilmesi sağlandı ve yeterli rüzgâr alan bir bölgeye kurulumu yapıldı. Bu yüksek lisans tezi Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından SAN-TEZ projesi ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Darrieus rüzgâr türbini, kanat profilleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION,
DESIGNING AND MANUFACTURING OF A VERTICAL AXIS DARRIEUS
WIND TURBINE**

Toygun DAGDEVİR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, June 2015

Supervisor: Prof. Selahaddin Orhan AKANSU

ABSTRACT

Consuming of fossil fuels all around the world has made the countries search for new and renewable energy sources. Among the renewable energy sources, wind energy is much more preferred because of its existence in the nature, being clean, cheap and most important and not having CO₂ emission. Wind energy can be converted to any consumable energy by means of wind turbines. Wind turbines are classified in two categories: vertical axis and horizontal axis.

In this study, different airfoils have been examined for a vertical axis Darrieus wind turbine and to demonstrate that numerical methodology of the study is valid, it was validated with a paper published in an international journal. The airfoils which will be carried out in experimental study were chosen by using same numerical methodology. After the airfoil was determined, turbine models were produced to examine in a wind tunnel, and other physical features were determined. Combinations of angle of attack and variable cross-sectional profiles were tried on these models. Blades, connectors and all mechanics features of the turbine were designed and after strength of the turbine were analyzed with structure analyze program, they were manufactured. Optimum power and braking system were provided with electronic card design and the turbine established in an area which has enough wind. This master thesis is supported with SAN-TEZ project by Minister of Science, Industry and Technology.

Keywords: Darrieus wind turbine, airfoils, computational fluid dynamics (CAD).

İÇİNDEKİLER

DARRIEUS DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI, TASARLANMASI VE ÜRETİLMESİ

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

RÜZGÂR ENERJİSİ

1.1. Rüzgârın Oluşumu ve Önemi.....	3
1.2. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları	4
1.3. Rüzgâr Enerjisinin Uygulama Alanları	5
1.3.1 Rüzgâr enerjisinin Mekanik Uygulamaları.....	6
1.3.2 Rüzgâr enerjisinin Elektriksel Uygulamaları.....	6
1.3.3 Rüzgâr enerjisinin Isıl Enerji Uygulamaları	6
1.4. Rüzgâr Hızının Ölçülmesi	6
1.5. Rüzgâr Türbinleri	7
1.5.1 Rüzgâr Türbinleri Çeşitleri.....	8
1.5.1.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri	8
1.5.1.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri	9

1.5.1.3. Çok Kanatlı Rüzgâr Türbinleri	12
1.5.2. Rüzgâr Türbini Tesis Yeri Seçim Kriterleri.....	13

2. BÖLÜM

DİKEY EKSENLİ DARRIEUS RÜZGÂR TURBİNLERİ

2.1. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Genel Özellikleri	16
2.2. Darrieus Rüzgâr Türbin Aerodinamiği	16
2.3. Performans Kriterleri	19
2.4. Rüzgârdan Alınan Güç-Momentum Teorisi.....	20
2.4.1. Betz Kanunu	21
2.4.2. Betz Limiti Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerine Uygulanması.....	24

3. BÖLÜM

DİKEY EKSENLİ DARRIEUS RÜZGÂR TURBİNİ İÇİN KANAT PROFİLİNİN SAYISAL YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

3.1. Giriş	25
3.2. Literatür Araştırması	25
3.3. Sayısal Analiz.....	27
3.3.1. Model Geometrisi	32
3.3.2. Sayısal Çalışmanın Sonuçları.....	38

4. BÖLÜM

DİKEY EKSENLİ HELİSEL DARRIEUS RÜZGÂR TURBİNİN LABORATUVAR VE SAHA ÇALIŞMALARI

4.1. Deneysel Çalışmalar.....	68
4.2. Kanat Üretimi.....	70
4.3. Türbinin Statik Yük Analizi	71
4.4. Elektrik-Elektronik Tasarım	74
4.4.1. Maksimum Güç Noktası Takipçisi (MPPT)	75
4.4.2. Rüzgar Türbininde Kullanılan Diğer Elektronik Devre Tasarımları.....	77

5. BÖLÜM
SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

5.1. Sonuç, Tartışma ve Öneriler	85
---	-----------

KAYNAKLAR	87
------------------------	-----------

ÖZGEÇMİŞ

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Sayısal analizinde kanatların modelin boyutları	29
Tablo 3.2. Kanat profillerin x ve y koordinatları	33
Tablo 3.3. λ sayılarında ortalama Reynolds değerleri.....	38
Tablo 4.1. Prototiplerin farklı rüzgar hızlarında oluşturduğu devir sayıları	70
Tablo 4.2. Modellerin 11.4 m/s rüzgar hızında tork ve devir deney sonuçları	70

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Anemometre.....	7
Şekil 1.2.	Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	8
Şekil 1.3.	Küçük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbini.	9
Şekil 1.4.	Savonius rüzgar türbini	9
Şekil 1.5.	Darrieus rüzgar türbini.....	10
Şekil 1.6.	Helisel Savonius rüzgar türbini.....	10
Şekil 1.7.	Helisel Darrieus rüzgar türbini.....	11
Şekil 1.8.	Darrieus H-rotor rüzgar türbini.....	11
Şekil 1.9.	Çok kanatlı rüzgar türbinleri tasarımları.....	12
Şekil 1.10.	Farklı kanat uç hız oranlarında (λ) kanat sayısının (N) güç faktörü (C_p) üzerine etkisi [8].....	13
Şekil 1.11.	Farklı kanat sayılarının (N), rotor azimutal açısına (θ°) bağlı olarak tork katsayısına (C_t) etkisi [8].....	13
Şekil 2.1.	Airfoil üzerindeki oluşan hız ve kuvvet vektörleri	17
Şekil 2.2.	Darrieus türbinde kanada etkiyen hız ve kuvvet bileşenleri	18
Şekil 2.3.	Darrieus türbinde kanada etkiyen hız bileşenleri ile açılar	18
Şekil 2.4.	Betz limiti türetmede kullanılan akış alanı ve akış alanı boyunca basınç ve hız değişimleri [13]	22
Şekil 2.5.	Farklı rüzgâr türbinleri için kanat uç hız oranına göre (λ) güç katsayısı (C_p) grafikleri [1]..	23
Şekil 3.1.	Çalışmada izlenecek süreç	28
Şekil 3.2.	Sayısal analiz şematik modeli.....	29
Şekil 3.3.	Sabit dış bölge için farklı ağ modelleri	30
Şekil 3.4.	Dönen iç bölge için farklı ağ modelleri	30
Şekil 3.5.	Kontrol çemberi için farklı ağ modelleri	31
Şekil 3.6.	Kanat profilleri etrafındaki farklı ağ modelleri.....	31
Şekil 3.7.	Ağ bağımsızlığı.....	32
Şekil 3.8.	Kanat profilleri [a) NACA0021, b) NACA0015 c) NACA5520 ve d) Clark-Y] [27].....	32
Şekil 3.9.	Sabit dış bölge.....	35
Şekil 3.10	Dönen iç bölge	35
Şekil 3.11.	Kontrol çemberi	36

Şekil 3.12	Laminer, geçiş ve türbülanslı akış hız profilleri ve türbülanslı akışta tabakalar [28]	37
Şekil 3.13.	Yapılan Sayısal analizde kullanılan NACA0021 kanat profilinin Castelli et al. çalışmalarıyla olan yakınsaması [2]	39
Şekil 3.14.	NACA0021, NACA0015, NACA5520 ve Clark-Y'nin çalışılan λ 'lardaki C_p eğrileri.....	39
Şekil 3.15.	Her bir profilin maksimum tork değerini verdiği λ sayısındaki tork ve ortalama tork değeri	41
Şekil 3.16.	Her bir profilin maksimum tork değerini verdiği λ sayısındaki tork ve ortalama tork değeri	42
Şekil 3.17.	$\lambda=1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açısında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız kontürleri	44
Şekil 3.18.	$\lambda=1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün toplam basınç	46
Şekil 3.19.	$\lambda=1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün türbülans kinetik enerji kontürleri	48
Şekil 3.20.	$\lambda=1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız vektörü kontürleri	50
Şekil 3.21.	$\lambda=2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız kontürleri.....	53
Şekil 3.22.	$\lambda=2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün toplam basınç kontürleri	55
Şekil 3.23.	$\lambda=2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün türbülans kinetik enerji kontürleri	57
Şekil 3.24.	$\lambda=2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız vektörü kontürleri	59
Şekil 3.25.	$\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız kontürleri.....	61
Şekil 3.26	$\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün toplam basınç kontürleri	63
Şekil 3.27.	$\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün türbülans kontürleri.....	65

Şekil 3.28.	$\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız vektörü kontürleri	67
Şekil 4.1.	Rüzgar tüneline denenen 9 farklı model	69
Şekil 4.2.	Niğde Üniversitesi rüzgar tüneli laboratuvarı.....	69
Şekil 4.3.	Modellerin değişen açılarda tork eğrileri.....	70
Şekil 4.4.	Kanat üretiminde kullanılan cam elyaf, kanat kalıbı, model kanat ve kanat resmi.....	71
Şekil 4.5.	Türbin katı modellemesi ve türbinin montaj anından bir fotoğraf.....	72
Şekil 4.6.	Kanat kolları üzerine mukavemet arttırmak için eklenen “T” bağlantısı	72
Şekil 4.7.	Kule-türbin, kule elemanları katı modelleri ve üretilmiş bir elemanın fotoğrafı.....	73
Şekil 4.8.	Mesh (Ağ) yapısı	74
Şekil 4.9.	20 m/s rüzgar hızında türbin ve kulenin statik analiz sonuçları [a) türbin ve kulede oluşan gerilme, b) Taban flanş elemanında oluşan gerilme, c) Kule bağlantısında oluşan gerilme, d) Kanat kolları, cıvatalar gerilme üzerinde oluşan gerilme, e) Türbin üzerinde oluşan gerilme, f) Türbin ve kulede oluşan toplam deformasyon]	74
Şekil 4.10.	MPPT Blok Diyagramı	76
Şekil 4.11.	MPPT devresi ile Akım-Gerilim eğrisi üzerinde standart ve maksimum güç eğrileri	76
Şekil 4.12.	Doğrultucu, Filtre, Türbin gerilimi ve Devir ölçüm devresi.....	78
Şekil 4.13.	Frenleme Devresi ve Frenleme Akımı Ölçümü	79
Şekil 4.14.	Şarj akımı kontrolü ve Akü Seviye Ölçüm Devresi.....	80
Şekil 4.15.	Şarj Akımı ölçüm devresi ve Regülatör Devresi	81
Şekil 4.16.	Opamp Devresi	81
Şekil 4.17.	Saat, Hafıza ve Haberleşme Devreleri	82
Şekil 4.18.	LCD Ekran Devresi.....	83
Şekil 4.19.	Mikroişlemci Devresi	83
Şekil 4.20.	Üretilen ve kurulan helisel Darrieus rüzgar türbini	84

GİRİŞ

Enerjiye olan ihtiyaçtaki artış, ülkeleri yeni enerji kaynakları arayışına itmiştir. Mevcut enerji kaynakların tükeniyor olması ayrı bir problem doğurmaktadır. Bu enerji sorununun çözümü için yenilenebilir enerji kaynakları göze çarpmakta ve bu kaynakların kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları temiz enerji kaynakları olup, çevreyi kirletmemektedir. Diğer enerji kaynaklarının özellikle fosil kökenli yakıtların çevreye verdiği CO₂ gibi zararlı gazların emisyonuna sebep olmaktadır. En önemlisi dışa bağımlılığı ortadan kaldıran özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgâr, güneş, biokütle, jeotermal ve hidrolik gibi enerji türleridir [1].

Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından ülkemiz oldukça iyi bir potansiyele sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlisi rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır. Rüzgâr, doğası gereği kinetik enerji taşımaktadır. Havanın özgül kütlesi düşük olduğundan rüzgârdan sağlanacak enerji miktarı daha çok hızına bağlıdır [1].

Türkiye'nin kurulu rüzgar potansiyeli oldukça iyi olmasına rağmen, elektrik üretimi veya farklı bir amaçta insanlığın hizmetine sunulması oldukça yenidir. Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü, mevcut potansiyelinin yanında ihmal edilecek kadar azdır. Türkiye'nin değişik bölgelerinde rüzgâr hızları belirli aralıklarda değişim göstermektedir. Her rüzgâr hızına uygun bir rüzgâr türbini tasarlamak mümkündür. Rüzgâr türbini seçimine; rüzgâr türbinin kurulacağı bölgeden alınmış son beş yıl içinde en az 100 m yükseklikte rüzgâr hızı ölçümleri değerlendirilerek karar verilir. Burada ana kistas rüzgar hızına uygun optimum rüzgar türbini seçmek ve tasarımı gerçekleştirmektir [1].

Rüzgâr türbinleri genel olarak büyük güçlü ve küçük güçlü olmak üzere iki ana başlıkta toplanmaktadır. Rüzgâr potansiyeli yüksek olan bölgelerde genellikle büyük güçlü

rüzgâr türbinleri elektrik üretme amaçlı olarak kurulmaktadır. Rüzgâr potansiyeli düşük olan bölgelerde ise küçük güçlü dikey eksenli rüzgâr türbinleri sulama, pompalama gibi işlemlerde kullanma amaçlı kurulmaktadır. Rüzgâr türbini tasarımının temelinde, mevcut rüzgâr potansiyeline en uygun rüzgar türbin tipinin ve kullanım amacının belirlenmesi gerekir. Gerekli bölgesel rüzgâr potansiyel verileri değerlendirilerek, gerekli mekanik hesaplar yapıldıktan sonra tasarıma geçilir [1].

Rüzgâr türbinlerinin verimini etkileyen en önemli unsurlarından birisi de kanat aerodinamiğidir. Kanat profillerinin aerodinamik tasarımı tüm kanadı performansı, dolayısıyla rüzgâr türbinin genel performansını etkiler. Rüzgâr türbini kanat profili olarak çoğunlukla NACA serisi kanat profilleri kullanılmaktadır. Rüzgârın farklı yönlerden esmesinden dolayı farklı hücum açıları oluşmaktadır. NACA serisi kanat profilleri rüzgâr türbinleri için her hücum açısında aynı performansı göstermemektedir ve dolayısıyla rüzgâr türbinleri için ideal kanat profili tipine uymamaktadır. Bu yüzden yüksek hücum açılarında bile iyi performans gösterecek yeni kanat profilleri tasarımına ihtiyaç vardır.

Bir rüzgâr türbinin kanat performansı havanın kanat üzerinden oluşturduğu sürüklenme ve kaldırma kuvveti ile doğrudan ilintilidir. Kaldırma kuvveti (C_L) ve sürüklenme kuvveti (C_D) katsayıları birçok sayısal çalışmalara konu olmuştur. Bu çalışmalar genel olarak ikiye ayrılabilir. İlki, belli bir amaç doğrultusunda sayısal çalışma yapmak için kullanılan kodun doğruluğu, ikincisi de kanat profillerinin çevresindeki akış için türbülans modellerin performansını içerir. Bunlardan ilk gruba birçok örnek verilebilir. Bu çalışmada Castelli et al. [2] “Energy” dergisindeki makalesi sayısal çalışmanın metodolojisinin doğrulanması için kullanılmıştır.

1. BÖLÜM

RÜZGÂR ENERJİSİ

1.1. Rüzgârın Oluşumu ve Önemi

Hava hareketlerinin temel prensibi, mevcut atmosfer basıncının bölgeler arasında değişmesidir. Rüzgâr, alçak basınçla yüksek basınç bölgeleri arasında yer değiştiren hava akımıdır. Rüzgâr daima yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru gider. İki bölge arasındaki basınç farkı ne kadar büyük olursa, hava akımı hızı o kadar fazla olur. Rüzgâr sahip olduğu hıza göre fırtına, hortum gibi isimler alır [3].

Rüzgârın yönü rüzgârgülü, hızı ise anemometre ile ölçülür. Anemometre; pervanenin dönüş hızından, rüzgârın hızını gösteren basit bir ölçü aletidir. Yükseklerdeki rüzgârlar balonlar yardımı ile ölçülmektedir. Bunun için yükselme hızı bilinen balonlar, belli yüksekliğe gelince rüzgâr hızından yol almaya başlar. Balonun birim zamanda kat ettiği yoldan, trigonometrik hesaplarla hızı bulunur. Daha hassas ölçmeler için balon, ya radarla takip edilir ya da balona bir telsiz vericisi monte edilir [3].

Okyanuslardaki akımların ve dalgaların meydana gelmesinde, rüzgârların büyük rolü vardır. Rüzgârlar, karaların şekillerinin değişmesine de sebep olur. Bilhassa çöllerde kimi tepeler, rüzgârlar sebebiyle devamlı değişir. Rüzgârların bitki sporlarını sağa sola taşıyarak, çiçeklerin döllenmesine sebep olması bitki neslinin devamı yönünden çok mühimdir. Rüzgâr gücünden yel değirmeni, yelkenli gemi işletmesinde de istifade edilir [3].

Rüzgârın meydana geliş sebepleri:

- Dünyanın dönüşü
- Yüzey sürtünmeleri
- Yerel ısı yayılması
- Rüzgâr yönünde başka atmosferik olayların oluşması
- Yeryüzünün topografik yapısı sebebiyle şekillenir.
- Rüzgâr, alçak (siklon) ve yüksek (antisiklon) alanlarda farklı özellikler taşır.

Siklon içerisinde;

1. Basınç radyal olarak içe
2. Doğru santrifüj kuvvetler dışa doğru
3. Koriolis kuvvet dışa doğru etki eder

Antisiklon içerisinde ise;

1. Basınç değişmesi radyal olarak dışarıya doğru
2. Santrifüj kuvvet dışarıya doğru
3. Koriolis kuvvet içe doğru etki eder

Bütün bunların etkisi sonucunda rüzgâr eşit basınç noktalarında yoluna devam eder. Bu hatların bir harita üzerinde çizilmesiyle meteoroloji haritaları elde edilir. Yüzey sürtünmeleri rüzgârın yönünü alçak basınç yönüne doğru çevirir. Denizlerde bu açı 20° , karalarda ise 30° ile 45° arasında değişir [3].

Atmosferin alt tabakalarında meydana gelen rüzgârlar, yerin ısı ve mekanik özelliklerinden dolayı türbülans meydana getirir. Türbülans meydana getirmeden, basınç alanları arasında dolaşan rüzgârlara, meyilli rüzgârlar denir. Eğer rüzgâr hafif meyilli karadan denize doğru eserse logaritmik olarak alçalan bir spiral hat çizerek ilerler. Kuzey yarım kürede bu spiralın dönüş yönü saat ibresinin dönüş yönüdür. Atmosferin üst tabakalarında rüzgâr hızı saatte 400 km'ye kadar çıkabilir [3].

1.2. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Rüzgâr; geçmişi eksilere dayanan, temiz ve herkesçe bilinen bir enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer almaktadır. Rüzgâr enerjisinin sahip olduğu avantajlar şunlardır:

- Rüzgâr enerjisi eldesi ücretsiz olup, tükenmeyen bir enerjidir. Süreç içinde bitme ve fiyatında artma söz konusu olmamaktadır.
- Yenilenebilir enerji kaynağı olmakla birlikte aynı zamanda temiz enerjidir.
- Atmosferi kirletmeyen bir enerji türü olup, çevreyi kirletmemektedir.
- Yerli kaynaklar kullanıldığından dışa bağımlılığı yoktur.
- Başka enerjilere dönüştürme teknikleri kolaydır.
- Rüzgâr hava hareketi ile oluştuğu için enerjinin nakledilmesinde sorun yoktur.
- Rüzgar türbinleri karmaşık olmayan otomatik makinalardır ve periyodik bakımlar sonucu 20-30 yıllık ömürleri boyunca sorunsuz çalışabilir.

Dezavantajları ise;

- Enerji üretimi rüzgâra bağlıdır. Dolayısı ile rüzgâr kesilmesi veya azalması ile enerji kaybı oluşur.
- Rüzgâr miktarına bağımlı bir enerji olduğu için sadece yeterli rüzgârın bulunduğu alanlarda kurulabilir,
- Rüzgâr türbinlerinin kurulacağı alanların durumu önemlidir. Örneğin arazinin engebeli oluşu ya da sit alanlarına yakınlığı mahzur olabilir,
- Rüzgâr türbinlerinin meydana getirdiği ses şiddeti çevreye gürültü olarak yansiyabilir.
- Türbin maliyetleri yüksek olabilmektedir. Gelişen teknoloji ve yaygınlaşma ile maliyetler gittikçe azalmaktadır.
- Türbin, büyük dönel bir makine olduğundan dolayı çevrede kuş ölümlerine neden olabilmektedir.
- Türbinler, elektromanyetik dalgayı etkileyebilir [4].

1.3. Rüzgâr enerjisinin Uygulama Alanları

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemler, enerji kaynağının sürdürülebilir olması, dönüştürme tekniklerinin kompleks olmaması, işletme ve bakımının kolay olması nedeniyle diğer enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir [5]. Küçük ölçekte elektrik şebekesinin ulaşmadığı yerleşim yerlerinde (örneğin meralar, yaylalar, köyler vb.), büyük ölçeklerde ise büyük ölçüde direk elektrik şebekesine satış yapmak amacıyla kullanılmaktadır.

1.3.1. Rüzgâr enerjisinin Mekanik Uygulamaları

Rüzgâr enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek genellikle sulama sistemlerinde tercih edilir. Su pompalama amaçlı kullanılan bu sistemler kırsal kesimlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Mekanik uygulamalar sadece su pompalama ile kısıtlı olmayıp, aynı zamanda çiftlik ve benzeri yerlerde hayvanların su ihtiyacının karşılanmasında ve evlerde ihtiyaç duyulan suyu elde etmekte de kullanılmaktadır [5].

1.3.2. Rüzgâr Enerjisinin Elektriksel Uygulamaları

Rüzgâr enerjisinden günümüzde modern rüzgâr türbinleri ile elektrik enerjisi üretimi de gerçekleştirilmektedir. Üretilen elektrik enerjisi bölgesel kullanılabildiği gibi aynı zamanda elektrik şebekesine bağlantısı gerçekleştirerek birlikte kullanılabilmektedir. Elektrik şebekesinin olmadığı uzak yerleşim yerlerinde, kırsal bölgelerde, adalarda, ormanlık ve dağlık bölgelerde rüzgârdan elde edilen elektrik enerjisi kullanılabilmektedir [5].

1.3.3. Rüzgâr Enerjisinin Isıl Enerji Uygulamaları

Rüzgâr enerjisinden elde edilen mekanik enerjinin ısı enerjisiye dönüştüğü sistemlerdir. Tanklarda su ısıtma ile enerji depolayan bu sistemler, yerel ısıtma, kurutma, sıcak su hazırlama amaçlarına uygun olarak kullanılabilmektedir [5].

1.4. Rüzgâr Hızının Ölçülmesi

Rüzgâr ölçümleri anemometre adı verilen cihazlar yardımıyla yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisinin üretiminde rüzgâr verilerinin doğru elde edilebilmesi çok önemlidir. Çünkü rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenecek bölgenin rüzgâr karakteristiklerinin bu bölge için seçimi gerçekleştirilecek rüzgâr türbinin veya türbin elemanlarının seçimi ve yerleşimini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 1.1 de rüzgar hızı ve yönü ölçümünde kullanılan bir anemometre gösterilmiştir. Bölgenin rüzgar haritasının çıkarılması için bu tür anemometreler belirli aralıklarda ve yükseklikte kurularak en az bir yıllık ölçüm alınmaktadır.



Şekil 1.1. Anemometre

Rüzgâr ölçümlerinde kullanılan anemometreler temelde analog ve sayısal anemometreler olmak üzere iki tipte üretilirler. Bu anemometreler arasında kup anemometre, pervane tipli anemometre veya ultrasonik anemometre gibi farklı çeşitler bulunmakla beraber en yaygın olarak kullanılanı ise kup anemometredir. Kup anemometreler İrlandalı T. R. Robinson tarafından icat edilmiş olup, genellikle rüzgâr hızı ölçme amaçlı kullanılmaktadırlar [6].

1.5. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr gücüyle hareket eden gemiler, değirmenler, su pompaları ve harman makineleri rüzgârdan elde edilen gücün basit bir şekilde uygulamalarına dayanan basit örneklerdir. Teknoloji ve sanayi devrimiyle, 20. yüzyılın sonlarında rüzgâr gücünün verimli şekilde kullanılan makinelerin ortaya çıktığı görülüyor. Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik gücünü kanatlar ve rotor ile kullanılabilir güce dönüştüren makineler olarak isimlendirilir [7].

20. yüzyılda ilk rüzgâr türbinleri rüzgâr yükünü alma açısından 3 temel prensibe göre çalışırdı : (1) yüke karşı durarak, (2) yükten kaçarak ya da yükün üzerine dökülmesiyle, (3) yükü mekanik olarak kullanarak; ya da bunların her ikisi ile. Bu evrimleşmenin ortalarında birçok rüzgâr türbini tasarımcısı günümüzde sınıflandırdığımız yatay ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri fikrini ortaya attılar. Bu türbinler bir, iki, üç veya çok

kanatlı olarak kullanımları mevcuttur. Bugün rüzgâr türbinlerinin kanat sayısı seçimi aerodinamik verimlilik, komplekslik, maliyet, gürültü ve estetik açıdan yapılmaktadır. Rüzgâr tasarımında göze alınan parametreler arasına iklim koşulları, rotor ve jeneratör tipi, gürültü azaltıcı faktörler ve güç kontrol parametreleri de eklenebilir. Bunlara ek olarak şuan ki çalışmalar, mega-watt gücündeki türbinler, düşük maliyetli ve hafif rüzgarlarda dönebilen türbin konseptleri üzerinedir [7].

1.5.1. Rüzgâr Türbinleri Çeşitleri

Rüzgar türbinleri genellikle rotor dönme ekseninin rüzgara ile yaptığı açı ile sınıflandırılır.

- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri
- Dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Rotor dönme ekseninin rüzgâra ile yaptığı açı ya ek olarak rüzgâr türbinleri kanat sayılarına göre de farklı şekillerde tasarlanmaktadır.

1.5.1.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Bu tip türbinlerde, dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne diktir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri Şekil 1.2. de görüldüğü gibi günümüzde kullanımı en yaygın olan rüzgâr türbinleri çeşididir.



Şekil 1.2. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin aksine yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kanatların rüzgarı dik alabilmesi için yön mekanizması vardır. Bu yön mekanizması mega-watt ölçeğindeki büyük türbinlerde kule üzerinde rüzgar yönünün ölçen anemometre ile ölçülüp, rüzgarın yönüne göre kanatlar dişli mekanizmaları ile rüzgara dik açığa getirilmektedir. Küçük ölçekli yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde ise bu işlem kanatların arkasında kuyruk ile sağlanmaktadır (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Küçük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbini

1.5.1.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Bu tip rüzgâr türbinlerinde rotor eksenini rüzgâr yönüne diktir. Bu sayede rüzgara karşı yön alma gibi bir düzeneğe ihtiyaç yoktur rüzgar hangi yönden gelirse gelsin kanatlara önemli değildir. Başlıca örnekleri Savonius (Şekil 1.4.) ve Darrieus (Şekil 1.5.) tipi türbinlerdir.



Şekil 1.4. Savonius rüzgar türbini



Şekil 1.5. Darrieus rüzgar türbini

Bu iki tip türbinde kendi içinde kanatlarının helisel yapıda olanları da mevcuttur. Kanatların helisel olması türbinin dönüşünü daha düzenli olmasını ve her rotor konum açısında daha fazla rüzgâr alımını sağlamaktadır. Şekil 1.6. de helisel Savonius Şekil 1.7. de helisel Darrieus ve Şekil 1.8. de Darrieus H-rotor rüzgar türbinleri gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Helisel Savonius rüzgar türbini



Şekil 1.7. Helisel Darrieus rüzgar türbini



Şekil 1.8. Darrieus H-rotor rüzgar türbini

Dikey eksenli rüzgar türbinleri kentsel kent içi kurulumu ve fazla alana kapsamı sayesinde rüzgardan elektrik üretiminde gittikçe önem kazanan türbinlerdir. Ancak dikey eksenli rüzgar türbinlerinin yatay eksenli rüzgar türbinlerine kıyaslandığında daha az verimli olduğu bilinmekte.

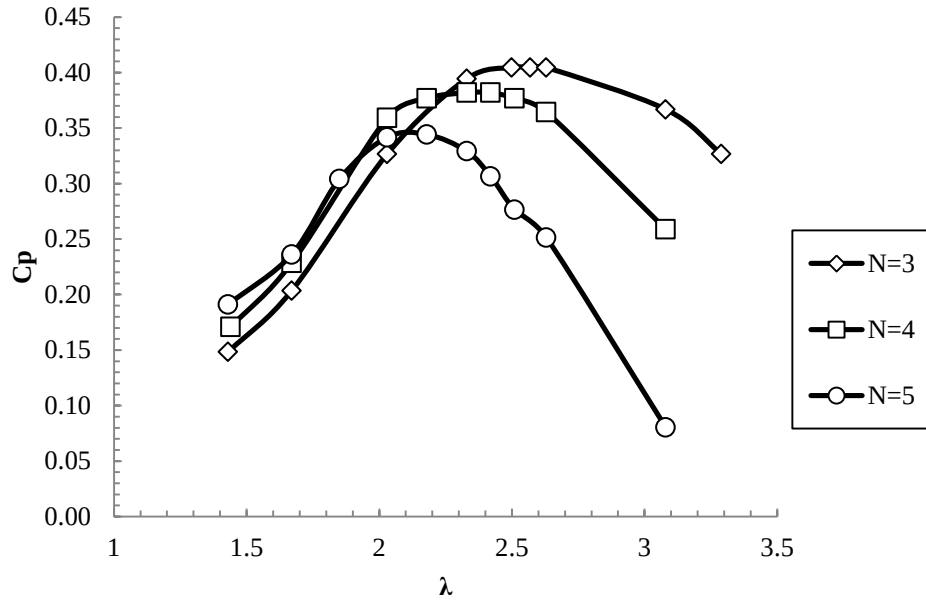
1.5.1.3. Çok Kanatlı Rüzgâr Türbinleri

İlk rüzgâr türbin tasarımları çok kanatlı konseptlerdi. Bu türbinler yüksek katılık (solidity) oranı (kanatların aldığı rüzgâr alanının, rotorun taradığı tüm alana oranı) ile karakterize edilmişlerdir. Yüksek katılık oranına sahip rüzgar türbinlerinin (Şekil 1.9.) dezavantajlarından biri, fırtına gibi çok yüksek rüzgar hızının olduğu hava şartlarında kanatlara toplam gelen hava yükünün çok fazla olması sebebiyle türbinde kalıcı hasarların hatta türbinin parçalanmasına sebep olabilmektedir.

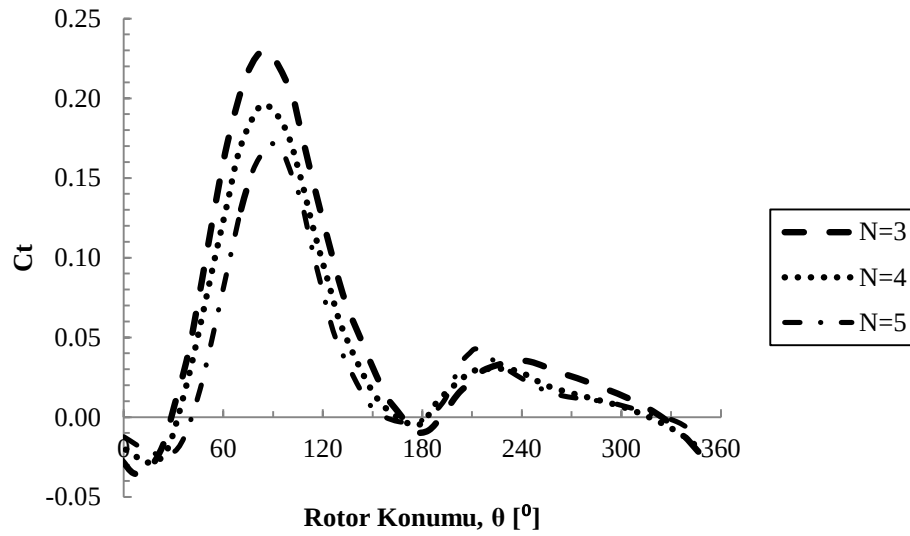


Şekil 1.9. Çok kanatlı rüzgar türbinleri tasarımları

Rüzgar türbinlerinde optimum kanat sayısının belirlemek için Castelli et al. yapmış olduğu çalışmada 3,4 ve 5 kanatlı dikey eksenli bir rüzgar türbini sayısal çalışma ile incelenmiştir. Çalışma sonucu 3 kanatlı bir türbinin diğerlerine oranla daha verimli olduğu ve kanatların rotor pozisyonu 90° olduğunda en yüksek tork elde edildiği gözlenmiştir [8]. Şekil 1.10 ve Şekil 1.11 bu çalışmaların sonucunu grafiksel olarak yansıtmaktadır.



Şekil 1.10. Farklı kanat uç hız oranlarında (λ) kanat sayısının (N), güç faktörü (C_p) üzerine etkisi [8].



Şekil 1.11. Farklı kanat sayılarının (N), rotor konum açısına (θ°) bağlı olarak tork katsayısına (C_t) etkisi [8].

1.5.2. Rüzgâr Türbini Tesis Yeri Seçim Kriterleri

Rüzgâr enerji santralının projelendirilmesi ve ekonomisi temel olarak seçilen santral sahasından üretililecek enerji miktarına bağlı olmaktadır. Bu enerji miktarının tespiti

için seçilen proje sahasına ait arazinin topoğrafik yapısı da göz önüne alınarak uygun nokta veya noktalara rüzgâr gözlem istasyonu (RGİ) kurulmalıdır. RGİ'lerindeki bir ölçüm direği üzerine yerleştirilmiş ölçüm aletleri ile standartlara uygun olarak yapılan rüzgar hızı, rüzgar yönü gibi ölçümler rüzgar enerji santralı projesinin daha sonraki aşamaları olan verilerin değerlendirilmesi, enerji üretim miktarının belirlenmesi ve rüzgar türbini seçiminde yol gösterici olacaktır.

RGİ'lerinin yerlerinin belirlenmesi hayati öneme sahiptir. RGİ'nun kurulacağı nokta veya noktalar her şeyden önce o alanı temsil edebilecek bir yer olmalıdır. WMO (Dünya Meteoroloji Örgütü) standartlarına göre temsil mesafesi arazinin topoğrafik yapısına bağlı olarak 500 m ile 100 km arasında değişmektedir. Ayrıca seçim yapılan nokta, topoğrafik açıdan son derece uygun olmakla birlikte bu alanda, engel yüksekliğinin 10 katı mesafeden daha yakında başka yüksek engeller bulunabilir. Bu şekilde seçilmiş yerler amaca uygun olmamaktadır. Tepe arkalarında yer seçimi tercih edilmemelidir. Bu durumda rüzgar hızı gerçek değerinden türbülanslar nedeniyle çok fazla uzaklaşabilir. Ayrıca RGİ'nun kurulacağı noktadaki rüzgar akışları daima birbirine paralel (laminer) olmalı, bozulmuş rüzgar akışları ve türbülanslar bulunmamalıdır. Özellikle enerji amaçlı rüzgâr hız ve yön ölçümlerinde hassasiyetin çok düşük olması istenmektedir. Zira, ölçümlerde yapılabilecek küçük bir hata enerji üretimine önemli oranda hata ve belirsizlik olarak yansır. Bu yüzden yer seçimi mutlaka bu konularda son derece deneyimli uzman personel tarafından yapılmalıdır. RGİ'lerinin kurulduğu noktalara ait 1/25000 ölçekli harita üzerinde UTM (Universal Transver Mercator) ve coğrafi koordinatları ile deniz seviyesinden olan yüksekleri de uzman elemanlar tarafından tespit edilmelidir [9].

RGİ'undaki ölçüm aletleri tamamen doğal atmosferik şartlarda çalıştığından kapalı yerlerde çalışan diğer aletlere göre ekonomik ömürleri daha kısadır. Paslanma, korozyon, çürüme, aşınma, buzlanma gibi etkenler yüzünden rüzgar aletlerinin ölçüm değerleri normalden hızla uzaklaşır. Bu yüzden rüzgar ölçüm aletleri ve kayıt sistemleri ile elektrik devreleri sık sık kontrol edilmeli, bakımları ve kalibrasyonları standartlarda ve aletlerin teknik el kitaplarında öngörülen zamanlarda mutlaka yapılmalıdır [9].

Rüzgâr hızı ve yönünü belirlemek amacıyla yapılan ölçümler, ölçüm amacına göre değişir. Meteorolojik amaçlı (klimatolojik, sinoptik, hava kirliliği vb) yer rüzgârı

ölçümlerinde Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kurallarına göre standart ölçüm yüksekliği 10 metredir. Enerji amaçlı rüzgâr ölçümlerinde ise rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve çevre sıcaklığı gibi parametreler 30 metre ve mümkünse türbin yüksekliğinde en az bir yıl periyodik olarak (10 dk, 1 saat) ölçülür ve bilgisayar ortamında değerlendirilebilecek şekilde veri paketi olarak tespit edilir. Rüzgâr hızı ve rüzgâr yönünün yansısı diğer bazı meteorolojik parametrelerin de ölçülmesi son derece faydalı olacaktır. Özellikle rüzgâr enerjisi hesaplamalarında kullanılan bir değer olan hava yoğunluğunu hesaplayabilmek için basınç, çevre sıcaklığı ve nemlilik değerlerinin ölçülmesi önemlidir [9].

2. BÖLÜM

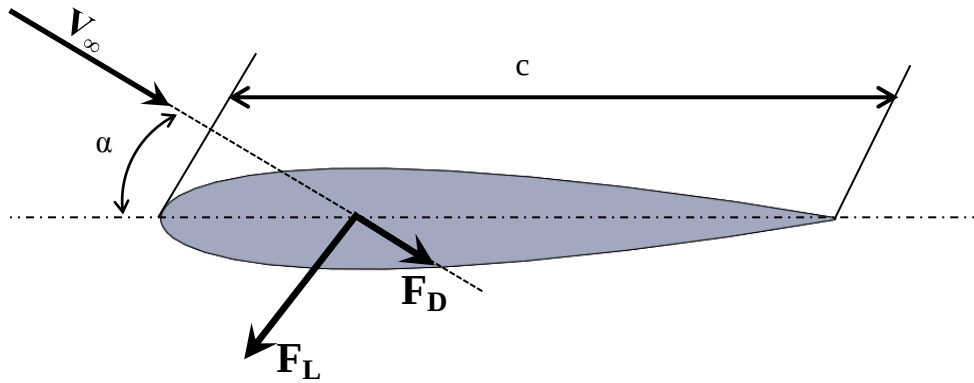
DIKEY EKSENLİ DARRIEUS RÜZGÂR TURBİNLERİ

2.1. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Genel Özellikleri

Dikey eksenli rüzgâr türbini olan Darrieus rüzgâr türbini ilk olarak 1920 yılında Georges Jean Marie Darrieus tarafından icat edilmiş ve beraberinde patenti de alınmıştır. İki dış bükey profilin birbirine sıkıca bağlanması sonucu oluşturulmuştur. Darrieus rüzgâr türbini modern rüzgar türbinlerinden farklı olup, eski İran türbinleri ile benzerlik göstermektedir. Kanat tipi rüzgar türbinleri geniş hız aralıklarında işletmeye elverişlidir [10]. Herhangi bir yönden esen rüzgârı alarak dönme avantajına sahiptirler. Bu durumdan ötürü rüzgâra yönelme mekanizmasına ihtiyaç duymazlar.

2.2. Darrieus Rüzgâr Türbin Aerodinamiği

Modern rüzgar türbinlerinin kanat profilleri, kanat üzerinde meydana gelen yükleri optimum güç elde edilmesi amacıyla geliştirilmiş olan özel profillerden (airfoil) seçilmektedir. Bu profillerin geliştirilmesi ve seçilmesinde amaç meydana gelen kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesidir. Profiller, bir giriş hattı üzerinde ve altında tanımlanmış iki özel eğriden oluşmaktadır. Hücum açısına bağlı olarak, rüzgar bu eğriler üzerinde yüksek ve düşük basınç alanları oluşturmakta ve bu basınç alanları arasındaki fark kanada kuvvet olarak yansımaktadır. Bir serbest akım içerisinde α hücum açısında örnek bir profilin maruz kaldığı kuvvetler Şekil 2.1.'de görülmektedir [11]. Şekil 2.1 de görüldüğü gibi α hücum açısında gelen bir rüzgar hızı, kendisine paralel yönde bir sürükleme kuvvetine ve kendisine dik açı yapacak şekilde bir kaldırma kuvvetine sebep olmaktadır.



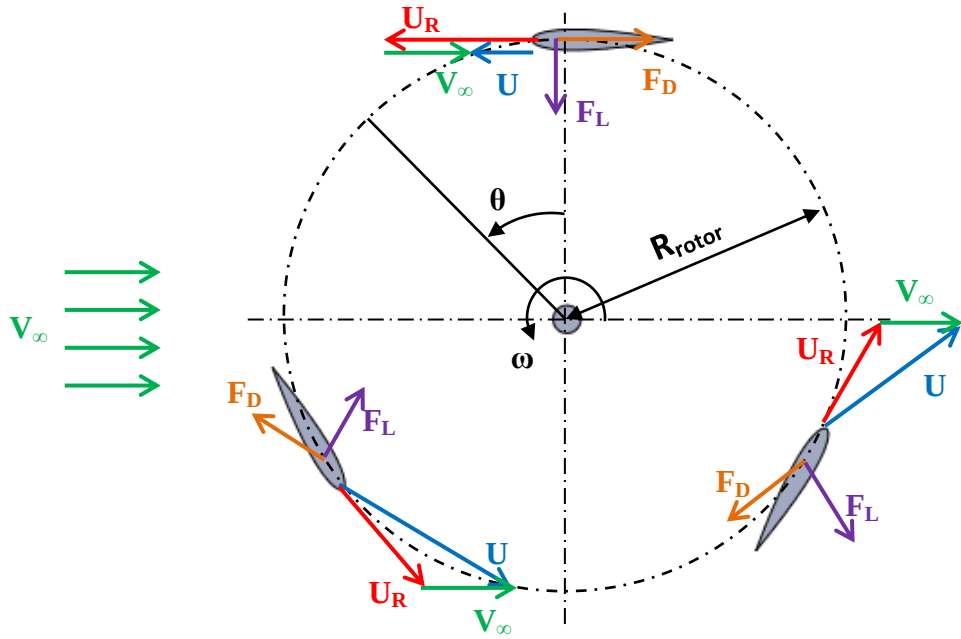
Şekil 2.1. Kanat profili üzerindeki oluşan hız ve kuvvet vektörleri [11]

Darrieus rüzgar türbininde detaylı olarak hız ve kuvvet vektörleri Şekil 2.2. de gösterilmiştir. Burada iki adet önemli hız bileşeni var; birincisi, “c” veter uzunluğuna her zaman paralel olan ve açısal hız ile rotor yarıçapı çarpımına eşit olan U_R hızı, ikincisi kanatlara tesir eden ve yönü ve büyüklüğü sabit olarak kabul edilen V_∞ hızı. Bu iki hızın sonucu olarak kanada U hızı (bağıl hız) ortaya çıkmaktadır (Denklem 2.1).

$$\vec{U} = \vec{V}_\infty + \vec{U}_R \quad (2.1)$$

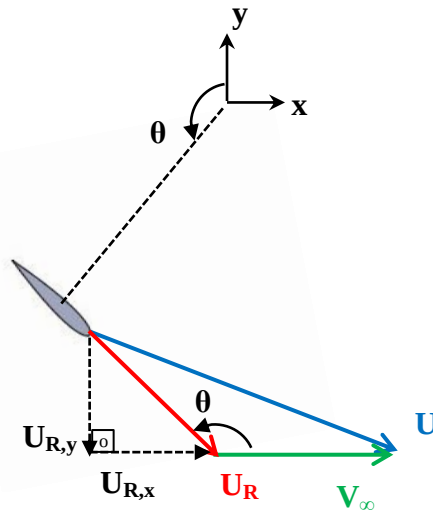
Tek bir kanat üzerinde gerçekleşen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini etkileyen bir parametre de hücum açısıdır. Simetrik olan kanat profillerinde hücum açısı 0° olduğunda sürüklenme kuvveti en azdır. Kaldırma kuvveti sürüklenme kuvvetinden büyük olduğu durumlarda kaldırma kuvveti kanat kolları sayesinde kanada dönme moment olarak yansır. Türbinin dönme hızı, rüzgar hızının en az 1.5 katı hızına ulaştığında bu kaldırma kuvveti, türbine güç üretmek için yeterli olmaktadır. [12], [13].

Hücum açısı α arttıkça kaldırma kuvveti ve dolayısıyla türbine yansıyan moment artmaktadır. Yalnız bu durumlar simetrik yapıya sahip kanat profilleri için geçerlidir. Bilindiği üzere simetrik olmayan kanat profilleri sıfır hücum açılarında bile bir miktar kaldırma kuvveti oluşmaktadır, bu yüzden rüzgâr türbinlerinde simetrik olmayan kanat profilleri seçimi akıllıca olacaktır.



Şekil 2.2 Dikey eksenli rüzgar türbininde kanada etkiyen hız ve kuvvet bileşenleri

Şekil 2.2. de dikey eksenli bir rüzgar türbininde kanatlara etki eden ortam rüzgar hızı V_∞ ve türbinin dönmesinden dolayı oluşan kanat ucundaki çizgisel hız U_R nin vektörel toplamı toplam U hızını vermektedir. Şekil 2.3 de ise tek bir kanat üzerinde oluşan hız vektörleri “ U ” nun hesaplamasını daha iyi gösterebilmek için detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 2.3. Tek bir kanat üzerinde oluşan hız vektörleri

Kanada etkiyen toplam U hızının hesaplanması kanat etrafındaki Re sayısının hesaplanması açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple U hızının denklemleri:

$$U = \sqrt{U_{R,y}^2 + (V_{\infty} + U_{R,x})^2} \quad (2.2)$$

$$U_{R,x} = \cos(180 - \theta) \cdot U_R \quad (2.3)$$

$$U_{R,y} = \sin(180 - \theta) \cdot U_R \quad (2.4)$$

Şekil 2.2 de görüldüğü gibi kanatlara etkiyen sürüklenme kuvveti F_D , kaldırma kuvveti F_L ye dik olacak şekilde oluşmaktadır. Aynı şekilde, F_D nin U hızına paralel ve yönü ters durumda oluşmaktadır.

2.3. Performans Parametreleri

Rüzgâr türbinleri tasarlanırken göz önüne alınması gereken birçok parametre söz konusudur. Bunları türbinin kurulacağı düşünüldüğü yerin rüzgâr potansiyeli, bu rüzgâr potansiyeline uygun kanat profili, hücum açısı, iklim şartları, türbinden elde edilmek istenen güç miktarı ve kullanım amacı olarak sıralayabiliriz. Rüzgâr ve hidrokinetik türbinler genellikle birimsiz performans parametreler ile karakterize edilirler.

Türbinin açısal dönme hızı, kanadın çizgisel hızının serbest hava hızına oranı olarak karakterize edilir, λ (kanat uç hız oranı) olarak sembolize edilir (Denklem 2.5) [2].

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (2.5)$$

$$Re = \frac{\rho L U}{\mu} \quad (2.6)$$

ω türbinin açısal dönme hızı, R rotor yarıçapını, V_{∞} serbest rüzgar hızını, ρ akışkan yoğunluğu, U toplam hızı (Denklem 2.1), L karakteristik uzunluk olarak kanadın veter uzunluğunu, μ ise akışkanın dinamik viskozite değerini ifade etmektedir. Benzer şekilde akışkanlar mekaniğinde akışın karakteristiğini belirlemede yaygın olarak kullanılan Reynolds sayısı Denklem 2.6 da verilmiştir.

Türbinin verimini ifade eden güç katsayısı (C_p) denklem (2.7) de tanımlanmıştır [11].

$$C_p = \frac{P_{türbin}}{P_{rüzgar}} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3} \quad (2.7)$$

Burada T ; türbinden elde edilen tork, ω türbinin açısal dönme hızı, A türbinin süpürdüğü rüzgâr alanı. T torkuyla dönen bir türbinin tork katsayısı denklem 2.8 de ifade edilmiştir. Burada da R türbinin rotor yarıçapını ifade etmektedir [11].

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho R A V_\infty^2} \quad (2.8)$$

Katılık oranı σ ile sembol edilir ve kanatların kapsadığı alanın türbinin toplam kapsadığı alana oranı olarak formülize edilir:

$$\sigma = \frac{A_{kanatlar}}{A_{türbin}} \quad (2.9)$$

2.4. Rüzgârdan Alınan Güç – Momentum Teorisi

Rüzgâr sahip olduğu hız nedeniyle kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgârın bu gücü, rüzgârın hızı, yoğunluğu, havanın sıcaklığı ve geçtiği kesit alanına bağlıdır. Kinetik enerji ve debi denklemlerinden rüzgârın gücü denklemi kolaylıkla elde edilebilir. Kinetik enerji:

$$E = \frac{1}{2}m V^2 \quad (2.10)$$

$$\dot{E} = P_{rüzgar} = \frac{1}{2}\dot{m} V^2 \quad (2.11)$$

Kütle debisi:

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A V \quad (2.12)$$

Değerler yerine yazıldığında kuramsal olarak V rüzgar hızındaki A alanından geçen rüzgarın sahip olduğu güç:

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2}\rho A V^3 \quad (2.13)$$

Bu denklemden gücün yoğunluk ve süpürülen alanın birinci hızın üçüncü kuvvetiyle orantılı olduğu görülebilmektedir. Denklem C_p güç katsayısı ile çarpılarak rüzgârdan türbine aktarılan güç oranını ifade etmektedir.

$$P_{türbin} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (2.14-1)$$

Bir başka deyişle;

$$C_p = \frac{P_{türbin}}{P_{rüzgar}} \quad (2.14-2)$$

da denebilir.

2.4.1. Betz Kanunu

Rüzgâr enerjisinin en temel teorilerinden biri Betz limitidir. Rüzgâr türbinin C_p katsayısı, alman fizikçi Albert Betz tarafından 1919 yılında serbest akışlı ortamda rüzgâr türbininin tasarımından bağımsız olarak rüzgârdan elde edilen maksimum katsayı olarak hesaplamıştır. Betz limiti olarak bilinen bu yasa, rüzgârdan enerji elde eden idealize edilmiş bir disk ile serbest akışlı havanın kütle ve momentum transferi prensipleri denklemlerinden türetilmiştir. Şekil 2.4 de türbin diskinin uygulanan Betz teorisi için şeması ve bölgelerinde meydana gelen basınç ve hız değişimlerini gösteren grafikler görülmektedir.

Türbinin ürettiği güç;

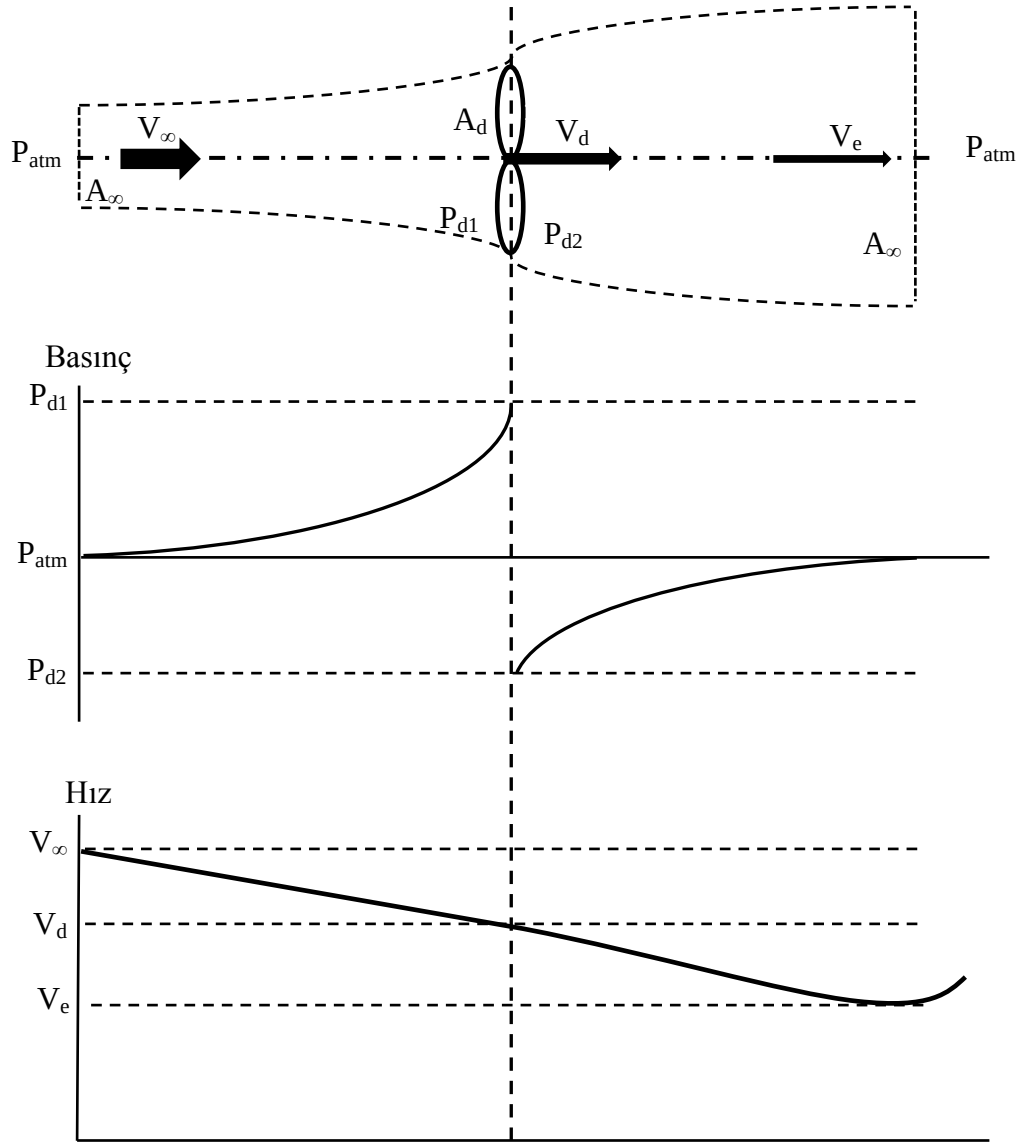
$$P_{türbin} = (P_{d1} - P_{d2}) A V \quad (2.15)$$

Türbin disk alanı A_d olmak üzere süreklilik denklemi;

$$A_{\infty} V_{\infty} = A_d V_d = A_e V_e \quad (2.16)$$

Momentum korunumundan türbine uygulanan kuvvet türbin diskinin giriş ve çıkışı arasındaki momentum değişimine eşittir;

$$(P_{d1} - P_{d2}) A_d = \dot{m} \Delta V = \rho A_{\infty} V_{\infty} (V_{\infty} - V_e) \quad (2.17)$$



Şekil 2.4 Betz limiti türetmede kullanılan akış alanı ve akış alanı boyunca basınç ve hız değişimleri [13].

Türbinden önce ve sonra Bernoulli denklemi yazılırsa;

$$P_{atm} + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 = P_{d1} + \frac{1}{2} \rho V_d^2 \quad (2.18)$$

$$P_{d2} + \frac{1}{2} \rho V_d^2 = P_{atm} + \frac{1}{2} \rho V_e^2 \quad (2.19)$$

$$(P_{d1} - P_{d2}) = \frac{1}{2} \rho (V_\infty^2 - V_e^2) = \rho \frac{A_\infty}{A_d} V_\infty (V_\infty - V_e) = \rho V_d (V_\infty - V_e) \quad (2.20)$$

(2.20) denkleminde;

$$V_d = \frac{1}{2}(V_\infty + V_e) \quad (2.21)$$

Çekilebilir. Betz teorisi başka herhangi bir kaybı göz önünde bulundurmuyarak, türbin tarafından elde edilen güç, çıkış ile güç arasındaki güç farkı olarak tanımlanabilir.

$$P_{türbin} = \frac{1}{2}\rho A_d V_\infty^3 - \frac{1}{2}\rho A_d V_e^3 \quad (2.22)$$

2.22 denklemi maksimum P güç değeri diferansiyeli alındığında $\left(\frac{V_e}{V_\infty}\right) = \frac{1}{3}$ değeri ile sağlanır.

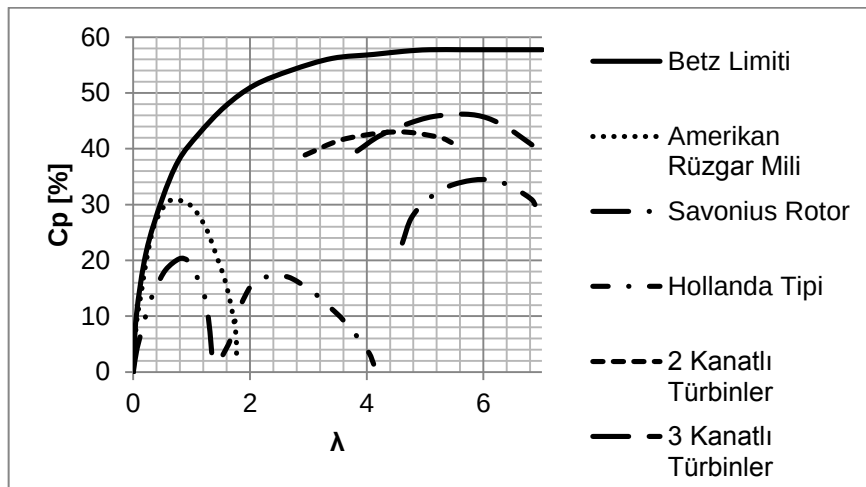
$$P_{türbin} = \frac{1}{2}\rho A_d V_d (V_\infty^2 - V_e^2)$$

$$P_{türbin} = \frac{1}{4}\rho A_d (V_\infty + V_e)(V_\infty^2 - V_e^2)$$

$$P_{türbin} = \frac{1}{4}\rho A_d V_\infty^3 \left(1 - \left(\frac{V_e}{V_\infty}\right)^2 + \left(\frac{V_e}{V_\infty}\right) - \left(\frac{V_e}{V_\infty}\right)^3\right) \quad (2.23)$$

2.23 denkleminde $\left(\frac{V_e}{V_\infty}\right) = \frac{1}{3}$ değeri yerine yazıldığında;

$$P_{türbin,max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A_d V_\infty^3 = P_{türbin,max} = \frac{1}{2} \rho A V_\infty^3 C_p \quad (2.24)$$



Şekil 2.5 Farklı rüzgâr türbinleri için kanat uç hız oranına göre (λ) güç katsayısı (C_p) grafikleri [1].

2.24 denklemindeki $\frac{16}{27}$ değeri maksimum güç için $C_{p,max} \cong 0,59$ değerini vermektedir ve bu değer yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rüzgardan elde edilebilecek en yüksek verimi ifade etmektedir [13], [14], [15]. Rüzgâr türbininde diğer mekanik aerodinamik vb. kayıplar olacağı da göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.5. de farklı tasarımlardaki rüzgar türbinleri için C_p katsayıları ve ideal Betz limiti gösterilmektedir [1].

2.4.2. Betz Limiti Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerine Uygulanması

Yatay eksenli rüzgar türbinleri için türetilen Betz limiti çalışmaları dikey eksenli rüzgar türbinleri için direk olarak kabul edilemez. Ancak, akış alanındaki kanatlara vuran hava akımı ve kanatlardan ayrılan hava akımı olarak ikiye ayrıldığında Betz teorisine eşdeğer bir teorem yaratmak mümkün olabilir. Dikey eksenli türbine uygulanan tork, türbinin arkasında kalan akış alanındaki açısal momentum değerine eşit ve zıt yönde olması gerekecektir.

3. BÖLÜM

DIKEY EKSENLİ DARRIEUS RÜZGÂR TURBİNİ İÇİN KANAT PROFİLİNİN SAYISAL YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

3.1. Giriş

Bu çalışma da, bir dikey eksenli Darrieus rüzgar türbini için kanat profilinin belirlenmesi için ilk adım olarak Castelli et al. 9 m/s rüzgar hızında NACA0021 üzerinde yaptığı sayısal ve deneysel çalışmanın, sayısal kısmının doğrulaması yapılacaktır. Bu işlemin amacı, yapılacak diğer sayısal çalışmalara doğru bir temel hazırlamak, yani sayısal analizin, ağ yapısı, seçilen parametreler ve modelleme gibi değişkenlerin Castelli et al. daha önceden yapmış olduğu ve doğruluğu uluslararası “Energy” dergisinden kabul edilmiş çalışma ile bizim analizimizin doğruluğunu güvence altına almak. Sayısal analizimizde incelenecek olan diğer kanat profilleri, NACA0015, NACA5520 ve Clark-Y profilleridir. Her bir kanat profili için 9 farklı λ sayısı için C_P ve C_T katsayıları, rotor konum açılarında tork değerleri bulunulması amaçlanmaktadır.

3.2. Literatür Araştırması

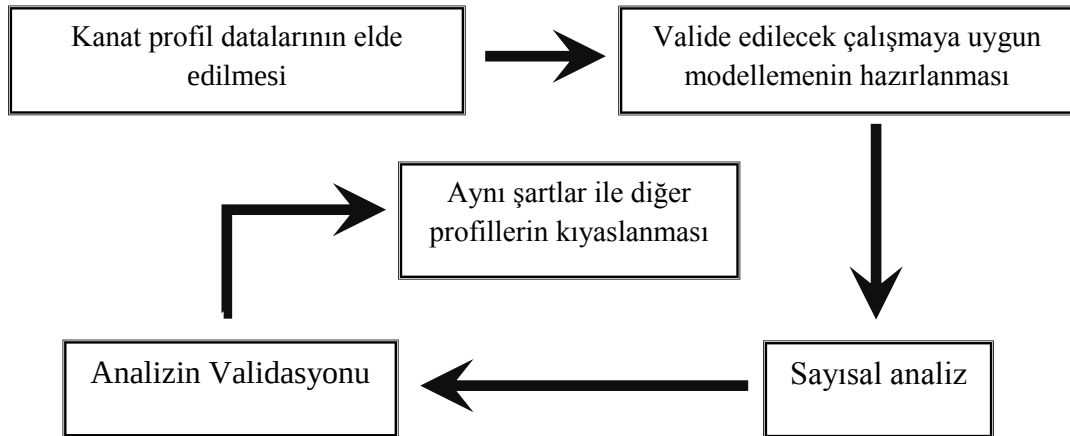
Dikey eksenli rüzgar türbinlerin performansını artırmak amacıyla ve araştırmacılar rotor tasarımı ve kanat profili üzerinde birçok çalışmaları mevcut. Pervez et al. dikey eksenli rüzgar türbinlerinde olmak üzere 3D ve 2D çalışmalarını NACA4518 i birbirlerine uygunluğu göstermiştir [16]. Nini et al. üç boyutlu olarak 1.52 ve 2.5 λ değerlerinde NACA0021 profilini incelemiş ve rotor bölgesi civarında dalga türbülansı görmüş ve bu türbülans etkisi $\lambda=2.5$ değerinde daha yüksek olduğunu belirtmiştir [17]. Nobile et al. ise NACA0018’i iki boyutlu olmak üzere dikey eksenli Darrieus rüzgar türbinlerinde;

ağ sayısı, türbülans modeli ve zaman adımının sonuçlara etkisini inceleyerek başlamıştır. Analizinde kararsız akışı simüle ederek kanat üzerindeki ağ yapısının ve türbülans modelinin analiz sonucunda önemli paya sahip olduğunu; ancak zaman adımının çözümü çok fazla etkilemediği sonucuna varmıştır. Nobile et al. [18] çalışmasında model olarak literatürdeki birçok örnekten farklı olarak türbin kanatlarının etrafına 8 adet 30° hücum açılı kanat daha eklemiştir ve bu sayede güç ve tork katsayısının yaklaşık %30-35 arttığı sonucuna varmıştır. Danao et al. [19] 7 m/s sabit serbest rüzgar hızında küçük ölçekli dikey eksenli rüzgar türbini için iki boyutlu analizler yapmıştır. Analizlerinde türbinin dönmesinden dolayı oluşan rüzgar hızının periyodik dalgalanmaların ortaya çıktığını ve türbinin 3 kanadında bu durumda farklı akış rejimleri gösterdiğini gözlemlemiştir. Eğer kanat uç hız oranı maksimum gücün elde edildiği değerde; dalgalanma genliği %10 dan az olursa ve dalgalanmanın frekansı 1 Hz den küçük olduğu durumlarda tüm kanatların ortalama performansının iyileştiği kanısına ermiştir [19]. McNaughton et al. [20] dikey eksenli rüzgar türbinlerinde iki boyutlu sayısal çalışmada NACA0018 kanat profilini kullanarak, iki farklı türbülans modelini incelemiştir. Çalışmasını öncelikle Roa et al.[21] katılık oranı 1.1 olan 3 kanatlı rüzgar türbinin 1.5×10^5 Reynolds sayısında test ederek başlamıştır. Kullandığı türbülans modellerinden biri olan SST modeli düşük Reynolds sayılarında akışı daha doğru simüle ettiğini görmüştür. Ferreira et al. [22] yaptığı PIV (Particle Image Velocimetry) deneyindeki hız değerlerinin sonuçlarını, sayısal çalışmada da benzer sonuçları bularak modelini doğruladığını göstermiştir. Ayrıca çalışmada doğru sonuca ulaştığını belirtebilmek için ağ yapısındaki değişkenliğin çözümü etkilemeyecek modeli seçtiğini ve Spalart-Allmaras ve k- ϵ türbülans modellerini denediğini belirtmiştir. Çalışmada NACA0015 i kullanmış ve sayısal çalışmalarda her zaman adımı için çözümün yakınsamasındaki dalgalanmanın kanat etrafındaki aerodinamik kuvvetlerin düzensizliğinden kaynaklanabildiğini sonucuna varmıştır. Sayısal çalışmasının amacı PIV deneyini bilgisayar ortamında daha masrafsız ve kolay bir şekilde gerçekleştirebilmek ve sonuçlarını PIV deneyi sonuçları ile eşleştirebildiği için de çalışmanın doğruluğunu kanıtlamıştır [22]. Almohammadi et al. [23] NACA0015 kanat profilini düz kanatlı dikey eksenli bir rüzgar türbini üzerinde ağ bağımsızlığı teknikleri üzerinde çalışmıştır. Bu teknikler, “*General Richardson Extrapolation*” (GRE), “*Grid Convergence Index*” (GCI) ve doğrulama yöntemleridir. Ağ bağımsızlığını sağlamak yüksek hücre sayılı ağ modellerine yakalamak mümkündür;

ancak buna ek olarak Almohammadi et al. yukarda belirtilen üç farklı modelle de ağ bağımsızlığının sağlayabilmenin çabası içinde olmuşlardır. Çalışmaları kanat uç hız oranının 0.5-5.0 aralığında olmuş ve bu değerlere bağlı olarak güç katsayısının eğrisi üzerinde yorumlar yapmıştır. Sonuç olarak *GRE* yöntemi tahmin edilen güç katsayısı değerine diğer iki yöntemden çok daha fazla yaklaşmıştır [23]. Tai et al. [24] NACA0012 kanat profilinin kullanıldığı dikey eksenli rüzgar türbinini iki boyutlu sayısal olarak, LDWT algoritma kodunu kullanarak incelemiştir. Literatürdeki deneysel çalışmaların sonucunu yüksek Reynolds sayılarında daha fazla yakın bulduğunu belirtmiştir. Düşük Reynolds sayılarında, dolayısıyla düşük kanat uç hız oranlarında, elde edilen gücün düşmesinin asıl sebebinin, kanat civarında oluşan akış durmalarından kaynaklandığını ileri sürmüştür [24]. Güleren vd. [25] genel olarak rüzgar türbinlerinde düşük hücum açılarında farklı kanat profillerinin aerodinamik kuvvet ve katsayıları üzerine çalışma yapmıştır. Kullandığı kanat profilleri: Eppler 625, Eppler 664, Clark-Y, Eiffel 10 (Wright), FX 69-PR-281, NACA Munk M-4 dir. Çalıştığı bu kanat profilleri içerisinde C_L ve C_L/C_D değişimi incelendiğinde en iyi performans gösteren Clark-Y profili olduğu ortaya çıkmıştır. Sadece C_L sayısı dikkate alındığında düşük Reynolds sayısında Eiffel 10, yüksek Reynolds sayısında ise yine Clark-Y profilinin seçiminin mantıklı olacağını tavsiye etmektedir. Ayrıca Bhutta et al. [26] dikey eksenli rüzgar türbinlerin kullanımını arttırmak için avantajlarını ve ilk hareket problemi gibi olan dezavantajlarını aşmak üzere bazı çalışmaları derleyerek bir yayın ortaya çıkarmıştır. 2-4 kW arası dikey eksenli rüzgar türbinlerin geri ödeme periyodunun daha kısa olduğunu, maksimum tork eldesi için ilgili konfigürasyonun uygun kanat uç hız oranında çalıştırılması gerektiğini ve rüzgar türbini tasarlanırken bu durumların göz önünde bulundurularak öncelikle CFD analizinin yapılmasının oldukça önemli olduğunu ifade etmiştir.

3.3. Sayısal Analiz

Sayısal analizimiz için izleyeceğimiz süreç Şekil 3.1 de gösterilmektedir. Kanat profilleri web siteden koordinat dataları alınmıştır [27]. Bu koordinatlar denklem 3.5, 3.6 ve 3.7 de verilen formüllerle hesaplanmaktadır. Sayısal analiz Ansys-Fluent 14.5 paket programı kullanılarak 2D Darrieus türbini modeli üzerinde kanat profillerinin kinetik ve dinamik karakteristikleri incelenmiştir. Castelli et al. çalışması ile yeterli uyum sağlandıktan sonra kıyaslama amacıyla diğer kanat profilleri incelenmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada izlenecek süreç

Analiz, sonlu hacimler metodu baz alınarak, Fluent programında sıkıştırılamaz kararsız akış için Moving Mesh (hareketli ağ yapısı) ve k-ε geliştirilmiş duvar davranış (enhanced wall treatment) modeli kullanılmıştır. Moving Mesh metodu bu tür dönen makine çalışmalarını basitleştirmek amacıyla kullanımı yaygındır [2]. Yakınsama kriterleri her zaman adımında en az 10^{-4} seçilmiş, programdan okunan moment değerleri %2 den az olduğunda kararlı durum sağlandığı varsayılmış olup her λ sayısı için akışın kararlı hale gelmesi için en az 7-8 tur atması gerekmiştir. Analiz, Navier-Stokes denklemlerin 2D akış ortamına uygulanması ile çalışılmıştır. Her bir kanadın her 1° bir yakınsama kriterleri sağlanmış ve her 4° de bir değerlerin okunması ile sonuçlar değerlendirilmiştir. Analizde sabit olarak yoğunluk $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$, dinamik viskozite $\mu=1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ alınmıştır. Program, akışkanlar mekaniğinin temeli olan süreklilik denklem (Denklem 3.1) ve momentum denklemi (Denklem 3.2) verilmiştir [28].

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

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

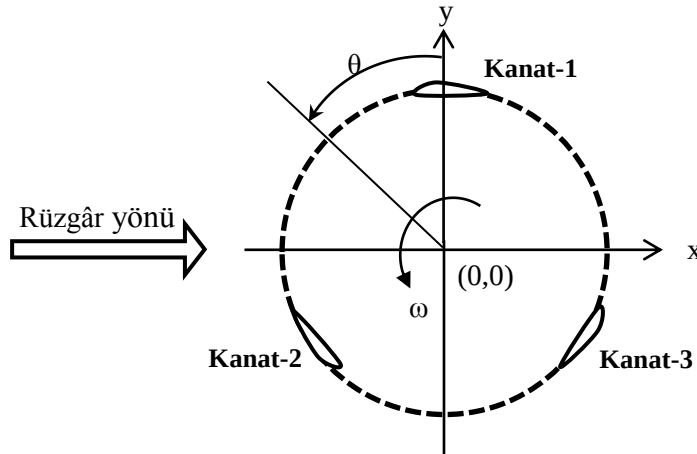
Programda seçilen k-ε türbülans modeli formülleri ve formüller içerisinde bulunan programda değeri seçilen kat sayılar aşağıdadır [29].

$$\frac{\partial(\rho k_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho(P_k - \varepsilon) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \quad (3.4)$$

$$C_{1c} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_c = 1.2 [2]$$

Şekil 3.2 de gösterildiği gibi; rüzgar, λ sayısına bağlı olarak belli ω açısal dönme hızlarında dönen kanatlara sabit 9 m/s rüzgar hızının uygulanması sonucu kanatların oluşturduğu torka göre daha önce belirtilen parametreler incelenmiştir. Tablo3.1 de sayısal model geometrisi ve kullanılan kanat profilleri ile ilgili bilgiler yer almaktadır.



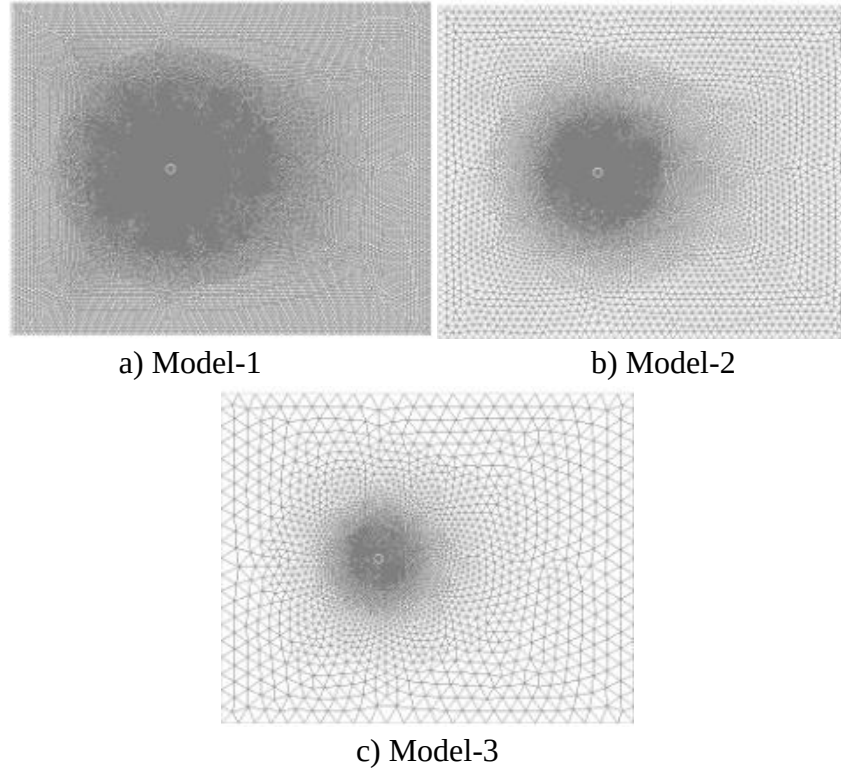
Şekil 3.2. Sayısal analizin şematik modeli

Tablo 3.1. Sayısal analizdeki modellerin boyutları

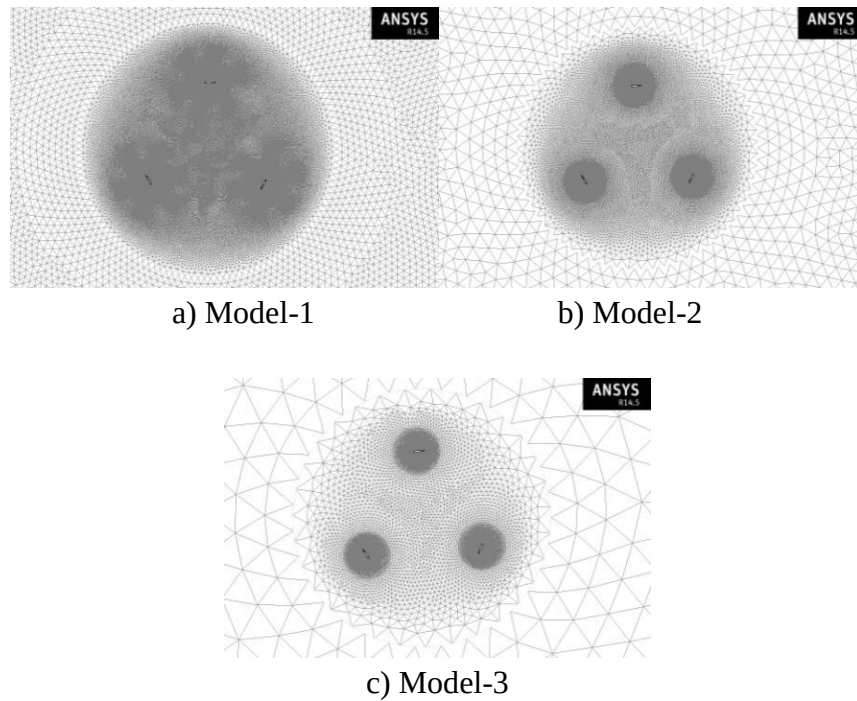
D_{rotor}	1.30 m
H_{rotor}	1.00 m
N (kanat sayısı)	3
Kanat profili	Naca0021, Naca0015, NACA5520 ve Clark-Y
c (veter uzunluğu)	0.0858 m

Sayısal çalışmaların sonuçları kullanılan türbülans modeli, referans değerlerine bağlı olduğu gibi ağ yapısı ve hücre sayısı da çözüm sonuçlarını önemli derecede etkilemektedir. Bir sayısal analizde ne kadar hücre sayısı varsa bilgisayar o kadar fazla işlem yapacak ve o kadar uzun süre geçecek demektir. Birkaç farklı hücre sayılı ağ modelleri denenerek sonucun artık pek değişmediği, en az hücre sayılı ağ modelinin seçilmesi kullanılan yaygın bir metottur ve buna ağ bağımsızlığı denmektedir. Bu sayısal analizde 3 farklı ağ modeli denenmiş (hücre sayıları sırasıyla 260000, 560000 ve 1 milyon) ve Şekil 3.3-6 da ayrıntılı şekilde resmedilmiştir. Hücre sayısındaki değişimin sonuca pek yansımadağı (Şekil 3.7) 560000 hücre sayılı Model-2 modeli seçilmiş ve

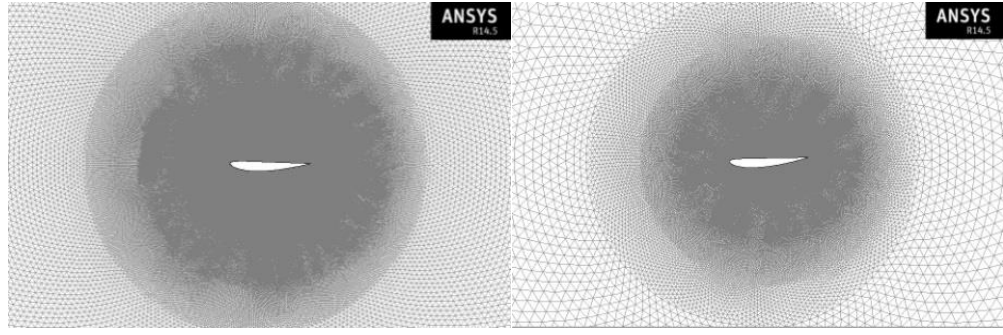
bütün analizler bu modellerle çalıştırılmıştır. 8 çekirdek 2.93 GHz, 16 GB RAM e sahip bilgisayar ile her bir λ sayısı için analiz süresi yaklaşık 3 gün sürmüştür.



Şekil 3.3. Sabit dış bölge için farklı ağ modelleri

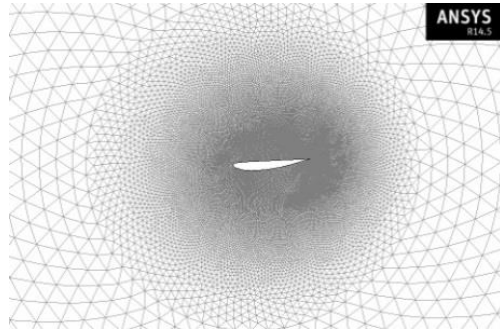


Şekil 3.4. Dönen iç bölge için farklı ağ modelleri



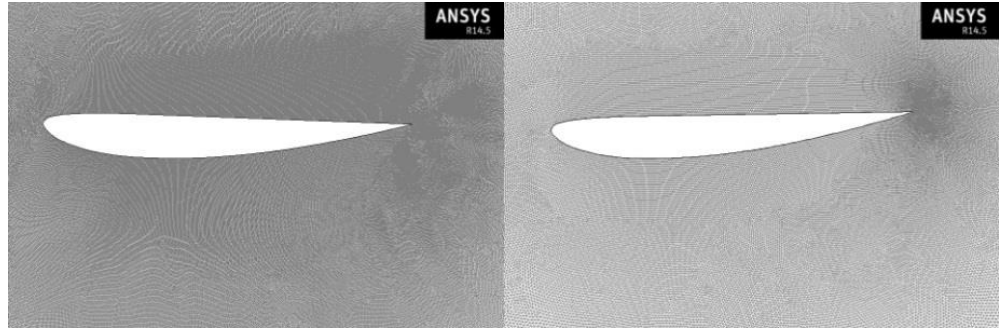
a) Model-1

b) Model-2



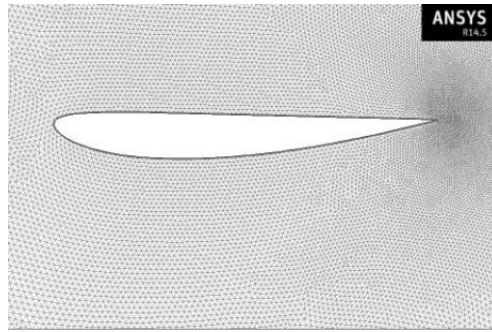
c) Model-3

Şekil 3.5. Kontrol çemberi için farklı ağ modelleri



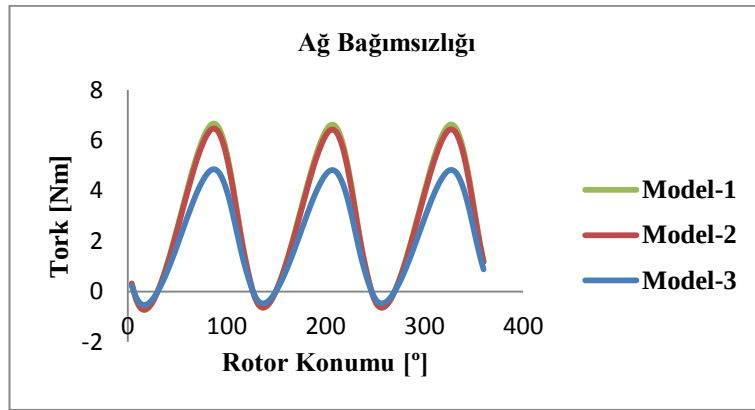
a) Model-1

b) Model-2



c) Model-3

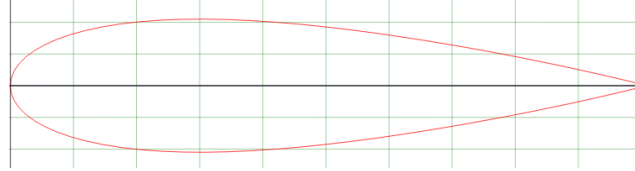
Şekil 3.6. Kanat profilleri etrafındaki farklı ağ modelleri



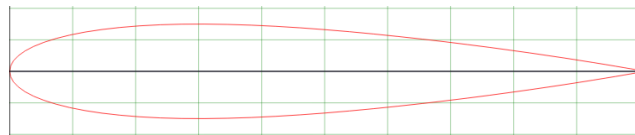
Şekil 3.7. Ağ bağımsızlığı

3.3.1. Model geometrisi

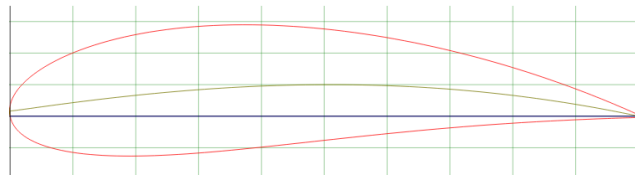
Daha önce de belirtildiği gibi incelenen kanat profilleri; NACA0021, NACA0015, NACA5520 ve Clark-Y 'dir ve Tablo 3.2. de koordinat değerleri ve Şekil 3.8 de kanat profil eğrileri gösterilmektedir.



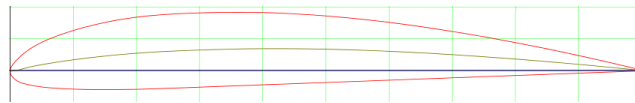
a) NACA0021



b) NACA0015



c) NACA5520



d) Clark-Y

Şekil 3.8. Kanat profilleri [a) NACA0021, b) NACA0015 c) NACA5520 ve d) Clark-Y] [27]

Tablo 3.2. Kanat profillerin x ve y koordinatları [30]

NACA0021		NACA0015		NACA5520		Clark-Y	
x	y	x	y	x	y	x	y
1.000	0.002	1.000	0.002	1.000	0.002	1.000	0.000
0.950	0.014	0.950	0.010	0.950	0.025	0.950	0.003
0.900	0.025	0.900	0.018	0.900	0.044	0.900	0.008
0.800	0.046	0.800	0.033	0.800	0.077	0.800	0.019
0.700	0.064	0.700	0.046	0.700	0.103	0.700	0.039
0.600	0.080	0.600	0.057	0.600	0.125	0.600	0.057
0.500	0.093	0.500	0.066	0.500	0.138	0.500	0.070
0.400	0.102	0.400	0.073	0.400	0.144	0.400	0.079
0.300	0.105	0.300	0.075	0.300	0.143	0.300	0.082
0.200	0.100	0.200	0.072	0.200	0.131	0.200	0.079
0.150	0.094	0.150	0.067	0.150	0.116	0.150	0.072
0.100	0.082	0.100	0.059	0.100	0.101	0.100	0.061
0.075	0.074	0.075	0.053	0.075	0.089	0.075	0.054
0.050	0.062	0.050	0.044	0.050	0.075	0.050	0.044
0.025	0.046	0.025	0.033	0.025	0.057	0.025	0.030
0.013	0.033	0.013	0.024	0.013	0.042	0.013	0.020
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000
0.013	-0.033	0.013	-0.024	0.013	-0.025	0.013	-0.016
0.025	-0.046	0.025	-0.033	0.025	-0.035	0.025	-0.020
0.050	-0.062	0.050	-0.044	0.050	-0.046	0.050	-0.026
0.075	-0.074	0.075	-0.053	0.075	-0.052	0.075	-0.029
0.100	-0.082	0.100	-0.059	0.100	-0.057	0.100	-0.031
0.150	-0.094	0.150	-0.067	0.150	-0.062	0.150	-0.034
0.200	-0.100	0.200	-0.072	0.200	-0.063	0.200	-0.035
0.300	-0.105	0.300	-0.075	0.300	-0.059	0.300	-0.035
0.400	-0.102	0.400	-0.073	0.400	-0.048	0.400	-0.035
0.500	-0.093	0.500	-0.066	0.500	-0.038	0.500	-0.035
0.600	-0.080	0.600	-0.057	0.600	-0.027	0.600	-0.035
0.700	-0.064	0.700	-0.046	0.700	-0.018	0.700	-0.035
0.800	-0.046	0.800	-0.033	0.800	-0.011	0.800	-0.033
0.900	-0.025	0.900	-0.018	0.900	-0.006	0.900	-0.019
0.950	-0.014	0.950	-0.010	0.950	-0.004	0.950	-0.010
1.000	-0.002	1.000	-0.002	1.000	-0.002	1.000	0.000

NACA kanat profillerinin çizgileri, eğrilik (kamburluk) çizgisi ve değişen kalınlık formüle edilerek hesaplanır ve belirlenir. Kamburluk çizgilerinin denklemleri maksimum kamburluğun olduğu noktanın (P), her iki tarafı için iki ayrı bölge olarak

tanımlanır. Nihai kanat profilin konumunu hesaplamak için kamburluk çizgisi (Denklem 3.5); daha sonra da kamburluk çizgisinin eğimi (Denklem 3.6) hesaplanması gerekir. (a) denklemi $0 \leq x < P$, (b) denklemi $P \leq x \leq 1$ değerleri arasında geçerlidir [31].

$$y_c = \frac{M}{P^2}(2Px - x^2) \quad (a) \quad y_c = \frac{M}{(1-P)^2}(1 - 2P + 2Px - x^2) \quad (b) \quad (3.5)$$

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{2M}{P^2}(P - x) \quad (a) \quad \frac{dy_c}{dx} = \frac{2M}{(1-P)^2}(P - x) \quad (b) \quad (3.6)$$

Kalınlık dağılımının denklemi denklem 3.7 de belirtilmiştir.

$$y_t = \frac{T}{0.2}(a_0x^{0.5} + a_1x + a_2x^2 + a_3x^4 + a_4x^4) \quad (3.7)$$

Denklemdeki katsayılar:

$$a_0 = 0.2969 \quad a_1 = -0.126 \quad a_2 = -0.3516 \quad a_3 = -0.2843 \quad a_4 = -0.1015$$

Çıkış kenarı kapatılacaksa $a_4 = -0.1036$ olarak hesaba alınmalıdır. Ayrıca bu katsayılar %20 kalınlıkta profiller (örneğin NACA0020) için geçerlidir, istenilen farklı kalınlıkta profil için $\frac{T}{0.2}$ değerindeki 0.2 sayısı değiştirilmelidir. %20 kalınlıkta profillerde, profilin çıkış (arka) kenarında ($x=1$) kalınlık 0.0021 olacaktır, eğer çıkış kenarının kapalı olması istenilirse a_4 katsayısı ayarlanmalıdır. y_t değeri profilin kalınlığının yarısını vermektedir, aynı işlem profilin diğer kenarı için de tekrarlanmalıdır. Yukarıdaki denklemler kullanılarak verilen x değeri için, kambur çizgisi y_c , kamburluk eğimini ve kalınlığı hesaplamak mümkündür. Eğrilik çizgisinin üst ve alt kısmının denklemleri (3.8) ve (3.9) da verilmiştir.

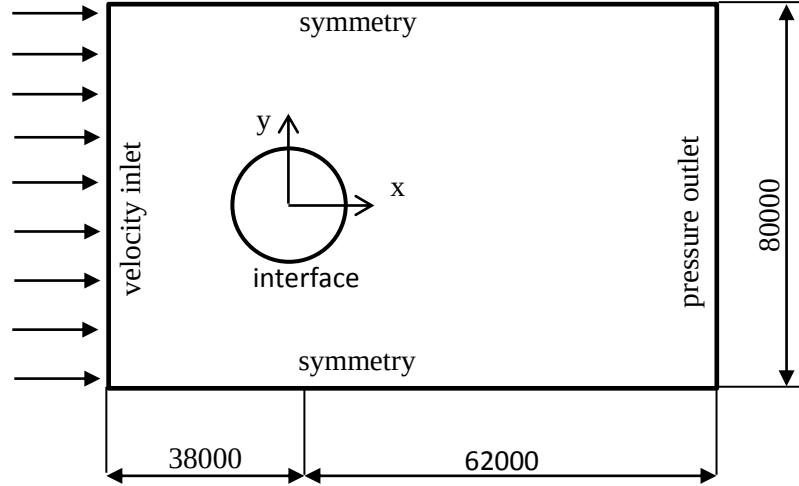
$$\theta = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \quad (3.8)$$

$$\text{Üst yüzey: } x_u = x_c - y_t \sin(\theta) \quad y_u = y_c + y_t \cos(\theta) \quad (3.9)$$

$$\text{Alt yüzey: } x_1 = x_c + y_t \sin(\theta) \quad y_1 = y_c - y_t \cos(\theta) \quad (3.10)$$

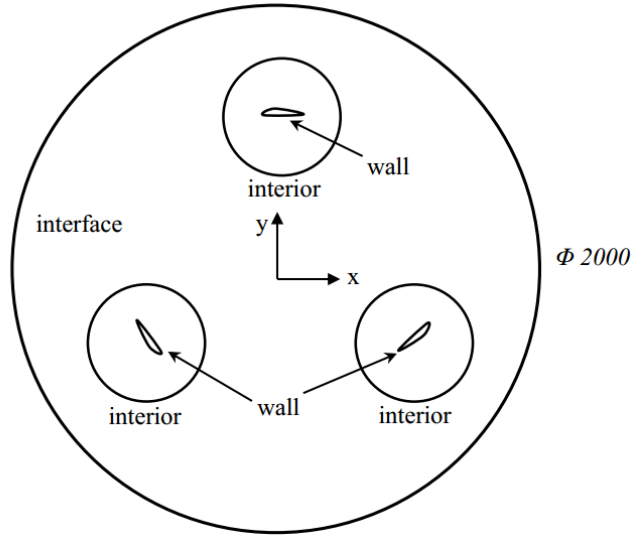
Sayısal analiz çalışmalarında dönen bir modelleme yaratılabilmesi için etrafında dönen bölgenin sınır şartlarının geçişini sağlayacak sabit bir bölgeye ihtiyaç vardır. Bu dış bölge bir diğer anlamda rüzgâr tünelinin de modellemesidir. Bu kapsamda sabit bir dış dikdörtgen bölge Şekil 3.9 de ve rotorun içinde yer aldığı dönen bir iç bölge, boyutları

ve programda belirtilen tanımlamaları Şekil 3.10 de ve kanat etrafında ağ yapısının yoğun olması amacıyla çemberi bölgesi Şekil 3.11 de gösterilmiştir.



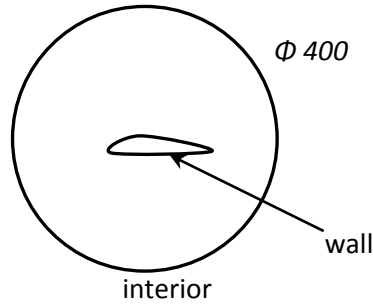
Şekil 3.9. Sabit dış bölge

Rüzgarın girdiği kenar program dilinde “velocity inlet”, rüzgarın çıktığı kenar “pressure outlet”, ve diğer iki yan kenar akışı etkilememek amacıyla “symmetry” seçilmiştir.



Şekil 3.10. Dönen iç bölge

Dönen iç bölgenin dış çember kenarı ve sabit dikdörtgen alanın içerisindeki boş iç çember kenarları akış şartlarını ve özelliklerini birbirlerine aktarmak amacıyla “interface” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.11. Kontrol çemberi

Kontrol bölgesinde “interior” diye tanımlama ağ sıklığının farklı yapılmak istenme amacıyla yapılmıştır. Kanatın dış kenarı “Wall” olarak ve içi boş uzay olarak modellenmiştir.

Akışkanlar mekaniğini ilgilendiren bu tür sayısal çalışmalarda akışın gerçekleştiği duvar civarında akışın karakterini belirten “duvar kanunu” bulunmaktadır. Bu kanun ilk olarak Theodore von Karman tarafından 1930 da yayınlanmıştır [32]. Duvar kanunu, türbülanslı akışta belirli bir noktadaki ortalama akışkan hızının duvara olan mesafesinin logaritmik ortalaması ya da akışkan bölgenin sınırını ifade etmektedir. Logaritmik yasası, yarı amprik bir ifadedir ve yalnızca düz plaka sınır tabakaları için değil aynı zamanda tam gelişmiş boru akışı hız profilleri için de geçerlidir. Logaritma yasası yüksek Re sayılarında hemen hemen tüm sınır tabakalı akışlar da geçerlidir. Logaritma yasası, genellikle **sürtünme hızı u_*** adı verilen bir karakteristik hız ile boyutsuzlaştırılan değişkenler cinsinden ifade edilir [28].

Logaritma yasası:

$$u^+ = \frac{1}{K} \frac{y u_\tau}{\nu} + C^+ \quad (3.11)$$

Olarak verilir ve sürtünme hızı:

$$u_T = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.12)$$

Şeklinde ifade edilir.

y^+ : duvar koordinatı; sürtünme hızı u_τ ve kinematik viskozite ν ile boyutsuz hale getirilir.

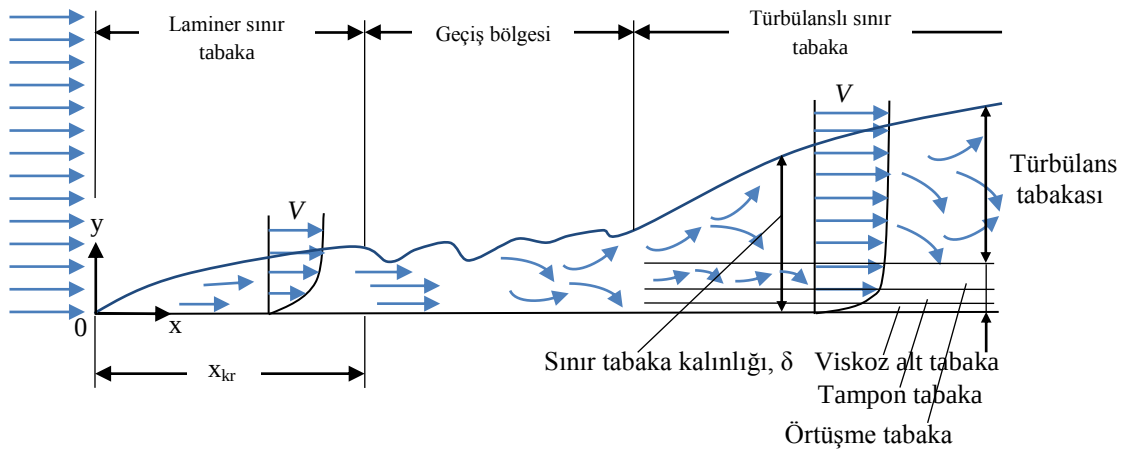
u^+ : boyutsuz hız; duvardan y mesafesinin fonksiyonu olarak duvara paralel U hızının sürtünme hızı u_τ ya oranı.

τ_w : duvar kayma gerilmesi

K : Von Karman sabiti

C^+ : doğal logaritmik integral sabiti

Pürüzsüz duvar üzerindeki yapılan deneylerde Von Karman sabiti $K \cong 0.41$ ve $C^+ \cong 5.0$ olarak tespit edilmiştir [32].



Şekil 3.12. Laminer, geçiş ve türbülanslı akış hız profilleri ve türbülanslı akışta tabakalar [28]

Ancak, Logaritma yasası çepere çok yakın yerlerde kullanılamaz (çünkü $\ln 0$ tanımsızdır) Duvar civarındaki akış bölgesi üç tabakaya ayrılmıştır. Bunlar viskoz etkilerinin baskın olduğu çepere bitişik çok ince olan tabaka viskoz alt tabaka (viscous sublayer), viskoz alt tabakaya yakın olan tampon tabaka (buffer layer) bulunur. Tampon tabaka üzerinde türbülans etkileri mevcut ancak hala viskoz etkilerinin hakimiyeti altındadır. Tampon tabakanın üzerinde türbülans etkilerinin çok daha fazla önem kazandığı ancak hala tam olarak hakim olmadığı örtüşme tabakası bulunmaktadır. Bu örtüşme tabakasının üzerinde türbülans etkilerinin viskoz etkileri üzerinde baskın olduğu türbülans tabakası bulunmaktadır [28]. Düz plaka üzerindeki bu bölge ve tabakalar Şekil 3.12 de resmedilmiştir. Şekil 3.12 de görüldüğü gibi çepere en yakın bölgeye viskoz tabaka denmektedir ve akışkanın viskoz özellikleri bu bölgede önemlidir. Sınır tabaka, literatürde boyutsuz değişkenler için kullanımı en yaygın gösterim, y^+ ve u^+ (iç

değişkenler veya çeper değişkenleri yasası istenir. Ariff et al. farklı türbülans modelleri ile bir kare cisim etrafındaki akış için düşük Reynolds sayılarında y^+ değerinin etkisini incelemiş ve ilk hücre boyutunun ne kadar küçük olursa o kadar çözümün doğru olduğu sonucuna varmıştır [33].

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (3.13)$$

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (3.14)$$

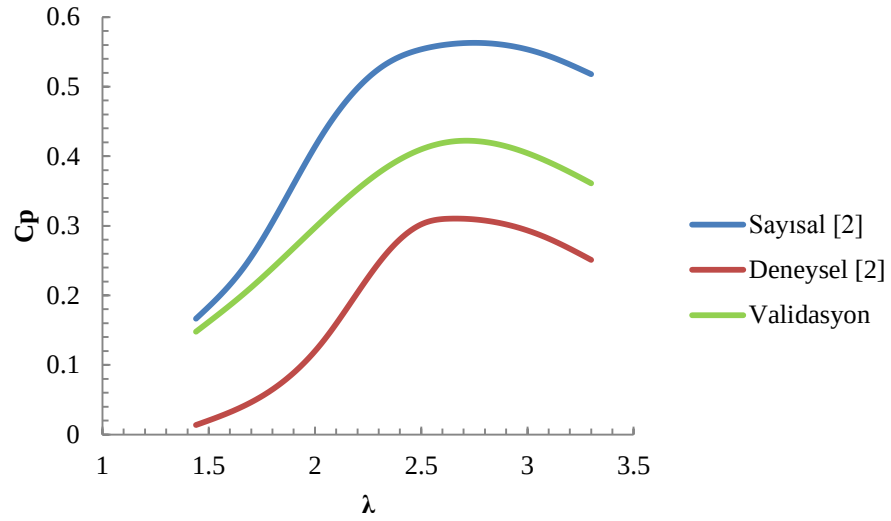
Sayısal analizde akışkanın viskoz etkilerinin ihmal edilmemesi için bu bölgelere de ağ atılması gerekmektedir. Seçilen ağ modelinde kanat etrafında sınır tabaka ağ atılmış ve bütün λ değeri için Fluent' de okunan y^+ değeri 5 den küçük olduğu (2 civarında) görülmüştür. Rüzgar türbinlerini çalışma karakteristiği incelendiğinde genellikle boyutsuz sayı olarak λ kullanılsa da, akışın türbülanslı olup olmadığına kanaat getirebilmek için rotor açısına bağlı olarak değişen Re değerlerin ortalama değerleri Tablo 3.3 de verilmiştir.

Tablo 3.3. λ sayılarında ortalama Reynolds değerleri

λ	1.68	2.04	2.33	2.51	2.64	3.09	3.30	3.7	4.00
Re	96870	114424	128913	138008	144613	167655	178479	199185	214772

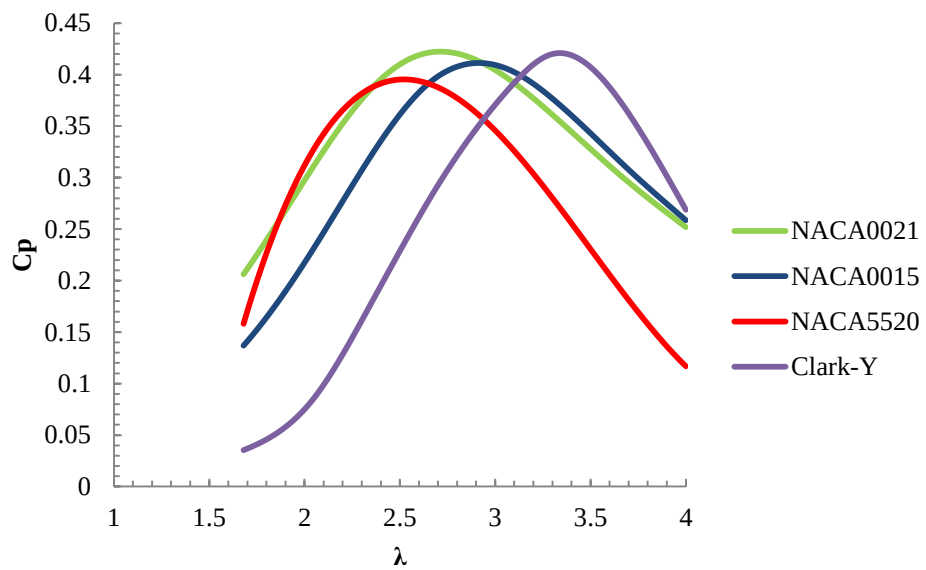
3.3.2. Sayısal Çalışmanın Sonuçları

Sayısal çalışmalarda çözümü doğru veya yanlış şekilde etkileyen bir çok parametre vardır; bunlar türbülans modelleri, türbülans modellerindeki katsayılar, çözüm metodları, yakınsama kriterleri vb. Yapılan sayısal çalışmanın sonuçlarının doğru olduğunu belirtebilmek için başka bir çalışma ile sonuçlarının örtüştüğü gerekmektedir. Bu kapsamda, sayısal analizin Castelli et al. çalışmasına uygunluğu Şekil 3.13 de görülebilmektedir [2]. Elde edilen değerler Castelli et al. yayınında bahsetmediği birkaç parametreden dolayı birebir sayısal çalışmasıyla örtüşmemiştir. Ancak seçilen farklı parametreler sayısal çalışmayı deney sonucuna daha fazla yakınsadığını ortaya çıkarmıştır.



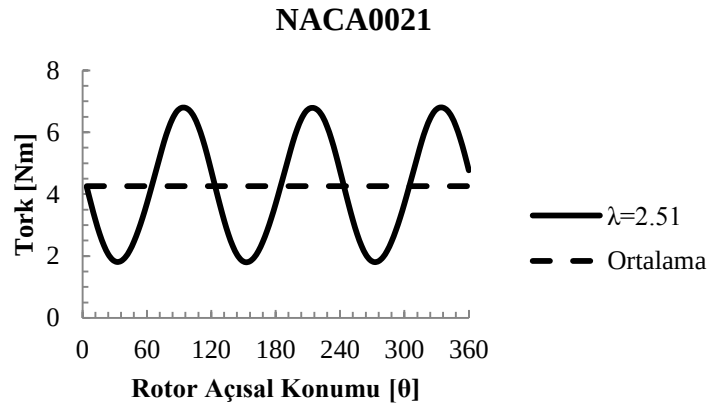
Şekil 3.13. Yapılan Sayısal analizde kullanılan NACA0021 kanat profilinin Castelli et al. çalışmalarıyla olan yakınsaması [2]

Uygulanan metotlar ve seçilen parametrelerin uygunluğu Castelli et al. çalışması ile sağlandıktan sonra NACA0015, NACA5520 ve Clark-Y için de aynı çalışma tekrarlanmıştır. Şekil 3.12 de NACA0021, NACA0015, NACA5520 ve Clark-Y profillerinin C_p eğrileri farklı λ sayılarında maksimum değerde ancak her dördü içinde maksimum C_p değeri 0.40 civarında olduğu görülmektedir (Şekil 3.14).

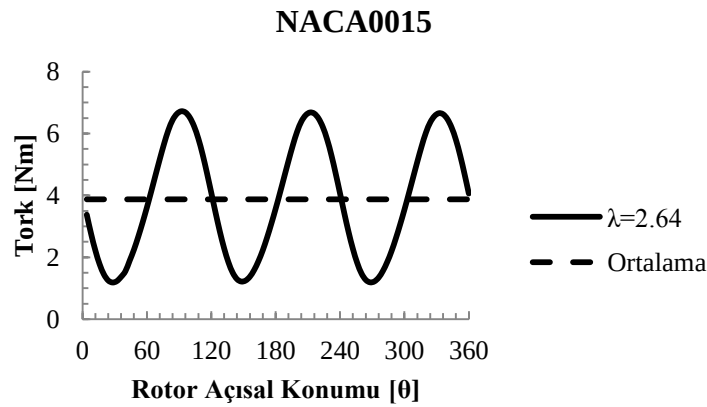


Şekil 3.14. NACA0021, NACA0015, NACA5520 ve Clark-Y'nin çalışılan λ 'lardaki C_p eğrileri

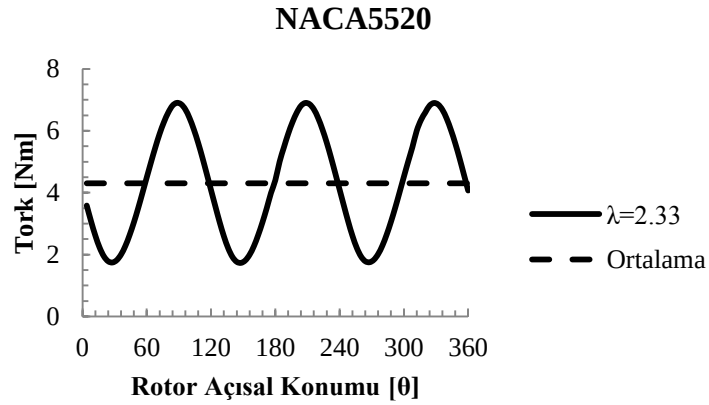
Burada önemli olan seçilecek profilin çalışma koşullarına göre seçilmesidir. Yüksek λ değeri, yüksek dönme hızı anlamına geldiği için yüksek dönme hızının gerçekleşeceği bir türbin için Clark-Y seçilmesi mantıklı olacaktır. Ayrıca dikey eksenli türbinlerin en büyük dezavantajı olan ilk hareketlenme problemi için de uygun profil seçilmelidir. Şekil 3.15. da her dört profilin en yüksek ortalama tork değerini aldığı grafikler verilmiştir. En yüksek ortalama tork değeri NACA5520 de 4.30 olarak belirlenmiş ve en küçük tork değeri 1.7311 ile NACA0021 e yakın olup diğer profillerden oldukça üstündür.



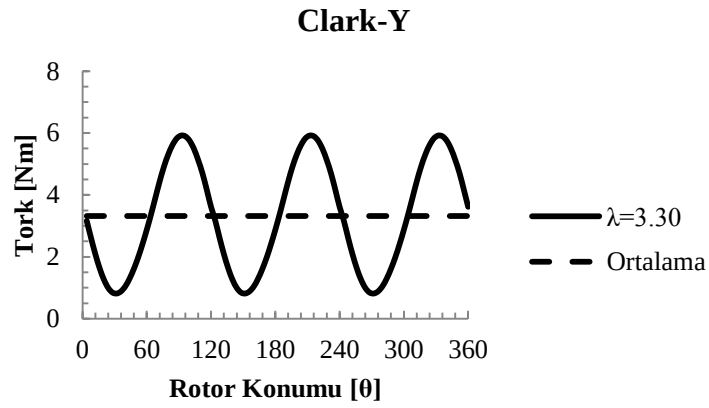
a) $\lambda=2.51$ de NACA0021 in rotor açı durumuna bağlı olarak tork ve ortalama tork değeri



b) $\lambda=2.64$ de NACA0015 in rotor açı durumuna bağlı olarak tork ve ortalama tork değeri



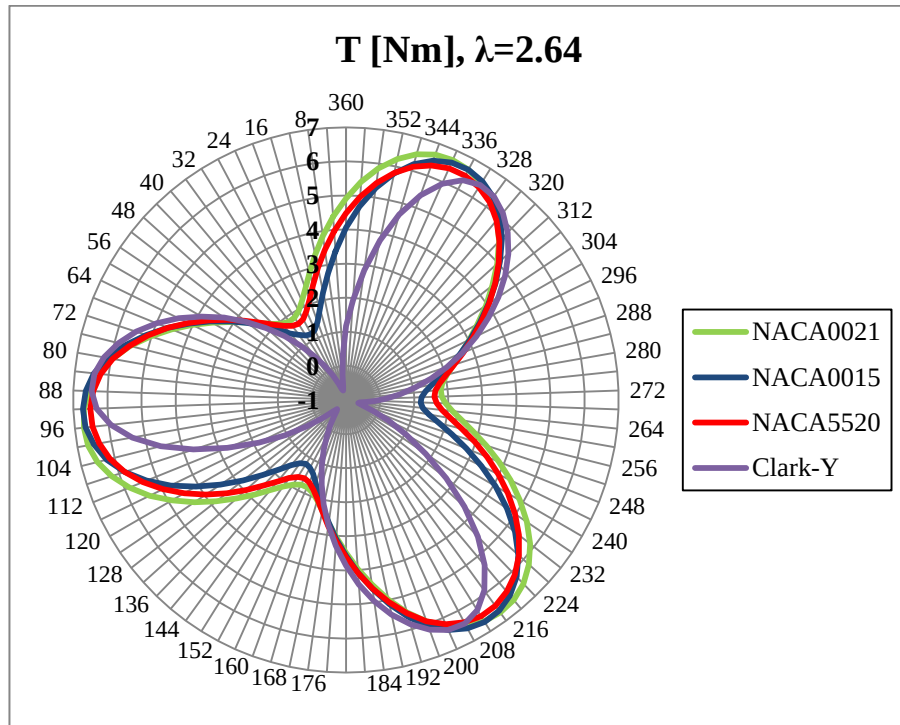
- c) $\lambda=2.33$ de NACA5520 in rotor açısı durumuna bağlı olarak tork ve ortalama tork değeri



- d) $\lambda=3.30$ de Clark-Y nin rotor açısı durumuna bağlı olarak tork ve ortalama tork değeri

Şekil 3.15. Her bir profilin maksimum tork değerini verdiği λ sayısındaki tork ve ortalama tork değeri

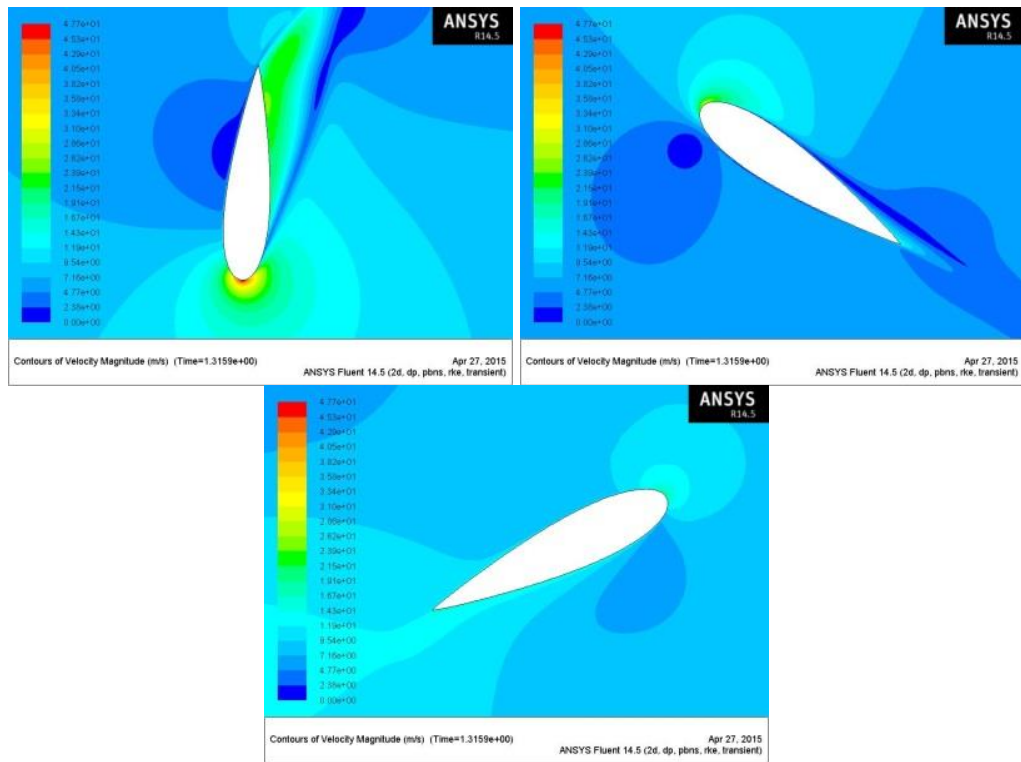
Herhangi bir λ değeri olarak 2.64 değerine bakıldığında Şekil 3.16. da profillerin, en yüksek torku 86° - 98° aralığında ve 120° 'lik periyotlarda sağladığı görülebilmekte. Buradan kanat profillerinin farklı rotor açılarda farklı karakteristik özellik gösterebileceği de çıkıyor.



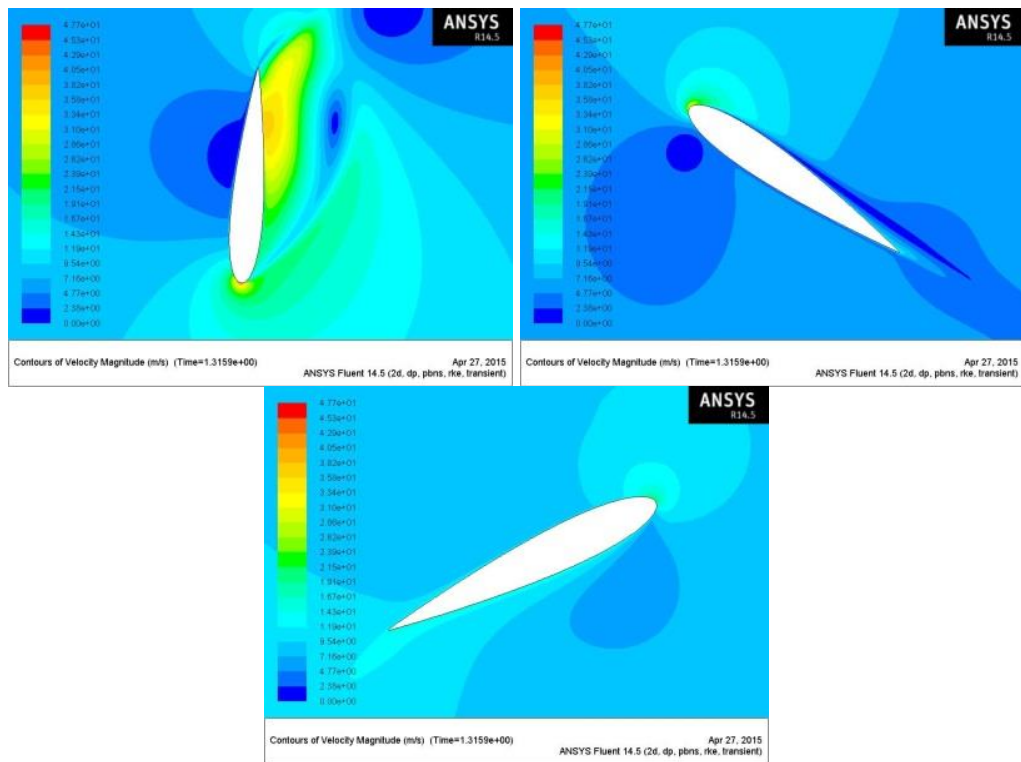
Şekil 3.16. $\lambda=2.64$ değerinde NACA0021, NACA0015, NACA5520 ve Clark-Y için tork değerinin açısal grafikte gösterimi

Bilindiği üzere kanat profillerinin rüzgar tünelineki deneylerinde duman akış izleme sayesinde kanatların C_L ve C_D katsayıları hakkında kıyaslama ve ön sezi yapılabilir. Ayrılma noktaları kanattaki düşük basınç bölgesi hakkında bilgi verdiği üzere basınç farkındaki büyüklük, hücum açısına göre oluşacak sürüklenme ve sürtünme kuvvetine tesir edecektir.

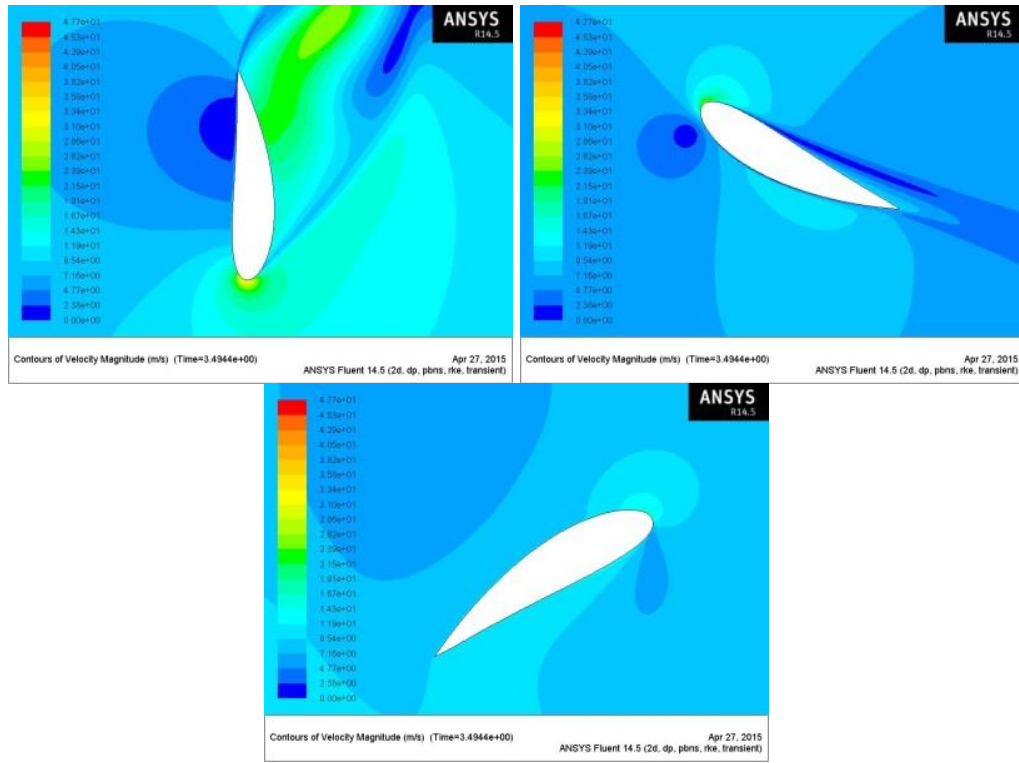
$\lambda=3.30$ değerinde 92° , 212° ve 332° rotor açılarında toplam hız resimleri verilmiştir. Şekil 3.17-18-19-20 de $\lambda=1.68$ de; Şekil 3.21-22-23-24 de $\lambda=2.64$ de; Şekil 3.25-26-27-28 da $\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin hız, toplam basınç, türbülans ve hız vektörleri kontürleri resmedilmiştir. Bu kontürlerde görüldüğü gibi, düşük Reynolds sayılarında yani düşük TSR sayılarında ($TSR=1.68$), özellikle 92° rotor açısında NACA0015 ve Clark-Y kanat profillerinin akış çıkış bölgesinde anlık yüksek basınç ve düşük basınç noktaları (dynamic stall) meydana gelmektedir (Şekil 3.18). Bu bölgelerde beklendiği gibi rüzgar hızı anlık olarak çok yüksek değerlere çıkmakta (Şekil 3.17); bu da elde edilen moment değerini olumsuz olarak etkilemektedir.



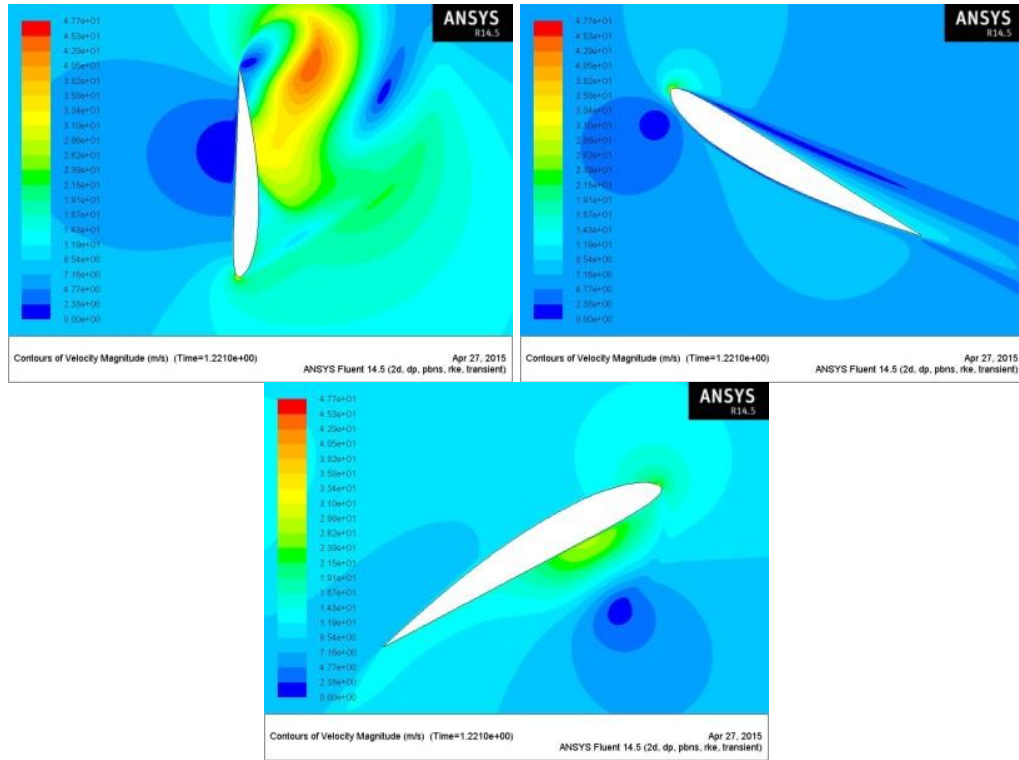
a) NACA0021



b) NACA0015

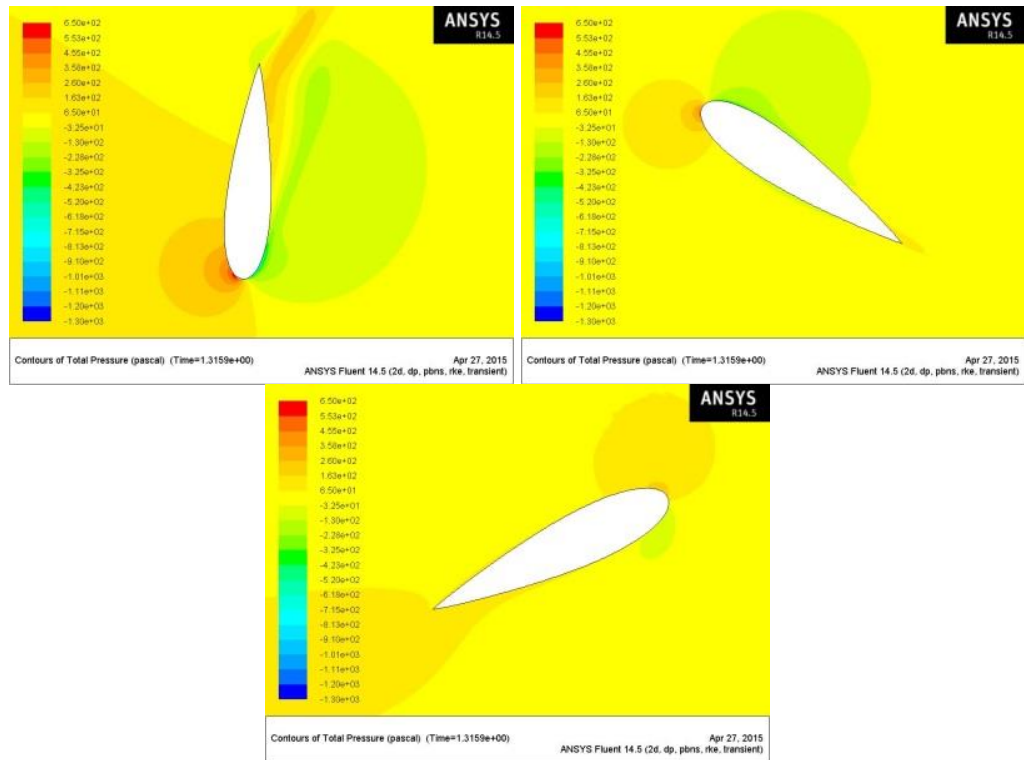


c) NACA5520

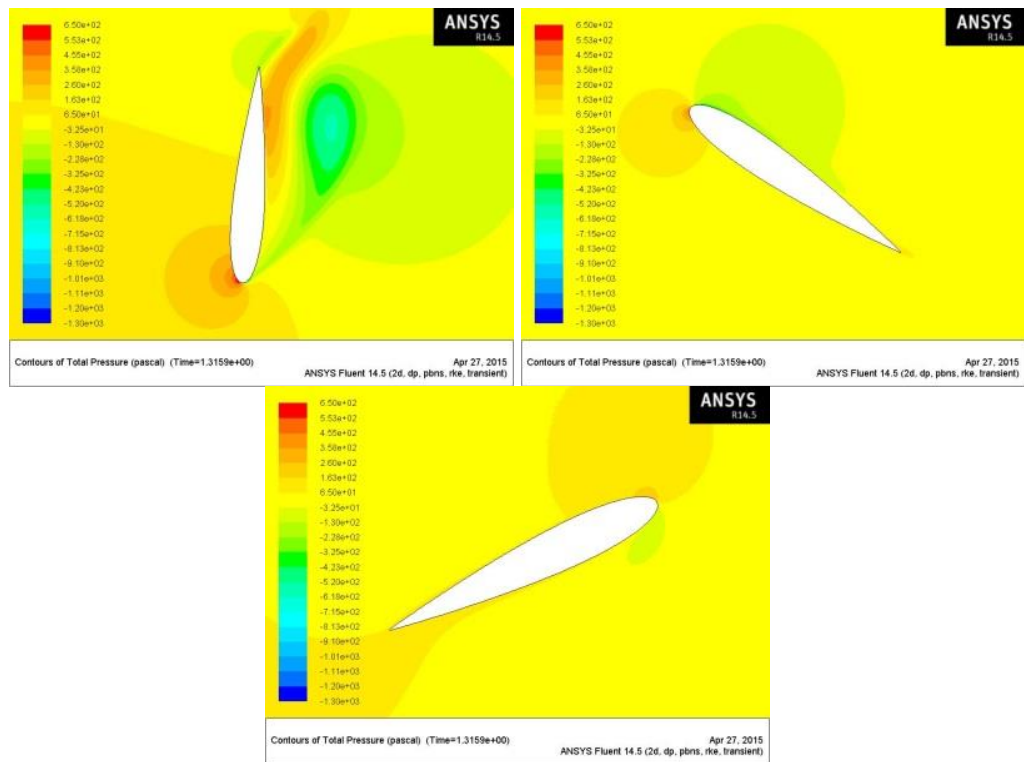


d) Clark-y

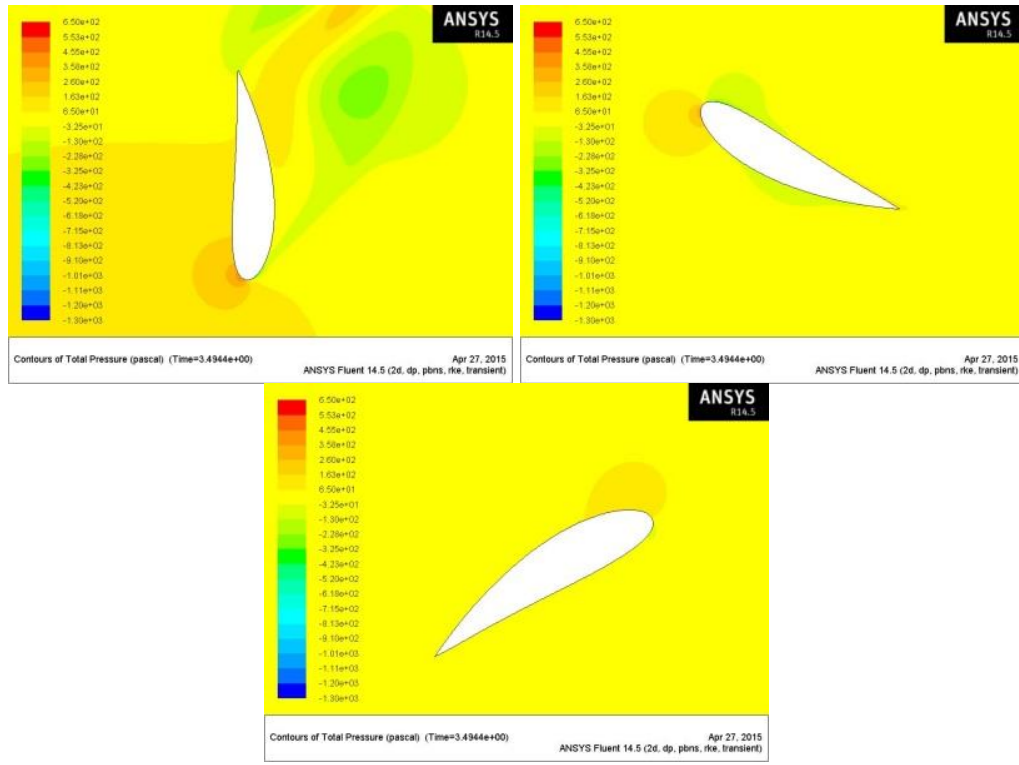
Şekil 3.17. $\lambda=1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız kontürleri



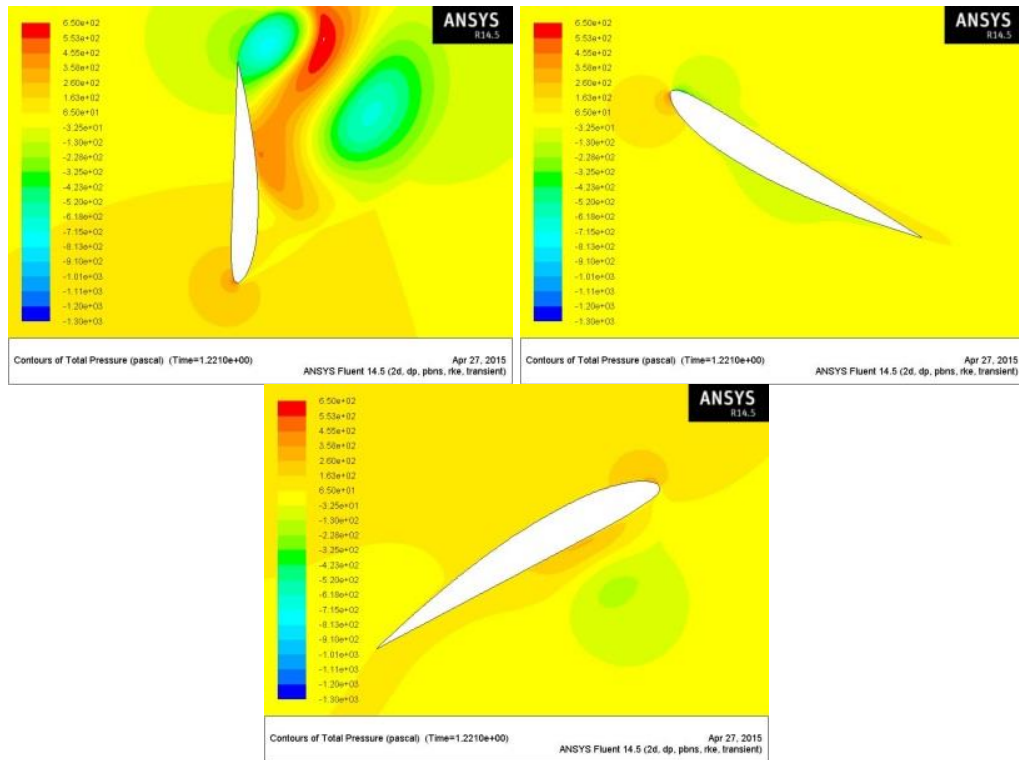
a) NACA0021



b) NACA0015

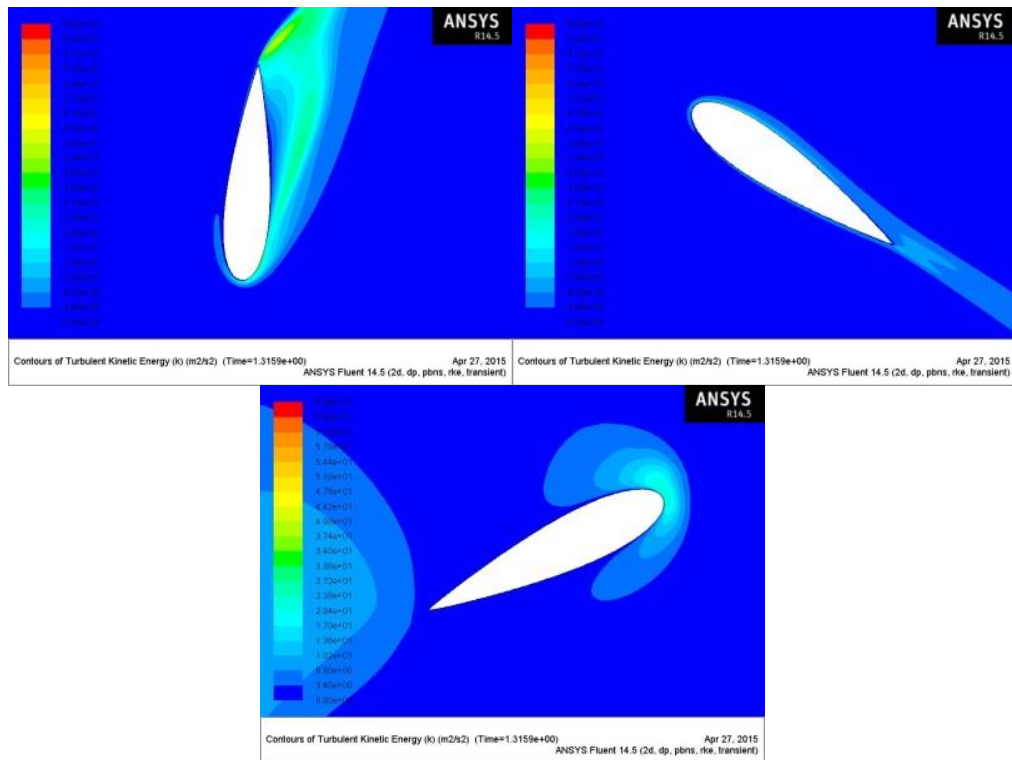


c) NACA5520

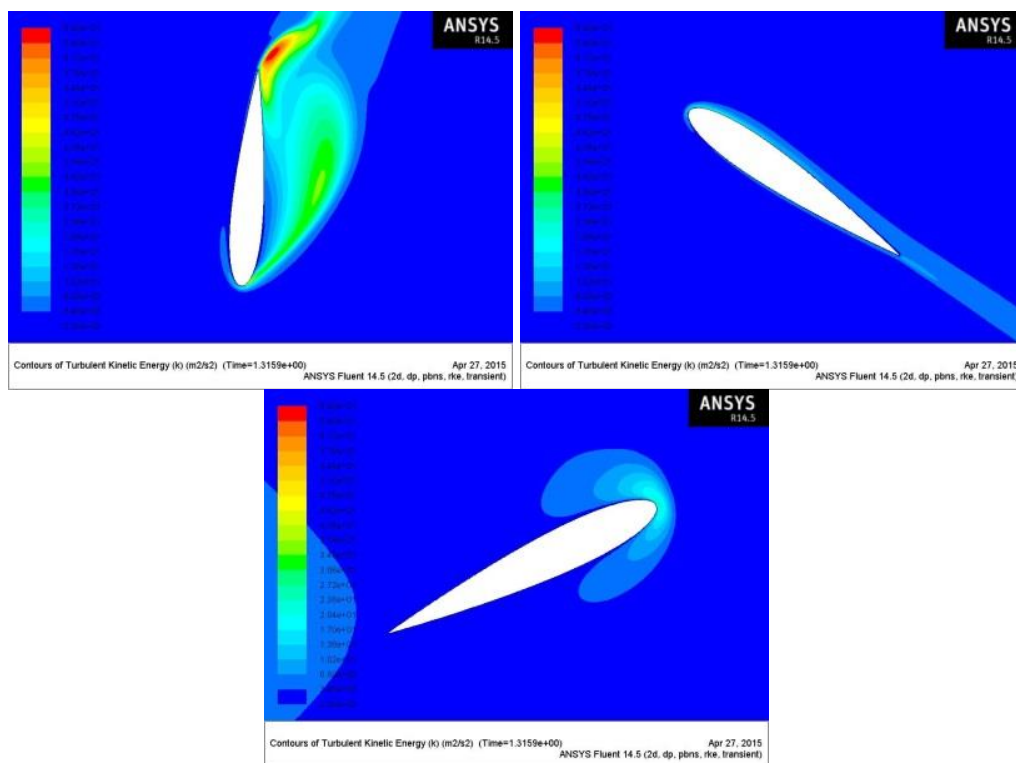


d) Clark-y

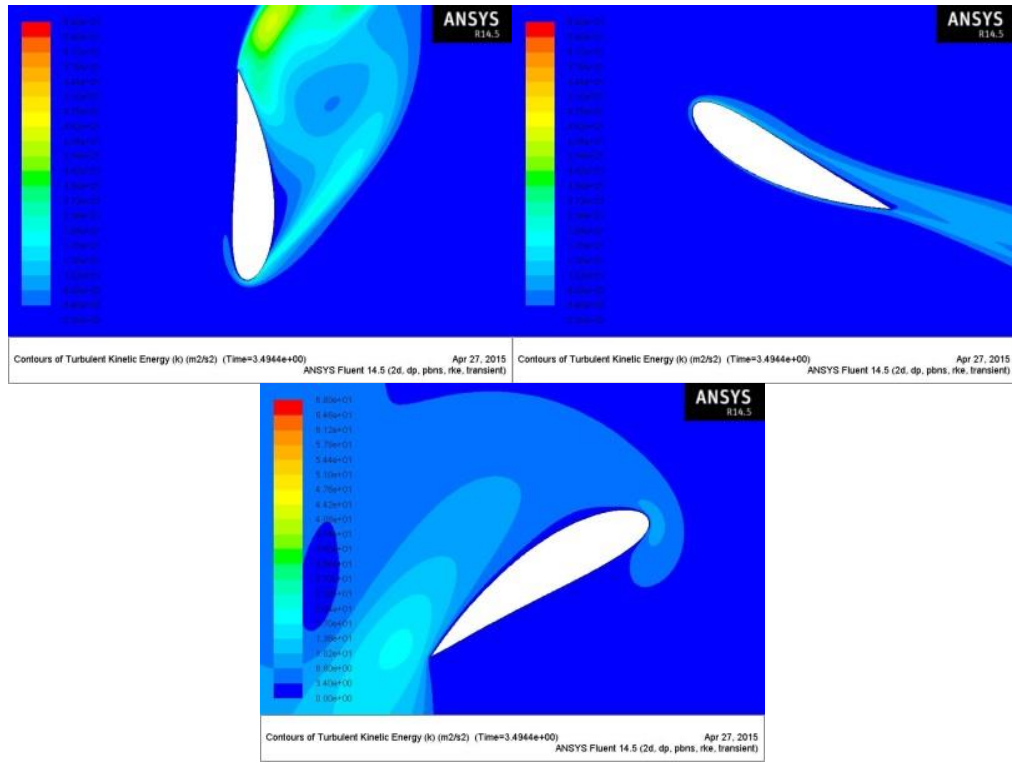
Şekil 3.18. $\lambda = 1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün toplam basınç kontürleri



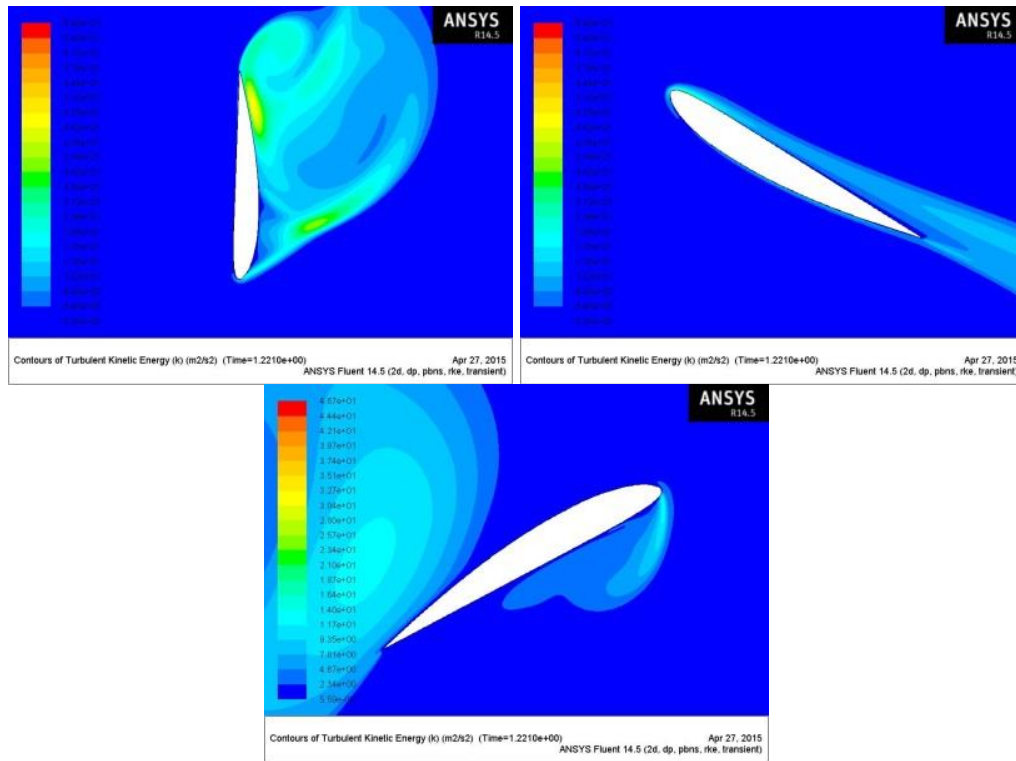
a) NACA0021



b) NACA0015

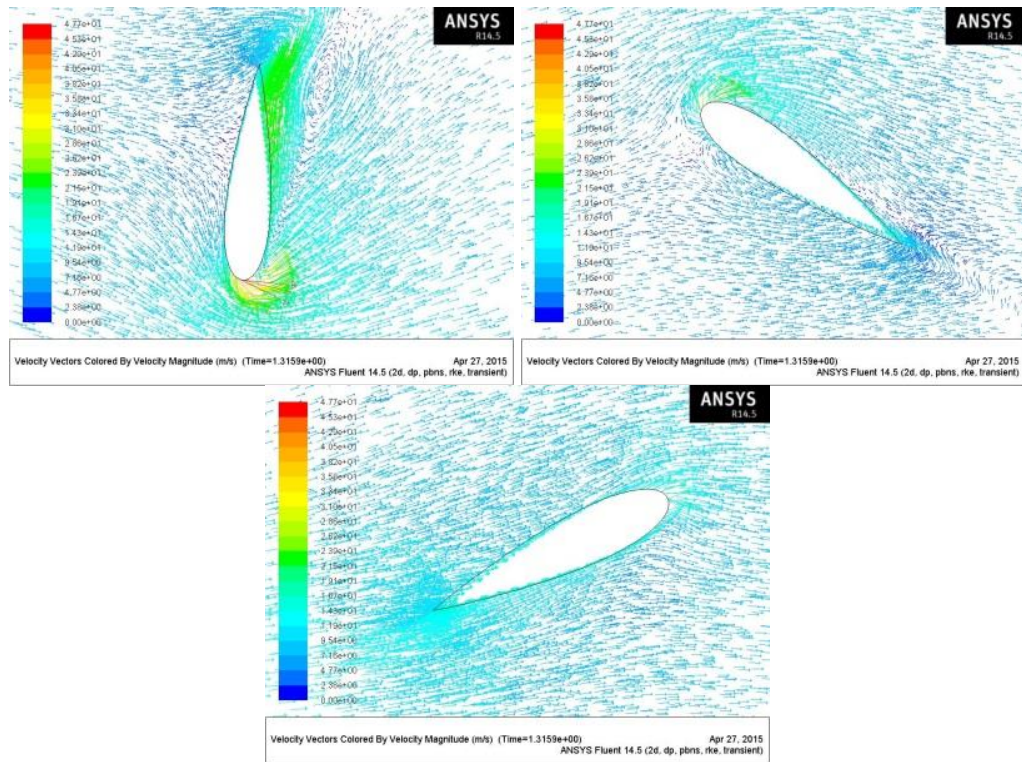


c) NACA5520

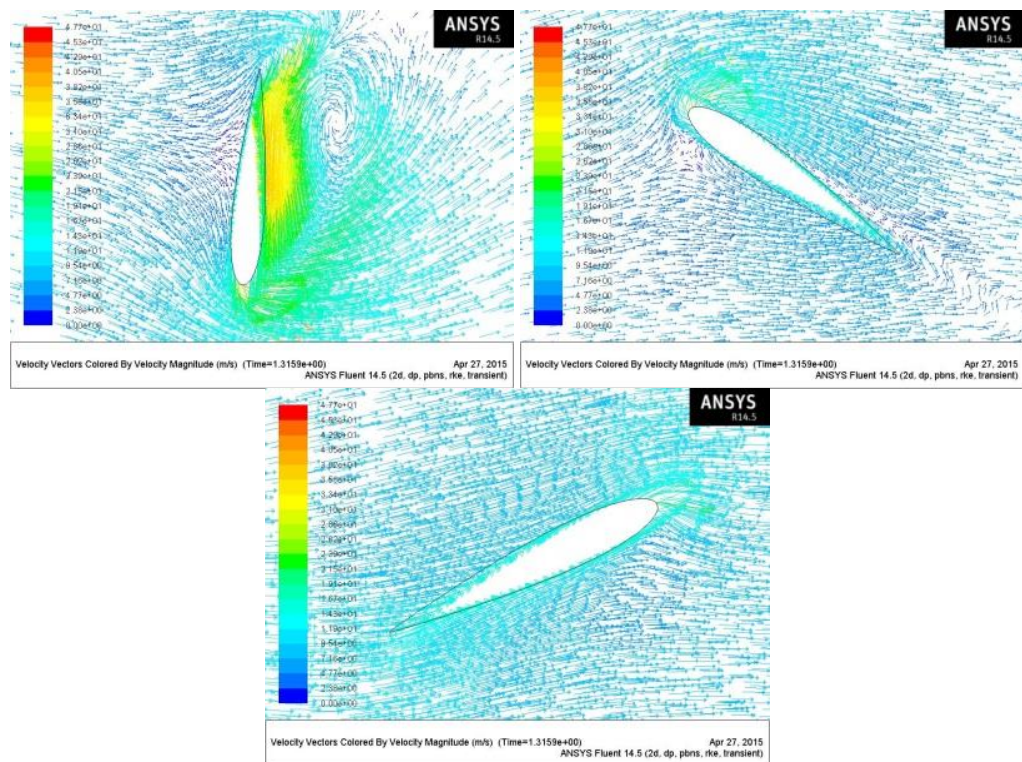


d) Clark-Y

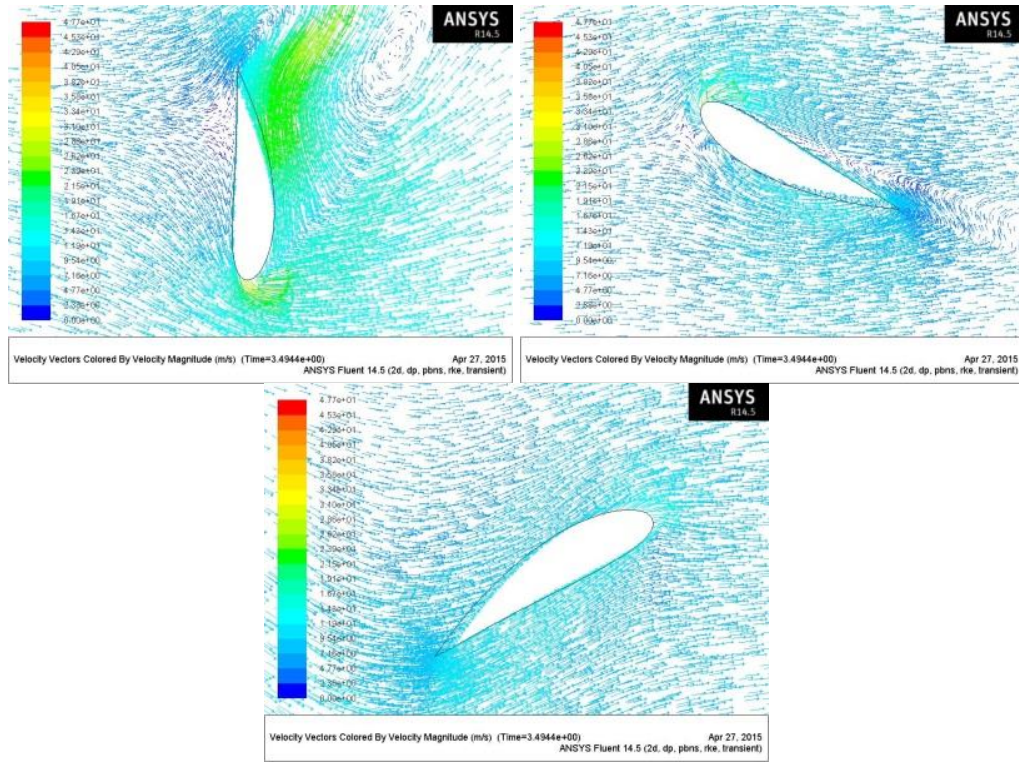
Şekil 3.19. $\lambda = 1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün türbülans kinetik enerji kontürleri



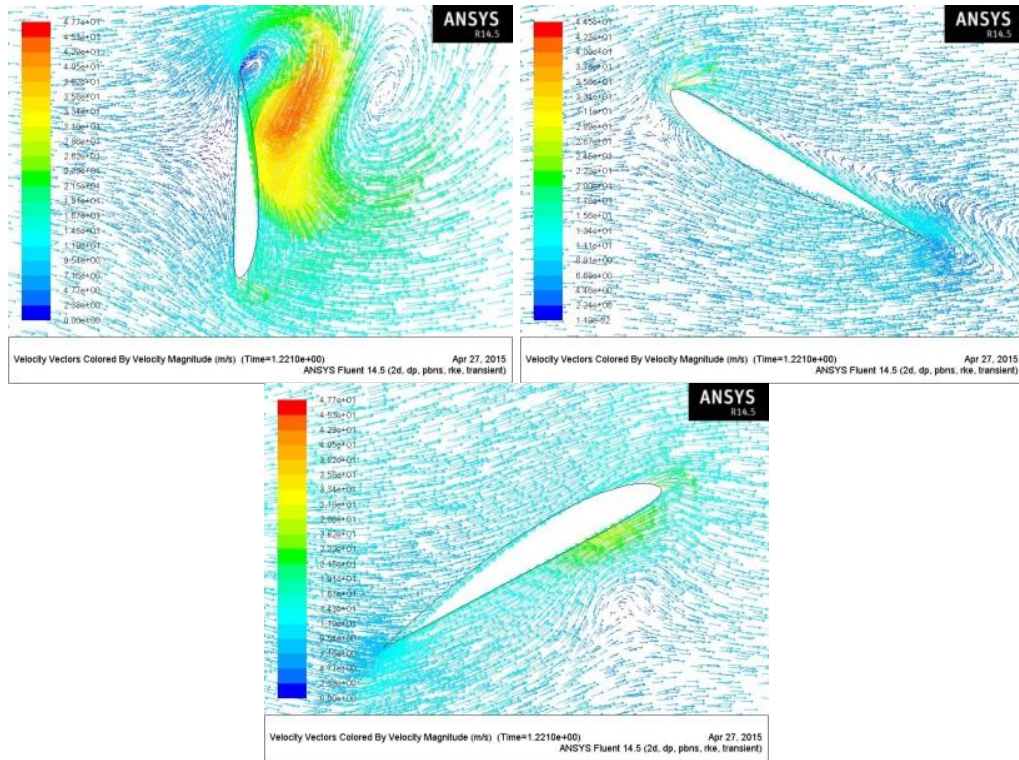
a) NACA0021



b) NACA0015



c) NACA5520



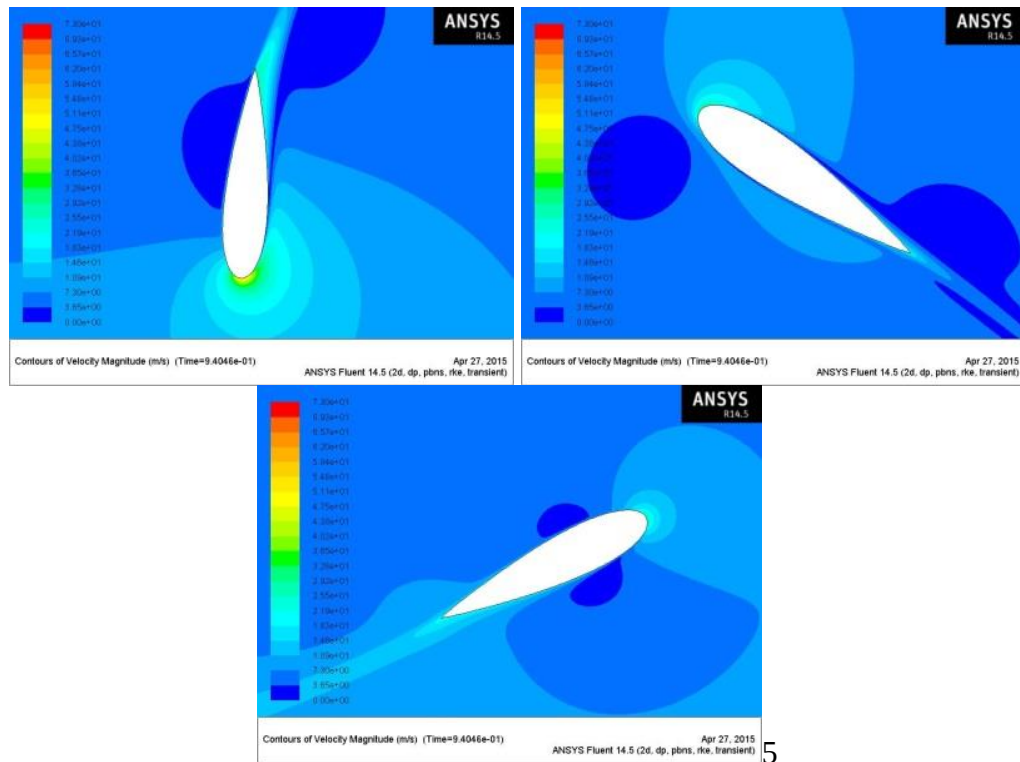
d) Clark-Y

Şekil 3.20. $\lambda = 1.68$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız vektörü kontürleri

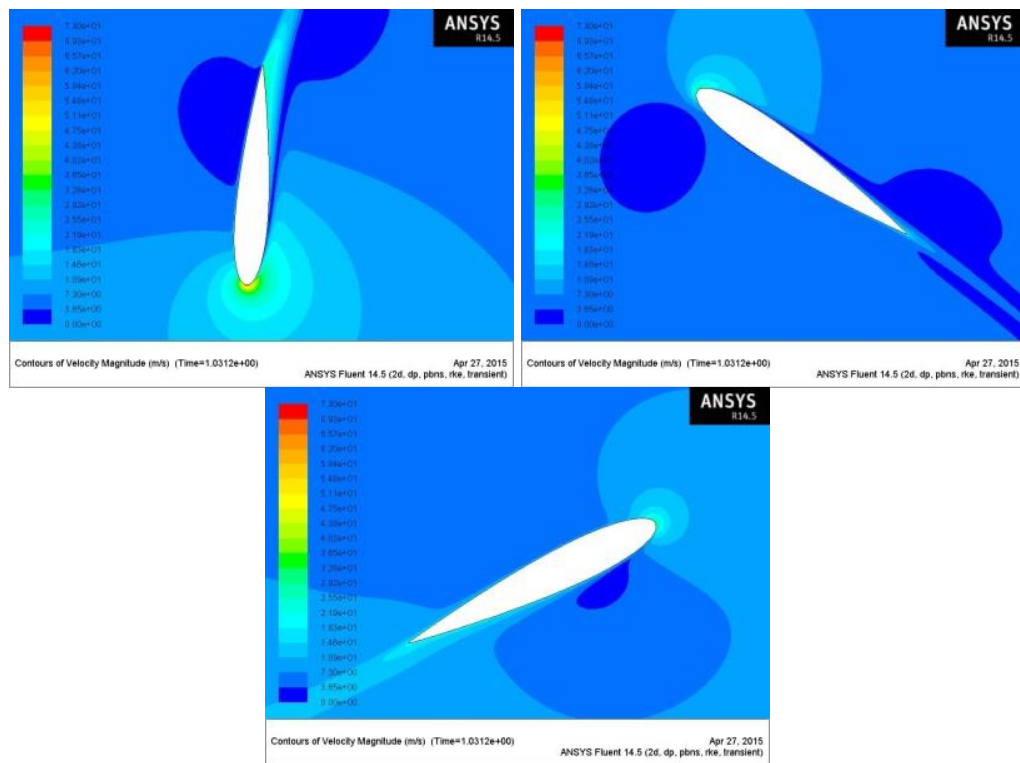
Ayrıca bu ani durma noktaları türbin üzerinde dengesizliğe yol açacağı için kesinlikle istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple de rüzgar türbinlerinin optimum çalışma koşulları daha yüksek TSR sayılarıdır. Ayrıca yine düşük TSR sayılarında yüksek TSR sayılarına göre türbülans kinetik enerji değerleri kanat profiline arka (çıkış) kenar bölgelerinde oluşmaktadır (Şekil 3.19). Türbülansın daha az olduğu şartlarda elde edilen momentten dolayı güç katsayısında daha olumlu eğriler elde edilmiştir.

Şekil 3.20 de görüldüğü gibi hız vektörleri kanat etrafında bu türbülansın dolayısıyla bir çalkantı oluşturmakta bu da daha önce belirtilen durumlara sebep olarak kanattan elde edilen moment değerini olumsuz etkilemektedir. Şekil 3.21, 22, 23 ve 24 TSR=2.64 değerinde sırasıyla hız, toplam basınç, türbülans kinetik enerji ve hız vektörü kontürlerini vermektedir. Yaklaşık olarak özellikle NACA0021, NACA0015 ve NACA5520 kanat profillerinin güç katsayıları bu TSR sayısında en yüksek değerlere çıkmaktadır. Beklendiği üzere türbinden elde edilen toplam güç kat sayısı değerlerini olumsuz yönde etkileyen parametreler bu TSR sayısında çok daha az tesir etmektedir. Yaklaşık 90° rotor konumundaki kanatlarda en fazla tork elde edildiği daha önce bahsedilmiştir. Ayrıca Dynamic Stall kavramı bu rotor konumunda kanatları daha da fazla etkilemektedir. Bu açıdan bu pozisyonundaki kanat profillerinin verimi türbinin toplam verimini önemli ölçüde etkileyen ilk parametredir. Hatta türbin kanatlarını diğer rotor konumlarında negatif etki etmemesi için türbinin bu açısına bir perde görevi yapacak eleman yerleştirilerek neredeyse sadece 90° pozisyonundan tork elde edilen tasarımlar da vardır. Kısacası bu konumdaki kanatların hemen etrafındaki akışın laminar oluşu bu TSR sayısında türbini daha düzenli, gürültüsüz, dengeli ve verimli çalışmasını sağlayacaktır.

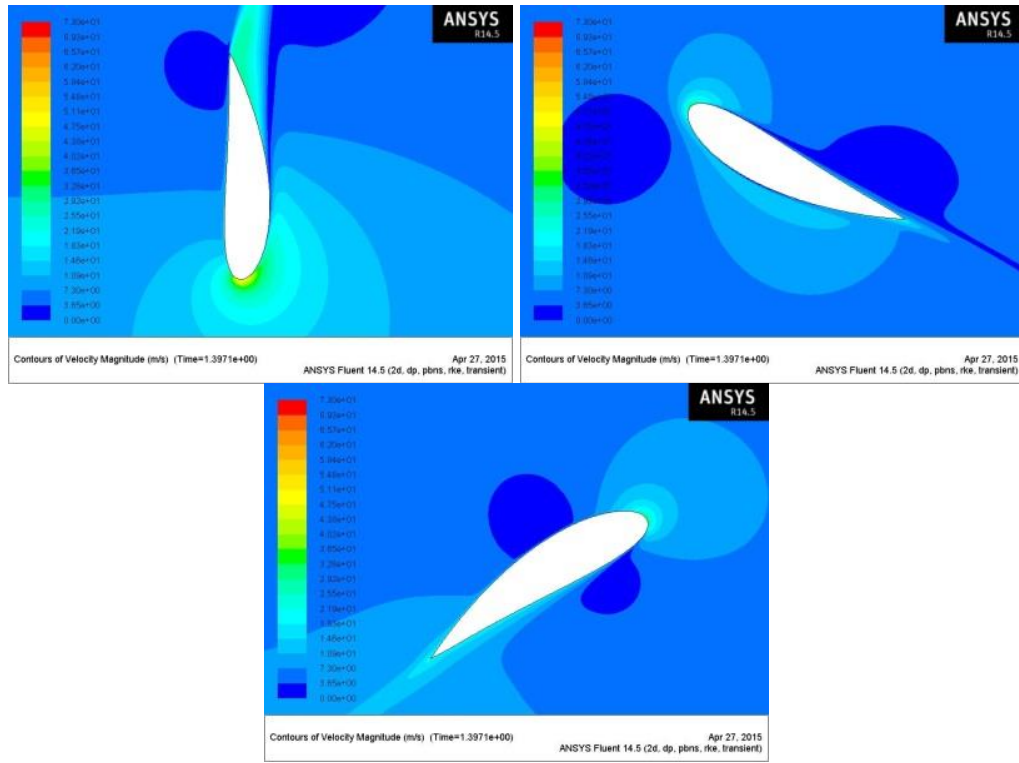
Şekil 3.25, 26, 27 ve 28 ise TSR=3.30 değerinde sırasıyla aynı kontürleri göstermektedir. 1.68 TSR değeri için belirtilen ifadeler, bu TSR sayılarında giderek (TSR sayısı arttıkça) azalmaktadır. Ancak bilindiği üzere çok fazla dönme hızı elde edilen moment değerini düşürmektedir. Bu nedenle moment elde edilmek istenen bu tür dönen makinalarda uygun çalışma aralığı belirlenmeli ve bu çalışma aralığında en uygun (optimum) tasarım seçilmelidir. Konu dikey eksenli rüzgar türbini olunca; elbette ilk hareketlenme problemi de göz önüne alınarak tasarım kriterleri içerisinde bu durum da eklenerek tasarım yapılmalıdır.



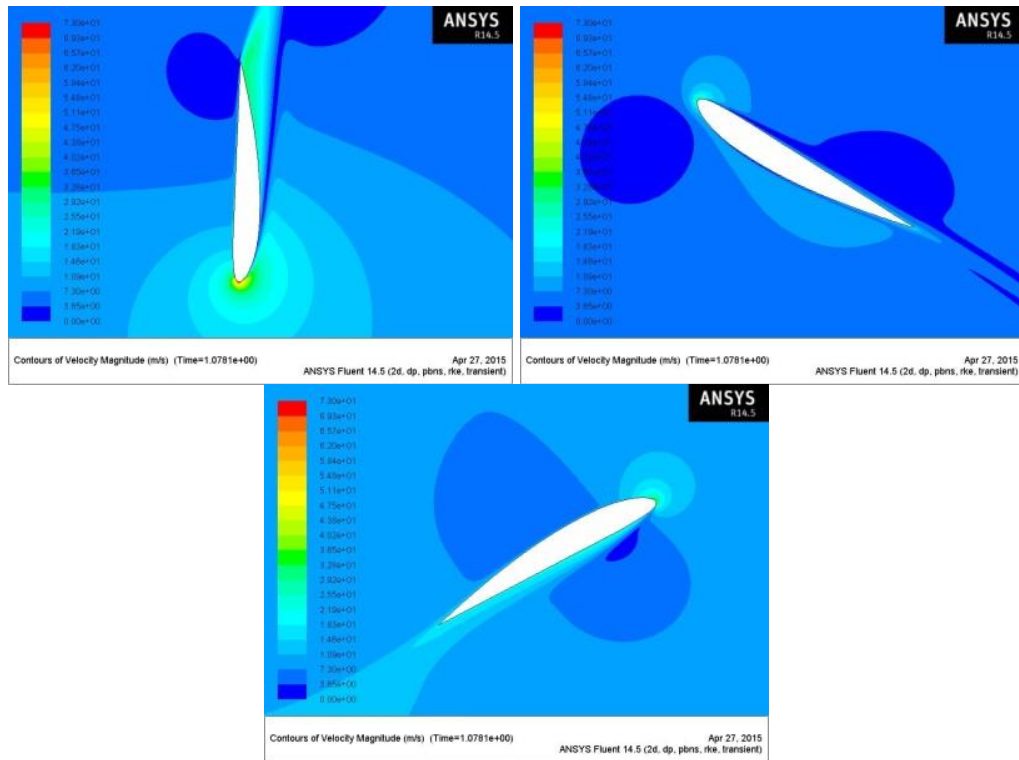
a) NACA0021



b) NACA0015

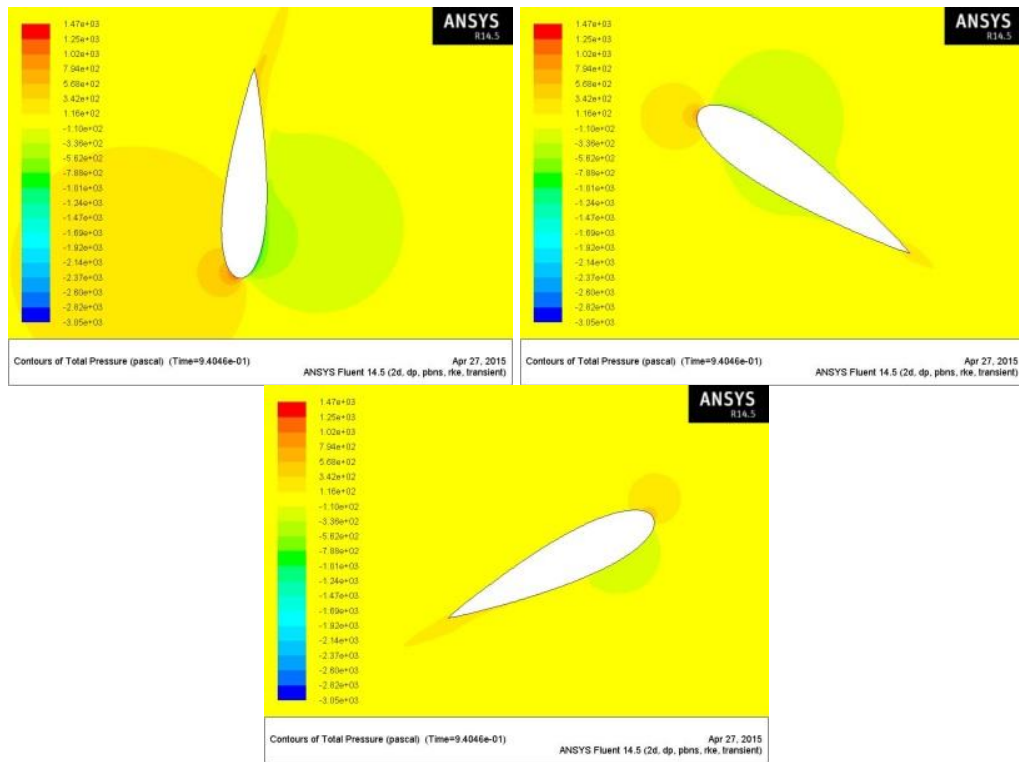


c) NACA5520

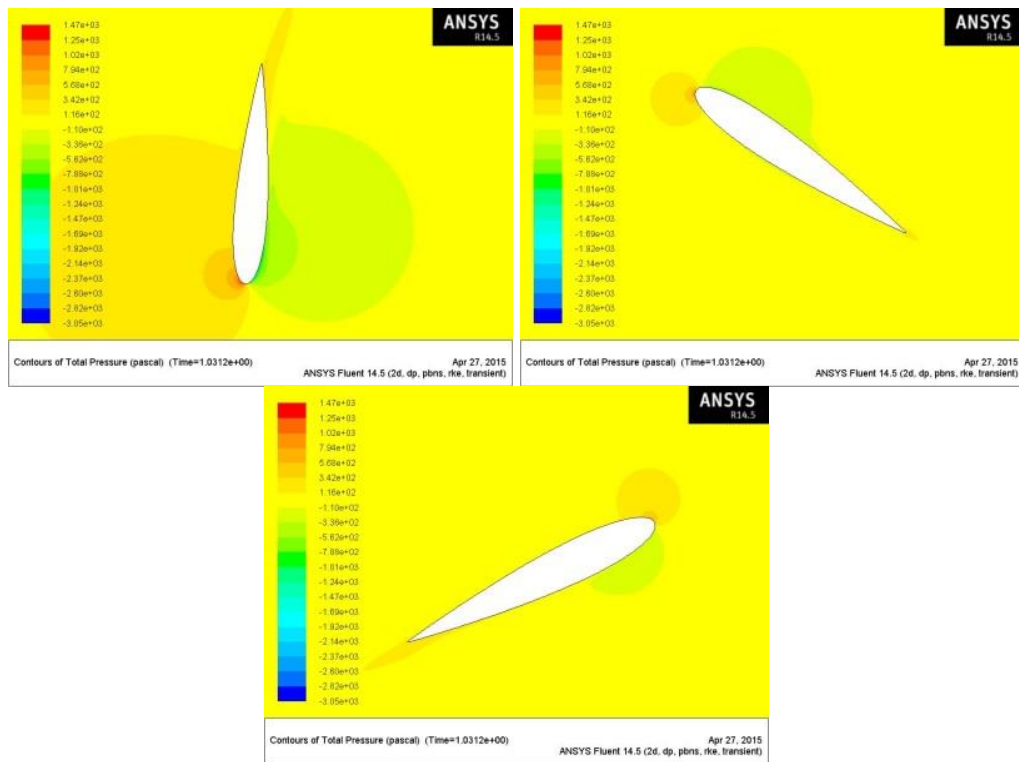


d) Clark-Y

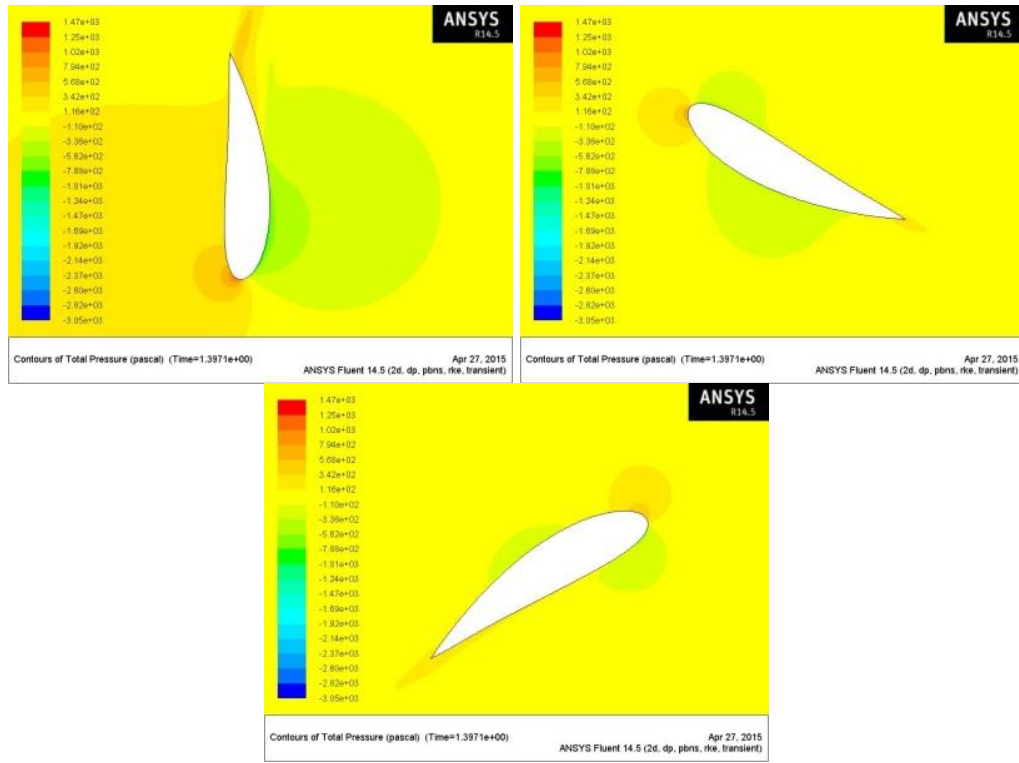
Şekil 3.21. $\lambda=2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız kontürleri



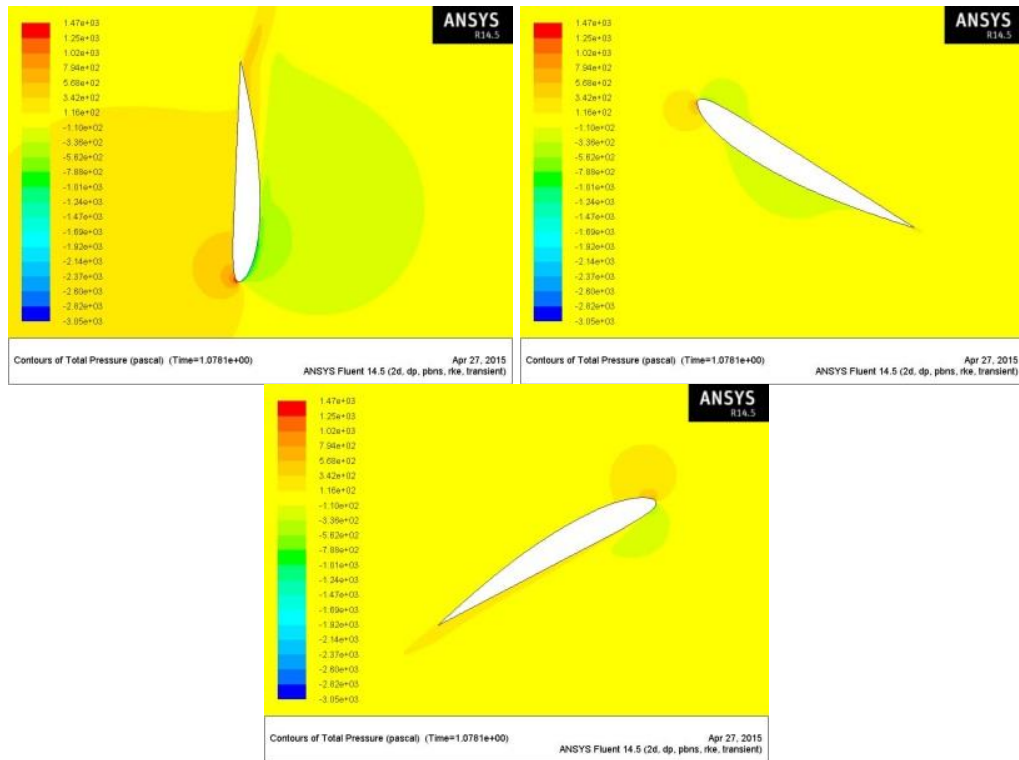
a) NACA0021



b) NACA0015

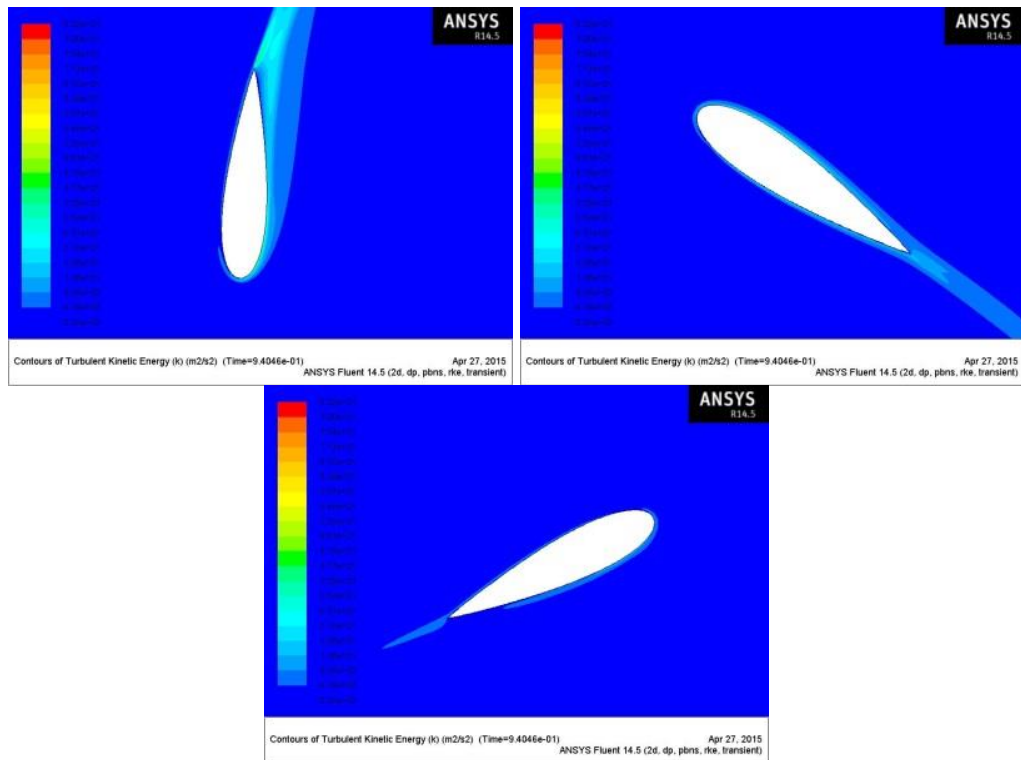


c) NACA5520

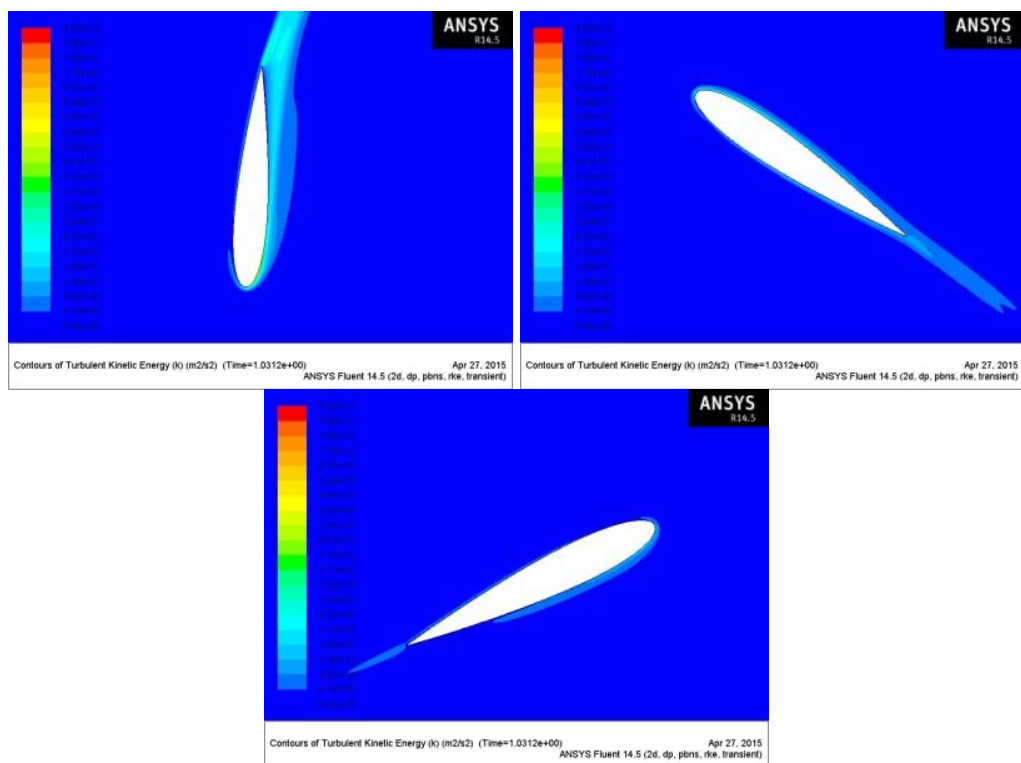


d) Clark-Y

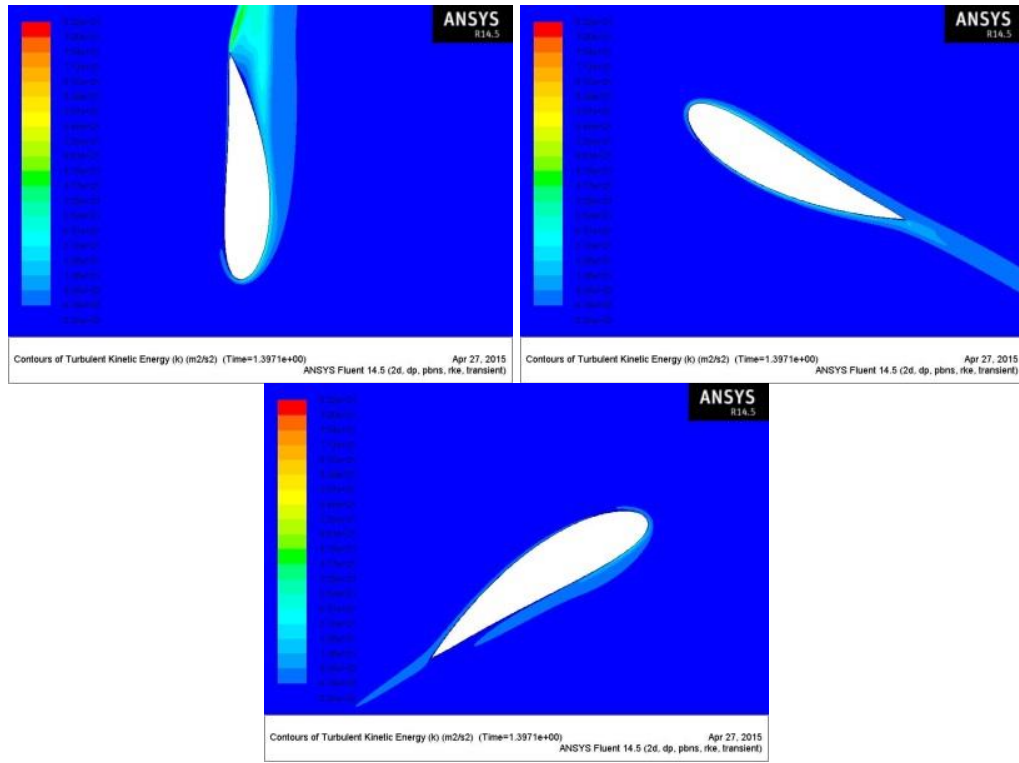
Şekil 3.22. $\lambda = 2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün toplam basınç kontürleri



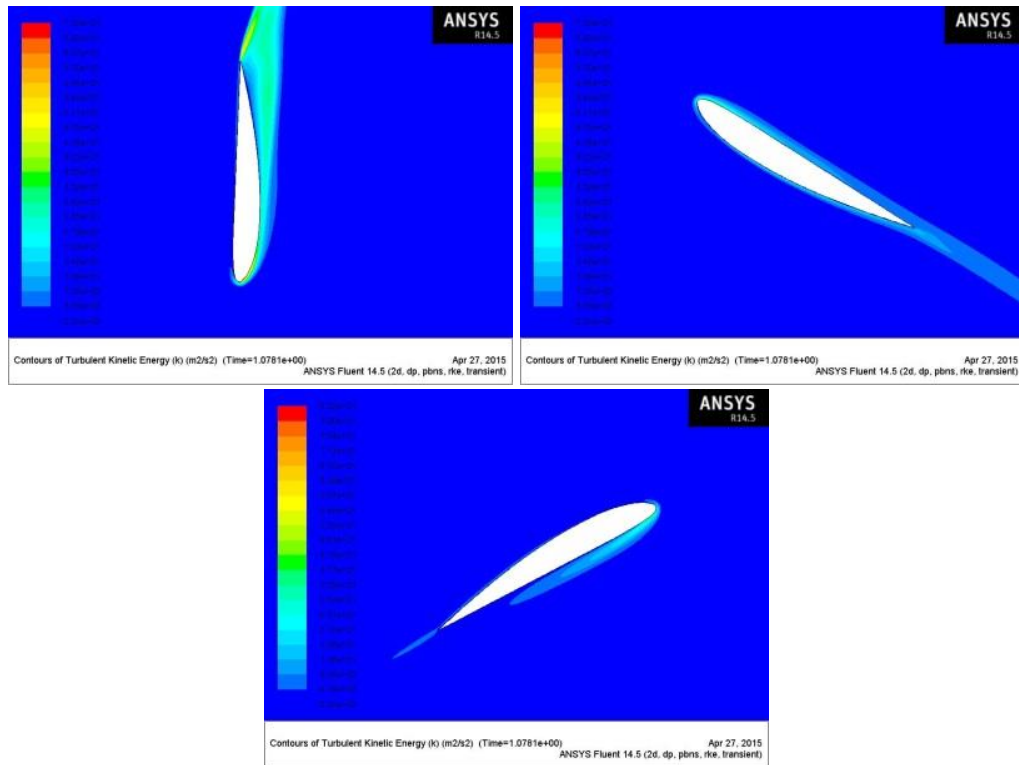
a) NACA0021



b) NACA0015

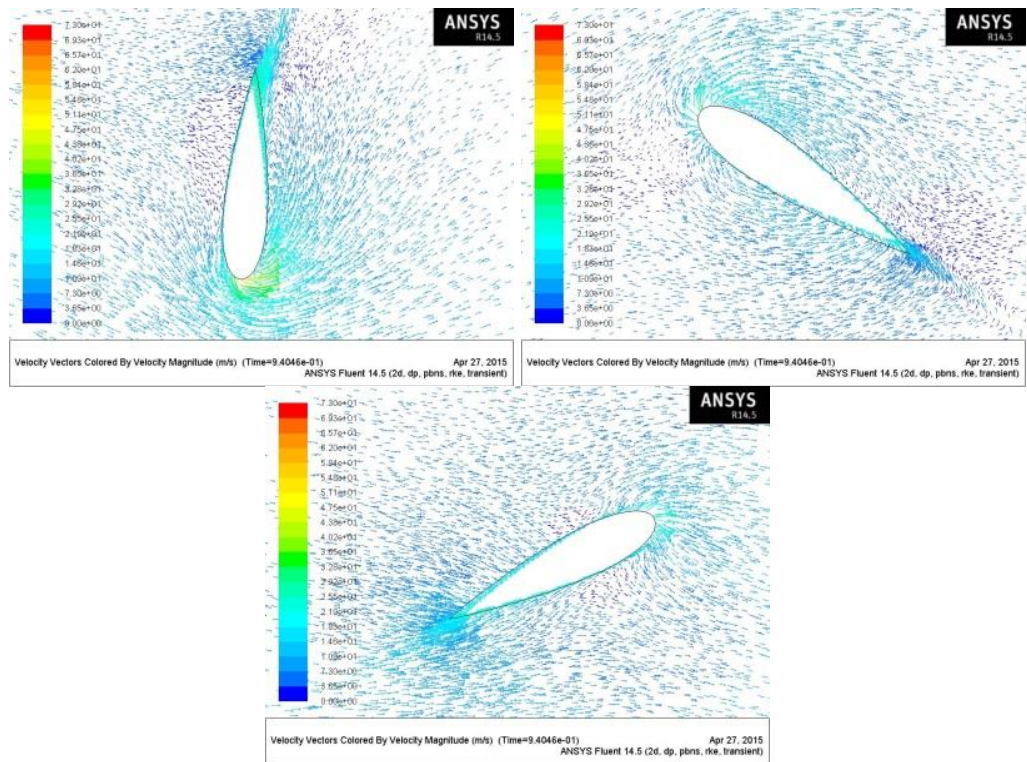


c) NACA5520

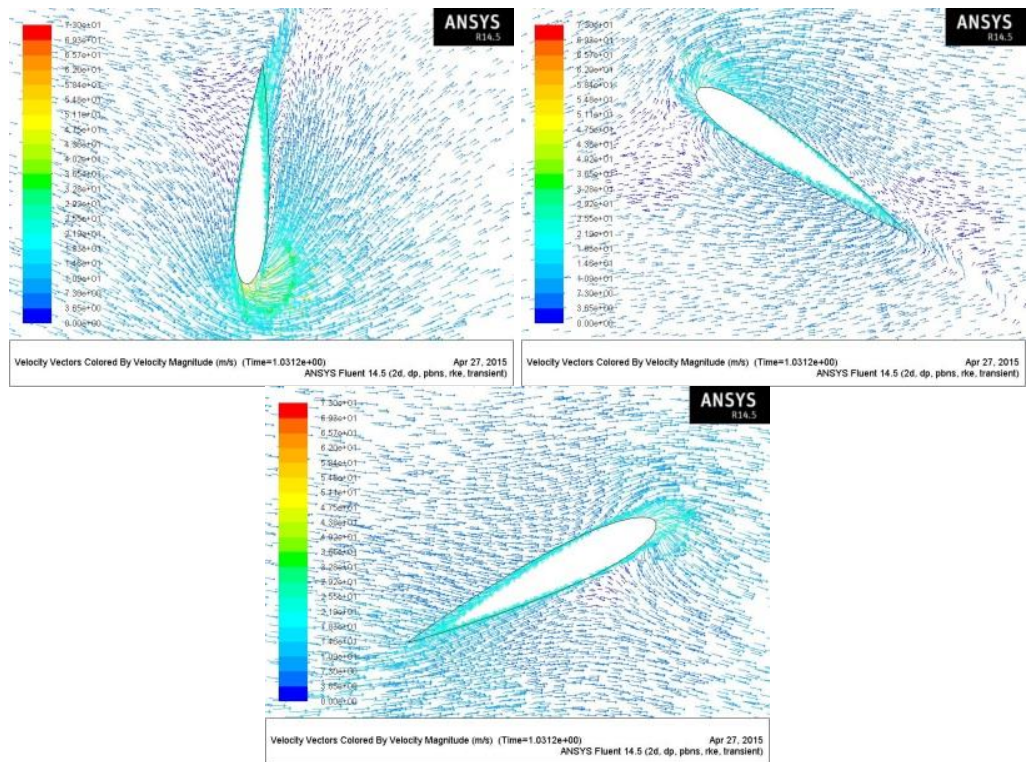


d) Clark-Y

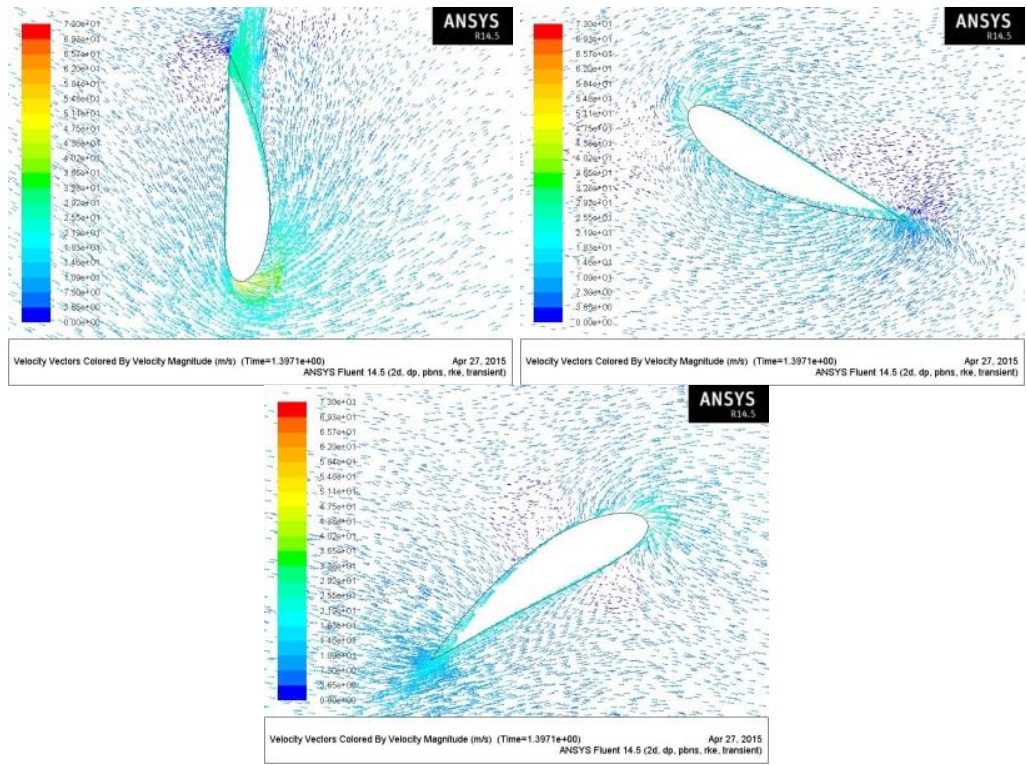
Şekil 3.23. $\lambda = 2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün türbülans kinetik enerji kontürleri



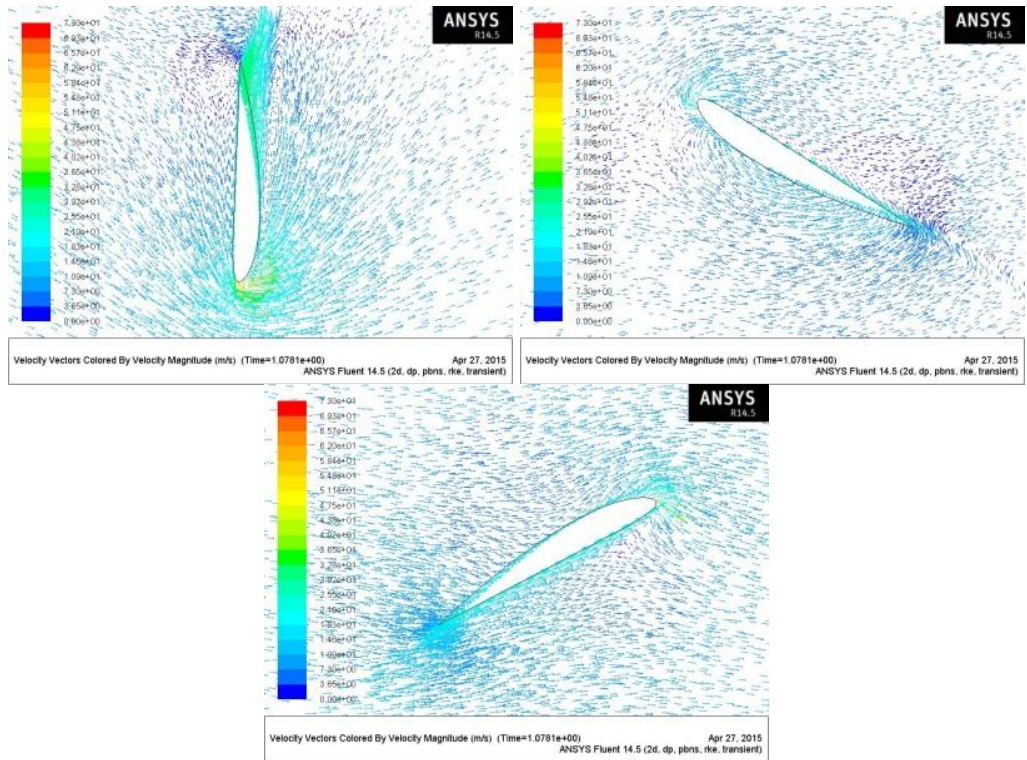
a) NACA0021



b) NACA0015

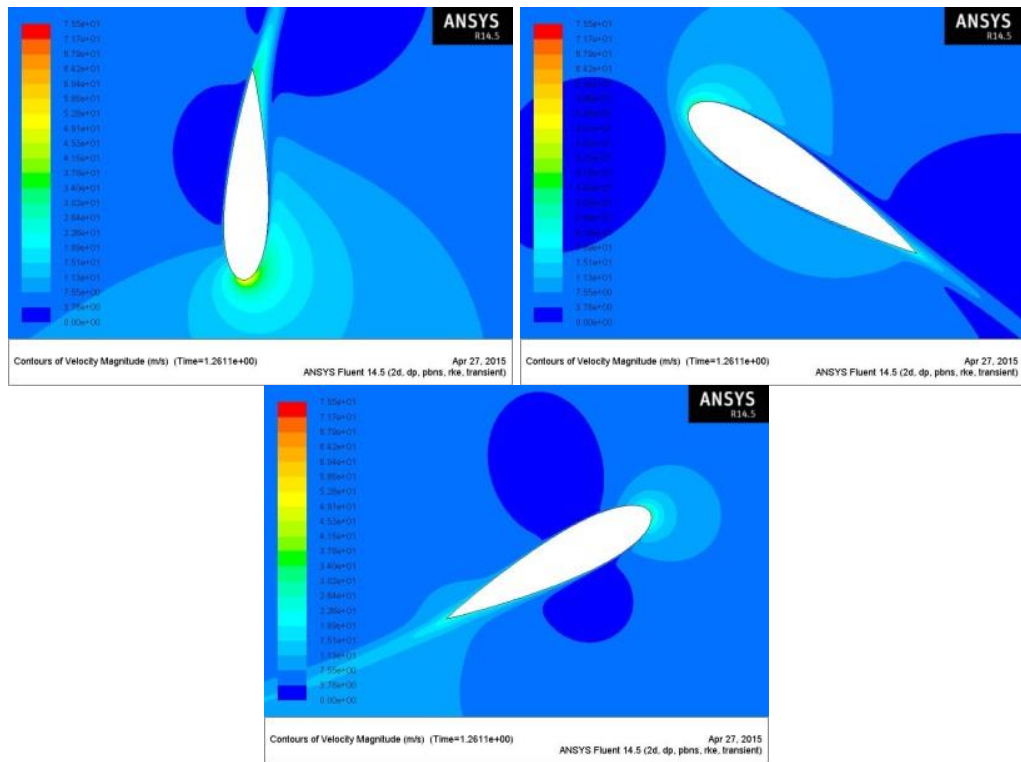


c) NACA5520

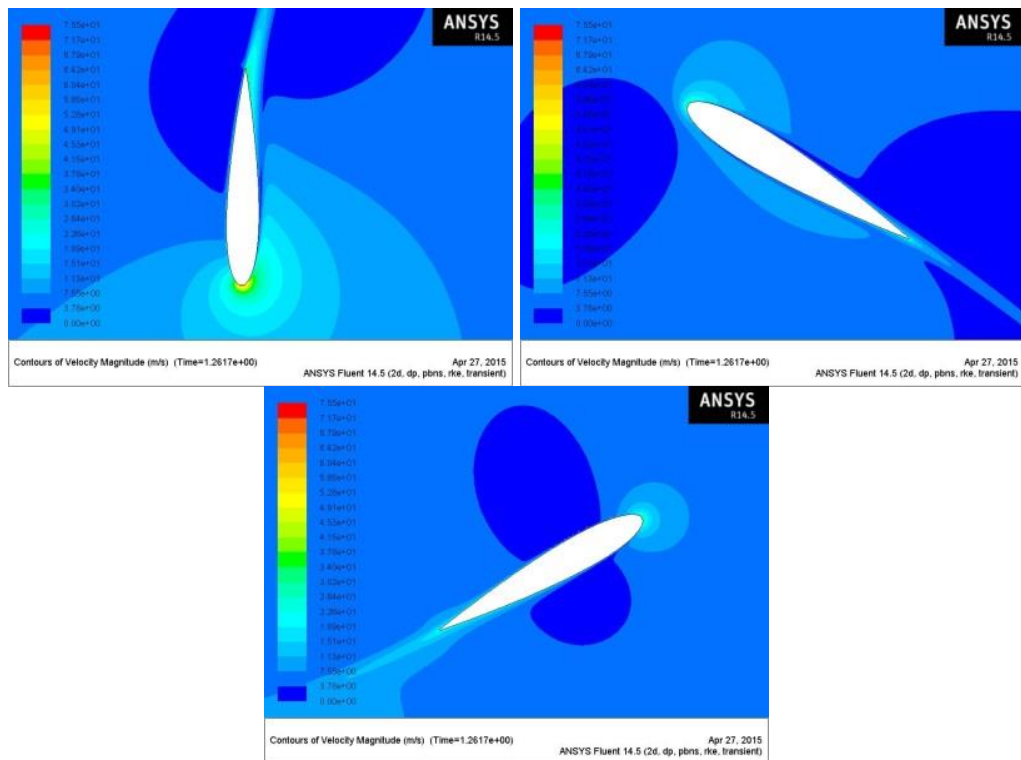


d) Clark-Y

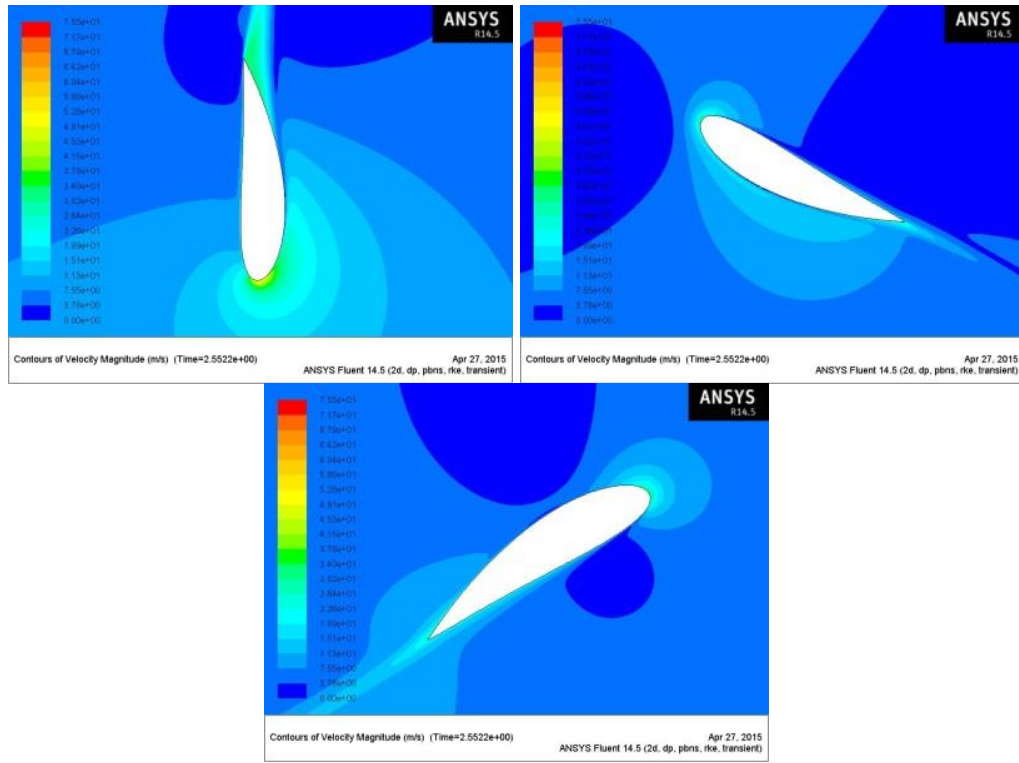
Şekil 3.24. $\lambda = 2.64$ de 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız vektörü kontürleri



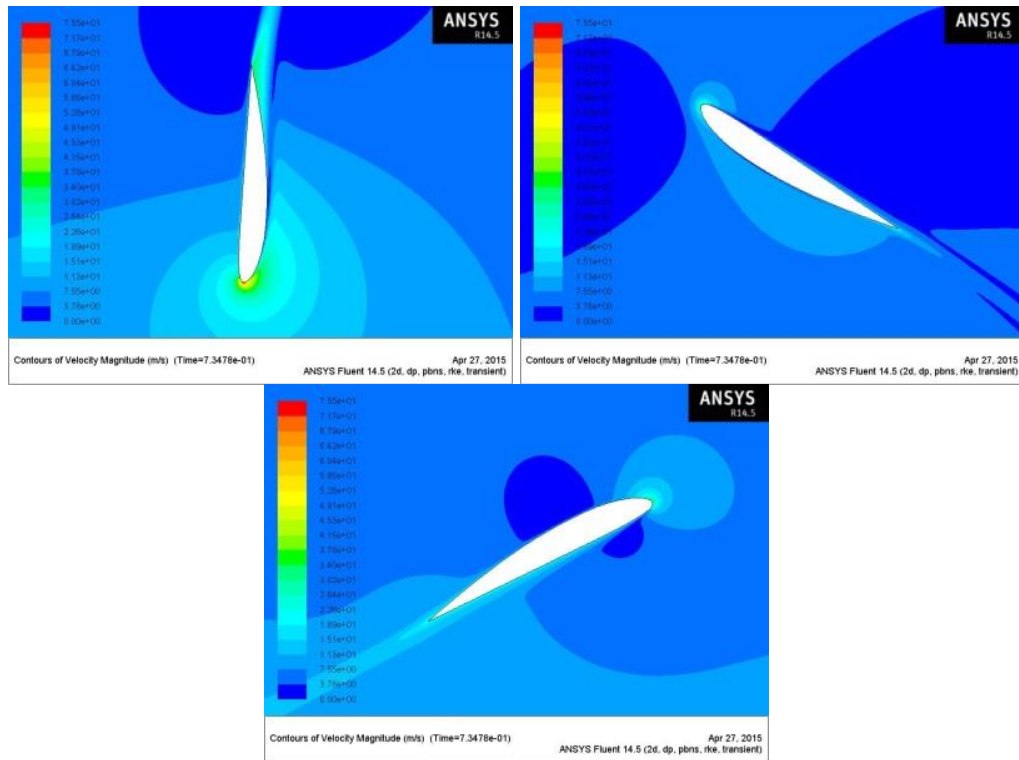
a) NACA0021



b) NACA0015

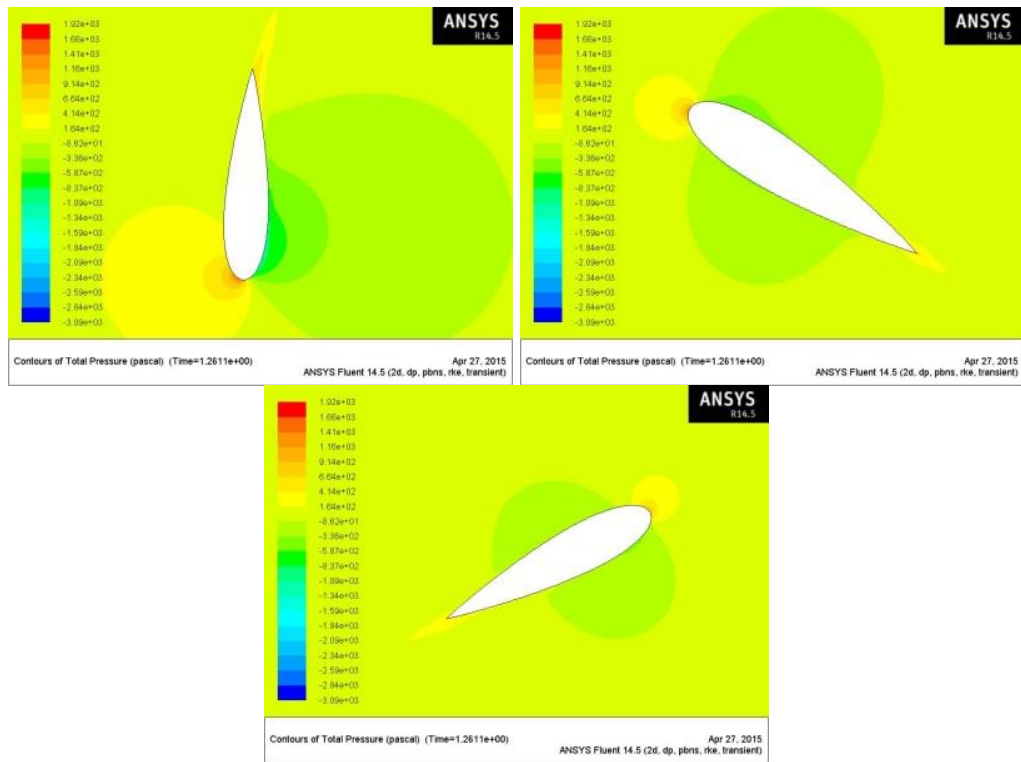


c) NACA5520

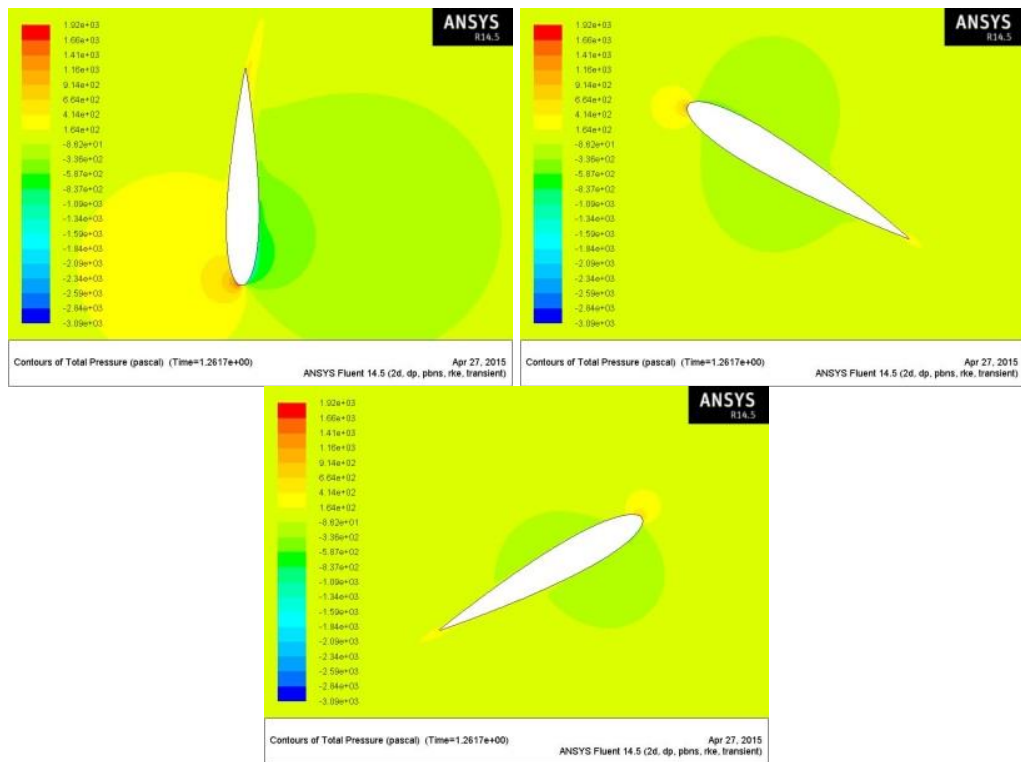


d) Clark-Y

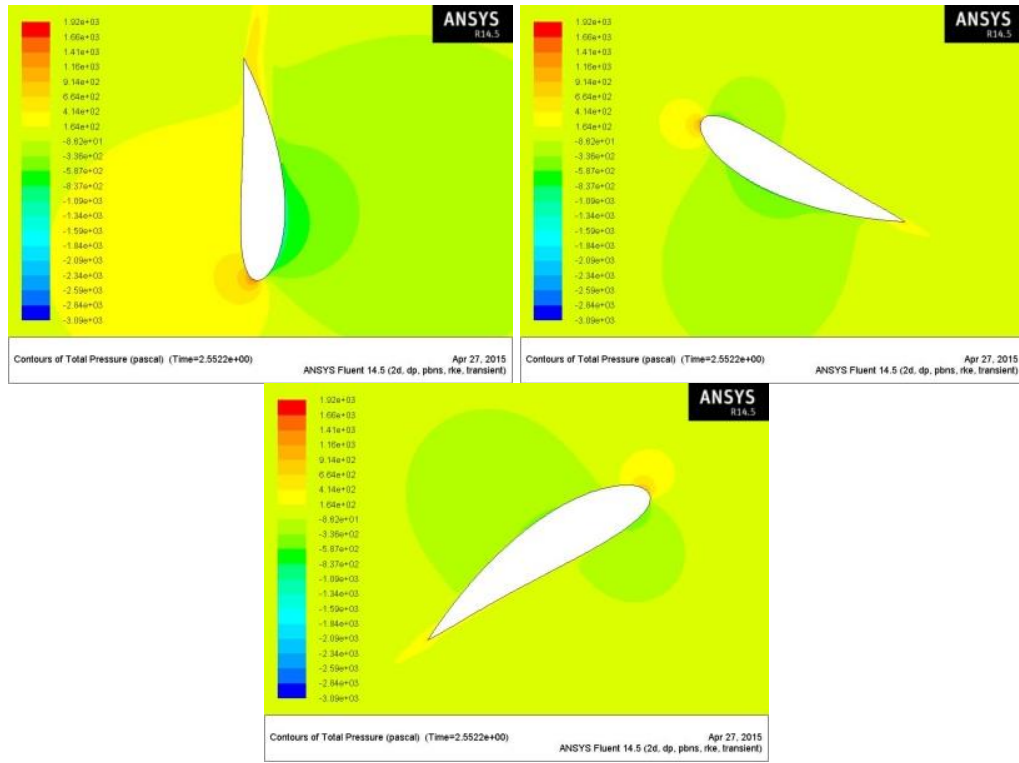
Şekil 3.25. $\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız kontürleri



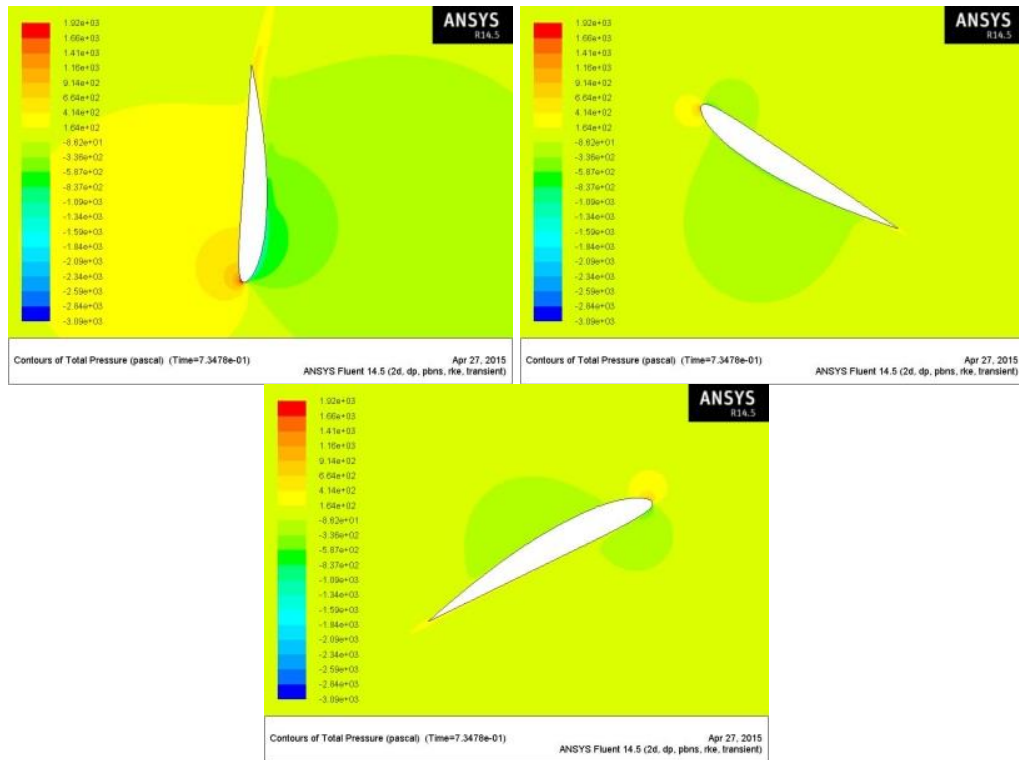
a) NACA0021



b) NACA0015

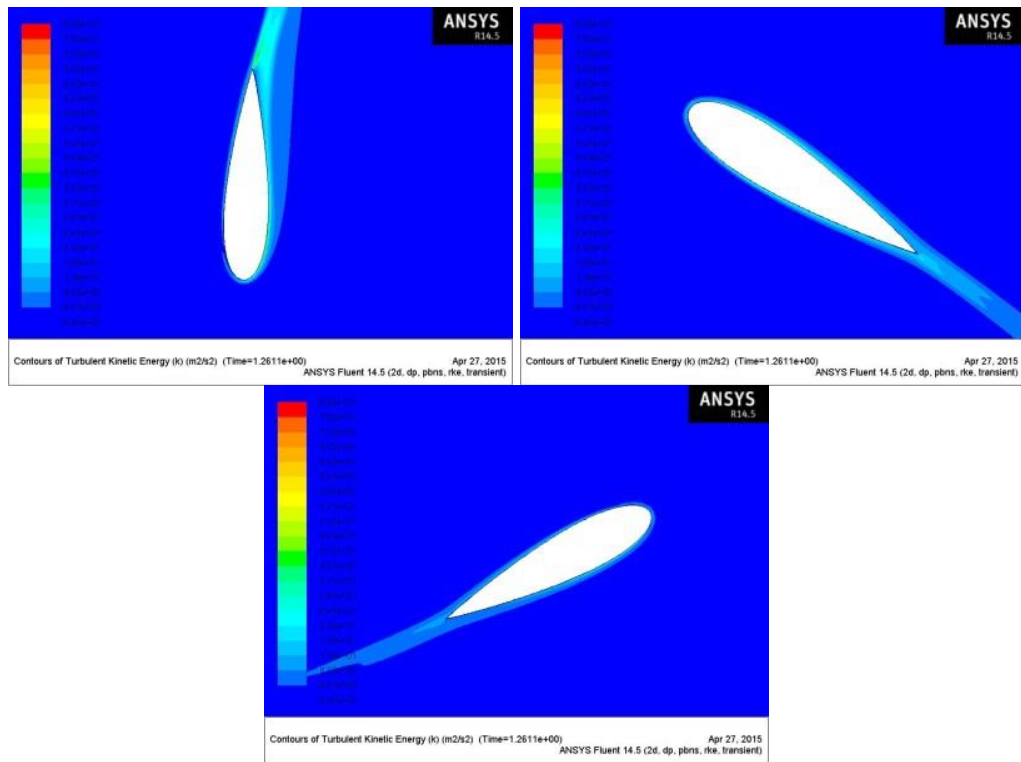


c) NACA5520

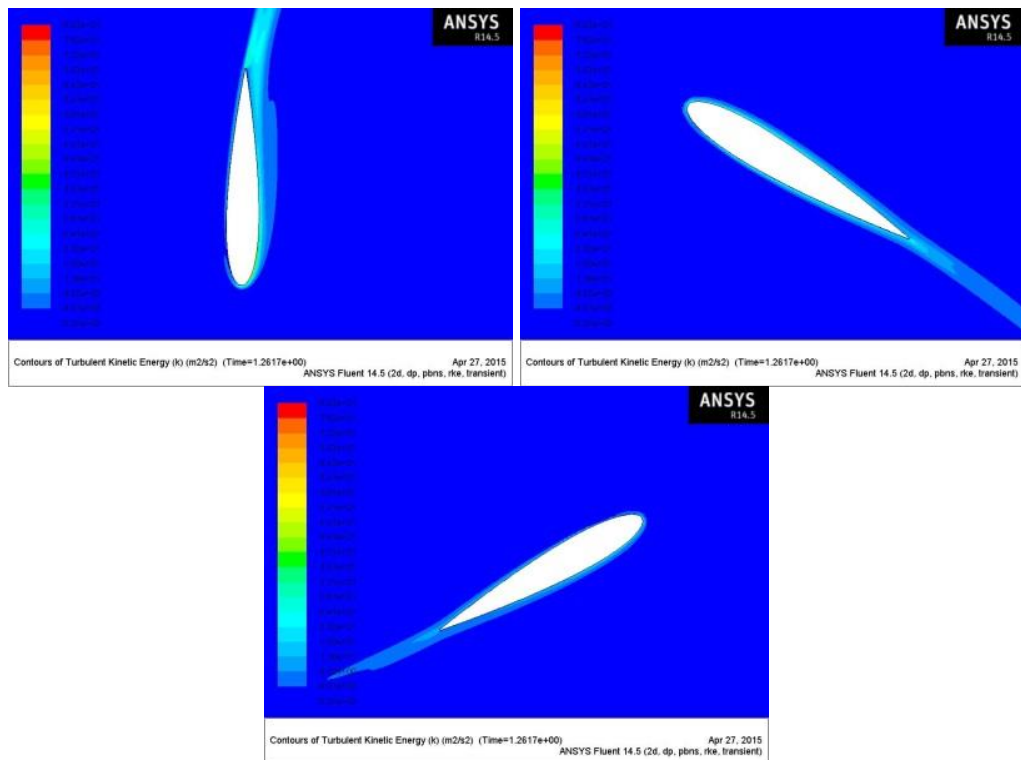


d) Clark-Y

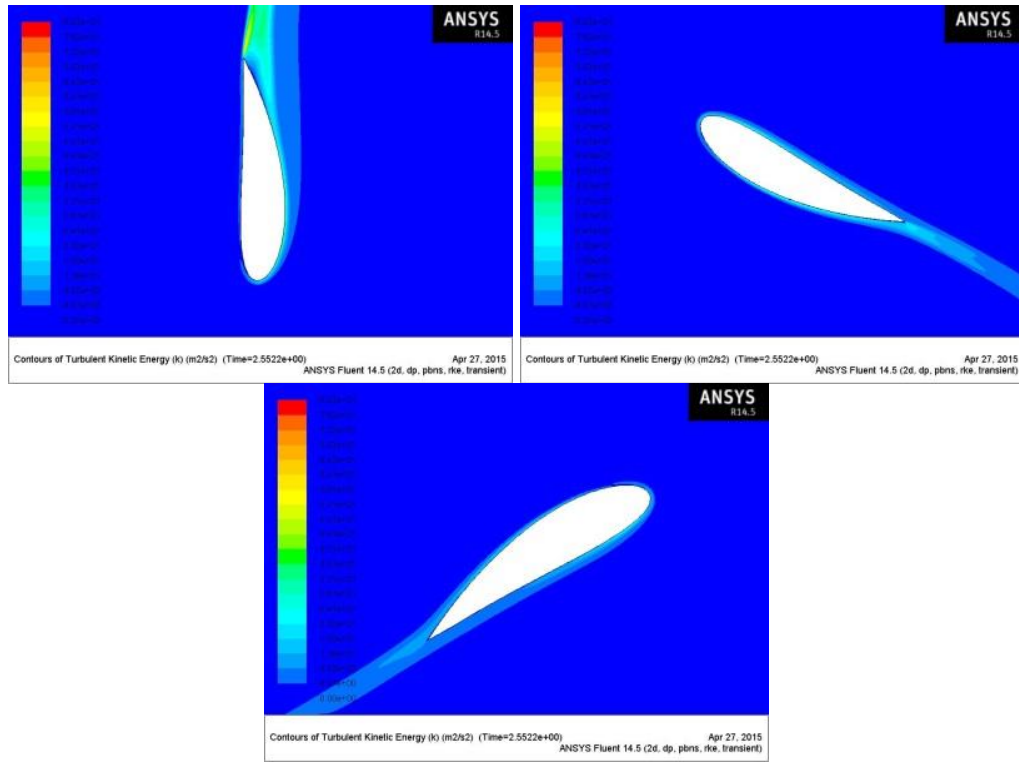
Şekil 3.26. $\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün toplam basınç kontürleri



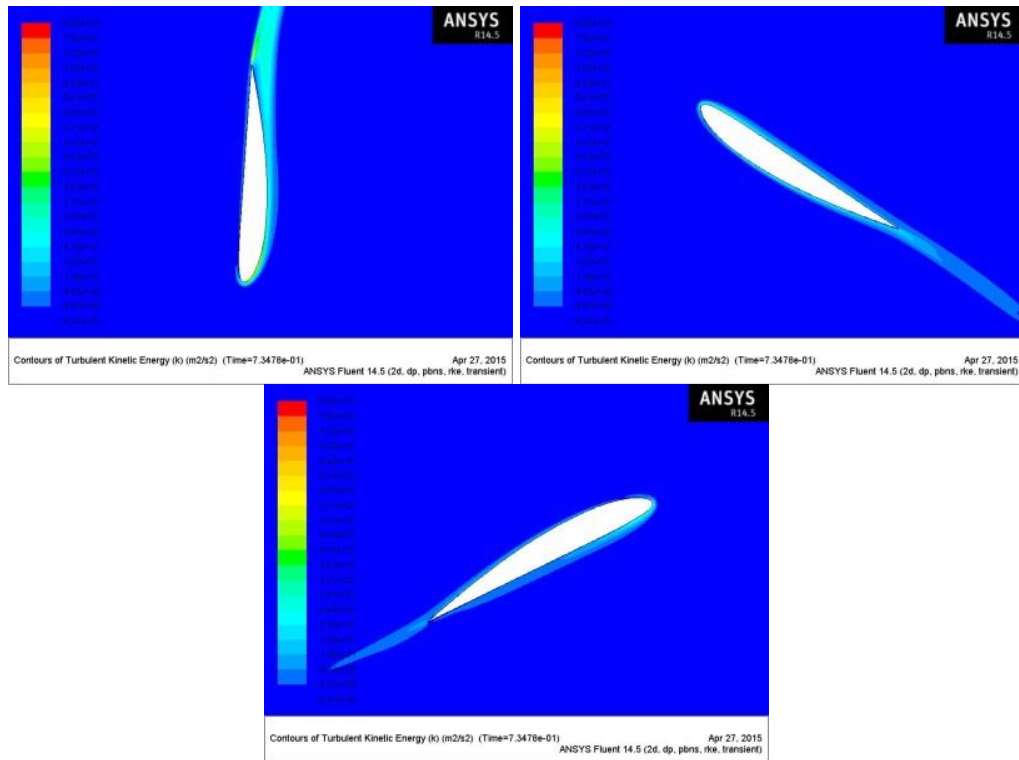
a) NACA0021



b) NACA0015

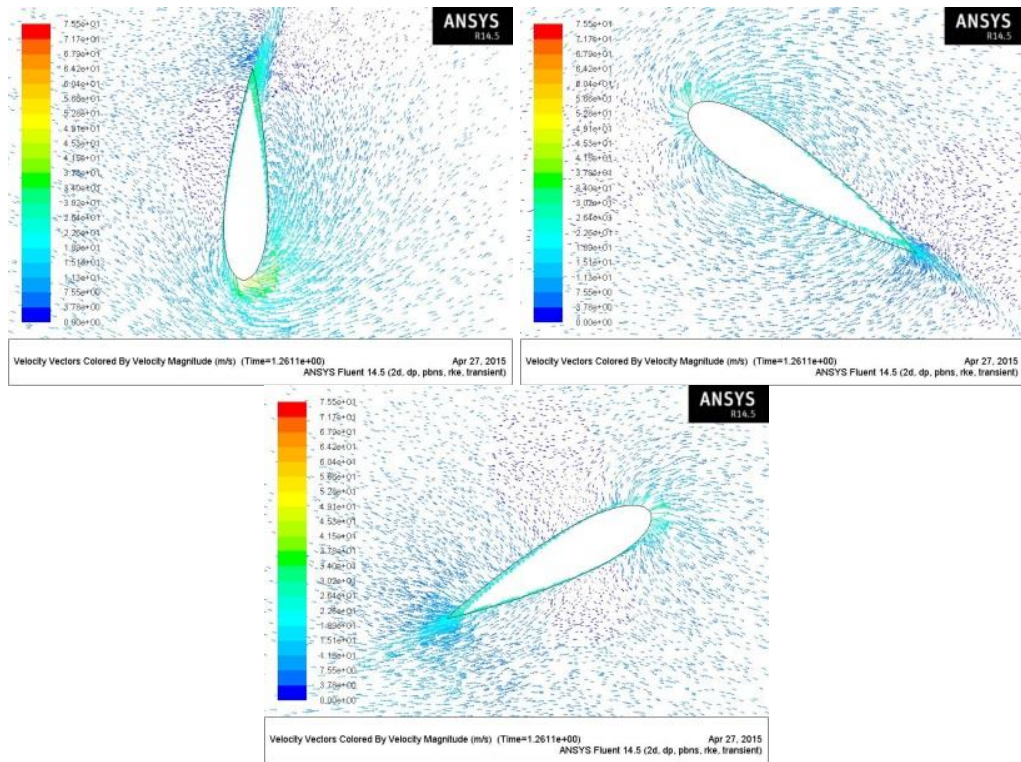


c) NACA5520

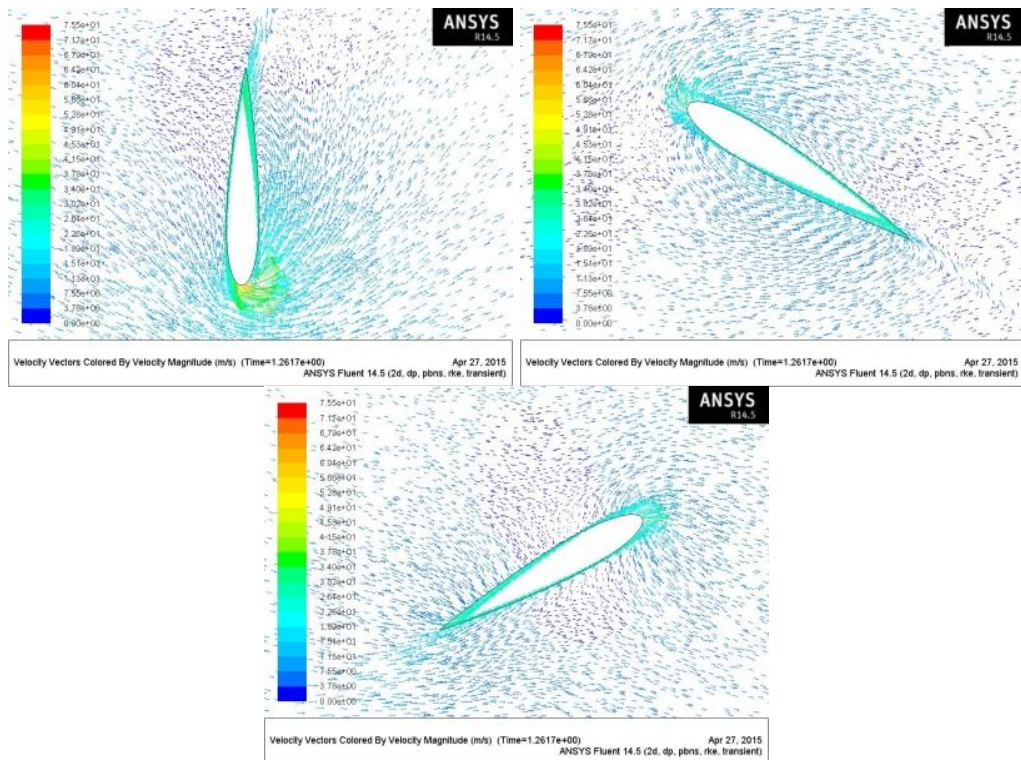


d) Clark-Y

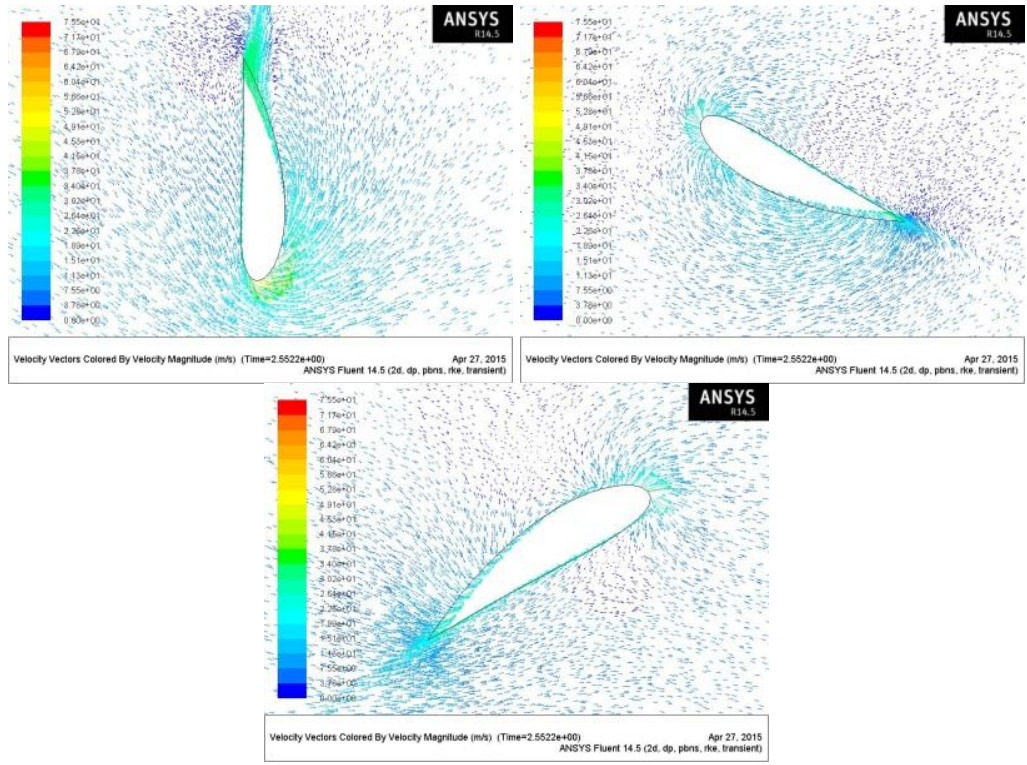
Şekil 3.27. $\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün türbülans kontürleri



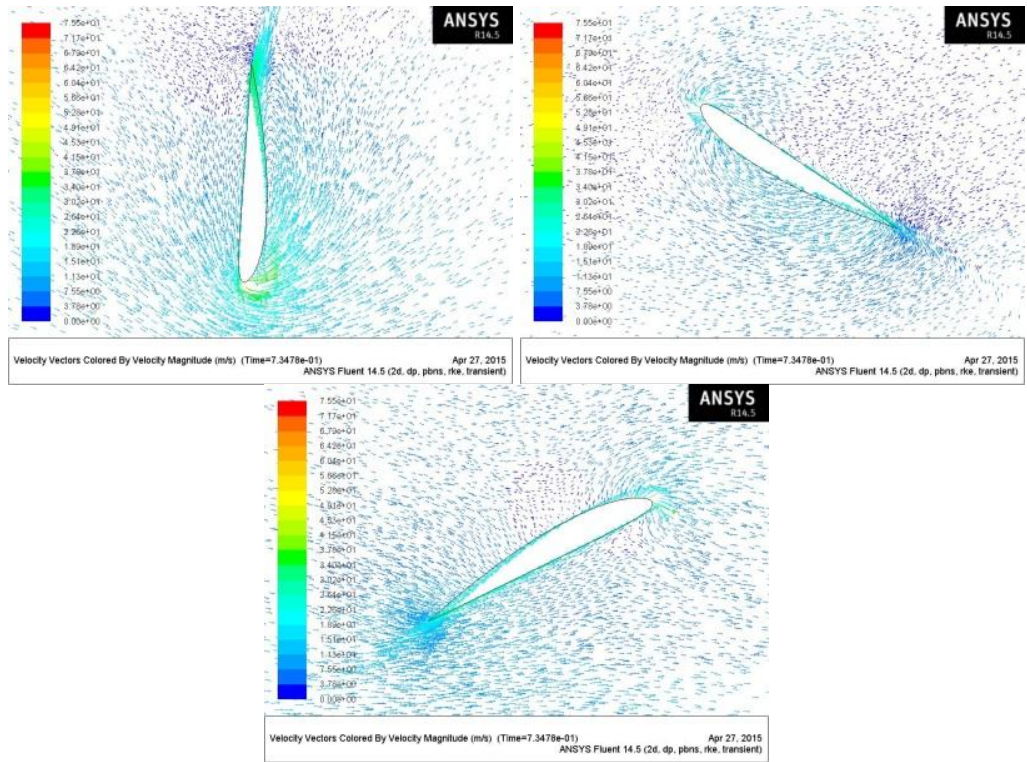
a) NACA0021



b) NACA0015



c) NACA5520



d) Clark-Y

Şekil 3.28. $\lambda=3.30$ da 92° , 212° ve 332° rotor açılarında dört farklı kanat profilinin Kanat-1, Kanat-2 ve Kanat-3 ün hız vektörü kontürleri

4. BÖLÜM

DIKEY EKSENİLİ HELİSEL DARRIEUS RÜZGÂR TURBİNİN LABORATUVAR VE SAHA ÇALIŞMALARI

4.1. Deneysel Çalışmalar

Türbinlerin devir hızı önemli bir verim parametresi olmasının yanı sıra düşük hızlarda da devir sayısı elde edilmesi önemli bir husustur. Her ne kadar sayısal analizler bir üretime başlamadan önce ilk seçim için gerekli olsa da deneysel çalışmalar ile desteklenmelidir. H tipi Darrieus rüzgar türbinlerinin sayısal çalışması 2D olarak yapılabilmiş olmasına karşın üretilecek türbin modeli helisel geometriye sahip olması sebebiyle 8 farklı model ile deneyi yapılacak olup asıl üretilecek model belirlenmiştir (Şekil 4.1). Modeller üretilmesi düşünülen prototipin 1/10 ölçeğinde olup 20 cm yüksekliğinde 15 cm çapındadır. (San-Tez destekli bir çalışma olması sebebiyle yüklenici firmanın isteği üzerine modeller için detaylı bilgi verilmemiştir). Yapılan 2D sayısal analizler bu deneysel çalışmalara bir alt yapı olmuş ve modellerde kullanılacak kanat modellerin seçimine dayanmıştır. Tablo 4.1. de Niğde Üniversitesi rüzgar tüneli laboratuvarında (Şekil 4.2) incelenmiş olan 8 farklı modelin farklı rüzgar hızlarında devir sayılarını ve Şekil 4.3 de modellerin farklı rotor açılarda tork eğrilerini göstermektedir.

Rüzgâr türbininin devir sayısını ne kadar önemli olsa da türbin, alternatörü döndürebilmek için gerekli eşik torku sağlamalıdır. Buna ilişkin olarak 11.4 m/s hızda her bir modelin tork değerleri alınmıştır. Tablo 4.2 de yer alan değerlere göre proje ekibiyle beraber Model-7'nin üretilmesine karar verilmiştir. Bu karar da dikey eksenli türbinlerde ilk hareket problemi olması sebebiyle türbinden elde edilen torka öncelik verilmiştir.



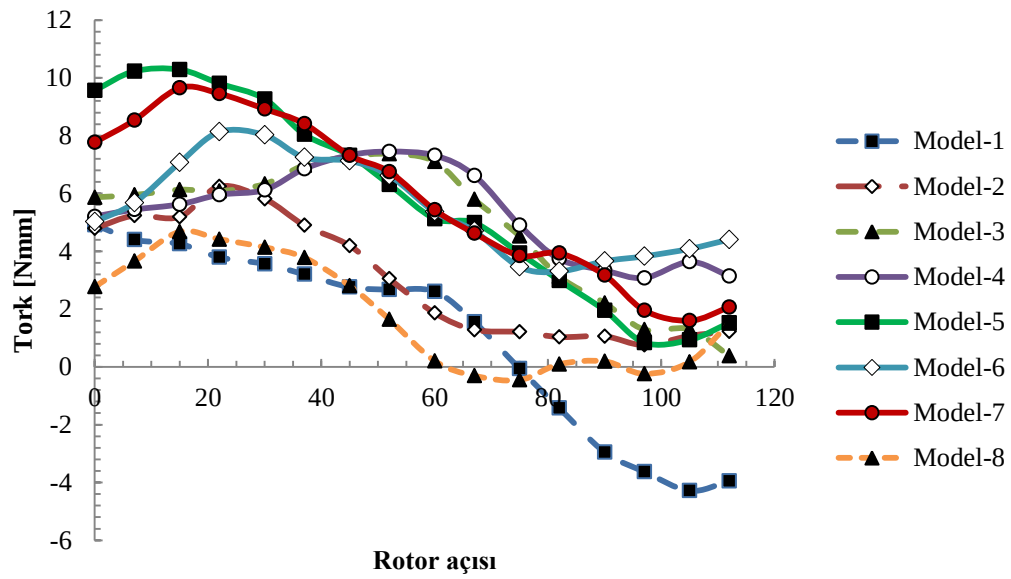
Şekil 4.1. Rüzgar tüneline denenen 9 farklı model



Şekil 4.2. Niğde Üniversitesi rüzgar tüneli laboratuvarı

Tablo 4.1. Prototiplerin farklı rüzgar hızlarında oluşturduğu devir sayıları

<u>Hız (m/s)</u>	<u>Model-1</u>	<u>Model-2</u>	<u>Model-3</u>	<u>Model-4</u>	<u>Model-5</u>	<u>Model-6</u>	<u>Model-7</u>	<u>Model-8</u>
3.2	21.3	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.3	75.0	70.0	28.7	63.3	26.0	51.3	68.8	0.0
7.4	125.5	110.0	89.0	130.5	78.0	90.5	90.0	0.0
9.3	181.0	149.0	146.0	190.8	130.0	129.0	138.0	72.3
11.4	258.0	187.0	215.0	255.0	180.0	174.0	182.5	140.0
13.4	358.0	237.0	300.0	348.0	233.0	242.0	250.0	231.0



Şekil 4.3. Modellerin değişen açılarda tork eğrileri

Tablo 4.2. Modellerin 11.4 m/s rüzgar hızında tork ve devir deney sonuçları

	<u>Model-1</u>	<u>Model-2</u>	<u>Model-3</u>	<u>Model-4</u>	<u>Model-5</u>	<u>Model-6</u>	<u>Model-7</u>	<u>Model-8</u>
Tork [Nmm]	1.4	1.2	1.7	1.6	1.6	1.9	2.7	3.8
Devir [rpm]	258	187	215	255	180	174	182.5	140

4.2. Kanat Üretimi

Üretilmesine karar verilen kanat profili yüklenici firmanın talebi üzerine belirtilemeyecek olup; belirtilebilecek özellikleri, kanat uzunluğu 2m, mil merkezinden yarıçap uzunluğu 0.75m ve kanadın veter uzunluğu 40 cm dir. Belirlenen kanadın

üretimi için ilk olarak kanadın bir adet modeli üretilmiş ve bu modelden alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluşan kalıp üretilmiştir. Şekil 4.4 kanadın üretiminde kullanılan cam elyaf ve Şekil 4.5 de bir adet model, kalıp ve bir adet kanat numunesi görülmektedir.



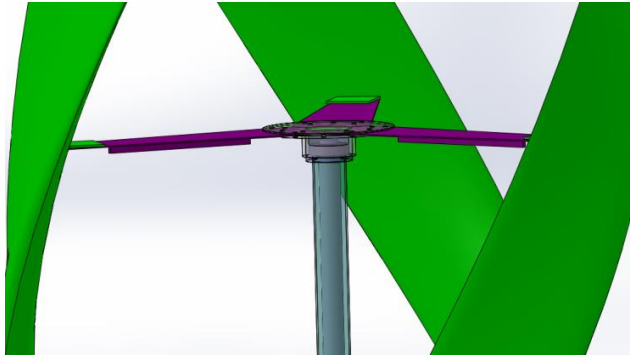
Şekil 4.4. Kanat üretiminde kullanılan cam elyaf; kanat kalıbı, model kanat ve kanat resmi

4.3. Türbinin Statik Yük Analizi

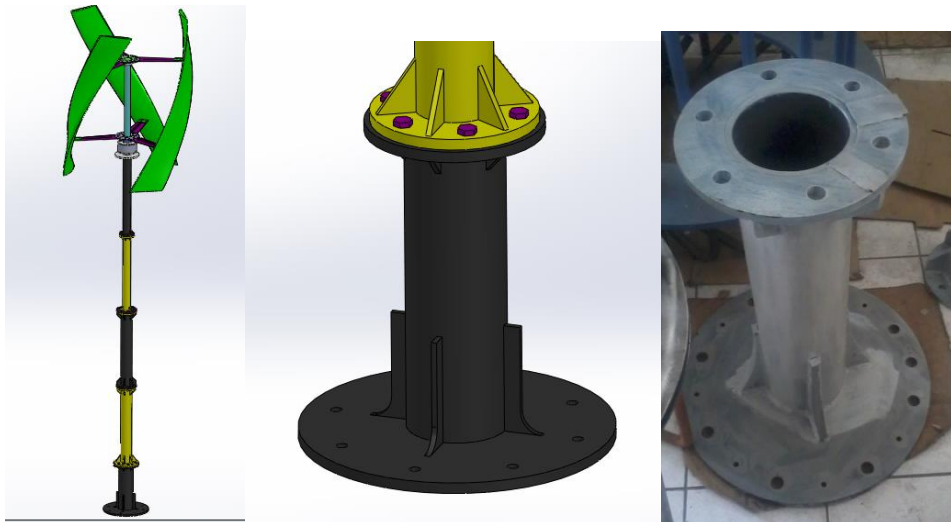
Kurulacak olan rüzgar türbinin yüksek rüzgar hızlarında üzerine dikilecek kulenin, mil bağlantısının, kanat kollarının ve flanş bağlantılarının dayanıklılığının ticari olmayan Ansys 14.5 paket programında statik yük analizi yapılması için öncelikle katı modellemesi yapılmıştır (Şekil 4.5). İlk analiz çalışmalarında kanat kollarının dayanıklılık açısından yetersiz olduğu görülmüş ve montaj sonrası bu durum pratikte de sağlanmıştır. Bunun üzerine kanat kollarında “T” bağlantısı ile mukavemeti arttırılmış, hem analiz ortamında hem de montaj üzerinde dayanıklılığı yeterli seviyeye geldiği görülmüştür (Şekil 4.6). Türbinin kurulacağı kule yaklaşık 4.5 m olup türbinle beraber toplam uzunluk 6.3 m’dir. Kule 5 parçadan oluşup katı modellemesi ve bir parçanın fotoğrafı Şekil 4.7 de verilmiştir.



Şekil 4.5. Türbin katı modellemesi ve türbinin montaj anından bir fotoğraf

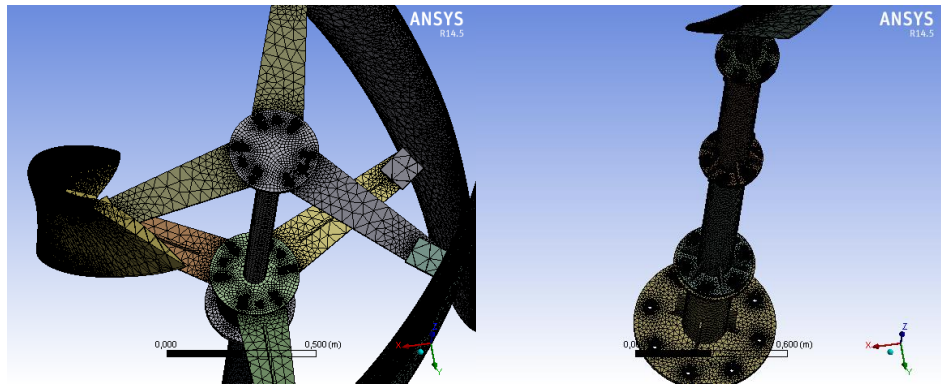


Şekil 4.6. Kanat kolları üzerine mukavemet arttırmak için eklenen “T” bağlantısı



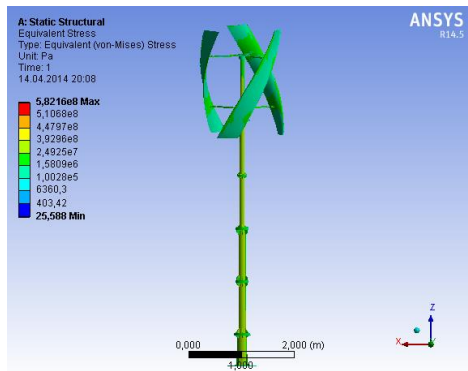
Şekil 4.7. Kule-türbin, kule elemanları katı modelleri ve üretilmiş bir elemanın fotoğrafı

Analizde, türbin ve kuleye etki edecek kuvvet 20 m/s rüzgar hızının yaptığı basınç dikkate alınıp, malzeme yapı çeliği seçilmiş, emniyet katsayısı da 1.5 olarak alınmıştır. Analizdeki modelleme çalışmayı kolaylaştırmak ve hücre sayısını azaltmak amacıyla, bazı radiuslar ve bağlantı elemanları gibi bazı özellikler ihmal edilerek model basitleştirilmiştir. Şekil 4.8. da ağ modellemesi görülmekte olup kritik bölgelerde ağ yapısı yoğunlaştırılmış, diğer bölgelerde seyrek tutulmuştur.

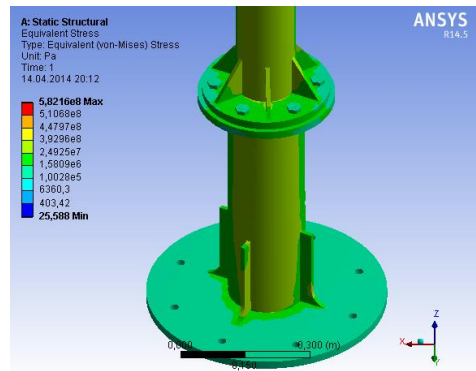


Şekil 4.8. Mesh (Ağ) yapısı

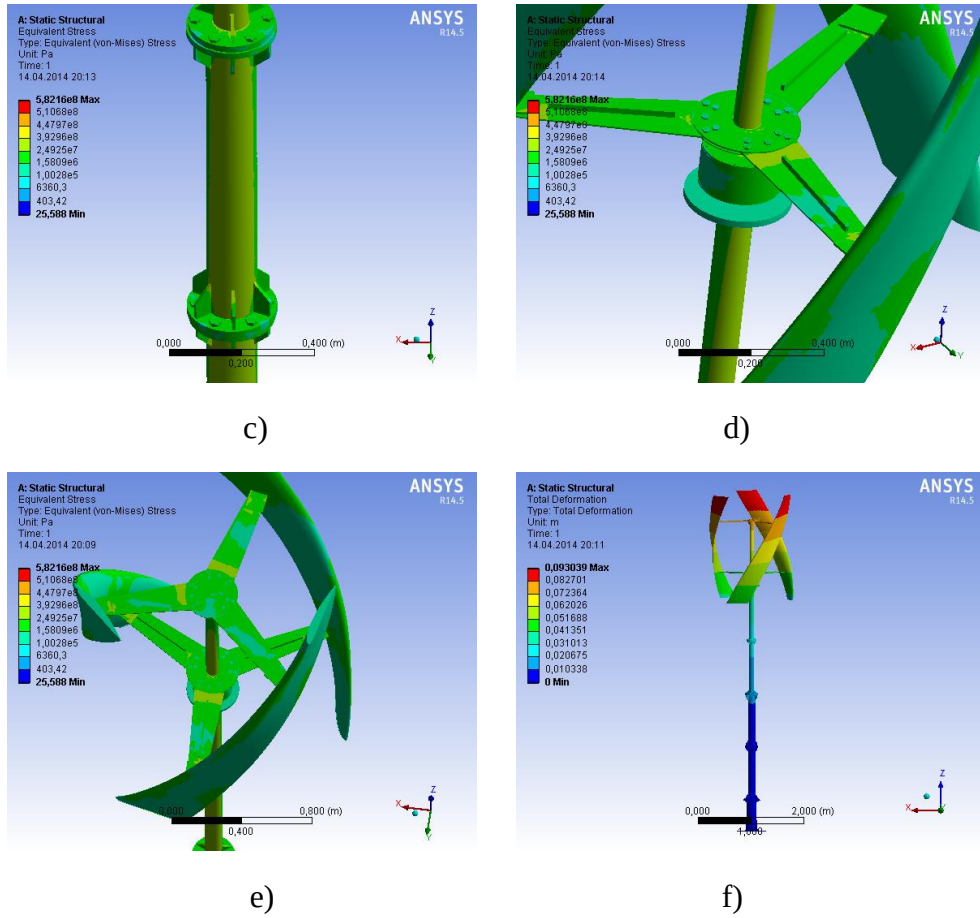
Analiz sonuçlarına göre; türbin ve kule, 20 m/s lik rüzgar altında statik olarak (türbin dönmüyorken) bazı bölgelerde en fazla 400 MPa'lık bir gerilme ve buna bağlı olarak türbinin en üst noktasında 9 cm'lik bir yana yatma mevcut olmaktadır. 400 MPa yapı çekiğinin akma gerilmesinden yüksek kopma gerilmesinden düşüktür ancak; analizde emniyet katsayısı 1.5 alınmakla beraber türbin döneceği için bu gerilme değerinin çok daha altında gerilim oluşacağı göz önüne alındığında türbin ve kulenin kurulmadan önce analiz açısından güvenilir olduğu düşünülmektedir. Analizin sonuçlarına ilişkin resimler Şekil 4.9 da verilmiştir.



a)



b)



Şekil 4.9. 20 m/s rüzgar hızında türbin ve kulenin statik analiz sonuçları [a) türbin ve kulede oluşan gerilme, b) Taban flanş elemanında oluşan gerilme, c) Kule bağlantısında oluşan gerilme, d) Kanat kolları, civatalar gerilme üzerinde oluşan gerilme, e) Türbin üzerinde oluşan gerilme, f) Türbin ve kulede oluşan toplam deformasyon]

4.4 Elektrik-Elektronik Tasarım

Bilindiği üzere rüzgar türbinleri oluşabilecek çok fazla rüzgar hızlarında (fırtına gibi) ciddi hasarlar görmekte hatta yıkılıp, yerinden kopup can kayıplarına bile sebep olabilmektedir. Bunun gibi olası kazaları engelleyebilmek için, rüzgar türbinlerinde belli bir rüzgar hızından sonra frenleme yapılmaktadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kanatların hücum açıları 0° pozisyonuna getirilerek türbine gelen rüzgar kuvveti minimuma indirilir ve türbin kanatlarının dönmesi engellenebilir. Ancak Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde kanatların hücum açılarının dinamik olarak değiştirilemediğinden ötürü (özellikle helisel olanların) farklı bir güvenlik önlemi alınması gerekmektedir. Bu kapsamda üretilecek olan dikey eksenli helisel Darrieus

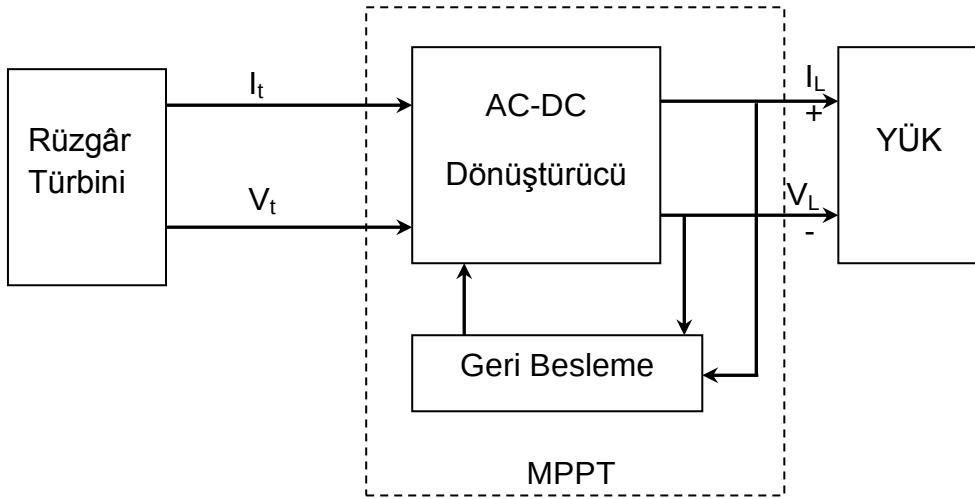
rüzgar türbini için elektronik kart tasarımı ile frenleme sağlanmak istenmiştir. Türbin belli bir dönme hızına eriştiğinde; bu dönme hızının artması sisteme zarar verebileceği endişesiyle bu hızının sabitlenmesi sağlanmıştır. Türbinin dönme hızının sabitlenmesi, alternatör çıkış voltajının kutupları değiştirilerek (kısa devre yapılarak); kanatlara tersine tork uygulanarak sağlanmıştır. Ayrıca MPPT (Maximum Power Point Tracking) ile türbin alternatöründen çıkış alınan gerilim (volt) ve akım (A) ın skaler olarak çarpımının yüksek gücü vereceğinden dolayı, bu değerlerin maksimum gücü verecek bir eğri üretilmekte ve bu sayede alternatörden maksimum güç alınmaya çalışılmıştır. Proje ekibinde bulunan bilgisayar mühendisi Muharrem ERBAY tarafından tasarlanmış ve tezin bu bölümünde (4.4 bölümünde) kendisinin bilgilerinden istifade edilmiştir. MPPT aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır:

4.4.1. Maksimum Güç Noktası Takipçisi (MPPT)

MPPT, belirli aralıklarla elde edilen gücün tepe değerini takip ederek yüke aktarılmasını sağlar. Rüzgar türbininden elde edilen enerjiden en yüksek seviyede faydalanmak bu elektronik cihazlar sayesinde mümkün olmaktadır. Rüzgar türbinlerinde kullanılan MPPT'lerin aralarında teknik açıdan farklılıklar olmasına rağmen temel olarak işleyişleri aynıdır. Gün içerisinde rüzgarın hızı sürekli olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak türbinden elde edilebilecek enerji miktarı da sürekli değişmektedir. Sistemin düzenli çalışabilmesi için artan ve azalan düzensiz bir güç doğrudan yüke yani aküye verilemez. Farklı rüzgar hızlarındaki bu güç değerleri düzenli bir hale dönüştürülüp daha verimli bir şekilde yüke aktarılmalıdır. Bu noktada MPPT devreye girer. Farklı zaman aralıklarında elde edilen farklı güç değerlerinin en büyük olduğu anları tespit ederek bir dizi işleme başlar. Bu işlemleri içerisinde bulunan mikro denetleyicideki algoritmalar sayesinde gerçekleştirir. MPPT devresinde direnç, diyot, kondansatör gibi temel devre elemanlarının yanında tüm bu sistemin düzenli bir şekilde çalışmasını kontrol eden, olası bir aksilik durumunda sistemi kapatan ve verimlilik için yazılmış algoritmaları içerisinde barındıran bir mikro denetleyici bulunmaktadır.

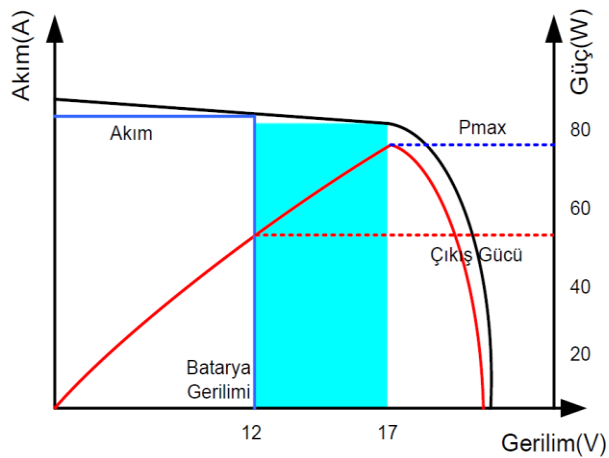
MPPT 'ler enerjinin elde edildiği rüzgar türbinleri ile yük arasına yerleştirilen AC/DC dönüştürücülerdir. Türbinden elde edilen alternatif akım önce 3-faz köprü diyot ile doğru akıma dönüştürülür. Daha sonra bu akım, sistemin güç ihtiyacına göre farklı

seviyelere dönüştürülür (Şekil 4.10). Buradaki temel amaç türbinden yüke en yüksek oranda gücün iletilmesini sağlamaktır.



Şekil 4.10. MPPT Blok Diyagramı

İdeal olmayan bütün gerilim kaynaklarının bir iç direnci vardır. Dolayısıyla kaynaktan akım çekilmeye başlandığında kaynağın gerilimi düşmeye başlar. Çekilen akım arttıkça gerilim seviyesi de düşer. Akımın sıfır olduğu anda gerilim en yüksek seviyede, akımın en yüksek olduğu anda ise gerilim en düşük seviyededir. $P = I \times V$ olduğundan bu noktalarda sıfıra yakın güç elde edilir. Bu iki nokta arasında ise sıfırdan başlayarak artan daha sonra tekrar sıfıra doğru inen bir güç eğrisi görülür (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. MPPT devresi ile Akım-Gerilim eğrisi üzerinde standart ve maksimum güç eğrileri

Eğrinin tepe noktası anına denk gelen akım ve gerilim değerleri en yüksek güç değerini verir. Gerilimin sabit olması durumunda MPPT devresine ihtiyaç yoktur. Çünkü statik devre elemanları ile akım sabit tutularak sabit bir çıkış gücü elde edilebilir ancak değişken giriş voltajına sahip sistemlerde bu mümkün olamamaktadır. MPPT bu noktada çıkış akımını ayarlayarak $I \times V$ değerini en yüksek seviyede tutar.

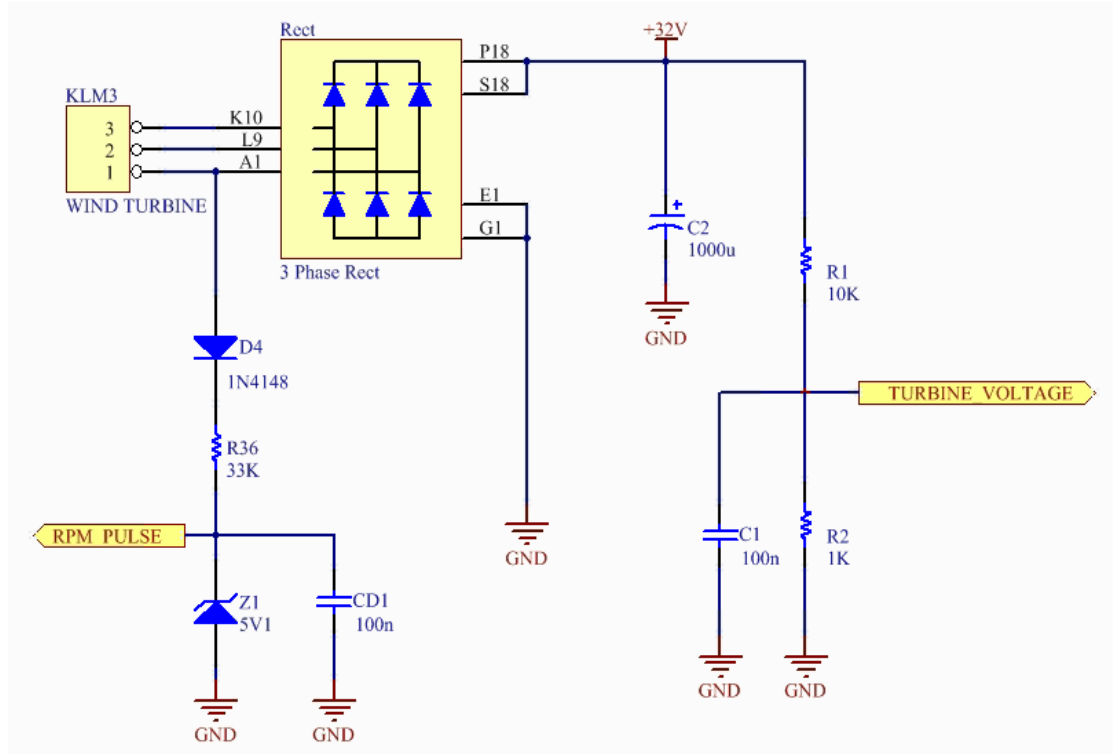
4.4.2 Rüzgar Türbininde Kullanılan Diğer Elektronik Devre Tasarımları

Bu amaçla projede (SAN-TEZ) tasarlanan dikey eksenli rüzgar türbininden elde edilen gücü kontrol etmek için bir MPPT devresi tasarlanmıştır. Bu devre genel olarak şu bölümlerden oluşmaktadır.

- Doğrultucu
- Türbin devir ölçme devresi
- Giriş filtresi
- Türbin gerilimi ölçüm devresi
- Frenleme devresi
- Dinamik akım sınırlama devresi
- Akım ölçüm devresi
- Çıkış filtresi
- Çıkış gerilimi ölçüm devresi
- Akü koruma devresi
- LCD Gösterge
- Mikro denetleyici
- Hafıza birimi
- Gerçek zaman (RTC) birimi
- Seri haberleşme birimi
- Kullanıcı kontrol arabirimi

Şekil 4.12 de devrede Rect isimli 3 faz köprü diyot alternatör çıkışındaki alternatif akımı doğru akıma çevirmektedir. C2 kapasitörü ise pozitif dalga arasındaki boşlukları doldurmaktadır. Bu sayede çıkıştaki dalgalanmalar filtre edilir. R1 ve R2 gerilim bölücü dirençler köprü diyot çıkışındaki gerilimi düşürerek işlemciye zarar vermesini engeller. Düşürülen bu referans gerilim ile alternatör çıkışındaki gerilim ölçülür. RPM_PULSE

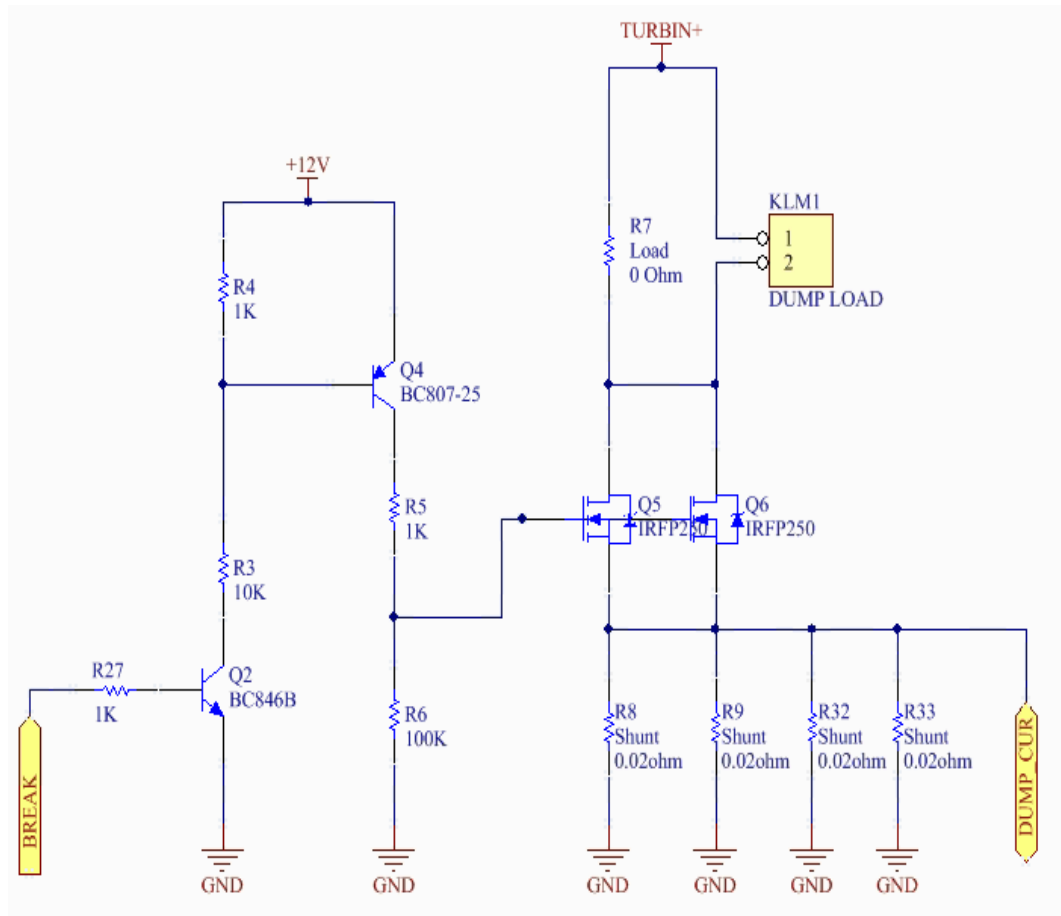
noktasından alternatörün bir tur dönüşünde 10 adet darbe sinyali alınır ve bu sinyal türbinin dakikadaki devir sayısını hesaplamada kullanılır.



Şekil 4.12. Doğrultucu, Filtre, Türbin gerilimi ve Devir ölçüm devresi

Frenleme devresi (Şekil 4.13) akü tamamen şarj olduktan sonra veya aşırı rüzgar hızından dolayı türbinin zarar görmesini önlemek amacıyla türbin çıkışını kısa devre ederek türbin dönüş hızını düşürür. Kısa devre işlemi sürekli olmaz. Mikroişlemciden BREAK noktasına belirli frekansta darbe uygulanarak frenleme miktarı otomatik olarak ayarlanır. Uygulanan darbe frekansı türbin devri ölçülerek yazılım vasıtasıyla dinamik olarak ayarlanır.

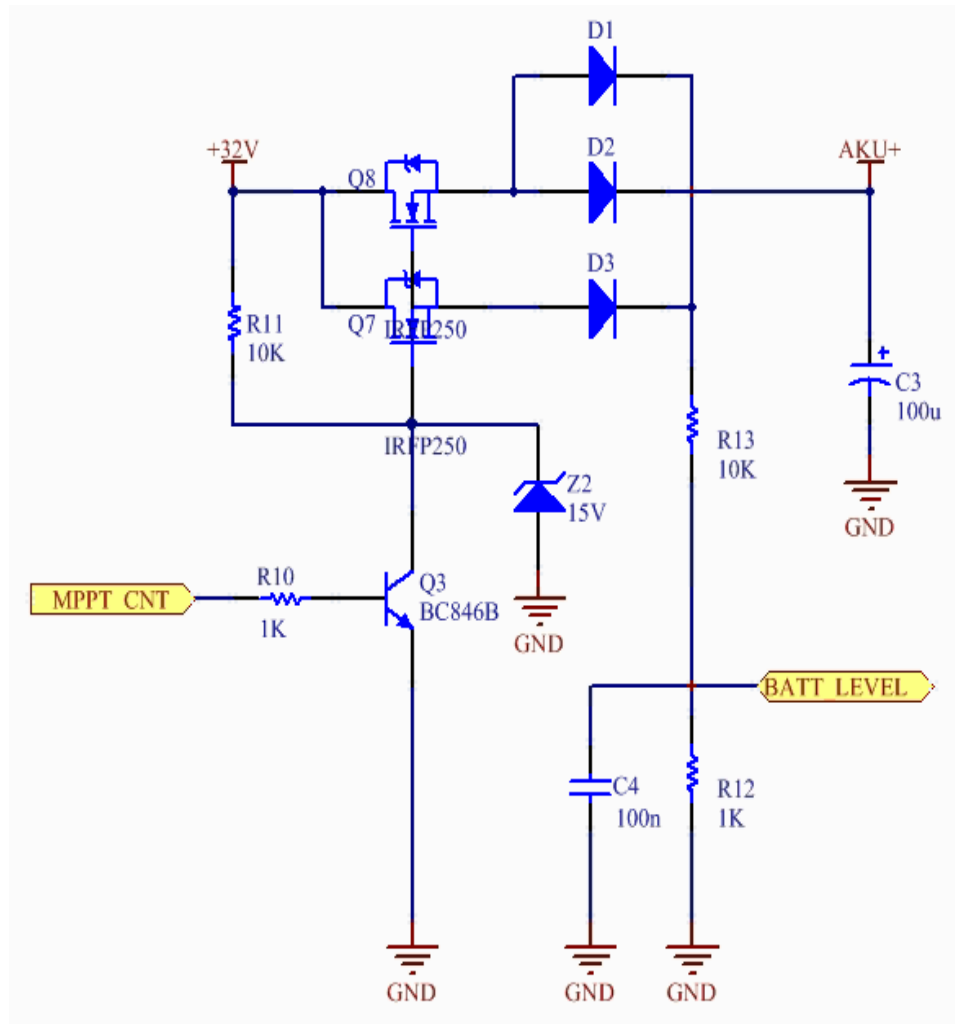
Şekil 4.13 deki devrede iki adet mosfet (Q5 ve Q6) anahtarlama elemanı olarak çalışmaktadır. Üretilen enerjinin fazlası DUMP_LOAD klemensine bağlanacak yüksek güçlü bir rezistans üzerinden ısıya dönüştürülerek harcanmaktadır. Ayrıca oluşan akımın şönt dirençleri üzerinden geçirilmesiyle oluşan düşük genlikli gerilim opamp devresi vasıtasıyla işlemci tarafından ölçülebilecek seviyeye yükseltilir. Bu sayede frenleme akımı da ölçülebilir olmaktadır.



Şekil 4.13. Frenleme Devresi ve Frenleme Akımı Ölçümü

Şekil 4.14 deki devre ise üretilen enerjiyi mikroişlemci kontrolü altında aküye gönderilmesini sağlar. MPPT_CNT noktasına mikroişlemci vasıtasıyla uygulanan darbe sinyalinin periyodu değiştirilerek aküye uygulanan akım miktarı ayarlanır. R12 ve R13 gerilim bölücü dirençler ile akü gerilimi mikroişlemcinin zarar görmeyeceği seviyeye düşürülür. Bu gerilimin seviyesi mikroişlemci tarafından ölçülerek akü voltajı hesaplanır.

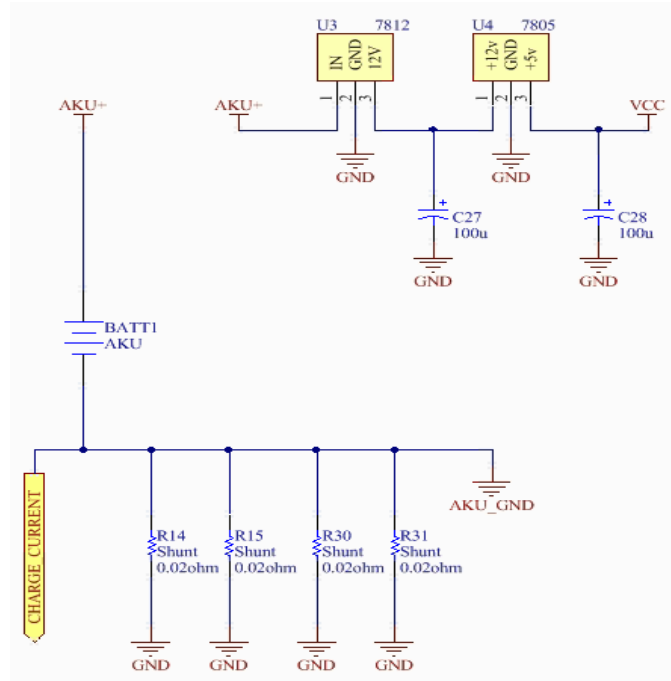
Aküye uygulanan akım miktarı ve türbin çıkış gerilimi eş zamanlı ölçülerek anlık güç hesabı yapılır. Şarj akımı yavaş yavaş artırılarak güç değeri tekrar hesaplanır. Akım miktarı yazılım tarafından dinamik olarak ayarlanarak güç miktarının en yüksek seviyede tutulması sağlanır.



Şekil 4.14. Şarj akımı kontrolü ve Akü Seviye Ölçüm Devresi

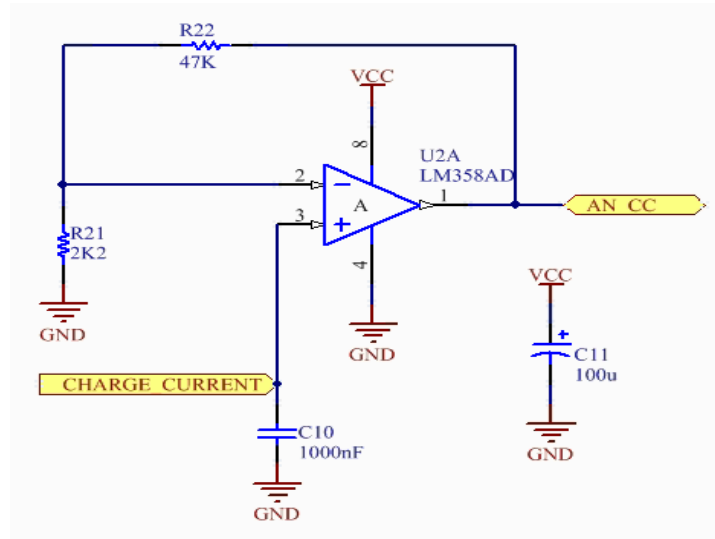
Devredeki D1, D2 ve D3 diyotları, giriş geriliminin akü geriliminden düşük olduğu durumlarda akü geriliminin türbin tarafına geçmesini engeller. C3 ve C4 kapasitörleri ise akü üzerindeki ani gerilim değişimlerini filtreleyerek hatalı gerilim ölçümünü engeller.

Şekil 4.15 daki devre şarj akımı ölçüm devresini ve işlemci için gerekli olan 5V besleme devresini göstermektedir. Şönt dirençleri üzerinden akan akım bu dirençler üzerinde bir gerilim düşümüne sebep olur. Bu gerilim değeri daha sonra opamp devresi ile kuvvetlendirilerek işlemci tarafından ölçülebilir seviyeye çıkartılır. U3 ve U4 regülatörleri akü voltajını kademeli olarak 5V seviyesine düşürür. Bu gerilim işlemcinin sağlıklı bir şekilde çalışması için gereklidir.



Şekil 4.15. Şarj Akımı ölçüm devresi ve Regülatör Devresi

Şekil 4.16 swki devre şönt dirençleri üzerine düşen çok düşük gerilimleri işlemci tarafından okunabilecek seviyeye kadar yükseltir. Bu zayıf sinyal opampın evirmeyen girişine uygulanır. Opampın çıkışından 0-4V arası bir gerilim elde edilir.

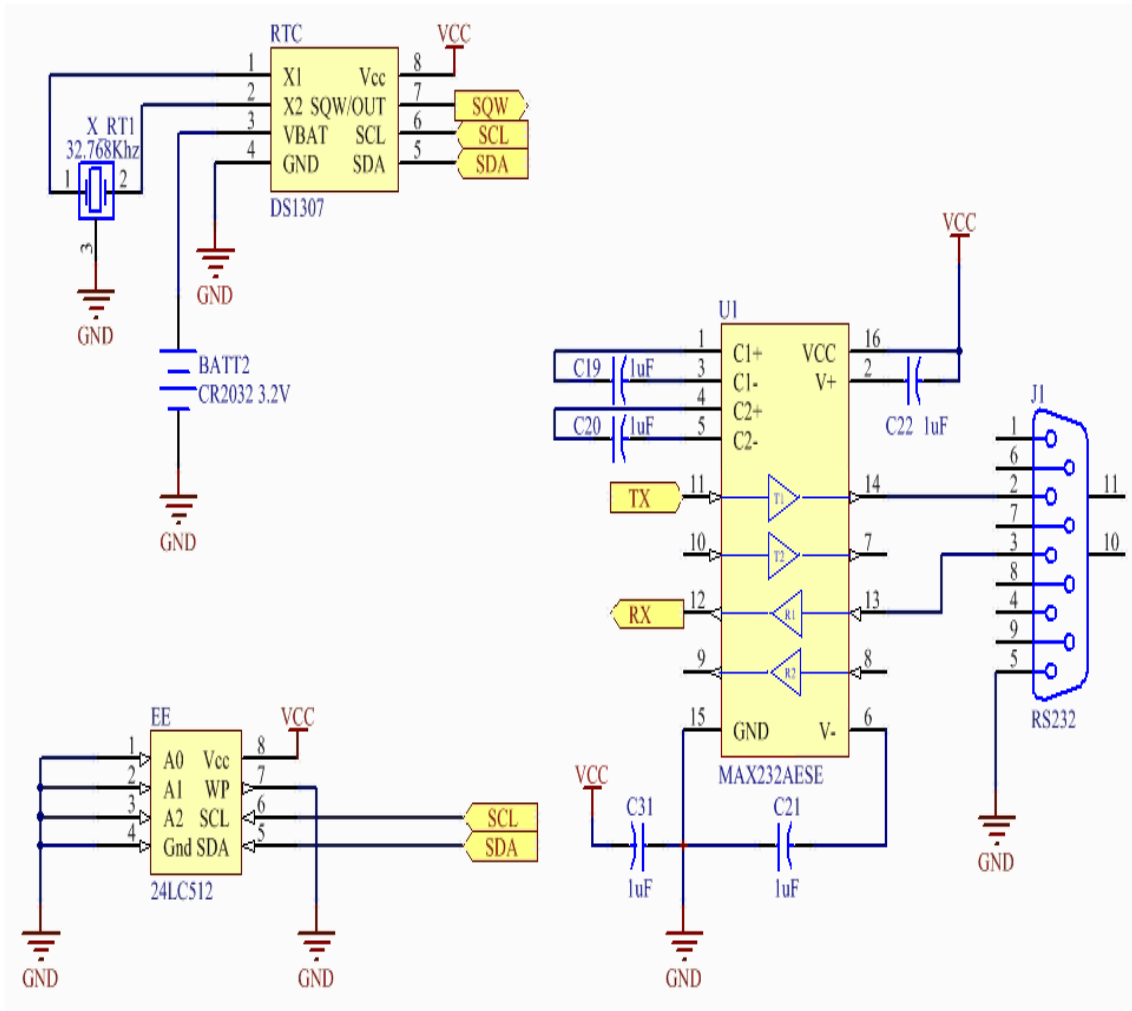


Şekil 4.16. Opamp Devresi

Şekil 4.18 deki devrede RTC entegresi gerçek zaman saatini tutmaktadır. Devre üzerindeki pil sayesinde akü devreden sökülse bile saat çalışmaya devam etmektedir.

24LC512 entegresi 512kbit yani 64KByte kapasiteye sahip bir hafıza entegresidir. Devre üzerinde ölçülen değerleri saat ve tarih değerleriyle birlikte kaydetmek amacıyla kullanılmıştır. 10 dakikalık periyotlar halinde kayıt yaptırıldığında yaklaşık 60 günlük kayıt imkanı sağlamaktadır.

U1 entegresi ise cihazın bilgisayar ile haberleşmesine olanak vermektedir. Bu sayede cihaz parametrelerinin bilgisayar programı ile ayarlanabilmesi ve cihaz verilerinin bilgisayar ortamına aktarılabilmesi öngörülmektedir. Bu entegrenin diğer amacı ise verilerin GPRS modem üzerinden merkezi bir istasyona aktarılmasına olanak sağlamasıdır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Saat, Hafıza ve Haberleşme Devreleri

Şekil 4.19 daki mikroişlemci devresini göstermektedir ve devrede Renesas marka 32KB flash ve 2KB RAM belleğe sahip R8C modeli bir mikroişlemci kullanılmıştır.

Tüm bu sırasıyla sayısal akış analizi, rüzgar tüneli deneyleri, mukavemet analizleri, elektronik devre tasarımları ve üretim prosesleri sonucunda nihai türbin ve kule Şekil 4.20 deki resimde görüldüğü gibi Kayseri ilinin Yamula barajı sahiline kurulmuştur ve civarda elektrik şebekesi olmaması sebebiyle oradaki halkın günlük elektrik ihtiyacının bir kısmını (TV, buz dolabı aydınlatma) karşılamaktadır.



Şekil 4.20. Üretilen ve kurulan helisel Darrieus rüzgâr türbini

5. BÖLÜM

SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

5.1. Sonuç, Tartışma ve Öneriler

Bu tez çalışmasında dikey eksenli helisel Darrieus rüzgâr türbini tasarımı için öncelikle kanat profilinin belirlenmesi üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmış ve üretimi için yapısal statik analizler yapılmıştır. Üzerinde çalışılan kanat profillerinin sonuçları incelendiğinde;

- Kanat profillerinin kalınlığı arttıkça oluşan moment, düşük λ değerlerinde yüksek olmaktadır.
- Simetrik olmayan kanat profilinin 0° hücum açısında bile kaldırma kuvveti oluşturması sebebiyle; diğer simetrik profillerden daha ince profile sahip olmasına rağmen yüksek λ değerlerde daha yüksek C_p değeri elde edilmiştir.
- En yüksek moment değeri bütün profiller için 86° - 98° aralığındaki rotor konumlarında sağlanmıştır.
- Bazı λ değerlerinde türbülans etkisi ani artış göstermektedir ve bu tork değerlerinde ani yükselmeye sebep olmaktadır. Ancak rotor dönme hızı arttıkça elde edilen moment değeri azalmaktadır. Yani maksimum güç katsayısı değerleri, optimum λ değeri oluşmakta ve bu değerler NACA0021 için 2.64, NACA0015 için 3.09, NACA5520 için 2.64 ve Clark-Y 3.30 olarak bulunmuştur.
- Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere, türbinin çalışma koşullarına göre (alacağı rüzgar hızına göre dönme hızı), düşük dönme hızlarında NACA0021 gibi kalın profiller; yüksek dönme hızlarında ise Clark-Y gibi simetrik olmayan kanat profilleri seçilmelidir. Ancak,

dikey eksenli rüzgar türbinlerinde bilindiği gibi ilk hareketlenme problemi yaşanmaktadır. Bu problem göz önüne alındığında NACA5520 kullanılması akıllıca olacaktır; çünkü diğer profillere nazaran maksimum C_p noktası daha düşük rüzgar hızlarında gerçekleşmekte hem de düşük rüzgar hızlarında elde edilen tork değerleri ve bu değerlerin artışı daha hızlı olmaktadır.

Uygulama açısından;

- Deneyleri yapılan 8 farklı modellerin 1/5 ölçekteydi, bu ölçek biraz arttırılarak deney sonuçları daha gerçekçi sağlanıp kıyaslama daha doğru yapılabilir.
- Cam elyaf malzemeden üretilen kanatlar daha sağlam ve hafif olması sebebiyle karbon fiberden üretilir.
- Alternatöre gelen dönme hızını arttırmak amacıyla türbin miline planet dişli sistemi eklenebilir.
- Daha yüksek moment elde edilmesi amacıyla türbin çapı deneyler yapılmak suretiyle arttırılabilir.
- Bilindiği üzere dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde ilk hızlanma sıkıntısı var; bu sıkıntı kanat kolları arasına eklenecek Savonius çarkı benzeri kanatlarla aşılabılır, ancak türbin dönmeye başladıktan sonra yüksek dönme hızlarında bu ek kanatların nasıl bir etki göstereceği göz önünde bulundurulmalı ve incelenmelidir.

KAYNAKLAR

1. Dursun, B., 2006. Dikey Eksenli Bir Darrieus Rüzgar Türbin Dizayn Edilmesi ve Kanat Üretimi. Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 65 s.
2. 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.
3. Wikipedia katılımcıları (2014). Rüzgâr. (Web sayfası: <http://tr.wikipedia.org/wiki/rüzgar>), (Erişim tarihi: Ekim 2014).
4. Uysal, A., 2008. Rüzgar Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 98 s.
5. Deda, B., 2000. Rüzgar Enerjisi ve Savonius Rüzgar Çarklarının Performanslarının Arttırılması. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 100 s.
6. Krinstensen, L., 1999. The perennial cup anemometer, **Wind Energy**, **2** (1): 59-75.
7. Centraltrykkeri, J., 2002. Guidelines for Design of Wind Turbines, Second Edition. Det Norske Veritas, Denmark, 286 pp.
8. Castelli, M. R., Betta, S. D., Benini, E., 2012. Effect of blade number on a straight-bladed vertical-axis Darrieus wind turbine. **World Academy of Science, Engineering and Techlonolgy**, **61** (1): 305-311.
9. Rüzgar ölçüm cihazı, (Web Sayfası: <http://www.ruzgarturbini.net/yazi/21/ruzgar-olcum-cihazı.htm>), (Erişim tarihi Ekim 2014).
10. Wikipedia katılımcıları, (2006). Darrieus wind turbine. (Web sayfası: http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine). (Erişim tarihi: Ekim 2014).
11. Niblick, A. L., 2012. Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System. University of Washington, Department of Mechanical Engineering, Master of Science in Mechanical Engineering, Washington, 167 pp.

12. Coste, J. D., Smith, A., White D., Berkvens, D., Crawford, J., 2004. Self-Starting Darrieus Wind Turbine. Dalhousie University, Department of Mechanical Engineering, Client, 34 pp.
13. Ragheb, M., Ragheb, A. M., 2011. Wind turbines theory-the betz equation and optimal rotor tip speed ratio, pp. 1-39. Fundamental and Advanced Topics in Wind Power (Eds: Carriceau, R.) Intech, Croatia.
14. Wikipedia katılımcıları, (2006). Betz's law. (Web sayfası: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Betz%27s_law&action=info). (Erişim tarihi: Ekim 2014).
15. Şentürk, U., 2007. Bir Rüzgar Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 89 s.
16. Pervez, N., Mokhtar, W., 2012 Cfd study of a Darrieus vertical axis wind turbine. *ASEE North Central Section Conference, 2012, Grand Rapids, Grand Valley State University*.
17. Nini, M., Motta, V., Bindolino, G., Guardone, A., 2014. Three-dimensional simulation of a complete vertical axis wind turbine using overlap grids. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, **270** (1): 78-87.
18. Nobile, R., Vahdati, M., Barlow, J. F., Crook, A. M., 2014. Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **125** (1): 168-179.
19. Danao, L., A., Edwards, J., Eboibi, O., Howell, R., 2014. A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. **Applied Energy**, **116** (1): 111-124.
20. McNaughton, J., Billard, F., Revell, A., 2014. Turbulence modelling of low Reynolds number flow effects around a vertical axis turbine at a range of tip-speed ratios. **Journal of Fluids and Structures**, **47** (1): 124-138.
21. Roa, A., Aumelas, V., T., M., Pellone, C., 2010. Numerical and experimental analysis of a darrieus –type cross flow water turbine in bare and shrouded configurations. **25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems**, **12113** (1):1-11.

22. Ferreira, C. J. S., Bijl, H., Bussel, G. V., Kuik, G. V., 2007. Simulating dynamic stall in a 2D VAWT: Modeling strategy, verification and validation with particle image velocimetry data, **Journal of Physics**, **75** (1): 1-13.
23. Almohammadi, K. M., Ingham, D. B., Ma, L., Pourkashan, M., 2013. Computational fluid Dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine, **Energy**, **58** (1): 483-493.
24. Tai, F. Z., Kang, K. W., Jang, M. H., Woo, Y. J., Lee, J. H., 2013. Study of the analysis method for the vertical-axis wind turbines having Darrieus blades, **Renewable Energy**, **54** (1): 26-31.
25. Güleren, K. M., Demir, S., 2011. Rüzgar türbinleri için düşük hücum açılarında farklı kanat profillerinin performans analizi, **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, **31** (2): 51-59.
26. Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali, Z., Jamil, S. R., Hussain, Z., 2012. Vertical axis wind turbine-A review of various configurations and design techniques, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **16** (1): 1926-1939.
27. NACA 4 digit airfoil generator (Web sayfası: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>). (Erişim tarihi: Ekim 2014).
28. Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., 2012. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları. İzmir Güven Kitabevi, İstanbul, 486 pp.
29. Ansys Fluent 12 User's Guide. Ansys Inc, 2009.
30. UIUC Airfoil Coordinates Database (Web sayfası: http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html). (Erişim tarihi: Nisan 2015).
31. Naca Airfoil Series (Web sayfası: <http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml>). (Erişim tarihi: Nisan 2015)
32. Law of the Wall (Web sayfası: http://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall). (Erişim tarihi: Nisan 2015).
33. Arif, M., Salim, S. M., Cheah, S. C., 2009. *Wall y^+ approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: Part 1- low Reynolds number,*

Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, December 9-11, 2009, Melbourne.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Toygun DAĞDEVİR

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 1988, Ankara

Medeni Durumu: Bekâr

Tel: +90 537 676 15 55

e-mail: toygun@erciyes.edu.tr, toygun_06@hotmail.com

Yazışma Adresi: Mevlana Mah. Cemil Baba Cad. Nilüfer Apt. No: 36/10 Talas, Kayseri

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü	Devam ediyor
Lisans	EÜ Müh. Fak. Makine Müh. Bölümü	2012

İŞ DENEYİMLERİ

2015-Halen	Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2013-2014	Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2012-2014	Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı - Erciyes Üniversitesi SAN-TEZ Projesi	Proje Asistanlığı

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Dagdevir T., Aydemir S., Akansu S.O. ve Kahraman N. "*Numerical Investigation of Aerodynamic Characteristics for Three Bladed Darrieus Wind Turbine on Naca0021, Naca0015 And Clark-Y*" **6th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection**, vol.1, pp. 151-160, (2013).
2. Dagdevir T., Keklikcioglu O., Ozceyhan V., "*Numerical Investigation To Enhance Heat Transfer In A Circular Tube Embeded With Free Space Entry And Conical-Nozzle Formed Sinusoidal Geometry*", **International Conference on Advances in Mechanical Engineering**, vol.1, pp.723-732, (2015).
3. Keklikcioglu O., Dagdevir T., Ozceyhan V., "*A Cfd Based Thermo-Hydraulic Performance In A Tube Fitted With Stepped Conical Nozzle Turbulators*", **International Conference on Advances in Mechanical Engineering**, vol.1, pp.716-722 , (2015).
4. Akansu S.O., Akansu Y. E., Dagdevir T., Daldaban F., Yavas F., "*Experimental And Numerical Aerodynamic Investigation Of A Prototype Vehicle*" **Wind and Structures**, vol. 20, No:6, *In Press*, (2015).