

**EKSENEL VE TEĞETSEL AKIM
İNDÜKLEME FAKTÖRÜ DEĞERLERİNİN
RÜZGÂR TÛRBİN PERFORMANSINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Erkan ORMAN
Yüksek Lisans Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Ağustos-2010

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Erkan Orman’ın “Eksenel ve Teğetsel Akım İndükleme Faktörü Değerlerinin Rüzgâr Türbin Performansına Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı **Sivil Havacılık** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 23.07.2010 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim–Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ	
Üye (Tez Danışmanı)	: Dr. M. Ziya SÖĞÜT	
Üye	: Doç. Dr. Zuhel OKTAY	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Önder TURAN	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Ertunç TAT	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKSENEL VE TEĞETSEL AKIM İNDÜKLEME FAKTÖRÜ DEĞERLERİNİN RÜZGÂR TÜRBİN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Erkan ORMAN

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

II. Danışman : Dr. M. Ziya SÖĞÜT

2010, 56 sayfa

Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde güç katsayısını, dolayısıyla enerji verimliliğini etkileyen temel parametreler incelenmiştir. Rüzgâr türbinlerinde rüzgâr hızının değişimini ifade eden eksenel ve teğetsel akım indüklemeye faktörü değerlerinin, rotor torku üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kanat profillerinin tasarım açısından uygunluğu, eksenel ve teğetsel indüklemeye katsayılarını etkilediğinden, bu değerler türbin rotorlarının enerji verimliliği açısından kritik parametreler olarak değerlendirilebilir.

Yapılan çalışmada, model bir rüzgâr türbini için bilinen güç katsayısı değerleri kullanılarak, rüzgâr türbininin minimum enerji kayıplarının gerçekleştiği koşullarda işletildiği kabulü ile eksenel ve teğetsel akım indüklemeye faktörü katsayıları için ortalama değerler bulunmuştur. Bu değerler yardımıyla, seçilen çeşitli uç-hız oranı büyüklükleri için tork değerleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Türbini, Eksenel Akım İndüklemeye Faktörü, Teğetsel Akım İndüklemeye Faktörü, Rotor Torku

ABSTRACT

Master of Science Thesis

EXAMINATION OF THE EFFECTS OF AXIAL AND TANGENTIAL FLOW INDUCTION FACTOR VALUES ON WIND TURBINE PERFORMANCE

Erkan ORMAN

**Anadolu University
Graduate School of Science
Civil Aviation Program**

Supervisor : Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Co-supervisor : Dr. M. Ziya SÖĞÜT

2010, 56 pages

In this study; power coefficients of wind turbines are analysed. In other words, main factors that effect energy efficiency are examined. The effects of axial and tangential flow induction factor values that show the rate of change in wind velocity are examined for rotor torque.

Proper design and selection of airfoils for wind turbines effects axial and tangential induction factors. As a result, these values are evaluated as critical factors for energy efficiency of wind turbine rotors.

For a model wind turbine, by using known power coefficient values, average values of axial and tangential flow induction factors are obtained with the assumption of minimum energy loss for wind turbine. With the help of these values, rotor torque is calculated for some chosen tip-speed ratios.

Keywords: Wind Turbines, Axial Flow Induction Factor, Tangential Flow Induction Factor, Rotor Torque

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum çalışmalar boyunca benden desteklerini esirgemeyen, çok değerli tez danışmanlarım sayın Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ ve sayın Dr. M. Ziya SÖĞÜT'e teşekkürlerimi bildirmekten mutluluk duyarım.

Ayrıca tez çalışmam süresince, raporun hazırlanması ve çalışma takviminin planlanması konusunda süreci yakından takip ederek bana destek olan Sayın Arş. Görv. Önder ALTUNTAŞ'a teşekkür ederim.

Tez raporumun kontrolünde emeği geçen Sayın Uzm. Elif YILDIRIM'a ve bu çalışmanın çeşitli bölümlerinin hazırlanmasında katkıları bulunan Sayın Ömer YILMAZ ile Sayın Yasin ŞÖHRET'e teşekkür ederim.

Erkan ORMAN

Ağustos-2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Rüzgâr Türbinleri ile İlgili Olarak Yapılan Temel Çalışmalar.....	4
2.2. Rüzgâr Türbinlerinde Kanatçıkların Aerodinamik Tasarım Parametreleri ve Kanatçık Optimizasyonu ile İlgili Çalışmalar	5
3. RÜZGÂR ENERJİSİ	8
3.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişim Süreci	8
3.2. Rüzgâr Enerjisi Hakkında Genel Bilgiler.....	12
3.2.1. Rüzgârlar ve özellikleri.....	14
3.2.2. Rüzgâr profilinin değişimi	15
3.3. Rüzgâr Potansiyelinin Belirlenmesi	17
3.4. Türkiye’de ve Dünyada Rüzgâr Gücü Kapasitesi.....	19
3.4.1. Türkiye’de kurulu rüzgâr gücü kapasitesi	19
3.4.2. Dünyada kurulu rüzgâr gücü kapasitesi.....	21
3.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	21
3.5.1. Eksen yapılarına göre rüzgâr türbinleri	22
3.5.1.1 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri	22
3.5.1.2 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	23
3.5.2. Rüzgâr hızına göre rüzgâr türbinleri.....	24
3.5.2.1 Düşük hızlı rüzgâr türbinleri	25
3.5.2.2 Yüksek hızlı rüzgâr türbinleri	25

3.5.3. Rotor hızına göre rüzgâr türbinleri	25
3.5.3.1 Sabit hızlı rüzgâr türbinleri	25
3.5.3.2 İki hızlı rüzgâr türbinleri.....	26
3.5.3.3 Değişken hızlı rüzgâr türbinleri.....	26
3.5.4. Güç kontrol sistemlerine göre rüzgâr türbinleri	26
3.5.4.1 Stall kontrollü rüzgâr türbinleri.....	27
3.5.4.2 Yunuslama (Pitch) kontrollü rüzgâr türbinleri.....	27
3.5.4.3 Aktif stall kontrollü rüzgâr türbinleri	27
3.5.5. Yükselen hava akımlı rüzgâr türbinleri	27
4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN TEORİLER	29
4.1. Akçüatör Disk Teorisi	29
4.1.1. Eksenel momentum teorisi.....	31
4.1.2. Güç katsayısı	33
4.1.3. Betz limiti.....	34
4.2. Rotor Disk Teorisi.....	35
4.2.1. İz rotasyonu.....	35
4.2.2. Açısal momentum teorisi.....	36
4.3. Rotor Pala (Kanatçık) Teorisi	39
4.3.1. Pala elemanı teorisi.....	40
4.3.2. Pala elemanı momentum teorisi	42
5. MODEL BİR RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇİN YAPILAN HESAPLAR	46
5.1. Model Rüzgâr Türbini İçin Yapılan Kabuller	46
5.2. Model Rüzgâr Türbininin Özellikleri.....	47
5.3. Model Rüzgâr Türbinine Ait Değerler	47
5.4. Eksenel ve Teğetsel İndükleme Faktörü Değerlerinin Hesabı	48
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

3.1. Afganistan’da, tahıl öğütmek amacıyla kullanılan düşey eksenli bir rüzgâr türbini.....	8
3.2. Poul la Cour’un elektrik üreten ilk rüzgâr türbini	10
3.3. Danimarka konsepti olarak bilinen rüzgâr türbinleri.....	11
3.4. 1997 yılında kızılötesi fotoğraflama yöntemi ile çekilmiş, deniz ve karalara ait yüzey sıcaklıklarını gösteren uydu fotoğrafı.....	13
3.5. Coriolis eğme kuvvetlerinin etkisi ile rüzgâr hareketi.....	14
3.6. Yönlere göre Türkiye’deki yerel rüzgârlar	15
3.7. Laminer ve türbülanslı akış için sınır tabaka.	16
3.8. 10 Mayıs 2010 itibarıyla Türkiye’de işletimde olan rüzgâr santralleri ve toplam enerji üretim kapasitesi	20
3.9. Dünyada kurulu rüzgâr türbin gücü kapasitesi.....	21
3.10. Düşey eksenli bir rüzgâr türbini örneği	23
3.11. Yatay eksenli üç kanatçıklı modern bir rüzgâr türbini	24
3.12. Yükselen hava akımlı rüzgâr türbini örneği.....	28
4.1. Bir rüzgâr türbini için oluşan akım tübünün yapısı	30
4.2. Akçüatör diskte meydana gelen ani basınç düşüşü ve rüzgâr hızında meydana gelen azalma.....	31
4.3. Eksenel indükleme faktörü a ’nın C_p güç katsayısı ile değişimi	34
4.4. Diski geçen hava moleküllerinin diskin arkasında maruz kaldıkları dönü hareketi.....	35
4.5. Rotorun dönmesi sonucunda pala elemanlarının taradığı halkasal alan.	36
4.6. Pala elemanı için eksenel ve teğetsel hız değerleri	37
4.7. Pala elemanı ve bu pala elemanı üzerinde hız bileşenlerinin gösterimi.	40
4.8. Pala elemanında meydana gelen hız, kuvvet ve açısı değerlerinin gösterimi.	41
6.1. Eksenel indükleme katsayısı ile torkun değişimi	52
6.2. Teğetsel indükleme katsayısı ile torkun değişimi	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
3.1. Bazı nesneler için sınır tabaka kalınlıkları	16
5.1. Model rüzgâr türbinine ait güç katsayısı değerleri	48
5.2. Verilen güç katsayısı değerlerine göre hesaplanan kök değerleri	49
5.3. Denklem (4.19)'dan yararlanılarak hesap edilen ortalama teğetsel akım indüklenme faktörü değerleri	50
5.4. Farklı uç hız oranlarında tüm disk için tork değerleri	51

SİMGELER DİZİNİ

A	: Alan (m^2)
a	: Eksenel akım indüklenme katsayısı
a'	: Teğetsel akım indüklenme katsayısı
c	: Veter uzunluğu (m)
c_d	: Sürüklenme katsayısı
c_l	: Taşıma katsayısı
C_p	: Güç katsayısı
D	: Sürüklenme kuvveti (N)
F	: Kuvvet (N)
L	: Taşıma kuvveti (N)
m	: Kütle (kg)
N	: Kanatçık (pala) sayısı
P	: Basınç (N/m^2)
Q	: Tork (N.m)
r	: Yarı çap (m)
U	: Boş akış hızı (m/s)
W	: İzafi hava hızı (m/s)
α	: Hücüm açısı ($^\circ$)
β	: Yunuslama açısı ($^\circ$)
η	: Verim
λ	: Yerel hız oranı
μ	: Verilen radyal mesafenin yarıçapa oranı
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
σ	: Katılık oranı
Φ	: İzafi hava hızının yatay ile yaptığı açı ($^\circ$)
Ω	: Açısal hız (radyan/s)

ALT ve ÜST İNDİSLER

∞	: Boş akış koşulları
d	: Disk
r	: Yarıçap
w	: İz bölgesi koşulları

1. GİRİŞ

Günümüzde, gün geçtikçe artan enerji talebine karşın ülkemizde ve dünyada kullanılan enerji kaynaklarının büyük bir bölümünün çevreye zararlı petrol türevli kaynaklar olması, bu kaynakların getirdiği yüksek maliyet ve dünyada petrol rezervlerinin tükenme noktasına gelmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik ilginin artmasına neden olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgâr türbinlerinin kullanımı çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Rüzgâr türbinleri, çevreye zararlı gaz emisyonuna neden olmadığından enerji geleceğimizde ve iklim değişikliğini önlemede büyük bir role sahiptir.

Ülkemiz için rüzgâr enerjisi, geleneksel güç santrallerinin aksine enerji güvenliği açısından yakıt maliyetlerini ve uzun dönemli yakıt fiyatı risklerini eleyen; ekonomik, politik ve tedarik riskleri açısından da diğer ülkelere bağımlılığı azaltan yerli ve her zaman kullanılabilir bir kaynaktır [1].

Rüzgâr türbinlerinin bakım maliyetlerinin az olması ve kullanım ömürlerinin uzun olması gibi etkenler, enerji sistemleri içerisinde rüzgâr türbinlerine ayrı bir yer kazandırmıştır. Gelişen teknolojik altyapı ve kurulum kolaylığı gibi faktörler de, rüzgâr enerjisinin kullanılmasıyla üretilen elektrik enerjisinin, diğer üretim teknikleri ile üretilen elektriğe göre maliyet ve miktar yönünden daha üstün durumda olmasına neden olmuştur.

Rüzgâr türbinlerinin kullanımının artması, daha verimli çalışan türbinlerin dizayn edilmesiyle mümkündür. Enerji verimliliği yüksek türbin tasarımlarında kanatçık dizaynı, en önemli tasarım kriteri olarak karşımıza çıkmaktadır. Kanatçık tasarımında göz önüne alınan aerodinamik tasarım parametreleri, rüzgâr türbininin enerji verimliliğini doğrudan etkiler. Rüzgâr türbin kanatçıklarının tasarımının doğruluğu, rüzgârdan çekilen enerjinin yüksek olacağı anlamına gelir. Bu konuda yapılan çalışmalar, genel olarak rüzgâr türbin kanatçık tasarımı ile ilgili olmakla beraber, dizayn edilen kanatçıkların optimizasyonu için yenilikçi metodların önerildiği çalışmalar da mevcuttur.

Bu çalışmada, model bir rüzgâr türbinine ait verilerin kullanılmasıyla, çeşitli kabuller dahilinde eksenel ve teğetsel akım indüklemeye faktörü değerleri

bulunarak, bunların rotorda meydana gelen torka ve dolayısıyla güce olan etkileri hesap edilmiştir.

Yeni tasarlanacak bir rüzgâr türbini için, mevcut rüzgâr türbinlerine ait test verilerinden yararlanmak çok büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada vurgulanmak istenen temel nokta, gerçek rüzgâr türbinleri için var olan çeşitli bilgilerin kullanılması ile bazı aerodinamik tasarım parametrelerine ulaşılabilesinin mümkün olup olmadığıdır. Bu kapsamda, yapılan bu çalışma ile Enercon 600 kW gücündeki rüzgâr türbinine ait, ölçümler sonucu elde edilmiş olan test verileri içerisinde güç katsayısı değerleri incelenmiş olup, bu değerlerin kullanımı sonucu eksenel ve teğetsel akım indüklemeye faktörleri için ortalama değerler hesap edilmiştir. Ayrıca eksenel ve teğetsel indüklemeye faktörü değerlerinin tork oluşumu üzerine olan etkileri de incelenerek bu parametrelerin önemi ortaya konmuştur.

Çalışmanın giriş bölümünde, bu çalışmaya ait temel odak noktalarından bahsedilerek, istenilen sonuca ulaşmak için takip edilen yol haritası açıklanmıştır.

İkinci bölümde, literatürde rüzgâr türbinleri ile ilgili olarak yapılmış olan en bilinen ve tasarım için kullanılması zorunlu olan temel çalışmalardan bahsedilmiştir. Genel literatür özetinden sonra, rüzgâr türbinlerinde son dönemlerde yapılan, kanatçıkların aerodinamik tasarımları ve tasarımları yapılmış olan kanatçıkların optimizasyonu ile ilgili olan çeşitli çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, rüzgâr enerjisi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin tarihsel gelişimi, rüzgâr enerjisi ve rüzgâr potansiyeli hakkında genel değerlendirmeler, Türkiye’de ve dünyada kurulu rüzgâr gücü kapasiteleri ile rüzgâr türbini çeşitleri ve bunların temel özellikleri anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, rüzgâr türbinleri için geliştirilen temel teoriler açıklanmıştır. Bu teorilerde yapılan kabuller ve bu kabuller dahilinde geliştirilmiş olan formüller incelenmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, model bir rüzgâr türbini için var olan güç katsayısı bilgilerinin kullanılması ile çeşitli tasarım parametreleri hesap edilmiştir. Burada kullanılan değerler, rüzgâr türbini üzerinde yapılan ölçümler neticesinde

elde edilerek, yapılan hesaplarda kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır. Hesaplanan ortalama eksenel ve teğetsel indüklemeye faktörü ifadelerinin tork üzerinde oluşturduğu etkileri incelemek üzere, tork değeri hesaplanarak çizelgelerde sunulmuştur.

Sonuç bölümünde ise çalışmaya ait veriler yorumlanmıştır. Beşinci bölümde hesaplanan eksenel ve teğetsel indüklemeye faktörü ifadelerinin, tork üzerinde meydana getirdiğı etkiler, sayısal büyüklükler halinde değerlendirilerek grafikler halinde sunulmuştur.

Yapılan bu çalışmada anlatılmaya çalışılan yaklaşımla, eksenel ve teğetsel indüklemeye faktörü ifadelerinin gerçek değeri bilindiğı bir rüzgâr türbini ile bu çalışmada kullanılan yöntemin uygulanması sonucu hesap edilen eksenel ve teğetsel indüklemeye faktörü değeri karşılaştırılarak; oluşturulan yöntemin uygunluğu, kullanılabilirliği ve hata miktarı gibi değerlendirmeleri içeren yeni çalışmaların da geliştirilmesi mümkündür.

2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Rüzgâr türbinleri ile ilgili olarak günümüze kadar oldukça yoğun bir biçimde çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar genelde kanatçık dizaynı ve optimizasyonu konularında olmakla beraber, belirli bölgelere ait rüzgâr potansiyellerinin belirlenmesi ile ilgili olan ve zorlu iklim şartlarında rüzgâr türbinlerinin dayanımlarını artırmayı amaçlayan geliştirici çalışmalar da yapılmıştır.

Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik tasarımları ile ilgili temel teorilerin ortaya çıkması 20. yüzyılın ilk çeyreğine rastlamaktadır. Bu süreçten sonra, yapılan çalışmaların sayısının artmasıyla beraber, boyut olarak da devasa büyüklüklerde rüzgâr türbinleri tasarlanarak imal edilmiştir. Rüzgâr türbinlerinde boyut, maliyet, üretilen enerji miktarı gibi kavramların beraber ele alınması sonucunda, optimum tasarımların önemi ortaya çıkmıştır.

2.1. Rüzgâr Türbinleri ile İlgili Olarak Yapılan Temel Çalışmalar

1900'lü yılların başında havacılıkta meydana gelen gelişmelere paralel olarak rüzgâr türbinlerinde de önemli gelişmelere tanıklık edilmiştir. Uçaklarda kullanılan pervaneler için meydana gelen her gelişme, doğrudan ve dolaylı olarak rüzgâr türbinlerine de katkı sağlamaktaydı. Alman fizikçi Betz, 1920 yılında rüzgâr-enerji dönüşümünün modern fiziksel temellerini ortaya koymuştur. Rüzgâr türbinleri için bütün bir rotor teorisi de yine Betz tarafından oluşturulmuştur [2]. 1936 yılında H. Glauert, momentum ve pala elemanı teorilerini birleştirerek klasik pervane teorisini yayınlamıştır [3]. Glauert, rüzgâr türbinleri için temel aerodinamik analiz konseptlerini oluşturarak, eksenel akışa enerji ve momentum denklemlerini uyguladıktan sonra iz bölgesindeki akışta meydana gelen dönü hareketini de hesaba katmıştır. Wilson ve arkadaşları, Glauert'in çalışmasını genişleterek rüzgâr türbinlerinde performans karakteristiklerinin hesaplanmasını adım adım göstermişlerdir. Yaptıkları analizler, 2 boyutlu pala elemanı teorisine dayanmakta olup, analizlerde kullanılan eksenel akım indükleme faktörü (a) ve teğetsel akım indükleme faktörü (a') değerleri iteratif yollarla hesaplanmıştır [4].

Betz teoremi, küçük hücum açıları ve hafif yükleme yaklaşımına dayanmaktadır. Theodorsen, Betz tarafından öne sürülen minimum enerji kaybı şartlarının yüksek yüklemelerde de geçerli olduğunu göstermiştir [5].

2.2. Rüzgâr Türbinlerinde Kanatçıkların Aerodinamik Tasarım Parametreleri ve Kanatçık Optimizasyonu ile İlgili Çalışmalar

Rüzgâr türbinlerinde, boş akış hızı ve rotor kanatçıklarından geçerek hareket eden hava akımının sahip olduğu teğetsel hız değerleri, tork oluşumunu etkileyen önemli büyüklüklerdir. Bir akım tübü boyunca hareket eden hava moleküllerinin eksenel hızında meydana gelen değişimi ifade eden eksenel akım indüklemeye katsayısı (a) ile rotorun önü ve arkası arasındaki teğetsel hız değişimini ifade eden teğetsel akım indüklemeye katsayısı (a') değerleri, rüzgâr türbin kanatçıklarının aerodinamik özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır.

Literatürde, rüzgâr türbin kanatçık tasarımları ve optimizasyonu ile ilgili olarak yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bununla beraber, çeşitli tiplerdeki rüzgâr türbin kanatçıkları etrafındaki akış incelenerek, akış modellemelerinin yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır.

Maalawi K. Y. ve Badawy M. T. S., yaptıkları çalışmada yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin performanslarını değerlendirmede kullanılan analitik ve doğrudan prosedürleri ortaya koyarak, performans analizlerindeki metodları incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma ile rüzgâr türbinleri için performans tahmini sağlayacak yeni bir formül geliştirerek, oluşturdukları bu formülü var olan model bir türbinin optimizasyonunda başarılı bir şekilde kullanmışlardır [4].

Neff D. E. ve Meroney R. N., çeşitli akış karakteristiklerinde dönen bir model rüzgâr türbin rotoruna ait aerodinamik etkileri, rüzgâr tünelleri yardımıyla deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında 0,53 metre rotor çapına sahip bir rüzgâr türbini kullanarak; farklı türbülans koşulları için, model rüzgâr türbininin performansını incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda farklı uç-hız oranlarında güç katsayısının değişim değerlerini sunmuşlardır [6].

Fuglsang P. ve Madsen H. A., yatay eksenli bir rüzgâr türbini için numerik bir optimizasyon metodu geliştirdiler. 1,5 MW gücündeki bir rotorun

sabit açısız hızdaki değeri için, minimum maliyeti sağlayacak olan optimum kanat profil karakteristiklerini ve güç değeriğini incelediler [7].

Magnusson M., yaptığı çalışmada bir rüzgâr türbini için iz bölgesi civarında rüzgâr tarafından oluşturulan hava akımını modellemiştir. Çalışmada logaritmik bir rüzgâr profili elde edilmesi durumunun iz bölgesindeki başlangıç durumunu nasıl etkileyeceği ortaya konmuştur. Dizayn edilen türbinlere ait farklı aerodinamik tasarım parametrelerinin kullanılmasının, farklı rüzgâr türbinlerinde farklı iz bölgelerinin oluşmasına neden olduğunu göstermiştir [8].

Vermeer L. J. ve arkadaşları yatay eksenli tek bir rüzgâr türbini ile rüzgâr çifliklerinde bulunan grup halindeki türbinlerin, iz bölgelerindeki aerodinamik durumu incelemiştir. Deneysel ve sayısal çözümlemelerle, iz bölgesi yakınındaki ve uzağındaki alanların aerodinamik durumunu analiz etmişlerdir [9].

Jureczko M. ve arkadaşları, 26 kesit halinde inceledikleri model bir türbin kanatçığının sparının burulduğu ve burulmadığı durumları incelemiştir. Aerodinamik analizlerinde, pala elemanı momentum teorisini esas alarak; imalat açısından basit yapı, düşük maliyetli, yüksek dayanımlı ve maksimum çıkış gücü sağlayarak bir çok kriteri hesaba katan ve optimum kanatçık dizaynını sağlayan paket bir bilgisayar programı geliştirmeyi amaçlamışlardır [10].

Kishinami K. ve arkadaşları; momentum, enerji ve pala elemanı teorilerini kullanarak yatay eksenli bir rüzgâr türbini için aerodinamik performans karakteristiklerini teorik olarak inceleyerek, aynı türbine ait bir modeli de deneylerinde kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarında üç farklı kanat profili, farklı boş akış hızlarında test edilmiştir. Yaptıkları çalışmada iki yaklaşım kullanmışlardır. Bunlar; itki-tork ve itki-enerji yaklaşımlarıdır. Bu iki yaklaşım sonucunda benzer veriler elde edilmesine rağmen, itki-enerji yaklaşımının kanatçıklar üzerinden geçen hava akımının kinetik enerjisini açıklamada daha üstün olduğunu göstermişlerdir [11].

Lanzafame R. ve Messina M., pala elemanı momentum teorisine göre oluşturulmuş bir matematiksel modelin kullanılması sonucu elde ettikleri tasarım verilerini, literatürde bulunan deneysel veriler ile karşılaştırarak, oluşturdukları matematiksel simülasyonun literatür verileri ile uygunluğunu incelemiştir. Elde edilen veriler, rotor performansının optimizasyonunda da kullanılmıştır [12].

Deglaire P. ve arkadaşları, dikey eksenli bir rüzgâr türbininin hareket halindeki kanatçıklarının etrafındaki akışa ait, analitik bir model geliştirmişlerdir. Oluşturulan bu model, viskoz etkileri göz önüne almadan kanatçıklar etrafındaki akışın, basınç dağılımının incelenmesine olanak vermiştir [13].

Yapılan literatür incelemesinden de anlaşıldığı üzere, rüzgâr türbinleri ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, kanatçıkların dizaynı ve optimizasyonu üzerinde yoğunlaşmaktadır. Türbinlerde kanatçık dizaynı ve optimizasyonu, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin ne kadarının kullanılabildiğinin ölçütüdür. Dolayısıyla eksenel doğrultudaki rüzgâr hızının diskteki değerini veren eksenel indükleme faktörü ifadesi ile rotordan geçen hava akımının teğetsel hız değerlerinin ne olacağını veren teğetsel indükleme faktörü ifadeleri, enerji verimliliğini etkileyen önemli kriterlerdir.

Bu çalışma ile elde edilen indükleme katsayısı ve tork değerleri, belli kabuller dahilinde elde edilmiş ortalama değerler olup, kullanımda olan rüzgâr türbinlerine ilişkin çeşitli ön bilgiler sağlayacak niteliktedir.

Rüzgâr türbinleri ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda, kullanımda olan rüzgâr türbinlerine ait ölçülebilen verilerden yararlanılarak, türbinler için çeşitli aerodinamik tasarım parametrelerinin mevcut durumları belirlenebilir. Yapılan bu çalışmalar, tasarımların geliştirilmesine katkı sağlayarak, kanatçık dizaynı ve optimizasyonu için yapılacak çalışmalar için de ön bilgi sağlayacaktır.

3. RÜZGÂR ENERJİSİ

3.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişim Süreci

İnsanoğlunun rüzgâr enerjisinden yararlanma düşüncesi çok eskilere dayanmakta olup, yaklaşık olarak 4000 yıllık bir süreci kapsadığı düşünülmektedir. Rüzgâr enerjisinden ilk olarak yelkenli gemilerde yararlanılmıştır ve bu kullanım, yel değirmenlerinin yapılandırılmasına örnek olmuştur [14,15].

Yel değirmenleri, geçmişte genellikle tahıl öğütmek ve su pompalamak amacıyla kullanılıyordu. Örneğin, M.Ö. 1700'lü yıllarda Babylon Kralı Hamurabi, Mezopotamya'da sulama işlerinde rüzgâr gücünden yararlanmıştır [14].

Tarihte ilk rüzgâr türbini, basit yapılı ve düşey eksenli olup, M.Ö. 200'lü yıllarda Persliler tarafından tahıl üretme işlerinde kullanıldığı sanılmaktadır. Daha sonraları tahta ve bez kullanılarak yapılan yatay eksenli yel değirmenleri geliştirilmiş, ağaç kesme işlemlerinde ve gemilerin hareketinde kullanılmıştır [18]. Afganistan'da, tahıl öğütmede kullanılan düşey eksenli bir rüzgâr türbini, Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Afganistan'da, tahıl öğütmek amacıyla kullanılan düşey eksenli bir rüzgâr türbini [2]

M.S. 11. yüzyılda, yel değirmenleri Ortadoğu’da yaygın biçimde kullanılmıştır. 13. yüzyılda rüzgâr gücünden yararlanma düşüncesi, Haçlılar tarafından Ortadoğu’dan Avrupa’ya taşınmıştır. Bu yıllarda yatay eksenli yel değirmenleri tarımsal ekonominin bir parçasıydı. 14. yüzyılda da Hollandalılar, yel değirmenlerinin geliştirilmesine öncülük etmiş; bu bölgelerde yel değirmenleri bataklıkların, göllerin ve deniz seviyesinin altındaki sulu alanların kurutulmasında, su pompalama amacıyla kullanılmıştır [16,17].

Ucuz fosil kaynaklı yakıtların kullanıldığı motorların keşfinden sonra, yel değirmenlerinin kullanımı kesintiye uğramıştır. Özellikle kömür, petrol ve doğal gaz gibi enerji kaynaklarının kolay elde edilebilmesi, bunların nakillerinin kolaylaştırılması, bununla birlikte içten yanmalı motorların küçük bir hacimde, istenen zamanda, büyük miktarda enerjiyi üretebiliyor olması nedeniyle yel değirmenlerinin modası geçmiştir [16].

Rüzgâr türbinlerinin elektrik üretiminde kullanılması, 19. yüzyılın sonlarında Amerika’da Brush tarafından 12 kW’lık DC rüzgâr türbin jeneratörünün üretilmesiyle imkan bulmuştur. 1920 ve 1926 yıllarında Albert Betz, şu an “Betz limiti” olarak bilinen maksimum rüzgâr türbini performansını ve optimum rotor kanatçık geometrisini hesaplamıştır. 1941’de Amerika’da inşa edilen 1250 kW’lık Smith-Putnam rüzgâr türbini; 53 m rotor çapına ve yunuslama (pitch) kontrollü türbin kanatçıklarına sahipti. 1950’de İngiltere’de Andrea Enfield, 100 kW’lık 24 m rotor çapına sahip rüzgâr türbinini inşaa etti. Danimarka’da 200 kW’lık 24 m rotor yarıçapına sahip Gedser rüzgâr türbini 1956’da inşa edilirken, Electricite de France, 1963’de 1.1 MW’lık 35 m rotor çapına sahip bir rüzgâr türbininin testini yapmıştır. 1950 ile 1960’lı yıllar arasında Almanya’da Prof. Hutter’a ait birçok yenilikçi ve hafif yapılı rüzgâr türbin tasarımı bulunmaktadır. Hutter, deneysel çalışmalarında rüzgâr türbinlerinin rotor palalarına modern aerodinamik teorilerini uygulamış, yapıları için modern cam fiber teknolojilerini kullanmıştır. Danimarkalı Poul la Cour doğru akım üreten rüzgâr türbinini tasarladıktan sonra, ünlü “Danimarka konsepti” olarak anılan rüzgâr türbinleri kullanılmaya başlandı. Poul la Cour’un elektrik üreten ilk rüzgâr türbini, Şekil 3.2’de gösterilmektedir [14,17].



Şekil 3.2. Poul la Cour'un elektrik üreten ilk rüzgâr türbini [2]

1973-74 yıllarındaki enerji krizi ile gelişen endüstriyel ve ekonomik güçler karşısında fosil yakıtların sınırsız olmadığı konusunda yaygınlaşan düşünceler, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi alternatif enerji kaynakları konusunu yeniden gündeme getirmiştir. Bu dönemlerde, petrol fiyatlarındaki ani artış neticesinde birçok ülkede hükümetler, devlet destekli araştırma ve geliştirme programları oluşturdular. Bu, Amerika'da 38 metre rotor çaplı 100 kW'lık rüzgâr türbinlerinin üretilmesi ile başlayıp, 1987'de 97,5 metre rotor çapına sahip 2.5 MW'lık örnek türbin serilerinin inşa edilmesi ile son bulmuştur. Benzer programlar İngiltere, Almanya ve İsveç'te de gerçekleştirildi. Hangi mimarının maliyet verimli olacağı hakkında belirsizlik vardı ve bazı yenilikçi tasarımlar gerçek ölçekte incelendi. Kanada'da 4 MW'lık Darrieus tip düşey eksenli rüzgâr türbini inşa edildi ve bu tasarım, USA'da test edildi. İngiltere'de düşey eksenli, H şeklindeki rotor geometrisini sağlaması için düz kanatçıkların kullanıldığı alternatif bir rüzgâr türbini Dr. Peter Musgrove tarafından önerilmiş ve 500 kW'lık örnek inşa edilmiştir. Belli bir süre kanatçık sayısında en iyi seçimin

hangisi olduğuna dair belirsizlik yaşanmış olsa da büyük rüzgâr türbinleri tek, çift ya da üç kanatçıklı olarak inşa edildiler [16,17].

Hükümet destekli projelerden elde edilen bilgiler, rüzgâr türbinleri ile ilgili çalışmaların sayısını büyük miktarda artırmıştır. Ancak uygulamada karşılaşılan birçok problem, türbinlerin güvenilirliklerini düşürmüştür. Küçük rüzgâr türbinleri, kurulum ve bakım kolaylıkları gibi etkiler nedeniyle 20. yüzyılın son çeyreğinde oldukça yaygın kullanım alanı buluyordu. Günümüzde, tüm dünyada yaygın olarak kullanılan Danimarka konsepti rüzgâr türbini olarak adlandırılan 3 palalı tasarım, oldukça başarılı bulunmuştur. Şekil 3.3’de Danimarka konsepti olarak bilinen rüzgâr türbinleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Danimarka konsepti olarak bilinen rüzgâr türbinleri [18]

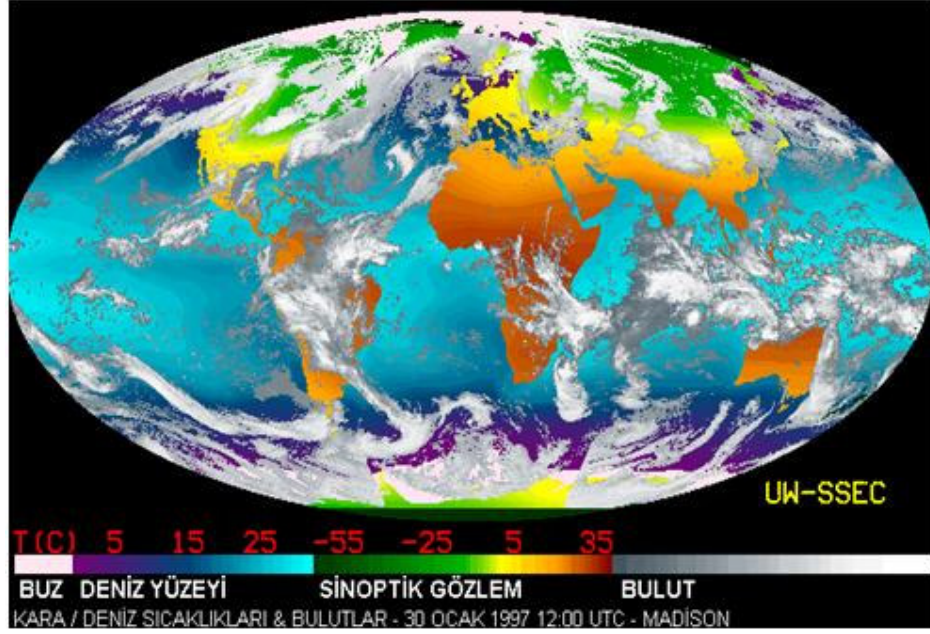
1973’den sonra rüzgâr enerjisindeki gelişimin tetikleyicisi, yakıt fiyatlarındaki artış ve fosil kaynaklı yakıtların sınırlılığından kaynaklanıyorken, günümüzde rüzgâr türbinlerinin elektrik üretiminde kullanılmasının temel sebepleri; tüm imalat, operasyon ve hizmetten alma süreçleri boyunca CO₂ emisyonunun azlığı ile rüzgâr türbinlerinin iklim değişikliğini sınırlandırmaya yapabileceği katkının fazlalığı olarak ortaya çıkmaktadır [17]. Tüm dünyada rüzgâr türbinlerindeki kurulu güç kapasitesinin her geçen gün artması,

yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgâr türbinlerinin önemini ortaya koymaktadır.

3.2. Rüzgâr Enerjisi Hakkında Genel Bilgiler

Yeryüzünün ihtiyaç duyduğu enerjinin tamamı güneşten gelir [19]. Tüm fosil esaslı tükenen veya tükenmeyen enerjinin kaynağı güneştir. Dünyamızın içinde bulunduğu samanyolunda güneş, egemen enerji kaynağıdır ve güneşten dünyamıza saatte 100 milyar MW’lık enerji ulaşmaktadır. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık % 2’lik kısmı rüzgâr enerjisine dönüştürülebilmektedir [20].

Güneş ışınimleri; havayı doğrudan ısıtmak yerine, önce yer yüzeyine ulaşır, buradaki yüzey katmanlarını ısıtır ve ısınan bu katmanlardan geri yansıyan ışınimler sonucunda, hava molekülleri ısınmaya başlar [21]. Sıcak hava soğuk havadan daha hafiftir ve ısınma sonucunda yukarıya doğru yükselir. Bu yükselme 10 km’lik bir mesafe boyunca gerçekleşebilir. Yeryüzünde güneş ışığına maruz kalan cisimlerin farklı ısı tutma kapasiteleri olduğu için, güneş ışınları (radyasyon), yer yüzeyinin farklı miktarlarda ısınmasına neden olur. Başka bir deyişle; karalar, denizler ve hava küre farklı özgül ısılara, dolayısıyla farklı sıcaklıklara sahip olur [22]. Şekil 3.4’deki 1997 yılında kızılötesi fotoğraflama yöntemi ile çekilmiş uydu fotoğrafı, deniz ve karalara ait yüzey sıcaklıklarını göstermektedir.



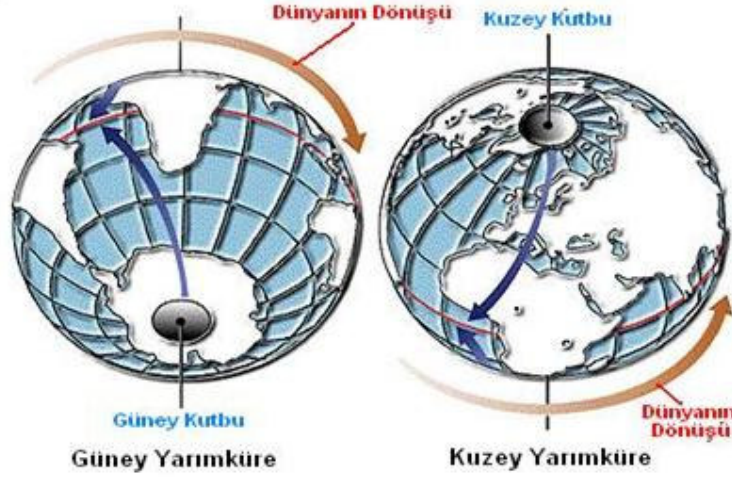
Şekil 3.4. 1997 yılında kızılötesi fotoğraflama yöntemi ile çekilmiş, deniz ve karalara ait yüzey sıcaklıklarını gösteren uydu fotoğrafı [23]

Yer yüzeylerinin farklı ısınması, bu yüzeylerle temas halinde olan hava moleküllerinin sıcaklığının, neminin ve basıncının farklılaşmasına neden olarak, bu etkiler altında havanın hareket etmesini sağlar. İşte bu durum, yeryüzünde rüzgârların oluşumuna neden olan temel sebeptir. Rüzgâr, güneş enerjisinin dolaylı bir ürünüdür ve yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eder [24].

Ekvator ve çevresi, güneş ışınlarının yer yüzeyine geliş açılarındaki farklılıklar nedeniyle, güneş tarafından diğer enlemlere göre daha çok ısıtılır. Bu nedenle büyük ölçekli rüzgârlar, ekvatorun kutuplardan daha fazla ısınması sonucunda oluşur [16,22].

Dünyamızın kendi eksenini etrafında belirli bir hızda dönmesi, kuzey ve güney yarım kürelerde farklı etkilere yol açmaktadır. Dünyada, kuzey yarım küredeki her hareketin sağa eğimli olduğu, güney yarım küredeki her hareketin ise sola eğimli olduğu görülür. Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi ile yarım kürelerde oluşan bu büküm kuvvetlerine “Coriolis Kuvveti” denir [20].

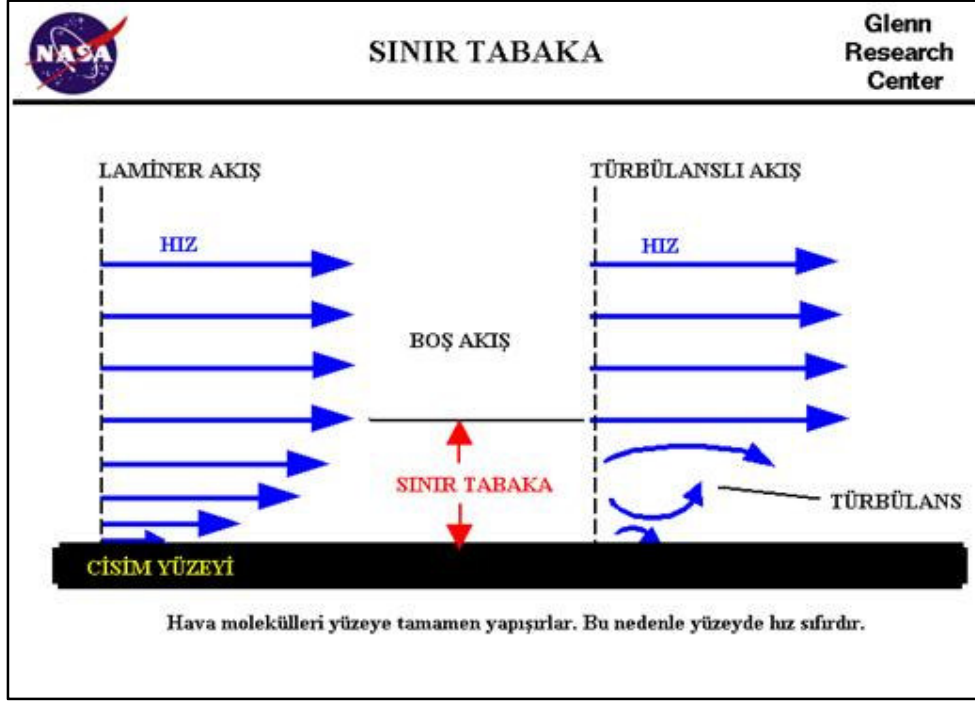
Yeryüzünde oluşan hava kütlesi hareketleri, yerin dönmesinden kaynaklanan Coriolis kuvvetinden ve yer yüzeyi ile akışkan hava kütlesi arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenir. Hareket eden hava, kuzey yarım kürede sağa, güney yarım kürede sola sapar [22]. Şekil 3.5’de Coriolis eğme kuvvetlerinin etkisinde rüzgârın hareketi gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Coriolis eğme kuvvetlerinin etkisi ile rüzgâr hareketi [25]

3.2.1. Rüzgârlar ve özellikleri

Hava olaylarının tamamı, atmosferin dünya yüzeyine en yakın tabakası olan troposfer tabakasında gerçekleşir [22]. Dünyada meydana gelen rüzgârları küresel ve yerel rüzgârlar olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür. Küresel rüzgârlar, dünya yüzeyinde meydana gelen farklı ısınmalardan kaynaklanan basınç farkları sonucunda oluşan rüzgârlardır. Bu rüzgârlar dünya çapında sirkülasyonların oluşmasına neden olur. Tropik rüzgârlar, muson rüzgârları, orta enlem rüzgârları ve kutup rüzgârları, küresel rüzgârlara örnek gösterilebilir. Yerel rüzgârlar, rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan rüzgâr türüdür. Genellikle kara-deniz etkileşimi, gündüz-gece değişimleri, topoğrafik yapı, kanal etkisi gibi sebeplerle ortaya çıkar. Kara ve deniz meltemleri, dağ ve vadi rüzgârları gibi



Şekil 3.7. Laminer ve türbülanslı akış için sınır tabaka [29]

Yüzeyle doğrudan temas halinde olan hava molekülleri, yüzeye tamamen yapışık haldedir ve bu moleküllerin hızı sıfırdır. Bu durum “kaymaz durum” olarak tanımlanır ve yüzeyden uzaklaştıkça tabaka tabaka akışkan moleküllerinin hızı artar. Çeşitli nesnelerin yüzeyleri etrafındaki sınır tabaka kalınlıkları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı nesneler için sınır tabaka kalınlıkları [28]

Nesne	Akışkan	Akış Hızı	Sınır Tabaka Kalınlığı
Süpersonik Savaş Uçağı Kanadı	Hava (Rüzgâr)	500 m/sn	Bir kaç mm
1 metre Veter Uzunluğuna Sahip Planör Kanadı	Hava (Rüzgâr)	20 m/sn	Bir kaç cm

Çizelge 3.1. (Devam) Bazı nesneler için sınır tabaka kalınlıkları [28]

200 m Uzunluğunda Gemi	Su	10 m/sn	1m
Okyanus	Hava (Rüzgâr)	10 m/sn	30 m
Kara Yüzeyi	Hava (Rüzgâr)	10 m/sn	100 m

Atmosferik sınır tabaka, yer yüzeyinde meydana gelen değişikliklerden en hızlı şekilde etkilenen ve bu etkilenmeye hızlı bir şekilde tepki veren tabaka olarak tanımlanabilir. Yer yüzeyi yakınlarında atmosferik sınır tabakaya kadar olan bölgedeki rüzgârın karakteristiği değişkenlik göstermektedir. Buna göre yüzeye yakın bölgelerdeki akış, türbülanslı karakteristik gösterirken, yüzeyden uzaklaştıkça yüzey pürüzlülüğünün etkileri azaldığı için laminar akış karakteristikleri artmaktadır. Sınır tabakadan sonraki bölümde, akış tamamen laminar bir hal alır.

3.3. Rüzgâr Potansiyelinin Belirlenmesi

Rüzgâr türbini işletimi ile ilgili olarak yapılacak ilk çalışma, rüzgâr türbinin kurulmasının planlandığı bölge için, rüzgâr potansiyeli çalışmasının yapılmasıdır. Seçilen sahada rüzgâr enerji santrali kurmak fiziksel, çevresel, teknik ve yasal açılarından mümkün olmayabilir. Bu nedenle şu kriterler dikkate alınmalıdır:

- Sahaya ulaşım kolaylığı
- Enerji nakil hatlarının ve trafo merkezlerinin güç kapasitesi
- Üretilen enerjinin nakli için trafo merkezlerine olan uzaklık
- Sahanın yol ve diğer çalışmalar için işleme kolaylığı
- Arazinin eğimi
- Sahanın alansal olarak yeterliliği

- Sahada arazi kullanım şekli ve mülkiyeti
- Sahanın bitki örtüsü
- Sahanın hakim rüzgâr yönüne göre durumu
- Sahanın yerleşim birimlerine olan uzaklığı
- Sahanın imar durumu
- Sahanın askeri ve sivil radar ve benzer tesislere olan yakınlığı
- Sahanın sit, milli park, orman arazisi veya diğer kapsamda olup olmadığı
- Sahanın doğal yaşam etkinlikleri ve ekolojik açıdan önemi
- Sahanın jeolojik yapısı
- Yeraltı su kaynaklarının analizi
- Yakın civarda yaşayanların rüzgâr santrallerine bakış açısı
- Sahanın buzlanma, yağmur, yıldırım ve atmosferik kararlılık durumları
- GSM kapsama alanının tespiti
- Yasal yükümlülükler
- Yerel elektrik dağıtım şirketi ile yapılacak görüşmelerin sonuçları [30].

Bölgenin rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, rüzgâr enerjisi gözlem istasyonlarının kurularak rüzgâr ölçüm direkleri vasıtasıyla, belirli yüksekliklerde rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve rüzgâr sıklığı (frekansı) gibi bilgilerin belirli zaman dilimleri için ölçülmesidir. Doğrudan ölçüm yaparak rüzgâr potansiyeli verilerinin belirlenmesi kullanışlı bir yöntem olmakla beraber, genellikle bir bölgenin potansiyelini belirlemek amacıyla, rüzgâr ve güneşin mevsimsel özellik gösteriyor olmaları gerekliliğinden dolayı en az 1 yıllık veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgâr verilerinin analizinde yaygın olarak “Weibull ve Rayleigh Dağılımları” kullanılır. Bu dağılımlar matematiksel olasılık fonksiyonları olup, yapılan birçok çalışma bölgelerdeki rüzgâr verilerinin davranışlarının bu dağılımlara uygun olduğunu göstermiştir. Potansiyel belirleme çalışmalarının güvenilir bir şekilde sonuçlandırılabilmesi için

bölgenin pürüzlülük durumu, bölgede bulunan engel bilgileri ve bölgenin topografik yapısı da dikkate alınmalıdır [31].

Rüzgâr ölçümleri çoğunlukla 10 metre ve 30 metre yüksekliklerde yapılmaktadır. Veriler birer saatlik ve 10’ar dakikalık periyodlarla toplanmakta, yazılım programı kullanılarak işlenmekte ve arşivlenmektedir.

Rüzgâr verilerinin analizini sağlayan bilgisayar programları analizlerini, rüzgâr hız verilerinin 2 parametrelili Weibull ve Rayleigh dağılımlarına uygun bir dağılım gösterdiğini varsayarak yapmaktadır. Bu tip programlar, benzer algoritmalar kullanmakla birlikte; saatlik rüzgâr verisi, bölgeye ait pürüzlülük durumu, yakın çevreye ait engel bilgileri ve bölgenin topolojik yapısına ait girdileri kullanmaktadır.

3.4. Türkiye’de ve Dünyada Rüzgâr Gücü Kapasitesi

Rüzgâr enerjisi, sağlamış olduğu avantajların çokluğu nedeniyle tüm dünyada ve Türkiye’de yaygın kullanım alanına sahip yenilenebilir bir enerji kaynağı türüdür. Ülkelerin enerji politikaları içerisinde rüzgâr enerjisinin yeri ve önemi, işletilen rüzgâr türbinlerinin toplam kapasitesi ile anlaşılabilir. Türkiye son yıllarda rüzgâr enerjisine yüksek seviyede yatırımın yapıldığı ülkeler arasındadır. Türkiye’nin sahip olduğu rüzgâr potansiyeli araştırıldığında, yapılan yatırımların daha da artırılması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

3.4.1. Türkiye’de kurulu rüzgâr gücü kapasitesi

Şekil 3.8’de, Türkiye’de kurulu rüzgâr kapasitesine ait 2010 yılı verileri bulunmaktadır. Şekil incelendiğinde, özellikle 2007 yılından itibaren birçok farklı firmanın farklı türbin modellerini kullanarak, değişik sayılarda rüzgâr türbinlerinden oluşan santral yatırımları yaptığı görülmektedir. Veriler, son yıllarda santral kapasitelerinde büyük artışların meydana geldiğini de göstermektedir.

Türkiye'de İşletmedeki Rüzgar Elektrik Santral Projeleri						
Mevkii	Şirket	Güç (MW)	Tarih	Türbin Markası	Türbin (MW)	Türbin Adedi
İzmir-Çeşme	Alize	1.50	1998	Enercon	0.5	3
İzmir-Çeşme	Ares Alaçatı	7.20	1998	Vestas	0.6	12
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt Sun'i Jüt	1.20	2003	Enercon	0.6	2
Balıkesir-Bandırma	Yapısan	30.00	2006	GE	1.5	20
İzmir-Çeşme	Mare Manastır	39.20	2006	Enercon	0.8	49
İstanbul-Silivri	Teperes	0.85	2007	Vestas	0.85	1
Çanakkale-İntepe	Anemon	30.40	2007	Enercon	0.8	38
Manisa-Akhisar	Deniz	10.80	2007	Vestas	1.8	6
Çanakkale-Gelibolu	Doğal	14.90	2007	Enercon	0.8 ve 0.9	13 adet 0.8 5 adet 0.9
Manisa-Sayalar	Doğal	34.20	2008	Enercon	0.9	38
İstanbul-Çatalca	Ertürk	60.00	2008	Vestas	3	20
İzmir-Aliğa	İnnores	57.50	2008	Nordex	2.5	23
İstanbul-GOP	Lodos	24.00	2008	Enercon	2	12
Muğla-Datça	Dares	29.60	2008	Enercon	0.9	37
Hatay-Samandağ	Deniz	30.00	2008	Vestas	2	15
Aydın-Didim	Ayen	31.50	2009	Suzlon	2.1	15
Balıkesir-Şamlı	Baki	90.00	2009	Vestas	3	30
Hatay-Belen	Belen	30.00	2009	Vestas	3	10
Tekirdağ-Şarköy	Alize	28.80	2009	Enercon	2 ve 0.9	14 adet 2 1 adet 0.9
İzmir-Urla	Kores Kocadağ	15.00	2009	Nordex	2.5	6
Çanakkale-Ezine	Alize	20.80	2009	Enercon	2 ve 0.8	10 adet 2 1 adet 0.8
Balıkesir-Susurluk	Alize	20.70	2009	Enercon	0.9	23
İzmir-Bergama	Ütopya	15.00	2009	GE	2.5	6
İzmir-Çeşme	Mazı-3	30.00	2009	Nordex	2.5	12
Balıkesir-Bandırma	Akenerji	15.00	2009	Vestas	3	5
Balıkesir-Bandırma	Borasco	45.00	2009	Vestas	3	15
Osmaniye-Bahçe	Rotor	95.00	2010	GE	2.5	54
Manisa-Soma	Soma	49.50	2010	Enercon	0.9	55
Balıkesir-Bandırma	As Makinsan	24.00	2010	Nordex	3	10
Mersin-Mut	Akdeniz	33.0	2010	Vestas	3	11
Çanakkale-Bozcaada	Bores	10.20	2000	Enercon	0.6	17
İzmir-Aliğa	Bergama	90.00	2010	Nordex	2.5	36
Edirne Enez	Boreas	15.00	2010	Nordex	2.5	6
Kapasite Toplamı	1029.85 MW					

Şekil 3.8. 10 Mayıs 2010 itibarıyla Türkiye’de işletimde olan rüzgâr santralleri ve toplam enerji üretim kapasitesi [32]

3.4.2. Dünyada kurulu rüzgâr gücü kapasitesi

Şekil 3.9’da dünyada kurulu rüzgâr türbin gücü kapasitesine ilişkin bilgiler verilmektedir. Bu bilgiler incelendiğinde rüzgâr enerjisine olan yatırımın tüm dünyada yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Şekilde, 2010 yılı kurulu kapasite değerinin, 2001 yılında var olan değerin yaklaşık 8,5 katına çıktığı görülmektedir. 9 yıl gibi kısa bir sürede gerçekleşen bu artış, rüzgâr enerjisine yapılan yatırımlara verilen önemin tüm dünyada arttığının göstergesidir.



Şekil 3.9. Dünyada kurulu rüzgâr türbin gücü kapasitesi [35]

3.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri, birçok farklı kriter baz alınarak sınıflandırılmaktadır. Örneğin rüzgâr türbinlerinin dönme eksenlerinin yatay veya dikey oluşu, güç kontrol sistemlerinin yapıları, rotorun dönüş hızı, rüzgârı önden veya arkadan alışı ve kullanım yerleri gibi kriterlere göre sınıflandırmalar yapılabilmektedir. Yapılan bu sınıflandırmalar ile rüzgâr türbinlerinin kullanım amacına uygun olarak

maksimum verimi sağlayabileceği şartlar yaklaşık olarak verilmektedir. Böylece, tasarım yapılmadan önce, türbinin kurulması planlanan yere en uygun türbin yapısının hangisi olduğuna dair ön bilgiler elde edilebilmektedir.

3.5.1. Eksen yapılarına göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri rotor kanatçıklarının etrafında dönmüş olduğu eksen yapılarına göre, düşey eksenli ve yatay eksenli olmak üzere iki grupta sınıflandırılır.

3.5.1.1 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Bu tür türbinlerde, rüzgârın geliş doğrultusu, rotorun etrafında dönmüş olduğu eksen ile 90 derecelik açı yapar. Bu türbinler için en önemli özellik, jeneratör ve dişli sisteminin yer seviyesinde yapılabilmesidir. Bu nedenle, tasarımlarında kuleye ihtiyaç duyulmayabilir. Yapısal açıdan daha basit yapıldıkları ve kurulumları kolaydır. Savonius, Darrieus ve H-Darrieus olmak üzere üç farklı yapıda olabilirler. Bu gruptaki rüzgâr türbinlerinin güç katsayısı değerleri ortalama 0,15 değerinden az oldukları için kullanımları çok yaygın değildir [34].

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin sağlamış olduğu önemli avantajlardan birisi, türbinin rüzgara doğru konumlandırılma zorunluluğunun olmamasıdır. Düşey eksenli bir rüzgar türbini rüzgarı aldığı yöne bağlı olmaksızın, kanatçıkları üzerinde uygun aerodinamik şartların oluşması neticesinde dönmeye başlar. Dönü hareketi, dönünün gerçekleştiği shaft üzerinde büyük miktarlarda gerilmeler meydana getirir. Ayrıca bu gerilmeler, kanatçıklar üzerinde bükülme momenti olarak da kendini gösterir. Şekil 3.10'da düşey eksenli bir rüzgâr türbini gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Düşey eksenli bir rüzgâr türbini örneği [35]

3.5.1.2 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde, rüzgârın geliş doğrultusu ile kanatçıkların etrafında dönmüş olduğu eksen birbirine paraleldir. Bu tip türbinlerde kanatçıklar, rüzgâra dik pozisyonda olup; rüzgârı alış yönüne göre arkadan veya önden rüzgârlı; kullanılan kanatçık sayısına göre de tek, çift, üç kanatlı veya çok kanatlı şekillerde dizayn edilebilir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde güç katsıyı değeri ortalama % 40 mertebelerindedir. Şekil 3.11’de yatay eksenli bir rüzgâr türbini gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Yatay eksenli üç kanatçıklı modern bir rüzgâr türbini [36]

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde, kullanılan kanatçık sayısının belirlenmesi birçok parametreye bağlı olmakla birlikte dönme momentinde kararlı bir yapının gözlemlenmesi, titreşim ve gürültü oluşmasına neden olacak koşulların üç kanatlı yapıda minimum seviyelerde olması gibi etkenler, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde üç kanatçık kullanılmasında temel sebepler olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.5.2. Rüzgâr hızına göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri, işletildikleri rüzgâr hızına göre yüksek hızlı veya düşük hızlı rüzgâr türbinleri şeklinde sınıflandırılabilir. Rüzgâr türbinlerinde az sayıda kanatçık kullanılması rotorun hafiflemesini sağlayarak, rotorun hızlı

dönüşüne olanak sağlar. Çok sayıda kanatçık kullanımı ise düşük rüzgâr hızlarında bile türbinin devreye girerek çalışmaya başlamasına olanak verir.

3.5.2.1 Düşük hızlı rüzgâr türbinleri

Düşük hızlı rüzgâr türbinleri 2-3 m/sn hızlarında kendiliğinden çalışmaya başlar. Bunlar genellikle hızları 3-7 m/sn arasında değişen rüzgârlarda kullanılırlar. Elektrik üretimi için verimli olmamakla birlikte, genellikle su pompalama gibi işlerde kullanılırlar. Kanatçık sayılarının fazla olması nedeniyle çok büyük boyutlarda inşa edilmezler [34].

3.5.2.2 Yüksek hızlı rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinlerinin yüksek hızda çalışabilmeleri, hafif olmalarını gerektirir. Bu tip rüzgâr türbinleri genelde üç kanatçıklı olup elektrik üretiminde sıklıkla kullanılırlar. Verimleri yüksek olmakla beraber, estetik görünümleri ve dönüş kararlılığına sahip olmaları tercih edilmelerinde etkilidir.

3.5.3 Rotor hızına göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinlerinde rotorun dönüş hızına ait karakteristik özellikler, türbinde kullanılacak jeneratör seçimi için belirleyici kriterler olarak karşımıza çıkmaktadır. Rotor dönüş hızına göre rüzgâr türbinleri sabit hızlı, iki hızlı ve değişken hızlı rüzgâr türbinleri olmak üzere üç grupta incelenebilir.

3.5.3.1 Sabit hızlı rüzgâr türbinleri

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde, rotor sabit bir hızda dönerek sabit güç üretimi sağlar. Bu sistemin tasarımının ve uygulanabilirliğinin kolay olması şebeke bağlantılı pek çok rüzgâr türbininde kullanılmasına neden olmuştur. Belirlenmiş olan nominal rüzgâr hızı değerinde maksimum verimde çalıştıklarından dolayı, bu hız değerinden uzaklaşmaya başlandıkça verimi düşer [34].

3.5.3.2 İki hızlı rüzgâr türbinleri

İki hızlı rüzgâr türbinleri, iki farklı hız değerinde döndükleri için; verimli olarak çalışılabildiği hız aralığının artmasını sağlar. Bu sayede sabit hızlı rüzgâr türbinlerine göre daha esnek kullanım şartlarına sahip olurlar. Verimleri sabit hızlı rüzgâr türbinlerine göre daha yüksek olduğundan, geniş kullanım alanına sahiptirler.

3.5.3.3 Değişken hızlı rüzgâr türbinleri

Geniş bir hız aralığında, verimli bir şekilde enerji çıkışı sağlayabilen sistemlerdir. Rüzgâr türbin rotoru değişik rüzgâr hızlarında, değişik hızlarda dönerek enerji üretimi sağlar. Bu sistemler için, farklı rüzgâr hızlarında farklı güç kontrol kombinasyonlarının uygulanmasının gerekliliğinden dolayı, iyi dizayn edilmiş bir elektronik kontrol sistemine ve yazılım altyapısına sahip olmaları gerekmektedir. Bu da maliyetlerinin diğer tipteki türbinlere nazaran fazla olmasına yol açmaktadır.

3.5.4. Güç kontrol sistemlerine göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri, çalışmaları için belirlenen optimum rüzgâr hızı değerlerinin dışında, olumsuz hava koşulları vb. durumlar neticesinde kötü operasyonel şartlara maruz kalabilmektedir. İşte böyle durumlarda, türbinin zarar görmesini engelleyebilmek için güç kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulur. Bu sistemler aşırı rüzgâr hızı gibi olumsuz koşullarda; türbin kanatçıklarının pozisyonlarını ayarlayarak, rotorun dönüş hızını emniyetli seviyelerde tutmaya çalışır. Güç kontrol sistemlerine göre rüzgâr türbinleri; stall kontrollü, yunuslama (pitch) kontrollü ve aktif stall kontrollü olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır.

3.5.4.1 Stall kontrollü rüzgâr türbinleri

Stall kontrollü türbinler, emniyetli işletim sağlar. Rüzgâr hızındaki artışa bağlı olarak hücum açısının da artması ile birlikte rotor kanatçıklarının stall etkisine girmeye başlamasıyla güç kontrolü sağlar. Başka bir deyişle, rotor kanatçıklarının aerodinamik tasarımları; rüzgâr türbini için belirlenmiş olan çalışma hız aralığının üzerindeki hızlarda, aerodinamik performansın düşmesini sağlayarak rotor hızının emniyetli seviyelerde tutulması sağlanmaktadır.

3.5.4.2 Yunuslama (Pitch) kontrollü rüzgâr türbinleri

Yunuslama kontrollü rüzgâr türbinlerinde, türbinin yüksek rüzgâr hızlarında emniyetli çalışabilmesi için kullanılan özel bir kanatçık mekanizması bulunmaktadır. Bu mekanizma sayesinde rotor kanatçıkları uzunlamasına eksenleri etrafında hareket ettirilebilmektedir. Bu durum, değişken rüzgâr hızlarında kanatçıklardaki hücum açısının artırılıp azaltılması kontrolüne imkan tanıyarak verim artışına neden olur. Yunuslama kontrollü rüzgâr türbinlerinin sahip olmaları gereken ek mekanizmanın yapısı ve rüzgâr karakteristiklerindeki ani değişimlere karşı, sistemin hassasiyet seviyesi göz önünde bulundurulmalıdır.

3.5.4.3 Aktif stall kontrollü rüzgâr türbinleri

Aktif stall kontrollü türbinler, yunuslama kontrollü türbinlere benzerler. Yunuslama kontrollü türbinlerde sistem; nominal hızın üzerine çıkıldığında palayı, hücum açısını düşürecek şekilde döndürürken, aktif stall kontrollü türbin palayı ters yönde çevirerek türbini stall etkisine sokar [37].

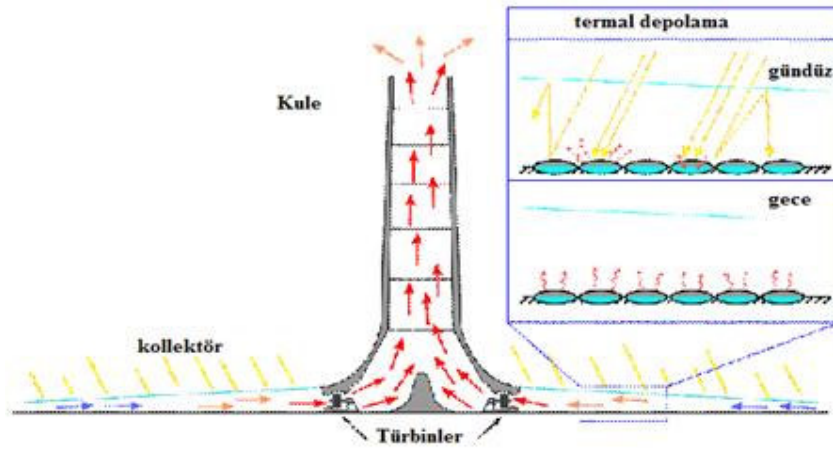
3.5.5. Yükselen hava akımlı rüzgâr türbinleri

Yükselen hava akımlı rüzgâr türbinleri, güneş ve rüzgâr enerjilerinin birlikte kullanıldıkları bir enerji dönüşüm sistemidir. Çalışma sistemi, ısınan ve dolayısıyla yoğunluğu azalan havanın hareketinden yararlanılarak, hava

moleküllerinin ihtiva ettiği enerji içeriğini kullanmaya yöneliktir. Şekil 3.13’de yükselen hava akımlı bir rüzgâr türbin örneği verilmektedir [37].



(a)



(b)

Şekil 3.12. Yükselen hava akımlı rüzgâr türbini. (a) dış görünüm ve (b) kesit görünümü [37]

4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN TEORİLER

Rüzgâr türbinleri için oluşturulan birçok teori bulunmakta olup, bunlar çeşitli kabuller dahilinde ortaya çıkmışlardır. Akçüatör Disk teorisinde, disk geçen hava akımının aksenal momentumunda meydana gelen değişim incelenir. Burada aksenal doğrultuda hava akımının kaybetmiş olduğu enerji, rotor düzleminden geçen hava moleküllerinin teğetsel hızında meydana gelen artışa kaynaklık eder. Rotor Disk teorisinde, disk geçen hava akımının teğetsel hızında meydana gelen değişim incelenerek, tork ve güç artışı denklemleri oluşturulmuştur. Rotor Pala (Kanatçık) teorisi ise kanatçık üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetleri dikkate alır.

4.1. Akçüatör Disk Teorisi

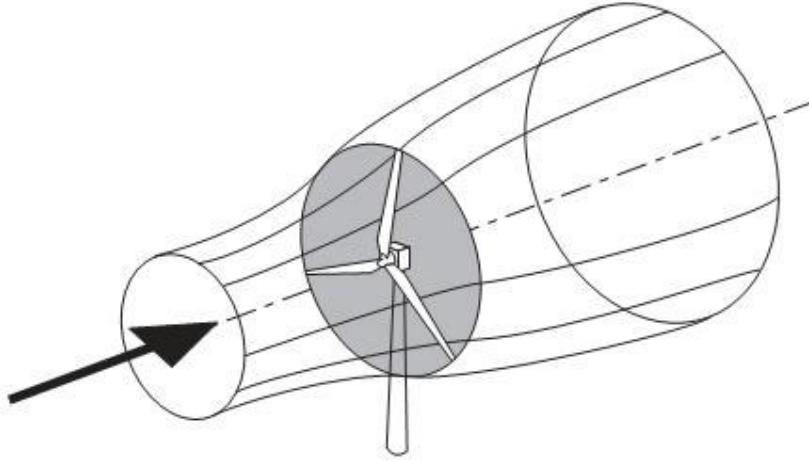
Rüzgâr türbinleri, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmını, türbin kanatçıkları vasıtasıyla rotorda dönü hareketine çevirir. Rotorda oluşan bu dönü hareketinin kaynağının, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji olması ve bu dönü hareketi ile kullanım amacı doğrultusunda başka bir kaynağa enerji aktarılması (elektrik üretimi vb.), rotorun önü ve arkasında rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji değerleri arasında bir fark oluşmasına neden olur. Başka bir deyişle, rüzgâr türbini kanatçıklarının arkasındaki hava molekülleri, kanatçıkların önündeki hava moleküllerinden daha az enerji taşımaktadırlar.

Hava hızının 100 m/sn değerinin altında olması durumunda, havanın yoğunluğunun akım tübü boyunca sabit kabul edilmesinde bir sakınca yoktur. Düzgün akış şartlarında (steady flow), akım alanı içerisinde seçilen herhangi bir noktada basınç, hız, sıcaklık ve yoğunluk gibi akış özellikleri zamanla değişmez. Akım tübü içerisinde alınan herhangi bir kesit üzerindeki tüm noktalarda akım özellikleri aynı ise bu durumda akış tek boyutlu akış olarak adlandırılır [30]. Rüzgâr türbinleri için geliştirilen teoriler bu kabuller dahilinde oluşturulmuştur. Akçüatör disk teorisi aşağıdaki kabuller dahilinde sistemi izah etmektedir:

- Akış, ideal (düzgün, homojen, viskoz olmayan, dönüsel olmayan ve sıkıştırılabilir olmayan) kabul edilir.

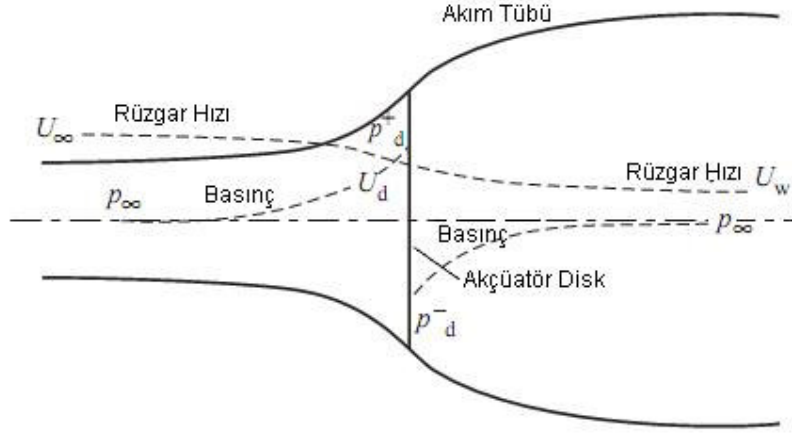
- Akış ve akıştan kaynaklanan itki kuvvetinin disk üzerinde homojen olarak dağıldığı kabul edilir.
- Akım tübü sınırlarındaki her noktada statik basınç, çevrenin sahip olduğu statik basınç değerindedir [38].

Aküatör disk teorisinde; kütlenin korunumu, eksenel momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri kullanılır. Bu denklemlerin, sistem olarak kabul edilen akım tübü içerisinde hareket eden akışkana uygulanması sonucu, minimum enerji kayıplı bir rüzgâr türbininin, rüzgârın kinetik enerjisinin en fazla ne kadarını kullanabildiği hesap edilebilmektedir.



Şekil 4.1. Bir rüzgâr türbini için oluşan akım tübünün yapısı [17]

Akım tübü içerisine birim zamanda giren hava kütlesi, kütle debisi olarak adlandırılır. Teorilerde yapılan incelemelerde, kütle debisinin sahip olduğu enerji miktarındaki değişimlere odaklanılmaktadır. Akım tübü içerisinde hareket eden hava debisinin hız, basınç gibi akış özellikleri, akım tübü boyunca değişiklik gösterir. Örneğin rüzgâr hızı azalma eğilimi gösterirken, diskin hemen önüne kadar olan bölgede, statik basınç değerinde artış meydana gelmektedir. Diski geçen hava akımının statik basıncı, disk kalınlığı mesafesinde aniden düşer. Meydana gelen bu değişiklikler, Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Akçüatör diskte meydana gelen ani basıñç düşüşü ve rüzgâr hızında meydana gelen azalma

4.1.1. Eksenel momentum teorisi

Akım túbü içerisinde yoğunluk her noktada sabit olduğu için, birim zamanda túb içerisinde herhangi bir kesitten giren ve başka bir kesitten çıkan kütle miktarları eşit olmak durumundadır.

$$\rho_{\infty} A_{\infty} U_{\infty} = \rho_d A_d U_d = \rho_w A_w U_w \quad (4.1)$$

Diskteki hava hızı eksenel indüklemeye faktörü (a) ve rüzgârın boş akış hızı (U_{∞}) cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$U_d = U_{\infty}(1 - a) \quad (4.2)$$

Akım túbü sistem olarak kabul edildiğinde, sisteme giren hava debisinin eksenel momentumunun değişim oranı aşağıdaki gibi yazılır.

$$F = \dot{m}(U_{\infty} - U_w) \quad (4.3)$$

Eksenel momentumun değişim oranı kuvvetin bir ifadesidir. Akım túbü içerisinde diskin hemen önü ve diskin hemen arkası arasında meydana gelen basınç farkı bu kuvvetin oluşumuna neden olur. Çünkü túbün çevresindeki havanın tamamı atmosferik basınçtır ve net kuvvet oluşumuna sebep olmaz. O halde disk üzerinde meydana gelen bu kuvvet, momentum değişim oranı ifadesinden elde edilen kuvvet değerine eşit olmalıdır.

$$F = (P_d^+ - P_d^-)A_d \quad (4.4)$$

$P_d^+ - P_d^-$ ifadesini elde etmek için Bernoulli Denklemi diskin önüne ve arkasına uygulanır.

$$\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 + P_\infty = \frac{1}{2} \rho_d U_d^2 + P_d^+ \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{2} \rho_w U_w^2 + P_w = \frac{1}{2} \rho_d U_d^2 + P_d^- \quad (4.6)$$

$\rho_\infty = \rho_w = \rho$ ve $P_\infty = P_w$ olduğu göz önüne alınarak elde edilen bu iki denklem taraf tarafa çıkarılırsa;

$$\frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_w^2) = P_d^+ - P_d^- \quad (4.7)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin sağ ve sol tarafının diskin alanı ile çarpılması sonucunda elde edilen kuvvet ifadesi ile (4.3) birbirine eşitlenir.

$$\frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_w^2) A_d = \dot{m} (U_\infty - U_w) \quad (4.8)$$

Gerekli sadeleştirme işlemleri yapılırsa " $U_\infty(1 - a) = (U_\infty + U_w)/2$ " ifadesi ve bu ifadenin sonucunda da " $U_w = U_\infty(1 - 2a)$ " ifadesi elde edilir. Buna göre diskteki havanın hızı, diskin yeterince önünde ve yeterince arkasındaki boş akış ve iz koşullarındaki hızların toplamının yarısı kadardır. Ayrıca eksenel hız

kaybının yarısının diskin önündeki kısımda, diğer yarısının ise diskin arkasındaki kısımda meydana geldiği anlaşılmaktadır.

4.1.2. Güç katsayısı

$P = FU_d$ denkleminde; $F = (P_d^+ - P_d^-)A_d$ ve $U_d = U_\infty(1 - a)$ ifadeleri yerlerine yazıldığında;

$$P = \frac{1}{2}\rho(U_\infty - U_w)(U_\infty + U_w)A_dU_\infty(1 - a) \quad (4.9)$$

elde edilir. Bu ifadede yer alan U_w hız ifadesi yerine de karşılığı olan $U_\infty(1 - 2a)$ değeri yazıldığında güç için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$P = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (4.10)$$

Elde edilen güç ifadesi rüzgâr hızının diske gelene kadar bir miktar azalması durumunun göz önüne alınmasıyla elde edilen güç ifadesidir. Eğer eksenel indüklemeye faktörü (a) dikkate alınmadan rüzgârın sahip olduğu güç hesaplanacak olursa, yani kütle debisi için rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji hesaplanacak olursa, aşağıdaki ifade elde edilecektir.

$$P = \frac{1}{2}\dot{m} U_\infty^2 = \frac{1}{2}\rho A_d U_\infty^3 \quad (4.11)$$

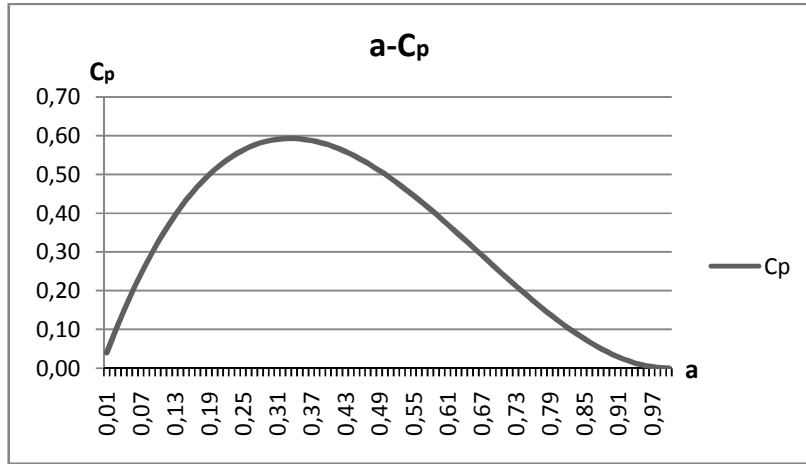
Buradaki güç ifadesi, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin birim zamanda oluşan kısmıdır. Dolayısıyla buradaki ifade, rüzgârın kayıplar olmadan sahip olduğu toplam enerjinin bir göstergesidir. Başka bir deyişle bu ifadede yukarıda bahsedildiği gibi, havanın diske yaklaştıkça hız kaybetmesi sonucu gücünde bir düşüşün meydana gelmesi durumu gözönüne alınmamıştır. Rüzgârın sahip olduğu güç potansiyeli olan (4.11) ve eksenel hızda meydana gelen kayıpları gözönüne alan eksenel momentum teorisindeki güç ifadesi (4.10) oranlarsa bir

güç katsayısı (C_p) elde edilebilir. Bu oranlama sonucunda elde edilen güç katsayısı (4.12)'de verilmektedir.

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (4.12)$$

4.1.3. Betz limiti:

Güç katsayısı (4.12), eksenel indüklemeye katsayısı a 'ya göre türev alınarak 0'a eşitlenirse C_p 'nin alacağı değer maksimum olacaktır. Buna göre $a = 1/3$ ve C_p 'nin maksimum olduğu değer ise 0,593 olarak bulunur. C_p 'nin a 'ya göre alacağı değerler, Şekil 4.3'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Eksenel indüklemeye faktörü a 'nın C_p güç katsayısı ile değişimi

0,593 değeri Alman bilim adamı Betz' e göre rüzgârdan çekilebilecek gücün teorik olarak üst limitidir. Bu güne kadar, bu limitin üzerinde güç katsayısına sahip bir türbin dizaynı yapılamamıştır [17]. Akçüatör disk teorisi ile rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin kullanılabildiği üst sınır için bir değer hesaplanmakla birlikte, akçüatör disk teorisi, rotorun gerisinde oluşan girdaplı akım alanını ve profil sürüklemesinden kaynaklanan viskoz kayıpları hesaba katmamaktadır. Bu kayıpların miktarı türbin boyutlarına ve tasarım kriterlerine

bağlı olmakla birlikte güç katsayısını Betz'in öngördüğü üst limitin de altına düşürür [16].

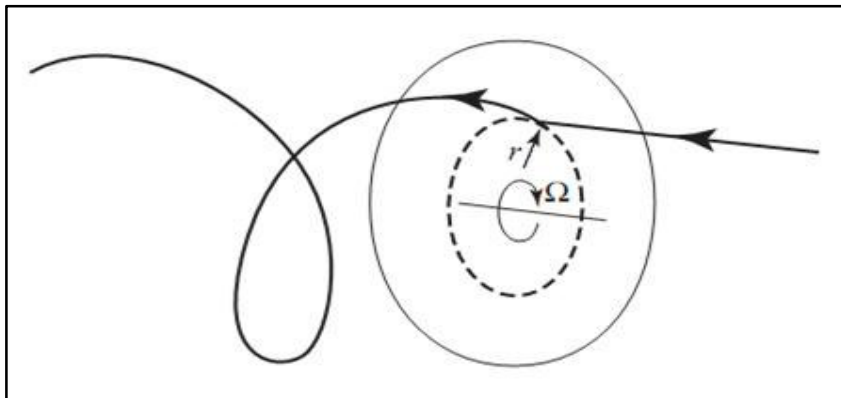
4.2. Rotor Disk Teorisi

Türbin palaları, aerodinamik dizaynları gereği rotorun önü ve arkasında basınç farkı oluşmasına neden olur ve bu durum aksel momentum kaybına yol açar [17].

4.2.1. İz rotasyonu

Türbin palalarının etrafından geçen hava akımının, rotor üzerinde tork oluşturarak rotoru döndürmesi, rotorun da eşit büyüklükte bir reaksiyon torkunu hava molekülleri üzerinde oluşturmasına neden olur. Bu nedenle, disk gerisindeki hava molekülleri, rotorun döndüğü yönün tersi yönünde dönerek açısal momentum kazanır.

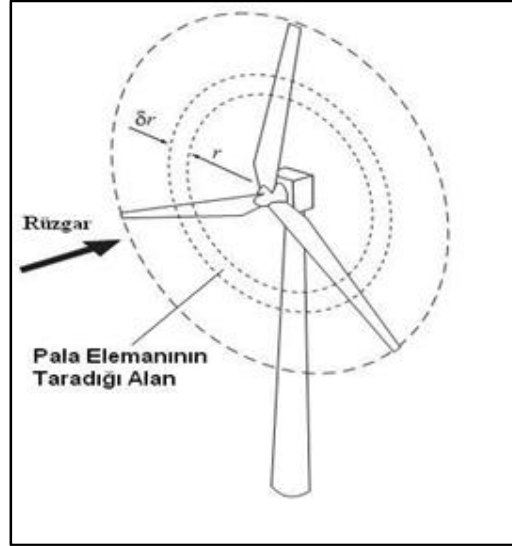
Akçüatör diske giren hava akımı, dönüsel hareket yapmazken, akçüatör diskten çıkan hava dönerek çıkar. Bu nedenle dönü hareketinin aktarımı tamamen disk kalınlığı boyunca meydana gelir [17]. Teğetsel hızdaki değişim teğetsel hız indüklemeye faktörü (α') cinsinden ifade edilir. Şekil 4.4'de diski geçen hava moleküllerinin diskin arkasında maruz kaldıkları dönü hareketi görülmektedir.



Şekil 4.4. Diski geçen hava moleküllerinin diskin arkasında maruz kaldıkları dönü hareketi

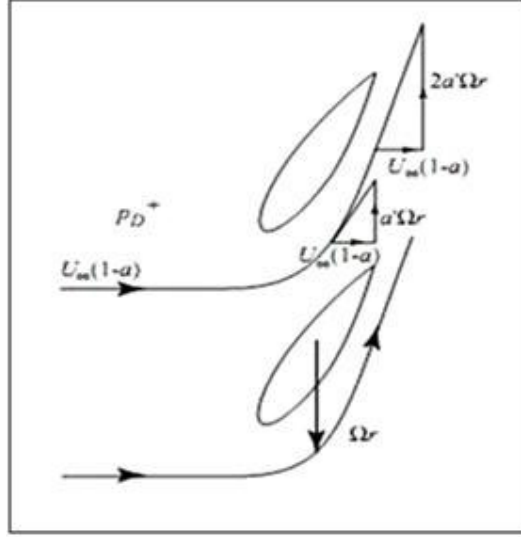
4.2.2. Açısal momentum teorisi

Radyal pozisyonlarda eksenel ve teğetsel hızlardaki değişimleri göz önünde bulundurabilmek için, türbin kanatçıklarının birbirinden bağımsız pala elemanlarından oluştuğu düşünülür. Rotor diskinin dönü hareketi sonucunda, hava akımının birbirinden bağımsız halkasal yapılardan oluştuğu kabul edilebilir. Bunlardan r radyal mesafesinde ve δr radyal kalınlığındaki bir halka incelensin. Rotorun dönmesi sonucunda pala elemanları Şekil 4.5'deki gibi halkasal bir alan tararlar.



Şekil 4.5. Rotorun dönmesi sonucunda pala elemanlarının taradığı halkasal alan

Rüzgâr türbin kanatçığından alınan herhangi bir kesit, o kısımda kullanılan kanat profilini verir. Kanat profilinin oluşturduğu sonsuz küçük kalınlıktaki parça pala elemanı olarak adlandırılır. Pala elemanının rotor etrafındaki dönüş hareketi sonucunda, hava moleküllerinin hız büyüklükleri farklı noktalarda farklı değerler alır. Örneğin diskten geçen hava moleküllerinin eksenel akış hızı değişiklik göstermezken, teğetsel akış hızında değişim meydana gelir. Örnek bir pala elemanı için eksenel ve teğetsel hız değerleri Şekil 4.6'da verildiği gibi olur.



Şekil 4.6. Pala elemanı için eksenel ve teğetsel hız değerleri

Halka üzerindeki tork, halkadan geçen hava akımında meydana gelen açısal momentumun değişim oranına eşittir. Buna göre tork; kütleli debi, teğetsel hızdaki değişim ve yarıçapın çarpımı ile bulunabilir.

$$\delta Q = \rho \delta A_d U_\infty (1 - a) 2\Omega a' r^2 \quad (4.13)$$

δA_d ifadesi halkanın alanını belirtmek üzere, tüm disk bu halkaların birleşiminden oluşmaktadır. Rotor shaftı üzerinde halkadan geçen hava akımının oluşturduğu tork, rotor shaftında güç artışına neden olur. Bu artış ise aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\delta P = \delta Q \Omega \quad (4.14)$$

Rüzgârdan elde edilebilen güç, akçüatör disk teorisinde verilen (4.10) ile gösterilir. Burada alan olarak disk alanı yerine halkanın alanı yazılırsa minimum kayıpların gerçekleştiği halkadan elde edilen güç bulunmuş olur. O halde halka için;

$$\delta P = 2\rho \delta A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (4.15)$$

bulunur. Denklem (4.14) ve Denklem (4.15) birbirine eşitlenirse;

$$2\rho\delta A_d U_\infty^3 a(1-a)^2 = \rho\delta A_d U_\infty(1-a)2\Omega^2 a' r^2 \quad (4.16)$$

elde edilir. Gerekli sadeleştirme işlemlerinin yapılmasıyla;

$$a(1-a) = \frac{\Omega^2 r^2}{U_\infty^2} a' = \lambda_r^2 a' \quad (4.17)$$

elde edilir. Burada Ωr halkanın teğetsel hızıdır ve teğetsel hızın, boş akış (freestream) hız ifadesine oranı “yerel hız oranı” (λ_r) olarak adlandırılır. Özel olarak bu formülde radyal mesafeyi gösteren r ifadesinin rotor yarıçapı olan R 'ye eşit olduğu durum olan yerel hız oranının pala ucundaki değeri, “uç hız oranı” olarak adlandırılır. Halka için rüzgârdan elde edilebilen güç ile rüzgârdan elde edilebilecek potansiyel oranlandığında (4.18) elde edilir.

$$\delta P = \left(\frac{1}{2}\rho 2\pi r \delta r U_\infty^3\right) 4a'(1-a) \frac{\Omega^2 r^2}{U_\infty^2} \quad (4.18)$$

Parantez içindeki ifade halkadan geçen hava akımının sahip olduğu güçtür. Kalan kısım ise verimi (η_r) ifade eder.

$$\eta_r = 4a'(1-a)\lambda_r^2 \quad (4.19)$$

Güç katsayısı (C_p) cinsinden ifade edilirse,

$$\frac{d}{dr} C_p = \frac{4\pi\rho U_\infty^3(1-a)a'\lambda_r^2 r}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 \pi R^2} = \frac{8(1-a)a'\lambda_r^2 r}{R^2} \quad (4.20)$$

$$\frac{d}{d\mu} C_p = 8(1-a)a'\lambda_r^2 \mu^3 \quad (4.21)$$

ifadeleri elde edilir. Bu durumda a ve a' değerlerinin radyal olarak nasıl değiştiği biliniyorsa, yukarıdaki denklem belirli uç-hız oranları için integre edilerek tüm disk için C_p değeri bulunmuş olur.

Verim denklemi a ve a' için ayrı ayrı türevlenip, sıfıra eşitlenirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{da}{da'} = \frac{(1-a)}{a'} \quad (4.22)$$

Denklem (4.17) taraf tarafa a' 'ya ve a' 'ne göre türevlenip eşitlenirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$da(1-2a) = \lambda_r^2 da' \quad (4.23)$$

Denklem (4.23)'de (da) ve (da') yerine (4.22)'deki karşılıkları yazılırsa;

$$(1-a)(1-2a) = \lambda_r^2 a' \quad (4.24)$$

elde edilir.

$a = \frac{1}{3}$, $a' = \frac{a(1-a)}{\lambda_r^2 \mu^2}$ için güç katsayısı değerleri maksimum olur. a' 'nin değeri akçüatör disk teorisindeki değer ile aynı iken, a' değeri radyal pozisyonlarda değişecektir. Bu nedenle a' 'nün yerine eşiti olan ve a' 'ya bağlı olan ifade, Denklem 4.25'de yerine yazılır. Böylece güç katsayısı C_p ;

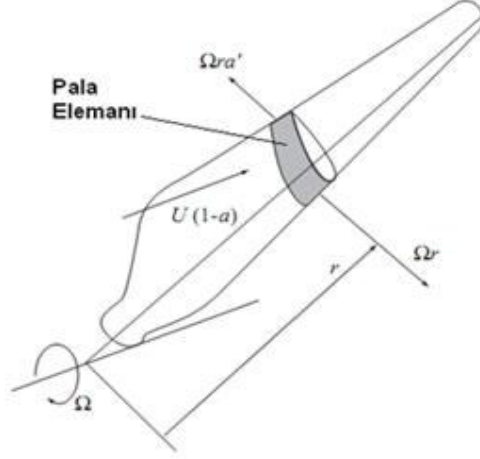
$$C_p = \int_0^1 8(1-a) \left[\frac{a(1-a)}{\lambda_r^2 \mu^2} \right] \lambda_r^2 \mu^3 d\mu = 4a(1-a)^2 = \frac{16}{27} \quad (4.25)$$

olarak bulunur.

4.3. Rotor Pala (Kanatçık) Teorisi

Her bir pala üzerinde, rotor merkezinden r mesafesi uzaklığında ve δr kalınlığında bir bölüm Şekil 4.7'de gösterildiği gibi palayı oluşturan elemanlardan

biri olarak alınsın. Tüm pala bu pala elemanı bölümlerinin birleşiminden oluşacaktır.

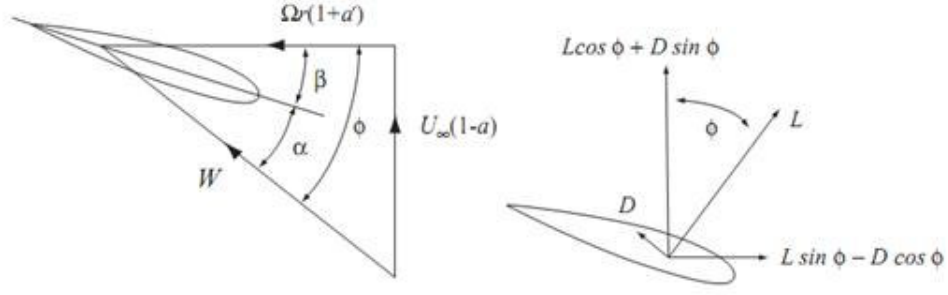


Şekil 4.7. Pala elemanı ve bu pala elemanı üzerinde hız bileşenlerinin gösterimi

Bir pala elemanın bir tur dönmesi ile türbin üzerinde Şekil 4.5'te gösterildiği gibi halka şeklinde bir alan taranmış olacaktır. Tüm pala elemanları, yapıları gereği üzerinden hava akımı geçmesiyle beraber basınç farkı oluşturarak, aerodinamik bir kuvvetin oluşmasına neden olurlar. Oluşan bu kuvvet, pala elemanlarının taradığı alandan geçen hava moleküllerinin eksenel ve açısall momentumlarının değişimine neden olan kuvvettir.

4.3.1. Pala elemanı teorisi

N sayıda palaya sahip bir rüzgâr türbin rotorunun yarıçapı R ve veter uzunluğu c simgeleri ile gösterilsin. Kanat profili sıfır taşıma hattı ve diskin düzlemi arasındaki açı olarak ölçülen yunuslama açısı da β ile gösterilsin. Veter uzunluğu c ve yunuslama açısı β ifadeleri, rotor yarıçapı boyunca değişecektir. Palaların Ω açısall hızı ile döndüğünü ve rüzgâr hızının da U_∞ olduğu kabul edildiğinde pala elemanları üzerinde kuvvet, hız ve açı ifadeleri Şekil 4.8'de gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 4.8. Pala elemanında meydana gelen hız, kuvvet ve açı değerlerinin gösterimi

Şekil 4.8’de gösterilen teğetsel hız $(1 + a')\Omega r$ ifadesi, pala elemanının teğetsel hızı olan Ωr ve pala elemanına etkiyen hava moleküllerinin teğetsel hızı olan $a'\Omega r$ ifadelerinin toplamı halinde gösterilerilmiştir [17]. Buna göre pala elemanındaki bileşke izafi hava hızının şiddeti;

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1 - a)^2 + \Omega^2 r^2(1 + a')^2} \quad (4.26)$$

şeklinde olacaktır. Şekil 4.7’den $\sin \phi$ ve $\cos \phi$ değerleri için (4.27) ve (4.28) yazılır.

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1 - a)}{W} \quad (4.27)$$

$$\cos \phi = \frac{\Omega r(1 + a')}{W} \quad (4.28)$$

Hücum açısı (α), bileşke hava hızının rotor düzlemi ile yaptığı açı (ϕ) ile yunuslama açısı (β) arasındaki fark kadardır.

$$\alpha = \phi - \beta \quad (4.29)$$

Pala elemanına etki eden taşıma kuvveti (δL), izafi hava hızının (W) doğrultusuna dik etki ederek Denklem 4.30’da verilen büyüklüğe sahip olacaktır.

$$\delta L = C_l \frac{1}{2} \rho W^2 c \delta r \quad (4.30)$$

Benzer şekilde pala elemanına etkiyecek olan sürüklenme kuvveti, oluşan taşıma kuvvetine dik ve yönü izafi rüzgâr hızına (W) paralel olacak şekilde konumlanarak;

$$\delta D = C_d \frac{1}{2} \rho W^2 c \delta r \quad (4.31)$$

büyükliğinde olacaktır.

4.3.2. Pala elemanı momentum teorisi

Bu teoride yapılan en önemli kabul, pala elemanı üzerinde oluşan kuvvetin, sadece o elemanın taradığı alandaki hava moleküllerinin momentumunun değişmesine neden olduğudur. Başka bir deyişle radyal mesafe boyunca komşu halkalar arasında etkileşim yoktur. Ayrıca bu durumun sadece eksenel indüklenme faktörünün (a) radyal olarak değişmediği durumlarda geçerli olduğu bilinmelidir [17].

Eksenel doğrultuda N adet pala elemanının oluşturduğu aerodinamik kuvvet;

$$\delta L \cos \phi + \delta D \sin \phi = N \frac{1}{2} \rho W^2 c \delta r (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) \quad (4.32)$$

şeklinde bulunur. Pala elemanlarının taradığı bölgenin oluşturduğu halka şeklindeki kısımda hava moleküllerinde meydana gelen eksenel momentum değişim oranı;

$$\rho U_\infty (1 - a) 2\pi r \delta r (2a U_\infty) \quad (4.33)$$

olarak bulunur. İz bölgesinde meydana gelen basınç düşüşüne neden olan dönü hareketi, dinamik basıncın artışına sebep olur [29].

$$\frac{1}{2}\rho(2a'\Omega r)^2 \quad (4.34)$$

Denklem (4.34)'ün halkanın alanı ile çarpılmasıyla halkaya etki eden ek aksenal kuvvet bulunur.

$$\frac{1}{2}\rho(2a'\Omega r)^2 2\pi r \delta r \quad (4.35)$$

O halde (4.32)'de taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin pala elemanları için oluşturulan aksenal kuvvet denklemi ile (4.33) ve (4.35)'in toplamı birbirlerine eşit olmalıdır.

$$N \frac{1}{2} \rho W^2 c \delta r (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) = 4\pi \rho r \delta r [a(1-a)U_\infty^2 + (a'\Omega r)^2] \quad (4.36)$$

$\mu = \frac{r}{R}$ olmak üzere denklem sadeleştirildiğinde aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) = 8\pi [a(1-a) + (a'\lambda\mu)^2] \quad (4.37)$$

Şu ana kadar aksenal doğrultuda meydana gelen aerodinamik kuvvet için yani itki değeri için bir denklem elde edildi. Benzer şekilde bir eşitlik de aksenal rotor torku için bulunmalıdır.

$$\delta L \sin \phi - \delta D \cos \phi = N \frac{1}{2} \rho W^2 c \delta r (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) \quad (4.38)$$

Halkadan geçen hava moleküllerinin açısal momentumlarının değişim oranı;

$$\rho U_{\infty}(1-a)2\pi r\delta r(2a'\Omega r)r = 4\pi\rho U_{\infty}(\Omega r)a'(1-a)r^2\delta r \quad (4.39)$$

Denklem (4.38) ile (4.39)'un eşitliğinden;

$$N\frac{1}{2}\rho W^2 c\delta r(C_l\sin\phi - C_d\cos\phi) = 4\pi\rho U_{\infty}(\Omega r)a'(1-a)r^2\delta r \quad (4.40)$$

elde edilir. İfadenin her iki tarafıda $\frac{2}{RU_{\infty}^2}$ ifadesi ile çarpılarak sadeleştirme yapılırsa;

$$\frac{W^2}{U_{\infty}^2}N\frac{c}{R}(C_l\sin\phi - C_d\cos\phi) = 8\pi a'(1-a)\lambda\mu^2 r \quad (4.41)$$

bulunur. Denklem (4.37) ve (4.41)'de bulunan $(C_l\cos\phi + C_d\sin\phi)$ ve $(C_l\sin\phi - C_d\cos\phi)$ ifadelerini işlem kolaylığı açısından sırasıyla C_x ve C_y sembolleri ile gösterilebilir.

Denklem (4.37) ve (4.41)'in eksenel ve teğetsel akış indüklemeye faktörleri için çözümü, iteratif bir süreci gerektirir. Bu denklemlerden akım indüklemeye faktörleri için aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4\sin\phi^2} \left[C_x - \frac{\sigma_r}{4\sin^2\phi} C_y^2 \right] \quad (4.42)$$

$$\frac{a}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4\sin\phi\cos\phi} \quad (4.43)$$

Bu denklemlerde geçen veter katılık oranı (σ_r) ifadesi, verilen bir r mesafesindeki toplam veter uzunluğunun (tüm kanatçıklar için) bu uzaklıkta oluşan çemberin çevresine oranı olarak verilir.

$$\sigma_r = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (4.44)$$

Rotor pala teorisine göre, tüm rotorun ürettiği tork, (4.45)'de verildiği gibi olacaktır.

$$Q = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \pi R^3 \lambda \left[\int_0^R \mu^2 \left[8a'(1-a)\mu - \frac{W}{U_{\infty}} \frac{N}{\pi} \frac{c}{R} C_d (1+a') \right] d\mu \right] \quad (4.45)$$

5. MODEL BİR RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇİN YAPILAN HESAPLAR

Rüzgâr türbinleri için geliştirilen teoriler, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi çeşitli kabuller dahilinde; temel korunum denklemlerinin, akım tübüne birim zamanda giren hava kütleline uygulanmasıyla başlar. Rüzgâr türbin kanatçıklarının eksenel hava akımının sahip olduğu enerjinin bir kısmını, rotorda torka dönüştürmek üzere kullanmaları sonucu, rüzgârın akış doğrultusunda sahip olduğu enerji miktarı azalırken, rotordan geçen hava akımının teğetsel hız bileşeni büyür. Rüzgâr türbin kanatçıklarının aerodinamik tasarım parametreleri, eksenel doğrultuda meydana gelen akışın sahip olduğu enerjinin ne kadarının, rotordan geçen hava akımının teğetsel hızının artırılmasında kullanılacağını gösteren temel unsurlardır. Betz, yapmış olduğu çalışmalar sonucunda eksenel doğrultuda hava akış hızının diske gelene kadar maksimum $2/3$ 'üne kadar azaltılabileceğini hesaplamıştır. Eksenel akış hızının diskteki değerinin bu kriteri mümkün olan en üst seviyede sağlayabilmesi, dizayn edilen kanatçık tasarımının başarısının bir göstergesidir. Eksenel ve teğetsel hızlardaki değişimler; eksenel ve teğetsel akış indüklemeye faktörü katsayıları ile belirtilmekte olup, bu kriterler tork oluşumuna ve dolayısıyla rotorda oluşan güce doğrudan etki etmektedirler.

5.1. Model Rüzgâr Türbini İçin Yapılan Kabuller

Yapılan çalışmada rüzgâr türbininin, minimum kayıplı bir ortamda işletildiği varsayılmaktadır. Başka bir deyişle, model olarak alınan bu rüzgâr türbinin, akçüatör disk teorisinde yapılan kabullere uygun olarak çalıştığı ve ölçülen güç katsayısı değerlerini bu koşullar dahilinde verdiği varsayılmaktadır. Ek olarak, rüzgâr türbininin sahip olduğu sapma (yaw) açısı değerleri de hesaplara dahil edilmemiştir.

Akçüatör disk teorisinde yapılan kabuller, eksenel akış indüklemeye faktörü ifadesinin rotor yarıçapı boyunca değişmediği varsayılarak yapılır. Gerçekte rotor diski üzerinde meydana gelen kuvvet dağılımı homojen olmadığı için, rotor diski üzerindeki hız dağılımı da homojen değildir. Dolayısıyla rotor yarıçapı boyunca eksenel indüklemeye faktörü değişkenlik gösterir. Teğetsel akım indüklemeye faktörü

ifadesi ise teğetsel hızın rotor yarıçapına bağlı olması nedeni ile yarıçap boyunca değişiklik göstermektedir. Hesaplamalarda, eksenel akım indüklemeye faktörü değerlerinin kullanılması sonucunda, teğetsel akım indüklemeye faktörü değerleri bulunduğu için, hesap edilen teğetsel akım indüklemeye faktörü değerleri ortalama değerler olarak kullanılmıştır.

Çalışmada bu noktada gözetilen ana düşünce, ölçülebilen bu değerlerin teoride kullanılması sonucu elde edilen verilerin tutarlılığının araştırılmasıdır.

5.2. Model Rüzgâr Türbininin Özellikleri

Bu çalışmada yapılan hesaplamalar için kullanılan güç katsayısı verileri, aşağıda özellikleri maddeler halinde verilen model rüzgâr türbinine aittir:

- Model rüzgâr türbininin gücü 600 kW değerindedir.
- Model rüzgâr türbini 3 ile 13 m/sn aralığında çalışabilmektedir.
- Türbin rotor merkezinin yerden yüksekliği 78 m'dir.
- Rotor üç kanatçıklı olup, türbin rotor çapı 44 m'dir.

5.3. Model Rüzgâr Türbinine Ait Değerler

Bu çalışmada halihazırda işletilmekte olan bir rüzgâr türbinine ait güç katsayısı değerleri kullanılmıştır. Bu değerler, bahsi geçen rüzgâr türbininin devreye alınma ve devreden çıkma hız aralıklarında, ölçümler sonucu elde edilen değerlerdir. Farklı boş akış hızlarında farklı güç katsayısı değerlerinin ölçüldüğü sistemde, rüzgâr türbininin mümkün olan en yüksek güç katsayısını emniyetli kullanımı riske atmadan sağlayacak şekilde işletilebilmesi esastır. Çizelge 5.1'de model rüzgâr türbinine ait güç katsayısı verileri sunulmaktadır.

Çizelge 5.1. Model rüzgâr türbinine ait güç katsayısı değerleri

U_{∞} (m/s)	C_p
3,00	0,058
3,50	0,169
4,00	0,250
4,50	0,321
5,00	0,357
5,50	0,381
6,00	0,403
6,50	0,414
7,00	0,428
7,50	0,444
8,00	0,440
8,50	0,441
9,00	0,439
9,50	0,451
10,00	0,439
10,50	0,432
11,00	0,410
11,50	0,384
12,00	0,357
12,50	0,341
13,00	0,307

5.4. Eksenel ve Teğetsel İndükleme Faktörü Değerlerinin Hesabı

Model rüzgâr türbini akçüatör disk teorisinde verilen kabuller dahilinde minimum enerji kayıplarının meydana geldiği bir ortamda çalıştığı varsayıldığından, verilen rüzgâr hızlarına bağlı güç katsayısı değerleri Denklem (4.13)'e eşitlenerek ilgili eksenel indükleme katsayısı değerleri hesaplanabilir. Yapılan bu işlem sonucunda eksenel indükleme faktörü ifadeleri için üç farklı kök değeri ortaya çıkmaktadır. Çizelge 5.2'de hesaplanan üç farklı kök değeri sunulmaktadır.

Çizelge 5.2. Verilen güç katsayısı değerlerine göre hesaplanan kök değerleri

U_{∞} (m/s)	C_p	a (Kök 1)	a (Kök 2)	a (Kök 3)
3,000	0,058	0,015	0,871	1,114
3,500	0,169	0,046	0,765	1,189
4,000	0,250	0,073	0,702	1,216
4,500	0,321	0,099	0,648	1,253
5,000	0,357	0,114	0,621	1,266
5,500	0,381	0,124	0,602	1,273
6,000	0,403	0,134	0,585	1,280
6,500	0,414	0,140	0,576	1,284
7,000	0,428	0,147	0,565	1,288
7,500	0,444	0,156	0,551	1,293
8,000	0,440	0,154	0,555	1,292
8,500	0,441	0,154	0,554	1,292
9,000	0,439	0,153	0,556	1,292
9,500	0,451	0,160	0,545	1,295
10,000	0,439	0,153	0,556	1,292
10,500	0,432	0,149	0,561	1,289
11,000	0,410	0,138	0,579	1,283
11,500	0,384	0,126	0,600	1,274
12,000	0,357	0,114	0,621	1,226
12,500	0,341	0,107	0,633	1,260
13,000	0,307	0,093	0,659	1,248

Elde edilen kök değerleri incelendiğinde sadece kök 1 değerlerinin 0,5 değerinden küçük olduğu görülmektedir. Eksenel indüklemeye katsayısı değerinin 0,5 olması durumunda rüzgâr hızının rotor diskindeki değerinin Denklem (4.2)'ye göre rüzgâr hızının yarısı büyüklüğünde olması, akım tübünün çıkışında ise 0 olması anlamına gelmektedir. Bu durumda eksenel indüklemeye katsayısı değerinin 0,5'den büyük olduğu değerlerde akım tübünü terkeden hava moleküllerinin hızının negatif değerlerde olması gerekmektedir. O halde eksenel indüklemeye faktörü değerlerinin tamamının 0,5'den büyük olduğu kök 2 ve kök 3 değerleri hesaplamalarda kullanılamazlar.

Elde edilen teğetsel indüklemeye katsayısı değerlerini kullanarak, seçilen uç-hız oranları için ortalama teğetsel indüklemeye katsayısı değerleri de hesap

edilebilir. Bunun için (4.19)'dan yararlanılarak uç-hız oranlarının 2,4,6,8,10 ve 12 olduğu durumlar için hesap edilen teğetsel indüklenme katsayısı değerleri Çizelge 5.3'te verilmektedir.

Çizelge 5.3. Denklem (4.19)'dan yararlanılarak hesap edilen ortalama teğetsel akım indüklenme faktörü değerleri

U_{∞}	$\lambda=2$	$\lambda=4$	$\lambda=6$	$\lambda=8$	$\lambda=10$	$\lambda=12$
3,000	0,0037	0,0009	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001
3,500	0,0110	0,0027	0,0012	0,0007	0,0004	0,0003
4,000	0,0169	0,0042	0,0019	0,0011	0,0007	0,0005
4,500	0,0223	0,0056	0,0025	0,0014	0,0009	0,0006
5,000	0,0253	0,0063	0,0028	0,0016	0,0010	0,0007
5,500	0,0272	0,0068	0,0030	0,0017	0,0011	0,0008
6,000	0,0290	0,0073	0,0032	0,0018	0,0012	0,0008
6,500	0,0301	0,0075	0,0033	0,0019	0,0012	0,0008
7,000	0,0313	0,0078	0,0035	0,0020	0,0013	0,0009
7,500	0,0329	0,0082	0,0037	0,0021	0,0013	0,0009
8,000	0,0326	0,0081	0,0036	0,0020	0,0013	0,0009
8,500	0,0326	0,0081	0,0036	0,0020	0,0013	0,0009
9,000	0,0324	0,0081	0,0036	0,0020	0,0013	0,0009
9,500	0,0336	0,0084	0,0037	0,0021	0,0013	0,0009
10,000	0,0324	0,0081	0,0036	0,0020	0,0013	0,0009
10,500	0,0317	0,0079	0,0035	0,0020	0,0013	0,0009
11,000	0,0297	0,0074	0,0033	0,0019	0,0012	0,0008
11,500	0,0275	0,0069	0,0031	0,0017	0,0011	0,0008
12,000	0,0253	0,0063	0,0028	0,0016	0,0010	0,0007
12,500	0,0239	0,0060	0,0027	0,0015	0,0010	0,0007
13,000	0,0211	0,0053	0,0023	0,0013	0,0008	0,0006

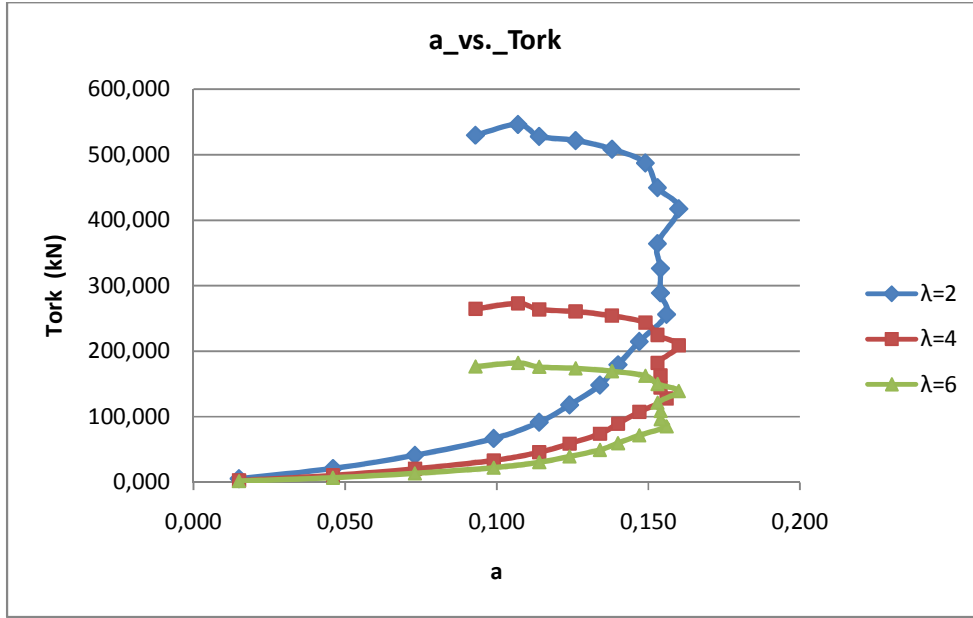
Elde edilen indüklenme faktörü verileri ile (4.14)'ün kullanılmasıyla tork değerleri hesap edilebilir. Buna göre, Çizelge 5.4'te hesap edilen veriler sonucunda ortaya çıkan tork değerleri uç-hız oranı değerleri 2, 4 ve 6 için tüm disk için kN birimi cinsinden verilmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı uç hız oranlarında tüm disk için tork değerleri (kN)

U_{∞} (m/s)	a	$a'(\lambda=2)$	Torque (kN)($\lambda=2$)	$a'(\lambda=4)$	Torque (kN)($\lambda=4$)	$a'(\lambda=6)$	Torque (kN)($\lambda=6$)
3,000	0,015	0,0037	5,365	0,0009	2,682	0,0004	1,788
3,500	0,046	0,0110	21,005	0,0027	10,503	0,0012	7,002
4,000	0,073	0,0169	41,109	0,0042	20,554	0,0019	13,703
4,500	0,099	0,0223	66,657	0,0056	33,328	0,0025	22,219
5,000	0,114	0,0253	91,632	0,0063	45,816	0,0028	30,544
5,500	0,124	0,0272	117,893	0,0068	58,947	0,0030	39,298
6,000	0,134	0,0290	148,176	0,0073	74,088	0,0032	49,392
6,500	0,140	0,0301	179,178	0,0075	89,589	0,0033	59,726
7,000	0,147	0,0313	214,657	0,0078	107,329	0,0035	71,552
7,500	0,156	0,0329	256,015	0,0082	128,008	0,0037	85,338
8,000	0,154	0,0326	288,918	0,0081	144,459	0,0036	96,306
8,500	0,154	0,0326	326,162	0,0081	163,081	0,0036	108,721
9,000	0,153	0,0324	364,147	0,0081	182,074	0,0036	121,382
9,500	0,160	0,0336	417,311	0,0084	208,655	0,0037	139,104
10,000	0,153	0,0324	449,565	0,0081	224,782	0,0036	149,855
10,500	0,149	0,0317	487,257	0,0079	243,628	0,0035	162,419
11,000	0,138	0,0297	508,174	0,0074	254,087	0,0033	169,391
11,500	0,126	0,0275	521,342	0,0069	260,671	0,0031	173,781
12,000	0,114	0,0253	527,799	0,0063	263,900	0,0028	175,933
12,500	0,107	0,0239	546,060	0,0060	273,030	0,0027	182,020
13,000	0,093	0,0211	529,563	0,0053	264,782	0,0023	176,521

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

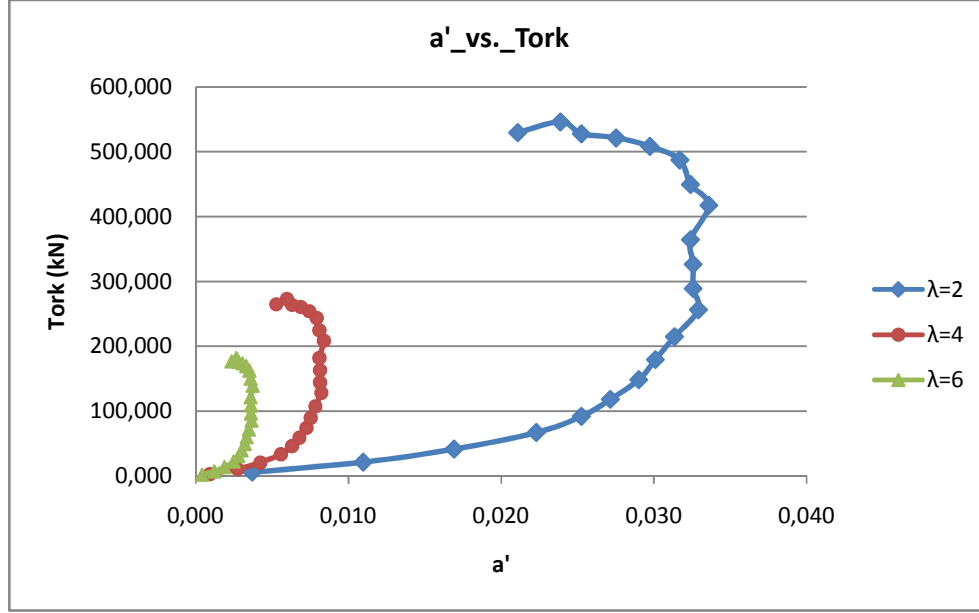
Hesaplanan değerler sonucunda oluşturulan grafikler incelendiğinde, eksenel ve teğetsel indüklemeye katsayısı değerlerinin rotor torkunu doğrudan etkilediği görülmektedir. Rotor torku, çıkış gücünün dolaylı bir ifadesi olduğundan, enerji verimliliği açısından da bir gösterge olarak kabul edilebilir. Rüzgâr türbinlerinde rüzgârın enerjisinin ne kadarının kullanılabileceği, kanatçıkların aerodinamik tasarım parametrelerine bağlı olmakla birlikte, bu tasarım parametrelerine bağlı olarak ortaya çıkan eksenel ve teğetsel indüklemeye faktörü ifadeleri var olan bir rüzgâr türbinleri için aerodinamik özelliklerin detaylı bir şekilde bilinmediği hallerde bile, mevcut durum hakkında önemli bilgiler verir.



Şekil 6.1. Eksenel indüklemeye katsayısı ile torkun değişimi

Şekil 6.1. incelendiğinde rüzgâr hızının artması ile eksenel indüklemeye faktörü değerleri 0,160 değerine kadar artış göstermiş, daha sonra ise 0,093 değerine kadar düşmüştür. Tork değerleri ise, uç-hız oranının 2 olduğu değerde 546,06 kN'luk maksimum değere ulaşmıştır. Uç-hız oranının 2 olarak seçildiği değerlerdeki tork büyüklükleri, tüm eksenel indüklemeye faktörü değerleri için uç-

hız oranının 4 ve 6 olarak seçilmesiyle hesaplanan değerlerden daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2. Teğetsel indüklemeye katsayısı ile torkun değişimi

Teğetsel indüklemeye faktörü değerlerinin tork ile değişimini, seçilen üç farklı uç-hız oranı için gösteren Şekil 6.2. incelendiğinde, maksimum tork değeri 546,060 kN büyüklüğüne, 0,0239'luk ortalama teğetsel indüklemeye faktörü değeri ile ulaşıldığı görülmektedir. Uç-hız oranının artması ile elde edilen tork değerleri azalma eğilimi gösterirken, teğetsel indüklemeye faktörü değerlerinin değişim aralığı uç-hız oranının artması ile azalma eğilimi göstermektedir.

Çalışma, hem teorik hesaplamaların sonucunda hem de ölçümler sonucu elde edilen güç katsayısı değerlerinin eksenel ve teğetsel indüklemeye faktörleri katsayılarının hesabında kullanılmasıyla, aradaki hata payının tespiti şeklinde devam ettirilebilir. Ayrıca rotor-pala teorisindeki tork formülünün kullanılması ile elde edilecek tork değerleri de hesaplanan tork değerleri ile karşılaştırılarak sonuçların tutarlılığı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=ruzgar&bn=231&hn=&nm=384&id=40696
- [2] Hau, E., *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, Almanya, 2006.
- [3] Glauert, H., "Airplane Propellers", *Aerodynamic Theory*, Peter Smith, Gloucester, USA, sayfa 169-269, 1976.
- [4] Maalawi, K. Y. ve Badawy, M. T. S., "A Direct Method for Evaluating Performance of Horizontal Axis Wind Turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5, Elsevier, 175-190, 2001.
- [5] Theodorsen, T., *Theory of Propellers*, McGraw Hill, New York, USA, 1948.
- [6] Neff, D. E. ve Meroney, R. N., "Mean Wind and Turbulence Characteristics Due to Induction Effects Near Wind Turbine Rotors", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, 413-422, 1997.
- [7] Fuglsang, P. ve Madsen, H. A., "Optimization Method for Wind Turbine Rotors", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80, Elsevier, 191-206, 1999.
- [8] Magnusson, M., "Near-Wake Behaviour of Wind Turbines", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80, Elsevier, 147-167, 1999.
- [9] Vermeer, L. J., Sorensen, J. N. ve Crespo, A., "Wind Turbine Wake Aerodynamics", *Progress in Aerospace Sciences* 39, Elsevier, 467-510, 2003.
- [10] Jureczko, M., Pawlak, M. ve Mezyk, A., "Optimization of Wind Turbine Blades", *Journal of Materials Processing Technology* 167, Elsevier, 463-471, 2005.
- [11] Kishinami, K., Taniguchi, H., Suzuki, J., Ibano, H., Kazunou, T. ve Turuhami, M., "Theoretical and Experimental Study on the Aerodynamic

- Characteristics of a Horizontal Axis Wind Turbine”, *Energy* 30, Elsevier, 2089-2100, 2005.
- [12] Lanzafame, R. ve Messina M., “Fluid Dynamics Wind Turbine Design: Critical Analysis, Optimization and Application of Blade Element Momentum Theory”, *Renewable Energy* 32, Elsevier, 2291-2305, 2007.
- [13] Deglaire, P. ve ark., “Analytical Solutions for a Single Blade in Vertical Axis Turbine Motion in Two-Dimensions”, *European Journal of Mechanics B/Fluids* 28, Elsevier, 506-520, 2009.
- [14] <http://www.wwindea.org/technology/ch01/estructura-en.htm>
- [15] <http://www.telosnet.com/wind/early.html>
- [16] Beşerik, G., *Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Aerodinamik Dizaynı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1992.
- [17] Burton, T. ve ark., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Chichester, İngiltere, 2001.
- [18] http://www.ngpowereu.com/media/media-news/news-thumb/100414/north_sea_turbine.jpg
- [19] Karadeli, S., *Rüzgâr Enerjisi*, Temiz Enerji Vakfı, Ankara, 2001.
- [20] Yerebakan, M., *Rüzgâr Enerjisi*, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 2001.
- [21] Şen, Z., *Temiz Enerji ve Kaynakları*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2002.
- [22] Acaroğlu, M., *Alternatif Enerji Kaynakları*, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 2003.
- [23] <http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/earth/imaging.html>
- [24] http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html
- [25] http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/circulation/coriolis_and%20friction.html
- [26] Durak, M. ve Özer, S., *Rüzgâr Enerjisi: Teori ve Uygulama*, Ankara, 2008.
- [27] <http://www.dmi.gov.tr/genel/ss.aspx?s=mahalliruzgarisimleri>
- [28] Steven, A. B. ve ark., *Introduction to Aeronautics: A Design Perspective*, AIAA, Washington, Amerika, 2006.
- [29] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boundlay.html>

- [30] http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_yol_haritasi.html
- [31] Hocaoglu, F. O. ve ark., “WAsP Yazılımı ile Rüzgâr Potansiyeli Analizi ve Uygulama”, IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Gaziantep,, 2007.
- [32] Durak, M., “Türkiye’de İşletmedeki Rüzgâr Elektrik Santral Projeleri”, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği, Mayıs 2010, http://www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr/index.php?option=com_docman&Itemid=86
- [33] http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com_content&task=view&id=266&Itemid=43
- [34] Karadağ, H. İ., *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgâr Enerjisinin Önemi ve Rüzgâr Türbini Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [35] <http://www.reuk.co.uk/OtherImages/darrieus-rotor.jpg>
- [36] http://www.netenerji.net/Urunler/haber/resimler/yatay_eksenli_turbin.jpg
- [37] Eriş, M. ve Duran, M., *Rüzgâr Enerjisi ve Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri*, Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Eskişehir, Ocak 2008.
- [38] Hartwanger, D. ve Horvat, A., “3D Modelling of A Wind Turbine Using CFD”, NAFEMS UK Conference, Cheltenham, UK, 1-3, 2008.