

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN KANAT AÇILI DÜŞEY EKSENLİ
RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI



Rıdvan ALMAZ

Şubat, 2020
İZMİR

DEĞİŞKEN KANAT AÇILI DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Rıdvan ALMAZ

Şubat, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

RİDVAN ALMAZ, tarafından **DOÇ.DR. ALPASLAN TURGUT** yönetiminde hazırlanan “**DEĞİŞKEN KANAT AÇILI DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Alpaslan TURGUT

Yönetici

Prof. Dr. Hasan ÖZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Sercan ACARER

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı gerçekleştirmek için beni öğrencisi olarak kabul eden, çalışmaya yön veren, araştırma yöntemleri ve mühendislik etiği konularındaki tecrübelerini paylaşan ve göstermiş olduğu sabırdan ötürü değerli hocam Doç. Dr.Alpaslan TURGUT'a teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi ve Katip Çelebi Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren değerli hocalarımla bir ekip olarak çalışarak son şeklini almıştır. Çalışmanın her aşamasında, engin teorik bilgisiyle desteklerini esirgemeyen ve çalışmayı her seferinde bir adım öteye taşımama büyük katkı sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Öğretim üyesi Sercan ACARER ve Doç. Dr. Öğretim üyesi Ziya Haktan KARADENİZ'e en derin saygılarımı sunarım. Aynı ekipte yer aldığım, rüzgar sektöründeki tecrübelerinden faydalandığım değerli büyüğüm ve ekip arkadaşım doktora adayı ve XGEN ENERGY firmasının kurucu ortağı İskender KÖKEY'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimime olan katkısından ve yol göstericiliğinden ötürü, annem Füsun TUĞLUER'e ve umudumu kaybettiğim zamanlarda bile bana güç veren Melda DÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Rıdvan ALMAZ

DEĞİŞKEN KANAT AÇILI DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

ÖZ

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin performans eğrilerini elde etmek amacıyla, ‘Çok Katmanlı İki Bölgeye Ayrılmış Akıştüpü Modeli (Double Multiple Streamtube / DMST)’ yöntemini kullanarak, seri ve paralel bağlı 1-boyutlu sistemler, MATLAB yazılımında modellenmiştir. Literatürde deneysel olarak çalışılmış simetrik kanat profilleri belirlenmiş ve geliştirilen modele bu karakteristiklerin entegre edilebildiği bir veritabanı oluşturulmuştur. Modelin veritabanında bu kanat profillerinin, Reynolds sayısının belirli değerlerinde deneysel olarak elde edilmiş kaldırma ve sürüklenme katsayıları mevcuttur. Literatürde çokça deney verisi bulunan ve veritabanındaki kanat profillerini kullanan türbinler ile test ve kalibrasyon çalışması yapılmıştır. Doğrulama gerçekleştirildikten sonra pasif akış kontrolünün etkisini incelemek için sabit yunuslama açısının performansa olan etkisi incelenmiştir. Akabinde dinamik kontrolün etkisini görmek ve tezin asıl hedefini gerçekleştirmek adına yunuslama açısının dinamik kontrolü sağlanmış ve sonuçların performansa olan etkisi incelenmiştir. Temel kanat profilleri ile elde edilen sonuçların ardından yüksek başarılı kanatlardan deneysel verilere sahip olanlar belirlenmiş ve karakteristikleri veritabanına entegre edilmiştir. Test ve kalibrasyonları yapılan deneysel veriye sahip türbinlerin dinamik kontrolü gerçekleştirilmiş ve genel kabul görebilecek çıkarımların olup olmadığı değerlendirilmiştir.

Geliştirilen modele bir arayüz tasarlanmıştır. Kullanıcılar istenen türbin parametrelerini girdikten sonra türbinin üreteceği tork ve güç hakkında hızlı bir şekilde fikir sahibi olabileceklerdir. Saatlerce süren HAD analizleri öncesinde bu modeli kullanmak türbin parametrelerinin seçiminde kolaylık sağlayacaktır. Ayrıca deneysel veri seti oluşturulan kanat profili karakteristiklerinin veritabanına kolay bir şekilde entegre edilebilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: DERT, DMST, statik yunuslama açısı, dinamik kontrol

DESIGN OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH VARIABLE PITCH ANGLE

ABSTRACT

In order to obtain the performance curves of vertical axis wind turbines, serial and parallel connected 1-dimensional systems are modeled in MATLAB software using DMST method. Experimentally studied symmetrical airfoil profiles in the literature were determined and a database was created in which these characteristics could be integrated into the model being developed. In the database of the model, these airfoil profiles have experimentally obtained lift and drag coefficients at certain values of Reynolds number. Test and calibration processes have been performed with turbines which have many experimental data in the literature and using airfoil profiles in the database. After verification, the effect of fixed pitching on the turbine's performance was studied to examine the effect of passive flow control. Subsequently, in order to see the effect of dynamic control and to carry out the main objective of this thesis, dynamic control of the pitching angles was provided and the effect of the results on performance was investigated. Following the results obtained with the basic airfoil profiles, the ones having the experimental and high performance airfoil profiles were determined and their characteristics were integrated into the database. The dynamic control of the turbines which have experimental data was carried out after testing and calibration processes and it was evaluated whether there are generally acceptable inferences.

An interface is designed for the model. Users will be able to quickly gain insight torque and power generated by the turbine after entering the desired parameters. Turbines parameters selection processes were become easier before the CFD analysis lasted for many hours with the help of this model. In addition, it is provided to integrate the airfoil profile characteristics created in the experimental data set into the database easily.

Keywords: VAWT, DMST, fixed pitch control, variable pitch control

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....	1
1.1 Rüzgar Enerjisi ve Tarihi.....	1
1.2 Rüzgar Türbinleri.....	5
1.3 Rüzgar Türbini Teorisi.....	9
1.4 Rüzgar Türbini Aerodinamiği.....	14
1.4.1 Aerodinamik Sürüklenme Kullanan Türbinler.....	14
1.4.2 Aerodinamik Kaldırma Kullanan Türbinler.....	16
1.5 Rotor Aerodinamiği.....	19
BÖLÜM İKİ – DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	21
2.1 Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Çeşitleri.....	21
2.2 Matematiksel Model ve Hesaplamalar.....	22
2.2.1 Türbin Parametreleri.....	25
2.2.1.1 Güç Katsayısı (CP).....	25
2.2.1.2 Kord (Veter) Uzunluğu (c).....	26
2.2.1.3 Kanat Uzunluğu (H).....	26
2.2.1.4 Türbin Yarıçapı (R).....	26
2.2.1.5 Türbin Süpürme Alanı (A).....	27
2.2.1.6 Kanat Açıklık Oranı (AR).....	28

2.2.1.7 Kanat Sayısı (N).....	29
2.2.1.8 Katılık Oranı (σ).....	31
2.2.1.9 Kanat Profili.....	32
2.2.1.10 Azimut Açısı (θ).....	34
2.2.1.11 Hücüm Açısı (α).....	34
2.2.1.12 Yunuslama Açısı (β).....	35
2.2.1.13 Serbest Rüzgar Hızı (V_∞).....	36
2.2.1.14 Türbin Açısal Hızı (ω).....	37
2.2.1.15 Kanat Uç Hız Oranı (TSR).....	37
2.2.1.16 Reynolds Sayısı (Re).....	38
2.2.3 Türbin Aerodinamiğinde Parametrelerin Önemi.....	40
BÖLÜM ÜÇ – LİTERATÜR ÖZETİ.....	42
3.1 Yapılan Çalışmalar.....	42
3.2 Motivasyon.....	46
BÖLÜM DÖRT – YÖNTEM.....	48
BÖLÜM BEŞ – BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59
BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR.....	67
KAYNAKLAR.....	68
EKLER.....	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Afganistan’da yer alan düşey dönme eksenine sahip yel değirmeni.....	1
Şekil 1.2 Su pompalamak için kullanılan Çin’e ait eski yel değirmenleri.....	2
Şekil 1.3 Su pompalamak için kullanılan Hollanda’da yer alan yel değirmeni.....	3
Şekil 1.4 Rüzgar türbinlerinin genel sınıflandırılması.....	7
Şekil 1.5 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	8
Şekil 1.6 Vorteks rüzgar türbinleri (soldaki Deniz üstü, sağdaki resim Kara üstü).....	9
Şekil 1.7 Pervane disk modelinin 2D görünümü.....	9
Şekil 1.8 Bet’z Limitinin rüzgar enerjisi üzerindeki grafiksel gösterimi.....	12
Şekil 1.9 Türbine gelen rüzgar ve arkadan çıkan rüzgarın hız ve basınç dağılımlarının gösterimi.....	13
Şekil 1.10 Sürüklenme bazlı çalışan rüzgar türbini şematığı.....	15
Şekil 1.11 Kanat Profiline etkiyen aerodinamik kuvvetlerin gösterimi.....	17
Şekil 1.12 Kanat profili üzerine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin gösterimi ve hız üçgeninin gösterimi.....	17
Şekil 1.13 Kaldırma / Sürüklenme katsayısı oranına karşılık elde edilebilecek maksimum güç değerlerinin grafiği.....	19
Şekil 2.1 DERT’lerin sınıflandırılması.....	21
Şekil 2.2 Rüzgar Türbini Teorisini geliştiren bilim insanları.....	23
Şekil 2.3 Farklı tipteki matematiksel modellerin gösterimi.....	25
Şekil 2.4 Kanat Profilinin Gösterimi.....	26
Şekil 2.5 Kanat sayısının türbin performansına olan etkisi.....	31
Şekil 2.6 Kanat sayısına bağlı değişen katılık oranına karşılık tork (soldaki) ve güç katsayısı (sağdaki) değerlerinin grafiksel gösterimi.....	32
Şekil 2.7 Kanat dönüşünde oluşan azimut açısının gösterimi.....	34
Şekil 2.8 Hücum açısı oluşumunun gösterimi	35
Şekil 2.9 Yunuslama açısının kanat profili üzerindeki gösterimi.....	36
Şekil 2.10 Rüzgar hızına bağlı olarak türbinden elde edilebilecek maksimum güçlerin karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.1 Türbin üzerinde bazı parametrelerin gösterimi.....	50

Şekil 4.2 Kanat üzerine etkiyen hızlar ve aerodinamik kuvvetlerin gösterimi.....	50
Şekil 4.3 DMST modelinin dönme dairesindeki dört farklı bölgede gösterimi.....	51
Şekil 4.4 İterasyon işleminin akış diyagramında gösterimi.....	55
Şekil 4.5 Matlab ile geliştirilen veritabanı ve kodun bir kesitinin gösterimi.....	56
Şekil 4.6 Matlab ile geliştirilen kullanıcı arayüzü.....	57
Şekil 4.7 Simulink ile geliştirilen model.....	57
Şekil 5.1 Yunuslama açısının olmadığı durum (sol) ve yunuslama açısının negatif olduğu durum (sağ).....	58
Şekil 5.2 Hücum açısına bağlı olarak CL, CD ve kaldırma/sürüklenme oranının gösterimi.....	59
Şekil 5.3 DMST teorisinin doğru uygulandığının valide edilmesi.....	60
Şekil 5.4 İdeal hücum açısının Reynolds sayısına bağlı fonksiyonu.....	61
Şekil 5.5 Balduzzi ve diğer. Deneysel çalışmaları ile 1 boyutlu modelin karşılaştırılması.....	61
Şekil 5.6 Lam ve Peng deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.7 Daniela Ragni ve diğer. deneysel çalışması ile 1 – boyutlu modelin karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.8 Raciti Castelli ve diğer. deneysel çalışması ile 1 – boyutlu modelin karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.9 Howell ve diğer. deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin doğrulanması....	63
Şekil 5.10 Sabit yunuslama açısı kontrolünde tork katsayısının türbin açısal konumuyla değişimi, (a) +1 ve -1, (b) +2 ve -2, (c) +3 ve -3 derece sabit yunuslama açılarının etkileri.....	64
Şekil 5.11 Güç katsayısının kanat uç hız oranıyla değişimi.....	64
Şekil 5.12 Türbinin yunuslama açısı yapmadığı ve dinamik yunuslama açısı yaptığı durumlarda türbin performans eğrileri.....	65

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Farklı büyüklükteki süpürme alanlarına sahip türbinler.....	28
Tablo 4.1 Türbin parametreleri.....	49



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Rüzgar Enerjisi ve Tarihi

Günümüz dünyasında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmıştır. Bunun başlıca sebepleri yenilenemez enerji kaynaklarının artan dünya nüfusuna yeterli miktarda enerji sağlayamayacak duruma gelmesi ve bu enerji kaynakları ile sürdürülebilir bir plan oluşturulamamasıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları dendiğinde ilk akla gelen enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi, tarihin ilk çağlarından beri var olan ve insanoğlunun yararlanmaya çalıştığı bir enerji türüdür.

Yeldeğirmenlerinin tarihi kökenleri hakkında çelişkili spekülasyonlar mevcuttur. Bazı yazarlar, İskenderiye yakınlarındaki Mısır'da 3000 yıllık geçmişi olan, taş yeldeğirmenlerinin kalıntılarını keşfettiğini iddia etmektedirler. Tarihi kaynaklardan gelen, yel değirmenlerinin varlığı hakkında ilk güvenilir bilgi 644 yılına dayanmaktadır. İran-Afganistan sınırındaki Seistan bölgesinde yeldeğirmenleri kalıntıları bulunmuştur. Eskiz içeren bir sonraki bulgu, 945 yılına dayanmaktadır ve düşey dönme eksenine sahip bir yel değirmenini göstermektedir. Bu yeldeğirmeni tahıl öğütmek amaçlı kullanılmıştır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere, son derece ilkel yel değirmenleri günümüze kadar Afganistan'da hayatta kalmıştır (Hau, 2013).



Şekil 1.1 Afganistan'da yer alan düşey dönme eksenine sahip yel değirmeni (Hau, 2013)

11. yüzyıla gelindiğinde rüzgar enerjisini kullanmanın farklı yolları keşfedildi. Ortadoğu'daki insanlar daha çok yiyecek üretimi için yeldeğirmenlerinden faydalanıyordu. İlk kayıtlı yeldeğirmenleri ise 1219'da Çin yeldeğirmenleri olarak kaydedilmiştir. Bu önemli bir gelişmedir çünkü bu zaman zarfında yeldeğirmenleri Çin kıyılarında rüzgar gücü için kullanılmıştır (Lorden, Anderson, Donahue ve Mullen, 2010).



Şekil 1.2 Su pompalamak için kullanılan Çin'e ait eski yeldeğirmenleri (Hau, 2013)

Tüccarlar vasıtasıyla ve Haçlı seferleri sonrasında Avrupa'ya da rüzgar teknolojisi ulaştı. Avrupada yeldeğirmenleri su pompalayarak toprağın sulanmasında kullanıldı. Hollandalılar, Ren Nehri Deltası'ndaki gölleri ve bataklıkları boşaltmak için büyük rüzgar pompaları geliştirdi (Lorden ve diğer., 2010). Geleneksel bir yel değirmeni olan yatay bir dönme eksenine sahip yel değirmeni, muhtemelen Doğu'nun düşey eksenli yel değirmenlerinden bağımsız olarak Avrupa'da icat edilmiştir. Doğrulanabilir ilk bilgi 1180 yılında Normandiya Dükalığı'nda mevcuttur (Hau, 2013).



Şekil 1.3 Su pompalamak için kullanılan Hollanda’da yer alan yeldeğirmeni (Hau, 2013)

Mucitler yeni kanat şekilleri ile yel değirmeninin daha verimli hale getirmenin yollarını keşfetmekle uğraşmışlardır. 19.yy sonlarına doğru Avrupa’da çoğunluğu tahıl öğütmek, su pompalamak ve kerevit fabrikalarında tahta kesmek gibi amaçlarla kullanılan 30000 yeldeğirmeni bulunmaktaydı (Lorden ve diğer., 2010).

1800’lerin sonu ve 1900’ların başından itibaren küçük ölçekli yel değirmenleri elektrik üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. İlk Amerikan rüzgar milleri Hollandalılar tarafından getirilmiştir ve New York’ta ve New England ‘da bir araya getirilmiştir. 1930’larda kırsal alanlara elektrik taşımak için enerji hatları inşa edilmeye başlanmıştır ve küçük ölçekli türbinlerin kullanımı azalmaya başlamıştır. 1930’lardaki ilk büyük deneyim Palmer-Putnam makinesi olarak adlandırılan makineydi. 1,25 MW elektrik üretebilme kapasitesine sahiptir. Mevcut malzemelerden kaynaklı olarak verimi zamanla büyük ölçekte düşmüştür ve bakımı gittikçe zorlaşmıştır. Diğer tasarımlara kıyasla 50 metre uzunluğunda rotorlara sahiptir ve oldukça büyüktür.

1970’lerdeki petrol krizinden sonra Birleşik Devletler ve dünya için enerji ortamı değişti ve petrol sıkıntısı, elektrik üretmek için rüzgar enerjisi gibi alternatif kaynakların kullanılma yollarını geliştirmeye ilgi arttı. ABD federal hükümeti büyük

rüzgar türbinlerinin araştırma ve geliştirilmesi için destek verdi. 1980'lerin başında binlerce rüzgar türbini büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden federal ve eyalet politikaları nedeniyle Kaliforniya'da kuruldu.

Federal hükümet ayrıca rüzgar türbinlerinin maliyetinin düşürülmesine yardım etmek için araştırma ve geliştirme finansmanı sağladı ve rüzgar enerjisi projeleri için vergi ve yatırım teşvikleri teklif etti. Buna ek olarak, eyalet hükümetleri yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi için yeni şartlar getirdi ve elektrik pazarlama ve ticaret şirketleri müşterilerine yeşil enerji sunmaya başladı. Bu politika ve programlar rüzgar türbinlerinin sayısının ve rüzgar enerjisi kullanılarak üretilen elektriğin miktarının artmasına neden oldu.

20.yy'da Danimarka 2. dünya savaşından sonra verimli rüzgar gücünden yararlanacak jeneratörlerin araştırılmasına tekrar başlandı. Gedser Wind Turbine olarak adlandırılan türbin üretildi ve 1960'ların ortalarına kadar çalıştırıldı ve 200 kW'lık bir makineydi. Rüzgardan daha iyi faydalanmak adına yunuslama açısı yapabilecek şekilde rotorlar tasarlandı. Cihazın ana gövdesi bir uçak gövdesine benzer şekilde inşa edilmiştir. Uçak teknolojisi türbinlerin en etkin şekilde kullanılması açısından başarılı bir şekilde uygulanmıştır türbin modellerine.

Avrupa'da ise 1960'lara doğru Profesör Ulrich Hutter (Alman teknolojist) cam elyafı ve lastik gibi modern malzemeleri birçok rüzgar jeneratörü modelinde uyguladı. Daha hafif cihaz demek cihazın daha hafif rüzgarlarda da çalışabileceği anlamına gelmekteydi ve daha az rüzgar hızında dahi elektrik üretebilmesi demektir. Yavaş bir şekilde rüzgar türbinleri bakımı ve inşası daha ekonomik hale gelmeye başladı (Hau, 2013).

Gelişen teknolojiyle birlikte rüzgar enerjisinin kullanım alanları enerji üretiminde gitgide artmaktadır. 1990'larda ABD'de elektrik üretiminin rüzgardan aldığı pay %1'den daha azdı. 2015 yılında bu oran %5 civarındaydı. Avrupa'daki teşvikler, rüzgar enerjisi kullanımının genişlemesine neden oldu. Çin ise rüzgar enerjisine büyük

yatırımlar yapıyor ve şu anda dünyanın en büyük rüzgar enerjisi üretim kapasitesine sahiptir.

Yeni kurulan kentlerde evlerin çatılarında daha sessiz ve küçük tasarıma sahip rüzgar türbinleri kullanılmakta. Bu rüzgar türbinleri rüzgarı daha verimli kulanacak şekilde tasarlanmıştır. Neredeyse 3 m/s gibi düşük hızlarda dahi enerji üretebilecek kapasiteye sahip olarak tasarlanmaktadır.

Teknolojik ilerlemeyle birlikte rüzgar kullanımının optimize edilerek büyük rüzgar türbinleri üretimine yönlenildi. Araştırmalar daha büyük bir türbinin daha fazla güç üretip üretemeyeceğini veya daha fazla problem ortaya çıkarıp çıkarmayacağına dair tartışmalara sebep olmakta. Daha büyük türbinler verimli çalışmalarını sürdürebilmek için daha fazla bakım maliyeti ve kurulum maliyeti anlamına gelmektedir.

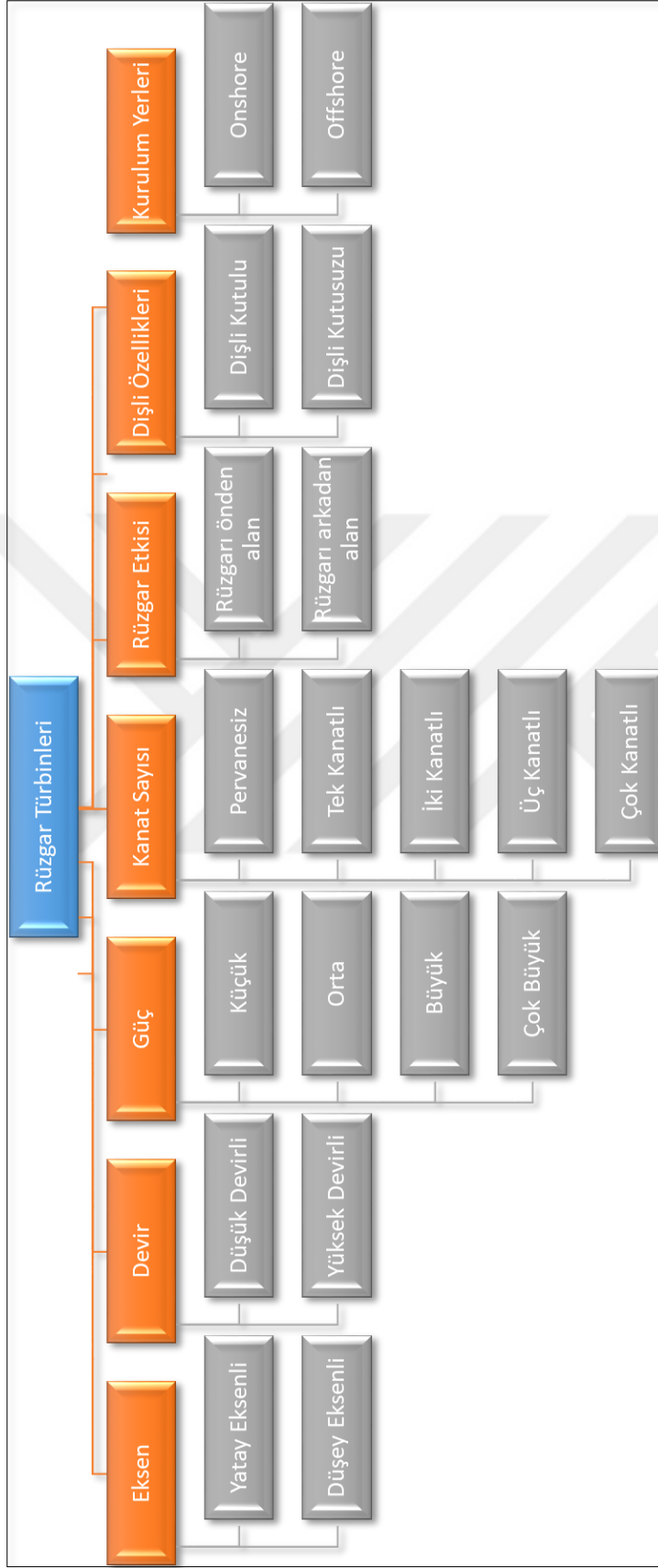
1.2 Rüzgar Türbinleri

Zaman içinde farklı amaçlar ile kullanılan rüzgar enerjisi günümüzde rüzgar veya yeldeğirmenlerine benzer yapılar ile rüzgar gücünü elektrik enerjisine dönüştüren ‘Rüzgar Türbinleri’ olarak karşımıza çıkmaktadır. Rüzgar türbini, rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir (Elibüyük ve diğer., 2014). Bu mekanik güç belirli görevler için (örneğin tahıl öğütme veya su pompalama) kullanılabilir veya bir jeneratör bu mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilir. Rüzgar mili, rüzgar hızını yavaşlatarak rüzgardan güç elde eder. Durma konumunda güç üretmez ve çok yüksek hızlarda da hava, rotor tarafından kısmen ya da çok fazla engelleneceğinden dolayı yine güç üretilmez.

Rüzgar türbinleri ürettikleri mekanik enerjiyle genellikle türbine bağlı elektrik jeneratörlerini çalıştırırlar. Pervane kanatları, pervane göbeği ve pervane miline rotor veya türbin denilir. Pervane mili dişli kutusuna bağlıdır. Dişli kutusunu jeneratöre bağlayan mile de, jeneratör mili denir (Özgener, 2002).

Rüzgar türbinlerinin farklı tipte olanları mevcut olsa da en yaygın kullanıma sahip olan türü yatay eksenli rüzgar türbinleridir. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması daha çok dönme eksenine göre yapılmaktadır ancak yine de genel bir sınıflandırma yapılmasında fayda vardır. Şekil 1.4'te rüzgar türbinlerinin genel sınıflandırılması yer almaktadır. Çoğunlukla dönme eksenine göre ve kurulum yerine göre sınıflandırma yapılmaktadır.

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri'nde dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne diktir. Verimleri genellikle %45 civarındadır. Genel şematikleri yandaki şekilde verilmiştir. YERT genel olarak yerden 20 – 30 m yüksekte ve çevredeki engellerden 10 m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir.



Şekil 1.4 Rüzgar türbinlerinin genel sınıflandırılması



Şekil 1.5 Yatay eksenli rüzgar türbinleri, (Viterna ve Ancona, 2009)

Yukarıdaki kategorilerde yer almayan ancak yeni bir rüzgar türbini çeşidi olan pervanesiz rüzgar türbinleri ispanyollar tarafından geliştirilmiş olan ancak normal türbinlere oranla %30 daha az elektrik üretebilme kapasitesine sahiptir.

Salınım yaparak elektrik üreten bu sistem rüzgardan bağımsız olarak çalışmaktadır. Bu yöntemle klasik dediğimiz kanatlı rüzgar türbinlerinin birçok dezavantajını ortadan kaldırmaktadır. Hareketli aksamı olmadığından yağlama gereksinimine ihtiyaç da yoktur bu sebeple malzeme ve işçilik maliyetleri oldukça düşüktür. Herhangi bir elektrik motoruna ihtiyaç duymazlar. Bu da bu türbinleri önemli bir inovatif yönüdür. İçi boş borulardan oluşan bu direklerin üst kısmının birleştiği yerde eş kutuplu olan iki mıknatıs bulunmaktadır. Rüzgar direklerinin aerodinamik özelliklerine göre tasarlanmasından dolayı hava akımları direk boyunca kontrollü olacak şekilde türbülansa yol açmaktadır. Direkler rüzgar sayesinde salınırken mekanik salınım frekansı üretmektedir. Bu esnada direğin içerisinde bulunan eş kutuplu mıknatıslar da

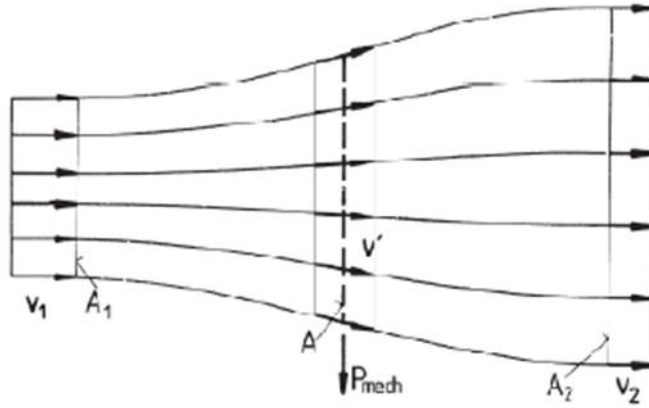
birbirlerini itme hareketi yaparlar ve salınım frekansını güçlendirirler. Oluşan mekanik titreşimler direğin altındaki şarj dinamosuna aktarılarak dalga akım jeneratörleri sayesinde titreşimler elektriğe çevrilmektedir.



Şekil 1.6 Vorteks rüzgar türbinleri (soldaki deniz üstü, sağdaki kara üstü), (Demircan, 2015)

1.3 Rüzgar Türbini Teorisi

Rüzgar mili, rüzgar hızını yavaşlatarak rüzgardan güç elde eder. Durma konumunda güç üretmez ve çok yüksek dönme hızlarında da hava, rotor tarafından kısmen ya da çok fazla engelleneceğinden dolayı yine güç üretilmez. Bir rüzgar türbini tarafından üretilen güç rüzgar türbinindeki kinetik enerji değişimine eşittir (Al-Shemmeri, 2010).



Şekil 1.7 Pervane disk modelinin 2D görünümü (Hau, 2013)

$$P_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot [v_1^2 - v_2^2] \quad (1.1)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v' \quad (1.2)$$

Denklem 1.1’den yola çıkarak tamamen önceki şekle ait terimlerle yorum yapılacaktır; $V_2=0$ olduğunda (yani hava, türbin tarafından tamamen durma noktasına getirildiğinde) güç değerimiz maksimum değerine ulaşır. Ancak bu da fiziksel olarak pek mantıklı değildir çünkü türbinden çıkış hızı olan $V_2=0$ olursa Türbine giriş hızı da 0 olmak zorundadır ($V_1=0$). Ve bu da türbinde daha fazla akış olmaması gerektiği anlamına gelmektedir. Tahmin edileceği üzere gücün maksimum olabilmesi için V_1 ile V_2 ‘nin belirli bir sayısal orana sahip olması gerekmektedir. Bu da türbinin mekanik gücünü ifade eden bir başka denklem gerektirir. Momentum Korunumu denklemini kullanarak havanın türbinde uyguladığı kuvvet aşağıdaki formülle ifade edilebilir;

$$F = \dot{m} \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.3)$$

Etki – Tepki prensibine göre bu F kuvveti (itme kuvveti), türbin tarafından hava akışına uygulanan eşit bir kuvvet ile giderilmelidir. Tabiri caizse, itme kuvveti hava kütlesini türbin akış düzlemindeki hız olan v' hava hızında iter. Bunun için gereken P gücünün değeri;

$$P = F \cdot V' = \dot{m} \cdot (V_1 - V_2) \cdot V' \quad (1.4)$$

Bu durumda denklem 1.1 ve 1.4’ü eşitleyecek olursak, yani $P_{kin} = P$ ise;

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1.5)$$

elde edilir.

Yani türbinden geçen akış hızı V' , V_1 ve V_2 ’nin aritmetik ortalamasıdır.

Denklem 1.2’de yer alan kütleli debi formülü, denklem 1.5’in denklem 1.2’ye uygulanmasıyla aşağıdaki şekli alır;

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1.6)$$

Denklem 1.6'nın denklem 1.1'e uygulanmasıyla rüzgar türbini tarafından üretilen güç aşağıdaki gibi bulunur;

$$P_{kin} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.7)$$

Rüzgarın kendinde bulunan ideal gücü P_0 ile ifade edecek olursak;

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \quad (1.8)$$

Rüzgar Türbini tarafından üretilen güç ile havanın kendinde bulunan ideal gücün oranı bize güç katsayısı (coefficient of power) olarak adlandırılan C_p değerini verir.

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right] \quad (1.9)$$

C_p 'nin maksimum alabileceği değer havadaki kinetik enerjiden maksimum ne kadar yararlanabileceğimizin göstergesidir. Bu durumda Denklem 1.9'un türbin çıkışındaki hıza yani V_2 'ye göre türevini alıp 0'a eşitleyecek olursak C_p 'nin maksimum değerini bulabiliriz. Öncelikle denklem 1.9'u genişletecek olursak;

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \right] \quad (1.10)$$

$$\frac{dC_p}{dV_2} = 0 \text{ ise;}$$

$$(V_1 - 3V_2) \cdot (V_1 + V_2) = 0 \quad (1.11)$$

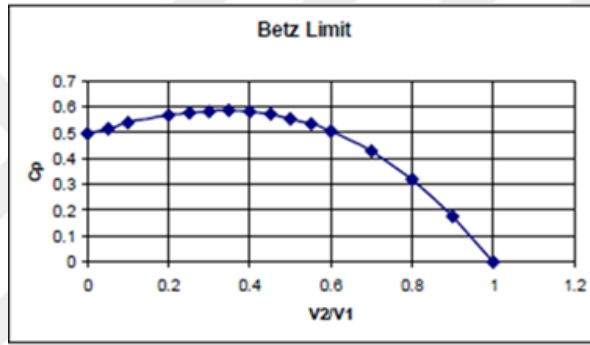
$V_1 + V_2 = 0$ gerçekçi bir yaklaşım olmadığından, $V_1 = 3V_2$ elde edilir.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3} \quad (1.12)$$

Denklem 1.12’de bulunan V_2/V_1 oranını denklem 1.9’a uygularsak C_p ‘nin maksimum değerini elde ederiz. Yani;

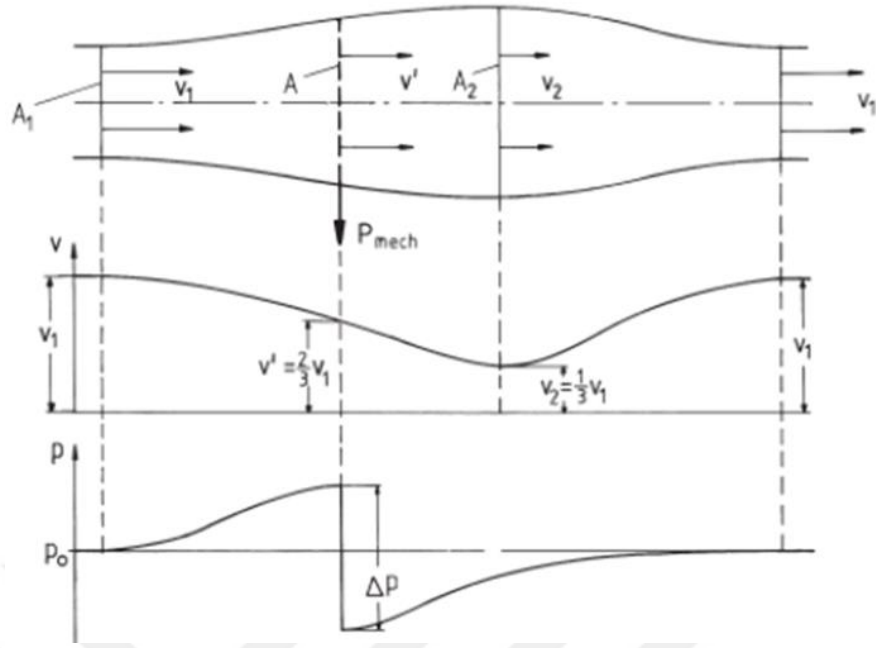
$$C_{p,max} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{9}\right] \cdot \left[1 + \frac{1}{3}\right] \quad (1.13)$$

Yukarıdaki denklemden C_p ’nin maksimum alabileceği değerin yaklaşık olarak 0,593 olduğu hesaplanır. Elde edilen bu değer ‘Betz Limiti’ olarak adlandırılır. Pratikte mekanik kayıplar ve aerodinamik yetersizliklerden dolayı bu değer, daha da düşük olacaktır.



Şekil 1.8 Bet’z limitinin rüzgar enerjisi üzerindeki grafiksel gösterimi, (Al-Shemmeri, 2010)

Türbin düzlemine yaklaşırken, hava yavaşlar, türbinin içinden akar ve daha sonra türbinin arkasında minimum bir değere yavaşlatılır. Akış çizgileri akış tüpünün en düşük hava hızında maksimum bir çapa kadar genişlediğini göstermektedir. Türbine yaklaşırken, statik basınç (P_0) artar ve daha sonra en düşük değere iner ve basıncın dengelenmesi için tekrar ortam basıncına doğru yükselir. Akış hızı türbinin çok uzak arka taraflarında başlangıç değerine yükselir ve akış tüpünün genişlemesi kaybolur. Bu temel ilişkilerin ideal, sürtünmesiz bir akış için türetildiğini unutmamak gerekir. Bu ilişkilerde rüzgar türbini tipine ve özelliklerine bakılmaz (türbinin ideal olduğu yani %100 verimle çalıştığı varsayılır). Gerçek durumda ise C_p değeri daima ideal Betz değerinden daha küçük olacaktır.



Şekil 1.9 Türbine gelen rüzgar ve arkadan çıkan rüzgarın hız ve basınç dağılımlarının gösterimi, (Hau, 2013)

Momentum Teorisi'nden türetilen temel bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- 1 - Bir türbin (veya herhangi bir enerji dönüştürücü) tarafından serbest akım hava akışından elde edilebilen mekanik güç rüzgar hızının kübüyle orantılıdır.
- 2 - Güç, türbinin enine kesit alanıyla doğrusal olarak artar yani rotor çapının karesi ile artar.
- 3 - İdeal bir hava akımı ve kayıpsız bir dönüşüm ile çıkartılabilir mekanik gücün, rüzgarda bulunan kinetik güce oranı yaklaşık 0.593'lük bir değer ile sınırlıdır. Bu nedenle belirli bir kesit alanındaki rüzgar enerjisinin sadece %60'ına yakın bir kısmı mekanik enerjiye dönüştürülebilir.
- 4 - İdeal C_p değerine ulaştığında, türbin akış düzlemindeki rüzgar hızı (V') bozulmamış rüzgar hızının (yani V_1) üçte ikisine denk gelir ve türbinde üçte birine düşürülür.

Gerçekte rüzgardan çıkartılabilecek ve kullanılabilir işe dönüştürülebilecek olan gücü hesaplarken aşağıdaki formülasyondan yararlanılır;

$$P_{\text{Gerçek}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1.14)$$

Türbinin maksimum gücü ile gerçek gücü arasındaki farkı daha iyi anlamak için şu örneği vermek yeterli olacaktır:

Dünyanın en büyük rüzgar türbini 126 metre rotor çapına sahiptir ve denizde üzerindedir (Offshore). Deniz seviyesinde olduğundan hava yoğunluğu yaklaşık 1,2 kg/m³ kabul edilebilir. Türbin 14 m/s rüzgar hızında 5 MW güç üretmektedir. Rotorun süpürme alanı (A) 12,469 m²'dir. Türbinin %100 verimle çalıştığını varsayarak rüzgardan çıkartılabilecek maksimum güç 12,173 MW elde edilecektir.

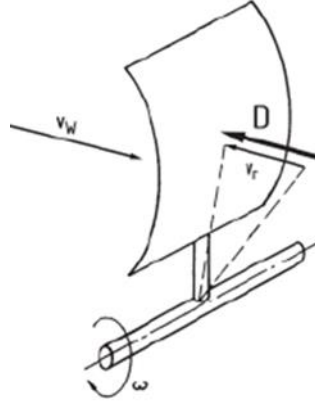
1.4 Rüzgar Türbini Aerodinamiği

Betz'in momentum teorisi, rüzgar türbininin tasarımına bakılmaksızın, serbest hava akışından mekanik gücün çıkarılması için fiziksel olarak ideal bir sınır olduğunu belirtir. Bununla birlikte, gerçek koşullar altında elde edilebilen güç, türbinin özelliklerinden bağımsız olamaz. Gerçek gücü önemli ölçüde etkileyen ilk temel fark, mekanik güç üretmek için hangi aerodinamik kuvvetlerden yararlanıldığıdır. Bir hava akımına maruz kalan tüm cisimler; bileşenleri akış yönünde aerodinamik sürüklenme ve akış yönüne dik aerodinamik kaldırma olarak adlandırılan aerodinamik kuvvetlere maruz kalırlar. Elde edilen C_p değerleri, aerodinamik sürüklenmenin veya aerodinamik kaldırmanın kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak büyük ölçüde değişir (Hau, 2013).

1.4.1 Aerodinamik Sürüklenme Kullanan Türbinler

En basit rüzgar enerjisi dönüşümü salt (saf) sürüklenme yüzeyleri vasıtasıyla elde edilir. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi hava V_w (V_{wind}) hızında A yüzeyine çarpar. P gücü; aerodinamik sürüklenme D, rotor süpürme alanı A ve kanadın veya geometrinin ötelenme hızı V_r kullanılarak hesaplanabilir (Hau, 2013).

$$P = D \cdot V_r \quad (1.15)$$



Şekil 1.10 Sürüklenme bazlı çalışan rüzgar türbini şematığı (Paraschivoiu, 2002)

Bağıl hız değeri $V_{rel} = V_w - V_r$ eşitliği ile bulunur. V_{rel} , sürüklenme alanına etkiyen net hız bileşenidir ve aerodinamik sürüklenme kuvveti D 'yi bulurken kullanılır. Aerodinamik sürüklenme katsayısının (C_D) kullanımı ile D sürüklenme kuvveti aşağıdaki gibi bulunur;

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_w - V_r)^2 \quad (1.16)$$

Denklem 1.16'nın, denklem 1.15'e uygulanmasıyla sürüklenme bazlı çalışan bir türbinden elde edilen güç;

$$P = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_w - V_r)^2 \cdot V_r \quad (1.17)$$

Sürüklenme tabanlı çalışan türbinler için maksimum C_p değeri aşağıdaki formülasyonlar yardımıyla bulunur;

$$C_p = \frac{C_D \cdot (V_w - V_r)^2 \cdot V_r}{V_w^3} \quad (1.18)$$

C_p 'nin maksimum değerine V_r / V_w oranı $1/3$ 'e eşit olduğunda elde edildiğine göre;

$$C_{P,max} = \frac{4}{27} C_D \quad (1.19)$$

Rüzgar yönüne kıvrılmış içbükey (konkav) bir yüzeyin aerodinamik sürüklenme katsayısı C_D 'nin 1,3 değerini neredeyse geçemeyeceğini göz önünde bulundurursak, $C_{P,max}$ değeri, sürüklenme tabanlı çalışan türbinler için yaklaşık olarak 0,2 değerini almaktadır.

Görüldüğü gibi sürüklenme bazlı çalışan türbinler Betz'in ideal değeri 0,593 olan katsayısının neredeyse sadece 1/3 'üne ulaşabilmektedir (Paraschivou, 2002).

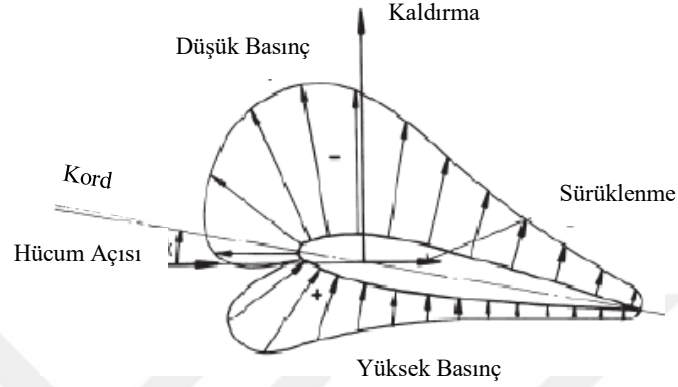
1.4.2 Aerodinamik Kaldırma Kullanan Türbinler

Rotor kanadının şekli, aerodinamik kaldırmanın kullanılmasına müsaade ederse, çok daha yüksek güç katsayıları elde edilebilir. Uçakların kanat profilinde olduğu gibi, aerodinamik kaldırmanın kullanılması verimliliği önemli ölçüde artırır.

Tüm modern rüzgar türbinleri bu efekti kullanmak için tasarlanmıştır ve bu duruma en uygun tür yatay eksenli rüzgar türbinleridir. V_w rüzgar hızı, vektörel olarak rotor kanatlarının çevresel hızı olan u ile toplanır. Rotor kanatları döndüğünde, dönme ekseninden belirli mesafedeki kanat kesitindeki çevresel hızdır bu hız. Kanat profilinin korduyla birlikte bileşke akış hızı, aerodinamik hücum açısını oluşturur. Oluşan aerodinamik kuvvet serbest akış hızı doğrultusunda D sürüklenme kuvveti ve serbest akış hızının dik doğrultusunda ise L kaldırma kuvveti bileşenlerine ayrışır. Buna ek olarak kaldırma kuvveti L , sırayla, rotorun dönme düzleminde bir L_{tork} bileşenine ve dönme düzlemine dik bir L_{itme} bileşenine ayrılabilir. Teğetsel bileşen L_{tork} tahrik momenti oluştururken, L_{itme} bileşeni ise itme kuvveti oluşturur.

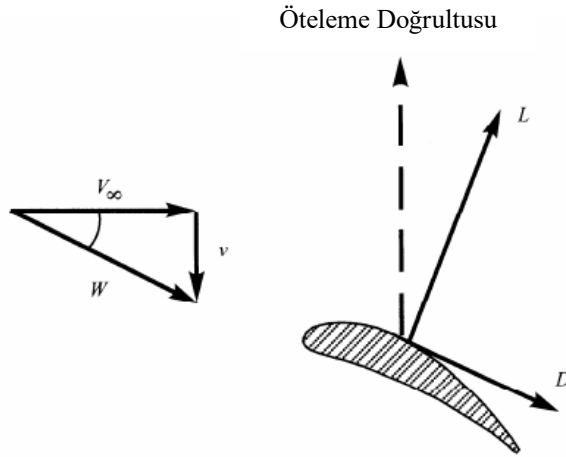
Uçak kanatları için geliştirilen ve aynı zamanda rüzgar türbinlerinin rotorlarında da kullanılan modern kanat profilleri için son derece uygun olan bir Kaldırma/Sürüklenme oranı vardır (E). Bu oran 200'e kadar olan değerlere ulaşabilir. Bu gerçek, aerodinamik kaldırmanın itici güç olarak kullanılmasının ne kadar etkili

olduğunu niteliksel olarak göstermektedir. Bununla birlikte bu aşamada, kaldırma tipi rotorların ulaşılabilir güç katsayılarının yalnızca temel fiziksel ilişkiler yardımıyla nicel olarak hesaplanması artık mümkün değildir. Bunun için daha sofistike teorik modelleme kavramları geliştirilmiştir.



Şekil 1.11 Kanat profiline etkiyen aerodinamik kuvvetlerin gösterimi (Hau, 2013)

Aşağıdaki şekilde V_r hızıyla ötelenen kanat elemanı kesitini (veya kanat profilini) göstermektedir. Rüzgar hızı V_w ile bağlı hız olan V_{rel} arasında bir hücum açısı oluşur demiştik. Bu durumda kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ortaya çıkar ve öteleme hızı V_r artarken, aerodinamik kuvvetler bileşke rüzgar hızıyla birlikte dönerler.



Şekil 1.12 Kanat profili üzerine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin gösterimi ve hız üçgeninin gösterimi, (Paraschivoiu, 2002)

Böyle bir cihaz tarafından elde edilecek güç;

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot V_w^3 \cdot A \left[1 - \frac{(V_r/V_w) \cdot D}{L} \right] \cdot \frac{V_r}{V_w} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_r}{V_w} \right)^2} \quad (1.20)$$

Hızların oranı (V_r / V_w) ve kaldırma/sürüklenme oranının bir fonksiyonu olarak bu şekilde tanımlanır. Bu durumda maksimum C_p değerine $V_r / V_w = 2/3 (L/D)$ iken ulaşılır. Bu durumda;

$$C_{P,max} = C_L \cdot \frac{2}{9} \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \sqrt{1 + \frac{4}{9} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^2} \quad (1.21)$$

$$\frac{C_P}{C_L} = \left[1 - \frac{(V_r/V_w) \cdot D}{L} \right] \cdot \frac{V_r}{V_w} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_r}{V_w} \right)^2} \quad (1.22)$$

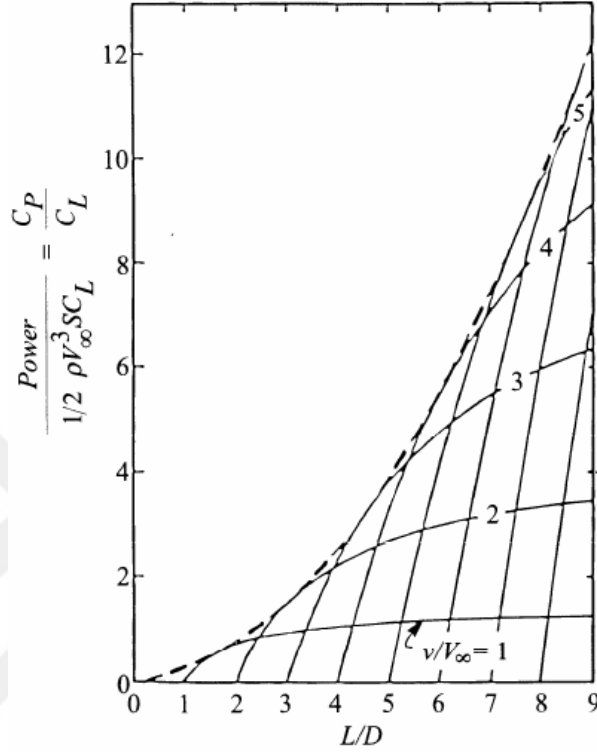
Yukarıdaki eşitlikte C_P/C_L oranının L/D oranının ve V_r / V_w oranının fonksiyonu olduğunu görmekteyiz. Bu durum için çizdirilen grafikte bu oranların değişimiyle C_P/C_L 'nin nasıl değiştiğini kolaylıkla görebiliriz.

Örneğin herhangi bir L/D oranında maksimum C_P 'yi bulmak istersek:

$L/D = 4$ için maksimum C_P/C_L değerine $V_r / V_w = (2/3) \cdot 4$ iken ulaşılabilir. Bu durumda ve grafikte de kolayca görülebileceği üzere C_P/C_L 'nin bu kaldırma-sürüklenme oranında ulaşabileceği maksimum değer 1.22 numaralı denklemden hesaplanarak 2,53 olarak bulunur ve grafikte de buna yakın bir değer olarak okunduğunu görebiliriz.

Kaldırma bazlı çalışan cihazlar, rüzgar hızından daha büyük hızlarda çalışma avantajına sahiptir. Bu, kaldırma mekanizmasının, 1'den büyük bir kanat uç hız oranı (TSR) için tasarlanan, dönen makineler için daha avantajlı olduğu anlamına gelir. Sürüklenme bazlı çalışma durumunda, maksimum güç katsayısı yeterince küçüktür. Wilson ve diğer. (Wilson, Lissaman ve Walker, 1976) denklem 1.21 kullanılarak sürüklenme cihazlarına göre kaldırma cihazlarının verimliliğini görmek için $C_{D,max}/C_{L,max} = 1$ olduğunu varsayarak, kaldırma mekanizmasının bir sürüklenme

mekanizmasından daha fazla güç üretebileceğini buldular (L/D oranının 10 olduğu varsayımıyla, birim yüzey alanı başına 100 kat daha fazla güç üretebileceğini buldular) (Paraschivoiu, 2002).



Şekil 1.13 Kaldırma/Sürüklenme katsayısı oranına karşılık elde edilebilecek maksimum güç değerlerinin grafiği (Paraschivoiu, 2002)

1.5 Rotor Aerodinamiği

Rotor, bir türbinin işlevsel elemanlarının zincirindeki ilk unsurdur. Bu nedenle aerodinamik ve dinamik özellikleri, birçok bakımdan tüm sistem üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Rotorun süpürdüğü alandan akan rüzgar enerjisinin maksimum oranda mekanik enerjiye çevrilmesi kabiliyeti, açıkça, aerodinamik özelliklerinin doğrudan sonucudur ve bu da rüzgar türbinindeki enerji dönüşümünün genel verimliliğini büyük ölçüde etkiler. Tüm diğer düzeltici güç üretim sistemlerinde olduğu gibi sistemin genel ekonomikliğı açısından en önemli olan enerji toplayıcının bu verimliliğidir. Rüzgar tarafından sağlanan yükselip-alçalan güç girdisini üniform (düzgün) torka dönüştürme kabiliyeti açısından rotorun aerodinamik, mekanik ve dinamik özellikleri daha az belirgindir fakat aynı oranda da önemlidir, aynı zamanda

kaçınılmaz olan dinamik yükleri mümkün olduğunca düşük seviyede tutmak gerekir. Türbinin arka tarafındaki akış bölgesinde elektriksel ve mekanik elemanlara etkiyen yük problemlerinin büyüklüğü rotorun yukarıda bahsedilen gereksinimleri ne kadar iyi karşıladığına bağlı olacaktır.

Rüzgar türbininin kontrol sistemi, aerodinamik özelliklere bakıldığında dikkate alınması gereken bir diğer husustur. Rotorun zayıf tork özellikleri veya rotor kanatlarının kritik akış ayırma karakteristikleri, rüzgar türbininin güç kontrolü için ciddi bir handikap olabilir. Bu nedenle kontrol sistemi, rotorun aerodinamik özelliklerine göre ayarlanmalıdır. Bu özellikler, rotor aerodinamiğinin sistemdeki önemi göstermektedir. Rotorun aerodinamik karakteristikleri ve en önemli parametreleri hakkında en azından bilgi sahibi olmadan bir rüzgar türbininin çalışmasının genel prensibini anlamak mümkün olmayacaktır (Hau, 2013).

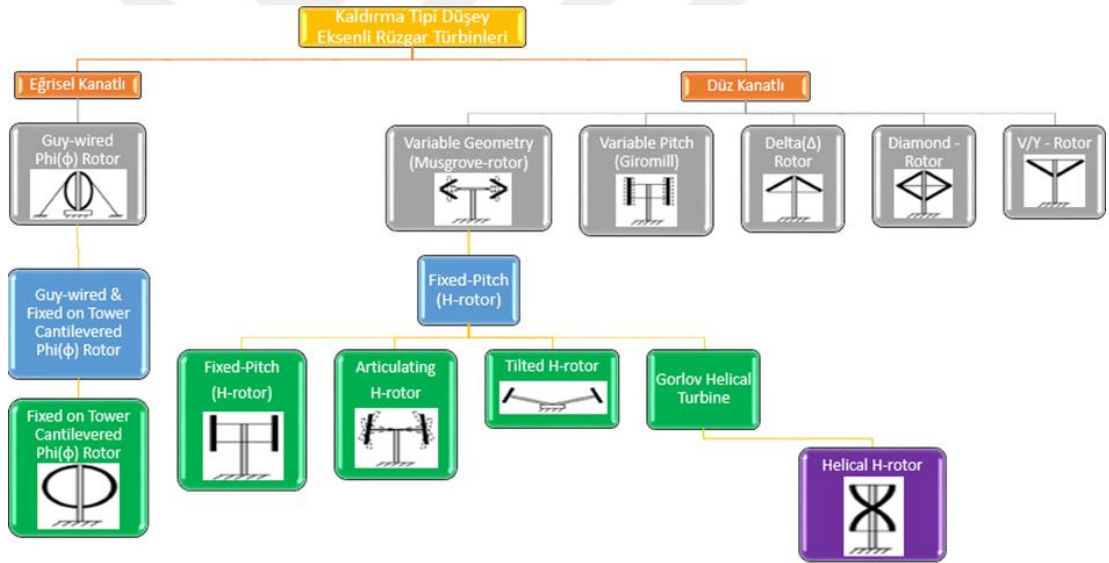
BÖLÜM İKİ

DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ

2.1 Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Çeşitleri

Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri rüzgar yönüne dik bir dönme eksenine sahiptirler ve türbin kanatları bu eksene yerleştirilir. Ticari kullanımda Yatay Eksenli rüzgar türbinleri kadar yaygın olmasalar da kentsel kullanım için daha uygundurlar. Rüzgarı her yönden alabilme özellikleri vardır.

Düşey eksenli rüzgar türbinlerini aşağıdaki şekilde yer aldığı gibi sınıflamak mümkündür.



Şekil 2.1 DERT'lerin sınıflandırılması

Genel sınıflandırmanın yanında kaldırma tipi veya sürüklenme tipi düşey eksenli rüzgar türbinleri olarak da ayrı bir sınıflandırma yapmak mümkündür. Rüzgardan enerji çıkartmak için iki farklı yol mevcuttur (Paraschivoiu, 2002).

Sürüklenme tipi olanlar daha az enerji çıkarırlar rüzgardan ancak daha yüksek tork sağlarlar ve genelde su pompalama gibi mekanik uygulamalar için oldukça uygundur.

En bilinen sürüklenme tipi düşey eksenli rüzgar türbini Savonius olarak adlandırılan türbindir.

Kaldırma tipi düşey eksenli rüzgar türbinleri ise kaldırma kuvveti oluşturmak için aerodinamik bir kanat profili kullanırlar ve rüzgardan daha hızlı hareket edebilirler. Bu tip türbinler genelde elektrik üretimi için uygundurlar. En bilinen kaldırma tipi düşey eksenli rüzgar türbini ise Darrieus olarak adlandırılan türbindir.

Kaldırma tipi rüzgar türbininin yapılma amacı kavisli kanatlar yerine düz kanatlar kullanmaktır. Bu tip bir cihaz ‘Giromill’ olarak adlandırılır ve sürüklenme tipine oranla daha yüksek verim elde edilir.

2.2 Matematiksel Model ve Hesaplamalar

Tasarımcı, rotorun gerçek şekli (örn; kanat sayısı, kanat profili vb.) ile aerodinamik özellikleri arasındaki ilişkiyi çözümlerken birçok problemle karşılaşacaktır. Tasarım aerodinamiği daha da karmaşıktır, çünkü rotor kanatlarının mukavemeti ve rijitliği ile rotorun aerodinamiğinden dolayı rotor tarafından üretilen gürültü vb. gibi sayısız unsuru göz önünde bulundurmak zorundadır. Bu nedenle gerçek rotor, ideal aerodinamik şeklin ve mukavemet ve rijitlikten kaynaklanan gerekliliklerin birlikte düşünülerek optimum şartların belirlenmesi ile elde edilir ve en önemlisi imalat maliyetlerini de göz önünde bulundurmalıdır.

Çoğu teknik tasarımda olduğu gibi, pratikte, tasarım süreci tekrarlanarak yapılır. Başlangıçta istenen özelliklere sahip olacağı taahhüdünde bulunan rotor konfigürasyonuna ait bir fikir vardır. Daha sonra bu konfigürasyon için hesaplamalar yapılır ve beklenen sonuçlarla mukayese edilir. Çoğunlukla sonuçlar ilk etapta tatmin edici olmaz, ancak matematiksel fiziksel model, rotorun tasarımı için verilen parametrelerin nihai sonucu nasıl etkilediğine dair fikir vermiş olur. Doğru yakınsamalar uygulanarak tasarımın geliştirilmesi bu şekilde sağlanacaktır.

Rüzgar türbinlerindeki teorik uygulamalar, gelişen havacılık aerodinamiği ile daha da tetiklendi. 20.yy’da aerodinamikçiler o noktaya gelinceye kadar daha çok ampirik olarak çalışan uçak tasarımcıları için güvenilir ve bilimsel temelli matematiksel araçlar sağlama görevi ile karşılaştılar. Aerodinamik olarak ideal kanadın bulunması için geliştirilen akışkanlar mekaniğinin özel bir dalı olan ‘kanat teorisi’ böylelikle geliştirilmiş oldu. Bu teori ile birlikte bu dönemde geliştirilen pervane ve türbin tasarım hesaplamalarının teorik modelleri, rüzgar türbini rotorlarının aerodinamik hesaplamaları için bir başlangıç olmuştur. Glauert tarafından 30’lu yıllarda, özellikle rüzgar enerjisi türbin rotorlarının aerodinamiğinin anlaşılması konusu oldukça geliştirildi. Glauert’in pervane teorisi daha sonra rüzgar türbini rotorlarına uygulanmış ve daha sonra Hutter ve Schmitz ve diğerleri tarafından geliştirilmiş ve iyileştirilmiştir. Son yıllarda helikopter rotorlarıyla yapılan yoğun çalışmalar bu konuda daha fazla bulguya neden olmuştur. Amerikalı Wilson ve Lissaman özellikle EDP sistemleri için özel hesaplama yöntemleri uyarlamışlardır (Hau, 2013).



Poul La-Cour, Denmark 1846–1908



Albert Betz, Germany, 1885-1968



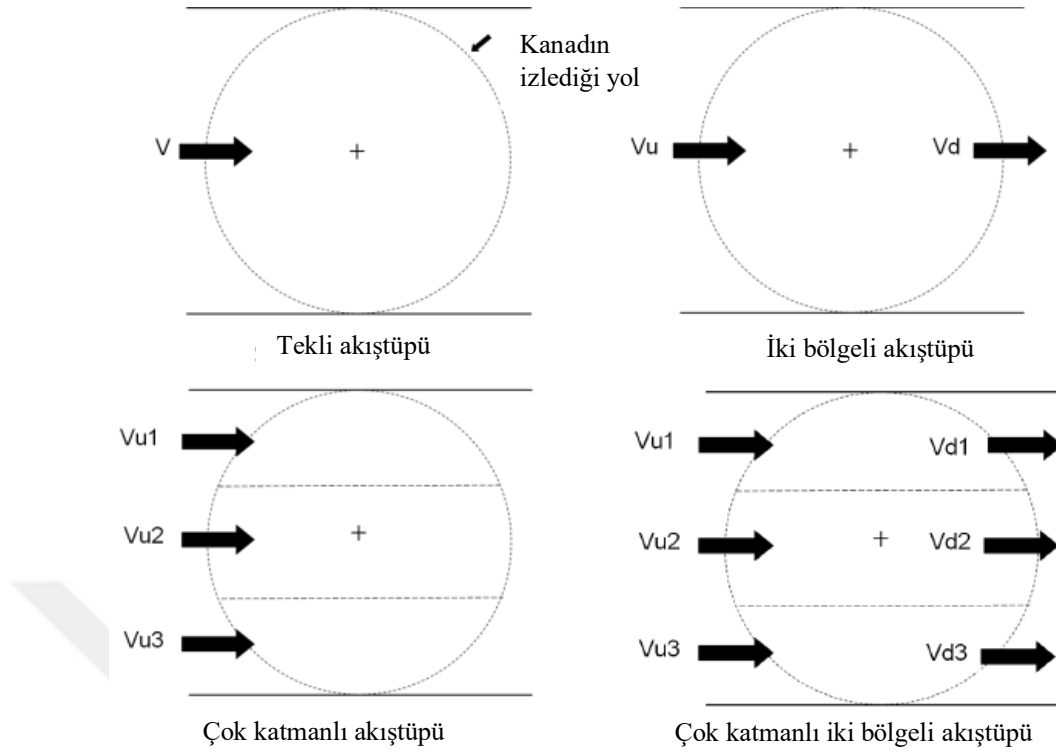
Palmer Cosslett Putnam, USA, 1910-1986



Ulrich Hütter, Germany, 1910-1989

Şekil 2.2 Rüzgar türbini teorisini geliştiren bilim insanları (Hau, 2013)

Glauert (2011) , uçak pervanelerinin performansını tahmin etmek için ‘Kanat Elemanı Teorisini’ tanıttı ve daha sonra Templin (1974) bu teoriyi düşey eksenli rüzgar türbinlerine uyarladı ve Darrieus tipi rüzgar türbininin performansını tahmin etmek için en basit model olan ‘Tekli Akıştüpü’ modelini sundu. Wilson ve Lissaman (1974) , bu akıştüpü modelini geliştirdiler. Türbinin süpürme alanı birkaç akış bölgesine ayrılmış ve kanat elemanı teorisi uygulanmıştır. Bu model ‘İki Bölge Akıştüpü’ modeli olarak adlandırılmıştır. Ancak sadece yüksek hızlı rüzgar türbinleri için uygulanmaktadır. Strickland (1975), farklı bir İki Bölge Akıştüpü Modeli sunmuştur. Bazı gelişmeler gerçekleşse de model çok yavaş bir şekilde yakınsama sağladı. Paraschivoui, akış arkası ve akış önü bölgeleri şeklinde ayrıklaştırarak ‘Çok Katmanlı İki Bölge Akıştüpü’ modelini önerdi (Paraschivoui, 1981). Akış önü ve akış arkası bölgeleri iki ayrı aktüatör olarak düşünülmüştür. Rotorun akış arkası bölgesi akış önü açıklığından tamamen ayrıştırılmış olarak kabul edildi. Bu model daha iyi bir performans tahmini sundu. Paraschivoui, türbinler için birçok geliştirme yaptı. Daha sonra modele dinamik durma eklemesi yaptı ve modelin doğruluğunu geliştirdi. Ancak yine de modeller ve deneysel veriler arasında hala büyük farklılıklar vardır.



Şekil 2.3 Farklı tipteki matematiksel modellerin gösterimi (Castillo, 2011)

2.2.1 Türbin Parametreleri

Bu bölümde bir rüzgar türbinine ait tüm tasarım parametrelerinden bahsedilecek ve bu parametrelerin türbin performansına olan etkisi incelenecektir.

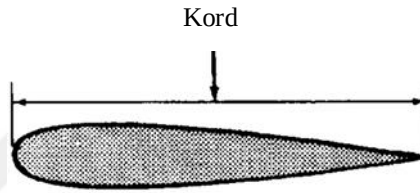
2.2.1.1 Güç Katsayısı (C_P)

Rüzgar Türbini tarafından üretilen güç ile havanın kendinde bulunan ideal gücün oranı bize güç katsayısı (coefficient of power) olarak adlandırılan C_p değerini verir. C_p 'nin maksimum alabileceği değer havadaki kinetik enerjiden maksimum ne kadar yararlanabileceğimizin göstergesidir. Betz'in teorisinden $C_p \approx 0,593$ olarak bulunan bu değer, pratikte mekanik kayıplar ve aerodinamik yetersizliklerden dolayı daha da düşük olacaktır. Pazardaki küçük düşey eksenli rüzgar türbinlerinden alınan verilerle yapılan analizde görüldü ki maksimum güç katsayısı C_p yaklaşık 0,15 ile 0,22 aralığındadır. Güç katsayısı sadece rüzgardan direkt olarak çıkartılan enerji dönüşümünde yani kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşümünde dikkate alınır

onun haricinde mekanik enerjinin elektrik enerjiye dönüştürülmesi aşamasında dikkate alınmaz burada daha çok jeneratör verimi devreye girer (Castillo, 2011).

2.2.1.2 Kord (Veter) Uzunluğu (c)

Kord uzunluğu kanat profili kesitinin ön kenar olarak adlandırılan kısmı ile arka köşesi arasındaki uzunluk olarak bilinir ve Reynolds sayısına katılık oranına ve daha birçok parametreye doğrudan etkir bu büyüklük. Bu sebeple tasarım yapılırken kord uzunluğunun iyi belirlenmesi gerekir (Castillo, 2011).



Şekil 2.4 Kanat profilinin gösterimi (Castillo, 2011)

2.2.1.3 Kanat Uzunluğu (H)

Burada düz kanatlı düşey eksenli rüzgar türbinlerinden bahsettiğimiz için yükseklik kavramı hem türbinin yüksekliği anlamını hem de kanadı uzunluğunu anlamını taşımaktadır. Tıpkı kord uzunluğunda olduğu gibi türbin yüksekliği de kanat açıklık oranına ve dolaylı olarak türbinin performansına etki ettiği için dikkatle belirlenmesi gereken bir parametredir (Castillo, 2011).

2.2.1.4 Türbin Yarıçapı (R)

Denklem 1.14'te yer alan süpürme alanından görüldüğü üzere türbinin yarıçapı türbinden elde edilebilecek gücün belirlenmesinde en etkin rol oynayan parametrelerden biridir ve türbinin birçok aerodinamiksel kuvvetine dolaylı olarak etkir bu sebeple doğru hesaplamalar ile ideal bir türbin yarıçapının belirlenmesi gerekir (Castillo, 2011).

2.2.1.5 Türbin Süpürme Alanı (A)

Rüzgar türbininin büyüklüğü türbinin süpürdüğü alanı belirler. Tasarımcıların optimum türbin büyüklüğü ile uğraşması ilk meşgalelerden biridir ve hangi türbin olursa olsun bu türbin büyüklüğünü belirleme işi ekonomik etkenlere bağlıdır. Bu ideal ekonomik konfigürasyonunu hesaplamak için birçok çalışma yapılmıştır ancak hepsi farklı şekilde sonuçlar meydana getirmiştir. 1979'da Sullivan, optimum ekonomik konfigürasyonu belirlemek için 15 – 20 metre aralığında incelemeler yapmış ve sonuçlar düşük maliyetli bir makine olarak kabul edilen 17 metrelik Sandia türbinine uygulanmıştır (Castillo, 2011).

Bir darrieus türbininin optimum boyutunu belirlemek için 'DAF Indal', çeşitli tasarım alternatiflerine ve maliyet analizine dayanan birçok projeyi inceledi. Şirket nihayet 1700 m² süpürme alanına sahip olan 1500 kW'lık bir rüzgar türbini önerdi. Tüm yapılan araştırmaların sonunda önemli deneyimler kazanıldı. FloWind 19 metrelik bir türbinin kurulum ve üretim maliyetlerinin 17 metrelik rüzgar türbininin maliyetlerini aştığını buldu ki bu da demek oluyor ki 19 metrelik türbin daha ekonomiktir. Darrieus tipi bir rüzgar türbininin kanatları ve merkezi sütun üzerindeki etkileri Malcolm ve Schienbein tarafından incelendi ve benzer yapı ve malzemelerin kullanımıyla; kütlenin türbin çapının küpü ile orantılı olduğu sonucuna vardı. Bu inceleme aynı zamanda ana tahrik elemanlarının maliyeti için yapıldı böylece toplam üretim maliyetin çapın üçüncü kuvvetiyle artmasının muhtemel olduğu sonucuna varıldı. Bu tamamen iyimser bir varsayımdır çünkü büyük bileşenler genelde seri üretime uygun değildir ve özel üretim teknikleri gerektirdiği için maliyet avantajlarından yararlanması da düşük bir olasılıktır. Diğer büyük maliyetler ise en azından çapın karesiyle artması muhtemel olan ulaşım ve saha hazırlığı, altyapı maliyetleridir. Bununla birlikte mevcut rüzgardan elde edilebilecek güç süpürme alanı ve rüzgar hızının küpü ile doğru orantılıdır. Süpürme alanı başına türbin ve halatların toplam kütlesi bazı ticari ve araştırma aşamasındaki rüzgar türbinleri için süpürme alanı ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Gerekli veriler tüm modeller için mevcut olmadığından bu karşılaştırma sadece sınırlı sayıda makine için yapılabilmektedir (Castillo, 2011).

Süpürme alanı, hareketi sırasında türbini çevreleyen havanın kesitidir. Süpürme alanının geometrisi rotorun konfigürasyonuna bağlı olarak değişir. Örn; bir yatay eksenli rüzgar türbininde kesit dairesel iken düşey eksenlilerde dikdörtgen kesitli olabilmektedir. Dikdörtgen kesitli Düşey eksenli rüzgar türbini için süpürme alanı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$A = 2.R.H \quad (2.1)$$

Burada R türbin yarıçapını ve H sembolü de türbin yüksekliğini ifade etmektedir. Süpürme alanı, türbin tarafından geçirilen hava hacmini sınırlar. Rotor rüzgardaki enerjiyi dönme hareketine dönüştürür ve böylece alan ne kadar büyükse aynı şartlardaki rüzgardan elde edilen güç çıkışı da o kadar büyük olacaktır.

Tablo 2.1 Farklı büyüklükteki süpürme alanlarına sahip türbinler (Jamieson, 2011)

Türbin	Süpürme Alanı (m²)	Toplam Ağırlık (kg)	Ağırlık/Alan (kg/m²)	Tip
<i>FloWind 17m</i>	241	7524	26,1	Ticari
<i>FloWind 19m</i>	315	10962	34,8	Ticari
<i>Adecon 19m</i>	316	9100	28,8	Ticari
<i>Magdalen Is. 24m</i>	478	14961	31,3	Araştırma
<i>Indal 6400</i>	495	17770	35,9	Ticari
<i>Sandia 34m</i>	955	72198	75,6	Araştırma
<i>Eole</i>	4000	300000	75	Prototip

2.2.1.6 Kanat Açıklık Oranı (AR)

Açıklık oranı olarak bilinen bu kavram türbinin yüksekliğinin çapına oranı ile tanımlanır. Başlarda Darrieus türbinleri verilen süpürme alanı için merkezi kolonu ve kanat uzunluğunun minimize etmek için düşük kanat açıklık oranlarında tasarlanırlardı. Ancak toplam maliyetin yaklaşık %50'sini kapsayan ve düşük hız torkuna oldukça bağlı olan tahrik düzeneğinin maliyeti gösterdi ki kanat açıklık oranı

arttıkça rotor hızı da artar ve güç sabit kalmak şartıyla tork düşecektir bu nedenle düşük kanat açıklık oranı ekonomik olarak çok da ideal değildir. Dahası, yerçekimi kanat açıklık oranı ile ilişkilidir. Şöyle ki düşük kanat açıklık oranı demek daha büyük yerçekimsel gerilme anlamına gelmektedir. Ancak büyük kanat açıklık oranları da türbinin dengesi açısından çok sağlıklı olmadığından kanat açıklık oranının da optimum bir değerde olmasını sağlamak için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ideal kanat açıklık oranının 1,3 ile 1,5 arasında olacağı varsayımı gerçekleşmiştir. Ancak farklı bakış açıları da vardır ve bunlardan bir tanesi kanat açıklık oranının devir sayısı ve reynolds sayısına olan etkisi ve doğal olarak türbinin performansına olan etkisinin incelenmesidir (Castillo, 2011).

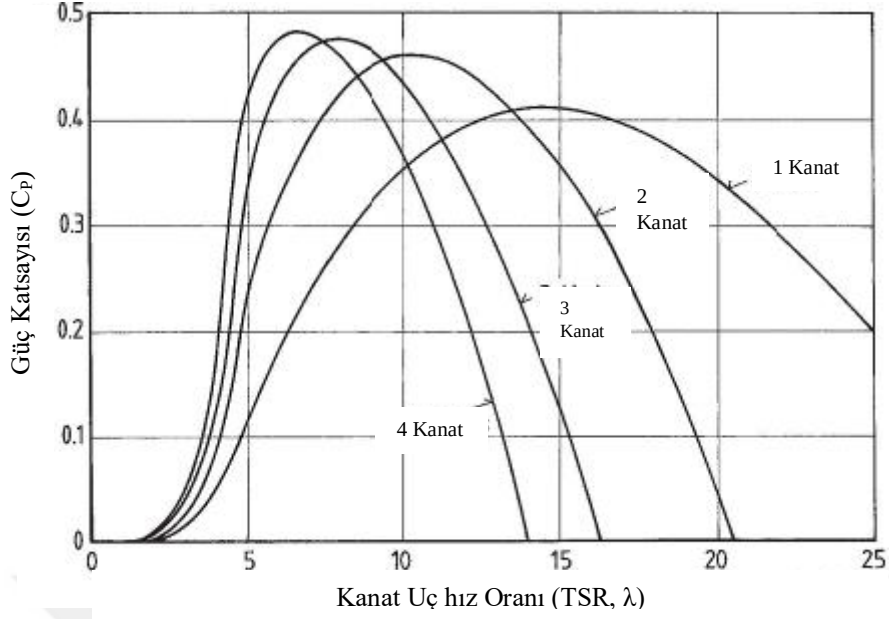
$$AR = \frac{H}{2R} \quad (2.2)$$

2.2.1.7 Kanat Sayısı (N)

Kanat sayısı rotorun düzgün olarak çalışmasına doğrudan etkide bulunur. Genelde en çok 3 ya da 4 kanatlı olarak bulunurlar. Kanat sayısı katılık oranına doğrudan etkir. Katılık oranı formülünden de gözlemlenebileceği üzere türbinin kanat sayısını arttırdığımızda katılık oranını istediğimiz bir düzeyde tutabilmek için kord uzunluğunu düşürmeliyiz. Artan kanat sayısı ile birlikte sabit kord uzunluğunda katılık oranı da artar ve bu da daha yüksek başlangıç torkuna, daha düşük çalışma TSR değerlerine ve daha düşük toplam güç performansına neden olur. Yatay eksenli rüzgar türbinleri ile yapılan bir deneyde kord uzunluğu kanat sayısı arttıkça orantılı olarak azaltılmış ve katılık oranı sabit tutulmuştur ve bu durum karışık sonuçları da beraberinde getirmiştir. Düz levha şeklindeki kanatlarda 3'ten 12 kanada kadar nispeten değişmeyen güç katsayısı, kanat profili şekilli kanatlarda kanat sayısı artarken önemli ölçüde azalmıştır. Bu da kanat sayısı ve katılık oranının güç performansındaki değişimden sorumlu olabileceği iddiasının ortaya atılmasına neden olmuştur. Sonuçlar eksenel akışlı türbinler içindi ve karşı akışlı türbinler için elde edilen sonuçlardan anlam çıkarırken daha dikkatli olunmalıdır. Kanat sayısı rotorun en belirgin karakteristik özelliğidir ve genellikle en çok anlaşmazlık yaratan tartışma ögesidir. Belli bir hava akımı keşinde mevcut olan rüzgar gücünden elde edilebilecek mekanik gücün rotor

yapısını bilmeden makul bir şekilde hesaplanmasının mümkün olduğunu daha önceki formülasyonlarda belirtmiştik. Bu durum kanatların rotor gücü üzerindeki etkisinin az olması gerektiğini zaten göstermektedir. Daha düşük sayıdaki kanada sahip rotorlar daha hızlı dönerler ve küçük bir kanat alanının dezavantajlarını telafi ederler. Aşağıdaki şekil kanat sayısının rotor güç katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Güç katsayısındaki azalma ya da artma şekilden açıkça görülmektedir (Castillo, 2011).

Kanat sayısı 1'den 2'ye çıkarıldığında kayda değer bir değişim olmuştur güç katsayısında ki o da yaklaşık %10 civarındadır ancak 2 kanattan 3 kanada çıkarıldığında bu oran %3, %4 civarında kalmaktadır ve 4 kanatlı bir türbinde ise güç katsayısı yaklaşık %2 civarında değişmektedir. Teoride, güç katsayısı artan kanat sayısı ile paralel olarak artacaktır. Ancak Amerikan rüzgar türbinleri gibi çok kanada sahip türbinler göstermektedir ki artan kanat sayısı ile güç katsayısı düşmektedir. Rotor katılık oranı çok yüksek olduğunda, aerodinamik akış koşulları daha karmaşık hale gelmektedir (cascade akışı) ve teorik model kavramlarıyla tanımlanamaz. Kanat sayısının güç katsayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde neden düşük sayıda kanada sahip (2 ya da 3 gibi) rüzgar türbinlerinin tercih edildiğini anlamak mümkündür. Genellikle, güç ve enerji veriminde yüzde birkaç verimi artırmak adına kanat sayısını arttırmak maliyetteki değişimi telafi etmeye yetecek kadar bir artış değildir. Bazı Darrieus türbinlerinde tork ve yapısal tepki için özellikle faydalı olacağı beklentisiyle 3 kanatlı yapılmış olsa da 2 kanatlı türbindeki malzeme ve kurulum maliyetinin daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı katılık oranını sağlamak için küçük kord daha fazla kanat sayısı seçmektense daha az kanat sayısı büyük kord uzunluğu seçmenin yapısal olarak daha avantajlı olduğu görülmüştür.



Şekil 2.5 Kanat sayısının türbin performansına olan etkisi (Hau, 2013)

2.2.1.8 Katılık Oranı (σ)

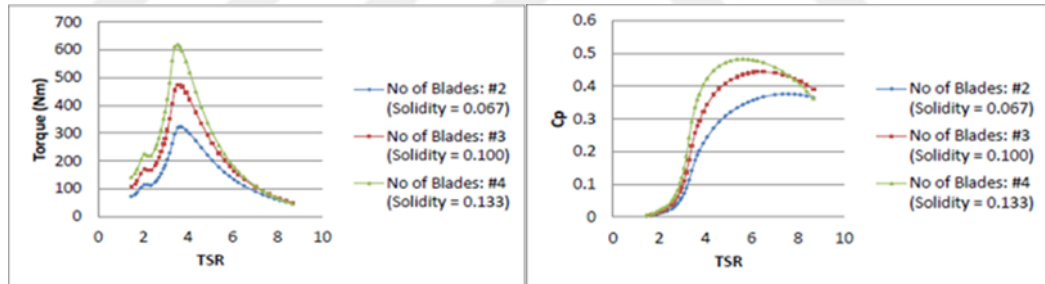
Katılık oranı toplam kanat alanı ile türbinin 2 boyutlu kuş bakışı görünüşünün alanı (planform area) arasındaki oran olarak ifade edilir. Kendi kendine dönme kabiliyetine doğrudan etkide bulunur bu boyutsuz parametre ve düz kanatlı düşey eksenli bir rüzgar türbini için bu oran;

$$\sigma = \frac{N \cdot H \cdot c}{H \cdot R} = \frac{N \cdot c}{R} \quad (2.3)$$

Bu formülasyon yatay eksenli rüzgar türbinlerine uygulanamaz çünkü süpürme alanının geometrisi farklıdır. Katılık oranı momentum modelleri varsayımlarının ne zaman uygulanabileceğini belirler ve $\sigma > 0,4$ gibi yüksek katılık oranlarında türbin kendi kendine çalışmaya başlar. Bu parametrenin türbin performansı üzerinde önemli etkisi vardır. Tasarımcılar, sıklıkla kanat sayısını değiştirerek türbinin katılık oranını değiştirir. Yüksek katılık oranına sahip türbinler genelde yüksek tork eldesi istenen yerlerde kullanılır. Bu türbinler genelde daha yavaş döner. Aşağıdaki şekilde yüksek katılık oranına sahip bir türbinin düşük TSR değerlerinde daha yüksek başlangıç torkuna sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek hızlı rüzgar uygulamalarında, mümkün olan en düşük torklarda çalışan türbinler daha çok istenir. Bunun sebebi türbini daha kolay çalıştırabilmek ve daha ucuz dişli kutusudur.

Şekilde, 0,1 metre kord uzunluğuna sahip bir türbin için farklı katılık oranlarında C_p ve TSR değişimini göstermektedir. Şekilden elde edilebilecek önemli bir nokta şu ki: Düşük katılık oranına sahip türbinlerin performans eğrisi daha geniş ve yassı (düz) bir hal almaktadır (Castillo, 2011).

Örneğin, C_p 'nin geniş bir TSR değer aralığındaki değişimi çok küçüktür ancak C_p 'nin maksimum değeri sürüklenme kayıplarının fazla olmasından dolayı daha düşüktür (Sürüklenme kayıpları kabaca, TSR değerinin kübüyle orantılıdır. Buna karşılık, yüksek katılık oranlarına sahip türbinlerde performans eğrisi daha dar bir aralıkta bir tepe noktasına sahiptir ve TSR'deki değişimlere karşı daha hassastırlar. Tüm diğer başlıca değişkenlerle birleştirilmesi ve dengelenmesi gereken önemli tasarım parametrelerinden biridir. Maliyet açısından ucuzluk isteniyorsa katılık oranı düşük tutulmalıdır. Bununla birlikte yapısal bütünlük açısından (alüminyum alaşım ekstrüzyonu gibi üretim teknikleri kullanarak) en düşük değer yaklaşık 0,1 civarında olmalıdır (Castillo, 2011).



Şekil 2.6 Kanat sayısına bağlı değişen katılık oranına karşılık tork (soldaki) ve güç katsayısı (sağdaki) değerlerinin grafiksel gösterimi (Okpue, 2011)

2.2.1.9 Kanat Profili

Birçok Darrieus türbin kanadında kaldırma performanslarının yüksek olması ve iyi bir perdövites karakteristiği sebebiyle NACA 00XX şeklinde 4 dijitle tanımlanan simetrik kanat profilleri kullanılmaktadır. İlk türbinlerde genelde NACA 0012 ve NACA 015 gibi daha ince profile sahip kanat profilleri kullanılmaktaydı ancak yatay konumdaki mukavemeti arttırmak açısından bazı üreticiler NACA 0018 kanat rofilini tercih etmektedir. Kanat profilinin şekli gelen bir akışa maruz kaldığında oluşan basınç

kuvvetleri nedeniyle performans üzerinde belirgin bir etkiye sahip olabilir. Kanat profili tasarım parametrelerinin bazıları; kord uzunluğu, ön kenar profili, arka kenar profili, kanat kalınlığının korda oranı, maksimum kalınlığın konumu ve kamber olarak tanımlanan parametrelerdir. Kanadın kord çizgisi ön kenar ile arka kenarı birleştiren çizgi anlamına gelir. Geleneksel olarak, düşey eksenli rüzgar türbini kanatları, geniş Reynolds sayı aralığı için kaldırma ve sürüklenme verilerinin mevcudiyetinden dolayı 4 dijital NACA profilleri ile tasarlanmaktadır. Bununla birlikte İslam ve arkadaşları, düz kanatlı düşey eksenli rüzgar türbini kanat profilleri üzerinde kanat şeklinin etkisini araştırmak için parametrik bir analiz sağlayarak 4 dijital simetrik kanat profillerinin diğer kanat profillerine oranla daha düşük performans gösterdiğini bulmuşlardır. Küçük düz kanatlı düşey eksenli rüzgar türbinleri için İslam ve arkadaşları optimum bir performans eldesi için istenen kanat profilinin çeşitli özelliklerini tespit ettiler: yüksek perdövites açısı, düşük sürüklenmeyle orantılı olan hücum açısının geniş bir aralığı, yüksek kaldırma / sürüklenme oranı, yüksek kaldırma katsayısı, gecikmeli aşırı perdövites gibi. Deneysel ve modelleme verilerinin analizi, bu özellikleri elde etmek için aşağıdaki kanat profili niteliklerini bulmuşlardır;

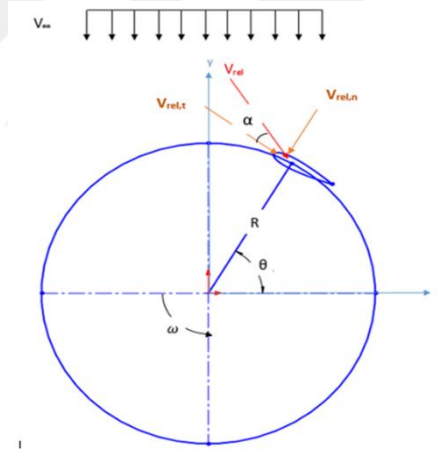
- Bombeli kanat, kamber açısı içbükey yöne bakacak şekilde dışarıya doğru radyal yönden uzak,
- Kalın kanat profili
- Büyük ön kenar radyusu,
- Keskin arka köşe

Kaldırma üretimi açısından, simetrik kanat profilleri hücum açısı negatif olduğunda (yani aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi bombeli kanat profilinin dışbükey tarafına doğru) asimetrik kanat profiline sahip olanlardan daha yüksek tork üretir. Ancak şu not edilmelidir ki buradaki hücum açısının işareti türbine göre değil kanat profiline göre tanımlanmıştır. İslam ve arkadaşlarının vurguladığı bazı asimetrik kanat profillerini göstermektedir ki düz kanatlı bir düşey eksenli rüzgar türbini için kendi kendine çalışmaya başlamasında, düşük reynolds sayılarında daha yüksek tork üretmek amacı gerekmektedir (Castillo, 2011).

Hızlı dönen rüzgar türbinlerinin verimliliği kullanılan kanat profilinin aerodinamik özellikleriyle büyük ölçüde belirlenir. Bu nedenle en uygun kanat profilinin seçilmesi, temiz bir rotor pervane yüzeyinin elde edilmesi, türbin kanatlarının performansı ve üretimi açısından büyük önem arz eder. Havacılıkta belli olan bu bulgu, rüzgar türbini teknolojisinde daha yeni gelişmelerle kabul gördü. Rotor performansı üzerindeki etkilerinden başka, belirli kanat profili özellikleri, rotorun kontrol ve çalışma davranışı için de önemlidir. Bazı çalışma koşullarında kritik hücum açısı değeri aşıldığında kanat profilinin perdövites davranışı büyük önem taşır bu gibi sebeplerle (Castillo, 2011).

2.2.1.10 Azimut Açısı (θ)

Türbin kanadının dönme düzleminde rüzgar yönüne göre konumunu belirleyen açı; bu açının değeri; kanat, rüzgarın gittiği yönde olunca bu açının değeri sıfırdır. Aşağıdaki şekilde azimut açısı θ olan bir türbin kanadı gösterilmiştir (Castillo, 2011).

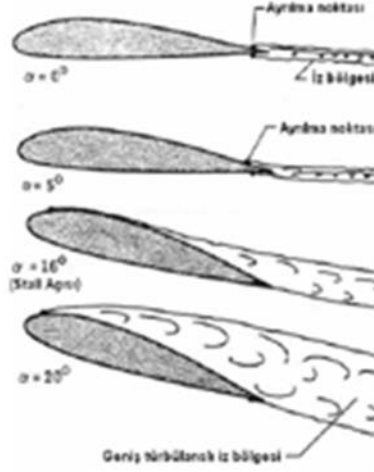


Şekil 2.7 Kanat dönüşünde oluşan azimut açısının gösterimi

2.2.1.11 Hücum Açısı (α)

Hücum açısı, kanat profilinin kord hattı ile kanada etkiyen bileşke hız vektörü arasında kalan açı olarak tanımlanır. Hücum açısı arttıkça kaldırma kuvveti de artar. Fakat bu açının belirli bir değeri geçmesi ile akım çizgileri kanat üzerinde tutunamayacaktır. 0°'lik hücum açısına sahip bir kanat profili firar kenarında akım

ayrılmaları başlar ve kanat arkasında iz bölgesi oluşur. Aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Castillo, 2011).

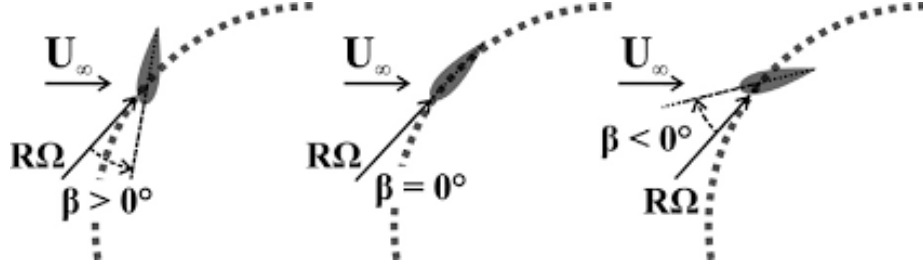


Şekil 2.8 Hücüm açısı oluşumunun gösterimi (Cengiz, 2010)

Hücüm açısı arttırıldıkça ayrılma noktası hücüm kenarına yaklaşır ve yaklaşık 12–16°'lik hücüm açısına ulaşıldığında akım ayrılması (stall) başlar. Türbülansın başladığı bu açiya stall açısı denir. Bu açıdan daha fazla hücüm açısının arttırılması halinde kaldırma kuvveti azalır ve sürüklenme kuvveti hızla artar. Hücüm açısının küçülmesi ile azalan kaldırma kuvveti uçak hızının arttırılması ile arttırılır. Yandaki şekilde kaldırma katsayısının stall açısına kadar arttığı ve bu açı değerinden sonra düşmeye başladığı görülmektedir. Ayrıca hücüm açısının artışı ile ayrılma noktasının hücüm kenarına yaklaşması sonucu sürüklenme katsayısı artmakta olduğu görülmektedir (Castillo, 2011).

2.2.1.12 Yunuslama Açısı (β)

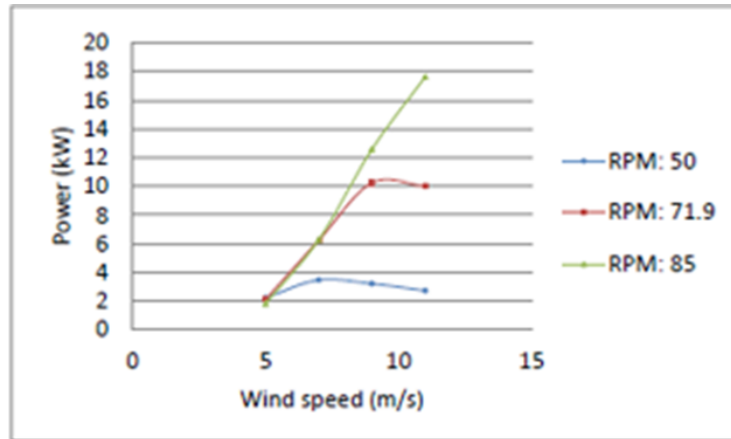
Yunuslama açısı olarak da bilinen *pitch* açısı türbinin dönme dairesine teğet olan çizgi ile kanat profilinin kord hattına teğet olan çizgi arasında kalan ve ' β ' ile gösterilen açıdır. Aşağıdaki şekilde pozitif bir yunuslama açısının gösterimi sunulmuştur. Kanat yunuslama açısı kanat profilinin montajlama noktasına göre değişir ve aşağıdaki şekilde kanat profilinin orta noktasından monte edilen bir gösterim mevcuttur. Diğer şekilde ise kord uzunluğunun ön kenardan 1/4 'ü kadarından montajlanmış bir kanadın yunuslama açısı gösterilmiştir (Castillo, 2011).



Şekil 2.9 Yunuslama açısının kanat profili üzerindeki gösterimi (Rezaeiha ve diğer., 2017)

2.2.1.13 Serbest Rüzgar Hızı (V_{∞})

Rüzgarda mevcut olan güç rüzgar hızının küpü ile orantılıdır demiştik. Rüzgar hızı arttıkça güç tepe noktasına ulaşmaya kadar yükselir ve tepe noktasına ulaştıktan sonraki rüzgar hızlarında azalmaya başlar. Devir arttıkça tepe noktasına daha yüksek rüzgar hızlarında ulaşılır. Kaldırma ve sürüklenme katsayılarına da önemli ölçüde etkisi bulunur rüzgar hızının. Belli bir değere ulaşana kadar rüzgar hızı arttıkça kaldırma katsayısı da sürüklenme katsayısı da artar ancak devir artmaya başladıkça sürüklenme katsayısı düşer ve kaldırma katsayısı da çok yüksek devirlerde genelde daha düşüktür. Aşağıdaki grafikte gücün belli devirlerde çalıştırılan türbinler için tepe değerine hangi rüzgar hızlarında ulaşıldığı ve bu rüzgar hızından sonraki güç değerindeki değişimi gösterilmiştir;



Şekil 2.10 Rüzgar hızına bağlı olarak türbinden elde edilebilecek maksimum güçlerin karşılaştırılması (Okpue, 2011)

2.2.1.14 Türbin Açısal Hızı (ω)

Türbin hızı çoğunlukla katılık oranı, rüzgar rejimi ve makinenin g değeri ile kontrol edilir. Türbin hızını arttırarak en küçük kanat alanı ile daha fazla enerji eldesi mümkündür. Bununla birlikte bu da, aerodinamiksel yüklere ve atalet yüklerine karşı daha zayıf kanatlara yol açabilir ki bazı ticari makinalarda bu durum yaşınmıştır (24 metrelik NRC/Hydro-Quebec makinası gibi). Türbin hızının artması elde edilecek torkun düşmesine neden olacaktır. Bu durumda daha karmaşık yapılı tahrik mekanizmaları kullanmak yerine maliyet olarak daha ucuz sistemler kullanılabilmektedir ancak elde edilecek g de düşünüldüğünde hem maliyet açısında hem de maksimum güç eldesi açısından optimum türbin hızını belirlemek için birçok çalışma mevcuttur. $P = T \cdot \omega$ olduğundan türbin hızının ge olan etkisini buradan gözlemlemek mümkündür (Castillo, 2011).

2.2.1.15 Kanat Uç Hız Oranı (TSR)

G katsayısı C_p en çok kanat ucundaki teğetsel hız ile gerçek rüzgar hızı arasındaki oranı ifade eden TSR değerine bağlıdır. Her rotor tasarımı maksimum güç eldesi için ideal bir TSR değerine sahiptir.

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{V_w} \quad (2.4)$$

İyi bir rüzgar alanı bulmak, küçük ölçekli rüzgar türbinleri için yer seçmek önemli bir konudur ve kurulu küçük ölçekli türbinlerin evlere ve çiftliklere ekonomik olarak elektrik üretebilmesi adına yıllık ortalama rüzgar hızı, en az 4 – 4,5 m/s civarında olmalıdır. IEC (International Electrotechnical Commission) ‘ye göre Türkiye’de ortalama rüzgar hızı 5,9 – 8,1 m/s aralığındadır.

Türbinin çalışacağı rüzgar hızını ayarlamak, performansını tahmin etmede önemli bir adımdır ve rüzgar türbininin başlangıç boyutunu belirlemeye yardımcı olur. Rüzgar türbinini tasarımımda ilk adımlardan biri çalışma uç hız oranının seçilmesidir. Güç katsayısının uç hız oranı ile değişiminin grafiği belirli bir türbinin çeşitli giriş ve dönüş

koşulları altında nasıl performans gösterdiğini anlamak için iyi bir göstergedir. Deneylerde bu durum özellikle önemlidir çünkü dönme hızı ve rüzgar hızı sürekli olarak değişmekte ve her iki miktarı birbirine bağlayacak olan bir formülasyon da uç hız oranı olduğundan türbinin güç çıkışı üzerindeki etkilerini anlamak daha da kolay bir hale gelmektedir bu kavramla birlikte (örneğin rüzgar hızındaki değişiklik devri de değiştirebilir; sistemde bir yük yok ise). Bu güç performans eğrileri TSR değerinin bir fonksiyonu olarak değişimi ile ortaya sunulduğunda aynı zamanda farklı sayıda kanatları olan türbinlerin optimum TSR değerinin de hangi aralıkta olması gerektiğini gösterir. Şöyle ki 3 kanatlı bir türbin için genelde optimum tasarımı elde etmek istiyorsak TSR değeri 7 ile 8 arasında tutulmalıdır ki iyi bir sonuç elde edelim ancak 2 kanatlılarda genelde bu değer 10 civarındadır. Tek kanatlılarda ise 15 civarı değerlere kadar çıkmaktadır TSR değeri optimum performans eldesi için. Optimum TSR değeri kanat profilinin seçimine de biraz bağlıdır (Castillo, 2011, s.29).

2.2.1.16 Reynolds Sayısı (Re)

Akış ortamındaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olup 1883 yılında Osborne Reynolds tarafından tanımlanan boyutsuz bir sayıdır;

$$Re = \frac{\rho \cdot V_w \cdot c}{\mu} \quad (2.5)$$

Burada; ρ yoğunluğu, V_w serbest akım hızını, c veter uzunluğu ve μ dinamik viskoziteyi ifade etmektedir.

Rüzgar türbinleri düşük Re sayılı rejimde çalışırlar. Re sayısına, hücum açısına ve kanat profilinin geometrik şekline bağlı olarak bir miktar farklılıklar gösterebilir. Bu durum, maksimum taşımada ve tutunma kaybı hücum açısında bir artış ve yüksek hücum açısındaki sürüklemeye bir miktar düşüş şeklinde kendini gösterir. Yani yüksek Re sayılarında kaldırma kuvveti artar ve sürüklenme kuvveti azalır (Castillo, 2011, 29).

Genelde doğru Reynolds sayısının seçimi üzerinde çok durulmaz. Ancak Reynolds sayısı türbinin enerji üretimi üzerinde oldukça önemli ve üzerine düşünülmesi gereken bir parametredir. Reynolds sayısının klasik tanımı, akış yoğunluğunu, akış hızını, akışkanın üzerinde aktığı yüzeyin uzunluk skalasını ve akışkan viskozitesini hesaba katar. Karakteristik uzunluk gövdenin şekline bağlı olarak çeşitli formlar alır ve hangi bölümlerin hava akışkanı ile etkileşimde olduğunu bu profilden görebiliriz türbinlerde bu kord uzunluğu olarak bilinir. Rüzgar türbinleri için Reynolds sayısını hesaplamanın çeşitli yöntemleri vardır:

- 1- Bazı araştırmacılar rüzgar hızına bağlı olarak Reynolds sayısını aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır;

$$Re = \frac{V_w \cdot c}{\nu_w} \quad (2.6)$$

Bu tanım en yaygın olanıdır ve kanat profili üzerinden akan akış için kullanılır. Sandia deneyinde bu tanım kullanılmış ve kaldırma ve sürüklenme katsayıları verileri üretilmiştir. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin simülasyonunda, akışın yalnızca serbest akış hızı, viskozite değeri ve kord uzunluğu temeline dayanarak karakterizasyon yapılması akış için uygun bir tanım sağlayamayabilir çünkü türbin hızını yani açısal hızı göz önünde bulundurmeyen bir hesaplama.

- 2- Reynolds sayısının diğer bir tanımı ise türbin hızı reynolds sayısı olarak bilinen ve rüzgar türbinine özgü olan tanımdır;

$$Re = \frac{\omega \cdot R \cdot c}{\nu_w} \quad (2.7)$$

- 3- Bu tanım ise yerel bağlı hıza bağlı olan Reynolds sayısının tanımını kapsar;

$$Re = \frac{V_{rel} \cdot c}{\nu_w} \quad (2.8)$$

Bu çalışmada daha çok türbinin her azimutal konumundaki hızını da hesaba katan türbin hızını içeren formülü yani iki numaralı reynolds sayısını kullanmaktayız.

2.2.3 Türbin Aerodinamiğinde Parametrelerin Önemi

Tasarım parametrelerinden her birini ayrı ayrı dikkate alarak tasarım yapmak mümkün olmadığı için çoğu zaman bazı parametreleri literatürden test edilip onaylanmış bir şekilde almak işe yarayabilir. Bir ön tasarım programı tasarlayarak gerekli parametre değerlerini girerek türbinden elde edilecek güç değeri, tork değeri, aerodinamik katsayı ve kuvvet değerlerini elde etmek ve türbinin optimum çalışma şartlarını kolaylıkla elde etmek tasarım aşamasından önce çok işe yarayabilir. Bu sebeple ilk önce nümerik olarak aerodinamik kuvvetlerin elde edilmesini göstereceğiz. İlk olarak türbinin dönme dairesi üzerinde tek bir kanat profili üzerindeki gelen rüzgar doğrultusuna göre oluşacak hız bileşenleri gösterilecektir. Daha sonra hız bileşenlerinin oluşturdukları geometrik açılar tanımlanacak ve düşey ve yatay doğrultuda oluşturdukları hız bileşenleri tanımlanacak daha sonra bu hız bileşenlerinden aerodinamik kuvvet bileşenlerine geçilerek en son performans eğrisi oluşturmak adına elde edilecek gerekli parametreler hesaplatılacak ve türbinin verimi ve tork değeri elde edilecektir.

Son yıllarda, Darrieus türbini için çeşitli aerodinamik performans tahmin modelleri oluşturulmuştur. Templin (1974), Wilson ve Lissaman (1974), Strickland (1975) ve Shankar (1976) modellerinin tümü, üç boyutlu Darrieus rotorlarının performansını tahmin etmek için kullanılmıştır.

Bu modellerin her biri (son üçü hemen hemen aynıdır), rotor kanatlarındaki kuvvetlerin, rotor boyunca akış yönünde momentumdaki değişime eşitlenmesine dayanır. Bu modellerle genel performans rotor kanatlarının hafifçe yüklendiği ve TSR'nin yüksek olmadığı koşullar altında oldukça iyi tahmin edilebilir. Bu modeller genel performans eğilimlerini tahmin etmede orta derecede başarılı olsalar da, birkaç açıdan tamamen yetersizdirler. Bu basit momentum modelleri ile ilişkili ana eksiklikler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bu modellerde kullanılan momentum denklemleri geçersiz hale geldiğinden, büyük TSR değerlerinde performans tahminleri yapılamaz. Bu durum rotorun katılık oranı arttıkça kötüleşir.

- Tahmin edilen kanat yükleri büyük olasılıkla çok yanlıştır çünkü bu modeller: (1) rotor boyunca yarı-kararlı bir akış olduğunu varsayar, (2) Sabit katılık oranındaki 1, 2 ve 3 kanatlı rotorlar arasında ve kanat reynolds sayıları arasında bir ayrım yapamaz, (3) rotor çevresindeki akış doğrultusunun konumunun bir fonksiyonu olan hızı sabit kabul eder ve (4) Serbest akış yönüne normal akış hızlarının 0 olduğunu kabul eder.



BÖLÜM ÜÇ

LİTERATÜR ÖZETİ

3.1 Yapılan Çalışmalar

Geçmişte düşey eksenli rüzgar makineleri için çeşitli vorteks modelleri geliştirilmiştir. Daha önce geliştirilen düşey eksen girdap modellerinin tipik örnekleri Fanucci (1976), Larsen (1975) ve Holmes (1976) modellerindendir.

Fanucci ve Walters (1976), dinamik durma olmayan kanatlarla yüksek kanat açıklık oranına sahip (H/D) düz kanatlı rotorlara uygulanabilen 2D girdap modelini ele almaktadır. Birinin kararsız serbest akış koşullarını simüle etmesine ve rotor açıklığının (*wake*) gelişimini gözlemlemesine olanak tanıyan geçici bir analiz formüle edilmiştir. Kanat profili yakınındaki potansiyel akışı modellemek için kanat kamber hattı boyunca bir girdap dağılımı kullanılır. Bu, sırayla kanada etkiyen kaldırma kuvvetlerinin yanı sıra, kanat profili yüzeyi boyunca basınç dağılımını belirlemeye olanak sağlar. Kanat profilinin bu gösterimi yalnızca dinamik durma olmayan koşullar için geçerlidir.

Larsen'in *cyclogyro*'su, Darrieus türbininden farklı olarak, mafsallı ve aslında devir başına iki kez "çeviren" kanatlara sahiptir. Kanatlar, güçlü girdapların sadece kanat profilleri çevrildiğinde dağılacığı şekilde mafsallanmıştır (Darrieus türbini ise girdapları sürekli olarak dağıtır). Larsen, tamamen gelişmiş bir *wake* varsayarak kararlı bir durum analizi gerçekleştirir. Bu *wake* yapısı daha sonra kanat-*wake* etkileşimlerinin kendinden tutarlı olmasını sağlayan yinelemeli bir işlemle değiştirilir. Kanat profili kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri lokal hücum açısına bağlı olarak hesaplatılır.

Holmes (1976) tarafından sunulan girdap modeli düz kanatlı ve yüksek kanat açıklık oranına sahip (H/D) düşey eksenli rüzgar türbinlerine uygulanır. Analiz, yüksek TSR değerlerinde çalışan yüksek unstalled kanat sayısına sahip rotorlar için

kesinlikle geçerlidir. Çok sayıda kanat varsayımı, kararsız akış probleminin sabit akış problemi ile yer değiştirmesine olanak tanır.

Sharpe ve Read (1982) indirgenen hızları hesaplamak için gereken etkileşim faktörleri için basit bir ifade buldu. Türbinin içinden geçen akış alanının düz ama paralel olmayan düzlemlerden oluşması gerekiyordu, ancak her yerdeki hızlar V_∞ doğrultusuna paralel idi. Daha sonra Loth ve McCoy (1983) tarafından düz kanatlı Darrieus rüzgar türbinleri için teorik bir optimizasyon tekniği geliştirilmiştir. Rotorun ön ve arka yarıları için ayrı kosinüs tipi etkileşim faktörleriyle birlikte seri olarak iki yarı silindirik aktüatör diski; bu hız dağılımında, rotor kanatları, iki rotor yarısının birleşme yerinin yanında yüksüzleşmektedir. Viskoz olmayan analizlerinde, aynı yazarlar eşit alanlı diskler kullandılar ve geleneksel değerden daha yüksek bir Betz tipi limit buldular. Newman (Newman, 1983) tarafından verilen 2 tane tekdüze yüksüz aktüatör diskleri için bir analiz, standart tahminlerin ($C_{pmax} = 16/27$) karamsar olduğunu ve tahmin edilenlere karşılık gelen yeni bir $C_{pmax} = 16/25$ değeri hesapladığını gösterdi. Paraschivoiu (Paraschivoiu, 1981) tarafından, indirgenen hızları tahmin etmek için rotorun ön ve arka yarıları üzerinde iki sabit interference faktörü kullanarak daha pratik bir analitik model geliştirilmiştir. Bu DMST modeli, genel aerodinamik performansı ve yükleri tahmin etmek ve düz ve eğri kanatlı Darrieus rotorlarının yapısal dinamik çalışmaları için kullanışlıdır. Bu farklı özellikler ön ve arka yarıdaki kanat kuvvetleri arasında ayırım yapabilen ucuz bir 'CARDAA' bilgisayar kodu kullanılarak belirlenmiştir. Performans / yük hesaplamaları yerel Reynolds sayısına ve yerel hücum açısına göre yapıldı.

Sandia Laboratuvarları'nda Berg (1985), daha sonra DMST modeline dahil edilen rotor yoluyla indirgenen hızlar için bir sinüs dağılımı düşündü. Bu durumda kullanılan 'SIDIF' bilgisayar kodu, akışkan tüplerinin yayılmasına izin vererek kütleyi koruyan, sabit olmayan interference faktörlerini içerir. Bununla birlikte, SIDIF modeli yüksek TSR'lerde işlevini kaybettiğinden, çalışma şu anda rotorun ön ve arka yarılarındaki akıştüplerinin her birinin bağımsız olduğu farz edilen 'INDOMS' bilgisayar koduyla 'Bağımsız DMST' modelinde devam etmektedir öte yandan akıştübünün genişlemesi

yatay düzlemle sınırlıdır ve denge düzlemi hızının düzensiz olduğu kabul edilir (Paraschivoiu, 2002).

Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte, özellikle yerleşim bölgelerinde düşey eksenli rüzgar türbinlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Yönsüz yani rüzgarı her yönden alabilen özellikle olmaları YERT'lere göre büyük avantaj sağlamaktadır. 1970'li ve 1980'li yıllarda ilk DERT geliştirmeleri karmaşık aerodinamiklerinden dolayı YERT'lere kıyasla performans ve ömürleri dolayısıyla çok rekabetçi değildi. Son yıllarda DERT'lerin performansını göstermek için HAD kullanımında önemli derecede artış olmuştur. Bunun sebepleri sadece kullanıcı dostu bir HAD yazılımı ve hesaplama maliyetleri değil aynı zamanda DERT'le ilişkili akış yapısının karmaşıklığından kaynaklanmaktadır (Castillo, 2011). 3 kanatlı rüzgar türbini performansı 2D HAD kullanılarak Dai ve Lam (2009) tarafından yapılmıştır ve sonuçlar tekil TSR değerindeki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Santiago ve diğer., (Santiago, Ramirez-Tovar ve Yuri, 2018) tarafından düz kanatlı Darrieus tipi çapraz akışlı deniz türbini için 2D HAD simülasyonları yapılmıştır ve tekil TSR değerinde Dai ve Lam'ın deneysel verilerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Danao ve Howell (2012) 2D DERT'in performansı üzerinde karasız akışın etkisini incelemiştir. Almohamadi ve diğer., (2013) ağ'dan (mesh) bağımsız çözüm ile yani 'Richardson extrapolation method', 'Grid Convergence Index method' ve 'fitting method' ile 2D DERT için incelemeler yapmıştır. Nobile ve diğer., (2014) DERT çevresine yerleştirilmiş yönsüz stator içeren DERT'in 2D HAD incelemelerini yapmışlardır ve C_p 'de ve tork değerinde %30-35 civarında bir artış olduğunu saptamışlardır. Elkhoury ve diğer., (2013) 2D HAD analizlerini faydalı hale getirmek için düz kanatlı DERT performansı üzerinde çeşitli türbülans modellerinin etkisini incelemişlerdir. Benzer deneysel ve hesaplama düzenekleriyle, laminar türbülans geçişinden kaynaklandığı kabul edilen bir senaryo ile tamamen türbülans modelleriyle C_p 'nin aşırı tahminleri tahmin edilmeye çalışıldı. Lanzafame ve diğer., (2014) 2D HAD çözücüyü DERT'ler için daha faydalı hale getirmek için tekli akıştüpü modelleri ile 'classical fully turbulence' modellerinin tahminlerini karşılaştırdı. McLaren ve diğer. (2008) küçük ölçekli yüksek katılık oranına sahip bir rüzgar türbini için '2D URANS CFD' simülasyonlarını başarılı bir şekilde gerçekleştirdi. Micallef ve diğer.,

(2014) kararlı ve kararsız akış koşullarında farklı DERT konfigürasyonlarının performansını ve wake dinamiklerini incelemek için 'vorticity transport' modelini kullandılar.

Önceki çalışmalar 2D akış modelinden faydalanmak için 2D simülasyonları az sayıdaki deneysel veri ile belirli bir TSR değerinde gerçekleştirdiler ki deneysel veriler validasyon çalışmaları için hayati önem taşır. Bu yapılan çalışmalar bağlantı kollarının DERT performansı üzerindeki etkisini incelememişlerdir. Bu özellik yüksek TSR değerlerinde ihmal edilemez (Elkhoury, Kiwata ve Issa, 2013) ki düşük TSR'larda meydana gelen kanat-bağlantı kolu etkileşiminden bahsedilmiyor bile. Dahası düşük kanat açıklık oranına sahip kanatları olan türbinler üzerindeki akış, kanat uç etkisi önemli hale geldikçe 2D davranışından uzaklaşır ve kıs 3 boyutlu hale gelir. Bu kısıtlamaları ele almak için, bu çalışmada bu etkiler de düşünülüyor ve deneysel sonuçlarla örtüşen bir 3D HAD modeli oluşturulması amaçlanıyor. Bu çerçevede, gelen akışın hızının etkisi, türbülans yoğunluğu, sabit veya değişken kanat açılı sistemler ve kanat profili şeklinin Türbinin C_p değeri üzerindeki etkisi dikkatli bir şekilde incelenmiştir. Farrugia ve diğer., (2014) Rüzgar tüneli ile offshore hawt modelinin performansı ve aerodinamiği üzerinde çalışmışlardır. Bose Sumantraa ve diğer., (2014) 3 kanatlı düz kanatlı H-Darrieus tipi DERT üzerinde önceden ayarlanmış yunuslama açısı etkisini nümerik yöntemle çalışmışlardır ve yunuslama açısının yokluğunda C_p değeri TSR'ın artan değerleriyle birlikte bir artış gösterdiğini, C_p 'nin pozitif değerleri türbinin güç ürettiğini saptamışlardır. Komass (2015), Matlab yazılımı kullanarak tek bir kanat için tork analizi yapmıştır. Matematiksel modeli oluşturmak için Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbininin kanat vektörlerini hesaplamıştır. Pitch açısı -20° ile $+20^\circ$ arasında değer alır ve $0,1$ derecelik artışlarla her yunuslama açısı için tork değeri hesaplatılır ve maksimum olan değer kaydedilir ve seçilen türbinin hangi sabit yunuslama açısında daha iyi sonuç verdiği belirlenmiş olur. Yunuslama açısı değerini maksimum tork eldesi ve maksimum C_L/C_D oranını sağlamak için belirlemiş ve maksimum tork eldesini sağlayan değerlerde türbinin daha performanslı çalıştığı sonucuna varmıştır. Blocken ve diğer., (2017) ise sabit bir yunuslama açısında DERT'lerin performans ve aerodinamiği üzerine inceleme yapmışlardır.

3.2 Motivasyon

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki bu alanda yeterli doğrulukta çalışma mevcut değildir. Elde edilen en önemli sonuç sabit bir pitch açısı, türbinin ön ve arka yarısında anlık moment katsayısı (C_m) değişimine sebep olur. C_m 'deki değişim DERT'ler için gelecek vaat eden güç geliştirme yöntemi olarak her bir kanadın dinamik pitching yapmasını önerir. Literatürde görülen eksikliklerden yola çıkarak deneysel verilerin kolayca kullanılabileceği bir sistem modellemek, bu modele daha sonra yapılacak deneysel verilerin kolayca entegre edilebilmesi, kullanılan metodolojinin optimizasyonlar sonucunda doğrulanmış streamtube sayısında gerçekleştirilmesi, programın deneysel verilerle aşırı tahmin kapabilitesinin düşürülerek pitch açısının gerçek etkisini görmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

Türbin performansının en iyi olduğu nokta (hücum açısı) çoğu çalışmada maksimum lift değerinin olduğu nokta olarak belirlenmiştir ancak maksimum C_L/C_D 'ye göre belirlenmediği için en ideal hücum açısı değeri yanlış tespit edilmiştir. Analitik çalışmalar içinde 1-boyutlu hızlı ve güvenilir sonuç veren bir sistem geliştirilmemiştir. Bu nedenle MATLAB'da bir veritabanı oluşturularak deneysel verilerin kolayca sisteme girilerek sonuç elde edildiği bir çalışma yoktur.

Yapılan çalışmaların doğruluğu birçok farklı deneysel ve analitik çalışmayla test edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda bir veya iki tane farklı çalışmayla doğrulama çalışması yapılmıştır. Programın doğruluğu 5 farklı çalışmayla test edilmiştir.

İlk olarak Seri ve Paralel bağlı 1 boyutlu sistemlerin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Program için deneysel verilerin kolayca entegre edilebildiği bir veritabanı geliştirilmiştir.

Geliştirilen modelin doğruluğunu literatürde deney verisi bulunan temel kanatlara sahip türbinlerle test edilerek kalibrasyonu sağlanmıştır. Yüksek başarılı (pasif akış kontrollü kanatlar dahil) kanat profillerinin araştırılıp, karakteristik eğrilerinin elde

edilmesi ve bunların derlenmesi. Temel ve yüksek başarılı kanatlara sahip türbinlerde sabit pitch açısının etkisiyle performansdaki değişimleri gözlemlenmiştir. Çalışmanın devamında temel ve yüksek başarılı kanatlara sahip türbinlerde değişken pitch açısının etkisi incelenmiştir. Sonuçların değerlendirilmiş ve pitch kontrolü ile ilgili genel kabul görebilir çıkarımların olup olmadığı değerlendirilmiştir.



BÖLÜM DÖRT

YÖNTEM

Şu ana kadar enerjinin tanımından, formlarından, enerji kaynaklarından ve rüzgar enerjisinden bahsedildi. Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimine değinildi ve teorik hesaplama yöntemlerine ve ideal bir türbinden elde edilebilecek maksimum güce giriş yapıldı. Tüm bu süreçlerde rüzgar türbinine ait tüm parametrelerden ve türbin performansına olan etkilerden de bahsedildi. Bu parametrelerin kullanılarak nümerik hesaplama yöntemi ile güç eğrilerini elde etmenin ve sabit tutulan parametreler ve değişken parametreler ile kıyaslama yaparken nümerik analizlerin zaman alıcılığından bahsedildi. Analitik çözüm metodlarının en büyük avantajı türbin parametresinin kıyaslanarak hızlı sonuç vermesi gibi gözükse de asıl önemli avantajı doğru bir kinematik analiz ile düşey eksenli rüzgar türbinlerindeki performansa etki eden parametrelerin önem sıralamasını belirlemektir.

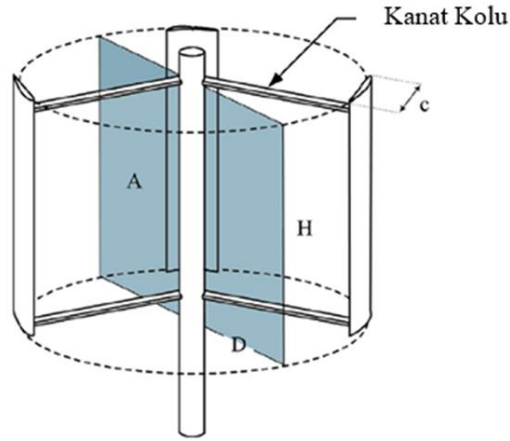
Şu ana kadar yapılan çalışmalar genelde nümerik metodlar ile performans değerlendirmesinde bulunmuş olsa da bu metodların çıkış noktası yatay eksenli rüzgar türbinleridir ve düşey eksenli rüzgar türbinlerindeki akış karmaşıklığı ve downstream bölgedeki türbülanslı akışın çözümlenmesinin zor olması kabul edilen varsayımların da geliştirilmesini gerektirmektedir.

DERT geometrisi Tablo 4.1’de numaralandırılan 12 temel parametre ile tanımlanabilmektedir. Bunlar, Şekil 4.1 üzerinde gösterilmektedir. Şekil 4.2 ise kanada gelen akımın ve oluşan kuvvetlerin yönünü göstermektedir.

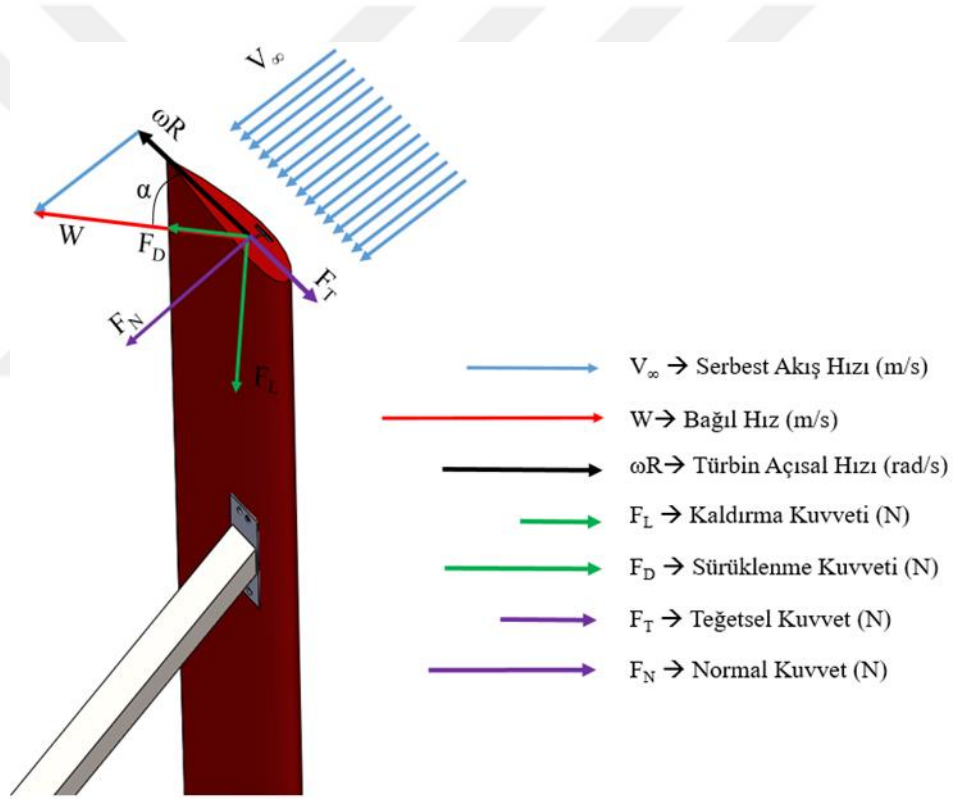
Tablo 4.1 Türbin Parametreleri

Parametrenin Tanımı	Sembolü	Birimi (SI)
Veter (Kord) Uzunluğu	c	m
Türbin/Kanat Yüksekliği	H	m
Rotor Çapı	D	m
Türbin Süpürme Alanı	A	m ²
Kanat Sayısı	N	-
Serbest Rüzgâr Hızı	V_{∞}	m/s
Türbin Dönüş Hızı	ω	rad/s
Kanat Profili	NACA-serisi	N/A
Katılık Oranı	σ	N/A
Hücum Açısı	α	Derece
Yunuslama Açısı	β	Derece
Türbin Açısal Konumu	θ	Derece

Tasarım parametrelerinden her birini ayrı ayrı dikkate alarak tasarım yapmak uzun bir süreci içerdiği için için, çoğu zaman literatürde bulunan ve daha önce test edilip onaylanmış boyutsuz gruplar üzerinden tasarım gerçekleştirmek mümkündür. Ancak daha detaylı olarak, 1-boyutlu bir model geliştirerek ve bu model üzerinde gerekli parametrelerin değerlerini girerek, türbinden elde edilecek güç değeri, tork değeri, aerodinamik katsayı ve kuvvet değerlerini saptamak ve türbinin optimum çalışma şartlarını belirlemek, bir diğer alternatiftir. Rüzgar türbini tarafından üretilen güç ile havada bulunan kinetik gücün oranı bize güç katsayısı (Coefficient of Power) olarak adlandırılan C_p değerini verir. Betz'in teorisinden bunun teorik üst sınırı 0.593'tür. Pratikte bu değer, mekanik ve aerodinamik kayıplardan dolayı daha da düşük olacaktır. Pazardaki küçük düşey eksenli rüzgar türbinlerinden alınan verilere göre DERT'ler için tipik güç katsayısı C_p yaklaşık 0,15 ile 0,22 aralığındadır (Tushar, Dhale, Harsh, Kavade, Prof. Ramesh ve Ghanegaonkar, 2018). Ancak türbin büyüdükçe (Reynolds sayısı arttıkça ve dolayısıyla göreceli sürtünme etkileri azaldıkça) bu değer 0,5 seviyelerine gelebilmektedir.



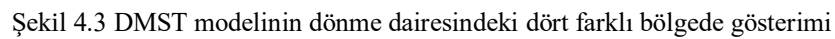
Şekil 4.1 Türbin üzerinde bazı parametrelerin gösterimi (Tushar, Dhale, Harsh, Kavade, Prof. Ramesh ve Ghanegaonkar, 2018)



Şekil 4.2 Kanat üzerine etkiyen hızlar ve aerodinamik kuvvetlerin gösterimi

Darrieus türbinleri için çeşitli aerodinamik performans tahmin modelleri vardır. Kanat-momentum prensiplerine dayanan aerodinamik modeller kanat yükünü tahmin etmede yetersizdir (Paraschivoiu, 1981). Buna rağmen momentum modelleriyle çalışma yürütmekteyiz çünkü bu modellerin en büyük avantajı çok hızlı bir şekilde sonuç vermeleri ve hesaplama maliyetlerinin oldukça düşük olmasıdır. Ayrıca dikey eksenli türbinleri geniş bir Reynolds sayısı ve hücum açısı aralığında çalışmaktadır.

Ion Paraschivoiu tarafından geliştirilen model ile akış tüpleri (rüzgarın geliş yönüne göre) ön ve arka olmak iki bölgeye ayrılmıştır. Ayrıca her iki bölgede birçok akış tüpü bulunmaktadır. İki parçaya bölünmüş çoklu akışkan tüplü bu analitik model ‘DMST’ olarak adlandırılmaktadır. Rotorun her iki tarafındaki indirgenen hızların değişimi, ön bölgede daha büyük torklar üretirken arka bölgede enerjinin büyük kısmının ön bölgede soğurulmasından dolayı daha küçük torklar üretmektedir (Sheldahl ve Klimas, 1981).



51

yerel rüzgar hızı V_∞ , $u < 1$ olan bir indirgeme (interference) faktörü ile azalır ve indirgenen hız, aşağıdaki gibi olur;

$$V_{\text{ön}} = u \cdot V_\infty \quad (4.1)$$

Nihayetinde indirgenen denge hızı V_{orta} ;

$$V_{\text{orta}} = (2u - 1) \cdot V_\infty \quad (4.2)$$

Rotorun arka bölgesi için, V_{orta} , giriş hızıdır ve akış tüpünün sonunda, indirgenen hız aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$V_{\text{arka}} = u_{\text{arka}} \cdot (2u - 1) \cdot V_\infty \quad (4.3)$$

$u_{\text{arka}} = V_{\text{arka}}/V_{\text{orta}}$ olduğu rotorun bu kısmı için ikinci indirgeme faktörü $u_{\text{arka}} < u$ olur. Bu koşullar altında akış tüpünde indirgenen hız, rotorun her bir yarısı için ayrı ayrı iterasyonlarla hesaplatılır. $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ ile sınırlandırılan rotorun ön bölgesi için yerel bağıl hız bileşeni, aşağıdaki denklemle verilir;

$$W_{\text{ön}} = V_{\text{ön}} \sqrt{1 + X_{\text{ön}}^2 - 2X_{\text{ön}} \sin(\theta)} \quad (4.4)$$

Burada rotor ön bölgesindeki yerel kanat uç hız oranı olarak adlandırılan $X_{\text{ön}}$;

$$X_{\text{ön}} = \frac{\omega \cdot R}{V_{\text{ön}}} \quad (4.5)$$

Denklemleri ile elde edilir. Daha sonra aşağıdaki denklem ile yerel Reynolds sayısı hesaplanır.

$$Re = \frac{W_{\text{ön}} \cdot c}{\nu_w} \quad (4.6)$$

Hücum açısı değerini de sinüs teoreminden hesaplatarak olursak aşağıdaki denklemi elde ederiz;

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{\text{ön}} \cdot \cos(\theta)}{W_{\text{ön}}} \right) \quad (4.7)$$

Bu aşamadan sonra rotorun ön bölgesinden başlanacak ve $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ arasında bulunan bölgede indirgeme katsayısının (u) değerleri elde edilecektir. Daha sonra rotorun arka bölgesi için bu ‘u’ değerleri kullanılarak $\pi/2 < \theta < 3\pi/2$ arasında tanımlanan arka bölgede uarka hesaplatılacak ve gerekli yakınsama sağlanana kadar iterasyona devam edilecektir.

$$F_{L_{\text{ön}}} = \frac{1}{2} \rho A_{\text{kanat}} W_{\text{ön}}^2 C_L \quad (4.8)$$

$$F_{D_{\text{ön}}} = \frac{1}{2} \rho A_{\text{kanat}} W_{\text{ön}}^2 C_D \quad (4.9)$$

Kanat profili kaldırma ve sürüklenme katsayıları, (sırasıyla C_L ve C_D) yerel Reynolds sayısı ve yerel hücum açısı parametrelerinin her ikisini de kullanarak interpolasyon ile elde edilir. Bunun için gereken kanat karakteristikleri Sandia Laboratuvar deney verilerinden alınmıştır (Sheldahl ve diğer., 1982). Yarı deneysel olan bu veriler geliştirilecek programın veritabanını oluşturmuştur.

$$F_{T_{\text{ön}}} = F_{L_{\text{ön}}} \sin(\alpha) - F_{D_{\text{ön}}} \cos(\alpha) \quad (4.10)$$

$$F_{N_{\text{ön}}} = F_{L_{\text{ön}}} \cos(\alpha) + F_{D_{\text{ön}}} \sin(\alpha) \quad (4.11)$$

$$C_{T_{\text{ön}}} = \frac{F_{T_{\text{ön}}}}{0,5 \rho A_{\text{kanat}} W_{\text{ön}}^2} \quad (4.12)$$

$$C_{N_{\text{ön}}} = \frac{F_{N_{\text{ön}}}}{0,5 \rho A_{\text{kanat}} W_{\text{ön}}^2} \quad (4.13)$$

$$F_{\text{ön}} = \frac{N.c}{8\pi R} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(C_{N_{\text{ön}}} \frac{\cos\theta}{|\cos\theta|} - C_{T_{\text{ön}}} \frac{\sin\theta}{|\cos\theta|\cos\delta} \right) \left(\frac{W_{\text{ön}}}{V_{\text{ön}}} \right)^2 d\theta \quad (4.14)$$

$$u = \frac{\pi}{F_{\text{ön}} + \pi} \quad (4.15)$$

Denklem 4.1'den denklem 4.15'e kadar olan işlemler yapılarak ilk iterasyon gerçekleştirilmiş olur ve her akış tüpü için 'u' değerleri elde edilir. Yakınsama, özellikle yüksek TSR'ler için ekvator düzlemi akışındaki en fazla sayıda iterasyonda daha hızlı gerçekleşir. Bir kez indirgenen hız doğru hesaplatıldığında, denklem 4.4 ile yerel bağıl hız (W) ve denklem 4.7 ile efektif hücum açısı (α) da doğru olarak elde edilecektir. Akış ön bölgesindeki tork ve güç katsayısı değerlerini elde etmek için aşağıdaki denklemler kullanılır;

$$\overline{T_{\text{ön}}} = \frac{N/2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F_{\text{ön}}(\theta) d\theta \quad (4.16)$$

Ve ortalama tork katsayısı aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\overline{C_{Q1}} = \frac{NcH}{2\pi A} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 C_{T_{\text{ön}}} \left(\frac{W_{\text{ön}}}{V_{\infty}} \right)^2 \left(\frac{\eta}{\cos \delta} \right) d\zeta d\theta \quad (4.17)$$

Böylece rotorun ön bölgesi için olan güç katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$C_{P1} = \frac{\omega \cdot R}{V_{\infty}} \overline{C_{Q1}} = X_{\text{orta}} \overline{C_{Q1}} \quad (4.18)$$

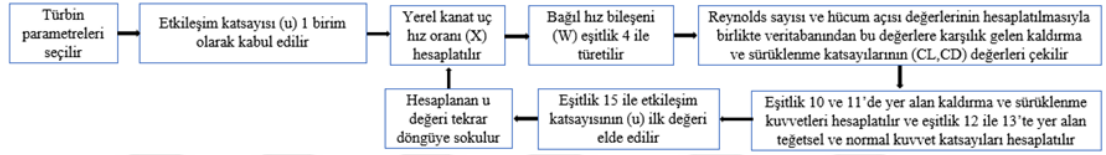
Akış ön bölgesi için tork ve güç katsayısı değerleri elde edildikten sonra aynı işlemler akış arka bölgesi için tekrar edilir. Rotorun arka tarafında kalan akış yönünde, yerel bağıl hız;

$$W_{\text{arka}}^2 = V_{\text{arka}}^2 [(X_{\text{arka}} - \sin \theta)^2 + \cos^2 \theta \cos^2 \delta] \quad (4.19)$$

Burada,

$$X_{\text{arka}} = \frac{\omega \cdot R}{V_{\text{arka}}} \quad (4.20)$$

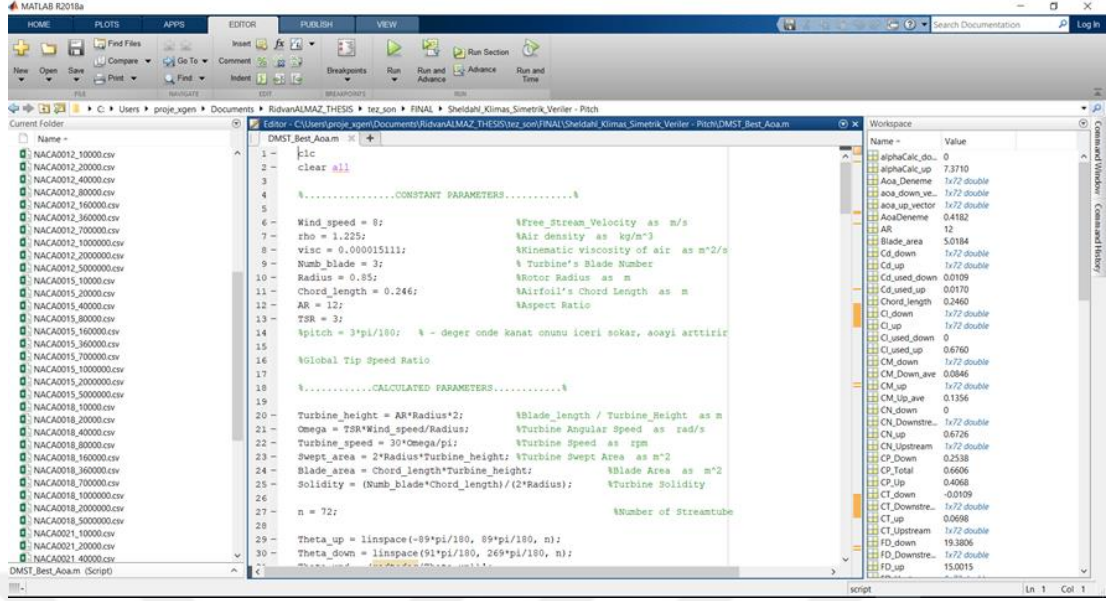
Denklem 4.4'te yer alan ön bölgede hesaplatılan yerel bağıl hız bileşeni yerine arka bölgede hesaplatılan yerel bağıl hız bileşeni yerleştirilir ve Reynolds sayısının arka bölgedeki değerine ulaşılır. Ayrıca hücum açısı değerinin hesaplatıldığı denklem 4.7 arka bölgeye indirgenerek gelen serbest akış hızı değeri ve arka bölgede hesaplatılan bağıl hız bileşeni yerleştirilerek hücum açısının arka bölgedeki değeri hesaplatılır. Denklem 4.4'ten Denklem 4.18'e kadar olan tüm denklemler akış arka bölgesi için tekrar hesaplatılır. Bu işlem gerekli yakınsama sağlanıncaya kadar devam eder. İndirgeme katsayısının (u) doğru değerine bir kez ulaşıldıktan sonra türbinin akış arka bölgesindeki tork ve güç katsayısı değerlerine ulaşılmış olur. İşlemlerin sonunda ön ve arka bölgede ayrı olarak hesaplatılan tork ve güç katsayısı değerleri skaler olarak toplanarak türbinin toplam tork değerine ve toplam güç katsayısı değerine ulaşılır. Bu algoritma Şekil 4.4'te özetlenmiştir.



Şekil 4.4 İterasyon işleminin akış diyagramında gösterimi

$$C_P = C_{P1} + C_{P2} \quad (4.21)$$

MATLAB yazılımı ile geliştirilen bir arayüz ve arka planda bu kanat karakteristikleri veritabanı ile birlikte genel tasarım parametreleri (Tablo 4.1) girilen türbinlere ait performans değerleri hızlıca elde edilmektedir.



Şekil 4.5 Matlab ile geliştirilen veritabanı ve kodun bir kesitinin gösterimi

Modelin talep ettiği kaldırma ve sürüklenme katsayıları aşağıda Şekil 4.6’da kısaca gösterilen veritabanından kolayca elde edilmektedir. Programın kendi içinde hesaplatılan yerel Reynolds sayısı ve hücum açısına bağlı olarak interpolasyon işlemini yapılmaktadır ve gerekli kaldırma ve sürüklenme katsayısı değerleri hesaplanarak işleme sokulmaktadır.

Veritabanında yer alan hücum açısına karşılık gelen kaldırma ve sürüklenme katsayılarının yer aldığı veriler Sheldahl ve Klimas’ın çalışmasındaki veriler olarak kabul edildi.

Veritabanı blok yapıda oluşturuldu ve farklı reynolds sayılarında farklı kaldırma ve sürüklenme katsayıları olduğu için reynolds sayıları hücre dizileri olarak kabul edildi. Kanat profilleri struct yapısında, reynolds sayıları hücre dizileri yapısında ve bu varsayımlar aracılığıyla artık verilerin veritabanına yüklenmesi kaldı. ‘CSV’ formatında kaydedilen belirlenmiş reynolds sayısına ait hücre dizisinde her bir hücum açısına karşılık gelen C_L ve C_D verileri artık veritabanında mevcuttur.

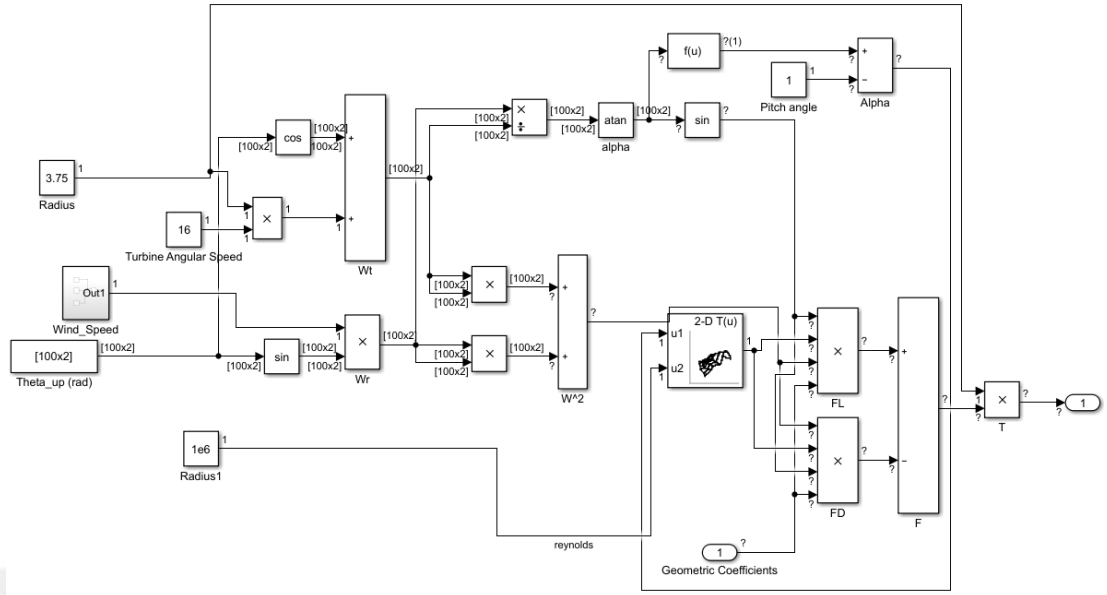
The image shows a MATLAB user interface window titled 'Panel'. It contains several input fields and a 'calculate' button. The input fields are arranged in two columns. The left column includes: Rotor Radius (m), Turbine Speed (rad/s), Wind speed (m/s), Number of Blades, Chord Length (m), Turbine Height (m), Pitch_angle (degree), Solidity, Reynolds Number, RPM, TSR, and Swept_area (m^2). The right column includes: FTave, T, P, CT, and CP. Below the input fields, there is a 'calculate' button and a dropdown menu showing 'NACA0012'.

Şekil 4.6 Matlab ile geliştirilen kullanıcı arayüzü

Girilen parametrelere ve veritabanında yer alan seçilecek kanat profiline göre türbine ait performan parametreleri programdan kolayca elde edilmektedir.

Türbin performansına etki eden tüm bileşenler, şekil 4.7’de verilen simulink modelinde daha açık bir şekilde gözükmemektedir. Simulink ile modelleme yaparak kodun matematiksel modellemesinde hata olup olmadığı daha iyi gözlemlenebilmektedir.

Rüzgar türbinleri belirli bir hıza ulaştınca güç üretmeye başlamaktadır. Bu durumu anlamak, 1-boyutlu ve zaman parametresinin gözetilmediği bir modelde pek mümkün değildir. Ancak geliştirilecek simulink modelleri ile birlikte hem modelin doğru kurgulanması sağlanmış olacaktır hem de gelişime açık olan temel modele, zaman parametresini dahil ederek, pahalı deney setlerine olan ihtiyaç azaltılmış olacaktır. Sisteme girilen türbin parametrelerine göre uygun olan jeneratörü belirlemek daha mümkün hale gelecektir.



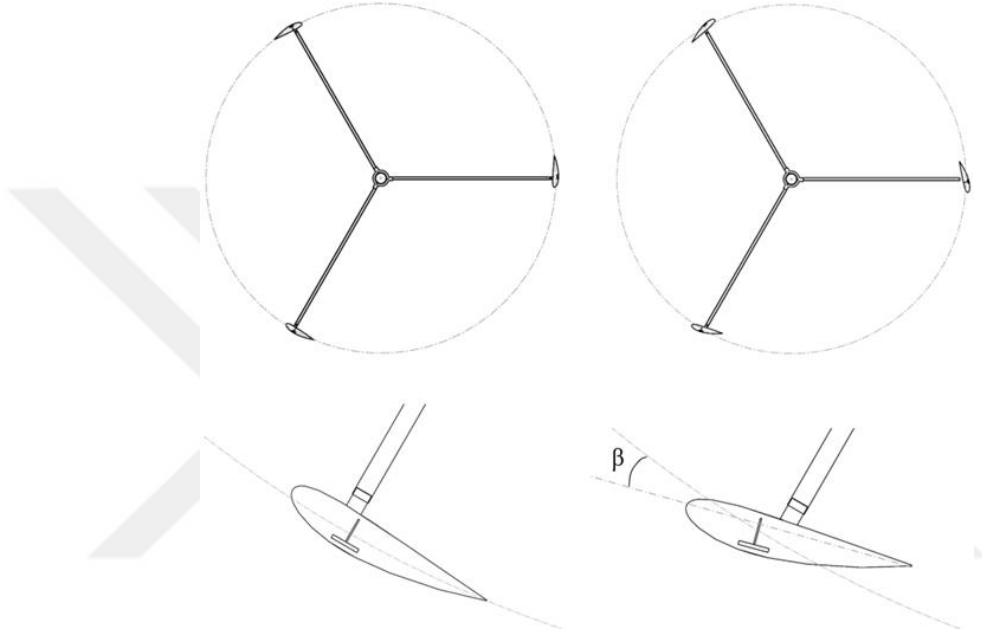
Şekil 4.7 Simulink ile geliştirilen model

Seçilen ve hesaplanan türbin parametreleri sistemde hesap yapılan modüle girerek gerekli yakınsama sağlanana kadar iterasyon işlemlerine devam edilmektedir. Kanat geometrisine ait aerodinamik verileri veritabanından çekebilmek için simulinkte 'Look up Table' modülünden faydalanılmaktadır ve gerekli karakteristik değerler elde edilebilmektedir.

BÖLÜM BEŞ

BULGULAR VE TARTIŞMA

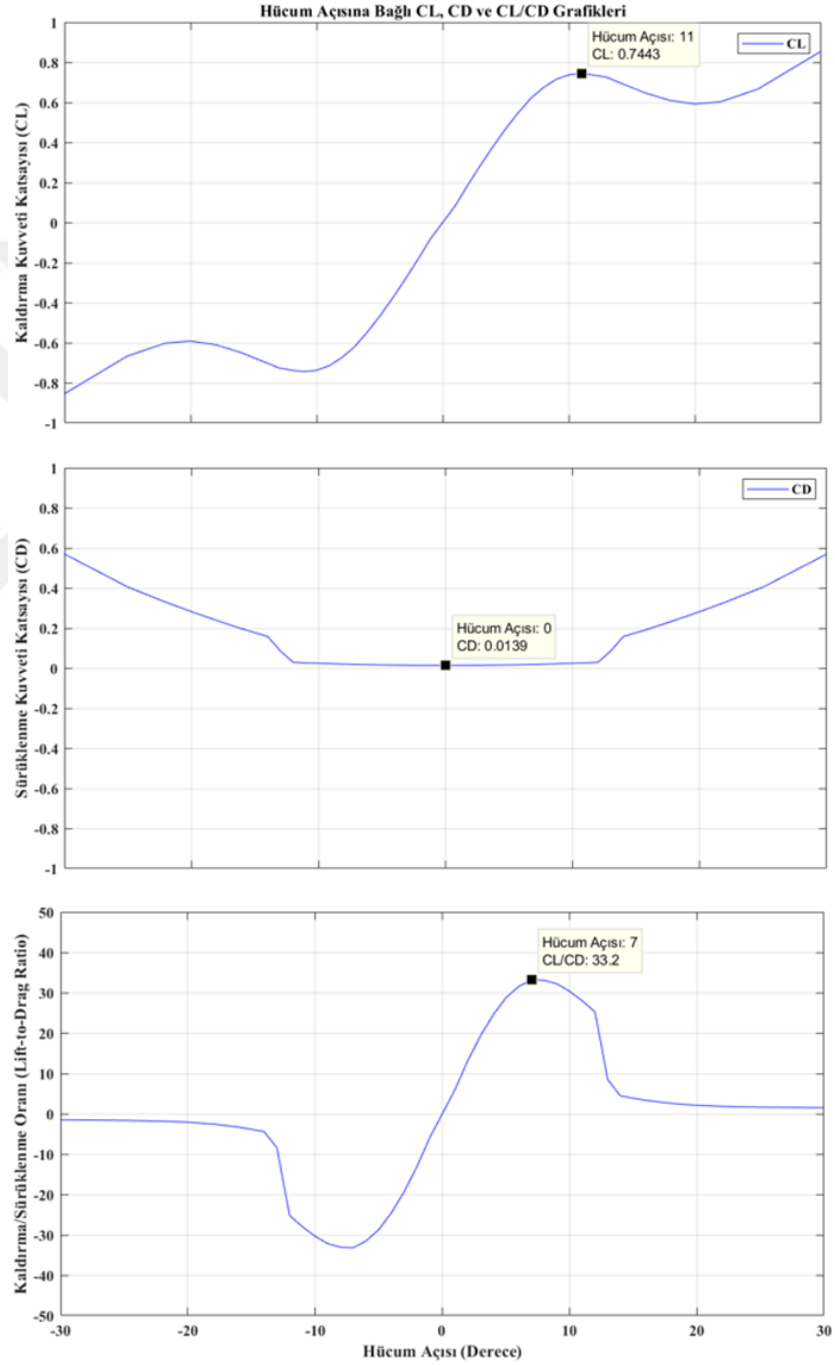
Yunuslama açısı, türbinin dönme dairesine teğet olan çizgi ile kanat profilinin kord hattına teğet olan çizgi arasında kalan ve β ile gösterilen açı olarak ifade edilmektedir (Paraschivoiu, 2002). Şekil 5.1’de negatif bir yunuslama açısı gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Yunuslama açısının olmadığı durum (sol) ve yunuslama açısının negatif olduğu durum (sağ)

Yunuslama açısı temel olarak akışın kanada hangi (bağıl) hücum açısı ile geleceğini belirler. Bu baştan ayarlanan bir açı da olabilir, dinamik olarak anlık da ayarlanabilir. Kanada gelen (bağıl) akışın aynı kaldığı düşünülürse, kaldırma kuvvetinin gelen akışa dik yönlü ve sürüklenme kuvvetinin ise gelen akışa paralel ve aynı yönde olduğu göz önünde bulundurulursa, kaldırma/sürüklenme kuvvet oranının arttıkça kanadın üreteceği torkun ve dolayısıyla türbin gücünün artacağı ortaya çıkar. Bu kapsamda yunuslama açısı ile konumlandırılan kanat, türbin dönüşü boyunca ağırlıklı olarak kaldırma kuvvetini artırır, sürüklenme kuvvetini ise azaltırsa türbin performansı artacaktır. Uygun olmayan bir yunuslama açısı seçimi ise tersi yönde etki yapacaktır. Bir kanadın tipik performansı (NACA0018 için) Şekil 5.2’de sunulmuştur. Buna göre maksimum kaldırma/sürüklenme kuvvet oranı, kaldırma kuvvetinin maksimum olduğu ya da sürüklenme kuvvetinin minimum olduğu hücum açılarına denk gelmeyip, ikisinin

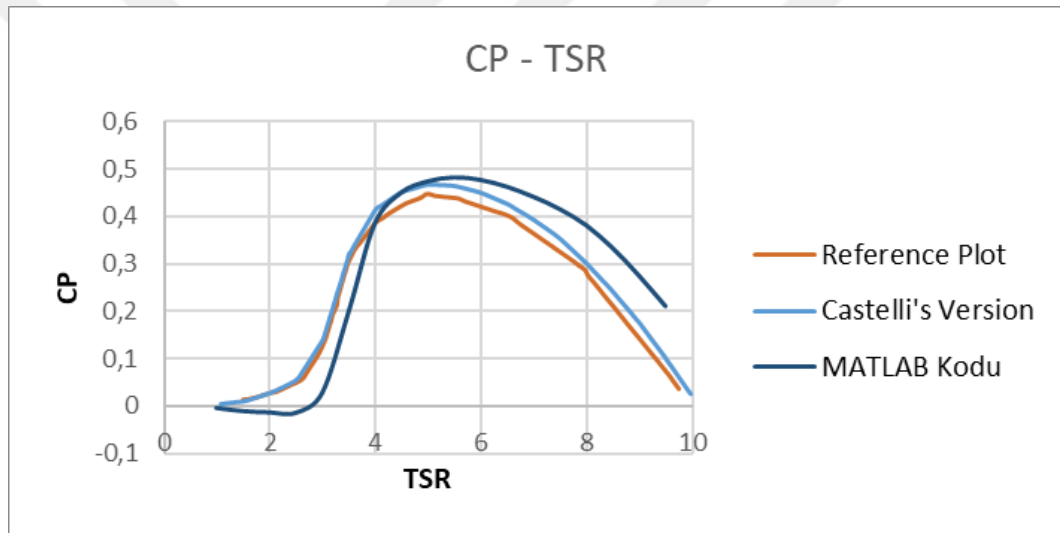
ortasında bir hücum açısında gerçekleşmektedir. Ayrıca bu karakteristikler anlık yerel Reynolds sayısına güçlü şekilde bağlıdır. Her şartta bu ideal çalışma şartının sağlanması, ancak gerçek zamanlı saha kontrolü ile sağlanabilir. Yunuslama açısı kontrolü olmadan, değişen koşullarla birlikte (rüzgar hızı, rüzgar yönü vb.) kanat profili, tasarım performansının ideal değerinin dışında çalışmaktadır (Hau, 2013).



Şekil 5.2 Hücum açısına bağlı olarak C_L , C_D ve kaldırma/sürüklenme oranının gösterimi

Daha yüksek performans değerine ulaşmak için dinamik yunuslama açısı kontrolü önemli olsa da gerçek hayatta ekonomik ve pratik olmayabilir. Ayrıca kanatların gerçek zamanlı olarak bu aralıklarda yunuslama yapması hem dinamik yükleri hem de yorulma yükünü arttıracaktır. Bunun yerine sabit bir yunuslama açısı değeri seçilip baştan sabitlenebilir. Ancak büyük türbinlerde dönüş hızları düşük olduğundan, bu anlık kontrol düşük frekanslı değişimlere cevap şeklinde olacağından pratik uygulama alanı bulabilir ve türbinden daha yüksek başarımlar elde etmek mümkün olabilir.

Kullanılan analiz yöntemi DMST hesaplamalarına göre yazılmış olan kod ilk olarak test edilmiştir. Programın hesaplama parametrelerinin doğru olduğu belirlenmiştir.

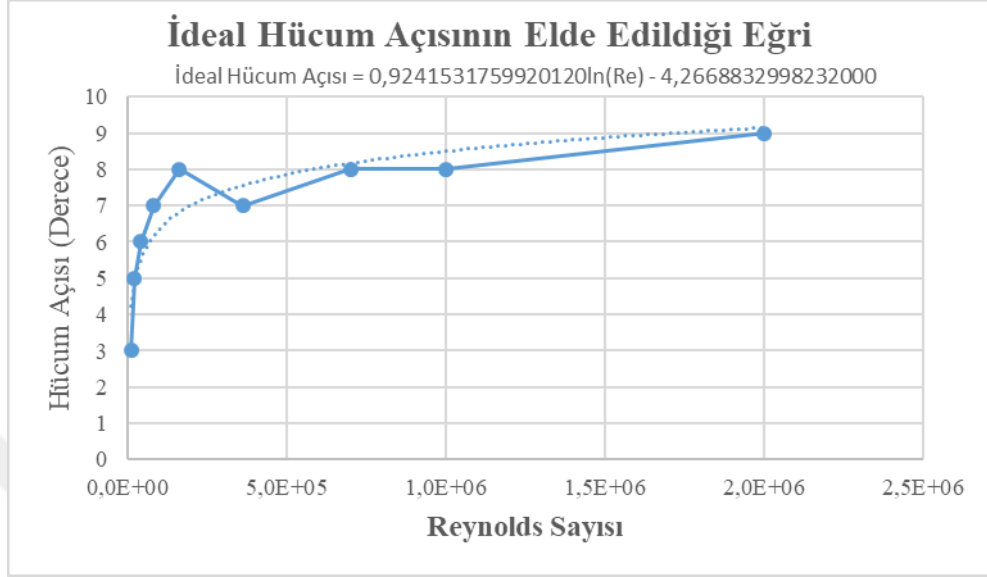


Şekil 5.3 DMST teorisinin doğru uygulandığının valide edilmesi

Programın doğruluğu test edildikten sonra sabit (statik) ve dinamik yunuslama açısının etkisi incelenmiştir. Sabit yunuslama açısı ile farklı sonuçlar elde edilmiş ve çalışmanın nihai amacı olan dinamik yunuslama açısının etkisi incelenmiştir.

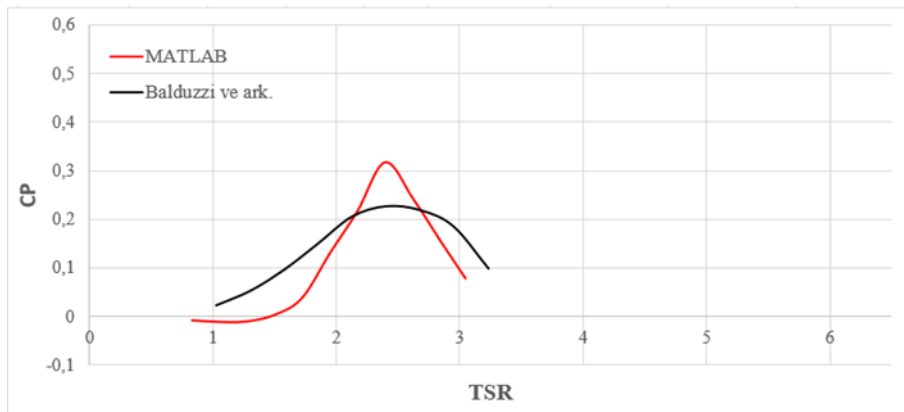
Çalışmanın asıl amacı dinamik olarak yunuslama açısını gerçek zamanlı kontrol ederek teorikte elde edilebilecek maksimum güç üretimini görebilmektir. Bu doğrultuda programın ilk olarak yerel Reynolds sayısına bağlı olarak ideal kaldırma/sürüklenme oranının elde edildiği hücum açısı değerlerini saptaması ve tüm kanat profilleri için ayrı bir fonksiyon elde ederek türbinin her açısal konumunda ideal performansı göstereceği kaldırma ve sürüklenme katsayılarını program veritabanında

çekebilmesi gerekmektedir. Buna göre program ideal hücum açısına göre, her açısal konumdaki yunuslama açısını hesaplamaktadır.

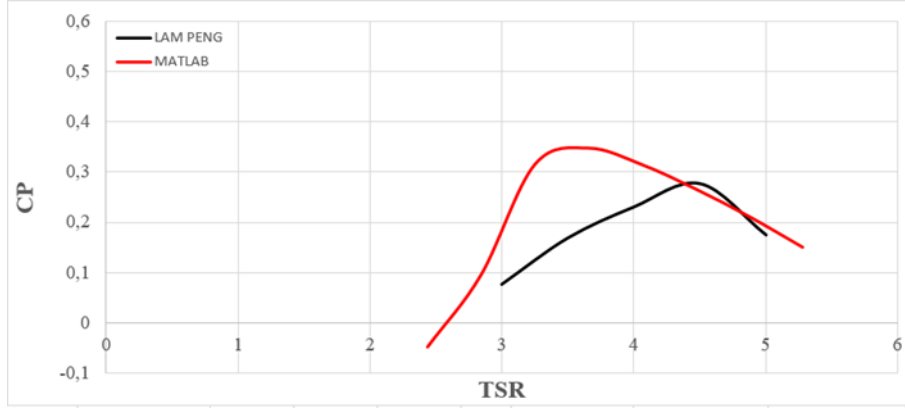


Şekil 5.4 İdeal hücum açısının Reynolds sayısına bağlı fonksiyonu

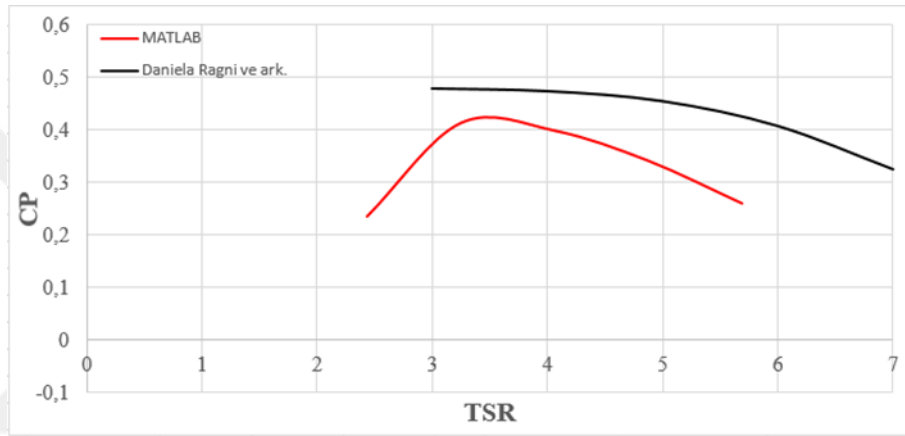
Kalibrasyon ve doğrulama için beş farklı türbin için tasarım parametreleri belirlenmiş ve MATLAB yazılımında geliştirilen 1-Boyutlu modelde bunlar tanımlanmıştır. Şekil 5.5 ile 5.9 arasında 4 türbin için ortak bir kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10'da bu kalibrasyon bozulmadan bağımsız bir 5. türbinde metodun başarımı sunulmuştur.



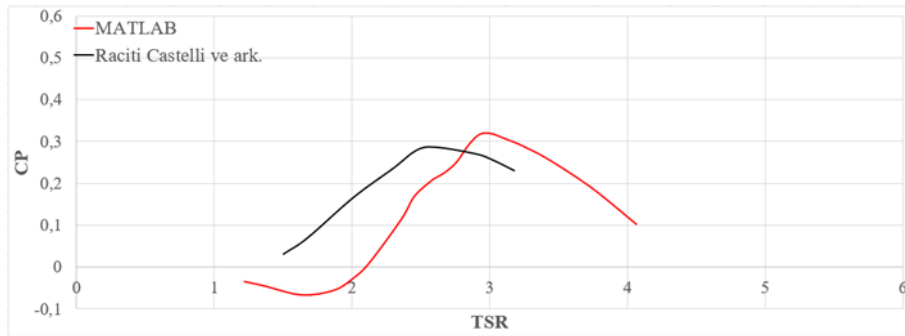
Şekil 5.5 Balduzzi ve diğer. deneysel çalışmaları ile 1 boyutlu modelin karşılaştırılması (Balduzzi, Bianchini, Maleci, Ferrara ve Ferrari, 2015)



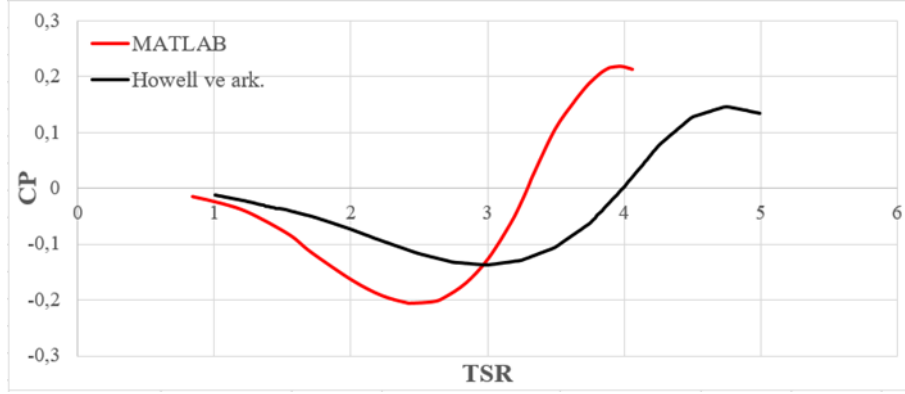
Şekil 5.6 Lam ve Peng deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin karşılaştırılması (Lam ve Peng , 2016)



Şekil 5.7 Ragni ve diğer., deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin karşılaştırılması (Ragni, Ferreira ve Correale, 2014)



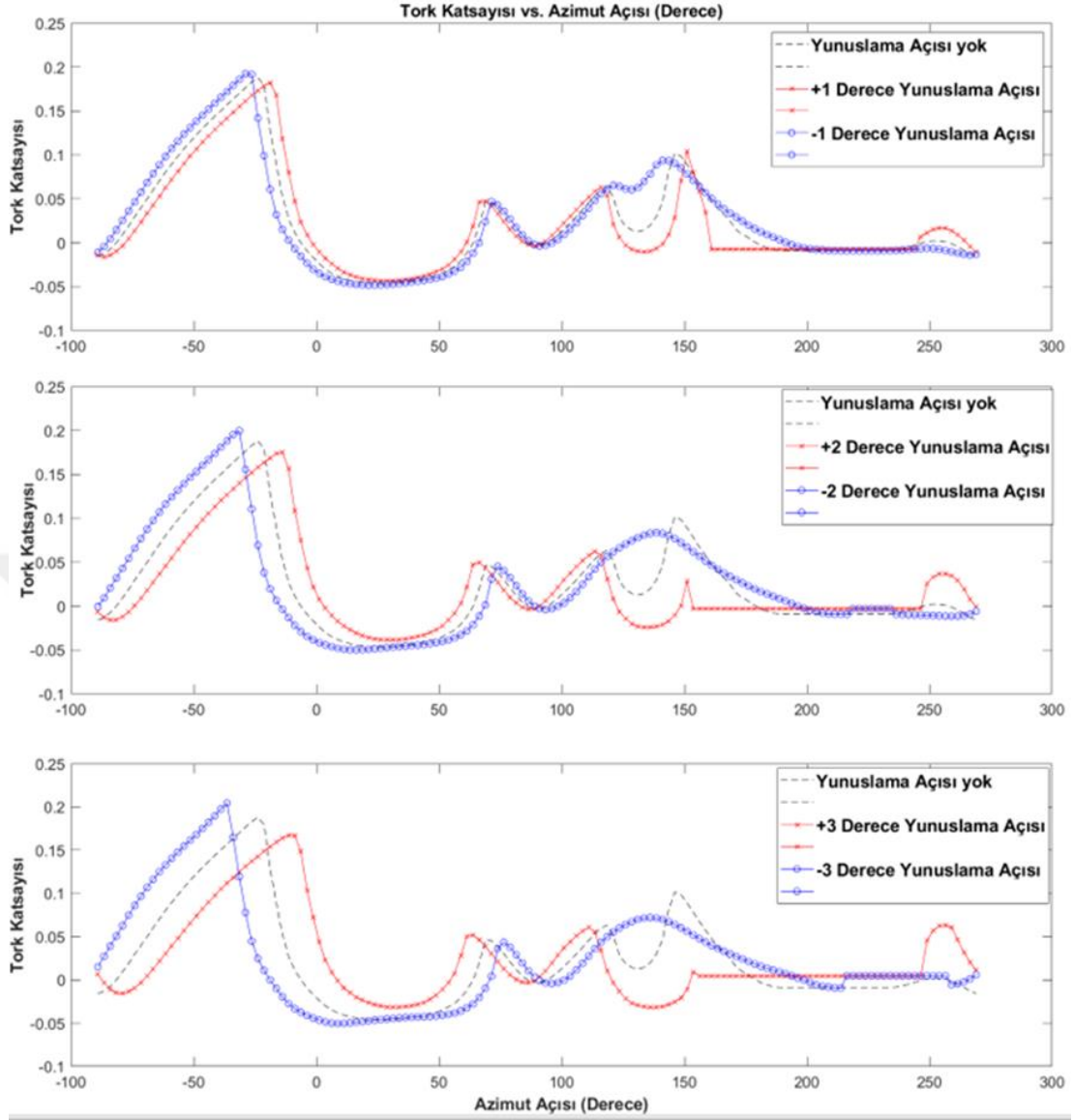
Şekil 5.8 Castelli ve diğer., deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin karşılaştırılması (Castelli, Englaro ve Benini, 2011)



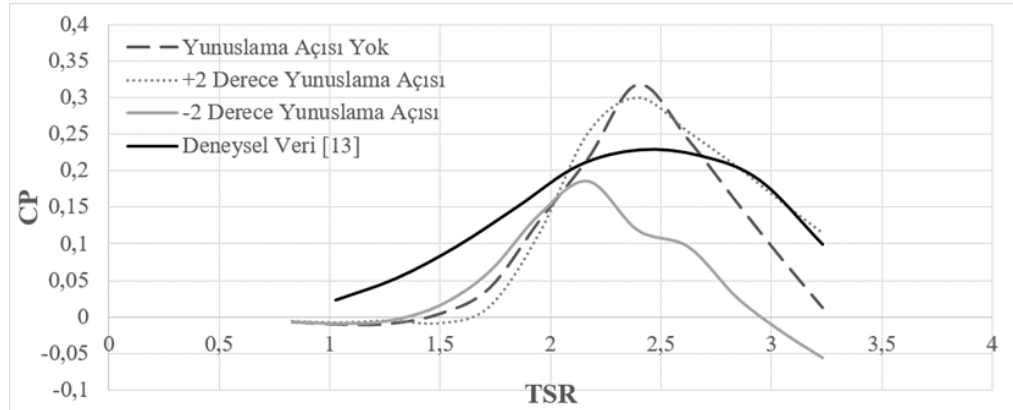
Şekil 5.9 Howell ve diğer., deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin doğrulanması (Eboibi, Danao ve Howell, 2016)

Programın doğruluğu test edildikten sonra sabit (statik) ve dinamik yunuslama açısının etkisi incelenmiştir. Sabit yunuslama açısı ile farklı sonuçlar elde edilmiş ve çalışmanın nihai amacı olan dinamik yunuslama açısının etkisi incelenmiştir.

Şekil 5.10'da önden ayarlı sabit yunuslama açısının türbin başarımına (tork katsayısının türbin kanadının açısız konumuna göre değişimi) etkisi gösterilmiştir. Beklendiği gibi -90 ile -45 derece arasındaki bölgede eksi yunuslama açısı kanadın hücum açısını arttırdığından burada tork katsayısını arttırmaktadır. Zıt yunuslama açısı ise ters yönde etki yapmaktadır. -45 dereceden sonra ise kanat stol bölgesine girdiğinden eksi yunuslama açısı tork katsayısını düşürmektedir. Yunuslama açısının türbine olan net etkisi birçok alt etkinin birleşiminden oluşmaktadır.



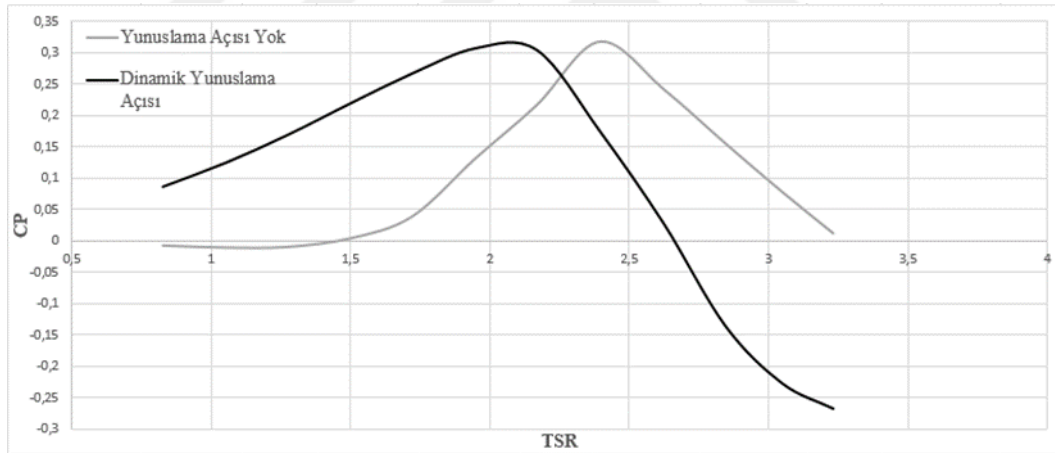
Şekil 5.10 Sabit yunuslama açısı kontrolünde tork katsayısının türbin açısıl konumıyla değişimi, (a) +1 ve -1, (b) +2 ve -2, (c) +3 ve -3 derece sabit yunuslama açılarının etkileri



Şekil 5.11 Güç katsayısının kanat uç hız oranıyla değişimi

Şekil 5.10’da görüldüğü üzere -1, -2 ve -3 derece yunuslama açıları türbin başlangıç anında kaldırma kuvvetinin etkisini arttırdığından dolayı performansı olumlu etkilemiştir. Ancak türbinin akış arka bölgelerinde, akışın ön tarafta büyük bir kısmının soğurulmasından kaynaklı daha düşük tork elde edilmiştir. Genel anlamda negatif yunuslama açısı türbin performansında olumlu etki oluşturmuştur. Şekil 5.11’e bakıldığında pozitif yönlü yunuslama açısı, türbinin çalışma aralığının artmasını sağlamıştır. Her iki performans göstergesinden de anlaşılabileceği üzere türbin açısal konumuna ve bu parametrenin bir fonksiyonu olan hücum açısına bağlı olarak her noktada performansı olumlu yönde etkileyecek bir yunuslama açısı mevcuttur.

Daha etkili performans artışı için, dinamik kontrol ile yunuslama açısı, türbin kanadının açısal konumuna bağlı ve yerel maks C_L/C_D hücum açısını sağlayacak şekilde değişebilir. Bu sağlandığı takdirde ise geliştirilen yöntem ile Şekil 5.12’de sunulan performans eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 5.12 Türbinin yunuslama açısı yapmadığı ve dinamik yunuslama açısı yaptığı durumlarda türbin performans eğrileri

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Statik yunuslama açısının uygulandığı modellerde negatif yunuslama açısı, türbinin ön bölgesinde rüzgardan daha çok enerji soğurmaktadır ve genel verimi olumlu etkilemektedir. Negatif statik kontrol, düşük TSR değerlerinde tork değerlerini iyileştirmiştir. Bu da türbinin kendi kendine dönmeye başlama kapabilitesini olumlu etkilemektedir. Dinamik yunuslama açısı kontrolü ile türbinin maksimum güç katsayısı değerinde kayda değer bir değişim olmasa da türbinin çalışma bölgesi genişlemiş ve geniş bir TSR aralığında türbinden güç eldesi sağlanmıştır. Geliştirilen modelin doğru çalıştığı deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Bu bulgular eşliğinde programın mantıklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Geliştirilen kod rüzgarın yoğunluğunu, sürtünmeleri ve türbinin arka bölgesine geçen havanın yayılarak kanada gelmesini hesaba katmamaktadır. Bu parametreler üzerine yoğunlaşarak kod geliştirilebilecektir. Teoride geliştirilen modeller, gelişen teknolojiyle birlikte düşey eksenli rüzgar türbinlerine uygulanabilirse ticari olarak daha yaygın hale gelecektir. Ayrıca ideal statik yunuslama açısında, sisteme dinamik yunuslama kontrolü uygulanabilir ve yeni bir hibrit sistem geliştirilebilir. Tüm bulgular eşliğinde, belirli bir doyum noktasına ulaşmış olan geleneksel türbinlerin gelmiş olduğu ticari noktaya, düşey eksenli rüzgar türbinlere uygulanacak kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ile varılabileceği aşıkardır. Bunun için teoriyi iyi anlamak gerekmektedir. Rüzgar santrallerinde birim alandan elde edilecek enerji miktarı ancak bu sistemlerin ve teorilerin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Almohammadi, K.M., Ingham, D.B., Ma, L. ve Pourkashan, M. (2013). Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine. *Energy* 58, 483–493.
- Al Shemmeri T. (2010). *Wind turbines*. London : Business School Regent's Park London NW1 4SA United Kingdom.
- Balduzzi F., Bianchini A., Maleci R., Ferrara G. ve Ferrari L. (2015). Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy* 85, 419-435.
- Berg, D., (1985). Structural design of the Sandia 34 - meter vertical - axis wind turbine. SANDIA REPORT, SAND84-1287.
- Bukhman I., (2005). *The TRIZ give way to the wind, and give the wind away: A repeatable process for improving sustainable wind energy generation*. 29 Eylül 2019, <https://triz-journal.com/triz-give-way-wind-give-wind-away-repeatable-process-improving-sustainable-wind-energy-generation/>.
- Castelli M.C., Englaro A. ve Benini E. (2011). The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy* 36, 4919 – 4934.
- Castillo J. (2011). *Small-scale vertical axis wind turbine design*. Yüksek Lisans Tezi, Tampere University, Finland.
- Dai Y ve Lam W. (2009). Numerical study of straight-bladed darrieus – type tidal turbine. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy* 162 (2), 67-76.
- Danao L.A. ve Howell R. (2012). Effects on the performance of vertical axis wind turbines with unsteady wind inflow : a numerical study. *50th AIAA Aerospace Sciences, Meeting, Nashville, Tennessee*, 1067.

Eboibi O., Danao L.A.M. ve Howell R.J. (2016). Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low reynolds numbers. *Renewable Energy* 92, 474-483.

Elibüyük U. ve Üçgül İ., (2014). Rüzgar türbinleri, çeşitleri ve rüzgar enerjisi depolama yöntemleri. *YEKARUM e-DERGI* 2 (3), 1-14.

Elkhoury M.; Kiwata, T. ve Issa, J. (2013). Aerodynamic loads predictions of a vertical - axis wind turbine utilizing various turbulence closures. *12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, 1–9.

Fanucci, J. B. ve Walters, R. E. (1976). Innovative wind machines: The theoretical performances of a vertical axis wind turbine. Proceedings of the Vertical – Axis Wind Turbine Technology Workshop, Sandia Laboratory Report SAND 76 (5586), 61-93.

Glauert H., (2011). *The elements of aerofoil and airscrew theory*. London: Cambridge University Press.

Hau E. (2013). *Wind turbines fundamentals , technologies, application, economics* (3.baskı). London: Springer.

Holmes, O., (1976). A contribution to the aerodynamic theory of the vertical - axis Wind turbine. *Proceedings of the International Symposium on Wind Energy Systems. St. John's College, Cambridge, England*, 55-72.

Komass T. ve Sniders A. (2014). Design and verification of vertical axis wind turbine simulation model. *Engineering for Rural Development*, 335 – 340.

- Kumar R., Raahemifar K. ve Fung A.S., (2018). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89, 281-291.
- Lam H. F. ve Peng H.Y. (2016). Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations. *Renewable Energy* 90, 386-398.
- Lanzafame, R., Mauro, S. ve Messina, M. (2014). 2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model. *Energy Procedia* 45, 131–140.
- Larsen, H. C. (1975). Summary of a vortex theory for the cyclogiro. *Proceedings of the Second U.S. National Conferences on Wind Engineering Research* 8, 1-3.
- Lorden A., Anderson D., Donahue L. ve Mullen C. (2010). *Wind energy*. 29 Eylül 2019, <https://www.slideshare.net/kkublbeck/wind-power-point-presentation>.
- Loth, J. L. ve McCoy, H., (1983). Optimization of darrieus turbines with an upwind and downwind momentum model. *Journal of Energy* 7, 313.
- Micallef, D., Farrugia, R., Sant, T. ve Mollicone, P., (2014). An aerodynamic study on flexed blades for VAWT applications. *Journal of Physics* 555 (1), 012073.
- Newman, B. G. (1983). Actuator - disc theory for vertical - axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 15, 347.
- Nobile R., Vahdati M., Barlow J.F. ve Mewburn - Crook A. (2014). Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 125, 168-179.
- Özgener Ö., (2002). Türkiye’de ve dünyada rüzgar enerjisi kullanımı. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 3 (4), 159 – 173.

- Paraschivoiu I., (1981). Double multiple streamtube model for darrieus wind turbines. *NASA, Lewis Research Center Wind Turbine Dynamics*, 19-25.
- Paraschivoiu I. (2002). *Wind turbines design with emphasis on darrieus concept*. Canada: Ecole Polytechnique de Montreal.
- Ragni D., Ferreira C. S. ve Correale G., (2014). Experimental investigation of an optimized airfoil for vertical-axis wind turbines. *Wind Energy* 18 (9), 1629-1643.
- Rezaeiha A, Kalkman I. ve Blocken B. (2017). Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy* 197, 132-150.
- Santiago L., Ramirez - Tovar A.M. ve Yuri L. (2018). Simulating and designing small hydrokinetic turbines. *A review International Review of Mechanical Engineering* 12 (11), 876-884.
- Scheurich F. ve Brown RE. (2012). Modelling the aerodynamics of vertical - axis wind turbines in unsteady wind conditions. *Wind Energy* 16 (1), 91-107.
- Shankar, P. N. (1976). On the aerodynamic performance of a class of vertical shaft windmills. *Proceedings Royal Society of London* 349, 35-51.
- Sharpe, D. J. ve Read, S. (1982). A critical analysis of the extended multiple streamtube theory for the aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Proceedings of the 1982 Wind and Solar Energy Technology Conference*, University of Missouri-Columbia Publications, Kansas City, 51-56.
- Sheldahl R. E. ve Klimas P. C. (1981). *Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180 - degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines*. Sandia National Laboratories Energy Report, 2114.

- Strickland, J. H. (1975). *The darrieus turbine, a performance prediction model using multiple streamtubes*. Sandia Laboratory Report SAND 75-0431.
- Sumantraa R.B., Chandramouli S., Prem Sai T.P., Prithviraj P., Vivek M ve Kishore V.R. (2014). Numerical analysis of effect of pitch angle on a small scale vertical axis wind turbine. *Journal of Renewable Energy* 4 (4), 929-935.
- Templin, R. J. (1974). *Aerodynamic performance theory for the NRC vertical axis wind turbine*. National Research Council of Canada, Report LTR-LA-160.
- Tullis S, Fiedler A, McLaren K ve Ziada S. (2008). Medium - solidity vertical axis wind Turbines for use in urban environments . *7th World Wind Energy Conference*, 227-239.
- Tushar R. Mali, Avinash P. Dhale, Harsh A. More, Prachi R. Kavade, Prof. Ramesh K Kavade ve Dr. P. M. Ghanegaonkar, (2018). Analysis of VAWT using pitching mechanism. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology*, 4 (3), 10-15.
- Wilson, R. E. ve Lissaman, P. B. S. (1974). *Applied aerodynamics of wind power machines*. Oregon: Oregon State University.

EKLER

Performans hesaplamak için kullanılan koddan bir kesit aşağıdaki gibidir.

```
clc
clear all

%.....CONSTANT PARAMETERS.....%

Wind_speed = 8;           %Free_Stream_Velocity as m/s
rho = 1,225;              %Air density as kg/m^3
visc = 0,000015111;       %Kinematic viscosity of air as m^2/s
Numb_blade = 3;           %Turbine's Blade Number
Radius = 0,85;            %Rotor Radius as m
Chord_length = 0,246;     %Airfoil's Chord Length as m
AR = 12;                  %Aspect Ratio
TSR = 2,4;
pitch = -3*pi/180; % - deger onde kanat onunu iceri sokar, aoayi arttirir

%Global Tip Speed Ratio

%.....CALCULATED PARAMETERS.....%

Turbine_height = AR*Radius*2; %Blade_length / Turbine_Height as m
Omega = TSR*Wind_speed/Radius; %Turbine Angular Speed as rad/s
Turbine_speed = 30*Omega/pi; %Turbine Speed as rpm
Swept_area = 2*Radius*Turbine_height; %Turbine Swept Area as m^2
Blade_area = Chord_length*Turbine_height; %Blade Area as m^2
Solidity = (Numb_blade*Chord_length)/(2*Radius); %Turbine Solidity

n = 72; %Number of Streamtube

Theta_up = linspace(-89*pi/180, 89*pi/180, n);
Theta_down = linspace(91*pi/180, 269*pi/180, n);
Theta_upd = (radtodeg(Theta_up));
Theta_downd = (radtodeg(Theta_down));

%.....UPSTREAM ZONE.....%

i = 0;

while i < n;

    i = i+1;
    u_up = 1.01;
    newu_up = 1;

    while (u_up - newu_up) > 1e-3

        u_up = newu_up;
        Vup = u_up*Wind_speed;
        Xup = (Omega*Radius)/Vup; %Lokal TSR

        Wup = Vup*sqrt(1+(Xup^2)-(2*Xup*sin(Theta_up(i))));
        Re_blade = Wup*Chord_length/visc; %Blade Reynolds number
```

```

ReCalc_up = Re_blade;
%best_aoa = 5*pi/180;
%alphaCalc_up = best_aoa;%-pitch + asin((Vup*cos(Theta_up(i)))/Wup);
alphaCalc_up = -pitch + asin((Vup*cos(Theta_up(i)))/Wup);
% pitch(i)=-15*pi/180 + asin((Vup*cos(Theta_up(i)))/Wup);
alphaCalc_up = abs(alphaCalc_up*180/pi);

[Cl_used_up, Cd_used_up] = Cl_Cd_Finder_Upstream(alphaCalc_up,ReCalc_up);

FL_up = 0.5*rho*Blade_area*(Wup^2)*Cl_used_up;
FD_up = 0.5*rho*Blade_area*(Wup^2)*Cd_used_up;

FT_up = FL_up*sind(alphaCalc_up) - FD_up*cosd(alphaCalc_up);
FN_up = FL_up*cosd(alphaCalc_up) + FD_up*sind(alphaCalc_up);

CT_up = (FT_up/((0.5)*rho*Blade_area.*(Wup^2)));
CN_up = (FN_up/((0.5)*rho*Blade_area.*(Wup^2)));

g = @(Theta_up) (abs(sec(Theta_up)).*(CN_up.*cos(Theta_up)
CT_up.*sin(Theta_up))*(Wup/Vup)^2);
y = integral(g,-89*pi/180,89*pi/180);
if y<0;
    y = abs(y);
end

fup = Numb_blade*Chord_length*y/(8*pi*Radius);
newu_up = pi/(fup+pi);

end

aoa_up_vector(i) = alphaCalc_up;
u_up_vector(i) = newu_up;
V_up_vector(i) = Vup;
Cl_up(i) = Cl_used_up;
Cd_up(i) = Cd_used_up;
W_up(i) = Wup;
Reynolds_Number_Up(i) = ReCalc_up;
FT_Upstream(i) = FT_up;
FN_Upstream(i) = FN_up;
FL_Upstream(i) = FL_up;
FD_Upstream(i) = FD_up;
CT_Upstream(i) = CT_up;
CN_Upstream(i) = CN_up;

end

Torque_Upstream = FT_Upstream.*Radius;
CM_up = Torque_Upstream./(0.5*rho*Swept_area*Radius*Wind_speed^2);

% Average upstream torque
Torque_Up_ave = mean(Torque_Upstream)*Numb_blade/2;

% Average torque coefficient
CM_Up_ave = Torque_Up_ave/(0.5*rho*Swept_area*Radius*Wind_speed^2);

%Upstream Power Coefficient

```

```
CP_Up = CM_Up_ave*TSR;
```

```
%.....DOWNSTREAM ZONE.....%
```

```
j = n+1;
i = 0;
```

```
while (j>1)
```

```
    j = j-1;
    i = i+1;
    u_down = 1;
    newu_down = u_up_vector(j);
    Ve = Wind_speed*((2*u_up_vector(j))-1);
```

```
    if Ve>0;
```

```
        while(u_down - newu_down)>1e-6;
```

```
            u_down = newu_down;
            Vdown = u_down*Ve;
            Xdown = (Omega*Radius)/Vdown;
            Wdown = Vdown*sqrt(1+(Xdown^2)-(2*Xdown*sin(Theta_down(i))));
```

```
            Re_blade2 = Wdown*Chord_length/visc;
            ReCalc_down = Re_blade2;
```

```
            alphaCalc_down = -pitch + asin((Vdown*cos(Theta_down(i)))/Wdown);
            alphaCalc_down = (alphaCalc_down*180/pi);
```

```
            [Cl_used_down, Cd_used_down] =
            Cl_Cd_Finder_Downstream(alphaCalc_down,ReCalc_down);
```

```
            FL_down = 0,5*rho*Blade_area*(Wdown^2)*Cl_used_down;
            FD_down = 0,5*rho*Blade_area*(Wdown^2)*Cd_used_down;
```

```
            FT_down = FL_down*sind(alphaCalc_down) - FD_down*cosd(alphaCalc_down);
            FN_down = FL_down*cosd(alphaCalc_down) + FD_down*sind(alphaCalc_down);
```

```
            CT_down = (FT_down/((0.5)*rho*Blade_area.*(Wdown^2)));
            CN_down = (FN_down/((0.5)*rho*Blade_area.*(Wdown^2)));
```

```
            g2 = @(Theta_down) (abs(sec(Theta_down)).*(CN_down.*cos(Theta_down) -
            CT_down.*sin(Theta_down)))*(Wdown/Vdown)^2);
            y2 = integral(g2,91*pi/180,269*pi/180);
```

```
            if y2 < 0
                y2 = abs(y2);
            end
```

```
            fdown = Numb_blade*Chord_length*y2/(8*pi*Radius);
            newu_down = pi/(pi+fdown);
```

```
        end
```

```

else

    Ve = 0;
    u_down = 0;
    newu_down = 0;
    Vdown = 0;
    Xdown = 0;
    Wdown = Omega*Radius;
    Re_blade2 = Wdown*Chord_length/visc;
    ReCalc_down = Re_blade2;

    alphaCalc_down = 0;
    [Cl_used_down, Cd_used_down] =
    Cl_Cd_Finder_Downstream(alphaCalc_down,ReCalc_down);

    FL_down = 0.5*rho*Blade_area*(Wdown^2)*Cl_used_down;
    FD_down = 0.5*rho*Blade_area*(Wdown^2)*Cd_used_down;

    FT_down = FL_down*sind(alphaCalc_down) - FD_down*cosd(alphaCalc_down);
    FN_down = FL_down*cosd(alphaCalc_down) + FD_down*sind(alphaCalc_down);

    CT_down = (FT_down/((0.5)*rho*Blade_area.*(Wdown^2)));
    CN_down = (FN_down/((0.5)*rho*Blade_area.*(Wdown^2)));

end

aoa_down_vector(i) = alphaCalc_down;
u_down_vector(j) = newu_down;
V_down_vector(i) = Vdown;
Ve_vector(j) = Ve;
Cl_down(i) = Cl_used_down;
Cd_down(i) = Cd_used_down;
Reynolds_Number_Down(i) = ReCalc_down;
FT_Downstream(i) = FT_down;
FN_Downstream(i) = FN_down;
FL_Downstream(i) = FL_down;
FD_Downstream(i) = FD_down;
CT_Downstream(i) = CT_down;
CN_Downstream(i) = CN_down;
W_down(j) = Wdown;

end

Torque_Downstream = FT_Downstream.*Radius;
CM_down = Torque_Downstream./(0.5*rho*Swept_area*Radius*Wind_speed^2);

% Average Downstream torque
Torque_Down_ave = mean(Torque_Downstream)*Numb_blade/2;

% Average torque coefficient
CM_Down_ave = Torque_Down_ave/(0.5*rho*Swept_area*Radius*Wind_speed^2);

%Downstream Power Coefficient
CP_Down = CM_Down_ave*TSR;

CP_Total = CP_Up + CP_Down
Torque_Total = Torque_Up_ave + Torque_Down_ave

```