

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNİ KULELERİNDE YAPISAL TİTREŞİM ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Onur AÇIK

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

MAYIS 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNİ KULELERİNDE YAPISAL TİTREŞİM ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur AÇIK

(301071022)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Önder GÜLER (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Ercan YÜKSEL (İTÜ)

MAYIS 2010

ÖNSÖZ

Hızlı nüfus artışına paralel olarak artan enerji ihtiyacı önümüzdeki yüzyılların en önemli sorunu olacak gibi gözükmemektedir. Bu sorunu çözmek için ya milyonlarca kişinin alışkanlıklarını değiştirmesi gerekecek ya da yeni, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları bulmaları gerekecektir. Bu iki seçenek arasında ikinci seçeneğin daha rasyonel olduğu açıktır. Buraya kadarki en önemli sözcük ise “yenilenebilir” sözcüğüdür. Çünkü artık dünyamız bize dar gelmekte ve zenginliklerini bizimle paylaşma konusunda eskisi kadar cömert davranmamaktadır. Bu yüzden yenilenebilir enerjinin önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Benim bu çalışmayı yapmamdaki amaç da en önemli yenilenebilir kaynaklardan olan rüzgar enerjisine olan büyük inancım. Umarım benim için gurur kaynağı olan bu çalışma başkaları için de ilham kaynağı olur.

Sıkıntılı ve uzun sayılabilecek bir süreç olan tez sürecini rahat ve başarılı şekilde geçirmem için ilgi, bilgi ve birikimini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU'ya, tezin bu noktaya gelmesine büyük katkıları ve emeği olan, her zaman minnet duyacağım İnşaat Fakültesi öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Ercan YÜKSEL'e çok teşekkür ediyorum. Ayrıca bana her zaman inanan ve destek veren biricik ev arkadaşım ablama, ailemizin yeni üyesi Adil'e, canım anneme ve beni yukarıdan izlediğine inandığım babama teşekkür ediyorum.

Mayıs 2010

Onur AÇIK
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. Giriş	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Literatür Özeti	1
2. Rüzgar Enerjisi Hakkında Genel Bilgiler.....	3
2.1 Rüzgarın Kaynağı.....	4
2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihi	7
2.3 Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Durumu	8
2.5 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Mevcut Durumu	10
2.6 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	12
2.7 Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları	16
3. Rüzgar Enerjisinin Temelleri.....	19
3.1 Dünyadaki Rüzgar Sistemleri:	19
3.2 Rüzgarların Sınıflandırılması	22
3.3 Rüzgar Ölçüm Teknikleri:.....	25
3.4 Rüzgar Karakteristikleri ve Rüzgar Enerji Potansiyeli	29
3.4.1 Rüzgar Karakteristikleri	29
3.4.1.1 Yıllar Arası Rüzgar Değişimi.....	29
3.4.1.2 Yıllık Rüzgar Şiddeti Değişimi	30
3.4.1.3 Günlük Rüzgar Şiddeti Değişimi	30
3.4.1.4 Kısa Süreli Rüzgar Şiddeti Değişimleri	31
3.4.2 Rüzgar Şiddeti Değişiminin Modellenmesi	32
3.4.3 Düşey Rüzgar Profili.....	33
3.4.4 Rüzgar Yönünün Değişimi.....	34
3.4.5 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi	34
3.5 Olasılık Dağılım Fonksiyonları (Weibull ve Rayleigh Dağılımları).....	36
3.6 Rüzgar Karakteri Üzerinde Arazinin Etkisi	39
4. Rüzgar Türbinleri	41
4.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	41
4.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	42
4.3. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Bileşenleri	44
4.3.1 Rotor.....	45
4.3.2 Dişli Kutusu	45
4.3.3 Jeneratör	46

4.3.4 Makine Dairesi ve Saptırma Sistemi.....	47
4.3.5 Kontrol Sistemleri	48
4.3.6 Kule	49
4.3.7. Kule Temeli.....	50
4.4 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamiği	51
4.4.1 Momentum Teoremi.....	52
4.4.2 Güç Katsayısı	53
4.4.3 Betz Limiti.....	54
4.4.4 Uç Hız Oranı	54
5. Rüzgar Türbini Kuleleri.....	57
5.1 Kule Çeşitleri.....	57
5.1.1 Kafes Yapılı Kuleler.....	57
5.1.2 Betonarme Kuleler	58
5.1.3 Tübüler Çelik Kuleler.....	58
5.1.4 Gergili Çelik Kuleler.....	59
5.1.5 Özel Tasarımlı Kuleler.....	60
5.2 Serbest Duran Tübüler Çelik Kuleler	60
5.2.1 Dayanım ve Rijitlik	61
5.2.1.1 Kopma Dayanımı	61
5.2.1.2 Yorulma Dayanımı	62
5.2.1.3 Kule Rijitliği.....	63
5.2.1.4 Burkulma Dayanımı	64
5.2.2 Kule İmalat Teknikleri ve Montajı.....	65
5.2.2.1 İmalat Teknikleri	65
5.2.2.2 Kule Montajı	67
6. Yapılan Çalışma	71
6.1 Kule Geometrisi.....	71
6.2 Kulenin Modellenmesi	72
6.3 Yük Koşulları	74
6.4 Statik Rüzgar Yüğü Durumu	75
6.5 Mevcut Kesitlerin Gerilme Analizi	80
6.6 Dinamik Rüzgar Yüğü Durumu	81
7. Sonuç	85
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	89

KISALTMALAR

WECS	: Wind Energy Conversion Systems
RES	: Rüzgar Enerji Sistemleri
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
REPA	: Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
OYF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
TUREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Rüzgar enerjisi ile sağlanan emisyon tasarruf miktarları	16
Çizelge 3.1: Beaufort skalasına göre rüzgar güçleri	29
Çizelge 6.1: Türbin bileşenlerinin ağırlıkları.....	71
Çizelge 6.2: Yüksekliğe göre çaplar	74
Çizelge 6.3: Yükseklik boyunca kule öz ağırlığının değişimi	74
Çizelge 6.4: Mod periyotları ve kütle katılım oranları	76
Çizelge 6.5: DIN 1055 standardına göre yüksekliğe bağlı hız ve dinamik basınç değerleri.....	78
Çizelge 6.6: Kule boyunca etki eden rüzgar yükleri.....	79
Çizelge 6.7: Kesit atalet momentleri ve yarıçapları.....	80
Çizelge 6.8: Seçilen kesitlerdeki Normal gerilme ve Moment etkisi değerleri	81
Çizelge 7.1: Yapının öz frekansları	83
Çizelge 7.2: Seçilen kesitlerdeki Normal gerilme ve Moment etkisi değerleri	83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Yatay eksenli rüzgar türbini	5
Şekil 2.2: Makine dairesinden bir kesit	6
Şekil 2.3:1996-2009 Yılları Arası Kümülatif Kurulu Güç Artışı	9
Şekil 2.4: EPDK'ya Yapılan RES Başvurularının Durumu	10
Şekil 2.5: İşletme ve İnşa Halindeki RES'lerin Türbin Güçlerine Göre Dağılımı	11
Şekil 2.6:Türkiye Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı, 50 m.....	14
Şekil 2.7: Avrupa ülkelerindeki doğrudan rüzgar enerjisi istihdamı.....	17
Şekil 3.1: Dünya üzerinde Coriolis kuvvetinin etkisi.....	20
Şekil 3.2: Jeostrofik rüzgar ve dengesinin oluşumu	21
Şekil 3.3: Gradyan rüzgar U ; R eğrinin yarıçapı	21
Şekil 3.4: Dağ ve vadi yamaçlarında yerel meltem oluşumu	23
Şekil 3.5: Van der Hoven (1957) tarafından yere yakın rüzgar şiddetinin şematik spektrumu. $S(n)$, güç spektral yoğunluğudur.	23
Şekil 3.6: Atmosferik hareketlerin yersel ve zamansal ölçekleri	24
Şekil 3.7: Griggs-Putnam endeksine göre rüzgar hızları.....	25
Şekil 3.8: Rüzgar türbini üzerindeki ölçüm sistemi	27
Şekil 3.9: Ultrasonik sensör	27
Şekil 3.10: Ayrık bir gust olayının gösterimi, Burada a, b, c, d; sırasıyla: genlik, devam süresi, maksimum değişim ve lapse-rate (değişim oranı)'dır.....	31
Şekil 3.11: Rotor disk alanı üzerinde üniform olmayan rüzgar akışı	32
Şekil 3.12: Bir rüzgar türbininin çalışma karakteristikleri	33
Şekil. 3.13: Düşey rüzgar profili.....	34
Şekil 3.14: Normal dağılım fonksiyonu ($\sigma=0.5, 1.0, ve 2.0$ için)	36
Şekil 3.15: Normal dağılım fonksiyonunun standardize edilmiş şekli	37
Şekil 3.16: Rayleigh dağılımı	38
Şekil 3.17: Düz arazi koşulu (c) gösterimi	40
Şekil 4.1: Savonius, Darrieus ve H-tipi düşey eksenli rotor tipleri	42
Şekil 4.2: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini	43
Şekil 4.3: Rüzgar türbini bileşenleri	44
Şekil 4.4: Dişli kutusunun elemanları.....	45
Şekil 4.5: Rotordan şebeke hattına kadar türbin bileşenleri	46
Şekil 4.6: a. Aktif kontrollü rüzgar üstü b ve c pasif kontrollü rüzgar altı ve rüzgar üstü	48
Şekil 4.7: Plak ve kazık temel tipleri	50
Şekil 4.8: Akım tüpü.....	51
Şekil 4.9: Akım tüpü içinde hız ve basınç değişimi	52
Şekil 4.10: Güç katsayısının hız oranlarına göre değişimi	54
Şekil 5.1: Kafes yapıli kule.....	57
Şekil 5.2: Betonarme Kule.....	58
Şekil 5.3: Gergili Çelik kule	59

Şekil 5.4: Hollanda’da yapılmış beton temel üzerine çelik kule (HAT-25)	60
Şekil 5.5: Yıkılmış bir rüzgar türbini	61
Şekil 5.6: Campbell diyagramı	62
Şekil 5.7: Bir rüzgar türbinin serbestlik dereceleri	63
Şekil 5.8: MOD-2 Rüzgar türbini et kalınlıkları	65
Şekil 5.9: Çelik plakaların haddelenmesi	66
Şekil 5.10: Kule bağlantı flanşları	67
Şekil 5.11: Rüzgar türbininin montajı	68
Şekil 6.1: Kule yükseliği boyunca et kalınlığı değişimi	72
Şekil 6.2: Kulenin modeli	73
Şekil 6.3: İlk üç mod şekli ve frekansları	77
Şekil 6.4: Rüzgar girdisinin ivme-zaman grafiği	80
Şekil 6.5: Tepe noktasındaki yerdeğiştirme-zaman grafiği	81
Şekil 6.6: Tepe noktasındaki hız-zaman grafiği	81
Şekil 6.7: Dip kesitteki kuvvet-zaman grafiği	81

RÜZGAR TÜRBİNİ KULELERİNDE YAPISAL TİTREŞİM ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında konik kesitli çelik bir kuleye sahip yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbinlerinin statik ve dinamik yükleme etkisindeki davranışları ve kesit analizleri yapılmıştır. İncelenen türbin Enercon E-48 rüzgar türbini olup, 54.55 metre yüksekliğe sahip daire kesitli bir çelik kule üzerinde durmaktadır. Yükseklik boyunca farklı çap ve et kalınlıklarına sahip olan kule 3 ayrı parça olarak EN10025 yapı çeliğinden imal edilmiştir. SAP2000 yazılımı kullanılarak hazırlanan matematik model kullanılarak özağırlık ile statik rüzgar yükü durumu, ardından da zaman serisi şeklindeki rüzgar yükü girdisi ile dinamik analiz yapılmıştır. Tüm bunların sonucu olarak kulenin doğal frekansları, yerdeğıştirmeleri ve kesit iç kuvvetlerine ulaşılmıştır ve böylece kulenin genel yapısal davranışı ile ilgili sonuçlar elde edilmiştir.

STRUCTURAL VIBRATION ANALYSIS ON WIND TURBINE TOWERS

SUMMARY

In this study, structural behaviours under static and dynamic loads of a three bladed horizontal axis wind turbine on a conical shaped tower has been investigated. Within this scope, the investigated wind turbine is an Enercon E-48 wind turbine at the top of a 54.55 meter tower. The tower is manufactured as three segments made up of EN10025 structural steel with various wall thicknesses. After modelling the tower via SAP 2000 software the analysis run both for the static and dynamic forces with gravity and wind load cases. As a result; natural frequencies, displacements and section stresses have been achieved. Thus, structural behaviour of the whole tower system have revealed.

1. Giriş

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında rüzgar türbin kulelerinde meydana gelen yapısal titreşimlerin incelenmesi hedeflenmiştir. Bunun için ele alınan 800 kW anma gücüne sahip Enercon E-48 rüzgar türbini ve 54.55 m yüksekliğindeki tübüler çelik kulesi ele alınmıştır.

Bu çalışma, rüzgar türbin kulelerinde görülen yapısal titreşimlerin kulede meydana getirdiği şekil değiştirmelerin elastik bölgede kalıp kalmadığı ve uzun süreli işletim yükleri altında zaman içinde kulelerde meydana gelecek yorulma gibi etkilerin incelenmesi amaçlı geniş kapsamlı bir çalışmanın başlangıcını oluşturmaktadır. İleride gerçek türbin kulelerinden alınacak titreşim işaretlerinin incelenmesi ve yapısal karakteristiklerin çıkarılmasını da hedefleyen çalışmaya teorik bir temel hazırlamak amacını gütmektedir.

Bu amaçla ele alınan türbin kulesinin çubuk sistem olarak matematik modeli oluşturulmuştur. Rijitlik ve kütle bilgilerine bağlı olan serbest titreşim analizi yapılmış; frekans, mod biçimi ve modal katılım oranları elde edilmiştir. Kulenin kullanım ömrü boyunca maruz kalacağı iki esas yükleme türü, öz ağırlık ve rüzgar yüklemesi, için statik durum esas alınarak ayrıntılı hesap yapılmıştır.

Rüzgar türbinlerinin yapısal olarak bütünlüklerinin korunması, türbin üzerine etki eden iç ve dış yükler içinde özellikle rüzgar yüklerinin statik ve dinamik analizlerinin yapılması ve gelecekteki akademik çalışmalara bir temel oluşturması diğer bir önemli amacıdır.

1.2. Literatür Özeti

Yapılan tez çalışması öncesinde geniş bir literatür taraması yapılmıştır. Bu taramanın kapsamını söz konusu çalışma ile ilgili kitaplar, daha önceden yayınlanmış ulusal ve uluslararası makaleler, standartlar, konferans raporları, ilgili oda ve kuruluş raporları,

ders notları ve internet araştırmaları oluşturmaktadır. Bu kaynaklar içinde olabildiğince güncel olanlar tercih edilmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda rüzgar trbunlerinin dinamik parçalarının titreşimleri üzerine pek çok çalışma olmasına karşın kule gibi yapısal elemanlar üzerine yapılmış akademik yayınların sayısının oldukça az olduğu grlmştir. Özellikle tezde ele alınan konuyla ilgili ve çalışmanın ilerlemesi açısından yardımı olan iki makale aşağıda verilmiştir.

Lavassas vd. 2003 yılındaki çalışmalarında 1 MW gücündeki bir rüzgar türbini kulesinin tasarımı ve analiz özelliklerinden bahsetmiştir. Yapı, değişik kesit ve et kalınlıklarından oluşan 44.075 m'lik tüp şeklinde S335J2G3 yapı çeliğinden yapılmış bir kuledir. Yapısal cevabın eldesi için iki farklı sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu analizlerin sonuçlarına göre de ilgili kodlara (Eurocode) göre çeşitli yükler altında (yerçekimi, rüzgar ve sismik) davranışı incelenmiştir. Ayrıca yapıya ilgili kod metodolojisine göre yorulma kontrolü de yapılmıştır.

Bazeos vd. 2002 yılındaki çalışmalarında ise 450 kW güce sahip yatay eksenli bir rüzgar türbini kulesi için yük dayanım kapasitesi ve sismik davranışları incelemiştir. Söz konusu elik kule değişken çap ve et kalınlıklarında, silindirik ve konik parçalardan oluşmaktadır. Yapının yük kapasitesi ve davranışı sonlu elemanlar yöntemi ve yapı kodlarına göre yapılmış modellerin yardımı ile bulunmuştur. Yapı statik, sismik ve bunların yanında yer çekimi yüklerine göre analiz edilmiştir. Ayrıca, yapının ayakta kalabilmesi için aerodinamik ve operasyonel koşullar incelenmiştir.

Uys vd. 2006 yılındaki çalışmalarında rüzgar türbini kulelerinin maliyetlerini minimuma indirecek tasarımları elde etmek için çalışmışlardır. Ele aldıkları elik kule silindir şeklinde ve güçlendirme halkaları ile desteklenmiş bir kuledir. 45 metre ykseklisindeki kule 15'er metrelik  parça halinde üretilmiştir. Rüzgar yükü Eurocode 1 Bölüm 2-4'e göre etki ettirilmiştir. İmalat maliyetleri hesaplanırken plakalara silindir şeklinin verilmesi, montaj işlemleri ve kaynak işlemleri göz önünde bulundurulmuştur. Azaltılması amaçlanan maliyetler malzeme ve imalat maliyetlerini kapsamaktadır.

2. Rüzgar Enerjisi Hakkında Genel Bilgiler

İhtiyaç duyulan ve vazgeçilmez olan enerjinin sürekli, kaliteli ve güvenli olarak sağlanabilmesi günümüzün en önemli konularında biridir. Dünya genelinde fosil kaynaklar, gerek ısınmada gerekse yakıt olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu fosil kaynakların rezervlerinin gelecek için yeterli görülmemesi, büyük ölçüde ileri teknoloji ve finans kaynağı gerektirmesi, tüm dünya ülkelerinin mevcut enerji programlarını tekrar gözden geçirmesine ve acilen gerekli önlemleri almasına sebep olmuştur. Alınacak önlemlerin başında, toplam enerji talebinde petrolün payının giderek düşürülmesi, enerji tasarrufunun sıkı bir şekilde yapılması ve kaynakların verimli kullanılmasının yanında yenilenebilir enerji kaynaklarından mümkün olduğu kadar yararlanmaya yönelik teknolojilerin hızla geliştirilip uygulamaya konulması gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakların en önemlilerinden biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi, aslında insanoğlunun M.Ö. 2800'lerden beri kullandığı en eski enerji kaynaklarından biridir. Rüzgar enerjisi, son yıllara kadar daha çok su pompalama ve kırsal alanda elektrik enerjisi elde etme amaçları ile kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde ise artık alternatif bir enerji üretim kaynağı olarak enerji sektöründe yerini almıştır. Bu enerjinin kullanılabilmesi, rüzgar rejimine, rüzgar milinin yerleştirildiği yüksekliğe ve enerji üretim sisteminin boyutlarına bağlıdır.

Kömür ve petrol gibi ithal enerji kaynaklarına bağlı olarak üretim yapan ülkeler rüzgar enerjisi gibi alternatif enerjiler sayesinde kendilerine yeter hale geleceklerdir. Rüzgarla üretilen elektrik enerjisi CO₂ emisyonu üretmemektedir böylece sera etkisine sebep olmamaktadır. Rüzgar enerjisi göreceli olarak iş gücünün yoğun olduğu ve yeni iş olanakları yaratan bir alandır. Rüzgar enerjisi uzak veya şebekenin yaygın olmadığı bölgelerde depolamak üzere veya dizel motorla birlikte kullanılarak yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca rüzgar türbinleri içme suyu olmayan kıyı bölgelerinde suyun tuzdan arındırılması işleminde de kullanılabilir. Rüzgarın bol olduğu bölgelerde üretilen elektriğin birim fiyatı açısından diğer konvansiyonel yöntemlere göre oldukça rekabet edilebilir seviyelerdedir.

Rüzgar enerjisini daha rekabetçi kılmak için türbin üreticileri üretim maliyetlerini düşürme konusuna odaklanmışlardır. Faiz oranları, arsa maliyeti ve bölgede esen rüzgar gibi bazı faktörler de üretilen elektrik enerjisinin maliyetini etkilemektedir. Üretim maliyeti; 20 yıllık bir süre zarfı içinde ilk yatırım maliyeti ile bakım maliyetlerinin toplamının kWh'de ölçülen bakım maliyetine bölünmesi ile hesaplanır. Özellikleri bilinen bir türbinin yıllık rüzgar hızı dağılımı bilinen bir bölgede ne kadar enerji üreteceği tahmin edilebilir.

Rüzgar türbinleri elektrik ürettikleri zaman bir miktar gürültü ortaya çıkarırlar. Modern rüzgar türbinlerinde imalatçılar çalışırken çıkan mekanik gürültünün neredeyse tamamını düşürmüşlerdir ve kanatlardan çıkan aerodinamik gürültünün azaltılması için çalışmaktadırlar. Nüfusun yoğun olduğu bölgelerde gürültü oldukça önemli bir etkidir. Bazı insanlar rüzgar türbinlerinin manzarayı bozduğunu düşünmektedir ancak teknolojinin de gelişmesi ile gittikçe büyüyen rüzgar türbinleri düşük kapasiteli birçok rüzgar türbininin yerini alacak hatta mevcut kapasitenin bile üzerine çıkaracaklardır. Eğer bir bölgeye birçok türbin dikilecekse orada yaşayanların izinlerinin alınması önemlidir. Bunu sağlamak için orada yaşayan insanları da projelere dâhil etmek hatta kardan pay almalarını sağlamak çok akıllıca bir yol olabilir. Ayrıca ileriki yıllarda deniz üstü türbinlerin artması ile gürültü ve görüntü kirliliği ortadan kalkacaktır.

Sorunlardan biri de doğanın bize rüzgar sağladığı sürece enerji üretebileceğimizdir. Birçok ülke için rüzgar olmadığında elektriği alabileceği büyük şebekeler olduğundan bu bir sorun değildir. Yakın gelecekte hangi kaynakların uygun olduğunu bilmek bir avantajdır, böylelikle konvansiyonel güç santrallerinin üretimlerini ayarlamaları sağlanmış olur. Bir termik santralin üretimini ayarlaması biraz zaman gerektirdiğinden güvenilir hava tahminlerinin yapılması çok gereklidir. Rüzgar türbinleri ile hidroelektrik santrallerinin birlikte çalıştırılması çok uygun gözükmektedir. Zira hidroelektrik santrallerin devreye alma süreleri çok kısadır ve gerekli olan su rezervuarlarda biriktirilebilir.

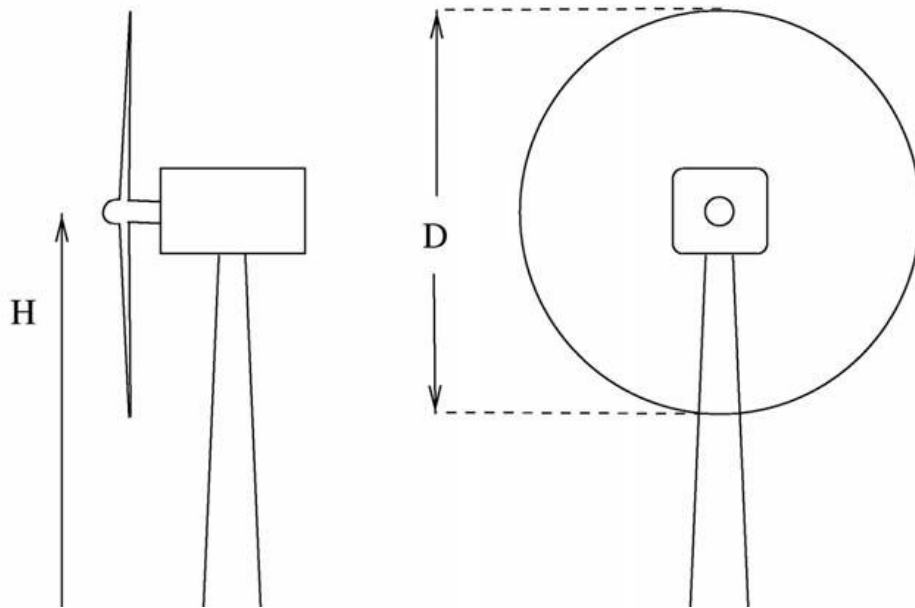
2.1 Rüzgarın Kaynağı

Bir rüzgar türbini rüzgardaki kinetik enerjiyi bir mil yardımıyla mekanik enerjiye, son olarak da jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Elde edilebilecek azami enerji, P_{max} , teorik olarak rüzgar hızının sıfıra inmesi ile elde edilir.

$P = \frac{1}{2} \dot{m} V_0^2 = \frac{1}{2} \rho A V_0^3$ burada \dot{m} akışkanın kütlesi, V_0 rüzgar hızı, ρ havanın yoğunluğu, A ise rüzgar hızının düştüğü alanı temsil etmektedir. Elde edilebilecek azami güç formülü bize çok önemli bilgiler vermektedir. Güçteki artış rüzgar hızının küpü ile orantılı iken havanın yoğunluğu alan ile lineer bir bağlantı vardır. Bir projeye başlanılmadan önce oradaki rüzgar hızları belirli bir süre için ölçülmektedir.

Pratikte ise rüzgarın hızı sıfıra inemeyeceğinden elde edilen enerjinin azami enerjiye oranı olarak bir güç katsayısı C_p tanımlanmıştır. Güç katsayısı Betz limiti denilen teorik bir maksimuma kadar ulaşabilir, $C_{p_{max}} = 16/27 = 0.593$. Modern rüzgar türbinleri 0.5 gibi bir güç faktörüne ulaşarak Betz limitine yaklaşmışlardır. İstatistiklere göre Danimarka'daki farklı rüzgar türbinleri yaklaşık 1000 kWh/m²/yıl enerji üretmektedir. Ancak bu üretim miktarları sadece o bölgeler için geçerlidir.

Ana tahrik kaynağı olarak basit sürüklemekten ziyade kaldırma kuvvetinin kullanılmasının daha etkin olduğu denizciler tarafından çok önce keşfedilmiştir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri rüzgar yönünün düşey ve paralel bileşenleridir. Teorik olarak rüzgar'dan güç elde etmenin en verimli yolu sürüklenme yerine kaldırma kuvvetinin kullanılmasıdır. Bu yüzden bütün modern rüzgar türbinlerinin dönen kanatları pervane kanatları gibidir. Eğer kanatlar düşey bir mile bağlanmış ise buna düşey eksenli rüzgar türbini, mil yatay ise yatay eksenli rüzgar türbini denir. Şekil 2.1'de yatay eksenli bir rüzgar türbininin rotor çapı (D) ve kule yüksekliği (H) görülmektedir.



Şekil 2.1: Yatay eksenli rüzgar türbini

Yerden yükseldikçe rüzgar hızı arttığı için kule yüksekliği, elde edilen güç formülündeki A alanı için rotor çapının büyüklüğü çok önemlidir. Rotor çapı ile kule yüksekliklerinin oranı genelde 1'dir. Kanat sayısı genellikle 2 veya 3'tür. 2 kanatlı rüzgar türbinleri daha ucuzdur fakat daha hızlı dönerler ve daha oynakmış gibi gözükürler, 3 kanatlı türbinler ise daha sakin ve çevreye daha uyumlu gözükürler. 2 kanatlı türbinler her zaman olmamakla birlikte genellikle rüzgar altı türbinlerdir. Bu yüzden mille olan bağlantı esnektir ve rotor mile mafsalla bağlanmıştır. Bu yüzden rotordaki eğilme momentleri mile aktarılmamış olur. Böyle bir yapı daha rijit olan 3 kanatlı türbinlere göre daha esnek, hafif ve küçük olabilirler ki bu da türbinin maliyetlerini azaltmaktadır. Rüzgar altı türbinler rüzgar üstü türbinlere göre daha gürültülü çalışırlar.

Türbin rotorunun dönme hızı ortalamam 20-50 dev/dk arasında, jeneratör milinin dönme hızı ise 1000-3000 dev/dk arasında değişir. Buradan da anlaşılacağı gibi düşük devirli rotor mili ile yüksek devirli jeneratör mili arasına bir dişli kutusu konması gerekmektedir. Şekil 2.2'de deniz üstü bir rüzgar türbininin içi görülmektedir. Ana mil, dişli kutusunun olası yerdeğiştirmelerinde yardımcı olmak için 2 ayrı yerden yataklanmıştır.



Şekil 2.2: Makine dairesinden bir kesit

Bazı rüzgar türbinleri çok kutup çiftli jeneratöre sahip olduklarından ve çok yavaş döndüklerinden dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaz. İdeal bir rüzgar türbininde rotor, rüzgar geliş yönüne dik olmalıdır. Bu yüzden türbinlerin üzerine rüzgarın yönünü

ölçen rüzgar gülleri yerleştirilir. Buradan gelen sinyalle birlikte türbini rüzgarın yönüne çevirecek bir motorun tahrik edilmesi sağlanmış olur.

Son yıllardaki gelişmelerin büyük kısmında rotordaki gelişmeler başı çekmektedir. İlk modern rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatlar havacılık sektöründen edinilen tecrübelerle çok fazla değiştirilmeden kullanılıyordu. Ancak günümüzde kanat üreticileri sadece türbinlerde kullanılmak üzere kanatların üretimine odaklanmışlardır. Kanat imalinde dayanıklı, yorulma limiti yüksek ve olabildiğince ucuz kanat imal edebilmek için birçok malzemeden faydalanılmaktadır. Günümüzde üretilen kanatlar genellikle fiberglas veya lamine ahşap gibi farklı malzemelerden yapılmaktadır (Hansen 2008).

2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihi

Rüzgar enerjisi kullanımı M.Ö. 2800 yıllarında Orta Doğuda başlamıştır. M.Ö. 17. yüzyılda Babil kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgar enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Yel değirmenleri, ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. İranlıların ilk Yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak Haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir. Fransa ve İngiltere'de yel değirmenlerinin kullanılmaya başlanması 12. yüzyılda olmuştur. Avrupa, Haçlı Seferlerinde kazandığı bu teknoloji ile Roma İmparatorluğunun kaçırdığı bir serveti yakalamıştır. Roma İmparatorluğu gücünün zirvesindeyken para basmak için gereken altın ve gümüşü Avrupa dışındaki eyaletlerden sağlamaktaydı. Bu eyaletleri kaybettikten sonra Avrupa'daki fakir madenlerin işletilmesi denenmiş, ancak bu madenlerin yüzeysel kapasiteleri hızla tüketilip, derinlere inildikten sonra galerilerden su çıktığından, madenler terk edilmiştir. Giderek artan para sıkıntısı ve ekonomik bunalımla birlikte, o dönemin yüksek hızlı enflasyonu Roma İmparatorluğunun sonunu getirmiştir. Avrupalılar bunu yel değirmenleri yardımı ile, galeri diplerindeki suları dışarı pompalayarak, yani rüzgar enerjisini kullanarak başarmışlardır.

18. yüzyılın sonunda yalnızca Hollanda'da 10.000 yel değirmeni bulunuyordu. Buhar makinesinin yapılması ve odun, kömür gibi yakıtlardan kesintisiz enerji üretimine başlanması ile rüzgar enerjisi önemini yitiriyordu. Bununla beraber, rüzgar türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler 1890'larm başlarında

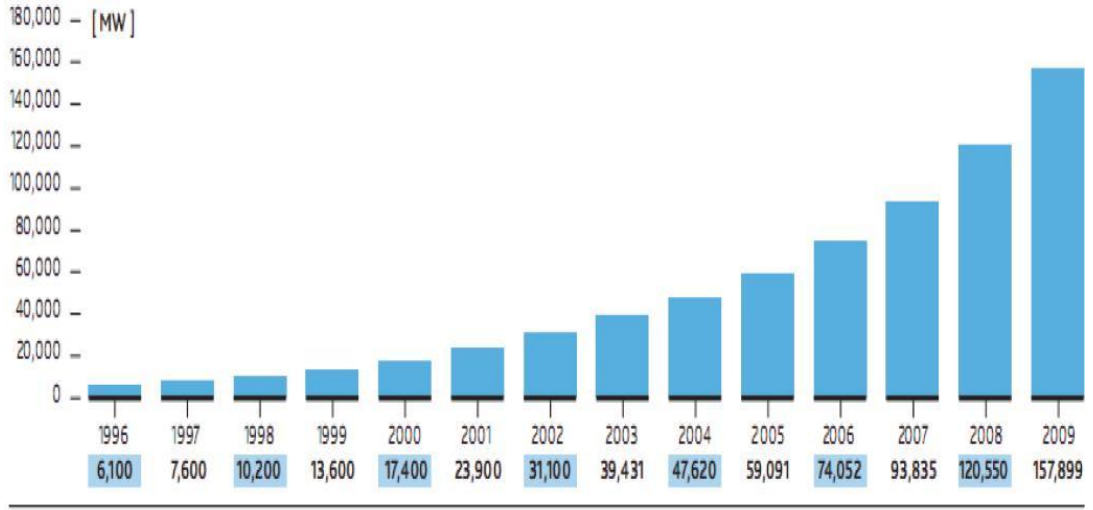
Danimarka'da yapılmıştır. Aynı dönemde, bu makinelerin geliştirilmesi için Almanya'da da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Rüzgar kuvvet makineleri yerlerini yakıtlı kuvvet makinelerine bırakırken rüzgar enerjisi kullanımının sürmesi için yeni bir teknoloji de başlıyordu. Ancak 19. yüzyılda geliştirilen ilk rüzgar türbinlerinin verimleri düşüktü.

1961 yılında Roma'da birleşmiş milletler tarafından düzenlenen "Enerjinin Yeni Kaynakları Konferansında" ele alınan üç kaynaktan biri rüzgar enerjisi idi. Böylece çok eskiden bu yana tanınan rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelerle ele alınıyor, yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokuluyordu. 1961-1966 yıllar arasında Almanya da rotor çap 35 m olan 100 kW'lık bir modelin geliştirilmesi üzerinde duruluyordu. 1970'lerde Danimarka'daki Gedser türbini, gücü 650 kW olan büyük türbinlerle değiştiriliyordu. Bu dönemde rüzgar jeneratörleri üzerinde İsviçre, Avusturya ve İtalya'da da teknolojik çalışmalar yapılmıştır. Amerika'da 1970'lerde büyük tip yatay eksenli makineler üzerinde yeniden çalışılırken, dikey eksenli Darrieus tipi makineler üzerinde de çalışmalar başlatılmıştır. Ucuz petrol döneminde güncellik kazanamayan rüzgar enerjisi, 1974-1978 yıllar arasındaki yapay petrol bunalımlarının ardından, gündeme daha çok girmiştir. Rüzgar enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Artık, eski tip rüzgar jeneratörleri yerine modern ve çağdaş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) kurulmaktadır. Ayrıca, rüzgar türbini ile beraber, dizel motor ve güneş fotovoltaik jeneratörü içeren rüzgar-dizel-PV hibrid sistemlerde geliştirilmiştir. Bir tüketiciyi besleyecek tek makine yerine, birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekeleri için üretim yapılır olmuştur. ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç'in katkıları sonucunda, deniz üstünde, kıyıdan uzakta rüzgar santralleri kurulmuştur (Hansen 2008).

2.3 Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Durumu

Dünyada rüzgar enerjisi en hızlı yayılan enerji kaynağı olmuştur. Global olarak 1996-2009 yılları arasındaki yıllık kümülatif artış Şekil 2.3'de görülmektedir. Özellikle 2005 yılından sonra ciddi bir artış gözlenmiştir. Bunda sadece Avrupa ülkelerinin değil; Amerika, Çin ve Hindistan'ın kurulu güç artışları etki etmiştir.

2006 yılından sonra yıllık 15,000 MW üzerine çıkan bir RES kapasitesi, 2009 yılında 37,466 MW olarak rekor kırmıştır.



Şekil 2.3:1996-2009 Yılları Arası Kümülatif Kurulu Güç Artışı

2009 yılı sonu itibarı ile dünyada toplam 157,899 MW toplam kurulu güç bulunmakta ve Avrupa 76,152 MW ile rüzgar enerjisinde liderliğini korumaktadır. Toplam dünya kurulu rüzgar gücünün %48'ine sahip Avrupa, 2009 yılında %16 büyüyerek toplam kurulu elektrik kapasitesinin %6'sını rüzgar enerjisinden karşılar hale gelmiştir. Çin Pazarı da 1 Ocak 2006'da çıkan Yenilenebilir Enerji Kanunu ile büyümeye başlayarak 2009 yılında 13,000 MW eklemiş ve %110'luk bir büyüme gerçekleştirmiştir. Avustralya, 2009 yılı sonunda 1712 MW kurulu rüzgar gücüne ulaşmıştır. Eyalet merkezli teşvik sistemi ile bu büyüme trendini devam ettirmek istemektedir. 2009 yılında 406 MW yeni kapasite eklenmiştir. Genç bir pazar olan Afrika ve Ortadoğu'da ise, Mısır (430 MW), Fas (253 MW) ve İran (91 MW) dikkati çekmektedir. Çin 2009 yılında %34.7'lik artışla dünyada ilk sırayı almaktadır. 2010 yılındaki gelişmelere bakılırsa bu durum devam edecek gibi gözükmektedir (Durak 2010).

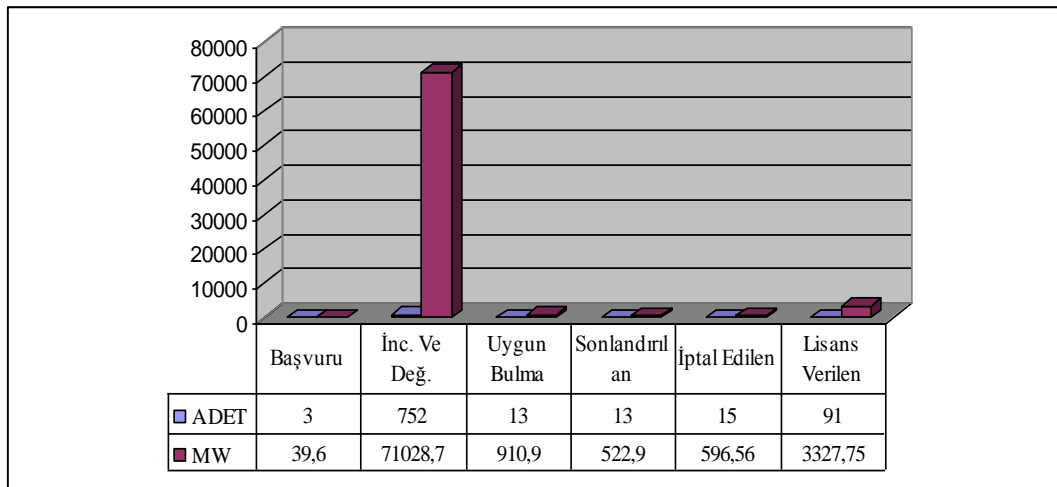
2.4 Rüzgar Enerjisinin Avrupa Ülkelerindeki Son Durumu

Avrupa Birliği Ülkeleri, rüzgar enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarının artırılmasına yönelik hedeflere odaklanmıştır. Avrupa'daki ve diğer bölgelerdeki ülkeler bu hedefleri tutturabilmek için çeşitli piyasa destek yöntemlerini benimsemişlerdir. Bu ülkeler, üretilen birim enerji başına prim ödenmesinden, özel tarifeler uygulanmasına, yenilenebilir enerji kaynaklarını

kullanan elektrik santrallerine vergi teşviki ve sübvansiyondan enerji üreticilerinin enerji arzlarının gittikçe artan bir yüzdesini yenilenebilir kaynaklardan elde etmeye zorunlu olmasına kadar dayanan bir takım yöntemlerden faydalanmışlardır. 2009 yılı içerisinde de Avrupa’da rüzgar enerjisi kullanımı artarak devam etmiştir. Almanya liderliğini korumuştur ve İspanya hemen onu takip etmektedir. İtalya ve Fransa’da kullanımı ise gittikçe artmaktadır. AB’ye yeni üye olan ülkeler RES kullanımında henüz istenilen seviyede değildir. Orta ve Batı Avrupa Ülkeleri, Doğu Avrupa Ülkelerine doğru yönelmektedir. Ayrıca deniz üstü (offshore) RES kurulu gücü de 2061 MW olup Avrupa’daki toplam kurulu güç olan 76,152 MW içerisinde %2.7 orana sahip olmakla beraber, deniz üstü RES projelerinin önümüzdeki yıllarda artacağı tahmin edilmektedir. AB Ülkelerinde 2008 yılı sonu 65,741 MW kurulu gücün üzerine, 2009 yılında 10,526 MW kurulu güç eklenerek toplam kurulu güç 76,152 MW olmuş ve sektör %16 yıllık büyüme gerçekleştirmiştir.

2.5 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Mevcut Durumu

Türkiye’de 2008 yılı sonu itibarıyla 433,35 MW rüzgar santrali şebekeye bağlı olarak enerji üretmekte, toplam kurulu gücü 402 MW olan rüzgar santrali de inşa halindedir. Bu santrallerin 2009 yılı sonuna kadar tamamlanarak devreye alınacağı öngörülmektedir. Bunların yanı sıra Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından lisanslanmış olan toplam 667 MW’lık rüzgar santrali projesinin de türbin tedarik sözleşmeleri imzalanmıştır.

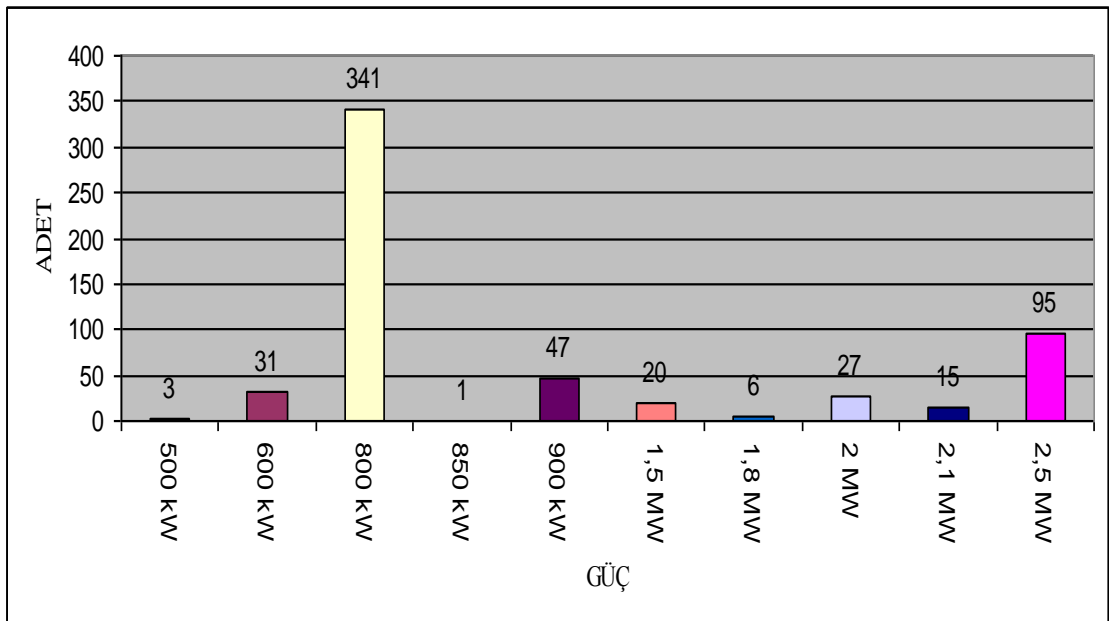


Şekil 2.4: EPDK’ya Yapılan RES Başvurularının Durumu

Günümüze kadar EPDK'ya yapılmış rüzgar enerjisi proje başvurularının durumu Şekil 2.4'de verilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi inceleme ve değerlendirme altında olan 71,028 MW'lık başvuru 1 Kasım 2007 tarihinde alınan projelerdir.

İşletme ve inşa halindeki rüzgar santrallerine türbin üreticileri açısından bakıldığında en büyük pazar payının Vestas türbinlerine ait olduğu görülmektedir. Bu santrallerde kullanılan Vestas türbinlerinin tamamı yurt dışından temin olup, türbin güçleri projelere göre 600 kW, 800 kW, 2 MW, 3 MW olarak değişmektedir. En çok kullanılan ikinci türbin markası Enercon'dur. Enercon türbinleri kullanan santrallerin türbin güçleri 600kW-2MW arasında değişmektedir. 600-900 kW'lık Enercon türbinlerinin kanatları Enercon&Demirer ortak girişimi olarak İzmir'de kurulan Enercon-Aero rüzgar türbin kanat fabrikası tarafından üretilmektedir. Söz konusu fabrikada Enercon 2 MW'lık türbin kanatları üretimine de başlanmıştır. Yine Enercon ve GE türbinlerinin kuleleri de Gemlik'te yer alan Çimtaş-Enka Çelik İmalat Montaj Sanayi A.Ş. tarafından üretilmektedir.

İşletme ve inşa halindeki rüzgar santrallerinde kullanılan türbinlerin güçlerine göre dağılımı ise Şekil 2.5'tedir. Görüleceği gibi en çok kullanılan türbin gücü 800 kW'tır. İkinci olarak en çok kullanılan türbin gücü ise 2,5 MW'tır (Altuntaşoğlu 2009).



Şekil 2.5: İşletme ve İnşa Halindeki RES'lerin Türbin Güçlerine Göre Dağılımı

2.6 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar enerjisi konusunda herhangi bir yatırıma başlamadan önce yatırımın yapılacağı yerin rüzgar kaynağı özelliklerini iyi anlamak gerekir. Rüzgar enerjisi potansiyel atlasları bu ve benzeri soruların cevaplandırılması için başvurulması gereken en önemli kaynaklardan biridir. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Türkiye rüzgar kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirlemek amacıyla üretilmiştir. Bu atlasla verilen detaylı rüzgar kaynağı haritaları ve diğer bilgiler rüzgar enerjisinden elektrik üretimine aday bölgelerin belirlenmesinde kullanılabilecek bir altyapı sağlamaktadır.

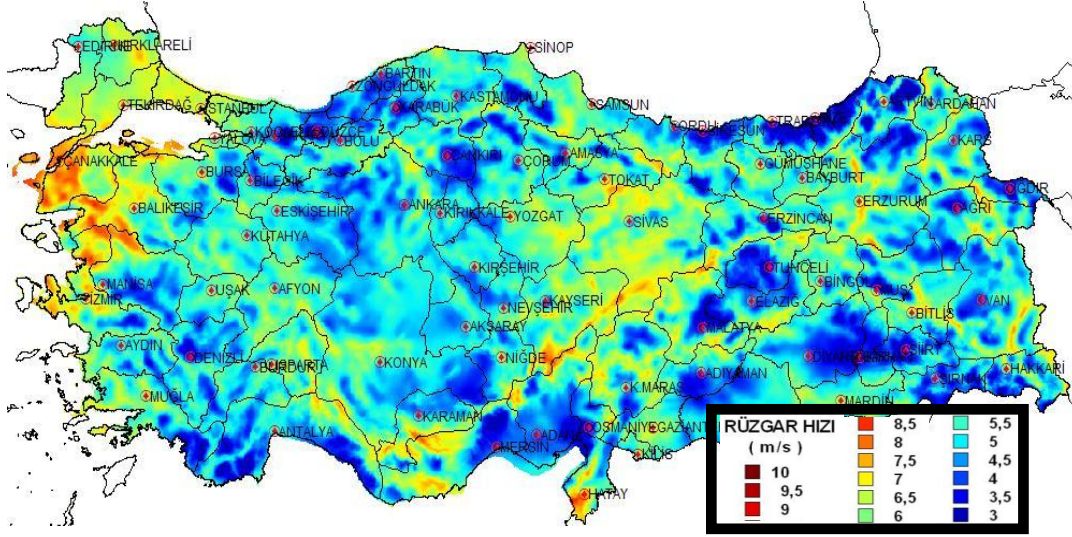
Yıllık ortalama değerler esas alındığında, Türkiye'nin en iyi rüzgar kaynağı alanları kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınında bulunmaktadır. Açık alan yakınlardaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgar hızları Türkiye'nin batı kıyıları boyunca, Marmara Denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Orta şiddetteki rüzgar hızına sahip geniş bölgeler ve rüzgar gücü yoğunluğu Türkiye'nin orta kesimleri boyunca mevcuttur. Mevsimlik ortalama değerlere göreyse Türkiye çapında rüzgar kaynağı karmaşık topografyaya bağlıdır. Birçok yerde, özellikle sahil boyunca ve doğudaki dağlarda kışları daha güçlü rüzgar hızları görülmektedir. Türkiye'nin orta kesimleri boyunca çoğu yerde rüzgar hızı değerleri mevsimden mevsime, nispeten sabittir. Aylık ortalama değerlere göre ise Türkiye'nin batı sahil bölgesi yanında Marmara Denizi'ni çevreleyen bölgede kış mevsimi süresince en şiddetli rüzgar hızına sahiptir. Rüzgar hızı haritaları asgari değerleri, haziran ayı süresince gösterir. Rüzgar hızları eylül ve ekimde artmaya başlar ve bölgedeki bölge deki azami değerler ocak ve şubat aylarında meydana gelir. Antakya yakınındaki güçlü rüzgar kaynağının da en kuvvetli zamanı kış aylarında, özellikle kasımdan şubata kadar olan zamandır. Bu bölgedeki rüzgar hızları ilkbahar ve sonbaharda azalma eğilimi gösterirken, yaz aylarında biraz daha yüksek değerlere sahip olurlar. Türkiye'nin doğusundaki dağlık bölgelerdeki rüzgar hızları şubat ayında zirveye ulaşırken kasımdan marta kadar nispeten yüksek değerler mevcuttur.

Türkiye'deki rüzgar enerjisi potansiyelleri, rüzgar enerjisi uygulamalarını etkileyen tüm parametrelerin çıkarılmasıyla elde edilmiş değerlerdir. Potansiyel hesaplamaları, Türkiye çapında 200 m çözünürlükte rüzgar verilerinden ve bu verilerden

oluşturulmuş haritalar üzerinden yapılmıştır. Rüzgar potansiyeli hesaplamaları için kullanılan varsayımlar (hesaplamaya dâhil edilmeyen alanlar) aşağıdaki gibidir.

- Karayollarına 100m emniyet şeridi içinde kalan alanlar
- Demiryolu hatlarına 100m emniyet şeridi içinde kalan alanlar
- Deniz sahillerine 100 m sahil koruma şeridi içinde kalan alanlar
- Havaalanlarına 3 km emniyet şeridi içinde kalan alanlar
- Şehirsiz alanlar ve 500 m emniyet şeridi içinde kalan alanlar
- Çevre koruma, milli parklar ve tabiat alanları ve 500 m emniyet şeridi içinde kalan alanlar
- 50 m derinlikten fazla olan deniz alanlar
- Arazi eğimi 20'den fazla olan alanlar
- Rakımı 1500 m'den fazla olan alanlar
- Göller, nehirler, sulak alanlar ve baraj gölleri alanları
- Belirli orman tiplerine sahip alanlar (Koru ormanları, özel ormanlar, fidanlıklar, sazlık ve bataklık alanlar, muhafaza ormanları, arberetum)
- Yıllık rüzgar hızı 6.5 m/s'den düşük alanlar

Bu kriterlerin dışında temin edilemeyen altlık haritalar (maden sahaları, petrol-doğalgaz boru hatları, askeri sahalar, özel mülkiyet, turizm bölgeleri, kar örtüsü, vb.) ve öngörülemeyen diğer kriterlerin olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle rüzgar santrali kurmaya elverişli olamayacak alanlar belirli yerlerde belirli oranlarda artırılmıştır. Bu nedenle REPA görüntüleme yazılımı geliştirilmiş ve bu yazılımda kullanılmayacak alan hesabı parametrik olarak sunulmuştur. Altlık haritalar temin edildikçe yazılıma eklenebilecek alan hesabı güncellenebilecektir.



Şekil 2.6:Türkiye Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı, 50 m.

Türkiye toplam yüzölçümünden bu alanlar çıkarıldıktan sonra rüzgar potansiyeli iki ayrı senaryo kapsamında incelenmiştir. 50m yükseklikte rüzgar güç yoğunluğu 400 W/m^2 'den ve rüzgar hızı 7.5 m/s 'den büyük alanlar ve 50m yükseklikte rüzgar güç yoğunluğu 300 W/m^2 'den ve rüzgar hızı 6.5 m/s 'den büyük alanlarda kilometrekare başına 5MW kurulabileceği varsayımı kullanılarak rüzgar potansiyeli hesaplamaları yapılmıştır.(Şekil 2.6). REPA çalışmalarında rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplamalarını yaparken 20'nin üzerinde altlık harita kullanılmıştır. Bu haritalar şunlardır: Arazi pürüzlülüğü; Topografya ve yükseklik; Deniz derinlikleri; Arazi eğimi; Yerleşim Birimleri; Göller; Nehirler; Sulak alanlar; Limanlar; Trafo merkezleri; Enerji nakil hatları; Enerji santralleri; Deprem fay zonları; Arazi kullanım şekli; RES başvurularının yerleri; Ormanlar; Çevre koruma alanları; Kuş göç yolları; Kara-demir-hava yolları.

REPA ile tüm Türkiye ve komşu ülkelerin önemli bir kısmının rüzgar kaynak bilgilerine $200 \times 200 \text{ m}$ çözünürlükte erişme imkanı bulunmaktadır. Bu bilgiler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 30, 50, 70 ve 100 metre yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgar hızı ortalamaları
- 50 ve 100 metre yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgar güç yoğunlukları.
- 50 metre yükseklikteki yıllık kapasite faktörü

- 50 metre yükseklikteki yıllık rüzgar sınıfları
- 2 ve 50 metre yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri
- Pürüzlülük değerleri
- Deniz seviyesinde ve 50 metre yüksekliklerdeki aylık basınç değerleri
- Rüzgar gülleri, Weibull parametreleri ve dağılımları, istenilen bir nokta veya alanın enerji üretim değerleri, potansiyelleri vb.

Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli, belirlenmiş kriterlerin ışığında rüzgar sınıfı iyi ile sıra dışı arasında 47849.44 MW olarak belirlenmiştir. Bu araziler Türkiye toplamının yüzde 1.30'una denk gelmektedir. Orta ile sıra dışı rüzgar sınıfına ait rüzgarlı arazilere bakıldığında ise 131756.40 MW'lık rüzgar enerjisi potansiyeli bulunduğu ve toplam rüzgarlı arazi alanının ise Türkiye'nin yüzde 3.57'si olduğu görülmüştür. 50 metre derinlik içerisinde kalan deniz alanlarının potansiyeline bakıldığında iyi ile sıra dışı arası rüzgar sınıfına ait rüzgarlı alanların 10463.28 MW rüzgar enerjisi potansiyelini desteklediği, orta ile sıra dışı arasında ise 17393.20 MW'ı desteklediği hesaplanmıştır.

Türkiye iyi-sıra dışı rüzgar sınıfına giren aralıkta rüzgarlı alanların potansiyelinin, yaklaşık 48000 MW'lık rüzgar kurulu gücü destekleyebileceği hesaplanmıştır. Rüzgar enerjisi potansiyelini ortaya koyarken daha önce belirtilen bir çok parametre kullanılmıştır. Fakat bu hesaplamada elektriksel altyapı dikkate alınmamıştır. Eğer elektriksel altyapı ve uygulamalar bu miktarda rüzgar enerjisini kaldırabilecek şekilde düzenlenirse Türkiye çapında böylesine büyük bir yerli potansiyelden yararlanma imkanı doğacaktır. Bu miktardaki bir rüzgar enerjisi potansiyeli en güvenli tarafta kalınarak elektrik enerjisine dönüştürülürse yıllık 147 milyar kWh enerji üretilebilir. Hesaplama 50 metre yükseklikteki rüzgar hızları, yüzde 35'lik kapasite faktörü, yıllık ortalama rüzgar hızının 7 m/s ve üzerindeki kullanılabilir alanlar ve kilometrekare başına 5 MW'lık bir güç kurulabileceği gibi güvenli yaklaşımlar kabul edilerek yapılmıştır. Rüzgar enerjisi uygulaması amaçlı kullanılmayacak tüm alanlar bu hesaplamadan çıkarılmış ve dikkate alınmamıştır. (Malkoç 2008).

2.7 Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

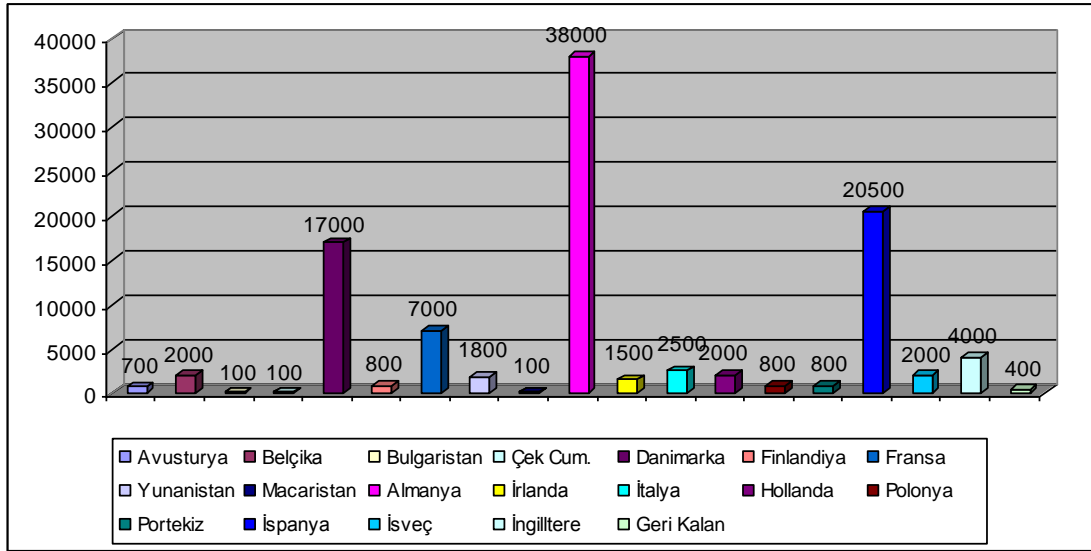
Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında da olduğu gibi rüzgar enerjisinin konvansiyonel enerji kaynaklarına göre en önemli avantajı çevreci olmasıdır. Rüzgar enerjisinin kaynağı fosil yakıtlar olmadığı için işletim sırası boyunca hiçbir kirletici gaz salınımı olmamaktadır. Türbin, kanat ve kule gibi bileşenlerin üretimi bunların taşınması gibi süreçlerde yapılan gaz salınımları dışında başka bir gaz salınımı söz konusu değildir. Ayrıca üretim ve taşıma sırasında ortaya çıkan salınımların toplam enerji üretimine oranına baktığımızda konvansiyonel enerji kaynaklarına ve diğer yenilenebilir kaynaklara göre çok düşük olduğu kesindir. Rüzgar enerjisi tarafından kWh başına üretilen elektrik yaklaşık 1 kg karbon dioksit tasarrufu sağlamaktadır. Bu da demektir ki fosil yakıtlarla üretilen elektriğin % 1'lik bir kısmının rüzgar enerjisi ile değiştirilmesi ile 15 milyon ton karbon dioksitin emisyonu azaltılmaktadır. Çizelge 2.1'de rüzgar enerjisinin kullanılması ile ne kadar gaz emisyonu tasarrufu yapıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.1: Rüzgar enerjisi ile sağlanan emisyon tasarruf miktarları

Kirletici	Tasarruf Miktarı kg/kWh
Karbon Dioksit	0.750-1.250
Baca Tozu	0.040-0.070
Kükürt Dioksit	0.005-0.008
Azot Oksit	0.003-0.006

Rüzgar enerjisi ile birlikte, diğer enerji türlerinde olduğu gibi radyoaktif atık, hava kirliliğinden dolayı oluşan fazladan harcamalar, toplum sağlığındaki bozulma, petrol sızıntısı, kullanılan yakıtın güvenliği vs. gibi olumsuzluklardan kaçınmış oluruz. Termik santrallerde üretilen elektrik için yapılan ekstra masraflar 0.04 €/kWh olabilmektedir ki rüzgar enerjisi için 0.03 €/kWh'tir (Wagner vd. 1996).

Büyük rüzgâr çiftlikleri enterkonnekte sisteme bağlanmaları, küçük ve münferit rüzgâr türbinlerinde ise özellikle, enterkonnekte sisteme uzak kırsal yerleşme merkezleri, deniz fenerleri, yüksek ve ulaşılması zor bölgelerdeki sosyo-ekonomik amaçlı tesislere, bu yolla elektrik enerjisi sağlamaları bakımından da çok avantajlıdır. Yaratılan istihdamın ülkelere göre dağılımı Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7: Avrupa ülkelerindeki doğrudan rüzgar enerjisi istihdamı

Rüzgar enerjisinin bir diğer avantajı da iş yaratan bir sektör olmasıdır. Rüzgâr enerjisinin dünyada oluşturduğu iş sayısı son üç yılda neredeyse ikiye katlanarak, 2008 yılında 440,000' e ulaşmıştır. Bunun büyük bir kısmı uzmanlık gerektiren işlerdir. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği'nin araştırmalarına göre Avrupa Birliği ülkelerinde rüzgâr endüstrisinin yarattığı doğrudan istihdam 108600 kişiye ulaşmıştır. Dolaylı istihdam da göz önüne alındığında bu rakam 150000'i aşmaktadır. Doğrudan rüzgâr enerjisi istihdamının yaklaşık % 77'si Danimarka, Almanya ve İspanya tarafından sağlanmaktadır.

Yukarıda belirtilen avantajların yanında, temiz bir enerji kaynağı olsa bile rüzgâr teknolojisinin çevrede birtakım olumsuzluklar oluşturması gibi bazı dezavantajlarının olması kaçınılmazdır. Ancak bunların çok büyük sorunlar olmadığı ve tam anlamıyla ortadan kaldırılamasa bile boyutlarının azaltılabilmesi mümkündür. Rüzgârların düzenli olmaması sebebiyle, enerji üretiminde kesikli bir düzen görülür. Yani rüzgârın yeterli hızda veya esmediği dönemlerde enerji üretimi gerçekleştirilemez. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, üretilen elektriğin dev akülerde depolanması ve suyun elektroliz edilmesiyle elde edilen hidrojenin depolanarak, rüzgârın esmediği dönemlerde enerji ihtiyacının karşılanabilmesine yönelik önemli çalışmalar yürütülmektedir. Özellikle deniz üstü rüzgâr santrallerinde, suyun elektrolizi yoluyla elde edilen hidrojen, tanker gemileriyle taşınacağından, yüksek maliyetli denizaltı iletim kablolarına gerek kalmayacaktır. Elektroliz metodu, gerek denizde, gerekse karada kullanılan rüzgâr türbinlerinin, enerjiyi kesikli üretmesinden kaynaklanan

dezavantajının ortadan kaldırılmasında ve üretilen elektriğin dev akülerde depolanması gibi önerilen çözüm yolları içinde en önemlilerinden biridir.

Rüzgâr türbinlerinin gürültülü çalışmaları, çoğu kimse tarafından bir dezavantaj olarak belirtilse de, gürültü kirliliği bakımından çok büyük etkileri yoktur. Bu etki, sadece rüzgâr santrallerinin kuruldukları lokasyonlarda, çok dar alanlarda gözlenmektedir. Bu olumsuzluğun ortadan kaldırılması amacıyla, bazı teknolojik önlemler alınmakta ve santrallerin coğrafi konumlarının seçiminde daha dikkatli davranılmaktadır. Rüzgâr santrallerinde, duymanın zor olduğu 80-85 dB civarında gürültü olmaktadır. Bu sebeple, rüzgâr santralleri ile yerleşim birimleri arasında 400-500 m'lik bir mesafenin bulunması gereklidir. Ayrıca gürültünün azaltılması için, teknik bir işlem olarak pervane, titreşimi emen, salınımlı bir yatak kullanılarak dişli kutusundan, izole edilmekte ve dişli kutusu ve jeneratörü içinde bulunduran tekne, lastik ile yalıtılmaktadır.

Rüzgâr santralinin büyüklüğüne göre değişmekle beraber, 2-3 km çapındaki bir alan içinde, radyo, televizyon ve diğer haberleşme dalgalarını olumsuz etkilemektedir. Bazılarına göre, doğaya uyumsuz şekilleri itibariyle, doğal ortam şartlarında garip ve çirkin görüntüler sergilemekte, görüntü kirliliği oluşturmaktadır. Örneğin İngiltere'de 10 türbinden fazla ve 5 MW'tan büyük güçte rüzgâr çiftlikleri, milli park alanlarında kurulmamaktadır. Yüksek hızla dönen rotorları (pervaneleri) ile kuşların ölümlerine sebep olmaktadır (Altuntaşoğlu 2009).

3. Rüzgar Enerjisinin Temelleri

Dünyamızın atmosferi, büyük bir ısı makinası gibi modellenebilir. Enerjisini tek bir kaynaktan (güneş) alır diğer bir kaynağa (atmosfer boşluğu) iletir. Bu süreçte, atmosferdeki gazlar iş görür. Hava basıncının geçici olarak yükseldiği veya azaldığı bölgeler oluşur. Hava basıncındaki bu fark atmosfer gazlarının yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket etmesine neden olur. Bu bölgeler genellikle yüzlerce km çapındaki bölgelerdir. Güneşten kaynaklanan radyasyon, suyun buharlaşması, yüzey pürüzlülüğü atmosferdeki şartların oluşmasında rol oynamaktadır. Bu etkiler arasındaki ilişkiyi inceleyen bilim dalı meteorolojidir.

Hava hareketlerini sürükleyen en temel kuvvetin iki bölge arasındaki basınç farklılıkları olduğunu söylemiştik. Bu hava basıncı birçok fizik yasasıyla açıklanmaktadır. Bunlardan bir tanesi de gaz basıncı ile hacminin çarpımlarının sabit sıcaklık altında değişmediğinin kabul edildiği Boyle yasasıdır.

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (3.1)$$

Bir diğer yasa da, sabit basınçta gaz hacminin mutlak sıcaklık ile orantılı olarak değiştiği Charles yasasıdır.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (3.2)$$

Charles ve Boyle yasaları ideal gaz kanunu altında birleştirilebilir.

$$PV = nRT \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte, R evrensel gaz sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, V m³ cinsinden hacim, n kmol cinsinden gaz sayısı ve p de paskal cinsinden gaz basıncıdır (Johnson 2001).

3.1 Dünyadaki Rüzgar Sistemleri:

Atmosferdeki rüzgar hareketlerinin mekaniğini en basit şekilde açıklayabilmek için dört adet kuvvet türünden bahsedilebilir. Bunlar; basınç kuvvetleri, dünyanın

dönmesinden kaynaklanan Coriolis kuvveti, büyük ölçekli dairesel dönmeye dayalı atalet kuvvetleri ve dünya yüzeyindeki sürtünme kuvvetleri. Şekil 3.1. de Coriolis etkisinin dünya üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 3.1: Dünya üzerinde Coriolis kuvvetinin etkisi

Havadaki kütle başına basınç kuvveti F_p aşağıdaki ifadeyle verilir:

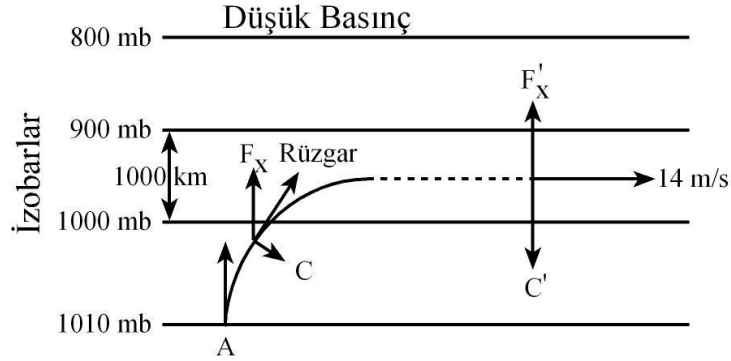
$$F_p = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3.4)$$

Burada ρ havanın yoğunluğu, n sabit basınç çizgilerine normal olan yöndür. Ayrıca $\frac{\partial p}{\partial n}$ sabit basınç çizgileri veya izobarlara normal olan basınç gradyenini temsil eder. Coriolis kuvveti (F) aşağıdaki eşitlikle ifade edilen ölçümlere dayalı imgesel bir kuvvettir.

$$F_c = f.U \quad (3.5)$$

U rüzgar hızı, f ise coriolis parametresidir [$f = 2\omega \sin(\phi)$]. ϕ enlemi, ω ise dünyanın açısal hızını ifade eder. Bu nedenle coriolis kuvveti rüzgar hızına ve

enleme bağlıdır. Coriolis kuvvetinin yönü hareket eden havanın yönüne diktir. Bu iki kuvvetin bileşkesine jeostrofik rüzgar denir ve izobarlara paraleldir. (Şekil 3.2).

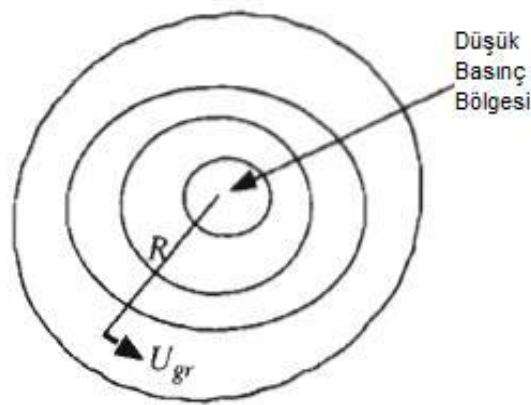


Şekil 3.2: Jeostrofik rüzgar ve dengesinin oluşumu

Jeostrofik rüzgarın büyüklüğü U_g kuvvet dengesinin bir fonksiyonudur ve şu şekilde ifade edilir:

$$U_g = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3.6)$$

Yüksek ve düşük basınç bölgelerinin varlığı izobar eğrilerini oluşturduğu için bu ideal bir durumdur. Bu durum rüzgar üzerinde merkezkaç kuvveti oluşturur. Gradyan rüzgarı denilen bu bileşke rüzgar U_{gr} Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Gradyan rüzgar U ; R eğrinin yarıçapı

Gradyan rüzgar izobarlara paraleldir ve kuvvet dengesinin bileşkesidir.

$$\frac{U_{gr}^2}{R} = -fU_{gr} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3.7)$$

Rüzgar üzerindeki son kuvvet dünya yüzeyindeki sürtünme kuvvetidir. Dünya'nın yüzeyi hareket eden hava üzerine akışı frenleyici yatay bir kuvvet etki ettirir. Bu kuvvet yerden yükseldikçe azalır ve sınır tabaka üzerinde yok sayılır. Sınır tabakanın üstünde sürtünmesiz rüzgar dengesi kurulur ve rüzgar izobarlar üzerinde gradyan rüzgar hızıyla geçer. Yüzeydeki sürtünme rüzgarın alçak basınç bölgesine doğru çevrilmesine sebep olur (Manwell vd. 2002).

3.2 Rüzgarların Sınıflandırılması

Önceki bölümde anlatılan dairesel dönüş şeması düzgün küresel yüzeyler için iyi bir model oluşturur. Gerçekte ise dünyanın yüzeyi okyanus ve kara parçalarıyla örtülüdür ve düzgün bir yüzeye sahip değildir. Yüzeylerdeki bu değişimler basınç bölgelerindeki farklılıklar, solar radyasyonun emilimi ve nemlilik oranına göre hava akışını etkiler. Örneğin okyanuslar büyük enerji soğurucu olarak işlev görürler. Bu yüzden, hava hareketleri genellikle okyanus akıntılarına eşlik ederler. Tüm bu etkiler, küresel rüzgarları ve birçok sürekli bölgesel rüzgarı etkileyen basınç farklılıklarına dayanır. Ayrıca, yerel ısınma ve soğumalar günlük ve mevsimsel bazda yerel rüzgarların oluşmasına sebep olur. Bunlar deniz meltemleri ve dağ rüzgarlarıdır.

Küçük ölçekli atmosferik akıntılar ikinci derece ve üçüncü derece akıntılar olarak ikiye ayrılabilir. İkinci derece akıntılar, yüksek veya alçak basınç merkezleri alçak atmosferin ısınması veya soğuması sonucu oluşurlar. İkinci derece akıntılar aşağıdaki rüzgarları oluşturur:

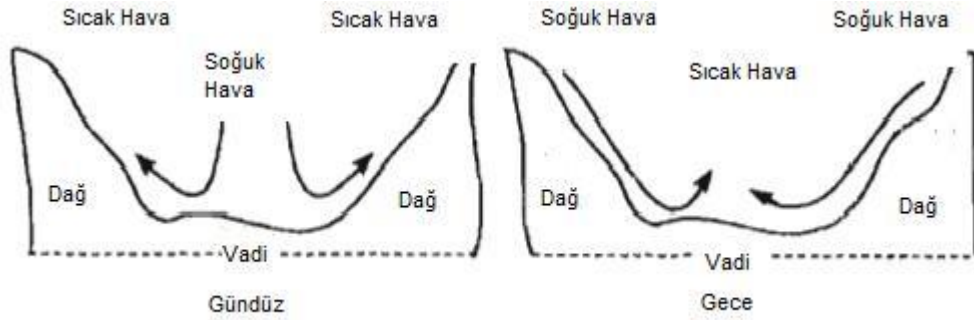
- Kasırgalar
- Muson rüzgarları
- Ekstra-tropikal siklonlar

Üçüncü derece akıntılar küçük ölçekli, yerel akıntılarının oluşturduğu yerel rüzgarlardır ve aşağıdaki gibi sıralanırlar:

- Kara ve deniz meltemleri
- Vadi ve dağ rüzgarları
- Muson benzeri küçük rüzgarlar
- Fön rüzgarları

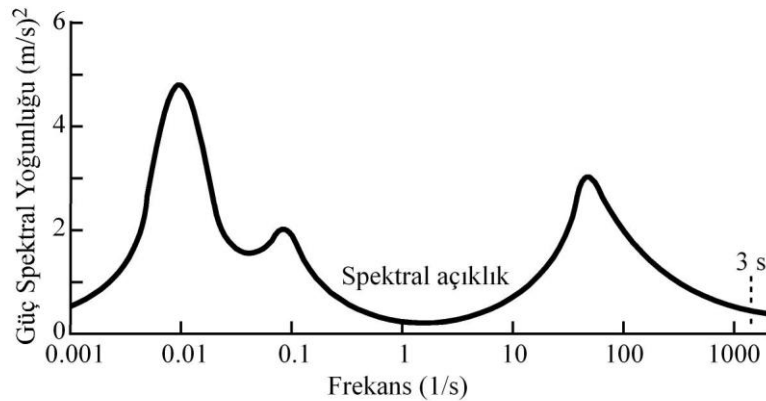
- Bora
- Tornadolar

Vadi ve dağ rüzgarlarının oluşumu Şekil 3.4’de verilmiştir. Gün içinde ısınan hava dağ yamaçları boyunca tırmanarak üzerindeki soğuk havanın yerini alır. Geceleri ise soğuk havanın aşağı doğru hareketi tersine bir rüzgar oluşmasına neden olur. Bu tip rüzgarların ve diğer yerel etkilerin iyi anlaşılması rüzgar enerjisi kurulacak bölgelerin potansiyellerinin araştırılması için çok önemlidir (Manwell vd. 2002).



Şekil 3.4: Dağ ve vadi yamaçlarında yerel meltem oluşumu

Atmosferin hareketi olan rüzgar, birçok farklı yer ve zaman ölçeklerinde oluşur. Şekil 3.5’de Van der Hoven (1957) tarafından yapılan yüzey rüzgar kayıtlarının bir spektral analizini göstermektedir. Güç spektral yoğunluğu $S(n)$, frekans n ile çarpılır. Bu güç spektrumu farklı tipteki atmosferik hareketlerden etkilenen nasıl özel bir yer olduğunu açıklar.



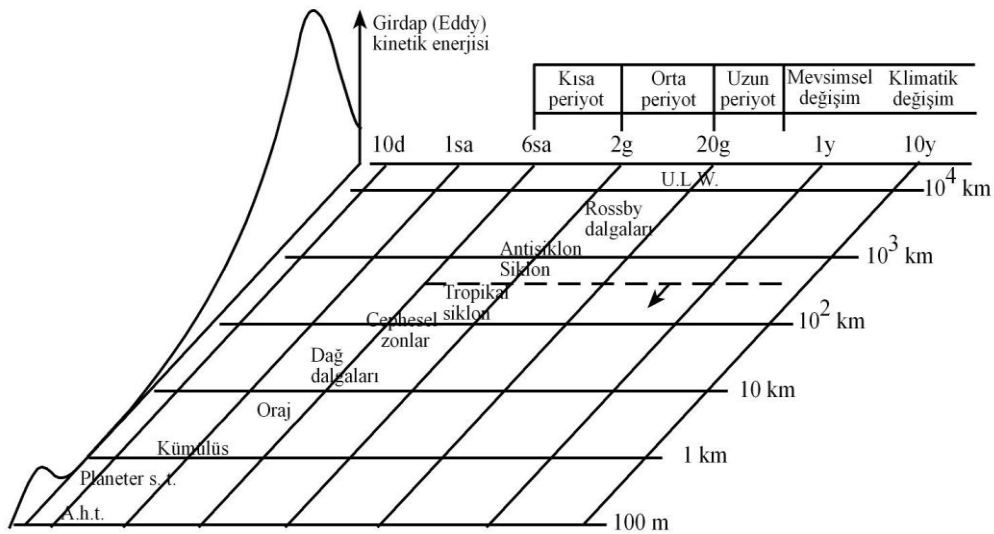
Şekil 3.5: Van der Hoven (1957) tarafından yere yakın rüzgar şiddetinin şematik spektrumu. $S(n)$, güç spektral yoğunluğudur.

Şekil 3.5’de iki geniş ve bir daha küçük pik açıkça görülmektedir. Enerjinin en geniş miktarı yaklaşık 100 saatlik veya kabaca 5 günlük periyot için bulunur. Bu pik yüksek ve alçak sistemler gibi batılı geniş ölçek hareket sistemlerini tanımlamaktadır. 10-15 saatlik periyot ile ikinci pik rüzgar şiddetindeki günlük değişimlere karşı gelmektedir.

2-3 dakika civarındaki maksimum, yüzeye yakın hareketin daima türbülans veya hamle olduğunu gösterir. Şekil 3.5’in diğer özelliği, çok küçük bir enerji ile 0.1 saat ile 3-4 saat periyotları arasında bir ‘spektral aralık’ görülmesidir. Atmosferde bu, bu zaman aralığında görülen sürekli hareket sistemlerinin yokluğuna karşı gelir.

Zaman zaman, gök gürültülü sağnak yağışla birlikte fırtına daha geniş bir zaman aralığında önemli enerji katkısı olan çok nadir olaylardır. Bu aralık mezo ölçek aralık olarak da adlandırılır. (10-100 km)

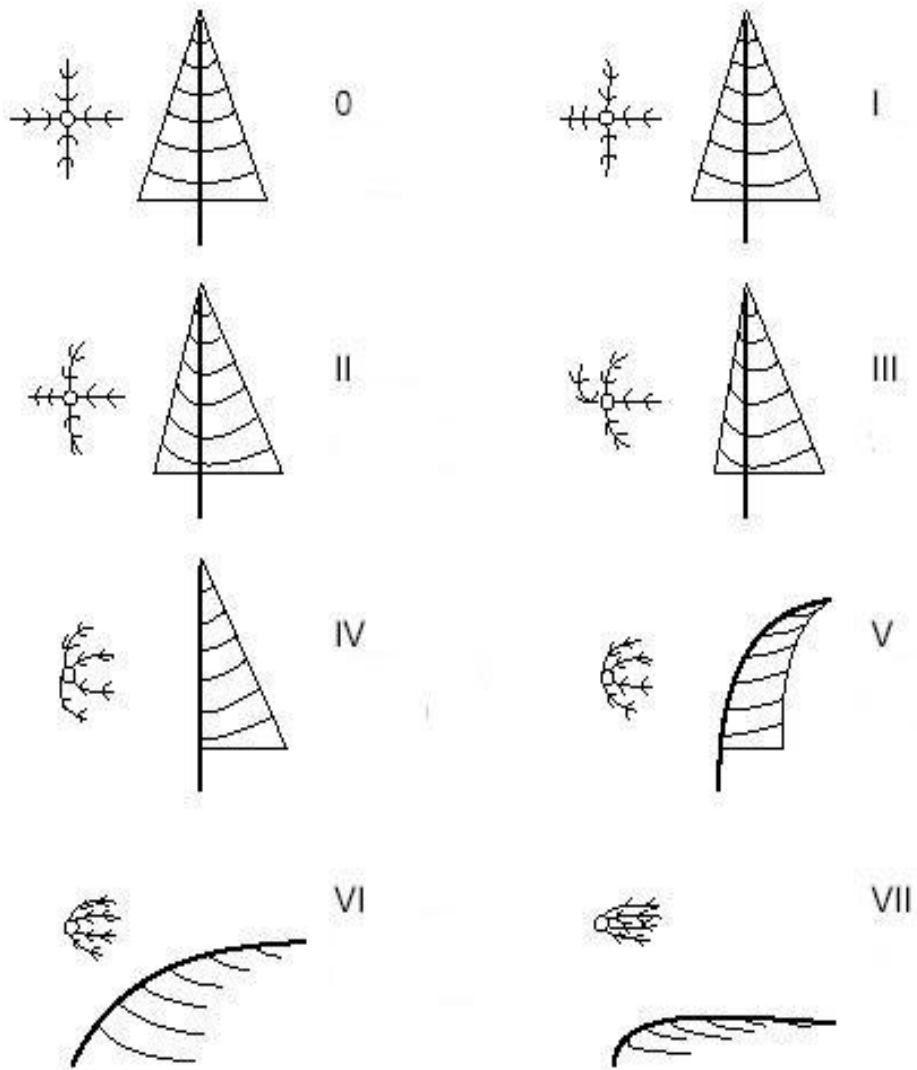
Şekil 3.6’da atmosferik ölçeklerin idealize edilmiş bir resmini göstermektedir. Şekilde uygun yatay ölçekler de gösterilmektedir. Bu ölçekli haritada ekstra-tropikal (tropikler dışı) siklonlar, depresyonlar ve tropikal siklonlar yoluyla Rosby dalgaları olarak da adlandırılan planeter ölçeklerden, meso ölçek kümülonimbus bulutlarına ve küçük ve mikro ölçek konveksiyon hücreleri ve türbülansa kadar hava sistemleri aralığını buluruz. Ana enerji kaynakları, ekstra-tropikal siklonlar ve küçük ölçek hareketin türbülans kararsızlığıdır. Tüm bu ölçekler atmosferik hareket içinde önemlidir. Enerji dönüşümünün farklı türleri tarafından yönlendirilir.



Şekil 3.6: Atmosferik hareketlerin yersel ve zamansal ölçekleri

3.3 Rüzgar Ölçüm Teknikleri:

Bir bölgedeki rüzgar karakteristiğinin belirlenmesi için en kesin yol ölçüm yapılmasıdır. Bir rüzgar türbininden enerji elde etmek sadece istatistiksel olarak onaylanmış ortalama rüzgar hızı, rüzgar hızı dağılımı ve düşey rüzgar profili değerlerinin varlığı ile mümkün olmaktadır. Genel olarak uzun süreli yıllık ortalama rüzgar hızı değerinin güvenilir olması on yıl süreyle ölçüm yapılmasını gerektirir. Sadece birkaç aylık periyotlarda basit ekipmanlarla toplanmış rüzgar verileri yeterli olmamaktadır.



	I	II	III	IV	V	VI	VII
Rüzgar Hızı m/s	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	10

Şekil 3.7: Griggs-Putnam endeksine göre rüzgar hızları

Diğer taraftan rüzgar atlasları tarafından büyük ölçekli alanlar için sağlanan veriler yerel durumların incelenmesi gerekli durumlar için yeterli olamamaktadır, özellikle karmaşık yüzeyli bölgeler için. Dağlık topografyalar ve kısmen kentleşmiş bölgelerde büyük ölçekli verilerden sapmalar olmaktadır. Bu tür belirsizlikler kısa dönemli ölçümlerle giderilebilmektedir. Görece daha kısa süreli periyotlarda rüzgar ölçümlerinin yapılması, örneğin bir yıllık bir periyot için, uzun vadeli ortalama hız değeri bilinen yakın bir bölgenin yıllık ortalaması ile karşılaştırılmasına imkan vermektedir.

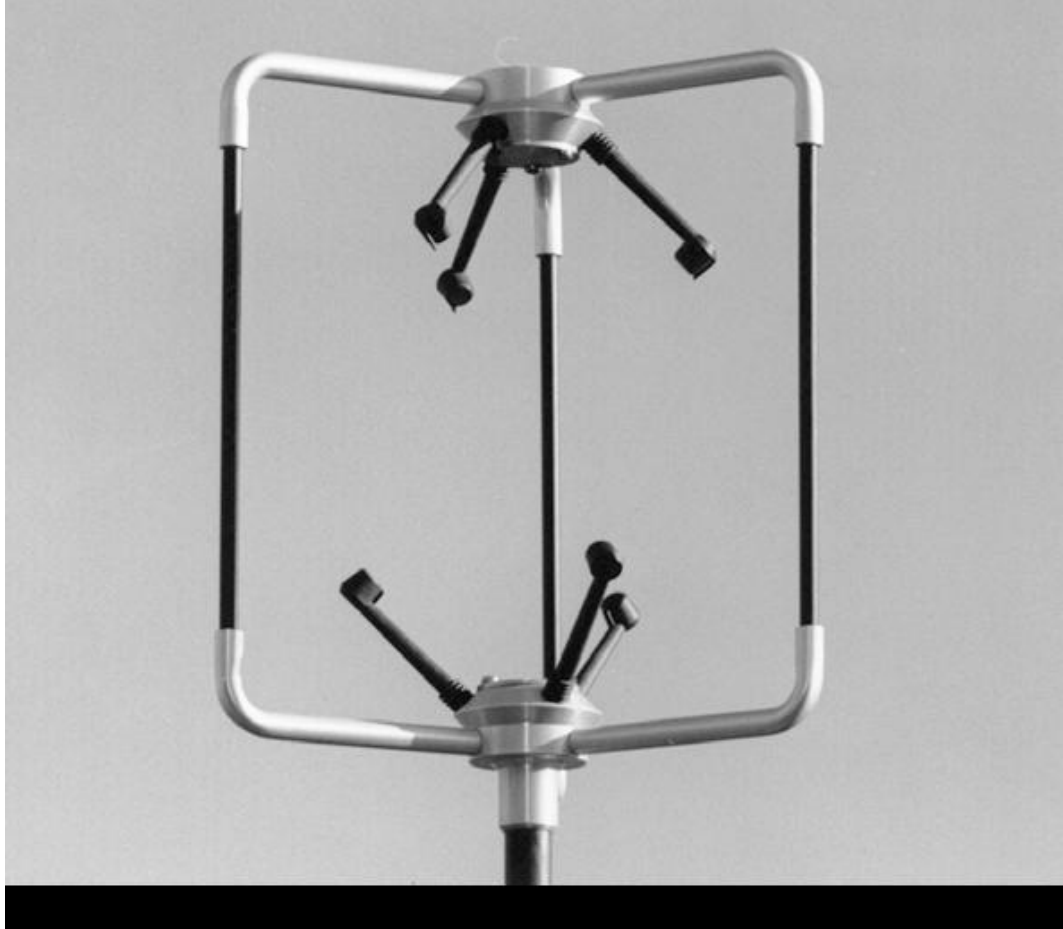
Eğer bir bölgeye birden fazla rüzgar türbini konacaksa hakim rüzgar yönü hatta bölgeye ait rüzgar yönü dağılımı verilerinin olması önemlidir. Ancak bu ölçümlerin yapılması çok zaman harcayan işlemlerdir bu yüzden sıklıkla kalitatif hakim rüzgar yönü bilgilerine başvurulur. Ağaçların ve çalılıkların büyüme şekilleri bunun tayin edilmesinde önemli ve güvenilir yardımcılarıdır. Rüzgarın fiziksel nesnelere üzerinde oluşturduğu etkilere göre hazırlanmış ve arazi incelemesinde kabaca hakim rüzgar yönünü öngörmeye kullanılan bir takım standart çizelgelerden en çok kullanılan Griggs-Putnam endeksidir. Şekil 3.7’de bu endekse göre rüzgar hızları verilmiştir.

Rüzgar türbinlerinin kurulması öncesi gerekli olan rüzgar bilgilerine ek olarak kurulduktan sonraki operasyonel işlemler için de sürekli rüzgar ölçümlerinin yapılması gereklidir. Büyük rüzgar türbinlerinin kendi rüzgar ölçüm sistemleri olmasına karşın, rüzgar hızıyla ilgili ek bilgiler gereklidir. Türbin üreticisi ürettiği enerji ile olası teorik değer arasındaki farkı karşılaştırmak ister. Bu durum türbin rotorundan etkilenmemiş temiz bir rüzgar ölçüm bilgisine olan ihtiyacı doğurur. Bazı durumlarda özellikle büyük rüzgar çiftliklerinde türbinden bağımsız rüzgar ölçümü güç çıkışının yönetimi için kullanılır. Örneğin toplu halde türbinlerin durdurulması ve çalıştırılması işlemleri için bu ölçümler gereklidir.

Rüzgar hızının anlık ölçülmesi için kepçeli anemometrelerin kullanılması oldukça yeterli bir durumdur ancak, burada yapılan ölçümlerin teknik olarak değeri gerçekte yoktur. Kullanılabilir verinin elde edilmesi ancak belirli bir periyotta yapılan ölçüm ortalamaları ve bunların kayıt altına alınması ile mümkündür. Bu ölçümler sabit bir direk üzerindeki ölçülen verinin kaydını da yapabilen ölçüm sistemleri ile yapılır. Rüzgar ölçüm sisteminin sensörleri genellikle bir adet anemometre bir adet de rüzgar okundan oluşur. (Şekil 3.8). Ayrıca hiç hareket eden parçası olmayan ultrasonik sensörler de mevcuttur. (Şekil 3.9).



Şekil 3.8: Rüzgar türbini üzerindeki ölçüm sistemi



Şekil 3.9: Ultrasonik sensör

Anemometrelerin rüzgar ölçümlerini kesin kayıtlarla yapabilmeleri kalibrasyonlarının iyi yapılmasıyla ilgilidir. Bu yüzden düzenli olarak kontrol edilmeli ve belirli aralıklarla kalibrasyonları yapılmalıdır. Günümüzde anemometre kalibrasyonlarını yapan bağımsız kuruluşlar vardır. Ayrıca çalışanlardan birinin bu sensörlerle yakından ilgilenmesi ve özen göstermesi tavsiye edilir.

Sensörler bir kulenin veya direğin tepesindeki bir kola monte edilir. Direk yüksekliği gereksinimlere göre belirlenir. Eğer rüzgar atlaslarındaki değerler ile bir karşılaştırma yapmak isteniyorsa 10 metre yükseklikteki standart direkler yeterli olmaktadır. Büyük rüzgar türbinlerinde hub yüksekliğindeki rüzgar hızı önemlidir. Eğer rüzgar hızı ve yönünde ani değişimler söz konusu ise rotor yüksekliğinde bir ölçüm direğinin kurulması bir zorunluluk haline gelir. Ancak 50 metre ve daha yüksek ölçüm kuleleri gerekli olduğunda maliyet artar ve inşa edilmesi için izin gerekebilir.

Geçmiş yıllarda rüzgar hızını ve yönünü kağıtlar üzerine yazan veya çizen anemograflar kullanılırdı. Günümüzde ise elektronik kaydediciler sayesinde sabit disklerle kayıt yapılır. Böylece bilgisayarlar sayesinde istenilen veriye anında ulaşım sağlanır.

Şimdiki yıllarda, rüzgar sınıflayıcı da denilen veri toplama cihazları özellikle rüzgar türbinleri için üretilmektedir. Bu cihazlar rüzgar hızlarının sürekliliğini belirli aralıklar içinde sayarlar ve böylece rüzgar hızı frekans dağılımı bilgilerine doğrudan erişim sağlanmış olur. Dahası, geçmiş aylara ait anlık veya ortalama rüzgar hızı verilerine ulaşmak mümkündür.

Rüzgar hızı dağılımının kaydedilmesi ve yakın bölgeler için hazırlanmış uzun periyotlu rüzgar ölçüm atlasları ile birleştirilmesi rüzgar türbinlerinin ne kadar enerji üreteceğinin belirlenmesinde güvenli bir kaynak oluşturmaktadır.

Rüzgar hızı SI birim sistemine göre m/s cinsinden ifade edilir. Buna rağmen rüzgar gücünün sınıflandırılmasında “Beaufort” skalasının kullanıldığı pek çok yer vardır. Çizelge 3.1’de m/s cinsinden rüzgar hızlarının “Beaufort” skalasında karşılıkları verilmektedir (Johnson 2001).

Çizelge 3.1: Beaufort skalasına göre rüzgar güçleri

Rüzgar Hızı Aralığı (m/s)		Beaufort Skalasına Göre Rüzgar Gücü
0.0	0.2	0
0.3	1.5	1
1.6	3.3	2
3.4	5.4	3
5.5	7.9	4
8.0	10.7	5
10.8	13.8	6
13.9	17.1	7
17.2	20.7	8
20.8	24.4	9
24.5	28.4	10
28.5	32.6	11
32.7	56.0	12-17

3.4 Rüzgar Karakteristikleri ve Rüzgar Enerji Potansiyeli

3.4.1 Rüzgar Karakteristikleri

Rüzgarlar genel (planeter) ve lokal olarak iki sınıfa ayrılır. Planeter rüzgarlar daha üst atmosfer seviyelerinde, lokal rüzgarlar ise yer yüzeyine yakın olan rüzgarlardır.

Diğer enerji kaynakları ile (hidro-elektrik, kömür veya gaz gibi) karşılaştırıldıklarında rüzgar yersel ve zamansal değişim gösteren bir enerji kaynağıdır. Yersel değişimler lokal coğrafi şartlara bağlıdır. Verilen herhangi bir yerde rüzgarın zaman içindeki değişimi dört sınıfa ayrılır. Yıllar arası, yıllık, günlük ve kısa periyotlu.

3.4.1.1 Yıllar Arası Rüzgar Değişimi

Hava veya iklim parametrelerinin uzun dönem tespiti için yaklaşık 30 yıllık bir data kabul edilmektedir. Bir istasyon için kabul edilebilir yıllık ortalama rüzgar şiddeti değerini dikkate almak için yaklaşık 5 yıllık bir veri gerekir. Ortalama değerler üzerinde yıl sayısı kadar bir bölgede istasyon sayısı da önem taşır. Birbirine yakın istasyonlar arasında da büyük farklar mevcut olabilir.

Bir türbinden üretilen güç, rüzgar hızının küpü ile orantılı olduğundan yıllık ortalama güç çıktısı veya yıllık enerji çıktısı (kWs/yıl) rüzgar şiddetine göre yıldan yıla daha büyük bir değişim gösterir. Örneğin rüzgar şiddetindeki % 15 lik bir değişim durumunda, 100,000 kWs/yıl üretmesi beklenen bir türbin 61,000 ile 150,000 kWs/yıl arasında üretebilir.

3.4.1.2 Yıllık Rüzgar Şiddeti Değişimi

Bir bölgede türbin kurmak veya bölgeler arasında en uygun alanı seçmek için yıllık ortalama rüzgar şiddeti en önemli faktörlerden biridir. Yıllık ortalama rüzgar şiddeti 10m'de 1-2 m/s gibi küçük bir değer olabildiği gibi yüksek bir değer de olabilir. Rüzgar enerjisi açısından 5m/s'lik bir değer bir türbin için kabul edilebilir bir değerdir. Ancak en elverişli bölgeler 6m/s'nin üzerindeki bölgelerdir. Yıllık rüzgar şiddet değişimi analiz için önemli bir faktördür. Rüzgar şiddeti mevsimsel veya aylık olarak da analiz edilebilir.

3.4.1.3 Günlük Rüzgar Şiddeti Değişimi

Yer yüzeyinin farklı ısınması nedeniyle günlük rüzgar şiddeti değişimi meydana gelir. Gece yarısından güneş doğuşuna kadar olan saatler boyunca rüzgar şiddeti en düşük değerinde iken, gün boyunca rüzgar artış gösterir (Özellikle yazın karasal bölgelerde). Bu günlük değişim, yer yüzeyinin üzerindeki daha yüksek seviyelerde farklı olabilir.

Rüzgarın gün içindeki davranışındaki yıldan yıla olan farklar özellikle başlıca rüzgarlı bölgelerde önemli olabilir. (Şekil 2.10)

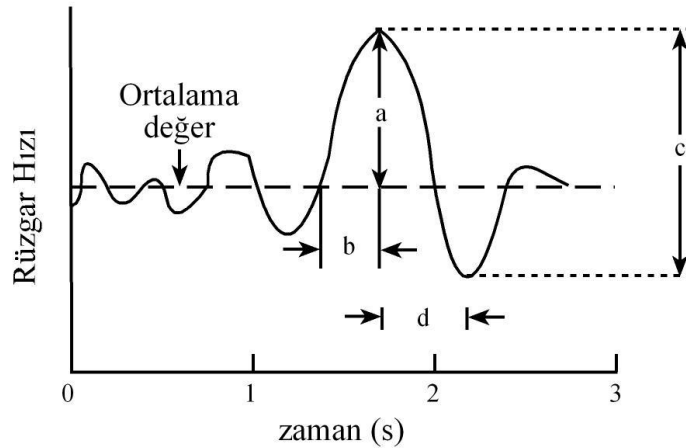
Her ne kadar gündün geceye günlük çevrimin temel özellikleri tek bir yıllık data ile tanımlanabilir de, günlük salınımların genliği ve gün içinde maksimum rüzgarın olduğu zaman gibi daha detaylı karakteristikler belirlenemeyebilir.

Rüzgar şiddetinin mevsimsel ve günlük değişimleri ve rüzgar gücü, rüzgar türbininin kurulmasına karar vermeden önce dikkatle analiz edilmelidir (Burton vd. 2001).

3.4.1.4 Kısa Süreli Rüzgar Şiddeti Değişimleri

Rüzgar şiddeti değişiminde genellikle iki aralık vardır. 10 dakika ve 3 saniye. İlki 1 s civarındaki bir örnekleme oranı kullanılarak tahmin edilir ve 10 dakikalık aralık için ortalaması alınır. 10 dakikalık aralık ortalaması, enerji çıktısı vasıtası ile rüzgar türbininin performansını tahmin etmek için kullanılır. Diğer taraftan 3 saniyelik bir aralıktaki kısa süreli rüzgar şiddeti değişimleri pik hamle (gust) ve türbülans datasını verir. Rüzgardaki türbülans, rüzgar türbinlerinin özellikle kanatlardaki yorulma süresini tahmin etmek için kullanılır.

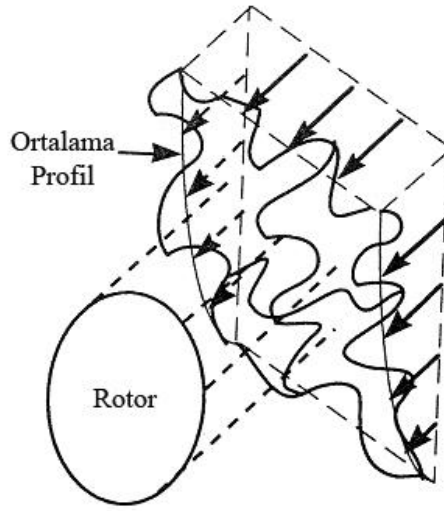
Gust türbülans içinde süreksiz bir olaydır. Bir gust'un dört karakteristiği vardır. Genliği, devam süresi, maksimum gust değişimi ve değişim süresi genellikle gust yapısı olarak adlandırılır (Şekil 3.10). Gust yapısı bir rüzgar türbininin davranışını etkiler. Örneğin bir gust genliğinden bir rüzgar türbini için ihtiyaç duyulan yapısal gerilmeler tahmin edilebilir. Bir ekstrem gust olayı türbinin kanat gibi bir elemanın veya tüm yapının dayanıklılığını belirler. Sisteme giriş bu nedenle süreklilikten çok ayrıktır. Ekstrem yüklemeler, bir türbin elemanının muhtemel bir kullanılabilir yaşam süresini sağlayan şiddetli gust değerine duyarlılığını belirleyerek, analiz edilir.



Şekil 3.10: Ayrık bir gust olayının gösterimi, Burada a, b, c, d; sırasıyla: genlik, devam süresi, maksimum değişim ve lapse-rate (değişim oranı)'dır

Rüzgar türbülans davranışı nedeniyle, rüzgar türbininin yükleri doğada stokastiktir. Bu yükler spektral güç yoğunluk fonksiyonu gibi istatistiksel metodlar kullanılarak tespit edilebilir. Türbülans ifadesi yatay ortalama rüzgar şiddeti değişimlerini ifade eder.

Dönen bir rotor farklı boyuttaki girdapları algılar (Şekil 3.11). Şekil ayrıca bir yaklaşım olarak kompleks bir rüzgar alanı için, ortalama düşey rüzgar profilini (logaritmik) gösterir. Dönen rotor rüzgar kayması nedeniyle sinüzoidal bir yüklemeye oluşturacaktır. Rüzgar türbin dizaynı için logaritmik rüzgar profili kullanılır. Bir rotorun rüzgar alanının ölçümü, rotor alanının çeşitli noktalarında rüzgarın farklı hızlarda olması nedeniyle kolay olmamaktadır. Rotor, çevresindeki tüm akış alanını değiştirerek, hızı azaltır. Problem, iki noktada rüzgar alanı (yersel türbülans) analiz edilerek çözülebilir (Burton vd. 2001).



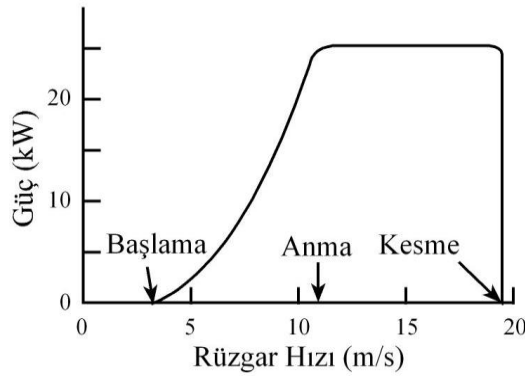
Şekil 3.11: Rotor disk alanı üzerinde üniform olmayan rüzgar akışı

3.4.2 Rüzgar Şiddeti Değişiminin Modellenmesi

Yıllık ortalama rüzgar şiddeti birim alandaki rüzgar enerjisi (kWs/m^2) veya rüzgar güç potansiyelini (W/m^2) tahmin etmek için kullanılabilir. Türbin yer seçimi için bir öngörü imkanı sunsa da, yıllık değişimlerini yansıtmaz. Aynı yıllık ortalama rüzgar enerjisine sahip iki farklı türbin alanı farklı enerji potansiyeline sahip olabilir. Bu nedenle rüzgar enerji potansiyeli hesaplamalarında saatlik ortalama rüzgar şiddeti değerleri kullanılır. Hesaplamalarda mevsimsel değişimleri gösterebilmesi için en az iki yıllık rüzgar şiddeti değerleri kullanmak önemlidir. Rüzgar şiddeti değişkenliğinin tam olarak belirlenmesi için beş yıllık verinin değerlendirilmesi tercih edilmelidir.

Rüzgar şiddeti frekans eğrisi o bölgede kullanılacak olan bir rüzgar türbininin çalışma karakteristiklerinin belirlenmesi açısından da büyük önem taşır. Bir rüzgar

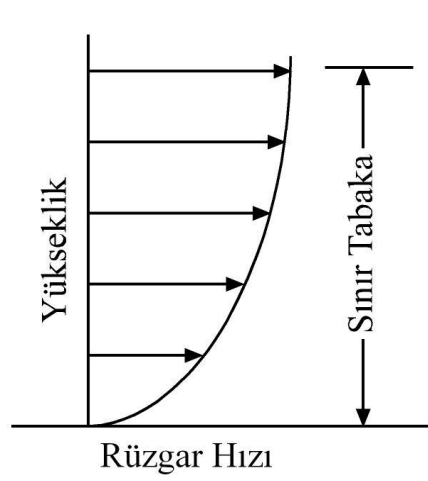
türbininin karakteristik güç eğrisi, türbinin üretime başladığı rüzgar şiddet değeri (cut in), maksimum gücün elde edildiği değeri, anma değeri (rated wind speed), türbinin devreden çıktığı değeri, kesme değeri (cut out) kapsar (Şekil 3.12). Türbinin çalışmaya başladığı hız ile maksimum güç elde ettiği hız arasında güç eğrisi sürekli artış gösterir. Bu değerin üzerinde ise pitch (hatve) kontrol mekanizması ile türbin maksimum güç üretmeye devam eder. Kullanılan türbin için kesme rüzgar şiddeti değerinde ise türbin üretimi durdurur.



Şekil 3.12:Bir rüzgar türbininin çalışma karakteristikleri

3.4.3 Düşey Rüzgar Profili

Yer yüzeyi yakınında rüzgar yüzey sürtünmesi nedeniyle yavaşlar, yüzeyin üzerinde ise yükseklikle artış gösterir. Rüzgarın yükseklikle bu değişimi düşey rüzgar profili olarak adlandırılır. Bu aynı zamanda rüzgarın düşey kaymasının ifadesidir. Bir türbinin hub (göbek) yüksekliğinin bu nedenle küçük çaplı bir rotor için bile 10 m'nin üzerinde olması gerekir. Rüzgardaki bu düşey kayma nedeni ile dönen bir kanat üzerinde salınımlı bir yük oluşacaktır. (Şekil 3.13)



Şekil 3.13: Düşey rüzgar profili

3.4.4 Rüzgar Yönünün Değişimi

Rüzgar yönü Atmosferin genel sirkülasyonuna bağlı olarak mevsimsel ve lokal etkiler nedeniyle de günlük ve kısa süreli değişim gösterir. Mevsimsel olarak yön değişimleri özellikle sürekli akım bölgelerinde (ticaret rüzgarları) oldukça küçüktür. Orta enlem dereceleri gibi geçiş bölgelerinde ise değişim büyüktür. Ancak bir türbinin çalışması ve performansı üzerinde günlük ve kısa süreli değişimler daha önemli etkiye sahiptir.

Rüzgar yön değişimleri ve hâkim rüzgar yönü, rüzgar gülü diyagramları ile veya rüzgar yönünün frekans (%) ortamında grafiksel gösterimi ile belirlenir.

Rüzgar yönündeki değişimlerin frekansı ve büyüklüğü, özellikle yatay eksenli türbinlerin farklı bileşenleri üzerinde dayanıklılık testleri ve oluşan gerilmeler açısından hayati önem taşır. Bir türbinden maksimum güç elde etmek ve gerilme etkisini minimize etmek için yön değişiminin davranışı ve persistans bilgisi gereklidir. Genelde bir rüzgar türbini, 30-60 saniyelik bir aralıkta rüzgar yönündeki her 5-10 derecelik değişim durumunda rüzgara doğru yönelerek uyum sağlar (Burton vd. 2001).

3.4.5 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Rüzgar hareket halindeki bir hava akımı olduğu için kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik enerji eşitliği,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.8)$$

ile verilmektedir. Burada m hareket halindeki cismin kütlesi, v de hızıdır. Özgül kütle ρ ile gösterilmek üzere eşitlikteki m kütlesi yerine

$$m = \rho V \quad (3.9)$$

yazılır. Burada V hacmi göstermektedir. Rüzgarın düşey bileşeni yatay bileşenin yanında ihmal edilir ve rüzgar esme yönüne göre dik alanı A ile, rüzgar yönündeki uzunluk da L ile gösterilirse hacim,

$$V = AL \quad (3.10)$$

ile ifade edilir. v rüzgar hızında ve t süresinde katedilecek mesafe ise,

$$L = vt \quad (3.11)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadeleri eşitlik-3.8'de yerine koyup düzenlersek

$$E = \frac{1}{2}\rho A t v^3 \quad (3.12)$$

ifadesi elde edilir. Burada $t = 1$ ve $A = 1$ alınırsa birim zamanda birim alandaki enerji elde edilir

$$E_B = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (3.13)$$

Eşitlikte kullanılan ρ , deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında havanın yoğunluğu olup $\rho = 1.223 \text{ kg / m}^3$, V ise 10 m yükseklikte ölçülen yatay rüzgar hızıdır.

Rüzgar enerjisi analizinde kullanılan büyüklük ve birimler:

$$\rho = 1.223 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$v : \text{[m/s]}$$

$$E = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (3.14)$$

$[\text{W}] = [\text{kgm}^2/\text{s}^3]$ olduğundan

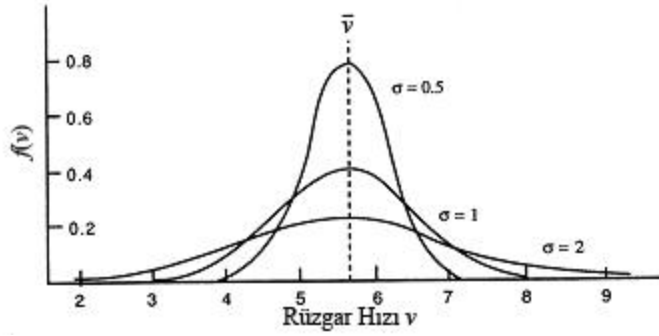
$E : [\text{W/m}^2]$ olarak ifade edilmektedir (Burton vd. 2001).

3.5 Olasılık Dağılım Fonksiyonları (Weibull ve Rayleigh Dağılımları)

Pratikte uygulamalarda karşılaşılan rastgele değişkenlerin büyük çoğunluğu normal dağılıma (Gauss Dağılımı) uyar. Bu dağılımın ortalama yoğunluk fonksiyonu,

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (3.15)$$

Kısaca $N(\mu, \sigma^2)$ şeklinde gösterilen bu dağılımın iki parametresinden μ_x , rastgele değişkenin ortalaması, σ_x standart sapmasıdır. Normal dağılım simetrik olduğundan çarpıklık katsayısı sıfırdır ($c_3=0$). Kurtosis katsayısı ise 3'e eşittir ($k = 3$). (Şekil 3.14)'de μ_x sabit kalırken, σ_x 'in üç farklı değeri için dağılım fonksiyonu verilmektedir.



Şekil 3.14: Normal dağılım fonksiyonu ($\sigma=0.5, 1.0, ve 2.0$ için)

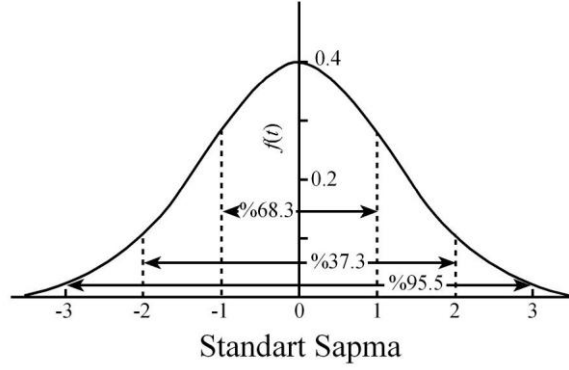
Normal dağılımın $F(x)$ eklenik dağılım fonksiyonunun ifadesi analitik olarak elde edilemez, ancak sayısal integrasyon yoluyla hesaplanarak tablo haline getirilmiştir. Tek bir tablo hazırlayabilmek için önce rastgele değişken aşağıdaki dönüşümle standart değişken haline getirilir.

$$Z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad x_{boyutlu} \rightarrow Z_{boyutsuz} \quad (3.16)$$

Standart değişken boyutsuz olup ortalaması 0, standart sapması 1'e eşittir. Z 'nin $N(0, 1)$ dağılımının, eklenik dağılım fonksiyonu tablo halinde verilmektedir.

Normal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf), μ_x ortalaması çevresinde simetrik bir çan eğrisi şeklindedir. Simetrik dağılım olduğu için modu ve medyanı μ_x 'e eşittir.

Rastgele değişkenin ortalamasının iki tarafında birer, ikişer ve üçer standart sapma genişlikteki aralıkların içinde kalması olasılıkları sırasıyla 0.68, 0.955 ve 0.9975 (~1)'dir. (Şekil 3.15)

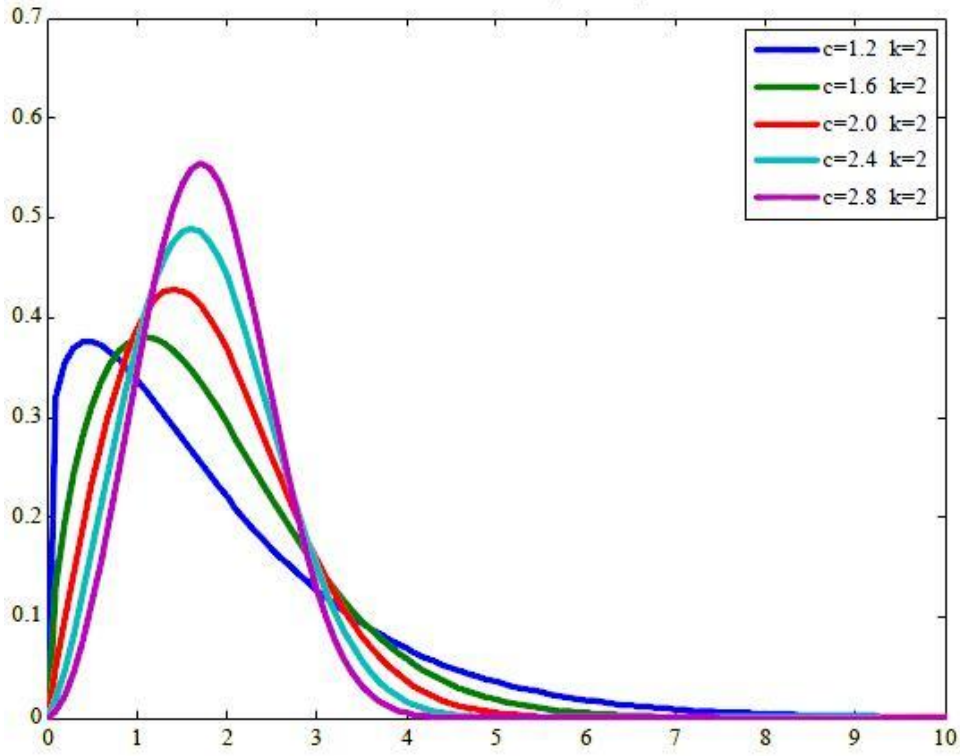


Şekil 3.15: Normal dağılım fonksiyonunun standardize edilmiş şekli

Örnekten hesaplanacak \bar{x} ve σ_x değerleri dağılımın parametrelerinin tahminleri olarak kullanılır.

Normal dağılıma ait olasılık kağıdı kolaylık sağlar. Bu kağıdın ordinat eksenini o şekilde ölçeklendirilmiştir ki normal dağılımın eklenik dağılım fonksiyonu (edf) bu kağıdın üzerinde doğru çizgi şeklinde görülür. Dağılım simetrik olduğu için $F(0.50)$ 'ye karşılık gelen $X_{0.50}$ medyan değeri ortalamayı verir. Standart sapma ise Şekil 3.15'de gösterildiği gibi $\sigma_x = x_{0.84} - \mu_x = \mu_x - x_{0.16}$ şeklinde hesaplanabilir. Çünkü rastgele değişkenin ortalamasının çevresinde iki yana doğru birer standart sapma genişlikte bir aralıkta kalma olasılığı 0.68'dir.

Rüzgar hızının dağılımının belirlenmesinde kullanılan pek çok dağılım vardır. İki parametrelili Weibull ve Weibull'un şekil parametresinin 2 olduğu durum olan Rayleigh dağılımları en yaygın kullanılan dağılımlardır. Rayleigh dağılımı tek parametrelili olduğu için Weibull'a göre daha az esnektir; ancak parametrelerinin hesaplanması daha kolaydır. Ayrıca, yıllık ortalama rüzgar hızının 4.5 den büyük olduğu durumda, rüzgar hızı dağılımının Rayleigh dağılımına yaklaştığı bilinmektedir. Şekil 3.16'te Rayleigh dağılımı gözükmektedir.



Şekil 3.16: Rayleigh dağılımı

Rüzgar hızı için iki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel ifadesi;

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.17)$$

şeklindedir. Weibull dağılımının ölçek parametresi olan c , aynı zamanda rüzgar verilerinde referans bir değere sahiptir. k şekil parametresinin genellikle 1.5 ile 3 değerleri arasında olması beklenmektedir.

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu;

$$F_w(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.18)$$

şeklindedir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir v değerinden küçük ya da eşit gerçekleşme olasılığını verir.

Rayleigh yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki ifade ile verilebilir:

$$f_R(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (3.19)$$

Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu

$$F_R(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (3.20)$$

şeklindedir. Rayleigh dağılımının en büyük avantajı sadece ortalama rüzgar hızı ile dağılımın belirlenmesidir. Rayleigh dağılımının rüzgar çalışmalarında geçerliliği pek çok referansta gösterilmiştir.

Ortalama rüzgar hızı ve rüzgar hızının standart sapması, sırasıyla (3.19) ve (3.20) eşitliklerinden hesaplanır.

$$v_m = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.21)$$

$$\sigma = \sqrt{c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]} \quad (3.22)$$

Weibull dağılımına dayanarak, en büyük sıklığa sahip rüzgar hızı (3.21) eşitliğinden hesaplanır.

$$v_{\text{mod}} = c\left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad (3.23)$$

Maksimum rüzgar hızı şu ifadeyle bulunabilir;

$$v_{\text{max } E} = c\left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (3.24)$$

Yukarıda ifade edilen formüllerde $k=2$ alındığında Rayleigh dağılımı için hesaplamalar gerçekleşir (Kurban vd.. 2005).

3.6 Rüzgar Karakteri Üzerinde Arazinin Etkisi

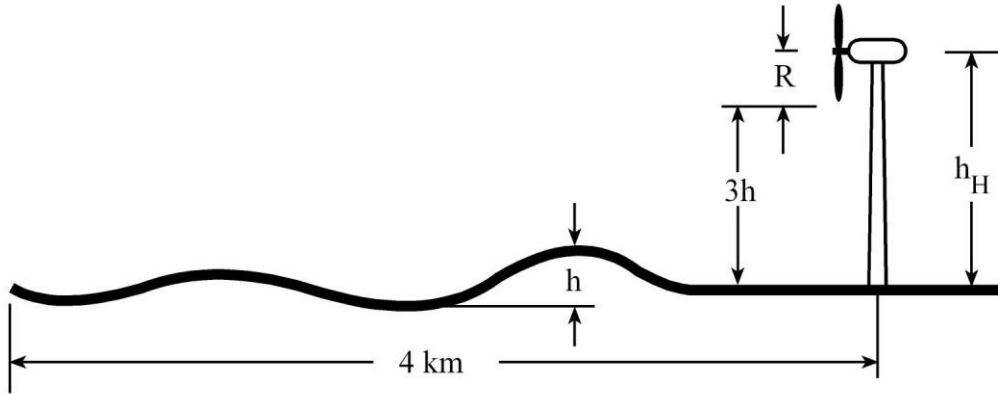
Düz bir arazi üzerinde rüzgar yükseklikle değişim gösterir. Yer yüzeyinin engebeli ve pürüzlü yapısı rüzgarın yatay olarak da değişimine neden olur. Uygun bir arazi modeli seçildiği takdirde türbinden elde edilecek enerji üzerinde arazinin olumlu yönde bir katkısı olur.

Küçük ormanlık alanlar, küçük rüzgar kırıcıları gibi küçük düzensizliklerin olması durumunda arazi düz kabul edilebilir. Oysa tepeler, kanyonlar, vadiler, sırtlar gibi alanlar düz olmayan arazi yapılarıdır. Aşağıda belirtilen şartlarda arazi düz kabul edilebilir.

Türbin alanında 11.5 km çaplı bir daire içinde türbin alanı ile çevresi arasında yükseklik farkı 60 m'den daha küçük olması durumunda,

- Türbin alanı içinde rüzgar üstü tarafında 4 km, rüzgar altı tarafında ise 0.8 km mesafede yüksekliğin genişliğe oranının 1/50'den büyük ($h/L > 1/50$ ($\approx 2\%$)) bir tepenin olmadığı arazi yapısı durumunda,
- 4 km mesafedeki yukarı akım bölgesi içinde rotorun en alt seviyesi ile yüzeyin en alt seviyesi arasındaki fark, maksimum yükseklik farkının üç katından büyük olmalıdır ($h_H - R > 3h$, Burada h_H : hub yüksekliği, h : tepe yüksekliği, R : rotor yarıçapı). (Şekil 3.17)

Yukarıdaki tanımlama yer yüzeyi üzerindeki düz bir arazinin genel değişim özelliklerini tanımlamaktadır.



Şekil 3.17: Düz arazi koşulu (c) gösterimi

Düzgün olmayan arazi özelliklerinde çok büyük değişim vardır. Ayrık yükseklik veya çukur bölgeler ve dağlık arazi yapısı şeklinde alt sınıflandırmalar yapılmaktadır. Dağlık bölgedeki akış şartları komplekstir. Dağlık bölgedeki akışı incelemek üzere arazi atmosferik sınır tabaka (AST) yüksekliğine göre küçük ve geniş ölçekli arazi olarak bölünebilir. Örneğin bir yüksek tepe AST'nin %10'u gibi küçük bir oranını oluşturuyor ise, küçük ölçek arazi özelliklerine sahip olduğu söylenebilir. Böylece geniş ölçek özellikler sınır tabakanın %10'undan daha fazla bir oranını oluşturur. Bazı durumlarda da AST'yi geçebilir (~ 1-3 km) (Burton vd. 2001)

4. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinlerinin tasarımları ele alındığında pek çok tasarım olduğundan genellikle rotor tiplerine göre sınıflandırılır. Aslında türbin rotoru ele alınacak tek kısım değildir. Dişli kutusu, jeneratör, kontrol sistemleri gibi elektromekanik bileşenler de üretilen elektriğin sürekliliği ve kalitesi açısından önemlidir. Rüzgar enerjisi dönüştürücüleri ilk olarak aerodinamik fonksiyonları ikinci olarak da konstrüksiyonlara bağlı olarak sınıflandırılabilir. Rotorun aerodinamik işlevi, hava akımının rotor yüzeyleri üzerindeki aerodinamik sürüklenmeden kaynaklı enerji üretmesi veya uygun formdaki yüzeyin akışa karşı aerodinamik kaldırma ile enerji üretmesine göre karakterize edilir. Şimdiye kadar değişik nitelikte ve tipte türbinler geliştirilmiş olup bunların bir kısmı günümüzde ticari hale gelmiştir. Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine göre yatay ve düşey eksenli türbinler olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

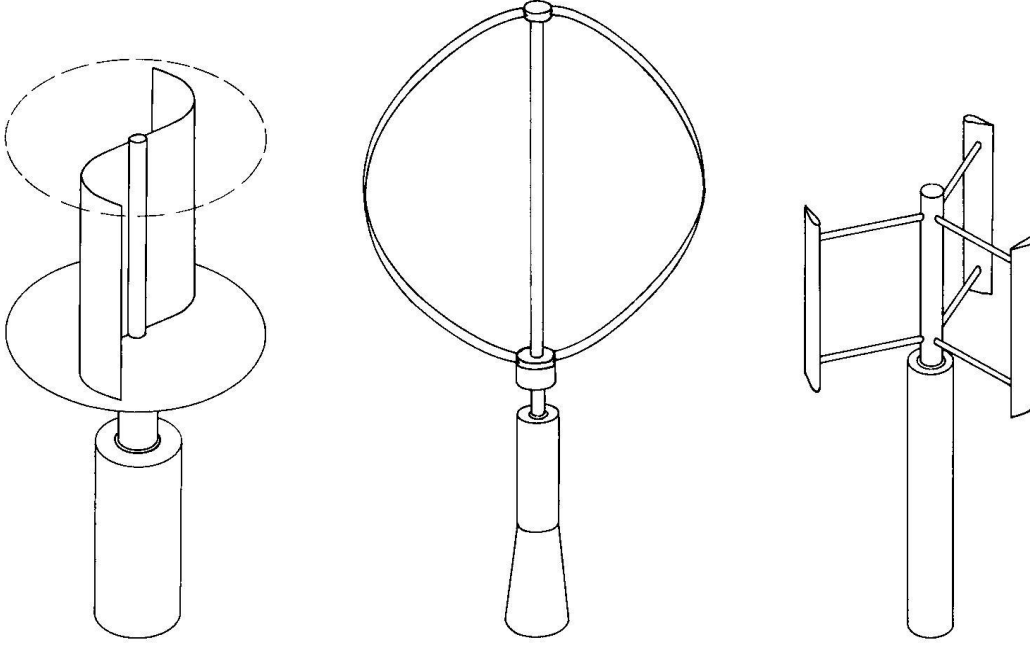
4.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Rüzgar rotorlarının ilk tasarımları düşey eksenle dönecek şekilde yapılmıştır ancak düşey eksenli bu rotorlar sadece sürüklenme tipi rotordur. Savonius tipi rotolar demiryolu taşımalarında havalandırma amaçlı kullanılmaktaydı. Ayrıca kepeçli anemometreler de rüzgar hızının ölçülmesinde kullanılan düşey eksenli rotordur. Ardından 1925 yılında Fransız mühendis Darrieus tarafından aerodinamik kaldırma etkisinin de etkili şekilde kullanıldığı düşey eksenli rotor geliştirildi. Darrieus tipi rotolarda kanatların tasarımları karmaşık ve üretimleri zordur. Yatay eksenli türbinlerde olduğu gibi Darrieus tipi rotolarda da üç adet kanat bulunur.

Düşey eksenli türbin tiplerinin en büyük avantajı temelde basit olan tasarımlarının elektromekanik sistemler, dişli kutusu, jeneratör gibi türbin bileşenlerinin zeminde olması ve türbinin rüzgar yönüne dönmesine gerek kalmamasıdır.

Darrieus tipi rotoların bir başka türü de H-tipi rotolardır. Kıvrımlı kanat profilleri yerine düz kanatlar kullanılır. Bu tasarımın ticari olarak geliştirilmesi için Almanya, Amerika ve İngiltere’de oldukça çalışma yapılmıştır. Ancak günümüzde bile H-tipi

rotorların maliyetleri yüksek olduğundan yatay eksenli türbinlerle rekabet edecek güçleri yoktur. Şekil 4.1’de düşey eksenli rotora örnekler verilmiştir.



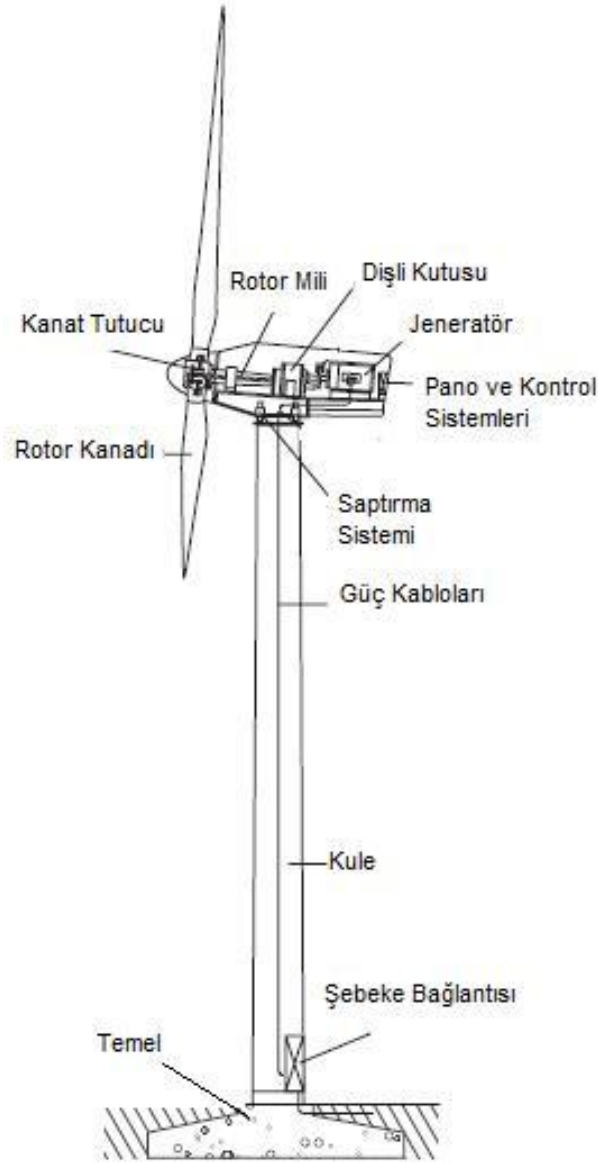
Şekil 4.1: Savonius, Darrieus ve H-tipi düşey eksenli rotor tipleri

Savonius tipi rotorlar genellikle küçük, basit rüzgar rotorları olmakla birlikte su pompaların çalıştırılmasında kullanılmaktadır. Kanat ucu hızı ve güç katsayısı görece daha düşük olduğundan elektrik üretimi için uygun değildir. Geliştirilmiş aerodinamik tasarımlarla birlikte, Savonius rotorlarının aerodinamik kaldırma özelliğini kullanması sağlanmış ve maksimum güç katsayısı değeri artırılmıştır. Bu üç düşey eksenli rotorun dışında çeşitli geometrilere birçok düşey eksenli tasarımlar önerilmiştir. Tasarımcılara göre basit ve ucuz olan bu tip rotorlar çok düşük güç katsayılarına sahip olduklarından fazla tercih edilmemektedir. Tüm bunların göz önüne alındığında özellikle Darrieus tipi düşey eksenli rotorların gelişimlerini henüz tamamlamadıkları ve uzun dönemde düşey eksenli rotor tiplerine rakip olabilecekleri unutulmamalıdır.

4.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenle dönerek enerji üreten rüzgar dönüştürücüleri temel olarak pervanelerden esinlenilerek yapılmıştır. Avrupa’daki yel değirmenleri, Amerikan rüzgar türbinleri ve günümüzde kullanılan modern rüzgar türbinlerini içeren bu

tasarım günümüz rüzgar enerjisi teknolojisinde çok baskın bir yere sahiptir. Şekil 4.2’de modern bir yatay eksenli rüzgar türbininin şematik görüntüsü vardır.



Şekil 4.2: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

Yatay eksenli bu türbinlerin karşı gelinemez üstünlüklerinin birkaç sebebi şu şekilde özetlenebilir;

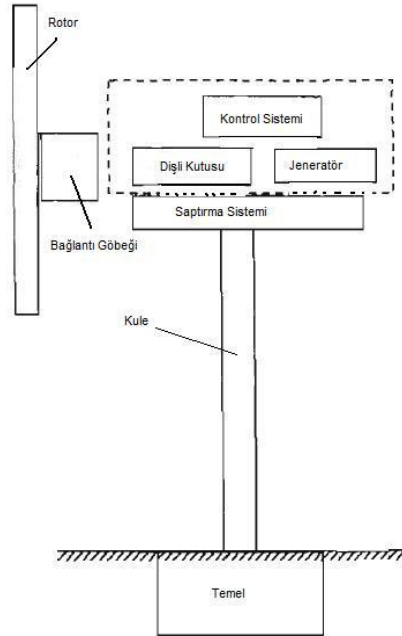
- Pervaneli tasarımlarda rotor hızı ve çıkış gücü rotor kanatlarının açılarının değiştirilmesi ile kontrol edilebilir. Dahası, rotor kanatlarının açılarının değişmesi rüzgar hızının çok artması gibi olağan dışı durumlarda büyük ölçekli türbinler için önemli bir güvenlik unsuru olmaktadır.

- Rotor kanatlarının şekli aerodinamik olarak optimize edilebildiğinden, aerodinamik kaldırma kuvvetinden maksimum verimde yararlanılabilir.
- Özellikle pervane tasarımlarındaki gelişmelerin teknolojik olarak çok ileride olması çok belirleyici bir etkidir.

Tüm bu avantajlar düşünüldüğünde günümüzde elektrik üretme amacıyla kullanılan türbinlerin neden yatay eksenli türbinler olduğu kolaylıkla anlaşılmaktadır (Hau 2006).

4.3. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Bileşenleri

Günümüzde en çok kullanılan rüzgar türbinlerinin yatay eksenli ve üç kanatlı rüzgar türbinleri olduğundan bahsetmiştik. Şimdiki bölümde ise türbin bileşenlerinin neler olduğundan ve fonksiyonlarından bahsedeceğiz. Türbin boyutunun büyüklüğüne göre değişmekle beraber bütün türbinlerde ortak olarak, türbin kanatları, kanat bağlantı göbeği, kanatları taşıyan ve dönme momentini ileten ana mil, jeneratör, kontrol sistemleri, kule ve temel bulunmaktadır. Bunların dışında, modern ve yüksek güçlü türbinlerde ayrıca ana milden gelen momenti iletmek için dişli kutusu, rüzgarın yönüne dönmek için saptırma sistemleri, rüzgarın hızına göre kanat açısını ayarlayan kontrol sistemi, frenleme sistemi de rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan bileşenlerdir. Şekil 4.3’de türbinlerde bulunun temel bileşenler görülmektedir.



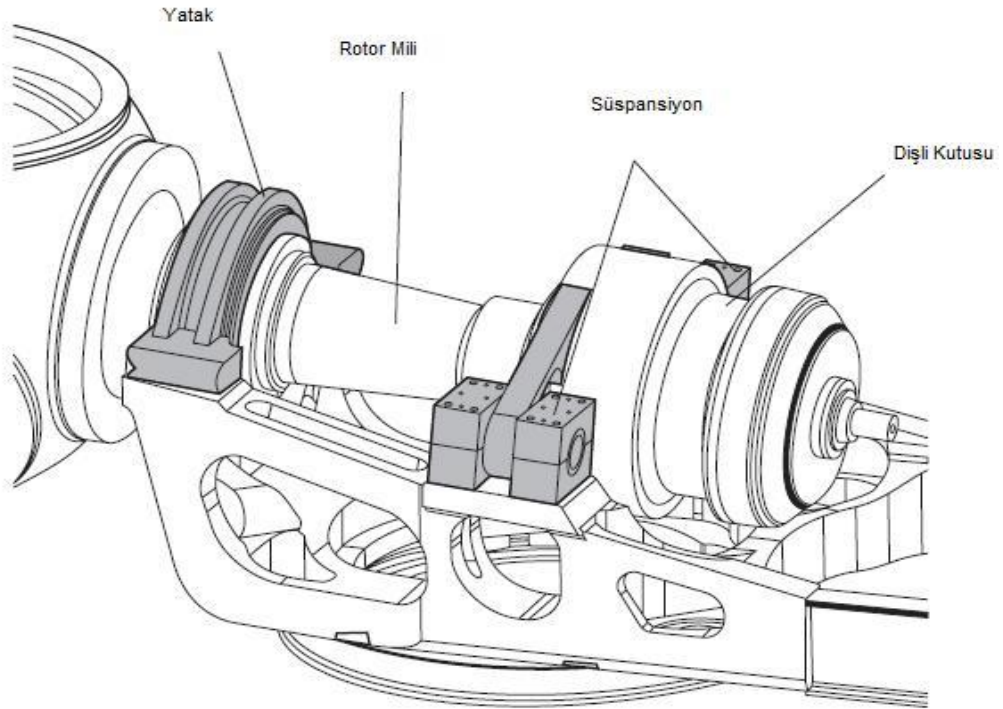
Şekil 4.3: Rüzgar türbini bileşenleri

4.3.1 Rotor

Rüzgar türbinlerinde rotor, kanatlar ve kanatların bağlandığı göbekten oluşur. Toplam maliyet ve türbinin performansı açısından bakıldığında rotorun en önemli bileşen olduğu söylenebilir. Günümüzde kullanılan türbinleri bir çoğu rüzgar-üstü çalışan 3 kanatlı türbinlerdir. Rüzgar-altı çalışan ve 2 kanatlı tasarımlar da mevcuttur. Tek kanatlı türbin uygulamaları da geçmişte denenmiştir fakat artık üretimi tamamen son bulmuştur. Küçük ve orta ölçekli türbinlerde sabit kanat açılı rotor tipleri kullanılmakla birlikte modern türbinlerde artık aktif kanat açısı kontrollü sistemler kullanılmaktadır. Kanat malzemesi olarak genellikle kompozit malzemeler kullanılmakla birlikte fiberglas malzemeler bir adım öle çıkmaktadır.

4.3.2 Dişli Kutusu

Dişli kutusu türbinin dönen parçalarından oluşmaktadır. Düşük hız mili, dişli mekanizması ve yüksek hız milinden oluşmaktadır. Diğer bileşenleri ise, yataklar, kavramalar, fren sistemi ve jeneratörün dönen parçalarıdır. Dişli kutusunun görevi rotordan gelen düşük dönme hızını dişliler vasıtasıyla yükseltmek ve jeneratörde elektrik üretilebilecek seviyeye getirmektir. (Şekil 4.4)



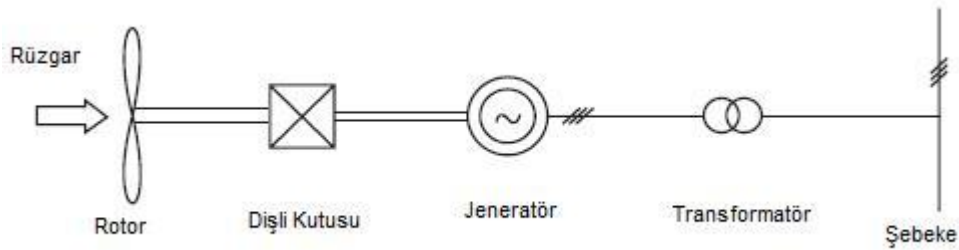
Şekil 4.4: Dişli kutusunun elemanları

Türbinlerde iki tip dişli kutusu kullanılır: paralel milli ve planet. Büyük türbinlerde planet dişli sistemi ağırlık ve boyut açısından sorun yaratacağından tercih edilmezler. Bazı türbinlerde ise düşük devirli jeneratörler kullanılır, böylece rotor mili doğrudan jeneratöre bağlandığından dişli kutusuna gerek kalmaz.

Rüzgar türbinlerindeki mil ve dişli sistemlerinin teknolojik gelişmesinde geleneksel makine mühendisliği konuları takip edilse de, türbinin maruz kaldığı dalgalı rüzgar yükü ve büyük dönel parçalardan dolayı üzerinde ayrıca ve titizlikle durulması gerekmektedir (Manwell vd. 2002).

4.3.3 Jeneratör

Bir rüzgar türbini bünyesinde yardımcı elektriksel sistemlerden kontrol sistemlerine kadar tüm bileşenleri içeren, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir yapıya sahiptir. Mekanik sistemler gibi elektrik sistemi de rüzgar türbinlerinde en önemli alt sistemlerden biridir. (Şekil 4.5). Bir rüzgar türbininde asıl elektromekanik enerji dönüştürücü olan jeneratör, konvansiyonel bir güç santrali gibi, fonksiyon zinciri içinde kendinden önce gelen diğer bileşenlerin odak noktasındadır. Jeneratörün karakteristik özellikleri bir rüzgar türbini için değişken torklar üreten rotordan kaynaklanan problemler için çok önemlidir.



Şekil 4.5: Rotordan şebeke hattına kadar türbin bileşenleri

İlke olarak bir rüzgar türbininde elektrik üretebilmek için herhangi bir türde jeneratör kullanılabilir. Eğer jeneratör doğru akım veya değişken kalitede alternatif akım üretse bile invertör bağlantısı ile şebekeye uygun elektrik akımı üretilebilir.

Doğru akım üreten jeneratörlerin avantajı değişken hızlarda çalışabiliyor olmalarıdır. Ancak günümüzde yüksek güçlü doğru akım jeneratörleri pek fazla kullanılmamaktadır. Bakımlarının pahalı ve zor olması fazla kullanılmamalarının

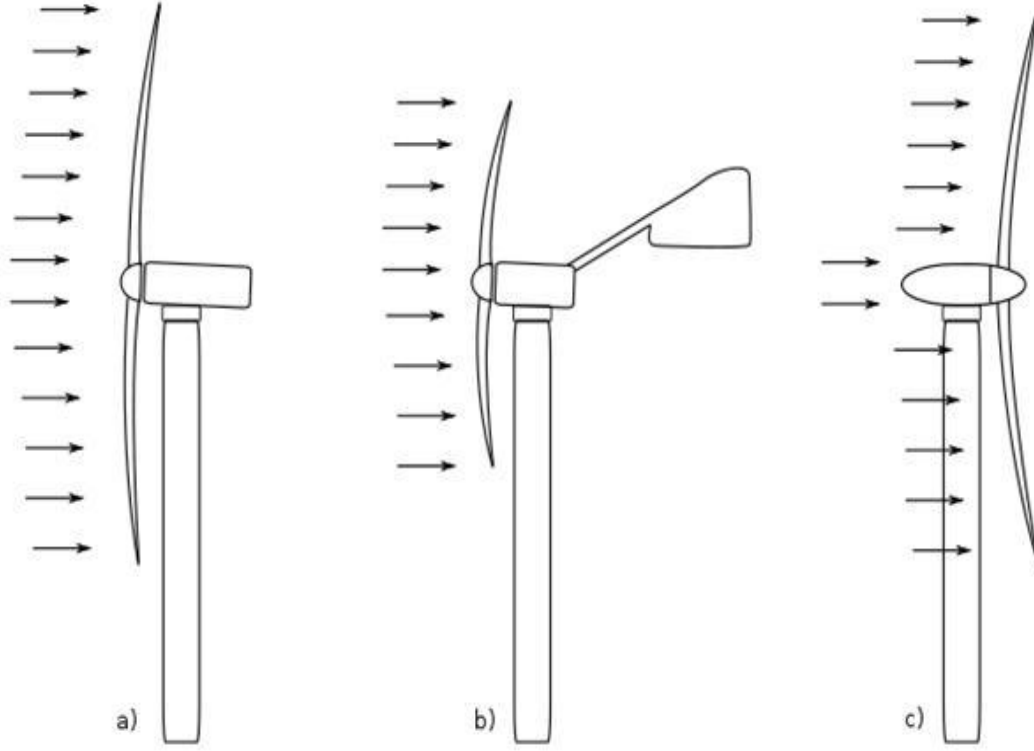
sebeplerinden biridir. Akü veya pil şarj etmek üzere kullanılan çok küçük rüzgar türbinlerinde doğru akım jeneratörleri hala kullanılmaktadır. Ancak büyük rüzgar türbinleri için uygun değildir. Bu tip türbinlerde, tıpkı konvansiyonel güç santrallerindeki gibi, üç fazlı alternatif akım üreten jeneratörler veya alternatörler kullanılır.

Bir rüzgar türbininin elektrik sistemi asla jeneratörle kısıtlanmamalıdır. Jeneratör ancak bu büyük elektrik ve elektronik sistemin çekirdeği olarak kabul edilebilir. Akımın dağıtılması, şebekeye bağlanması, izleme ve kontrol sistemleri için kullanılan elektriksel donanımların tümü bu sistemin bir parçasıdır. Rüzgar türbinleri, otomatik çalışma, izleme ve emniyet sistemleri gibi diğer tüm güç santrallerinde de bulunması gereken zorunlulukları karşılamak zorundadır.

Elektrik sisteminin bir diğer önemli yanı da onun kontrol edilebilirliğidir. Elektrik jeneratörünün ve diğer kontrolle ilgili özelliklerin karakteristikleri her zaman bir bütünlük içinde ele alınmalıdır. Bunlar birbirinden ayrılamayan topyekûn bir sistemi meydana getirirler. Şebekeyi besleyen elektrik akımının kalitesi elektrik sisteminin teknik yapısından dolayı oldukça önemli olarak kabul edilmiştir. Elektrik sisteminin tasarımında ve seçiminde zayıf sistemlerdeki güç ve gerilim dalgalanmaları veya harmonikler önemli kriterlerdir (Hau 2006).

4.3.4 Makine Dairesi ve Saptırma Sistemi

Bu kısım, kulenin tepesinde bulunur ve rotorun bağlı olduğu ayrıca içinde dişli kutusu, jeneratör, transformatör gibi alt sistemlerin bulunduğu muhafazayı ve bunun rüzgarın yönüne doğru yön değiştirmesini sağlayan saptırma sistemini içerir. Bu ana çerçeve, hareketli makine parçalarının doğru hizada monte edilmiş olmasını sağlar. Saptırma sistemi rotor milinin daimi olarak rüzgarla ilişkide olmasını sağlar. Birincil bileşen ana çerçeveyi kuleye bağlayan büyük bir rulman yataktır. Genelde rüzgar üstü türbinlerde kullanılan aktif saptırma sistemi üzerinde bir veya daha fazla saptırma motoru bulunur. Bu mekanizma, genellikle makine dairesi (nacelle box) üzerinde bulunan rüzgar yönü sensörlerinden aldığı bilgiye göre işlem yapan otomatik saptırma kontrol sistemi tarafından yönetilir. Bazen saptırma frenleri beşğin sabit pozisyonda kalmasında kullanılır. Serbest saptırma sistemleri genellikle rüzgar altı türbinlerde kullanılır. (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: a. Aktif kontrollü rüzgar üstü b ve c pasif kontrollü rüzgar altı ve rüzgar üstü

4.3.5 Kontrol Sistemleri

Bir rüzgar türbini için kontrol sistemi hem makinelerin işletimi hem de güç üretimi için çok önemlidir. Kontrol sistemleri aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- Sensörler: hız, pozisyon, akış, sıcaklık, akım, gerilim vs.
- Kontrol birimi: mekanik sistemler, elektriksel devreler ve bilgisayarlar
- Güç yükselticileri: anahtarlar, elektriksel yükselticiler, hidrolik pompalar ve vanalar
- Aktüatörler: motorlar, pistonlar, manyetikler ve solenoidler.

Rüzgar türbini uygulamalarında kontrol sistemlerinin tasarımı geleneksel kontrol mühendisliği çalışmalarından faydalanılarak yapılır. Rüzgar türbinin kontrolü aşağıdaki üç temel görüş ve onların gereksinimlerinin düzgünce dengelenmesini içerir (Manwell vd. 2002).

- Üst sınırların konulması ve dişli kutusu tarafında güç ve tork değerlerinin sınırlandırılması

- Rüzgar yönü ve hızındaki değişimler, türbülans gibi durumlarda rotor aktarma organları ve diğer yapısal bileşenlerin yorulma ömürlerinin uzatılması.

4.3.6 Kule

Kuleler, rüzgar türbinlerinin taşıyıcı bileşenleridir. Yere yakın yerlerde sınır tabakadan dolayı rüzgar hızları düşük olduğun için kule yüksekliklerinin belirli bir değerinde olması tercih edilir. Bu açıdan bakıldığında kuleler türbinler için bir avantajdır ancak kule boyunun uzaması ile birlikte artan malzeme, üretim, taşıma ve montaj maliyetleri rüzgar türbini için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu yüzden optimum kule yüksekliğinin hesabı yapılırken, maliyet fonksiyonu ile rüzgardan elde edilecek enerji fonksiyonunun kesiştikleri noktaya bakmak gerekir. Ancak bu kesişim noktasının tespit edilmesi genelleştirilmiş formüllerle yapılamamaktadır. Büyük rüzgar türbinlerinde inşaat maliyetleri kule yüksekliğinin artması ile hızlı bir yükseliş gösterir. Kule yüksekliğinin seçiminde türbinin kurulacağı bölgenin de önemi büyüktür. Kıyıda uzaklaşıldığı iç bölgelerde rüzgar hızlarının yükseklikle birlikte hızlı artış göstermemesinden dolayı seçilen kulenin yüksek olması önem taşımaktadır.

Kule yüksekliğinin yanında kulenin rijit yapıda olması da kule seçiminde önemli bir faktördür. Henüz tasarım aşamasındayken birinci doğal frekansın belirlenmesi önemli bir iştir. Bunun sonucu olarak kullanılacak malzeme ve maliyetler belirlenmiş olur. Sonuç olarak bir kulenin tasarımında amaç; arzulanan yükseklik ve rijitlikteki kuleyi minimum maliyetle üretmektir.

Kulenin taşınması ve montaj işlemleri de günümüzün büyük rüzgar türbinleri için sorun teşkil etmektedir. Yüksekliği 100 metreden yüksek olan kuleler hem yüzlerce tonu bulan ağırlıkları hem de geniş çapları yüzünden taşıma sırasında sıkıntı yaratabilmektedir. Kule imalatında tercih edilen malzemeler genel olarak çelik ve betondur. Tasarımlar kafes yapılı, gerdirmeli, tüp şeklinde çelik olabileceği gibi oldukça ağır ve büyük betonarme yapılı da olabilmektedir (Hau 2006).

Tez kapsamında rüzgar türbini kulelerinin yapısal analizi konusu işlendiğinden Bölüm 5 kapsamında kule konusu daha kapsamlı olarak işlenecektir.

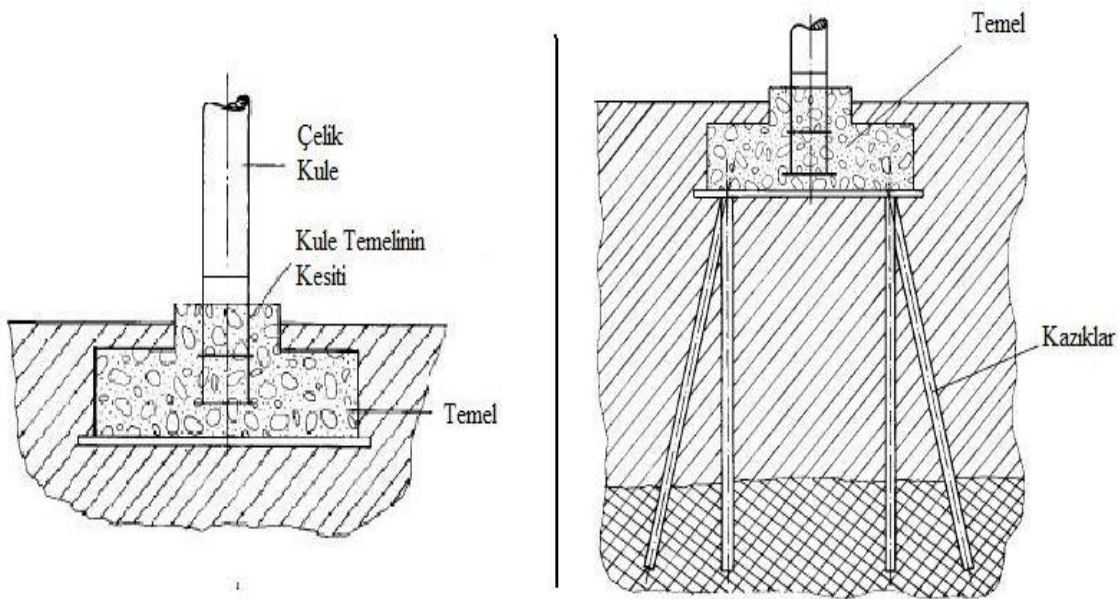
4.3.7. Kule Temeli

Kuleye uygun temel seçimi yapılırken rüzgar türbininin büyüklüğü ve kurulacak alanın zemin koşulları göz önünde bulundurulur. Burada birincil olarak rüzgar türbininin hareketsiz olarak durduğu zaman üzerine gelen en yüksek yük durumu düşünülmelidir. Buradaki belirleyici faktör türbinin ayakta kalma rüzgar hızı olarak adlandırılan maksimum rüzgar hızı düşünülmelidir. Kanat açısının değişiminin mümkün olmadığı türbinlerde türbinin çalışmaması durumunda gelen yükler yüksek olduğundan temelin boyutlandırılması açısından maliyetleri oldukça yükseltmektedir.

En azından kontrol edilmesi gereken ikinci bir yük durumu ise işletim sırasında oluşan maksimum yük durumudur. İşletimde iken temeldeki oluşan maksimum eğme momenti rotorun tepkisinden dolayı oluşmaktadır. Kanat kontrollü türbinlerde, rotor tepkisi anma gücünde pik değere ulaşır.

Tasarım onayı ve güvenlik sertifikası için bu tür yük durumları göz önüne alınır. Dinamik yükleme spektrumu ile ilgili yorulma ömrü hesaplamaları genellikle aranmaz. Bu hesaplamalar imalatçının sorumluluğundadır.

Türbinin kurulacağı zeminin jeolojik durumuna göre plak temel veya kazık temel tipi temeller tercih edilir.(Şekil 4.7) Buradaki belirleyici faktör yüklerin absorbe edileceği zemin katmanlarının derinliğidir (Hau 2006).

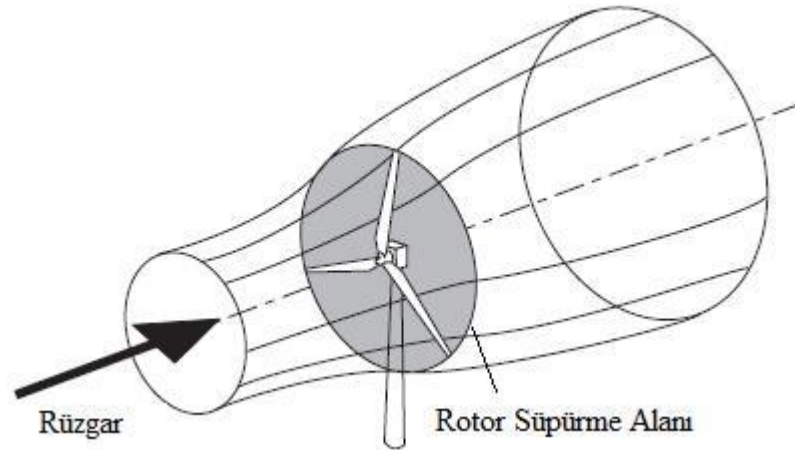


Şekil 4.7: Plak ve kazık temel tipleri

4.4 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamiği

Bir rüzgar türbininin rüzgardan kinetik enerjiyi çekip çıkararak bir makine olduğundan bahsetmiştik. Türbinin varlığı rotora doğru gelen havanın yavaşlamasına neden olur böylece hava rotora ulaştığında hızı serbest akan rüzgara göre çoktan yavaşlamıştır. Yavaşlamanın etkisiyle akım-tüpü genişler ve havanın statik basıncı kinetik enerjideki azalmayı karşılayabilmek için artar.

Hava rotor süpürme alanından geçerken, teorik olarak, statik basınçta bir düşme olur, ayrıldığı anda ise hava atmosfer basıncının altındadır. Daha sonra hava, azalmış hızı ve basıncı ile rüzgar altı konuma geçmiş olur. Akışın bu bölgesine girdap (wake) denir. Sonunda, rüzgar altının uzak bölgelerinde girdaptaki statik basınç atmosfer basıncına geri dönmelidir. Statik basınçtaki bu artış rüzgarın yavaşlamasına neden olur. Böylelikle rüzgar üstü ve girdap bölgelerinin uzak kısımlarında basınç korunmuş ancak kinetik enerjide azalma olmuş olur.

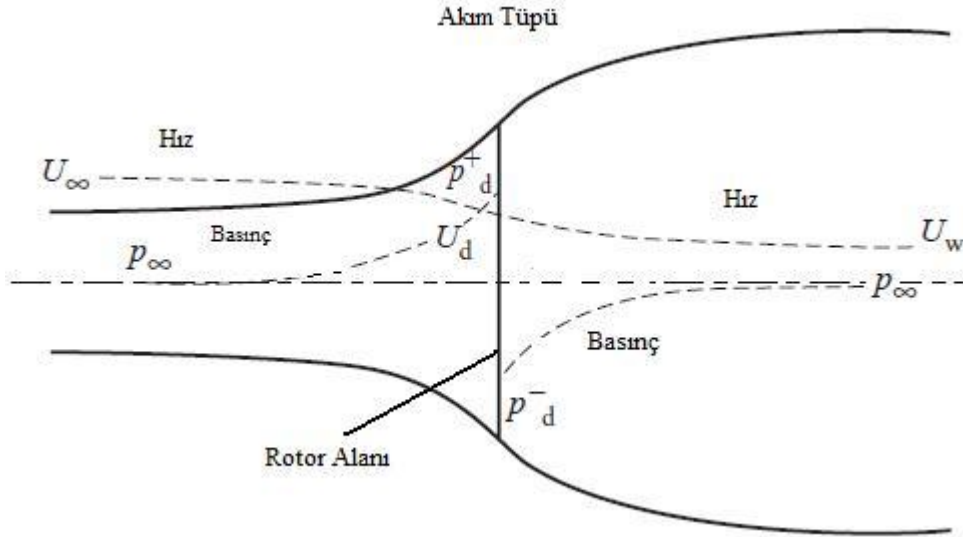


Şekil 4.8: Akım tüpü

Akım tüpü (Şekil 4.8) boyunca kütle akış oranı sabit kalacağından aşağıdaki ifade yazılabilir;

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

Şekil 4.9'deki ∞ sembolü rüzgar üstü kısımdaki uzak bölgeleri, d sembolü rotordaki durumu, w sembolü ise girdap bölgesini temsil etmektedir.



Şekil 4.9: Akım tüpü içinde hız ve basınç değişimi

4.4.1 Momentum Teoremi

Rotor alanından geçen hava genel bir hız değişimine uğrar, $U_\infty - U_w$ ve momentum değişimi oranı, toplam hız değişimi ve akan kütle için çarpımına eşittir:

$$\text{Momentum Değişim Oranı} = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \quad (4.2)$$

Bu momentum değişikliğe neden olan kuvvet tamamen rotor diski etrafındaki basınç farkından meydana gelmektedir çünkü aksi halde akım tüpü tamamen atmosfer basıncı ile çevrelenmiş olur ve net kuvvet sıfır olur. Bu yüzden,

$$(P_d^+ - P_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty (1 - a) \quad (4.3)$$

$(P_d^+ - P_d^-)$ basınç farkını elde etmek için, akım tüpünün rüzgar altı ve rüzgar üstü kısımların ayrı ayrı Bernoulli denklemi uygulanır. Ayrı denklemlerin gerekli olmasının sebebi ise her iki taraftaki toplam enerji değişimi farklıdır. Bernoulli denklemine göre steady koşullar altında akıştaki toplam enerji, statik basınç enerjisi ve yerçekiminin potansiyel enerjisi iş yapılmadığı için sabit kabul edilir. Böylelikle havanın birim hacmi için,

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = \text{sabit} \quad (4.4)$$

Bu yüzden rüzgar üstü için aşağıdaki denklem elde edilir,

$$\frac{1}{2}\rho^\infty U_\infty^2 + \rho_\infty g h_\infty = \frac{1}{2}\rho_d U_d^2 + p_d^+ + \rho_d g h_d \quad (4.5)$$

Sıkıştırılmaz akış ($\rho_\infty = \rho_d$) ve yatay ekseninde ($h_\infty = h_d$) olduğundan,

$$\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^+ \quad (4.6)$$

Benze şekilde rüzgar altında da,

$$\frac{1}{2}\rho U_w^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^- \quad (4.7)$$

Bu eşitlikleri birbirinden çıkardığımızda,

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2) \quad (4.8)$$

(4.3) eşitliği bizi aşağıdaki eşitliğe götürür,

$$\frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty (1-a) \quad (4.9)$$

Sonuçta aşağıdaki denkleme ulaşılır,

$$U_w = (1-2a)U_\infty \quad (4.10)$$

4.4.2 Güç Katsayısı

Havadaki kuvvet sarı eşitlikten şu şekilde çıkarılır,

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1-a) \quad (4.11)$$

Bu kuvvet rotor diskinde noktasal olarak etki ettirilirse yapılan iş, FU_d kuvvetince yapılmış olur. Böylece havadan alınabilecek güç, (Burton T. vd. 2001)

$$Güç = FU_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1-a)^2 \quad (4.12)$$

Buradan güç katsayısı tanımlanır,

$$C_p = \frac{Güç}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} \Rightarrow 4a(1-a)^2 \quad (4.13)$$

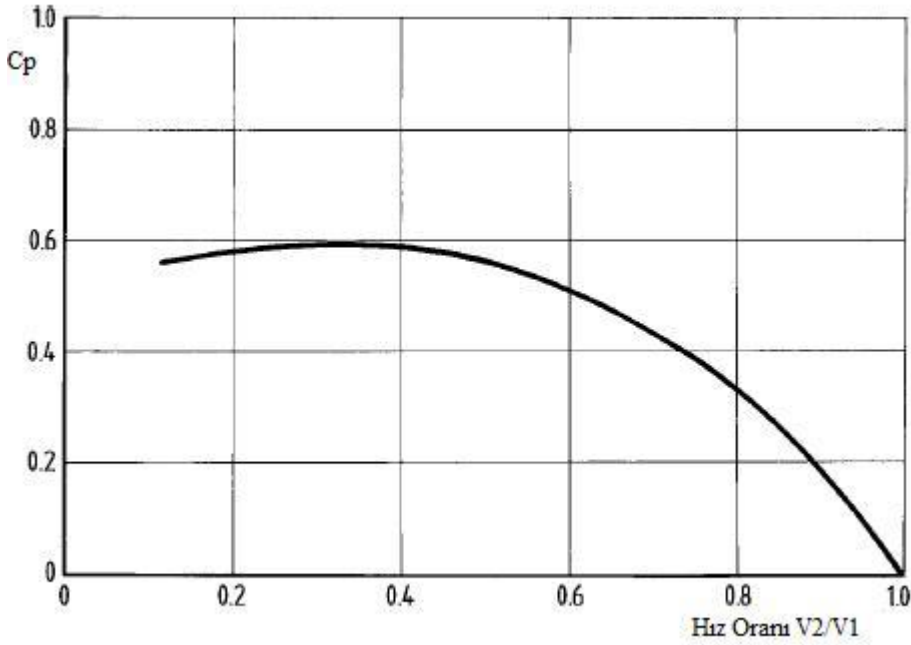
4.4.3 Betz Limiti

C_p 'nin maksimum değeri aşağıdaki koşulda oluşur,

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (4.14)$$

$a = \frac{1}{3}$ yerine konduğunda, $C_{p \max}$ değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (4.15)$$



Şekil 4.10: Güç katsayısının hız oranlarına göre değişimi

Ulaşılabilen en yüksek güç katsayısı “Betz Limiti” olarak tanımlanmıştır. Bu güne kadar da bu limiti geçebilen bir türbin tasarlanmamıştır. Zaten bu durum tasarım yetersizliğinden kaynaklanamamaktadır. Çünkü akım tüpü genişlemek zorundadır ve akışın serbest olduğu bölgedeki tüpün kesiti rotor kesitinden küçüktür. Şekilde Güç katsayısının hız oranlarına göre değişimi verilmiştir (Şekil 4.10) (Hau 2006).

4.4.4 Uç Hız Oranı

Pala ucundaki çevresel hızın, U_0 , sonsuzdaki gelen akım hızına (v_∞) oranıdır. Yazının bundan sonraki kısmında basitlik için ∞ indisi kullanılmayacaktır.

$$\lambda_0 = \frac{U_0}{V} \quad (4.16)$$

burada,

$$U_0 = \Omega R = 2\pi nR = \frac{2\pi NR}{60} \quad (4.17)$$

Uç hız oranı türbin performansının belirlenmesinde etkili olan bir parametredir. Bir türbinin tork ve güç üretimi uç hız oranı ile değişir. Türbinin tasarım uç hız oranı değeri, güç katsayısını (C_p) maksimum yapacak şekilde seçilir

5. Rüzgar Türbini Kuleleri

5.1 Kule Çeşitleri

Günümüz rüzgar türbinlerinin aksine onların ataları sayılan yel değirmenlerinde kule yerine bu işlevi gören görece daha kısa boylu yapılar vardı. Ancak rüzgardan enerji üretiminde yüksekliğin öneminin anlaşılması ile birlikte bu yapılardan vazgeçilerek kule benzeri daha ince uzun tasarımlar tercih edildi. En sonunda ise ilk olarak Amerikan tarzı küçük rüzgar türbinleri ile birlikte direk ve kuleler ön plana çıkmaya başladı. Bu gelişmenin bir sonucu olarak da kule tasarımı ve kullanılan malzemeler açısından çeşitlilikler artmaya başladı. Yel değirmenlerindeki ahşap yapıların yerini çelik ve beton malzemeler aldı. Modern rüzgar enerjisi teknolojilerinin başladığı ilk yıllar çeşitli tasarımların denendiği ve test edildiği yıllardı. Zaman içinde de bu çeşitlilik iyice daralarak serbestçe duran çelik ve beton yapılara kadar azaldı (Hau 2006).

5.1.1 Kafes Yapılı Kuleler

Yüksek ve rijit kule inşa etmek için en basit yol üç boyutlu makas kiriş sistemli kafes kuleler yapmaktır. Kafes kuleler bu yüzden ilk deneysel türbinlerin tasarımında ve küçük ticari türbinlerde kullanılmaya başlandı. (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Kafes yapılı kule

Günümüzde kafes yapılı kuleler, sahilden uzak kesimlerde büyük türbinleri taşımak için gerekli olan yüksek kulelerde tübüler yapılı çelik kulelere alternatif oluşturmaktadır.

5.1.2 Betonarme Kuleler

Yirminci yüzyıl başlarında çelik takviyeli betonarme kuleler ilk olarak Danimarka'da kullanılmaya başladı. Bu kuleler aynı zamanda Danimarkalı türbin üreticilerinin büyük türbinler için kullandığı ilk kuleler olma özelliğini taşımaktadır. Daha sonraları buralarda da çelik kuleler ticari anlamda baskın hale geldi. Seksen metreden yüksek yapılar için betonarme kuleler kaybettikleri değeri kazanmaya başlamıştır. (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Betonarme Kule

5.1.3 Tübüler Çelik Kuleler

Modern rüzgar türbinlerinde en yaygın olarak kullanılan kule tipi tübüler çelik kulelerdir. Titreşim davranışındaki ustalığı bu tip kulelerin kullanımını kolaylaştırmıştır, bu yüzden de tübüler çelik kuleler çok düşük tasarım rijitlikleri ile

uygulanmıştır. Böylelikle kütleli olarak ağırlık dolayısıyla da maliyetleri aşağıya çekmek mümkün olmuştur (Hau 2006). Bölüm 5.2’de tübüler çelik kuleler ile ilgili daha detaylı bilgiler verilecektir.

5.1.4 Gergili Çelik Kuleler

Rüzgar altı türbinlerde rotorun, kulenin sebep olduğu rüzgarı gölgeleme etkisini azaltmak için daha ince yapılı kulelerin yapılması ihtiyacı doğmuştur. Bu kulelerde istenilen eğilme mukavemeti değerinin sağlanması için çelik kablolar veya kirişler kullanılır. Görece olarak düşük kütleli olmalarına rağmen gergili kuleler maliyet açısından çok düşük değildir. Çelik teller ve bunların bağlanacağı temel ve diğer ekipmanların maliyetleri toplam maliyeti oldukça şişirmektedir. Buna ek olarak, tarımsal alanlar bu kablolar engel teşkil etmektedir. (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: Gergili Çelik kule

5.1.5 Özel Tasarımlı Kuleler

En çok kabul gören kule tasarımlarından ayrı olarak bazı farklı tasarımlı rüzgar türbini kuleleri de mevcuttur. Örneğin deneysel bir çalışma için Hollanda'da yapılmış olan HAT-25 türbini beton ve çeliğin birlikte kullanıldığı özel bir tasarıma sahiptir. (Şekil 5.4). Bazı Danimarka yapımı türbinler tripod tasarımlı taşıyıcı ayaklara sahiptir. Bazı nadir durumlarda da kafes yapılı veya betonarme yapılı ince kuleler çelik kablolar tarafından tutturulmuştur. Ancak bunların hiçbiri kule seçimi yaparken önem verilen tasarımlar değildir.



Şekil 5.4: Hollanda'da yapılmış beton temel üzerine çelik kule (HAT-25)

5.2 Serbest Duran Tübüler Çelik Kuleler

Serbestçe duran tübüler çelik kulelerin günümüz ticari rüzgar türbinlerinde çok tercih edildiklerinden bahsetmiştik. Bunun ana nedeni montaj ve birleştirme işlemlerinin yerinde çok kısa sürede tamamlanmasıdır. 20 metreden kısa olan kuleler imalatçının fabrikasında tek parça olarak üretilip, kolaylıkla temele bağlanabilir. 100 metreye

kadar olan kuleler ise birden fazla bölüm olarak imal edilir ve hiç kaynak gerektirmeden yerinde flanş bağlantıları ile bağlanabilirler. Tübüler çelik kulelerin tercihinde son yirmi yıl içindeki çelik fiyatlarının düşük seyretmesinin de önemli yeri vardır.

5.2.1 Dayanım ve Rijitlik

Kule tasarımında boyutlandırma yaparken dayanım ve rijitlikle ilgili gereksinimler göz önüne alınır. Üzerinde düşünülmesi gereken bu faktörler aşırı rüzgar hızlarında ayakta kalabilmesi için gerekli olan kopma dayanımı, 20-30 yıl arası bir işletim süresine dayanabilecek yorulma dayanımı ve titreşim özelliklerine dayanabilecek rijitliktir (Hau 2006).

5.2.1.1 Kopma Dayanımı

Kuleye etki eden statik yükler; makine dairesini ve kulenin kendi ağırlığı, rotora etki eden aerodinamik kuvvetin doğurduğu yüklerdir. Kanat açısı kontrollü türbinlerde rotora gelen kuvvet, genellikle rotorun anma hızında döndüğü zaman en yüksektir. Bu durum ancak türbinin durur vaziyetteyken rotor üzerine gelen aşırı rüzgar yükleri durumunda daha fazla olabilir. Kuledeki en yüksek eğilme momenti dağılımı kanat açısı kontrolü olmayan türbinlerde veya kanat pozisyonunun bazı yük durumlarında gerçekleşir. Şekil 5.5'te yükler karşısında yıkılmış bir rüzgar türbini görülmektedir. (Barbu 2009).

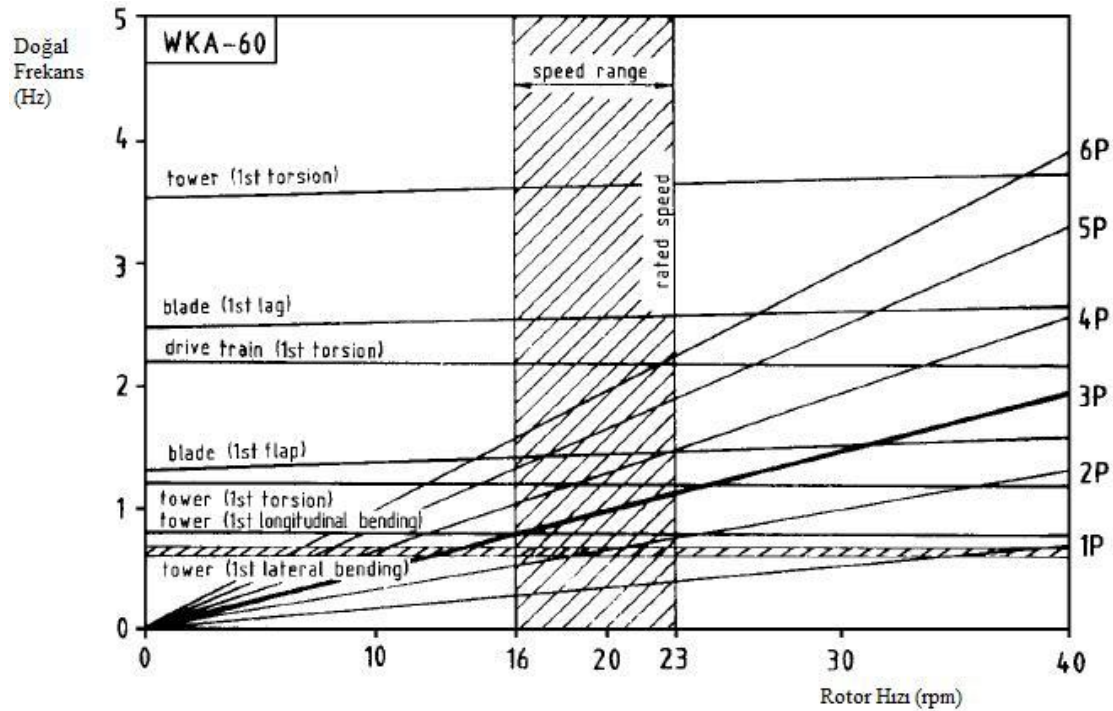


Şekil 5.5: Yıkılmış bir rüzgar türbini

5.2.1.2 Yorulma Dayanımı

Rotorun işletiminden kaynaklanan dinamik yüklerin ince kulelerin yorulma ömürleri üzerinde önemli etkileri vardır. Titreşimden kaynaklanan rezonans durumları fazladan yüklemeye sebep olacağından ayrıca üzerinde düşünülmesi gereken bir konudur. Bu nedenle konvansiyonel binalar için uygulanan statik gerilme analizi her rüzgar türbini kulesi için uygun olamamaktadır.

Rüzgar türbini çalıştırılırken, türbin bileşenlerinin titreşimleri ve doğal frekansları göz önünde bulundurulmalı ve bu doğal frekans bölgelerinden kaçınılmalıdır. Rotordan gelen tahrik ile doğal frekanslar arasındaki ilişkiyi belirlemenin bir yolu Campbell diyagramından faydalanmaktır. Campbell diyagramı türbinin en önemli doğal frekanslarını rotor hızının bir fonksiyonu olarak gösterir. Şekil 5.6'da üç kanatlı bir türbin için Campbell diyagramı görülmektedir. Burada (1P) rotorun dönme frekansını, (BP) kanat dönme frekansını, (B) kanat sayısını, (P) ise her bir dönüşü temsil etmektedir. Kesişim noktaları kaçınılması gereken işletim hızlarıdır.



Şekil 5.6: Campbell diyagramı

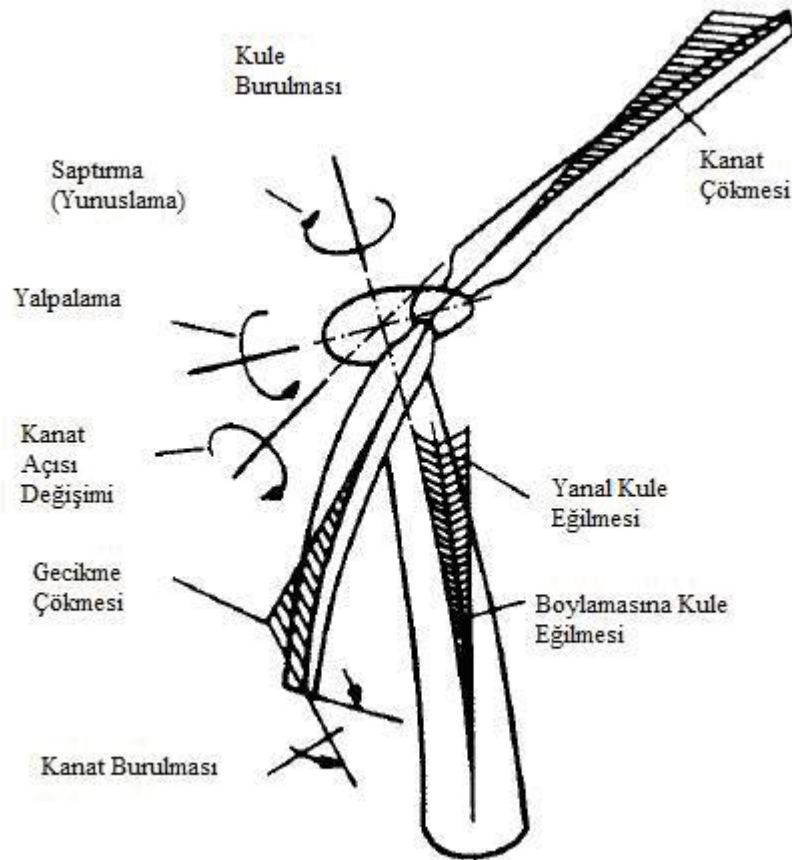
Bazı durumlarda doğal frekanslarda veya yakınların çalışmak kaçınılmaz olmaktadır. Bu durum türbini çalıştırma veya durdurma durumlarında veya değişken hızlı türbinlerin bazılarında görülebilir. Bu yüzden böyle durumlarda işletim etkilerini özellikle değerlendirmek gerekmektedir (Manwell vd. 2002).

5.2.1.3 Kule Rijitliği

Kule için istenilen rijitlik, türbinin bir bütün olarak ele alındığındaki titreşim davranışına göre belirlenir. Genellikle de birinci eğilme frekansına göre belirlenir. Özellikle doğal burulma frekansı gibi diğer doğal frekanslar türbinin saptırma sisteminin dinamik hareketleri çerçevesinde kontrol edilir.

Türbinin titreşim davranışını bir bütün olarak düşündüğümüzde bizi birincil olarak kule ve rotor birleşimine götürür. Rotor-kule sistemi sürekli olarak kendi kendini tahrik etme eğilimi gösterir. Şekil 5.7’de sistemin en önemli serbestlik dereceleri gözükmemektedir.

Tahrik eden kuvvetler sadece ve ilk olarak kulenin titreşimini etkilemez aynı zamanda birbirleriyle etkileşim içindeki çok serbestlik dereceli diğer bileşenleri de etkiler ki bu da değişik titreşim modlarından birçoğunun gerçekleştiği anlamına gelir. Ancak her bir serbestlik derecesinin çakışarak pratikte böyle bir durum oluşturması düşük bir olasılık olduğundan sadece bir kısmı dikkate alınır.



Şekil 5.7: Bir rüzgar türbininin serbestlik dereceleri

Dönen rotorun oluşturduğu kuvvetler birincil olarak kulenin eğilme titreşimlerini tahrik eder. Ancak kulenin burulması tamamen ihmal edilmemelidir, hatta birçok kulede kulenin birinci burulma frekansı birinci eğilme frekansından belirgin şekilde yüksektir.

Rotor kanatlarında, kelebekleme yönünde, kanat hattı boyunca ve burulma hareketleri ve ilgili doğal frekansları önemlidir. Kanatlarda kelebeklemeden dolayı oluşan birinci eğilme frekansı kulenin eğilmesi ile rezonansa girebilir. Kanat hattı boyunca olan hareket ise türbinin aktarma organlarının titreşim davranışı ile ilişkilendirilmelidir.

Türbinin bütününün titreşim davranışını kontrol etmenin birinci ve en önemli gereksinimi, rotordan gelen rezonans kuvvetlerinin kulenin eğilme frekansını etkilemesinden sakınmaktır. Bu durumda, kulenin doğal frekanslarını üzerinde taşıdığı kütle ile birliktymiş gibi düşünmektir. Rotorun tahrik kuvvetleri iki ayrı kategoride incelenebilir.

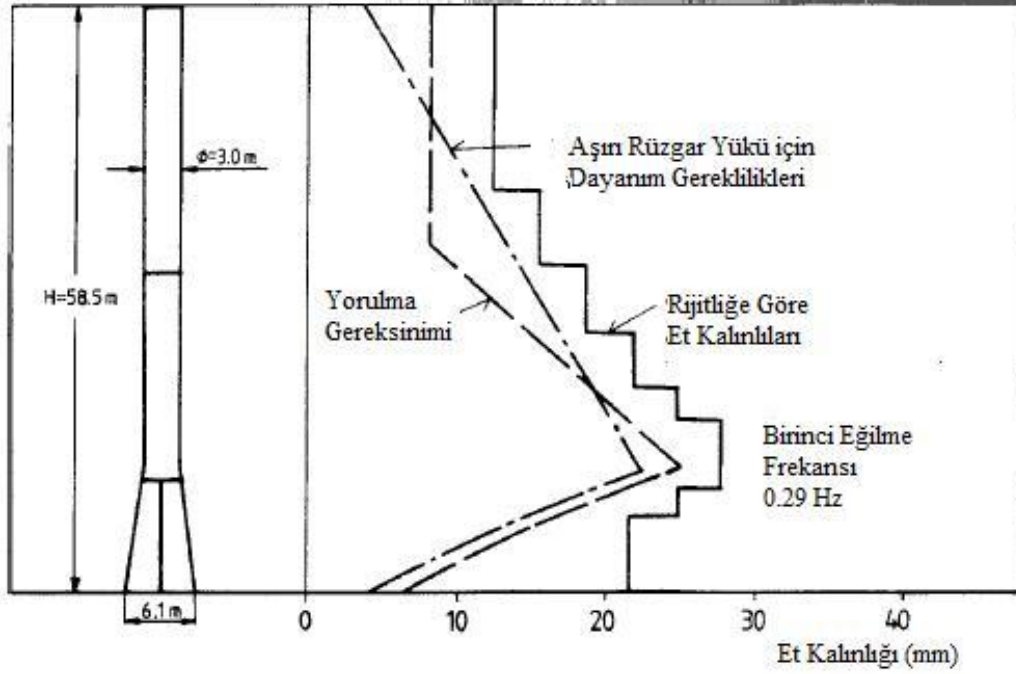
- Rotorun dönme frekansından kaynaklanan tahrik kuvvetleri. Bunlar genellikle ağırlık dengesizliklerinden kaynaklanan birincil kuvvetlerdir.
- Rotorun dönme frekansının kanat sayısı ile çarpılarak elde edilen tahrik kuvvetleri. Bu durum ise akış halindeki havanın aerodinamik dengesizlikler olarak asimetrik şekilde rotoru etkilemesinden dolayı oluşan kuvvetlerdir. (kulenin gölgeleme etkisi, düşey rüzgar profili vb.)

Aerodinamik etkilerden dolayı oluşan kuvvetler kritik öneme sahiptir çünkü ağırlık dengesizliklerin aksine bunlardan kaçınmak mümkün değildir. Kulenin birinci eğilme frekansının bu durumu kulenin genel titreşim davranışı açısından tasarımını belirlemektedir. Bu durum kanat sayısına göre değişkenlik göstermektedir.

5.2.1.4 Burkulma Dayanımı

Eğilme doğal frekansı düşük olan ve et kalınlığı ince olan tübüler çelik kulelerde yerel burkulmaların da önemi büyüktür. Modern türbinlerdeki ağırlıkların azaltılması çalışmalarının sonucu olarak incelen et kalınlıklarının boyutlandırılması için burkulma dayanımına sıklıkla başvurulur.

Şekil 5.8’de MOD-2 rüzgar türbininin yükleme durumuna karşılık gelen et kalınlıklarını göstermektedir. Gerekli et kalınlıkları rijitlik gereksinimlerini karşılamak üzere seçilmiştir (Hau 2006).



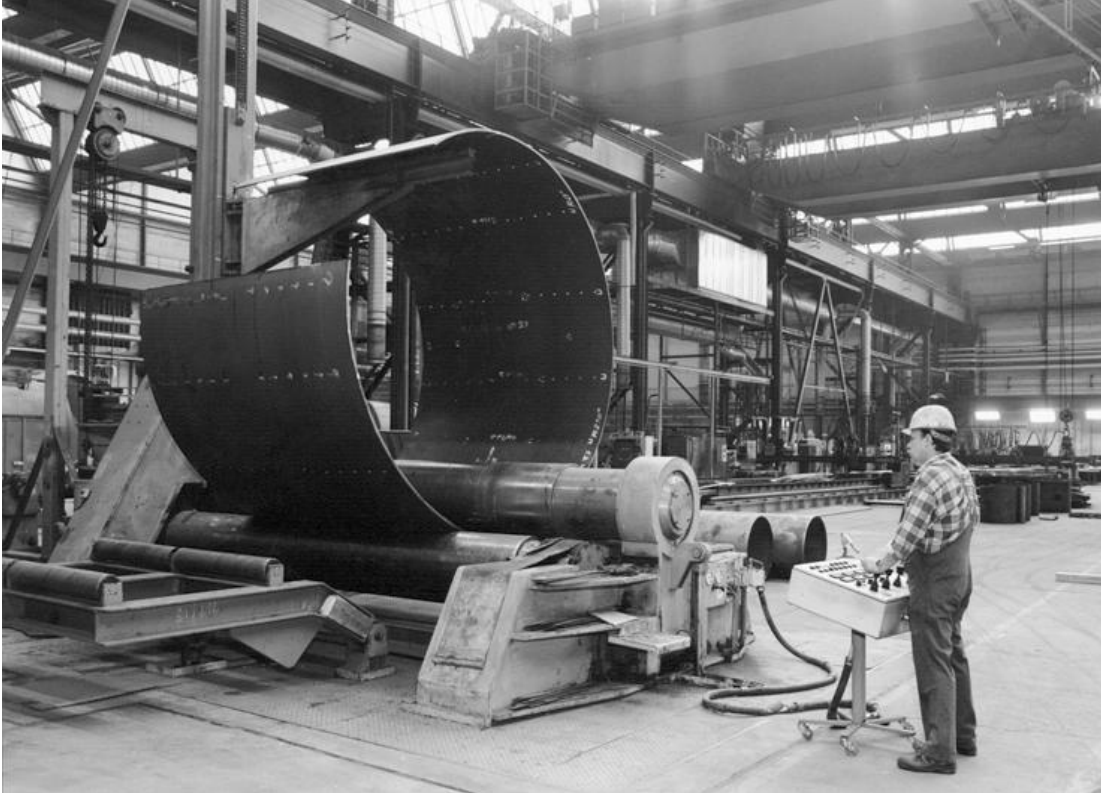
Şekil 5.8: MOD-2 Rüzgar türbini et kalınlıkları

5.2.2 Kule İmalat Teknikleri ve Montajı

5.2.2.1 İmalat Teknikleri

Bazı istisnalar dışında günümüzün büyük rüzgar türbinlerinin kuleleri temelden yukarıya doğru incelen kesitli ve konik biçimlidir. Silindir geometrisiyle kıyaslandığında istenilen rijitlik değerini sağlarken ağırlık tasarrufu da sağlar.

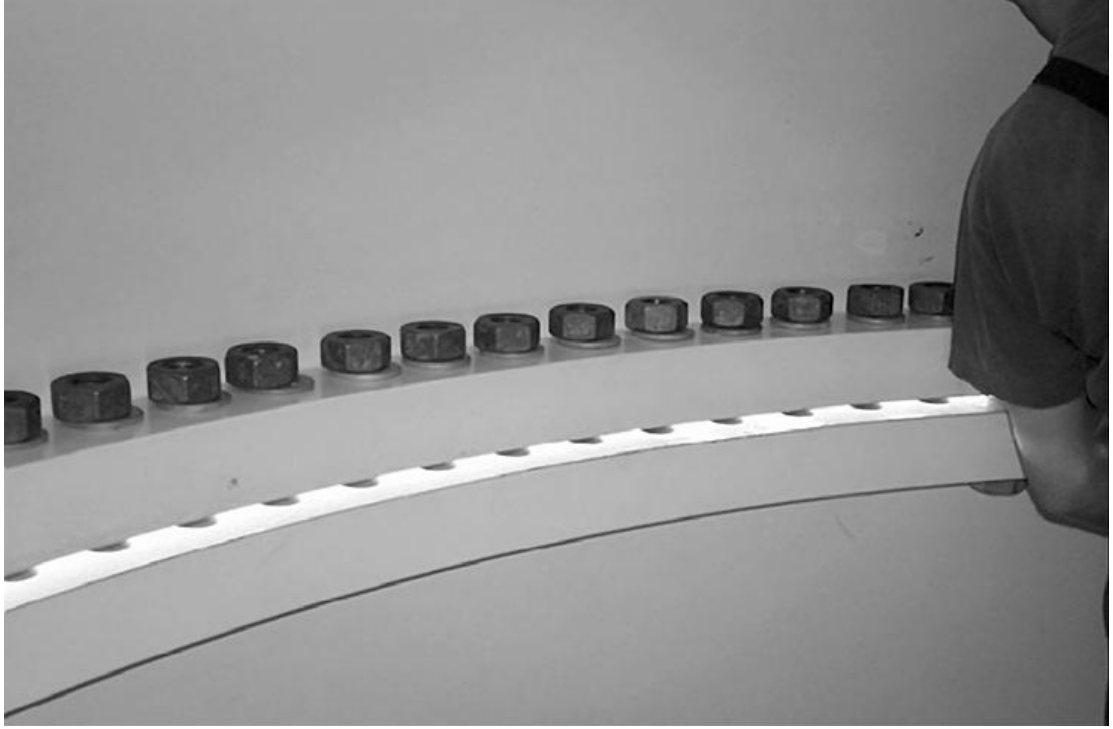
Türbin kuleleri imalathanelerde önceden üretilmiş boyları 10 metreye ulaşan parçalardan oluşur. Bu parçalar 10 ila 50 mm arasında değişen kalınlıklarda çelik sac plakalardan imal edilir. Yaklaşık 2 metre genişliğindeki bu çelik plakalar haddelerde dairesel şekillerini alır. Şekil 5.9’da haddelenmekte olan çelik kule parçası görülmektedir. Bu parçaların kaynaklanmasıyla kule segmentleri oluşturulmuş olur. Kulenin maruz kalacağı yüklere karşı dayanımlı olması için kaynaklara çok önem verilir ve yüzey çatlaklarının kontrolleri yapılır. Kulede kullanılan çelik plakalar genelde St52 veya St48 yapı çelikleridir. Flanş bağlantıları ve temelde ise daha yüksek dayanımlı çelikler kullanılır.



Şekil 5.9: Çelik plakaların haddelenmesi

Kule parçalarının her birinin bittiği yere iç taraftan flanşlar kaynatılır. Bu flanşlar yüksek kaliteli dövme çeliklerdir. Flanşların şekil verme ve kaynak işlemleri yapılırken büyük itina gösterilmelidir. Çünkü sahadaki montaj işlemleri sırasında parçaların birbirlerine mükemmel uyumlu olmaları gerekmektedir. Kule parçaları arasında bulunan boşluklar birer kusurdur ve tübüler çelik kulelerde oldukça karşılaşılan bir durumdur. Kule genellikle temele, temel parçası denilen ve betonun dökülmesi sırasında temele yerleştirilen bir parçadan bağlanır. Kule ile makine dairesi arasındaki bağlantı ise azimut tipi dökme flanşla yapılır. Şekil 5.10'da kule bağlantılarının yapıldığı flanşlar gösterilmiştir.

Çelik kulelerin kalitesi söz konusu olduğunda yüzey kalitesi çok önem kazanır. Korozyona karşı dayanım ise sert hava koşulları için bile en azından 10 yıllık süreyi kapsamalıdır. Kumlama işleminden sonra kule parçaları termal bir uygulamayla çinko kaplanır. Dış kaplama üzerine iki ya da üç kat boya yapılır. Bazı ülkelerde kulenin rengini belirleyen bazı düzenlemeler de vardır.



Şekil 5.10: Kule bağlantı flanşları

Dört metreye kadar olan kule çaplarının imalatı için üreticilerin geleneksel imalat ekipmanları dışında yeni ekipman almaları gerekmez. 90 metreden yüksek kulelerde ise temel çapı 4.5 metreyi çeliklerin et kalınlığı ise 40mm'yi bulabilir. Bu yüzden bunları imal edebilmek için çelik imalat sanayisinde kullanılan standart ekipmanlar yetersiz kalmaktadır. Bu kadar büyük çaplı parçaların normal yollarla taşınması da mümkün olmamaktadır (Hau 2006).

5.2.2.2 Kule Montajı

Bir rüzgar türbininin inşası oldukça karmaşık bir süreçtir ve birçok adımdan oluşur. Bu süreç yasal onay ve izinlerin alınmasıyla başlar. Gerekli onaylar alındıktan sonra ise türbinin konacağı yerin hazırlanması, türbinin taşınması ve montaj bağlantılarının yapılması işleri yapılır.

Alanın montaja hazırlanması için yol yapılması, bölgenin etrafının temizlenmesi, güç hatlarının bağlanması ve temelin yapılması gereklidir. bölgenin montaja hazır hale gelmesi o bölgenin lokasyonuna, güç hatlarına olan uzaklığına, türbinin tasarımına ve yüzey şekillerine doğrudan bağlıdır. Türbin temelinin tasarımı türbine ve bölgeye özgün olarak yapılır. Tahmin edilen türbin yükü, kule tasarımı ve zemin özellikleri ne tür ve ne ebatta temel yapılacağını belirler. Ayrıca yol yapımı da; taşınacak

yüklerin ağırlıkları, yüzey şekilleri, yerel hava koşulları, zeminin özellikleri ve herhangi çevresel etkene göre şekillenir (Manwell vd. 2002).

Diğer bir önemli sorun da rüzgar türbininin sahaya taşınmasıdır. Küçük türbinlerin paketlenerek konteynır içinde karayolu vasıtasıyla taşınması mümkündür. Büyük türbinler ise parçalar haline sahaya taşınarak orda monte edilmek zorundadır. Uzak bölgelere kurulacak türbinler için ise türbin boyutunu ve tasarımını sınırlandırabilir ya da helikopterlerle taşımak gibi maliyetli çözümler üretilebilir. Şekil 5.11’de büyük bir rüzgar türbininin montajı gözükmektedir.



Şekil 5.11: Rüzgar türbininin montajı

Sahada montaj sırasında karşılaşılabilecek sorun henüz tasarım aşamasındayken düşünölmelidir. Montajın kolaylık yapılabilmesi, türbinin boyutu ve ağırlığına, uygun boyutta vinçlerin bulunmasına, türbin tasarımına ve bölgeye olan erişime bağılıdır. Küçük ve orta ölçekli türbinler sahada bir vinç yardımıyla nispeten kolayca inşa edilebilir. Hatta bazı türbinler zeminde monte edilerek daha sonra vinç yardımıyla temele bağlanabilir. Sahanın uzaklığı veya uygun vincin bulunamaması durumunda devirmeli kuleler kullanılabilir. Türbinin tamamı ve kulesi yerde monte edilerek hidrolik pistonlar yardımıyla kulenin dikey montajı yapılır. Bu tip bağlantılarda bakım amacıyla türbine ulaşmak kolay olmaktadır. Büyük türbinlerin inşası ise teknik olarak tam bir mücadele gerektirir. Kule parçaları, makine dairesi ve kanatların her biri oldukça büyük ve ağır olabilir. Bu yüzden büyük vinçlere gerek duyulur. Ayrıca türbinler teleskopik kulelerle veya kuleye entegre kaldırma sistemleriyle tasarlanabilir (Manwell vd. 2002).

6. Yapılan Çalışma

6.1 Kule Geometrisi

İncelenen çelik kule Enercon E-48 tipi 800 kW güce sahip yatay eksenli rüzgar türbininin taşıyıcı kulesidir. Üç kanatlı olarak tasarlanan türbinin rotor süpürme alanı 1810 m²'dir. Kanatlar GRP (epoksi) malzemeden yapılmış olup her birinin uzunluğu 22.8 m'dir. Kule hariç rüzgar türbininin toplam ağırlığı 34.5 tondur. Türbinin bileşenlerine göre ayrı ayrı ağırlıkları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Söz konusu kule Gemlik'teki Çimtaş fabrikasında yapılmış olup, 54.55 m yüksekliğindedir. Montaj kolaylığı sağlaması açısından üç parça halinde imal edilmiştir. İçi boş tüp şeklindeki kule dairesel kesitli ve koni şeklinde olup, dolayısıyla dipten tepeye doğru çıkıldıkça azalan çaplara sahiptir. Silindirik bir geometri yerine konik bir geometrinin kullanılmasının tek amacı kule maliyetinin azaltılmasıdır. Dip çapı 3.30 metre olan kulede makine dairesinin bağlı olduğu en üst noktaya ulaşıldığında çap 1.33 metreye kadar düşmektedir. Kulede kullanılan çelik levhaların et kalınlıkları 22 mm'den 12 mm'ye kadar değişmektedir. Şekil 6.1'de kulenin yükseklik boyunca değişen et kalınlıkları verilmiştir.

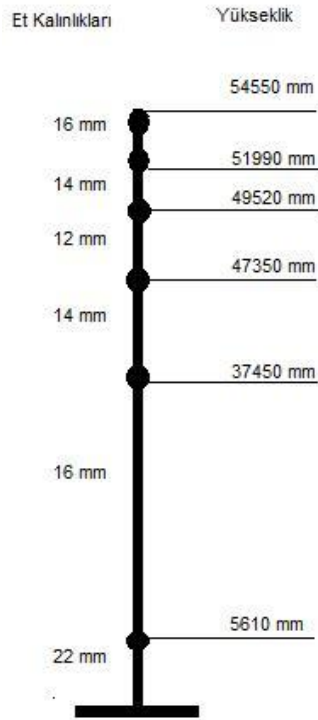
Çizelge 6.1: Türbin bileşenlerinin ağırlıkları

Bileşen	Ağırlık
Makine Dairesi	5 kN
Rotor ve Mil	15 kN
Jeneratör	14.5 kN
Toplam Ağırlık	34.5 kN

Önceden de belirtildiği gibi üç parça olarak üretilen kulenin bağlantıları, birleşim yerlerine kaynatılmış flanşlar sayesinde yapılmaktadır. Montaj ve bakım işlemlerinin kolaylığı açısından flanş bağlantıları kulenin sadece iç tarafında yer almaktadır. Temelle olan bağlantı flanşı, ara bağlantı flanşları (2 adet) ve makine dairesi ile olan bağlantı flanşlarının çapları sırası ile 3576 mm, 2530 mm, 1870 mm, 1332 mm'dir.

Bu flanşların malzemeleri EN 10113 malzeme olup yüksek dayanımlı yapı çelikleridir. Flanşlar dışındaki çelik plakaların malzemesi ise EN10025 yapı çeliğidir.

Yorulma dayanımı bakımından tüm kaynaklı birleşimler tam nüfuziyetli yüksek kalite alın kaynağı olarak yapılmıştır. Yerel burkulmaların kritik öneminden dolayı plakaların izin verilen tolerans değerleri kalite açısından A sınıfı olarak seçilmiştir. Bazı rüzgar türbini kulelerinin aksine bu kulenin iç tarafında nervür halkalarının kullanılmasına gerek duyulmamıştır.

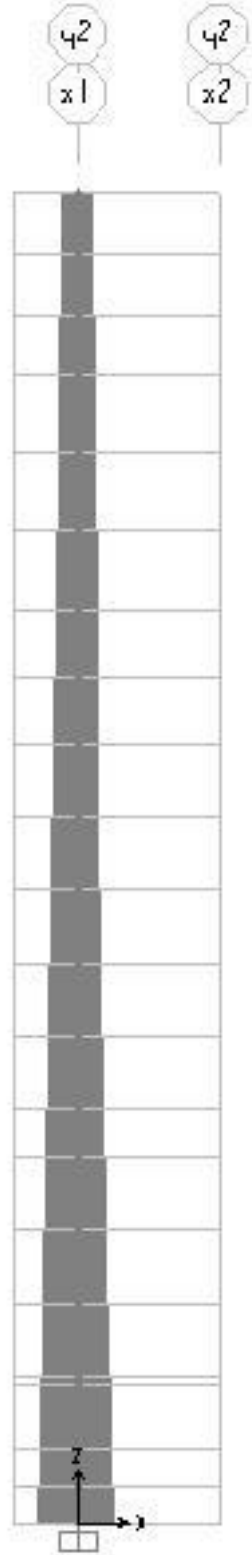


Şekil 6.1: Kule yüksekliği boyunca et kalınlığı değişimi

6.2 Kulenin Modellenmesi

Kulenin yapısal analizi SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılım ile yapının doğal titreşim hesabı, öz ağırlık ve rüzgar yükleri etkisindeki iç kuvvet ve yerdeğiştirmeleri belirlenmiştir. Ayrıca mevcut bir rüzgar hız kaydından üretilen ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal hesap yapılmıştır.

Koni biçimli kule 21 adet çubuk elemana bölünmüştür. Her çubuk elemanda çap sabit kabul edilmiştir. Çubuk elemanların boyları tanımlanırken; flanşlı bağlantı noktaları, et kalınlıklarının değişkenlik gösterdiği noktalar ve koni formuna uygunluk esas alınmıştır. (Şekil 6.2)



Şekil 6.2: Kulenin modeli

Kule yüksekliği boyunca kullanılan çaplar Çizelge 6.2’de toplu olarak verilmiştir. Kule teme ankastr olarak bağlanmıştır. Daire kesitli her bir bölümün öz ağırlığı hesaplanmıştır. Ard arda gelen bölümlerin yükseklikleri de göz önüne alınarak

ağırlıklı ortalamalar alınmış ve elde edilen öz ağırlık yükleri ara düğüm noktalarına verilmiştir. Bu durumda, yükseklik boyunca kule öz ağırlığının değişimi Çizelge 6.3'te verilmektedir. Kule toplam öz ağırlığı 47.35 ton olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2: Yüksekliğe göre çaplar

Yükseklik (mm)	Kesit Çapı (mm)	Yükseklik (mm)	Kesit Çapı (mm)	Yükseklik (mm)	Kesit Çapı (mm)
0-1500	3300	15000-16930	2530	34630-37450	1794
1500-3000	3164	16930-19930	2418	37450-40650	1708
3000-5610	3045	19930-22930	2306	40650-43850	1621
5610-6000	3027	22930-25930	2194	43850-47050	1535
6000-9000	2891	25930-28930	2083	47050-49520	1468
9000-12000	2754	28930-31930	1971	49520-51990	1401
12000-15000	2618	31930-34630	1870	51990-54550	1332

Silindirik kesitli her bir bölümün ağırlıkları hesaplanmıştır. Birbirini takip eden bölümlerin yükseklikleri de göz önüne alınarak ağırlıklı ortalamaları alınmış ve elde edilen sonuçlar bölümler arasındaki düğüm noktası olarak kabul edilen noktalara atanarak kulenin toplam ağırlığı kule boyunca yayılmıştır.

Çizelge 6.3: Yükseklik boyunca kule öz ağırlığının değişimi

Yükseklik (mm)	Ağırlık (kN)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (kN)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (kN)
0-1500	2.6674	15000-16930	1.9143	34630-37450	1.9782
1500-3000	2.5567	16930-19930	2.8385	37450-40650	1.8714
3000-5610	4.2803	19930-22930	2.7150	40650-43850	1.7752
5610-6000	0.4633	22930-25930	2.5779	43850-47050	1.6803
6000-9000	3.4028	25930-28930	2.4465	47050-49520	1.0641
9000-12000	3.2407	28930-31930	2.3140	49520-51990	1.1827
12000-15000	3.0798	31930-34630	1.9749	51990-54550	1.3292

Tüm bunların yanı sıra, kulenin temel ile olan bağlantısı sabit kabul edilerek ankastre olarak duran model tamamlanmıştır.

6.3 Yük Koşulları

2010 yılında Türk Loydu'nun Kısım 200 olarak çıkardığı “*Rüzgar Türbinlerini Sertifikalandırma Esasları*” Bölüm 4'e göre rüzgar türbinlerine etkiyen yükler 4 ana gruba ayrılmıştır: Atalet ve ağırlık yükleri, aerodinamik yükler, işletim yükleri ve diğer yükler.

Atalet ve ağırlık yükleri; titreşimden, dönmeden, ağırlıktan ve sismik faaliyetlerden kaynaklanan, rüzgar türbinine etki eden statik ve dinamik yüklerdir.

Aerodinamik yükler; hava akımının ve bunun rüzgar türbinlerinin sabit ve hareketli parçalarıyla karşılıklı etkileşiminin neden olduğu statik ve dinamik yüklerdir. Hava akımı; pervanenin dönüş hızına, pervane düzlemindeki ortalama rüzgar hızına, türbülans derecesine, havanın yoğunluğuna, rüzgar türbini bileşenlerinin aerodinamik şekline ve bunların karşılıklı etkilerine ve aeroelastik etkilere bağlıdır.

İşletim yükleri; rüzgar türbininin işletimi ve kontrolünden kaynaklanır. Bunlar çeşitli kategorilere ayrılırlar. Bunlar pervane devrinin kontrolü, kanat açısı değişiminin tork kontrolü veya diğer aerodinamik cihazlardır. Diğer işletim yükleri; pervanenin harekete geçmesi ve durması, jeneratörün devreye girmesi ve devreden çıkması ile yönlendirme hareketleri sırasında oluşan mekanik frenleme ve geçiş yükleridir.

Diğer yükler (iz yükleri, darbe yükleri, buz yükleri vb.) de oluşabilir ve bunların ilgili olanlarının dâhil edilmesi gerekir. Tesis alanının özel koşulları da dikkate alınmalıdır.

Tasarım amacıyla, rüzgar türbininin ömrü, rüzgar türbininin karşılaşılabileceği en önemli koşulları kapsayan tasarım koşulları ile karakterize edilebilir. Yük durumları; dış koşullar ile birlikte, özel montaj, bakım ve işletim durumları veya tasarım koşullarının kombinasyonundan belirlenmelidir. Kontrol ve emniyet sistemlerinin davranışları ile birlikte, ilgili yük durumları, makul bir oluşma olasılığı dahil edilerek alınmalıdır. Genel olarak bir rüzgar türbininin yapısal bütünlüğünün belirlenmesinde kullanılan yük durumları aşağıdaki kombinasyonlardan hesaplanır:

- Normal tasarım koşulları ve normal dış koşullar
- Normal tasarım koşulları ve aşırı dış koşullar
- Hataya ait tasarım koşulları ve buna ilişkin dış koşullar
- Taşıma, montaj ve bakıma ait tasarım koşulları ve buna ilişkin dış koşullar.

Bu çalışma kapsamında kulenin normal tasarım koşulları ve aşırı dış koşullar durumu için atalet ve ağırlık yüklerinin yanı sıra aerodinamik yüklerin varlıkları statik ve dinamik açıdan ele alınacaktır (Türk Loydu, 2010).

6.4 Statik Rüzgar Yükü Durumu

Önceki bölümde bahsedildiği gibi; kulenin kendi ağırlığı, yüksekliği boyunca düğüm noktalarına dağıtılmış, buna ek olarak kulenin tepesinde bulunan makine dairesi ile

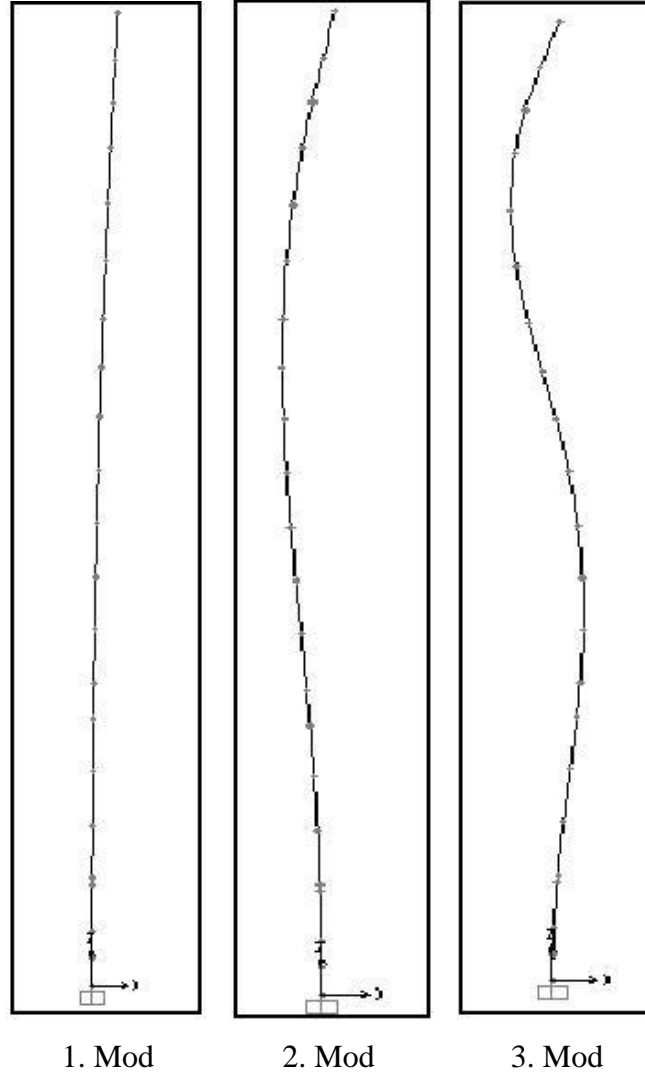
birlikte rotorun da ağırlığı (toplam 34.5 kN) noktasal bir yük olarak eklenmiştir. Böylece yapının doğal frekanslarının bulunması için yeterli olan kütle ve rijitlik ile ilgili tüm parametreler girilmiştir.

SAP2000 programında yürütülen analiz sonucunda sistemin ilk 32 mod şekli hesaplanmıştır. Bu sayı X ve Y doğrultularındaki mod şekillerinin toplamıdır. Ancak kule kesitinin dönel simetrisi dolayısıyla X ve Y doğrultularındaki titreşim özellikleri aynıdır. Sonuç olarak her bir doğrultu için, 16 adet titreşim modu dikkate alınmıştır.

Yapının cevabı, modal vektörlerin ve deformasyon vektörlerinin zamana bağlı bazı çarpanlar ile çarpılarak toplanmasından elde edilmektedir. Modların yapının deformasyonuna katılımı farklı düzeylerde dir. Mod katılım oranları analiz sırasında toplam kütle oranı olarak da ifade edilebilmektedir. Çizelge 6.4'te de, bir doğrultudaki ilk 16 modun ayrı ayrı ve yığışlımlı kütle katılım oranları ve modların periyot değerleri verilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi ilk üç modun kütle katılım oranı toplamı %97 değerine erişmiştir. Şekil 6.3'te ilk üç mod şekli ve bu modların frekansları verilmiştir.

Çizelge 6.4: Mod periyotları ve kütle katılım oranları

Mod No (Birimsiz)	Periyot (Saniye)	Kütle Katılım Oranı (Birimsiz)	Yığışlımlı Kütle Katılım Oranı (Birimsiz)
1	2.253796	0.91051	0.91051
2	0.381517	0.05143	0.96194
3	0.138299	0.00787	0.96981
4	0.076060	0.01780	0.98762
5	0.071579	0.00173	0.98958
6	0.044140	0.00066	0.99032
7	0.030440	0.00037	0.99069
8	0.023101	0.00016	0.99531
9	0.018074	4.774E-05	0.99536
10	0.014651	0.00159	0.99696
11	0.014643	3.044E-05	0.99699
12	0.012600	1.776E-05	0.99701
13	0.011066	5.759E-06	0.99702
14	0.009629	2.431E-06	0.99788
15	0.008805	1.647E-06	0.99788
16	0.008195	1.738E-08	0.99789



1. Mod 2. Mod 3. Mod

1. Mod Frekansı (Hz)	0.44
2. Mod Frekansı (Hz)	2.60
3. Mod Frekansı (Hz)	7.23

Şekil 6.3: İlk üç mod şekli ve frekansları

Kule üzerine etkileyen rüzgar yüklerinin belirlenmesinde DIN 1055'in dördüncü bölümü kullanılmıştır. Rüzgar yükü yapının şekline bağlı olup; basınç, emme ve sürtünmenin birleştirilmiş etkilerinin bir sonucudur. Yapı üzerine etkileyen bileşke rüzgar yükü aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$W = c_f \cdot q \cdot A \quad (6.1)$$

Burada, q rüzgar dinamik basıncı, c_f yapının şekli ve rüzgarın yönüne bağlı bir fonksiyon olan aerodinamik katsayısı ve A ise etkin rüzgar alanıdır. Silindirik yapılar için; c_f katsayısı ve A referans alanı, ilgili standardın 6.2 bölümündeki tablolardan seçilebilir. Silindir çapı d , yüksekliği L olmak üzere A referans alanı $A=d.L$

eşitliğinden bulunabilir. Bu çalışmada, referans alanı (A) değeri yerine silindir çapı (d) alınacaktır. Bunun nedeni SAP2000 programında girilecek yüklerin şerit yük olarak girilmesi ve programın L boyu uzunluğunca bileşke yükü bulmasıdır. c_f katsayısı ise $c_f = c_{f0} \cdot \Psi$ 'dir. Buradaki c_{f0} değeri genellikle 1.2 alınabilir. Daha kesin bir sonuç için standarttaki Şekil 2'ye bakılabilir, ancak bu çalışmada 1.2 değeri esas alınmıştır. Ψ değeri ise indirgeme faktörü olup standarttaki Şekil 14'ten seçilebilir.

Rüzgarın dinamik basıncı ise aşağıdaki ifadeden bulunabilir;

$$q = \frac{1}{2} \cdot g \cdot v^2 \quad (6.2)$$

Havanın yoğunluğu için aşağıdaki kabulü yapmamız yeterli olmaktadır;

$$g = 1.25 \text{ kg/m}^3 = \frac{1}{800} \frac{\text{kN s}^2}{\text{m}^4} \quad (6.3)$$

Rüzgar hızını m/s cinsinden alıp formülde yerine koyduğumuzda aşağıdaki sadeleşmiş ifadeye ulaşabiliriz (Türk Loydu, 2010);

$$q = \frac{v^2}{1600} \text{ kN/m}^2 \quad (6.4)$$

Rüzgar hızı ve dinamik basınç, rüzgar yükleme alanı ile yer seviyesi arasındaki yüksekliğin bir fonksiyonu olarak hesaplandığında aşağıdaki Çizelge 6.5 oluşur:

Çizelge 6.5: DIN 1055 standardına göre yüksekliğe bağlı hız ve dinamik basınç değerleri

Rüzgar Yükleme Alanının Yerden Yüksekliği (m)	Rüzgar Hızı (m/s)	Dinamik Basınç (kN/m ²)
0 - 8	28.3	0.5
8 - 20	35.8	0.8
20 - 100	42.0	1.1
>100	45.6	1.3

Dairesel kesitli kesik koni biçimindeki kuleyi modellenirken 21 adet parçaya ayrılmış ve her bir parça silindir olarak modellenmiştir. Statik rüzgar yükünü kule boyunca hesaplamak için de benzer bir yaklaşım kullanılmıştır. Bilindiği üzere rüzgar hızı yerden yukarıya doğru çıkıldıkça artmaktadır. Bu artış düşey rüzgar profiline bağlı olan bir artıştır ve doğrusal değildir. Bu çalışmada, kulenin her bir elemanına karşı gelen rüzgar profili parçasının üniform olduğu kabul edilmiştir. Kule

boyu 54.55 metre olduğundan DIN 1055 standardına göre maruz kalacağı en büyük rüzgar hızı 42 m/s'dir. Kulede seçilen eleman yükseklikleri esas alınarak, yerden 9 metre yüksekliğe kadar olan ilk 5 elemanda 28.3 m/s, 22.93 metreye kadar olan sonraki 5 elemanda 35.8 m/s, geri kalan 11 elemanda ise 42 m/s rüzgar hızının statik olarak etkidiği kabul edilmiştir. (6.4) ifadesine göre hesaplanan dinamik basınçlar ve karşı gelen rüzgar yükleri Çizelge 6.6'te verilmiştir.

Çizelge 6.6: Kule boyunca etki eden rüzgar yükleri

Yükseklik (m)	Rüz. Hızı (m/s)	Dinamik Basınç (kN/m ²)	W (kN/m)
51.99-54.55	42.0	1.1025	1.454
49.52-51.99	42.0	1.1025	1.529
47.05-49.52	42.0	1.1025	1.602
43.85-47.05	42.0	1.1025	1.675
40.64-43.85	42.0	1.1025	1.769
37.45-40.65	42.0	1.1025	1.864
34.63-37.45	42.0	1.1025	1.958
31.93-34.63	42.0	1.1025	2.041
28.93-31.93	42.0	1.1025	2.151
25.93-28.93	42.0	1.1025	2.274
22.93-25.93	42.0	1.1025	2.395
19.93-22.93	35.8	0.8010	1.829
16.93-19.93	35.8	0.8010	1.918
15.00-16.93	35.8	0.8010	2.006
12.00-15.00	35.8	0.8010	2.076
9.00-12.00	35.8	0.8010	2.184
6.00-9.00	28.3	0.5006	1.433
5.61-6.00	28.3	0.5006	1.500
3.00-5.61	28.3	0.5006	1.509
1.50-3.00	28.3	0.5006	1.568
0.00-1.50	28.3	0.5006	1.635

Bu aşamaya kadar kule üzerinde etkili olan statik rüzgar yükleri hesaplanmıştır. Bunun haricinde kulenin üst noktasına bağlı olan kanatların da rüzgar yükünün hesaplanması gerekmektedir. Buradaki yaklaşım ise, kulenin tepesindeki makine dairesine bağlı olarak duran kanatların üzerine gelen yüklerin toplanarak sanki göbeğe etki eden tekil bir yük varmış gibi kabul edilmesidir. Tek bir kanadın yüzey alanı 27 m²'dir. Kanat sayısı üç olduğundan toplam referans yüzey alanı 81 m²'dir. Kulenin yüksekliği 54.55 metre, bir kanadın uzunluğu ise 22.8 metre olduğundan toplam yükseklik 100 metrenin altındadır. Bu yüzden kanatların referans yüzey alanındaki rüzgar hızı tablodan 42 m/s olarak seçilmiştir. (6.4) ifadesinde gerekli değerler yerine konulduğunda kulenin tepesine etki eden statik rüzgar yükü 88.41 kN ve maksimumu yer değiştirme değeri ise 33.42 cm olarak bulunur. Bu hesaplamada

kule yükü için yapılanlardan farklı olarak yayılı yük yerine tekil yük kullanıldığı için ifadenin orijinalinde olduğu gibi A referans alanı doğrudan kullanılmıştır.

6.5 Mevcut Kesitlerin Gerilme Analizi

Bu bölümde incelenen kulenin özağırlık ve statik rüzgar yükleri etkisinde gerilme analizleri yapılmıştır. Kulenin tüm kesitlerine normal kuvvetle momentin birlikte etki etmesi durumu söz konusudur. Kulenin öz ağırlığı ve üzerinde taşıdığı makine dairesi ve kanat ağırlıkları kule üzerinde aksel kuvvetler oluşturmakta, kule boyunca ve kanat yüzeylerine etkileyen rüzgar yükü ise eğilme momenti oluşturmaktadır.

Basınç aksel kuvveti ve eğilme momenti etkisindeki kesitte oluşan en büyük aksel gerilme aşağıdaki eşitlikle ifade edilir;

$$\sigma_{\max} = \omega \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \quad (6.5)$$

Bu eşitlikte; ω burkulma katsayısını, N basınç kuvvetini, F enkesit alanını, M eğilme momentini, W kesit mukavemet momentini ifade etmektedir. Bu ifade ile belirlenen gerilme büyüklüğü rüzgarlı durum için tanımlanmış $\sigma_{em}=1.6$ kN/cm² emniyet gerilmesi ile karşılaştırılacaktır.

Kulenin statik yükler etkisindeki analizi bazı kritik kesitlerde yapılmıştır. Bunlar, kulenin temele bağlandığı taban kesiti ile flanş bağlantı kesitleridir. Bunlar hazırlanan matematik modelde sırasıyla 1, 8 ve 15 nolu kesitlerdir. (Karataş, H., 1978)

Seçilen kesitlerin atalet yarıçaplarını (i_x) bulmak için aşağıdaki formül kullanılır;

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{F}} \quad (6.6)$$

Buna göre hesaplanan değerler çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7: Kesit atalet momentleri ve yarıçapları

Kesit No	Alan(cm ²)	Atalet Momenti(kgcm ²)	Atalet Yarıçapı(cm)
1	2265.59	30,431,894	115.90
8	1263.67	9,983,740	88.89
15	893.72	3,531,916	62.86

İncelenen kulenin alttan ankastre konsol sistem olması dolayısıyla; S_k burkulma boyu, gerçek kule boyunun iki katıdır. Kule boyu 5455 cm olduğundan $S_k=10910$ 'dur. Burkulma katsayılarının belirlenmesi için kesit narinlikleri (λ) aşağıdaki ifade ile belirlenmiştir;

$$\lambda = S_k / i_x \quad (6.7)$$

Hesaplanan narinliklere göre çelik yapılar için burkulma katsayıları ilgili tablodan seçilerek (Deren vd. 2008) normal gerilme ve moment değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8: Seçilen kesitlerdeki Normal gerilme ve Moment etkisi değerleri

Kesit No	Burkulma Katsayısı (ω)	Normal Gerilme (kN/cm ²)	Moment Etkisi (kN/cm ²)	Toplam Gerilme (kN/cm ²)
1	1.79	0.038	0.418	0.456
8	2.55	0.056	0.632	0.688
15	5.08	0.061	0.539	0.600

Görüldüğü üzere toplam gerilme içinde moment etkisinin doğurduğu gerilme, normal gerilmeye göre daha yüksek bir yüzdeye sahiptir. İncelenen kesitlerin toplam gerilme değerlerine baktığımızda, kabul edilen $\sigma_{em} = 1.6$ kN/cm² emniyet gerilme değerinin altında olduğu görülmektedir ki bu durum emniyet sınırları içinde kaldığının kanıtıdır.

6.6 Dinamik Rüzgar Yüğü Durumu

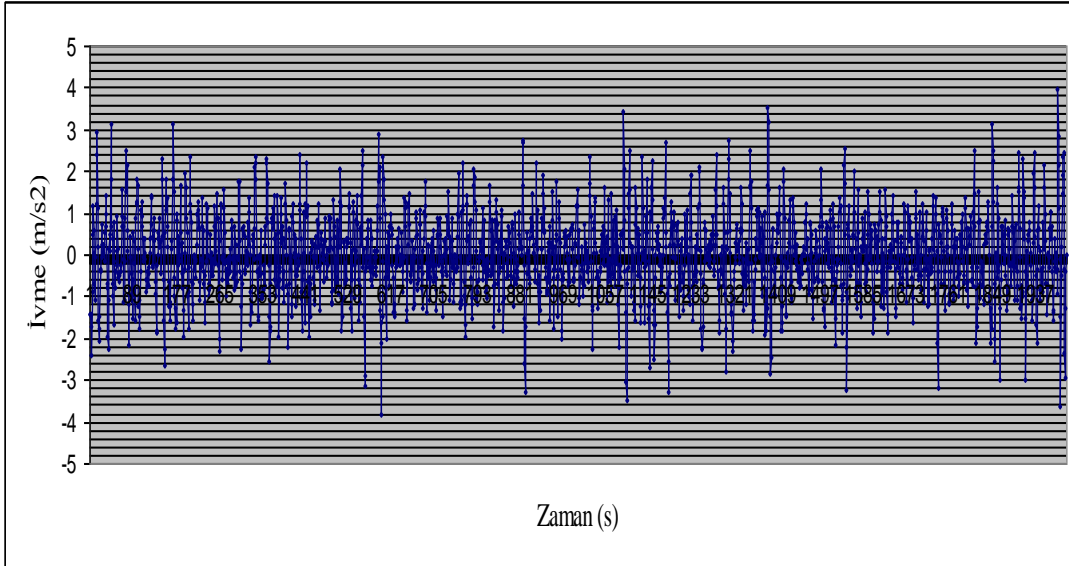
Bir önceki bölümde statik rüzgar yükü etkisindeki davranışı incelenen kulenin dinamik rüzgar yükü altındaki davranışı bu bölümde incelenmiştir. Diğer bölümden farklı olarak ise DIN 1055 Bölüm 4 standardında yer alan statik rüzgar yükünün yerine bir zaman serisi olarak kuleye etkiyen değişken büyüklüklerdeki rüzgar yükü kullanılmıştır.

Burada kulede yük oluşturacak rüzgar verisi olarak yaklaşık 5.5 saatlik aşırı rüzgarlı bir durumun kaydı kullanılmıştır. Kullanılan rüzgar verisi 60 metre yükseklikte anemometre vasıtasıyla ölçülmüş, örnekleme frekansı 1 Hz olan 20,000 adet rüzgar hızı verisinden oluşmaktadır. Ölçülen rüzgar hızlarının birimi m/s cinsindedir.

Rüzgar verisinin mevcut durumu SAP2000 programında kullanım için uygun değildir. Bu yüzden rüzgar hızı verilerinden oluşan bu kaydın ivme kaydına dönüştürülmesi gerekmektedir. Rüzgar hızlarının ivmeye dönüştürülmesi için 7 noktalı diferansiyel operatörü kullanılmıştır. 7 noktalı diferansiyel metoduna göre aşağıdaki denklemden faydalanılır;

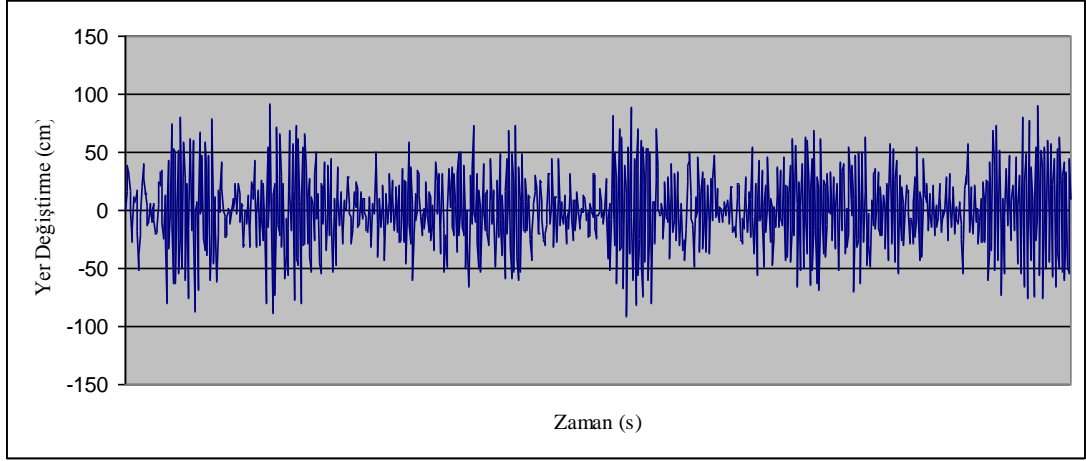
$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{3(n_{k+3} - n_{k-3}) + 2(n_{k+2} - n_{k-2}) + (n_{k+1} - n_{k-1})}{28\Delta t} \quad (6.6)$$

Burada k değeri türevi alınmak istenen veri noktasını, n_k ise bunun değerini, Δt ise örnekleme periyodunu temsil etmektedir. Bu metoda göre rüzgar verisinin 5.5 dakikaya denk gelen ilk 2000 terimi ivmeye dönüştürüldüğünde Şekil 6.4'deki grafiğe ulaşılır.

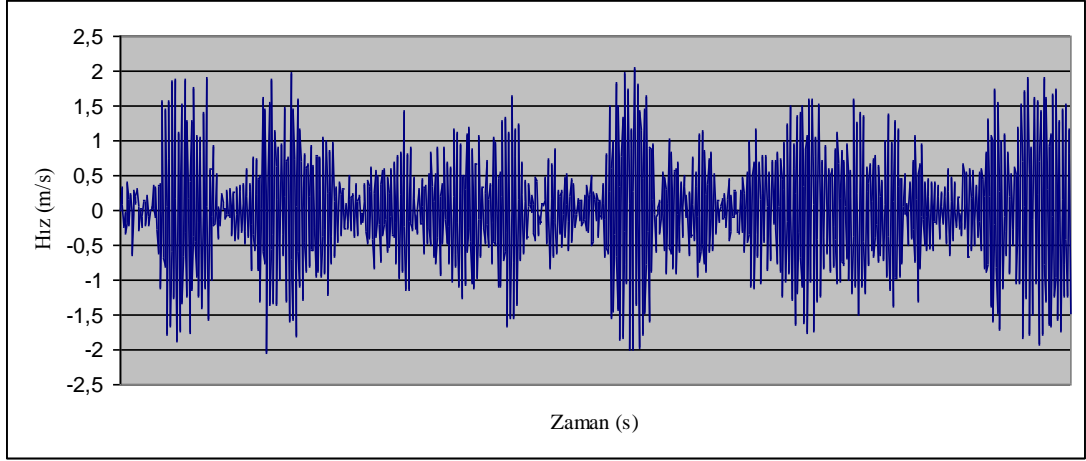


Şekil 6.4: Rüzgar girdisinin ivme-zaman grafiği

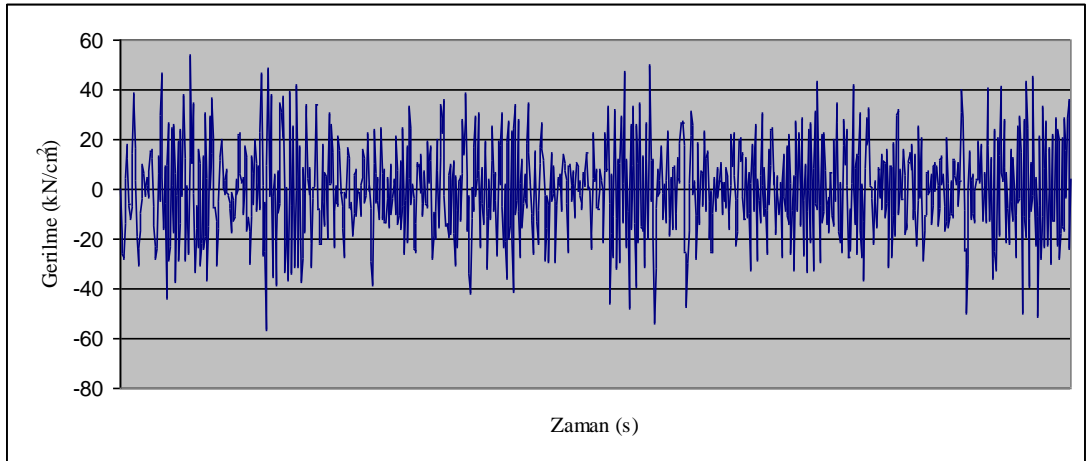
Görüldüğü üzere ivme değeri yaklaşık olarak $\pm 4m/s^2$ arasında değişkenlik göstermektedir. İvmeye dönüştürülmüş rüzgar verisi, 54.55 metre yüksekliğindeki kulenin üst noktasında girdi olarak kullanıldığında elde edilen sonuçlar Şekil 6.5-6.7'de sırasıyla tepe noktasındaki yer değiştirme ve hızların yanında, kulenin yere bağlı olduğu kesitindeki kuvvet değerlerinin grafikleri verilmiştir. Bu grafiklere göre tepe noktasındaki en büyük yer değiştirme 92.1 cm ve en yüksek hız değeri 2.05 m/s'dir. Dip kesite gelen en büyük gerilme ise 56.4 kN/cm^2 'dir.



Şekil 6.5: Tepe noktasındaki yerdeğiştirme-zaman grafiği



Şekil 6.6: Tepe noktasındaki hız-zaman grafiği



Şekil 6.7: Dip kesitteki kuvvet-zaman grafiği

7. Sonuç

Bölüm 6’da yapılan çalışma ve sonuçları ayrı ayrı detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu bilgiler ışığında sonuçların bir arada gösterilmesi gereği doğmuştur.

Yapının SAP2000 programı yardımı ile modellenmesinin ardından ilk üç öz frekansının belirlenmesi ile birlikte mod şekilleri bulunmuştur. Buna göre yapının öz frekansları Çizelge 7.1’deki gibidir.

Çizelge 7.1: Yapının öz frekansları

1. Mod Frekansı (Hz)	0,44
2. Mod Frekansı (Hz)	2,60
3. Mod Frekansı (Hz)	7,23

Daha sonra yapının statik ve dinamik rüzgar yükleri altındaki davranışları incelenerek bir karşılaştırma yapılmıştır. DIN 1055 standardının 4. bölümüne göre statik olarak rüzgar yüküne maruz bırakılan yapıda 33.42 cm’lik bir yerdeğiştirme olduğu belirlenmiştir. Aynı model üzerinde yapılan ve gerçek rüzgar kayıtlarının kullanıldığı dinamik yükleme durumunda ise 92.10 cm’lik bir yerdeğiştirme olmaktadır. Dinamik rüzgar yükü durumunda yerdeğiştirmenin haricinde tepe noktasındaki en yüksek hız değeri 2.05 m/s ve dip kesitteki en büyük gerilme değeri 56.4 kN/cm² olarak bulunmuştur.

Tüm bunların yanı sıra kritik olarak görülen 1,8 ve 15 nolu kesitler için gerilme hesapları yapılarak burkulma etkisindeki normal gerilme ve moment etkisi göz önüne alınmıştır. Çizelge 7.2’de seçilen kesitler için normal gerilme ve moment etkisinin sonuçları ayrı ayrı verilmiştir.

Çizelge 7.2: Seçilen kesitlerdeki Normal gerilme ve Moment etkisi değerleri

Kesit No	Burkulma Katsayısı (ω)	Normal Gerilme (kN/cm ²)	Moment Etkisi (kN/cm ²)	Toplam Gerilme (kN/cm ²)
1	1,79	0.038	0.418	0.456
8	2,55	0.056	0.632	0.688
15	5,08	0.061	0.539	0.600

Bu değerler kabul edilen 1.6 kN/cm^2 'nin altında olduğundan kesitlerin emniyetli olduğu belirlenmiştir

Daha öncede belirtilmiş olduğu gibi, rüzgar türbin kulelerinde görülen yapısal titreşimlerin kulede meydana getirdiği şekildeğiştirmelerin elastik bölgede kalıp kalmadığı ve uzun süreli işletim yükleri altında zaman içinde kulelerde meydana gelecek yorulma gibi etkilerin incelenmesi amaçlı geniş kapsamlı bir çalışmanın ilk adımları olarak gerekli yapısal modellerin oluşturulması ve teorik altyapının kurulması hedefini güden bu çalışmada elde edilen sonuçlar altıncı bölümde verilmiştir. İleride gerçek türbin kulelerinden alınacak titreşim işaretlerinin incelenmesi ve yapısal karakteristiklerin çıkarılması ile devam ettirilecek olan çalışmaların ana hedefi, rüzgar enerji santrallerinde kullanımda olan türbin kulelerinin güvenirlik ve yorulma analizlerinin toplanan titreşim işaretleri ile yapılabilmesini sağlamaktır.

KAYNAKLAR

- Altuntaşoğlu Z.**, 2009: “Yerli Rüzgar Enerji Teknoloji Üretimi Destek Politikaları, İstihdam Olanakları ve Türkiye’deki Durum” Mühendis ve Makine Dergisi Sayı 594
- Barbu C.**, 2009: Wind energy systems challenges for the future, *Symposium on Control & Modeling of Alternative Energy Systems*
- Bazeos N., Hatzigeorgiou G.D., Hondros I.D., Karamaneas H., Karabalis D.L., Beskos D.E.**, 2002: *Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower*
- Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E.**, 2001: *Wind Energy Handbook*
- DIN 1055 Part 4**, 1986: *Design Loads for Buildings*
- Durak M.**, 2010: 2009: *Yılı Sonu İtibarı ile Dünya ’da ve Ülkemizde Rüzgar Elektrik Santral (RES) Projelerinin Son Durumu*, TÜREB
- Hansen M.**, 2008: *Aerodynamics of Wind Turbines 2nd edition*
- Hau E.**,2006:*Wind Turbines; Fundamentals, Technologies, Application, Economics 2nd edition*
- Johnson L. G.**, 2001: *Wind Energy Systems .*
- Karataş, H.**, 1978: *Mukavemet*
- Kurban M., Mert Kantar Y., Hocaoğlu F. O.**, 2005: “Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Araştırılmasında Weibull ve Rayleigh Dağılımlarının Kullanılması”
- Lavassas I., Nikolaidis G., Zervas P., Efthimiou E., Doudoumis I.N., Baniotopoulos C.C.**, 2003: *Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower*
- Malkoç Y.**, 2008: “Rüzgar Enerjisi Kaynaklarımız” Yeni Enerji dergisi sayı:2
- Manwell J. F., Mc Gowan J. G., Rogers A. L.**, 2002: *Wind Energy Explained – Theory Design and Application*
- Türk Loydu**, 2010: Rüzgar Türbinlerini Sertifikalandırma Esasları Kısım 200- Cilt F
- Uys P.E., Farkasb J., J’armaib K., van Tondera F.**,2006:*Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure*
- Wagner S., Bareiß R., Guidati G.**, 1996: *Wind Turbine Noise*

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Onur AÇIK

Doğum Yeri ve Tarihi: Mardin / 10.12.1984

Lisans Üniversitesi: Makine Mühendisliği/Yıldız Teknik Üniversitesi