

# TEMİZ ENERJİ YAYINLARI

## RÜZGÂR ENERJİSİ

RÜZGÂR KAYNAĞI .....	2
GİRİŞ .....	2
RÜZGÂR TÜRLERİ.....	2
RÜZGÂRA ÖZGÜ TANIMLAR .....	3
RÜZGÂR ÖLÇÜMLERİ .....	4
Rüzgâr Değerlendirmeleri.....	6
Weibull Dağılımı: .....	6
Rayleigh Dağılımı: .....	6
Rüzgâr Gücü: .....	6
RÜZGÂR ENERJİSİ.....	7
RÜZGÂR TÜRBÜNÜ.....	9
RÜZGÂR ÜRETEÇLERİ (JENERATÖRLER).....	13
RÜZGÂR SANTRALI (ÇİFTLİĞİ, PARKI).....	14
Rüzgâr Santralında Park Etkisi, Kuyrukyeli Etkisi (Wake Effect) .....	16

## RÜZGÂR KAYNAĞI

### GİRİŞ

Yer yüzeyinin gerek duyduğu enerjinin tümü güneşten gelir. Güneş yer yüzeyine her saat 100.000.000.000.000 kWh'lık enerji yayar. Başka bir deyişle, yer yüzeyi güneşten 1017 watt gücünde enerji alır. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %1-2 si rüzgâr enerjisine dönüşür. Yani rüzgâr enerjisi, hız enerjisine dönüşmüş güneş enerjisidir.

Karalar, denizler ve havaküre farklı özgül ısılarla dolayısıyla farklı sıcaklıklara sahip olurlar. Sıcaklık dağılımı, coğrafik ve çevresel koşullara bağlıdır. Yerkürede ortaya çıkan sıcaklık ve buna bağlı basınç farklılıkları, rüzgârın oluşmasına neden olur. Yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava, "rüzgâr" olarak isimlendirilmektedir. Yeryüzünde oluşan hava kütleleri hareketleri, yerin dönmesinden kaynaklanan "coriolis" kuvvetten ve yeryüzü ile akışkan hava kütleleri arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenirler.

Küresel rüzgârlar

Ekvator ve çevresi (0 derece enlemi) güneş ışınlarının yer yüzeyine geliş açılarındaki farklılıkları nedeniyle, güneş tarafından diğer enlemlere göre daha çok ısıtılır. Farklı ısınma ve farklı sıcaklık derecesi nedeniyle hava dolaşimleri başlamış olur. Sıcak hava, soğuk havadan daha hafiftir. Isınma sonucunda sıcak hava yukarıya doğru yükselir. Bu yükselme, yaklaşık olarak 10 km yüksekliğe kadar sürer. Yükselen hava bu yükseklikte kuzeye ve güneye doğru ayrılır. Eğer yer küre dönmemiş olsa idi, yükselen hava basit olarak kuzey ve güney kutuplara gider ve kutuplarda aşağılara çöker, tekrar ekvatora doğru hareket ederek sürekli çevrimine devam ederdi.



Hava kütleleri ekvatorda ısınarak yukarıya doğru hareket ederler. Belli bir yükseklikten sonra, kuzeye ve güneye doğru hareketlerine devam ederler. Her iki kürede 30 derece enlemlerde "coriolis kuvveti" hava kütlelerinin daha yüksek enlemlere hareketini önleyerek kuzeye ve güneye doğru hareket etmesine neden olur.

Hareket halindeki hava kütleleri, dünyanın dönüşünden dolayı kuzey yarımkürede sağa, güney yarımkürede sola doğru sapar. Sapmaya neden olan kuvvete "coriolis kuvveti" denir. Bu şekilde oluşan rüzgâra da "jeostrofik rüzgâr" denir. Aslında jeostrofik rüzgâr, basınç gradyanı ve coriolis kuvveti arasındaki dengeden oluşan ve yer yüzeyi ile etkileşmeyen kuramsal bir rüzgârdır. Bu rüzgâr izobarlara paraleldir. Gerçekte coriolis kuvveti bir kuvvet değildir. Yalnızca dünyada ki belli bir yerdeki hava parselinin yatay olarak hareketine bir bakış açısı sağlar. Basınç gradyanları arasındaki akış, aslında rüzgârın hareket kuvvetidir. Hava kütleleri yüksek basınç alanlarından dolayı tekrar aşağı seviyelere doğru inmeye başlarlar. Kutuplarda da havanın daha soğuk olmasından dolayı yüksek basınç alanları oluşur. Coriolis kuvvetinden dolayı baskın rüzgâr yönleri elementlere göre aşağıdaki şekilde oluşur.

Enlem	90-60 N	60-30 N	30-0 N	0-30 S	30-60 S	60-90 S
Yön	NE	SW	NE	SE	NW	SE

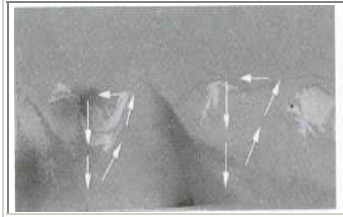
Çizelgedeki baskın yönleri yerel coğrafik yapıdan etkilenebilmektedir.

## RÜZGÂR TÜRLERİ

Tüm dinamik hava olayları atmosferin yer yüzeyine en yakın tabakası olan troposfer denilen katman içerisinde yer almaktadır. Kutuplar ve ekvator arasındaki hava devinimlerine bağlı olarak oluşan rüzgârların yanı sıra rüzgârdan, enerji üretimi açısından denizler, karalar, dağlar ve vadiler arasındaki hava akımlarına dayalı yerel rüzgârlarda oldukça önemlidir. Yani rüzgâr kaynağı küresel, bölgesel ve yerel olarak değişmektedir.

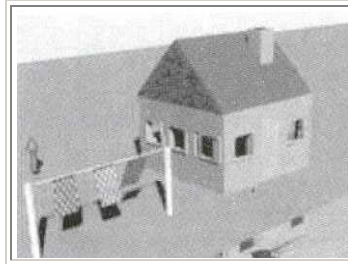
Yüzey rüzgârları yer yüzeyinden yaklaşık 100m yükseklik içerisinde oluşur. Ve yer yüzeyinden çok etkilenir. Yere yakın düzeylerde yüzey rüzgârının önünün jeostrofik rüzgârdan farklı olmasının neden budur. Rüzgâr enerjisinin asıl konusu yüzey rüzgârlarıdır.

Yerel rüzgârlar (dağ, vadi rüzgârları): bu rüzgârlar belli bir alanda bastın rüzgârı belirlemede önemlidir. Yerel rüzgârlar büyük ölçekli rüzgârlara katkıda bulunurlar. Büyük ölçekli rüzgârlar zayıf olduğu zaman yerel rüzgârlar, rüzgârın şeklini belirler.



vadi rüzgârları

**Deniz meltemi:** kara üzerindeki hava kütlesi güneş tarafından gündüz, deniz üzerindeki hava kütlesinden daha çabuk ısıtılır. Hava kütlesi yukarıya doğru hareket etmeye başlar. Böylece kara üzerinde alçak basınç alanı oluşur. Bu alana denizdeki hava kütlesi hareket ederek deniz melteminin oluşmasına neden olur.



Deniz Meltemi

Kara meltemi: akşam, kara ve deniz sıcaklıklarının eşitlenmesi süreci olduğundan hava sakindir. Gece ise, kara denizden daha soğuk olduğu için tersine hareket başlar. Yani hareket karadan deniz doğru olur. Buna kara meltemi denir. Bu rüzgârlar daha az şiddetlidir. Çünkü geceleyin kara ve deniz sıcaklıkları birbirine daha yakındır.

Jeostrofik rüzgâr: jeostrofik rüzgâr, sıcaklık farklılıkları dolayısıyla oluşan basınç farklılıklarından oluşur. Jeostrofik rüzgârın yerin yüzey yapısından etkilenmediği var sayılır. Bu rüzgârın olduğu yükseklik, yaklaşık olarak 1000m dir. Bu rüzgâr hava balonları kullanılarak ölçülür

## RÜZGÂRA ÖZGÜ TANIMLAR

Rüzgâr hızı

Rüzgâr dağılımı (frekansı)

Rüzgâr türbülansı (girdabı)

Rüzgâr hamlesi (gust)

Rüzgâr yönü

Rüzgâr gücü yoğunluğu

1. Rüzgâr hızının kısa periyot değişkenliği: rüzgâr hızı çok küçük periyotlarla daima değişen dalga özelliği göstermektedir. Değişimin büyüklüğünün nasıl olduğu hem havaya hem de yüzey koşulları ve engellere bağlıdır.

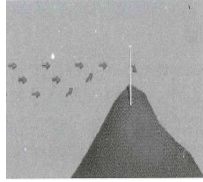
2. Günlük rüzgâr değişimi: Yer küredeki bir çok yerde, gündüzler gecelerden daha rüzgârlıdır. Bunun asıl nedeni deniz yüzeyi ve kara yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının gündüz gecedan daha fazla

olmasıdır. Bu durum, enerjinin gündüz geceden daha fazla üretilmesi ve tüketilmesinden dolayı önemli bir üstünlük sağlar.

3. Rüzgârın yıllık Değişimi: Rüzgârın yıldan yıla değişimi %10-20 arasındadır. Danimarka da bu oran 19 yıl boyunca yaklaşık %9-10 arasında gözetlenmektedir.

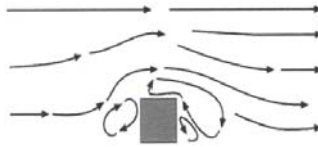
Rüzgâr hızlanması (tepe etkisi): Arazide türbinleri en iyi yerleştirilecek yer, hâkim tepe ve sırtlarıdır. Bu durumu arazide baskın rüzgâr yönü açısından olabildiğince üstünlük sağlar. Ayıca, tepelerde rüzgâr hızları, çevre arazilerden genellikle yüksektir. Tepenin rüzgârlı yanı ile kıyaslandığında, hava tepeye ulaşır ve tekrar dağılarak rüzgârsız yamaçtan alçak basınca doğru hareket eder. Düzgün ve pürüzsüz olmayan tepelerde yüksek rüzgâr hızı üstünlüğüne karşın türbülans önemli bir olumsuzluk oluşturur.

Rüzgâra Tünel Etkisi: Daha çok binalar arasında veya dar dağ geçitlerinde bu etkiye rastlanır. Hava, bina veya dağların rüzgârlı yanlarında sıkışır; rüzgâr hızı belirgin bir oranda artar. Buna tünel etkisi denir. Rüzgâr hızı açık arazide 6 m/s ise doğal tünel etkisi nedeniyle 9 m/s ye ulaşabilir. Bu tür yerlerde rüzgâr türbünü yerleşimi çok iyi bir yöntemdir. Bununla birlikte dikkatli olunması gerekir. Eğer siteyi çevreleyen arazi çok düz değilse, bu durumda tepeler çok kaba ve pürüzlü ise, çok türbülanslı bir ortam oluşur. Ve her yönde çok hızlı değişiklikler olur. Bu durumda rüzgârında fazla olma avantajı türbülans yüzünden tümüyle ortadan kalkar. Türbülans, türbinde bozulma ve yıpranma etkisi yaratır.



Tepede Rüzgâr

Rüzgâr türbülansı (girdabı): çok engebeli ve pürüzlü arazilerde binalar, ağaçlar gibi engeller çok fazla türbülans yaratır. Türbülans, düzenli olmayan rüzgâr akışıdır. Bu akış çevrede dönme ve vorteks yaratır. Türbülans, rüzgâr türbünün de, rüzgârdan enerji üretim verimliliğini azaltır. Türbülans, türbünde yıpranma hasarlanma ve bozulmalara neden olur. Kulelerin genellikle yüksek yapılmasının bir nedeni, hem türbülansdan kaçınmak hem de yüksek rüzgârdan daha çok yararlanıp daha çok elektrik üretmektir. Düşük türbülans yoğunluğu, rüzgâr türbinleri için daha fazla ömür sağlar. Denizlerde türbülans karadan daha azdır bu nedenle denize kurulan türbinler karaya kurulanlardan daha uzun ömürlüdür.



Engelde (bina) türbülans etkis

## RÜZGÂR ÖLÇÜMLERİ

Rüzgâr hızı ölçümleri genellikle kupalı tür anemometreler ile yapılır. Kupalı anemometreler, dikey eksenli olup, 3 adet kupası vardır. Kupanın dakikadaki dönme sayısı elektronik olarak kaydedilir. Böylece rüzgâr veya lazer türü anemometreler de bulunmaktadır. Bunlar, hava moleküllerinin davranışlarına ve hızların dayalı ilkelerle çalışırlar. Ayrıca, "sıcak telli anemometreler" rüzgâr ile telin soğuması ilkesine dayalı olarak çalışırlar. Kullanımı yaygın ve pratik değildir. Anemograflar rüzgâr hızlarını çizimsel olarak kaydeden aygıtlardır.



Kupalı anemometre

Öngörülen rüzgâr türbünü sitesinde rüzgâr hızı ve yönü ölçümlerinin en iyi yolu öngörülen "türbün göbeği" yüksekliğinde ölçüm yapılmasıdır. Bu yöntem, farklı yüksekliklerde rüzgâr hızı hesaplama belirsizliklerini ortadan kaldırır. Anemometre direğin en üstüne kurularsa, direktten kaynaklanan akım bozulmalarından etkilenmez. Eğer anemometre direğin yanına kurulmak zorunda kalırsa, öngörülen baskın yöne açık olacak şekilde kurulmalıdır. Yani kulenin rüzgâra yapacağı gölgeleme etkisi en aza indirilmelidir. Anemometrelerden ve yön sezgiciden alınan bilgiler ir mini bilgisayar üzerindeki yonga da toplanır. Bu şekilde veri toplamaya yarayan aygıtlara veri toplayıcılar denir. Veri toplayıcılar, genellikle normal büyüklükteki pillerle uzun süre işletilebilirler. Eğer ölçüm soğuk hava, buzlanma vb. ortamda yapılacak ise, ısıtmalı anemometreler kullanılır. Ancak, bunların enerji gereksinimleri için şebekeye bağlanma zorunluluğu, pratik olmayan yönleridir.

Rüzgâr hızı ölçümleri genellikle 10 dakika ile 60 dakikalık ortalama hız aralığında yapılır. Böylece bir çok standart değerlendirme programıyla konfigürasyon kolaylıkla sağlanır. Dünya Meteoroloji Örgütü'nün belirlediği standart ölçüm yüksekliği 10 metredir.

Rüzgâr, devinen havadır. Bu devinim bir vektör boyunca belirli bir kuvvettir. Bunun sonucunda rüzgâr, hız ve yön olmak üzere iki değişkenle ölçülür. Hızdaki ani dalgalanma veya değişiklikler hamle olarak adlandırılır. Gerçekte rüzgârın hızı, yönü ve hamlesi en iyi aletlerle ölçülür. Aletlerle ölçmenin olanaksız olduğu durumlar rüzgâr, kestirilerek de ölçülür. Kestirerek rüzgâr ölçümünde Beaufort ölçeği kullanılır.

### Beaufort Rüzgâr Ölçeği

Beaufort no	R.Hızı km/saat	R.Hızı m/sn	Tanım	Açıklama
0	<1	0-0.2	Sakin	Duman dikey olarak yükselir
1	1-5	0.3-1.5	Esinti	Duman hafif esinti ile yükselir. Rüzgâr yönü belirsizdir.
2	6-11	1.6-3.3	Hafif rüzgâr	Yapraklar kıpırdar. Esinti insan yüzünde hissedilir. Rüzgâr yönü yoktur.
3	12-19	3.4-5.4	Tatlı rüzgâr	Yapraklar ve ince dallar hareket eder.
4	20-28	5.5-7.9	Orta rüzgâr	İnce dallar hareket eder. Kağıt ve tozlar yükselir
5	29-38	8.0-10.7	Sert rüzgâr	Ağaçlar sallanmaya başlar
6	39-49	10.8-13.8	Şiddetli rüzgâr	Büyük ağaç dalları hareket eder. Açık iletkenler sallanır. Şemsiyenin kontrolü zorlaşır.
7	50-61	13.9-17.1	Çok şiddetli rüzgâr	Büyük ağaçlar sallanır yürüme zorluğu farkedilir.
8	62-74	17.2-20.7	Fırtına	Ağaçlardaki ince dal ve çöpler kırılır. Rüzgârda yürümek iyice zorlaşır.
9	75-88	20.8-24.4	Şiddetli fırtına	Binalarda hafif hasar oluşur. Çatı kiremetleri sökülmeğe başlar.
10	89-102	24.5-28.4	Tam fırtına	Binalar hasarlanır. Büyük ağaçlar kökünden sökülür
11	103-117	28.5-32.6	Çok şiddetli fırtına	Geniş ölçekli hasarlar olur.
12	>118	>32.7	Tayfun	Aşırı derecede hasarlar meydana gelir.

$$1\text{m/s}=3.6\text{km/h}=2.187\text{mph}=1.944\text{knots}$$

Meteorolojistler hava kestirimleri yapmak için verileri, meteoroloji istasyonları ve hava alanlarından toplarlar. Rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü bilgilerini, rüzgâr enerjisi parkına aday yerlerdeki rüzgâr koşullarını genel olarak değerlendirme için sık sık kullanırlar. Rüzgâr hızı, engel yakınında çevre arazisinin pürüzlülüğünden ve arazi eğiminden şiddetle etkilenir. Yapılan meteorolojik ölçümleri yerel koşullarla değerlendirilmedikçe "site" için rüzgâr koşullarını belirlemek son derece zordur. Bazı

durumlarda meteorolojik verilerin doğrudan kullanımı, site deki gerçek rüzgâr potansiyelinin altında kestirim yapılmasına yol açar.

## Rüzgâr Değerlendirmeleri

Elde edilen rüzgâr kayıtları, kalite kontrolü yapılarak istatistik çözümlenmeler de kullanılmak üzere değerlendirilir. Değerlendirmelerde, hem uzun dönemli rüzgâr kayıtlarını elde etmek, hem de farklı site ve farklı yüksekliklerde rüzgâr özelliklerini belirlemek için rüzgâr hızı dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlar, Rayleigh dağılımı, Weibull dağılımı ve Beta dağılımıdır.

## Weibull Dağılımı:

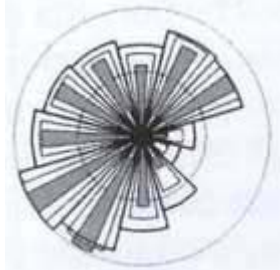
Rüzgârın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgâr endüstrisinde çok önemlidir. Türbün tasarımcıları, türbün iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgâr dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgâr ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgârların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgârların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir site için rüzgâr dağılımı ya ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde "Weibull dağılımı" ile belirlenir. Bu dağılım, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olasılığı "1" dir. Yani, sakin havalar da bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgârın her aralıkta toplam olma olasılığı %100 dür. Weibull dağılımı eğrisi simetrik değil çarpıktır. Bu eğriyi oluşturan her bir hız frekansları, ortalama hızın bulunmasını da sağlar.

## Rayleigh Dağılımı:

Eğer Weibull dağılımı şekil değişkeni 2 ise, böyle bir dağılıma "Rayleigh dağılımı" denir. Rüzgâr türbini üreticileri genellikle makine başarımlarını Rayleigh dağılımına göre verirler. Bunun nedeni, değişik yerlerdeki rüzgâr dağılımlarının bilinmemesidir.

## Rüzgâr Gülü:

Rüzgâr gülü, belirli kesimlerdeki rüzgârın esme sıklığını gösterir. Rüzgârgülü, aynı zamanda her bir kesimin ortalama rüzgâr hızına katkısının ne kadar olduğunu gösterir. Bir rüzgârgülü farklı kesimlerdeki oransal rüzgâr hızları bilgisini verir. Rüzgârgülleri yerden yere değişiklik gösterir. Yakın yerlerde ise, özellikle baskın yön açısından rüzgârgülleri birbirine yakınlık gösterir. Bu durumlarda pratikte interpolasyon veya korelasyon güvenle yapılabilir. Eğer dağ ve vadilerden oluşan karmaşık bir arazi var ise, bu yerler ile kıyı bölgeleri arasında önemli yön değişiklikleri olur. Bu durumlarda kestirimler yapmak genellikle güvenilir değildir. Rüzgârgülü yalnızca rüzgâr yönlü, türbün yerleşiminde son derece önemlidir. Eğer türbünleri bu yönde yerleştirmek gerekiyorsa, örneğin baskın enerji yönü kuzey ise doğu ve batı yönlerindeki engeller çok önemli değildir. Çünkü bu yönlerden herhangi bir rüzgâr gücü gelmez. Bunun yanında, rüzgârın şekli ve enerji içeriği yıldan yıla yaklaşık %10 değişir. Bu nedenle birkaç yıllık gözlemler sağlıklı yaklaşımlar için iyi sonuçlar verir. Genelde geniş rüzgâr parkı planlamacıları bir yıllık yerel ölçümlere güvenirlir. Bu ölçümlerle, yakın ve uzun dönemli meteorolojik gözlemlerden yararlanarak uzun dönemli güvenilir veri elde ederler.



**Rüzgâr Gülü**

# RÜZGÂR ENERJİSİ

Rüzgâr gücü insanlık tarafından binlerce yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünyada toplam 300.000 den fazla yel değirmeni olduğu bilinmektedir. Bunun dışında, yelkenlilerde ve su pompalama sistemlerinde rüzgâr kullanılmıştır.

## Rüzgâr Enerjisinin Olumlu Yönleri

- Sonlu fosil kaynakların kullanımının azaltmak ve bugünkü enerji üretim kaynaklarına destek olur.
- Türbünlerin oturduğu alan çok küçüktür ve türbünler arası alanların kullanıma olanak verirler.
- Rüzgâr gücünü elektriğe verimli dönüşümünü sağlar.
- Ömrü dolan türbünleri söküp kaldırmak kolaydır. Arazi yeniden kullanılabilir.
- Rüzgâr endüstrisi tüm dünyada gelişmektedir.
- Rüzgâr santral projeleri basit ve türbünlerin bakımı kolaydır.
- Teknolojik alt yapı vardır.
- Rüzgâr santralleri kurmak için gerekli kredi faiz oranları düşmüş ve yatırımcılar için rüzgâr santrali kurmak çekici duruma gelmiştir.

**Rüzgârdaki Enerji:** havanın ağırlığı ve hızı olması nedeniyle kinetik enerjisi vardır. Rüzgâr gücünün ve enerjisinin belli bir yörede belirlenmesi hız enerjisinden yararlanılarak yapılmaktadır.

Hız (kinetik) enerjisi =  $\frac{1}{2} (mv^2)$

Burada, m, havanın kütlesi (kg); v, havanın hızı (m/s) dir.

D yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>) V hacmi (m<sup>3</sup>) göstermek üzere  $m = Vd$  dir. Ve rüzgâra dik (A) alanından (V) hızıyla (t) süresinde geçen havanın hacmi  $V = vAt$  dir. Bu değer kütle eşitliğinde yerine konulursa, ve  $t = 1$  alınır hız enerjisi eşitliği güç eşitliğine dönüşür.

Bir rüzgâr türbününün üretebileceği elektrik enerjisi miktarı, rüzgâr hızına son derece bağlıdır. Enerji, ortalama rüzgâr hızın enerji bileşenidir. Örnek olarak, 8m/s de elde edilecek güç 314 watt/m<sup>2</sup> iken 16m/s de bu güç 2509 watt/m<sup>2</sup> değerine ulaşır. Görüldüğü gibi, rüzgâr hızı iki kat artarken elde edilecek güçte sekiz kat artmaktadır. Çeşitli rüzgâr hızlarında, değişik arazi koşullarında güç yoğunlukları genel olarak aşağıda çizelge olarak verilmiştir.

## Rüzgârın Hızının Değişimi

Engelli arazi		Açık arazi		Sahil boyları		Açık deniz		Dağ ve tepeler	
m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
>6	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9	>800	>11.5	>1800
5-6	150-250	6.5-7.5	300-500	7-8.5	400-700	8-9	600-800	10-11.5	1200-1800
4.5-5	100-150	5.5-6.5	200-300	6-7	250-400	7-8	400-600	8.5-10	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5-6	150-250	5.5-7	200-400	7-8.5	400-700
<3.5	<50	<4.5	<100	<5	<150	<5.5	<200	<7	<400

Yer yüzeyinden yaklaşık 1 km ye değin rüzgâr, yer yüzeyinin yüzey yapısından oldukça etkilenir. Havakürenin alt katmanlarında rüzgâr hızları sürtünmeye uğrarlar. Bu duruma arazinin pürüzlülüğü ve engeller neden olur. Pürüzlülük ne kadar çok ise rüzgâr o kadar azalır. Su yüzeyi, rüzgârı daha az etkileyen en pürüzsüz yüzeydir. Uzun ot, çalı ve çöp gibi pürüzlülük öğeleri rüzgâr hızını daha çok etkiler azaltır.

Türbün göbeği yüksekliğinde rüzgâr hızının kestirimi iki şekilde hesaplanır.

$$1. \quad v_2 = v_1 \left[ \ln \left( \frac{h_2}{Z_0} \right) / \left( \frac{h_1}{Z_0} \right) \right]$$

Z<sub>0</sub>: pürüzlülük uzunluğu (0,0001 <= Z<sub>0</sub> < 1: genelde).

2. Hellman üstel eşitliği

Rüzgâr hızının yükseklikle değişimi Hellman Bağıntısı ile verilir.

$$V = V_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^a$$

V, H düzeyindeki rüzgâr hızı ; V<sub>0</sub>, H<sub>0</sub> düzeyindeki rüzgâr hızı; H, başvuru ölçüm yüksekliği; H<sub>0</sub>, rüzgâr hızı belirlenmek istenen yükseklik.

Düz arazilerde pürüzlülük  $a$  ile pürüzlülük uzunluğu arasındaki ampirik bağıntılar bulunmaktadır.

Pürüzlülük	Üstel rüzgar "shear" kesmesi ( $\alpha$ )
Su veya buz yüzeyi	0.1
Küçük ot veya bozkır	0.14
Engelli kırsal alan	0.2
Ormanlık alan ve küçük yerleşimler	0.25

Pürüzlülük sınıfı	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
Pürüzlülük uzunluğu	0.0002	0.0024	0.03	0.055	0.1	0.4	1.6

Engeller ve rüzgâr akışı: Engeller, arka taraflarında bozulmuş akış alanları oluşturur. Bunlara dalgalar denir. Engel dalgaları rüzgâr hızını azaltır. Hız ve yön de hızlı değişiklikler oluşturur. Buna türbülans denir. Engellerden ne kadar yükseğe çıkılırsa o kadar rüzgâr gölgelenmesi az olur. Yatay olarak engelin rüzgâr gölgelemesi, engel yüksekliğinin 20-30 katına dek uzanmaktadır. Eğer engel yüksekliği kanat göbeği yüksekliğinin yarısından daha fazla ise, elde edilecek enerji üretim sonuçları daha belirsizdir ve engelin geometrisi sonuçları etkilemektedir. Engel etkisi açısından türbün ve engel arası uzaklık çok önemlidir. Genelde, engel etkisi, engelden uzaklaştıkça azalmaktadır. Düşük pürüzlü arazi üzerlerinde engel etkisi, engelden 20 km ilerde bile ölçülebilmektedir. Engel ve türbün arasındaki arazi pürüzlülüğü, engel etkisi büyüklüğü konusunda önemli rol oynamaktadır. Düşük pürüzlü araziler, havanın, engelin etrafından geçmesine ve karışmasına daha kolay izin verir. Eğer engel türbüne baskın rüzgâr yönünden 1000 m den daha yakın ise, dikkate alınmalı: uzak ise rüzgâr üzerinde etkisi o kadar fazla olmamaktadır. Eğer engel türbüne, yüksekliğinin beş katından daha yakın ve yüksekliği kanat göbeği düzeyinin yarısından fazla ise, önemli oranda rüzgâra etki yapacaktır. Ve bu durum türbün yerleşimlerinde önemli oranda dikkate alınmalıdır. Engelin genişliği bulunduğu kesim ve baskın yönden dolayı çok önemlidir. Engelin geçirgenliği, rüzgârın, ilgili engelin içinden geçme kolaylığı olarak tanımlanır. Örneğin geçirgenlik binalarda 0, ağaçlarda 0.5, ve kafes direklerde 0.7-0.8 değerleri arasındadır.

Deniz ve göl yüzeyleri oldukça düşük pürüzlülüğe sahiptir. Ve buralarda hemen hemen hiçbir engel bulunmaz. Ancak denizlerde yüksek rüzgâr hızlarında yüksek pürüzlülük olacağı unutulmamalıdır. Düşük pürüzlülükte "makaslama" denilen üstel çarpan denizde çok düşüktür. Yani rüzgâr hızı, türbünün göbek yüksekliğinde çok fazla değişmez. Bu nedenle daha düşük kule kullanımı daha ekonomik olmaktadır. Benizde kurulacak rüzgâr türbünü rotor çapları yerel koşullara bağlıdır.

### Rüzgâr Gücünün Özellikleri

- Modern rüzgâr türbünleri 2-3 kanatlıdır.
- Kanat çapları yaklaşık olarak 30 m. Dır.
- Belli bir zaman aralığında rüzgâr hızı değişmez değildir. Ancak, şebekeye enerji, rüzgâr jeneratörü ve kanat özellikleri ile yaklaşık olarak değişmez olarak verilir.
- İki rüzgâr türbünü arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 150-300 m arasında değişebilir. Bu nedenle arazinin yaklaşık %99 luk kısmı tarım, hayvancılık ve diğer amaçlar için kullanılabilir.
- En ekonomik rüzgâr santrali, 10-30 MW lık kapasite büyüklüğüdür. Bugün yaygın büyüklükteki 25 türbün yılda yaklaşık 20GWh lık enerji üretilebilmektedir.
- Enerji üretimi rotor yüksekliğinde rüzgâr hızının kübüne ve kanatların süpürme alanına bağlıdır.
- Rüzgâr hızı yükseklikle artar, çoğu türbün 30-50m kule yüksekliğine sahiptir.
- Beklenen türbün ömrü en az 20 yıldır.
- Her türbün bilgisayar sistemi ile denetlenmektedir.
- Rüzgârdan üretilen elektriğin birim maliyeti giderek düşmektedir. 2005 yılına kadar maliyetlerin %25 azalacağı beklenmektedir.
- Türbün güçleri birkaç kW tan birkaç MW a kadar değişebilmektedir.
- Rüzgâr türbünleri karaya kurulduğu gibi deniz lerde de kurulabilmektedir.



# RÜZGÂR TÜRBÜNÜ

Rüzgâr türbününe bağlı elektrik üretici, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemleri 50W ile 2-3 MW arasında mekanik veya elektrik gücü sağlayabilmektedir. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgârdan sağlanacak enerji rüzgâr hızına bağlıdır. Rüzgâr hızı yükseklikle, gücü ise hızının kübü ile orantılı biçimde artar. rüzgârın sağlayacağı enerji, gücüne ve esme saati sayısına bağlıdır özgül rüzgâr gücü, hava debisine dik birim yüzeye düşen güçtür. Topoğrafik koşullara göre yerden 50 m yükseklikte özgül güç, hız 3.5m/s den küçük iken 50W/m<sup>2</sup> den az olabileceği gibi hız 11.5m/s den büyük iken 1800W/m<sup>2</sup> den çok olabilir. Ortalama rüzgâr hızı yıldan yıla değişebilir. Rüzgâr hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgâr enerjisi potansiyelinden elde edilecek enerji, yıllık ortalama hız değerinden hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Bu yüzden belli bir bölgede rüzgâr türbünleri ile üretilebilecek elektrik enerjisi üretim miktarının hesabında, yıllık ortalama rüzgâr hızından çok, gözlemlenene dağılım veya Weibull dağılımı ile hesap edilmiş rüzgâr hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır. Türbün tarafından üretilen enerjinin miktarı, rüzgâr hızı dağılımına bağlıdır. Rüzgâr hızları, frekans dağılımına bağlı olarak, aynı ortalama rüzgâr hızına sahip farklı yerlerde iki kata varabilecek güç yoğunluğu farklılıkları olabilir. Bu durum küb çarpanından kaynaklanmaktadır. Güç Katsayısı (Power Coefficient): bir türbünün rüzgârdaki enerjiyi elektriğe dönüştürme verimi olarak adlandırılır. Bu rüzgâr türbinin enerji çıktısı aşağıdaki eşitlik ile belirlenir.

$$P=1/2dv^3ACP$$

P, güç çıktısı; d, hava yoğunluğu; A, süpürme alanı; CP, Güç katsayısı; v, Rüzgâr hızı  
Modern rüzgâr türbünlerinde güç çıktısı rated power düzeyinde sınırlanır.

## Rüzgâr Türbünleri Kavramları

- Yatay eksenli (HAWT) veya dikey eksenli (VAWT) tür rüzgâr türbünleri
- Önden-rüzgârlı (Up-Wind) veya arkadan rüzgârlı (Down-wind) rüzgâr türbünleri
- Tek, iki veya üç kanatlı indüksiyon veya senkron üreteçli rüzgâr türbünleri
- Durdurma veya kanat eğimi denetimli rüzgâr türbünleri
- Değişmez veya değişken hızlı rüzgâr türbünleri

## Rüzgâr Türbünü Yapısı

- Kule (tubular, boru şeklinde veya lattice kafes şeklinde)
- Döngen (rotor) Göbeğe (hub) takılmış fiberglass kanatlı
- Türbün denetleyicileri
- Nacelle (bir veya iki ana yataklı ana shaft)
  - Rotor shaftında fren disk
  - Vites kutusu (bazı türbünler vitessizdir)
  - Üreteç shaftı
  - Üreteç
  - Yön saptırma
  - dalgalı akım

## Rüzgâr Gücünün İletimi Ve Üretim Olayları Dizisi

1. Rüzgâr, rotoru çevirdiği için bir döndürüm üretilir.
2. Rotorun oransal olarak düşük dönme sıklığı bi vites kutusu ile artırılır.
3. Vites kutusundan çıkan shaft, üreteci döndürür.
4. Türbün denetleme mekanizmaları, frenler ve trafolar tarafından üreticinin ürettiği elektriğin orta gerilimli olmasını sağlar.
5. Site kablo sistemi, site fren sistemi ve site kontrol sistemiyle site trafolarına elektriği dağıtır.
6. Site trafosu voltajı şebeke gerilimi düzeyine yükseltir.
7. Şebeke sistemi, elektriği kullanım için mahallelere dağıtır.
8. Ara-İstasyon trafoları elektrik voltajını düşürür.
9. Düşük yerel gerilim ağları elektriği ev ofis ve fabrikalara taşır.

## Yatay Eksenli ve Dikey Eksenli Türbünler

Teknolojik ve ticari olarak en çok kullanılan türbünler yatay ekenli olanlardır. Dikey eksenli türbünler genellikle Darrieus tipi makine lardır. Dikey eksenli türbünlerin üstünlükleri

- Üreteç ve vites kutusu gibi donanımlar yeryüzündedir. Bu nedene kuleye gerek duyulmaz.
- Dikey eksenli türbünler yön saptırma "Yaw" mekanizmasına gerek duymaz,

Olumsuz yanları

- Kule mekanizmasına gerek olmamasına karşın, yere yakın oldukları için düşük rüzgâr hızlarında çalışmak zorunda kalırlar.
- Bu türbünler çalışmaya kendi kendine başlamaz
- Bu türbünlerin yer yüzeyine bağlanmaları için çelik halatlara gereksinim duyulur.

### Önden Rüzgârlı Makinalar

Bu makine larda rotor yüzü rüzgâra doğru yönelmiştir. Bu makinaların en önemli üstünlüğü kulenin arkasında yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmamaktır. Yıllardır yaygın olarak bu makinalar kullanılmıştır. Öte yandan yine de kulenin önünde, azda olsa, bir rüzgâr gölgelemesi vardır. Yani, rüzgâr kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak ve düz olsa bile bu nedenle kanatın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. İşte bu nedenle rüzgâr çekilmesinden dolayı kanatların çok ser yapılması gerekir ve kanatların kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekir. Ayrıca, önden rüzgârlı makineler, rotoru rüzgâra karşı döndürmek için "Yaw" mekanizma sına gerek duyarlar.

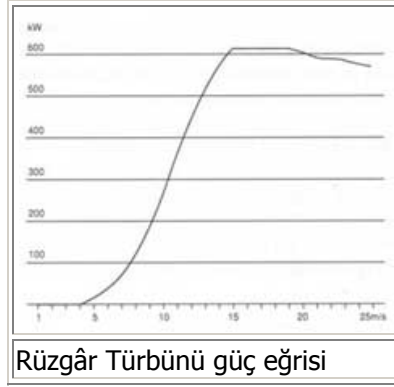
### Arkadan Rüzgârlı Makinalar

Bu makinaların rotorları kule arkasına konur. Bunların önemli üstünlüğü rüzgâra dönmek için "Yaw" mekanizmasına gerek duymayışlarıdır. Eğer "Nacelle" ve rotor uygun tasarlanırsa Nacelle rüzgârı pasif olarak izler. Bazı rüzgâr türbünlerinde bu kesin bir üstünlük değildir. Üreteçten inen akım kabloları, rotor pasif olarak belli bir periyotta her öne döndüğü zaman kablo dolanır. İşte "YAW" bu sorunu ortadan kaldırır. Daha önemli bir üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip yapılmasıdır. Bu, hem ağırlık hem de makinanın güç dinamiği açısından önemli bir üstünlük sağlar. Böylece kule yükü azalmış olur. Arkadan rüzgârlı makinaların temel üstünlüğü böylece önden rüzgârlı makinalara göre daha hafif yapılması şeklinde ortaya çıkar. Ancak, kanat kuleden geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbüne önden rüzgârlı makinalardan daha çok zarar verir.



### Rüzgâr türbünün güç eğrisi

Bir türbünün güç eğrisi, çizim olarak verilir. ve hangi rüzgâr hızına ne kadar güç üreteceğini gösterir. Güç ölçümleri, araziye kurulan ve rüzgâr türbününe belli bir yakınlıkta göbek yüksekliği ile aynı yükseklikte bulunan bir anemometre ile ölçülür. Anemometre, türbün kanatlarının üreteceği türbülans nedeniyle türbünün üzerine konmaz. Eğer rüzgâr hızı çok hızlı dalgalanmıyorsa, ölçülen rüzgâr hızında türbünden elde edilen elektriksel güçler elde edilir. Ve iki değer çizimsel olarak karşılaştırılır. Ancak, rüzgâr hızı ölçümlerinin kusursuz olması gerekir. Çünkü, rüzgâr hızı ölçümünde yapılacak %3 lük bir hata enerji hesaplamalarında  $\pm$  %9 luk bir hataya neden olacaktır. Bu nedenle, sertifiklanmış güç eğrisinde dahi  $\pm$  %10 bir hata olabilir. Güç eğrileri. Düşük türbülanslı alanlarda yapılan ve türbününe doğru doğrudan gelen akışkan ölçümlerine dayalıdır. Yerel türbülans ve karmaşık arazilerde hamleler, rüzgâr türbününe değişik yönlerden etki eder. bu nedenle her hangi bir yerde kesin güç eğrisi elde etmek zor olabilir. Gerçekte, bir güç eğrisi bir ortalama hızda rüzgâr türbününün ne kadar kesin güç üreteceğini göstermez. Ayrıca, türbünün farklı sıcaklık ve yoğunluk koşullarında çalışacağı, bu nedenle farklı güçler üreteceği unutulmamalıdır.



### Rüzgâr Türbünlerinde Güç Ayarlanması

- Durdurma denetimi ( kanatlar göbeğe sabitlenmiştir.
- Kanat eğimi denetimi (çeşitli açılardan rüzgârı yakalayabilir.)
- Yön saptırma denetimi

Rüzgâr türbünleri olabildiğince ucuz olacak şekilde elektrik üretimi için tasarlanılır. Bu nedenle bir türbün, yaklaşık 15l/s den en çok güç üretimi verecek şekilde tasarlanılır. Çünkü, daha fazla hızlara sahip rüzgârlar daha az oluşur. Çok şiddetli rüzgâr koşullarında rüzgâr türbinlerinin hasarlanmaması için belli bir hızdan sonrasında çalışması istenmez. Bu nedenle türbünlerde güç denetimi mekanizmaları vardır. Bu mekanizmalar modern rüzgâr türbünlerinin güvenle çalışmasını sağlar.

### Kanat eğimi (pitch) denetimli rüzgâr türbünleri

Kanat eğim lendirme denetimi, rüzgâr türbinlerinde türbünün elektronik denetimi sanayide birkaç kez güç denetimi yapar. Güç üretimi çok yüksek olduğu zaman denetim mekanizması kanat eğimlendirme mekanizmasını hemen rüzgârın dışında yavaşça döndürür. Tersine durumda kanatlar, rüzgâr tekrar azalana dek rüzgâr geri döner. Kanatlar böylece kendi dikey eksenlerinde dönerek rüzgâr yakalama miktarını ayarlarlar. Böylece rüzgâr hızı ne olursa olsun güç değişmez kılınmış olur. Olağan işletimde kanatlar birkaç derece döner. Kanat eğimi deneyimli rüzgâr türbünlerinde bilgisayar, kanatları birkaç derece döndürerek rüzgâr değişikliklerini tüm hızlarda gücü en büyük yapacak şekilde kanatları rüzgâra en iyi açıda tutar.

### Durdurma (stall) denetimli rüzgâr türbünleri

Bu türbünlerde kanatlar göbeğe sabit bir açıda bağlanmıştır. Kanat profili geometrisi, döndürme sağlamak için aerodinamik olarak tasarlanmıştır. Kanatların yanında türbülans yaratır. Durdurma mekanizması kanatlardaki kaldırma kuvvetini önler. Rüzgâr hızı arttıkça aynı noktada kanatın yakalama açısı artacak ve kanat durmaya başlayacaktır. yani rüzgâr arttıkça kanat dikey ekseninde bükülmeye başlayacaktır.

### Kanatlı (Flaps) Denetim

Eski model türbünlerde gücü denetlemek için kanat şekli değiştirilir.

### Yön saptırma (yaw) Denetimi

Rotoru kısmen rüzgârın dışına çevirmekle güç azaltılır. Bu teknik pratikte çok küçük güçlü rüzgâr türbünlerinde kullanılmaz.

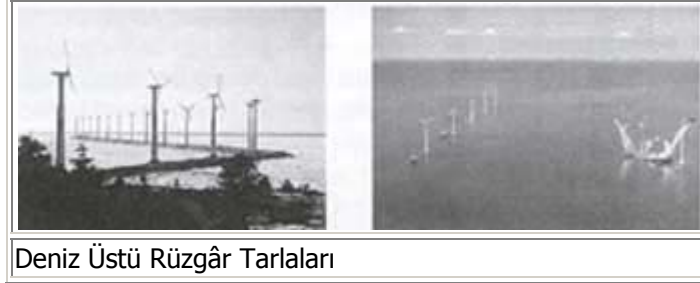
### Hız Denetimi

Başlama rüzgâr hızı: genellikle rüzgâr türbünleri 3-5m/s de çalışmaya başlayacak şekilde ayarlanır. Kesme rüzgâr hızı: rüzgâr türbünleri, hasar lanmayı önlemek için, yaklaşık 25m/s rüzgâr hızı üzerinde çalışmayacak şekilde tasarlanır.

### Deniz-üstü Rüzgâr Türbünleri

Deniz-üstü rüzgâr türbünlerinin en önemli üstünlüğü ve özelliği, maliyetlerinin daha az olmasıdır. Deniz altı kablo lama ve temeller, kıyıdan uzak rüzgâr enerjisinin son zamanlara kadar pahalı bir seçenek yapmış iken, yeni temel teknolojileri ve Mega-watt boyutlu rüzgâr türbünleri şimdi kıyıdan uzak rüzgâr türbünleri en azından 15m ye kadar deniz derinliği için, karadaki türbünler ile yarışabilir. Kıyıdan uzaktaki rüzgârlar, karadaki düz arazilerden %50 daha çok enerji üretebildiği için, kıyıdan uzak bütün

yerleşimleri oldukça çekici olmuştur. Yeni teknolojiler 15m su derinliğine kadar ekonomik olunacağını göstermektedir. 1.5MW büyüklükteki türbünleri şebekeye bağlantısı ve temel işleri 450-500 kW lık türbünlerin kinden yalnızca %10-20 oranında yüksektir. Deniz-üstü petrol platformları ile ilgili deneyimler, bu platformların korozyon önlemleri ile korunabildiğini göstermektedir. Yüzey koruma ile kara türbünlerinden daha yüksek koruma sistemi deniz üstü rüzgâr türbünlerinde de olacaktır. İlk ticari deniz-üstü rüzgâr parkı, kıydan 15-40km uzaklıkta 5, 10, 15m derinliklerde 120-150MW olarak Danimarka da kurulması planlanmaktadır. Kullanılacak türbünler 1.5MW güçte olup, işletmeye yaklaşık 5 yılda geçilecektir. Bu tür türbünlerin şebekeye bağlantısı deniz altı kabloları ile yapılacaktır.



### Rüzgâr Türbünlerinin Şebekeye Bağlanması

Büyük ölçekli rüzgâr türbünleri ulusal şebekeye bağlanır. Ve üretilen enerji şebekeye verilir. rüzgâr olmadığı zaman gereksinim duyulan enerji şebekeden karşılanır. Şebeke bağlantılı rüzgâr türbünleri yüksek rüzgâr hızlarında, yüksek döndürüm oluşturmak için 2-3 kanatlı yapırlar. Su pompalamak için kullanılan rüzgâr türbünleri, çok kanatlı olduğu için düşük dönürüm üretmektedir. 3 kanatlı türbünler daha fazla enerji üretirler. Görüntüleri daha estetikdir. Ancak daha pahalı, daha ağır ve kurulmasının daha zor olması kusurlarıdır. 2 kanatlı sistemler, daha ucuz daha hafif ve daha yüksek rüzgâr hızı olmayışı ve gürültülü çalışmaları, kolay kurulma üstünlüğüne karşın, önemli bir kusurdur.

### Şebeke Bağlantılı Rüzgâr Santralleri

Yalnızca bir yerleşim yerinin elektrik enerjisi gereksiniminin karşılayabileceği gibi, belli bir yerde çok sayıda şebekeye elektrik sağlamak amacıyla kurulurlar. Şebeke bağlantılı sistemlerde günümüzde ticari olarak en yaygın olanı 600kW lık birim ünite gücüne sahip türbünlerdir. Kanat çaplarındaki gelişmeye koşut olarak, birim türbün gücünün önümüzdeki yıllarda optimum büyüklük olarak kabul edilen 1-3MW lık düzeye ulaşması beklenmektedir. Ülkemizde Demirer Holding A.Ş tarafından uygulaması olan 3 adet türbün ile uygulamaları gerçekleştirilecek olan santrallerdeki birim ünite gücü 600kW tr.

### Şebekeden Bağımsız Rüzgâr Üreteçleri :

#### A, Rüzgâr Pompası

Bu pompalar çok kanatlı, düşük rüzgâr hızında döndürüm sağlayabilen, su pompası ile bağlantılı olarak çalışabilen, genellikle su pompalamada kullanılan sistemlerdir.



#### b. Şebekesiz Uygulamalar

Uygulamaların çoğu küçük ucuz rüzgâr türbünleri şeklinde ve bireysel olarak veya kotular için elektrik enerjisi üretmek şeklindedir.

## **Rüzgâr Türbünü Ömrü**

Eğer bir otomobil ortalama 80-90km/saat lik bir hızda yaklaşık 150-200 bin km yol yaparsa, bu yolu almak için geç süre yaklaşık olarak 2000saat olacaktır. Ortalama hız düşük ise, bu süre 3000 saati bulacaktır. Rüzgâr türbünlerinin yılın 8760 saati çalıştığı düşünülürse 150 000 km yol yapan aracın parçalarının değiştirilmesinde olduğu gibi, bu değiştire, rüzgâr türbünündede olacaktır. Günümüzde 15-16 yıldan daha fazla çalışan türbün olmadığı için kesin bir ömür verilmemekle birlikte, beklenen türbün ömrünün 20-30 yıl olabileceği söylenebilir. Dünya da bu gün için yaklaşık 30 000 türbünün çalıştığı bilinmektedir. Rüzgâr türbünlerinin kanatları fiber-glass polyester malzemenen, nadiren de tahtadan yapılmaktadır. Kuleler ise, çelik boru şeklinde, kafes tipi veya betondan üretilmektedir. Günümüzde yaygın kullanılan rüzgâr türbünleri yaklaşık 3-5m/s de çalışmaya başlar. Maksimum güce yaklaşık 15m/s ulaşır yaklaşık 25m/s çalışmaz. Kanatlar dakikada yaklaşık 15-50 kez döner, ancak değişken kanat hızlı türbün çeşitlerinin sayısı giderek artmaktadır.

## **Rüzgâr Türbünleri Bakımı**

Modern rüzgâr türbünleri 20 yıllık ömürlerinde 120 000 saat çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu süre, bir otomobilin 4 000-6 000 saat çalışma aralığından çok daha fazladır. Pratikteki deneyimler, yeni türbün bakım maliyetleri artmaktadır. Danimarka da 1975 den beri kullanılan 4 400 türbün üzerinde yapılan çalışmalar,yeni üretim türbünlerinin bakım ve onarım maliyetlerinin eski üretim türbünlerin bakım ve onarım maliyetlerinden oldukça düşük olduğu görülmektedir. Eski Danimarka türbünlerinin yıllık bakım maliyetleri, türbün yatırım maliyetlerinin %3 dolayındadır. Yeni üretim türbün lerinde ise bu oran, yatırım maliyetlerinin %1.5-2 dolayındadır. Tek bir türbünün bakım maliyeti, bir rüzgâr parkındaki türbünlerin bakım maliyetinden daha pahalıdır.bazı rüzgâr türbünü parçaları bozulmaya ve değiştirilmeye, diğerlerinden çok maruz kalır. Bu, özellikle rotor kanatları ve vites kutusu görülür. Özellikle kanatlar, vites kutusu veya üreteç türbün fiyatının %15-20 arasında değişen kısmını oluşturur. Türbünlerin 20 yıllık tasarım ömrü üreteçler tarafından belirtilmektedir. Ancak gerçek ömür hem türbün kalitesine hemde lokal klimatolojiye bağlıdır. Örneğin, site"deki türbülans miktarı gerçek ömrü önemli oranda belirleyen değişkendir.

## **Rüzgâr Türbünü Güvenliği**

Rüzgâr türbününün kanatları ve diğer parçaları en az 50 yıl için tasarlanır. Bu süre, rüzgârlı hava koşullarında rüzgâr türbününün 120 000 saat işletilmesi anlamına gelir. Bu süre ortalama otomobil motorunun 5000 saat çalışma süresi ile kıyaslanırsa rüzgâr türbününün çok daha uzun çalıştığı görülür. Büyük modern rüzgâr türbünleri normal olarak konik çelik boru şeklinde kuleler kullanırlar. Bu kulelerin kafes kulelere göre en büyük üstünlüğü , daha güvenli olması ve rüzgâr türbünün bakım ve onarımının personel tarafından daha rahat ve güvenli yapılmasını sağlamasıdır. Kusuru ise, maliyetleridir. Kafes tipi kulelerin en büyük Kusurları, rüzgâr çiftliğinde daha az uygun olması ve yanına varılabilirliğinin zor olmasıdır. Bakım onarım ve servis için az güvenlidir. Kule yüksekliği, türbünleri kurarken ve bakım çalışması yaparken en tehlikeli özelliktir. Fakat yeni rüzgâr türbünlerinde personelin düşmemesi için inerken ve çıkarken her türlü güvenlik önlemi alınmıştır. Bakım anında makinaların tamamen durması gerekmektedir. Kritik parçaların bozulması durumunda ve ya şebekeden ayrılma durumunda, rotorun ve türbünün durması gerekmektedir. Bu durumda durma olmazsa, rotor çok kısa sürede hızlanmaya başlayacaktır. İşte bu durumlarda aşırı hızlanma koruması olmalıdır. yeni modern türbünlerde bu önlem vardır.

## **RÜZGÂR ÜRETEÇLERİ (JENERATÖRLER)**

### **Asenkron (indüksiyon) üreteçler**

Bunlar 3 faz asenkron olarak şebekeye bağlantılı kullanılırlar. Bu üreteçlerin en önemli özelliği, ucuz olmasıdır. Bu üreteçlerin kullanıldığı türbünler şebekeden enerji alarak büyük bir fan olarak çalışabilirler. Rüzgâr olduğu zaman rotor, üreteci çevirmeye başlar. Bu durumda üreteç şebekeden akım çekmez şebekeye akım verir. Yani bu üreteçler her durumdu şebeke ile etkileşim durumunda olurlar.

### **Rüzgâr Üreteçleriyle Voltaj Üretimi**

Büyük rüzgâr türbünlerinde genellikle 690V üç faz alternatif akım üretilir. Akım, rüzgâr türbünü yanındaki veya içindeki transformatöre gönderilir. Transformatör bu gerilimi yerel elektriksel şebekeye bağlı olarak 10-30kV a yükselir. Çoğu üreticiler 50Hz yi destekleyecek türbün üretirler.

### **İki hız, değişken üreteçler**

Bazı üreticiler türbünlerini iki üreteçli üretirler. Küçük olan, düşük rüzgâr hızı olduğunda; büyük olan, yüksek hız olduğunda çalışır. Bazı üreteçler müşteriye bağlı olarak farklı iki hızda yapılır. Bu endüstri geçen son birkaç yılda çok yaygın bir hal almaya başladı.

## **RÜZGÂR SANTRALI (ÇİFTLİĞİ, PARKI)**

Rüzgâr enerjisi bakımından denizler, karasal alanlara göre daha büyük zenginlik göstermektedir. Rüzgâr santrallerinin kurulacağı yerler için ortalama rüzgâr ve saatlik rüzgâr hızları genellikle meteoroloji istasyonlarında bulunmaktadır. Rüzgâr santrali planlama aşamasında, rüzgâr atlasları ilk başvuru kaynakları olmalıdır. rüzgâr atlası, yer yüzeyinden 10 m yükseklikte, yer yüzeyinde ölçülmüş olan rüzgâr hızı ve yönüne yeterli süre ve sayıdaki meteoroloji istatistiklerinin , özel bilgisayar programları yardımıyla değerlendirilmesi sonucunda elde edilen, enerji planlarına ve yatırımcılara, rüzgâr gücü ve kapsadığı alanlar hakkında bilgi veren rüzgâr istatistikleridir. Öte yandan, rüzgâr atlası yer seçiminde tek başına yeterli olmayacaktır. Yer seçiminde özel çalışmalara ve özel ölçümlere gerek duyulmaktadır.



Rüzgâr Santrali

Site seçimi konusunda doğanın kendisi, kusursuz bir yol göstericisidir. Eğer sitede ağaç ve çalılar var ise, bunlar öngörülen baskın rüzgâr yönü hakkında önemli ipuçları verir. Ayrıca çeşitli şekillerde rüzgârın oluşturduğu aşınma yine önemli ipuçları verir. Meteorolojik verilere bağlı olarak 30 yılın üzerinde hesaplanan bir rüzgârgülü, en iyi rehber. İğne sağılayan değişkenlerden bir tanesidir. Fakat bu veriler nadiren site'lerden toplanabilir. Site de meteorolojik verilerin den kullanımından çok dikkatli olmayı gerektiren nedenler vardır.

Özel sitelerde rüzgâr potansiyelini belirlemek için herhangi bir ölçüm sistemi kurulmadan önce, meteorolojik ve topografik olarak rüzgâr potansiyelini yüksek olabileceği yerlerde, aşağıdaki ölçütler dikkate alındığında daha başarılı sonuçlar elde edilebilir.

- A. Şiddetli basınç gradyanı olan yerler
- B. Sürekli rüzgârlara koşut, yağışlı ve uzun vadiler
- C. Şiddetli Jeostrofik rüzgâr alanlarındaki yüksek, engebesiz tepe ve platolar.
- D. Şiddetli Basınç gradyanlı, düşük eğimli sürekli rüzgâr vadileri
- E. Şiddetli Jeostrofik rüzgâr alanlarındaki tepeler ve zirveler.
- F. Şiddetli Jeostrofik rüzgâr veya termal gradyan alanlarına maruz kalmış kıyı şeritleri

Saptana bilen aday sitelerde, yüksek rüzgâr potansiyelini gösteren belirtiler aşağıdaki gibidir.

- A. Biyolojik Belirtiler
- B. Coğrafik Belirtiler
- C. Jeolojik Belirtiler
- D. Topografik Belirtiler
- E. Sosyal ve Kültürel Belirtiler

Yapılan çalışmalar sonucu belirlenen sitelerde elde edilen sonuçlarla birlikte, rüzgâr karakteristiklerine enerji üretimi çözümlerinin yapılması gerekmektedir. Bunun için, belirlenen araziye temsil edecek

nokta ve ya noktalarda ölçüm yapmak gerekmektedir. Yapılacak ölçümler, teknik açıdan en az bir yıl sürmelidir. Bunun yanında, rüzgâr santralı kurmaya aday olabilecek yerlerde göz önüne alınması gerek aşağıdaki noktalar, rüzgâr enerji si santralinin olabilirliği ve uygulanabilirliği açısından çok önemlidir.

1. ulaşım kolaylığı
2. ulusal şebekeye bağlanma kolaylığı
3. arazinin yol ve diğer çalışmalar için işlenme kolaylığı
4. arazinin eğimi
5. arazinin büyüklüğü
6. arazinin kullanım şekli
7. arazinin bitki örtüsü

Ayrıca arazilerde rüzgâr enerjisinden yararlanmayı önleyebilecek bir takım kısıtlar olmaktadır. Bu kısıtların dikkate alınması gerekmektedir.

- Ø Arazinin yerleşim birimlerine olan yakınlığı
- Ø Arazinin askeri, sivil radar ve buna benzer tesislere olan yakınlığı
- Ø Arazinin havaalanına olan yakınlığı
- Ø Arazinin mülkiyeti
- Ø Arazinin sit veya diğer kapsamda olup olmadığı
- Ø Arazinin gelecekteki kullanım amacı
- Ø Arazinin milli park veya doğal yaşam etkinlikleri kapsamında olup olmadığı
- Ø Arazinin turizm bölgeleri ile olabilecek etkileşimi vb.

Rüzgâr değerlendirilmelerinde ve türbün yerleşimlerinde özet olarak,  
Tofografya,  
Hava,  
Altyapı,  
Arazi kullanımı,  
Uzun dönemli kayıtlar,  
Kısa dönemli kayıtlar,  
Çevresel değişkenler, dikkate alınmalıdır.

Rüzgâr santralı rüzgâr kaynağı değerlendirmelerinde,

- Elde edilmiş veya kullanılabilir yakın tarihsel rüzgâr verileri ve duyarlılığı
- Verilerin elde edildiği yerin ve kurulacak rüzgâr parkının çevre engel koşulları
- Orografik ve topografik yapı
- Arazi pürüzlüğü

Son derece önemli rol almaktadır.

Rüzgârdan ne kadar elektrik üretileceği, tümüyle santralin kurulacağı yere bağlıdır. Ortalama kapasite faktörü Türkiye’de de olduğu gibi %30 dolayındadır. Yani, yılın yaklaşık %60ında türbünün belli hız dağılımında çalışacağı anlaşılmaktadır. İyi seçilmiş ve kurulmuş bir rüzgâr santralinde 600kW’lık bir türbün, yılda yaklaşık 1.00-1,500ailenin enerjisini üretebilmektedir. Ancak, bu sayı santral yerlerine ve ailenin enerji tüketimine bağlı olarak değişebilir.

Kapasite çarpanı, bir rüzgâr türbününün yıllık enerji üretiminin belirlenmesi ölçüsüdür.

$CF = \text{yıllık enerji üretim miktarı} / \text{türbün tarafından nominal güçte yılda üretilecek kurumsal enerj miktarı}$ .

CF, kurumsal olarak 0-100arası değerler alabilir. Ancak bu değer, pratikte 20-70 arasında gözlenmektedir. En çok gerçekleşen CF değeri, 25-35 arasındaki değerlerdir.

Bir yer için, kullanılacak türbünün CF sine bakılır. Ancak CF'nin düşük olup da, enerji üretiminin yüksek olduğu durumlar unutulmamalıdır. Bu duru, büyük çaplı makine kullanımı ve nominal güç değeri ile açıklanabilir.

20 türbünden oluşan bir rüzgâr santrali yaklaşık 1km<sup>2</sup> alana kurulabilir. Ancak, bu alanın yaklaşık olarak%1-1,5'lık kısmı türbünlerin oturacağı alandır. Geri kalan alanın tamamı tarımsal, hayvancılık ve diğer etkinlikler için kullanılmaya açıktır. Baskın rüzgâr yönü, rüzgâr türbünü yerleşiminde son derece önemlidir.



Rüzgâr Türbünleri, arazinin diğer amaçlı kullanımı engellemez

Rüzgâr santrali ölçütleri  
Enerji Üretimi  
Yüksek rüzgâr santrali verimliliği  
Santralin en iyi şekilde kullanımı şeklindedir.

Enerji üretimi değerlendirme'lerinde en güvenli yol, türbün göbek yüksekliğinde rüzgâr hızını ölçmek ve rüzgâr dağılımını hesaplamaktır. Ayrıca enerji dağılımı değerlendirmelerinde, değişik yükseklikler için yalnızca yıllık ortalama rüzgâr hızına dayalı "Rayleigh Dağılımı" yerine "Weibull Dağılımını" kullanmak çok daha sağlıklı değerlendirmeleri sağlar.

Temeller (beton)  
Yol yapımı (parka ulaşmak için)  
Taransformotor (yaklaşık 600V"u10-30kV" a dönüştürmek için)  
Uzaktan denetim  
Kablolamadır.

Yol maliyeti, topografik yapı, uzaklık, mobil vincin siteye ulaşımı ve zemin koşullarına bağlıdır. Toprak koşullarına bağlıdır.

## **Rüzgâr Santralında Park Etkisi, Kuyrukyeli Etkisi (Wake Effect)**

Parka kurulu her bir türbün rüzgârı ve içerisindeki enerjiyi aldıktan sonra, arkasındaki türbüne göndereceği rüzgârı ve rüzgâr enerjisini azaltır. Bu nedenle ideal olarak türbünleri olabildiğince baskın rüzgâr yönüne göre yerleştirmek gerekir. Ancak baskın enerji yönünün bu yerleşimde daha önemli olduğu unutulmamalıdır. Ancak, böyle bir yerleşimde şebekeye bağlanma uzaklığı ve kullanılan arazi büyüklüğü de çok önemlidir. Baskın enerji yönünün belirgin olduğu siteler, türbünlerini birbirine daha yakın kurulmasını sağlayarak hem arazi kullanım oranını düşürür, hem de şebekeye bağlanma ve park yolu masraflarını azaltır. Ancak ikinci sıra türbünlerin yerleşimlerinde kuyruk yeli etkili olacağından, türbünleri birinci sıra türbünlerden daha uzağa kurmak gereklidir. Genel olarak bir rüzgâr parkında türbünler birbirlerinden 5-9 rotor çapı uzaklığı kadar olabilir.

Bir rüzgâr türbünü rüzgârdaki enerjiden elektrik ürettiği için, türbünden ayrılan rüzgâr enerjisi türbüne gelen rüzgâr enerjisinden daha düşük olmalıdır. bir rüzgâra türbünü rüzgâr altı yönünde daime bir rüzgâr gölgelemesi yaratır. Türbün, arkasında uzun bir aralıkta oldukça fazla türbülansa neden olur.



Rüzgâr santrallerinde türbünler birbirlerinden en az 3 rotor uzaklığında kurulurlar. Bunun nedeni türbünlerin akıntı yönünde yaratacağı çok fazla türbülânstan kaçınmaktır.