

**Esen Yelden Yenilenebilir  
Temiz Enerjiye:**

# Rüzgâr Enerjisi

Prof. Dr. Faruk Soyduğan [ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü

Her insan yaşamını devam ettirmek için enerjiye ihtiyaç duyar. Zaruri ihtiyaçlarımızın yanında yaşamımızı kolaylaştırmak ve gelişen sanayi ile teknolojiye kaynak sağlamak için enerji vazgeçilmez önceliklerimizden biridir. İnsan nüfusunun artması ile birlikte hızla gelişen sanayi ve teknoloji, enerji ihtiyacımızın da hızla artmasına neden oluyor. Unutulmaması gereken ve bize sürekli hatırlatılan ise enerji ihtiyacını karşılarken doğaya ve çevreye, kısacası yaşadığımız dünyaya zarar vermemek veya verdiğimiz zararı en aza indirmek için alternatifler geliştirmek ve enerji ihtiyacımızı bu yönde karşılamaya çalışmaktır. Bu yazının konusu, küresel ısınmanın olumsuz etkilerini hissettiğimiz son yıllarda çözüm için en önemli alternatiflerden biri olan ve kullanımı hızla artan rüzgâr enerjisi.



**E**nerji, iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. İnsanlık bilim ve teknolojideki ilerlemelerle enerjiyi bir formdan başka bir forma nasıl dönüştüreceğini öğrendi, dönüştürme için geliştirdiği düzeneklerle onu iş yapmak için kullandı ve kullanmaya devam ediyor. Enerji, ihtiyaca yönelik biçimde pratik kullanım amacıyla bir formdan diğerine dönüştürülebilir. Örneğin, kömür ve doğalgazda depolanan kimyasal enerji ve nehirlerde akan suyun kinetik enerjisi elektrik enerjisine oradan da ihtiyacımız olan ısı ve ışık enerjisine çevrilebilir.

Yaklaşık 1,5 asrı aşan süredir elektrik enerjisini aktif olarak kullanıyoruz ve enerjiye olan ihtiyacımız sürekli artıyor. Bu süreçte enerji dönüşümlerinde başat rolü fosil yakıtlar olarak da adlandırılan kömür, petrol ve doğal gaz oynadı, hâlâ da oynamaya devam ediyor.

İnsanlığın enerji bağımlılığı arttıkça bu kaynaklara olan bağımlılık da gitgide büyüyor. Söz konusu kaynaklar sonlu olduğundan, bu süreç bizi “enerji krizi” olarak adlandırılan duruma doğru yaklaştırıyor, hatta zaman zaman kendimizi bu krizin içinde buluyoruz. Son yıllarda enerji kullanımında farklı alternatifler geliştirilse de fosil yakıtların dünyada kullanım oranı hâlâ çok yüksek. Diğer taraftan insanlık bu yoğun fosil yakıt kullanımının çevre ve insan sağlığı üzerinde yol açtığı olumsuz etkileri her geçen gün daha da fazla hissediyor. Bu nedenle, son dönemde gerek artan enerji ihtiyacına farklı kaynaklarla cevap verebilmek gerekse temiz enerji kaynakları bulabilmek adına, alternatif ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim hızlandı. Sonlu ve kirlilik oluşturan yenilenemez kaynaklar yerine, kaynak ömrü sonsuz denecek kadar çok ve temiz enerji olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim;

küresel ısınma, çevre sorunları ve hızla artan enerji ihtiyacı düşünüldüğünde son derece önem taşıyor. Bu yazıda, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi üzerinde duracağız. Öncelikle rüzgârı daha yakından tanıtıp sonra “Rüzgârı nasıl kullanılabilir enerjiye dönüştürebiliyoruz?” sorusuna cevap vermeye çalışacağız.

## Rüzgâr ve Hızı

Çoğu yenilenebilir enerji kaynağının olduğu gibi rüzgârın da ana kaynağı Güneş’tir. Rüzgâr, atmosferdeki basınç farklılıkları nedeniyle havanın yer değiştirmesi sonucu oluşur. Bunun da kaynağı çoğunlukla Güneş’in ışınımının yer yüzeyini farklı miktarlarda ısıtmasıdır. Dünya’nın yüzeyi, Ekvator’da Güneş ışınlarına neredeyse dik, kutuplarda ise paralel olduğundan birim alan başına en fazla enerjiyi Ekvator alır, kutuplara doğru da alınan enerji miktarı düşer. Farklı enlemlerin farklı miktarlarda ısınması sıcaklık ve basınç değişimlerini ortaya çıkarır. Böylece Ekvator’da daha düşük hava yoğunluğuna sahip sıcak hava, atmosferin üst taraflarına doğru yükselerek kutuplara doğru hareket eder. Yoğunluğu fazla olan soğuk hava ise kutuplardan Ekvator’a doğru akar. Bu hareketler, Dünya’nın



Rüzgâr tulumu



kendi etrafındaki dönüşü ve Coriolis (saptırma) etkisini dikkate almaksızın, meridyenlere bağlı dolaşımın oluşturur. Farklı ısınmaya yol açan etkilerden bir diğeri de mevsimsel değişikliklere de yol açan Dünya'nın dönme ekseninin yörünge düzlemine göre yaklaşık 23,5 derece eğimli olmasıdır. Dünya'nın yüzeyinde farklı yansıtma ve soğurma özelliklerine sahip bitki örtüleri, kayaç yapılar, kum, su, buz vb. farklı türde malzemeler bulunuyor. Dolayısıyla, aynı enlemlerde olsalar bile, cisimlerin farklı yansıtma ve soğurma özellikleri; bazı alanların fazla ısınmasına (çöller gibi), bazılarının (buzlu göller gibi) ise düşük sıcaklıklarda kalmasına neden oluyor. Dünya'nın yüzeyindeki dağ, vadi ve tepe gibi farklı yükseltili yapılar da güneş alan ve gölgeli alanlarının olması nedeniyle farklı miktarlarda ısınıyor.

Rüzgârın oluşumu ve hareketinde etkili olan diğer kaynaklar ise Dünya'nın kendi etrafındaki dönüşünden kaynaklanan Coriolis etkisi ve yerel coğrafik özelliklerdir. Coriolis etkisi atmosfer hareketlerinin yönünü saptırır ve enleme bağlı olarak değişir. Ekvator'da minimum (sıfır), kutuplarda ise maksimum değere ulaşır. Bununla birlikte, rüzgârdaki sapma miktarı rüzgârın hızına da bağlıdır. Yavaş esen rüzgârlar daha küçük, yüksek hızda esen rüzgârlar ise daha büyük sapma gösterirler. Dünya yüzeyindeki pürüzlülük de rüzgâr için önemli parametrelerden olup hem doğal hem de insan kaynaklı ortaya çıkabilir. Pürüzlülük rüzgâr hızını azaltıcı etki oluştururken bunda topografya, arazi özellikleri, iklim ve yerleşim yerlerinden uzaklık gibi değişkenler etkilidir. Bunun yanında, bazı özel coğrafi yapılar

rüzgâr yoğunluğunu arttırabilir. Örneğin, dağ geçitlerinden esen rüzgârlar yüksek hızlara ulaşır dağ jetlerini oluşturabilir.

Rüzgârın oluşumu ve hareketini etkileyen süreçlere baktıktan sonra enerji hesabından en önemli parametre olan rüzgâr hızı üzerinde durulur. Rüzgâr, yüksek basınçtan alçak basınca doğru gerçekleşen hava hareketleri şeklinde karşımıza çıkarken onun hızını etkileyen çok sayıda faktör bulunur. Rüzgâr hızı rastgele değişen bir parametredir, bu nedenle ölçülen rüzgâr hızı genellikle istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilir. Ortalama rüzgâr hızlarının günlük değişimleri genellikle sinüs dalgaları ile tanımlanır. Rüzgâr hızları gündüz daha yüksektir ve genellikle maksimum hızla öğleden sonraları karşılaşılır. Bu



Anemometre (yelölçer)

da rüzgâr hızının alınan güneş enerjisiyle ilişkisini açıkça ortaya koyar. Başka bir deyişle, bu durum, rüzgâr enerjisinin güneş enerjisinin kinetik yani hareket enerjisine dönüşmüş bir formu olduğunu gösterir.

Rüzgâr hızı, günümüzde sensör teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak çok hassas biçimde ölçülebiliyor. Farklı çeşitleri olsa da temelde ölçümler yön sensörleri de içeren anemometreler ile yapılıyor. Rüzgâr hızı, metre/saniye (m/s), kilometre/saat (km/h) ve knot (deniz mili/saat olup saatte 1.853 kilometre hıza karşılık gelir) birimleri ile gösteriliyor. İki yüzyıldan

fazla süredir kullanılan, önce denizcilerin yararlandığı şu anda diğer alanlarda da faydalanılan Beaufort (Bofor) ölçeği ise anemometre ve benzeri ölçüm aletlerinin olmadığı yerlerde, rüzgârın yer yüzeyindeki cisimler üzerinde yaptığı etkiler dikkate alınarak gözlemlere dayalı bir tahmin sistemidir. Enerji hesapları için yapılan rüzgâr hızı ölçümleri, çok daha hassas veri ölçümü ve takibi istediğinden, ölçümlerde sensör teknolojileri içeren aletler kullanılır. Hız ölçümlerinde klasik kap anemometresi yanında ultrasonik ve lazer anemometrelerin de kullanıldığını söyleyelim.

Rüzgâr enerjisinden verimli bir şekilde yararlanmak için bölgedeki hâkim rüzgâr yönü ve yönleri de önemlidir. Anemoskop (jirüet) denilen aletlerle belirlenen rüzgâr yönleri, bazı ortamlarda da rüzgâr tulumu veya torbaları ile takip edilebilir. Rüzgârgülleri de rüzgâr hızının frekans dağılımını veren ve hâkim rüzgâr yönlerini gösteren diyagramlar olup pratikte

kullanılırlar. Meteorolojide rüzgâr esiş yönleri, coğrafik yönlerle açıklanır. Rüzgârlar sekiz yöne göre isimlendirilir (örneğin, kuzey: yıldız, kuzeybatı: karayel vb.).

Rüzgâr enerjisinin ana problemlerinden biri rüzgârın değişken olmasıdır. Bu nedenle, rüzgârın ilgili bölgede hangi yönden, ne kadar süre ve ne kadar sık estiğinin ölçülüp takip edilmesi gerekir. Esiş sıklığı olarak da adlandırılan bu durum, enerji yatırımları için son derece kritiktir. Rüzgâr çeşitleri ve rüzgârların sınıflandırılması, bu yazının kapsamında olmadığından bu konu üzerinde durmayacağız.



İzmir

Rüzgâr, yer yüzeyinden yaklaşık 1 km yüksekliğe çıktığımızda (atmosferik sınır katmanıdır ve bölgeden bölgeye değişkenlik gösterir), artık yer yüzeyinden etkilenmez. Atmosferin düşük katmanlarında (genellikle ilk birkaç yüz metre yükseklikte) rüzgâr hızı sürtünmeden etkilenir. Sürtünmenin düşük olduğu açık denizlerde ve okyanuslarda çok büyük hızlara ulaşırken yüksek binaların bulunduğu yerleşim alanlarında ve ormanlık bölgelerde yüksek sürtünme nedeniyle rüzgâr hızı daha düşük olur. Rüzgâr enerjisi ile ilgili hesaplamalarda ve fizibilite çalışmalarında, rüzgâr hızının ilgili alanda yükseklikle nasıl değiştiği ve sürtünmeden nasıl etkilendiği, belirli zaman

aralığına yayılmış ölçümler kullanılarak belirlenir. Rüzgârın yatayda değişimi düşeydekine göre az olduğundan rüzgârın düşey değişimlerinin ölçümler yardımıyla ortaya çıkarılması büyük önem taşır. Rüzgârın yükseklikle değişimini gösteren temel denklemlerden biri, Hellmann güç eşitliği olarak bilinir ve aşağıdaki gibi verilir:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^m$$

Burada  $v_1$  ve  $v_2$ , sırasıyla  $h_1$  ve  $h_2$  yüksekliklerindeki rüzgâr hızıdır. Buradaki  $m$  sabiti (rüzgâr kesme katsayısı olarak da bilinir), atmosferin kararlılığını gösteren ve ölçümlerden yola çıkılarak hesaplanabilen bir sabittir.

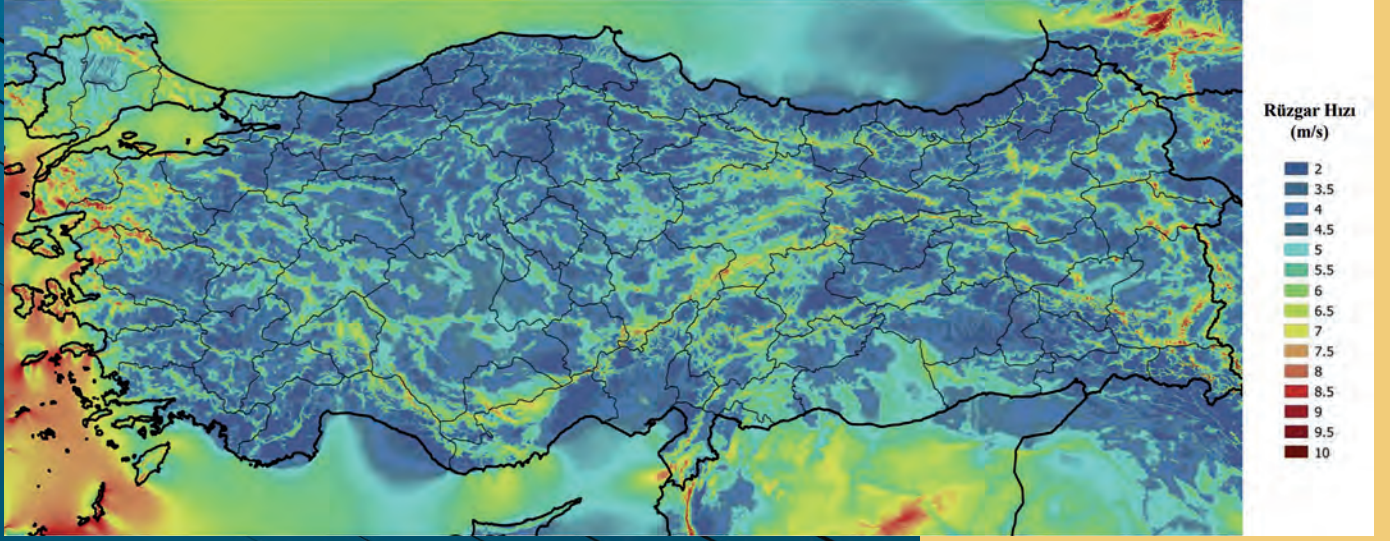
Bu katsayı coğrafik konum özellikleri, yükseklik, mevsim ve günün saati gibi çok farklı parametrelere göre değişiklik gösterir. Dengele bir ortam için bu katsayı yaklaşık 0,143 veya 1/7 olarak kullanılır ancak engebeli yüzeylerde ve yakınında farklı yükseltili pürüzlülük oluşturan nesnelere bulunduran alanlarda farklı değerler alır. Pürüzlülüğü dikkate alan diğer eşitlik ise şöyledir:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{h_2/z_0}{h_1/z_0}\right)$$

Buradaki hızlar yukarıda tanımlandığı gibidir.  $k$  terimi Karman katsayısı olarak bilinir ve değeri yaklaşık 0,4 olarak verilir.  $z_0$  ise pürüzlülük uzunluğu olarak tanımlanır.  $z_0$  düz çöllerde veya kabaca su yüzeylerinde 0,001 iken yüksek binalar bulunan şehir yakınlarında 0,7 değerini alabilir. Bu durumda, sürtünmeden daha az etkilenmeleri için yüksek kulelere yerleştirilen türbinlerin, aslında daha planlanma aşamasında hangi yüksekliklerde hangi rüzgâr hızlarıyla karşılaşacakları bu tür bağıntılar ve yapılan ölçümler yardımıyla tahmin edilir.

Rüzgâr enerjisi kullanımında ilgili bölgenin rüzgâr profilinin çıkarılması ve takibi son derece önemlidir. Bu yüzden küresel ölçekte rüzgâr haritaları çıkarılmış olup ülkelerin rüzgâr potansiyelleri büyük ölçüde





REPA veri tabanına göre Türkiye’de 100 m yükseklik için ortalama rüzgâr hızı dağılımı

belirlenmiştir. Tahmin edileceği üzere, açık denizler ve okyanus kıyıları en fazla rüzgâr alan bölgeler olmaları dolayısıyla rüzgâr enerjisi potansiyeli en fazla olan yerlerdir. Dünya ölçeğinde 100 m yükseklikteki rüzgâr hız dağılımını görmek için [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/globalwindatlas3/HR\\_posters/ws\\_World.pdf](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/globalwindatlas3/HR_posters/ws_World.pdf) adresini ziyaret edebilir ya da aşağıdaki kare kodu akıllı cihazınızdaki barkod okuyucuya okutabilirsiniz.



Ülkemizde de rüzgâr hızı ölçümleri son yıllarda sistematik ve hassas olarak yapılıyor, ülke genelinde ve iller özelinde rüzgâr potansiyeli belirleniyor ve takip ediliyor. Bu kapsamda, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

organizasyonunda, orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin paylaşıldığı Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlandı. Türkiye’de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul ediliyor. Bu çalışmalar çerçevesinde, Türkiye’nin rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlendi. Bu potansiyeli gerçekleştirmek için toplam kullanılması gereken alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30’una karşılık geliyor.

Yıllık ortalamalara bakıldığında Türkiye’nin en yüksek rüzgâr potansiyeli olan bölgeleri Ege ve Marmara olarak görülüyor. Özellikle Ege Denizi’nin kuzeydoğusunda şiddetli

rüzgârlar esiyor. İç Anadolu Bölgesi’nin doğusu, Orta Toroslar ve Akdeniz Bölgesi’nin kuzeydoğusundaki bazı alanlarda da ortalama rüzgâr hızı 7,5 m/s değerini aşıyor. Marmara Bölgesi’nin özellikle Avrupa yakasında ve bu alanların da Karadeniz kıyısında yüksek hızda rüzgârlar ölçülüyor. Batı ve Orta Karadeniz’in sahil bölgesi ve yine Akdeniz’in orta kesimlerinin sahillerinde ortalama rüzgâr hızları, rüzgârdan elektrik elde edilmesi için uygun değerlerdedir. İç Ege, İç Anadolu, Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde de bazı rüzgârlı hatların bulunduğu ülkemizin rüzgâr hız dağılımı haritasından görülebilir. Enerji yatırımlarında gerek REPA verileri gerekse yerel rüzgâr hız ve güç verileri ile bunların günlük, aylık ve mevsimsel takipleri son derece önemlidir.

# Rüzgârdan Enerjiye ve Güce

Rüzgâr enerjisi elde edilmek istenen bölgede belirli bir dönem için yapılan rüzgâr hız ve yön ölçümleri, farklı yüksekliklerdeki rüzgâr profillerinin elde edilmesini sağlar. Bundan sonraki adım, verimli bir rüzgâr rejimine sahip bölgedeki rüzgârı kullanılabilecek enerjiye dönüştürmektir. Bu aşamada farklı türlerde rüzgâr türbinleri kullanılır ancak öncesinde rüzgârın gücünden biraz daha bahsedelim.

Yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket eden hava, bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgâr enerjisi dediğimiz de işte bu hava hareketinden ortaya çıkan kinetik enerjidir ( $E_k$ ).  $v$  hızıyla hareket eden  $m$  kütleli hava akımının kinetik enerjisini hesaplamak için:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

formülünden yararlanır. Belirli bir zaman aralığında, rüzgâr türbininin kanatlarının süpürme alanından ( $A$ ; türbinlerde kanat uzunluğuyla orantılı olup rüzgâr akış yönüne dik olan alandır ve rüzgârın etkileştiği alan olarak da düşünülebilir) geçen,  $\rho$  yoğunluğunda ve  $v$  hızındaki hava kütesinin değişimi ise

$$\dot{m} = A\rho v$$

formülü ile ifade edilir. Birim zamandaki enerji güç olarak tanımlandığından, rüzgâr için güç ( $P$ ) değeri:

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

bağıntısıyla elde edilir. Yazılan bağıntı, rüzgârın gücünün hızının küpü ile orantılı olduğunu açıkça gösterir. Örneğin, rüzgâr hızı iki kat değişirse rüzgâr gücü sekiz kat değişir. Yeri gelmişken, burada sözü edilen “güç”, tamamıyla enerjiye dönüştürülen gücü değil, rüzgârın kendi gücünü ifade eder. Peki, bu gücün ne kadarı enerjiye dönüşür? İşte bu soruya cevap verirken çok sayıda değişkeni dikkate almak gerekir. Gerçekte, rüzgârın kinetik enerjisi bir rüzgâr türbininin kullanabileceği enerji miktarını temsil etmez. Rüzgâr türbinleri %100 verimli değildir ve hava akımının türbine

ulaştırdığı tüm kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çeviremezler. Bir rüzgâr türbinini %100 verimli olsaydı rüzgârların hızı türbinden geçtikten sonra saatte 0 km’ye düşerdi ancak bu durum pratikte asla gerçekleşmez. Bu nedenle güç ifadesi için

$$P = \frac{1}{2}C_p \rho A v^3$$

şeklinde daha genel bir formül kullanılır.  $C_p$  terimine “güç katsayısı” adı verilir. 1926 yılında Albert Betz bu katsayı için bir sınır değer belirledi. Betz, bir rüzgâr türbinisiyle elde edilebilecek maksimum enerjinin rüzgârdaki enerjinin sadece 16/27’sine veya %59’una karşılık geldiğini gösterdi. Bu güç değeri üst sınır olup buna ulaşmak mümkün değildir çünkü hiç kayıp olmadığı duruma karşılık gelir. Son dönemde gelişen teknoloji sayesinde bu katsayı için 0,5 değerine ulaşılabildi. Bu katsayı



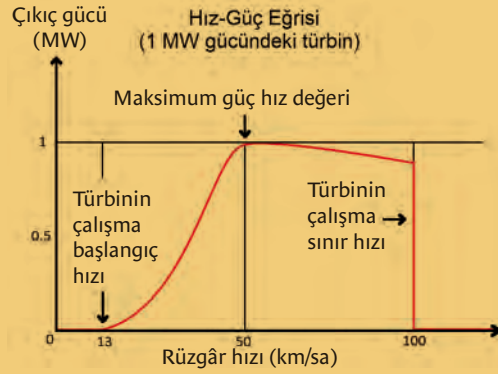
Bozcaada



içinde rüzgâr türbininin kanat aerodinamiğinden kaynaklanan kayıplarla mekanik ve elektriksel kayıpların etkisi yer alıyor.

Güç katsayısı, türbin aerodinamiği için en temel parametrelerden olup rüzgâr türbinine yaklaşan, ulaşan ve türbin ile etkileştikten sonra ilerleyen hava akımının hızları kullanılarak ifade edilebiliyor. Türbinlerin özelliklerine göre hız-güç eğrileri belirlenir ve rüzgâr gücünden ne ölçüde yararlanılabileceği bu sayede ortaya çıkar. Bu eğriler, türbinin devreye girmesi (cut-in), maksimum güç üretmesi ve durdurulması (cut-out) için sınır hız değerlerini gösterir. Rüzgâr, türbin için sınır hız değerine ulaştığında türbinler zarar görmemesi için durdurulur. Günümüzde

etkin kullanılan 1 MW üstü güce sahip türbinler genellikle 2-4 m/s hızlarda çalışmaya başlarken 10-15 m/s hızlarda maksimum güç sağlarlar ve 25-30 m/s (yaklaşık saatte 100 km'ye ulaşan hızlar) hızlara kadar yüksek güç üretmeye devam ederler. Rüzgâr ne kadar şiddetli eserse essin, sınır değerine kadar enerji üretimine devam edilir. Belirlenen sınır değer teknolojiyle birlikte sürekli yükseliyor.



([https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind\\_power](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind_power))

## Rüzgâr Türbinleri

Devasa rüzgâr çiftliklerinden tek bir eve güç sağlayan küçük türbinlere kadar, dünyanın dört bir yanındaki rüzgâr türbinleri çeşitli güç ihtiyaçları için temiz elektrik üretir. Bu başlıkta, türbinlerin yapısına ve özelliklerine yakından bakalım.

Mekanik güç üretmek için rüzgâr enerjisinden yararlanma fikrinin ortaya çıkışı çok eski tarihlere uzanır. MÖ 5000'li yıllarda Mısırlılar, Nil Nehri boyunca tekneleri hareket ettirmek için rüzgâr enerjisini kullandılar. Sonrasında yel değirmenleri geliştirildi ve tahıl öğütmek, su pompalamak ve kereste fabrikalarında odun kesmek için kullanıldı. Günümüzün rüzgâr



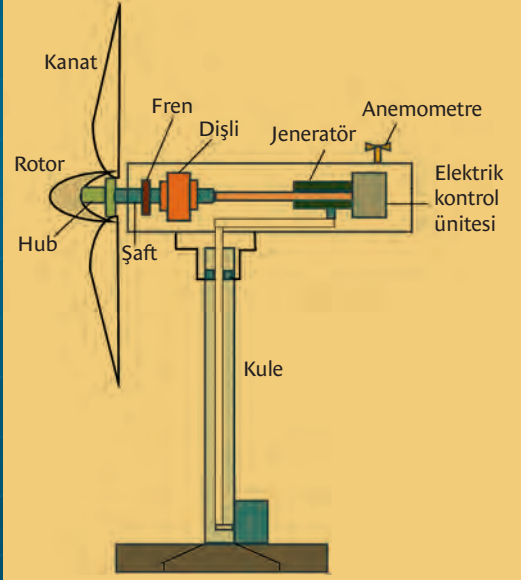
türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi temiz ve yenilenebilir elektriğe dönüştürerek yel değirmeninin modern eşdeğeri hâline geldiler.

Rüzgâr türbinlerinin çoğu, çelikten yapılmış bir kuleye monte edilmiş üç kanattan oluşur. İki kanatlı ya da beton veya çelik kafes kuleli daha az yaygın çeşitler de vardır. Yerden 100 metre veya daha yüksekte olan kule, türbinin daha yüksek irtifalarda bulunan daha hızlı rüzgârlardan faydalanmasını sağlar. Türbinler, bir uçak kanadı gibi hareket eden pervane benzeri kanatlarıyla rüzgârın enerjisini yakalar. Rüzgâr estiğinde, kanadın bir tarafında düşük basınçlı hava cebi oluşur. Düşük basınçlı hava cebi daha sonra kanadı kendine doğru çekerek rotorun dönmesine yol açar. Bir dizi dişli, rotorun dönüşünü yüksek devirlere çıkarır. Ulaşılan

hız, türbin jeneratörünün alternatif akım (AC) elektrik üretmesini sağlar. Aerodinamik yapıda bir muhafaza (nasel de denir), temel türbin bileşenlerini (genellikle dişliler, rotor ve jeneratör dâhil) kule üzerinde bir arada tutar. Türbinlerde diğer bir önemli bileşen ise yüksek rüzgârlardan kaynaklanan hasarı önlemek için rotor hızlarının sınır değeri aşmasını engelleyen türbin kontrolörüdür. Bir anemometre rüzgâr hızını sürekli ölçerek verileri kontrolöre iletir. Motor bölmesinde bulunan bir fren, acil durumlarda rotoru mekanik, elektrik veya hidrolik olarak durdurur.

Özetle rüzgâr türbini, ana bileşenler ve birçok yardımcı parçadan oluşur. Ana parçalar kule, rotor ile kanatlar, nasel (kule üzerinde şaft, dişli, jeneratör, fren, kontrol ünitesi gibi parçaları tutan yapı) ve temel veya tabandır.

Karadaki türbinlerin temeli yerin altındadır, üzeri toprakla kaplı olduğu için görünmez. Tüm türbini ona etki eden kuvvetlere karşı ayakta tutması gereken büyük ve ağır yapıllı bir beton bloktur. Açık deniz türbinlerinde ise taban su altındadır ve görülemez. Açık deniz türbinlerinde taban yüzer ancak türbinin ağırlığını ve üzerine uygulanan tüm kuvvetleri dengelemek ve türbini dik tutmak için yeterli kütleyle sahiptir. Kanatlar ve nasel bir kulenin üstüne monte edilmiştir. Kule, rotor kanatlarını yerden yüksekte ve ideal bir rüzgâr hızında tutmak için inşa edilir.

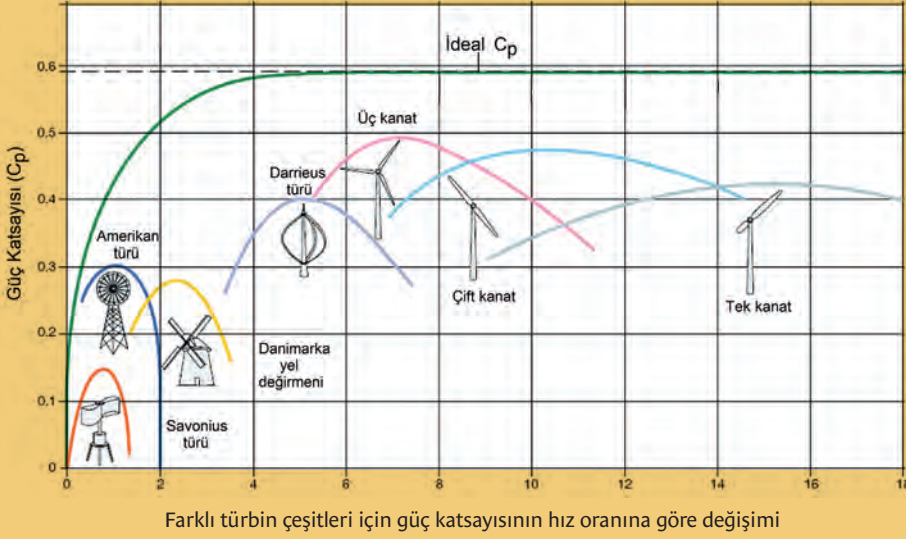


Yatay eksenli bir rüzgâr türbininin temel bileşenleri

Modern türbinlerin çoğunda kule, türbinin boyutuna ve konumuna bağlı olarak 75-150 m yüksekliğinde, 3-4 m çapında çelik bir boru şeklindedir. Rotor, bir türbinin dönen kısmıdır; (çoğunlukla) üç kanattan ve kanatların bağlı olduğu orta kısım olan göbekten oluşur. Bir türbinin mutlaka üç kanadı olması gerekmez; iki, dört veya başka sayıda kanada da sahip olabilir. Kanatlar hafif ve güçlü olması için kompozit malzeme ile, aerodinamik yapıda olması için de bir uçak kanadı teknolojisi ve hassasiyetinde üretilirler. Kanatlar eksenleri etrafında 90°ye kadar dönebilir. Göbeğin (hub) işlevi, kanatları tutmak ve türbin gövdesinin geri kalanına göre dönmelerini sağlamaktır.

İki temel rüzgâr türbini türü vardır: Yatay eksene sahip olanlar ve dikey eksene sahip olanlar. Rüzgâr türbinlerinin çoğu yatay eksene sahiptir. Bunların, yatay bir eksen etrafında dönen



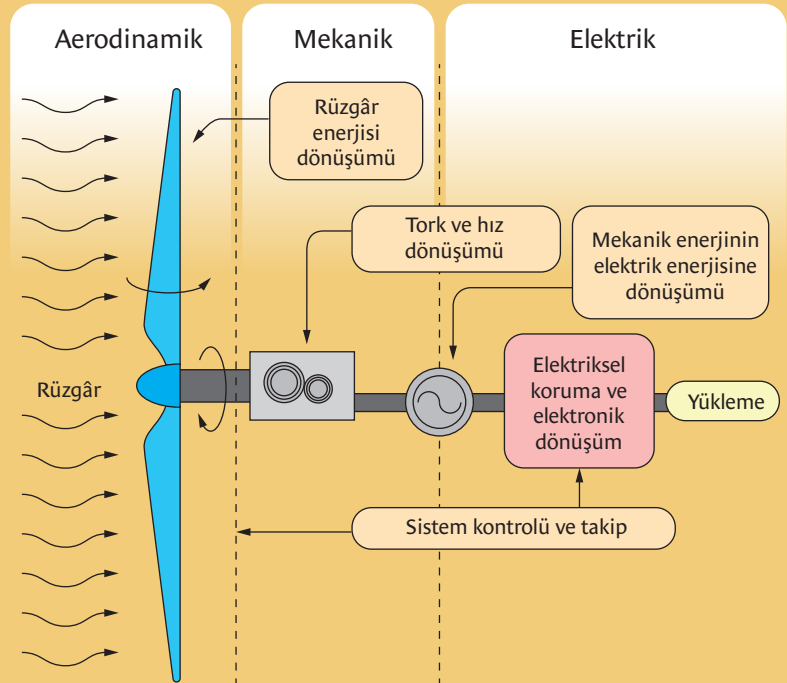


Türbin ana bileşenlerini, bu ekipmanların ardındaki fiziksel süreçleri ve mühendislik değerlendirmeleri dikkate alarak grupladığımızda şu gerçeklerle karşı karşıya kalıyoruz. Aerodinamik, mekanik ve elektriksel aşamalar olarak adlandırılan bu süreçlerdeki verimlilik, bir rüzgâr türbininden alınan gücü artırıyor. Her bir aşamada kayıplar olması kaçınılmaz olsa da teknolojik gelişmeler sayesinde bu kayıplar gittikçe azaltılıyor. Son yıllarda güç katsayısının 0,5'e kadar yükseldiği (ulaşılacak maksimum değer 0,59 olduğunu hatırlatalım) örnek türbinler görmeye başladık. Yakın dönemde türbin kanatları ve onların malzeme yapısı ile aerodinamiğinde çok önemli gelişmeler yaşandığını belirtmeliyiz.

kanatlara sahip pervane tarzı bir görünüşleri vardır. Yatay eksenli türbinler ya rüzgâra karşı (rüzgâr kanatlara kuleden önce çarpar) ya da rüzgâr doğrultusunda (rüzgâr kanatlardan önce kuleye çarpar) olmak üzere iki şekilde de üretilirler. Rüzgâra karşı olan türbinler, rüzgârın yönü değiştiğinde rotoru rüzgâra dönük tutmak için naseli döndüren bileşenler içerir. Daha az kullanılan dikey eksenli türbinler ise iki ana tasarıma ayrılır. Sürüklenme tabanlı Savonius türbinleri genellikle dikey bir eksen etrafında dönen katı kanatlı rotora sahiptirler. Kaldırma tabanlı Darrieus türbinleri ise uzun ve dikey bir kanat profili görünümündedirler (bazıları yumurta çırpıcı şeklinde görünür).

kanat ucu çevresel hızının (rotorun açılma hızı ile türbinin dış çapına bağlı) rüzgâr hızına oranını gösteren grafik bunu açıkça ortaya koyar. Grafiklere bakarak en büyük güç katsayısı değerine şu anda aktif olarak en çok kullanılan üç kanatlı rüzgâr türbinleriyle ulaşıldığı söylenebilir.

Rüzgâr türbinlerinin tarihsel gelişim süreci, genellikle onlardan sağladığımız enerji verimliliği üzerinden değerlendirilir. Farklı tür türbinler için güç katsayısı olan  $C_p$  ile hız oranı dediğimiz



Rüzgâr türbinlerinde üç ana aşama

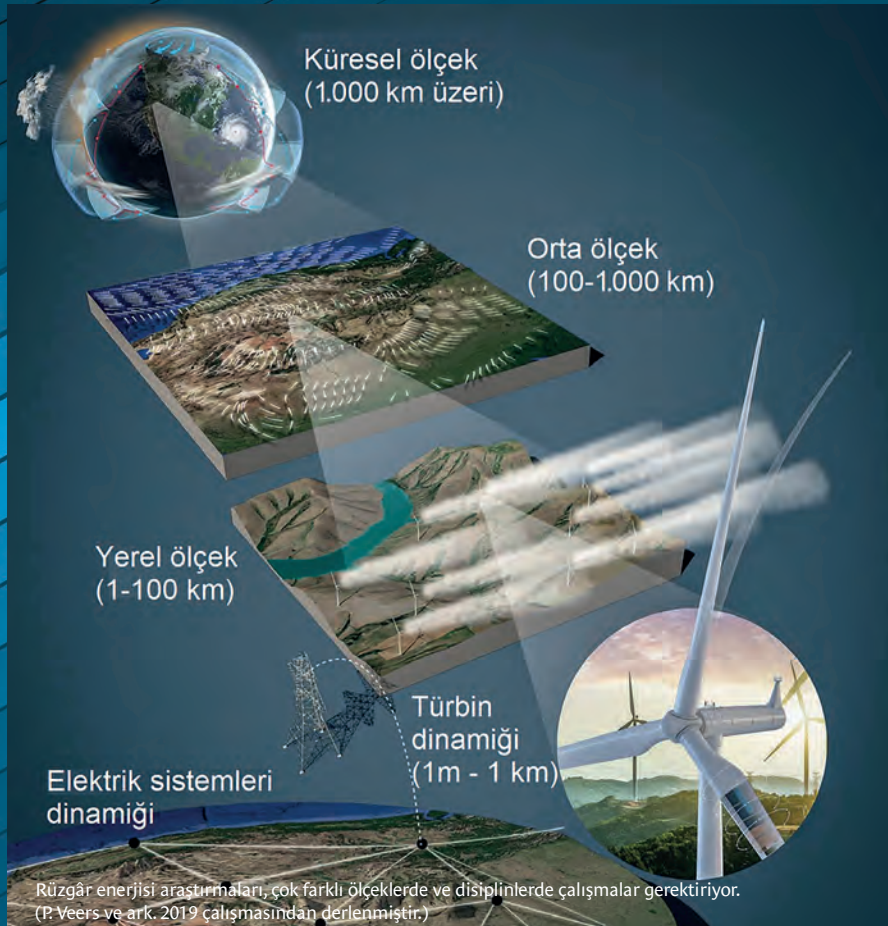
# Rüzgâr Enerjisi Türbinleri Üzerine Araştırmalar ve Gelişmeler

Rüzgâr enerjisi araştırmaları birkaç bölümde ele alınabilir. Bunlardan ilki atmosfer fiziği, meteoroloji ve iklim bilimi kapsamında hem küresel hem de yerel ölçeklerde hava akımlarının anlaşılması ve modellenmesidir. Rüzgârdan enerji elde etmede en önde gelen zorluklardan biri

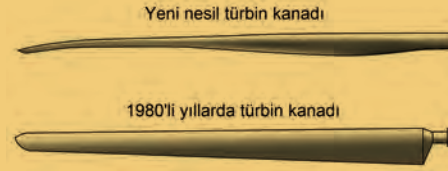
olan hava akımlarındaki kısa ve uzun zaman ölçeklerindeki değişikliklerin modellenmesi üzerine önemli gelişmeler sağlandı. Son dönemde, küresel hava akışları hakkında önemli bilgi birikimi olduğundan, üreticiler ve kullanıcılar yerel rüzgâr davranışlarını çözmeye, modellemeye ve tahmin etmeye daha çok yöneldiler. Günümüzde kullanılan yüksek güce sahip türbinlerin neredeyse tamamı atmosferik sınır tabakası dediğimiz yüksekliğin altında konumlandığı için onlara ulaşan hava akımları yerel faktörlerin (ağaçlar, tepeler, binalar, vadiler vb.) neden olduğu sürtünmeye

maruz kalıyor. Gerek türbinlerin veya rüzgâr çiftliklerinin konumlandırılmasında gerekse verimlilik fizibilite çalışmalarında bu yerel etkilerin kısa ve uzun vadede doğal hava akımı değişimleri kapsamında belirlenmesi ve ilerisi için tahminlerin yapılması (yapay zekâ algoritmalarından da faydalanılarak) son derece önemlidir.

Rüzgâr enerjisi araştırmalarında en önemli alanlardan biri de türbinler üzerine yapılan çalışmalardır. Büyük ölçekli yapılar üzerinde dönen dev kanatların aerodinamik, tüm yapının da dinamik özelliklerinin anlaşılması konusunda önemli aşamalar kaydedildi. Bir rüzgâr türbini, kanatların dönüşü dışında çok hareketsiz görünebilir ancak sistemin tamamı, 20 yıl veya daha fazla olan tüm çalışma ömrü boyunca, farklı yönlerde kendisine etkileyen kuvvetler ve momentler nedeniyle sürekli olarak esner. Bu yüzden türbinlerin uzun dönemli çalışma sürelerinde etkileyen kuvvetlere verdikleri tepkiler ve dinamik etkileşmeler titizlikle araştırılmalıdır. Son 20 yılda, rüzgâr türbini fiziğine ilişkin en son bilgileri (örneğin, aerodinamik, yapısal dinamikler, kontrol sistemleri ve hatta açık deniz uygulamaları için hidrodinamik) birleştiren sayısal rüzgâr türbini benzetim yetenekleri gelişti.



Aşırı hava koşullarında uzun süre çalışabilecek ve verimli güç sağlayan devasa rüzgâr türbinleri tasarlanmaya ve kullanılmaya başlandı. Sonuç olarak, rüzgâr türbinleri, 20 yıldan fazla süre dayanıklı kalıp çalışabilen, dünyanın en büyük esnek makineleri hâline geldi. Son dönemde kule yüksekliklerini 100 metrenin üzerinde sıklıkla görmeye başladık ve kanat uzunlukları da 80 metreye yaklaşıyor. Aslında,



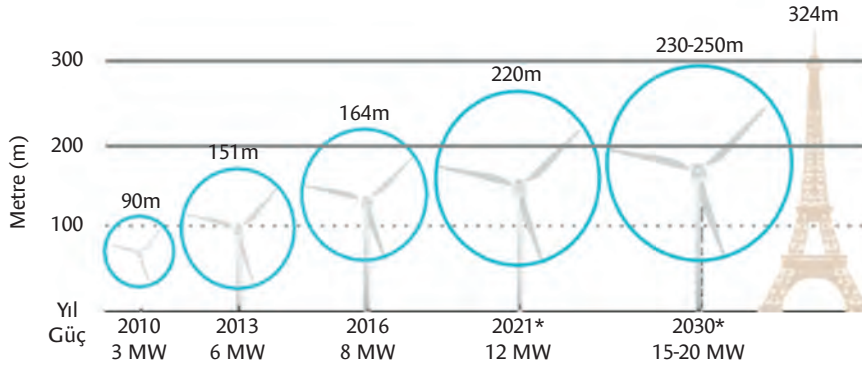
40 yılda türbin kanadı tasarımında gerçekleşen dönüşüm. Aerodinamik açıdan büyük gelişmelerin yanı sıra aynı boyutlardaki yeni nesil kanatlar, 1980'li yıllardakilere göre %90 daha hafiftir.

yüksek güç üreten rüzgâr türbinleri, genellikle 200 m'yi aşan, 60 kattan daha yüksek bir binaya eşdeğer devasa inşaat mühendisliği uygulamaları olarak

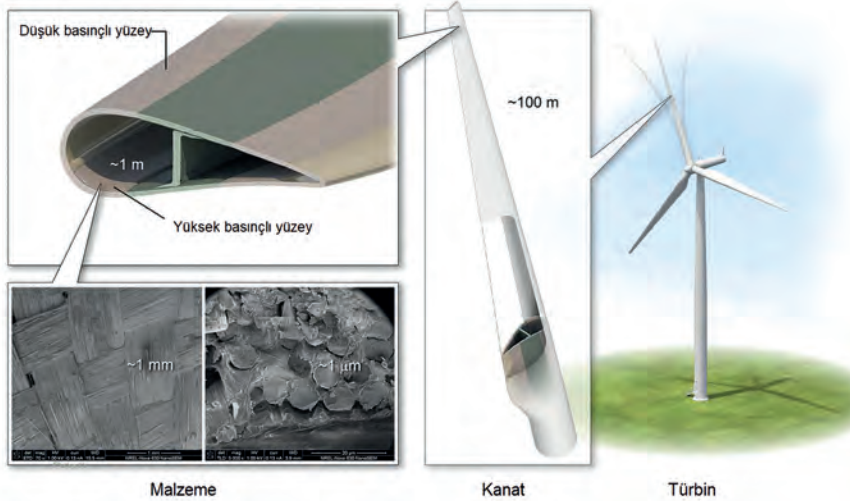
da görülebilir. Özellikle açık deniz (offshore) uygulamaları için çok daha yüksek rüzgâr hızlarına dayanıklı türbin geliştirilmesi, rüzgârın dikey davranışının anlaşılması ve açık denizlerde yüzer yapılar için aerodinamik ve hidrodinamik alanlarda yapılacak araştırmalar rüzgâr enerjisine başka bir soluk getirecektir.

Başta türbinler olmak üzere rüzgâr enerjisi ekipmanlarında hâlâ malzeme bilimi anlamında önemli gelişmelere ihtiyaç duyuluyor. Son yıllarda malzeme teknolojisinde farklı gelişmeler olsa da (fiber takviyeli kompozit malzeme, termoplastik malzemelerin denenmesi ve kullanımı) yüksek maliyet ve geri dönüşüm problemleri bu alandaki araştırmaların önemini ortaya koyuyor. Bu problemler nedeniyle bazı modern türbin üreticileri hâlâ 1990'ların türbin malzemelerini (düşük maliyetli kompozit elyaflar, dayanıklı epoksi reçineler vb.) kullanıyorlar.

Dünyada türbin üretiminde öne çıkan ülkeler Danimarka, Almanya, Hollanda, İspanya, İtalya, Hindistan ve Çin olarak sayılabilir. Şu anda geliştirilen türbinlerde 10 MW'ın üzerinde güce sahip tasarımdaki türbinlerin sayısı 10'u geçti. Farklı güçlerdeki ve modellerdeki türbinlere ve özelliklerine <https://en.wind-turbine-models.com/turbines> internet adresinden ulaşabilirsiniz.



Türbin yükseklik, güç ve süpürme çaplarının yıllara göre değişimi (Offshore Wind Outlook 2019, International Energy Agency. www.iea.org)



Rüzgâr türbini kanatları, büyük ölçekli sorunlara neden olabilen sürekli türbülans kaynaklı yüklemeler nedeniyle küçük ölçekli üretim kusurlarının büyüyebileceği karmaşık kompozit yapılarıdır. (P. Veers ve ark. 2019 çalışmasından derlenmiştir.)

# Rüzgâr Enerjisinde Yeni Nesil Uygulamalar

## Titreşimden Enerjiye

Kanatsız olarak geliştirilen bu türbinler, hava akımlarının mekanik sistemler üzerinde neden olduğu titreşimler kullanılarak geliştirildi. Bu güç kaynakları aeroelastik yapılar olarak da düşünülebilir. Temelde elastik bir çubukla dikey olarak sabitlenmiş silindir benzeri bir görünümüleri vardır. Silindir veya dikey yapı rüzgâr aracılığıyla salınım yapar ve daha sonra bir alternatör sistemi yardımıyla elektrik üretilir. Dikey esnek yapıya uygulanan kuvvetlerin frekansı, yapının frekansına yeterince yakın olduğunda yapı salınım yapmaya başlar ve rüzgârla rezonansa girer. Bu aynı zamanda “girdap kaynaklı

titreşim” olarak da bilinir. Bu yenilikçi rüzgâr türbini daha az malzeme içerdiğinden bakım maliyetlerinin de geleneksel türbinlere göre daha düşük olması muhtemel. Kanatlarının olmaması nedeniyle daha az gürültü oluşturacağı ve yaban hayata daha az zarar vereceği düşünülüyor.

## Su Damlalarından Aracısız Elektrik Enerjisi

Hareketli parçası olmayan ve yüklü su damlacıklarını kullanarak elektrik üreten kanatsız bir rüzgâr türbini geliştirildi. EWICON (Electrostatic WInd energy CONvertor – elektrostatik rüzgâr enerjisi dönüştürücü) olarak adlandırılan bu türbin, doğrudan rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretilmesini sağlıyor. Bunu, yüklü parçacıkların rüzgâr sayesinde elektrik alanın zıt yönünde yer değiştirmesiyle yapıyor.



Hollandalı araştırmacılar, yüklü su damlacıklarını rüzgârla iterek elektrik üreten ve hareketli parçası olmayan kanatsız bir rüzgâr türbini olan EWICON'u ürettiler.

Cihaz, bir tenis raketine benzer şekilde, sıralanmış 40 kadar yatay boruyu tutan çelik bir çerçeve ile donatıldı. Her bir tüp, elektro-püskürtme diyebileceğimiz bir yöntemle havaya pozitif yüklü su damlaları bırakacak elektrotlar içeriyor. Pozitif yüklü parçacıklar doğal olarak negatif elektroda doğru hareket eder ancak rüzgâr, parçacıkları negatif elektrottan uzaklaştırır ve potansiyel enerjilerini artırır. Aslında bu süreç, bir kaya parçasını bir tepenin zirvesine doğru, yer çekimine karşı itmeye benziyor. Bu sayede yüklü su damlalarında biriken enerji kullanılabilir forma dönüştürülüyor. Üretilen enerjinin miktarı, rüzgârın hızına ve yüklü parçacıkları püskürtmek için kullanılan tüplerin sayısına bağlı olarak değişiyor. EWICON'un avantajları arasında farklı şekil ve boyutlarda olabilmesi, hareketli parçası olmaması ve çok daha düşük bakım maliyetleri olarak görülüyor. Hareketli parçası



Kanatsız Rüzgâr Türbini



Londra'daki Strata isimli bina, rüzgâr türbinlerinin binanın dokusuna entegre edildiği ilk bina. Bina, enerji ihtiyacının %8'ini üreten üç adet 15 MW gücünde türbine sahiptir.

olmaması sayesinde daha az titreşim oluşturuyor ve çok daha sessiz çalışıyor, bu nedenle yerleşim yerlerine yakın alanlarda da kullanılabilirliği düşünülüyor. Prototip olarak üretilen bu yeni nesil türbinin, daha büyük ölçekli modelinin üretilmesi için çalışılıyor. Elektrostatik rüzgâr enerjisi dönüşümü olarak da adlandırılan bu süreç konusunda iki farklı uygulama olan WPG (wind power charged aerosol generator - rüzgâr enerjisi şarjlı aerosol jeneratörü) ve SWET (solid state wind energy transformer - katı hâl rüzgâr enerjisi transformatörü) üzerinde de araştırmalar devam ediyor.

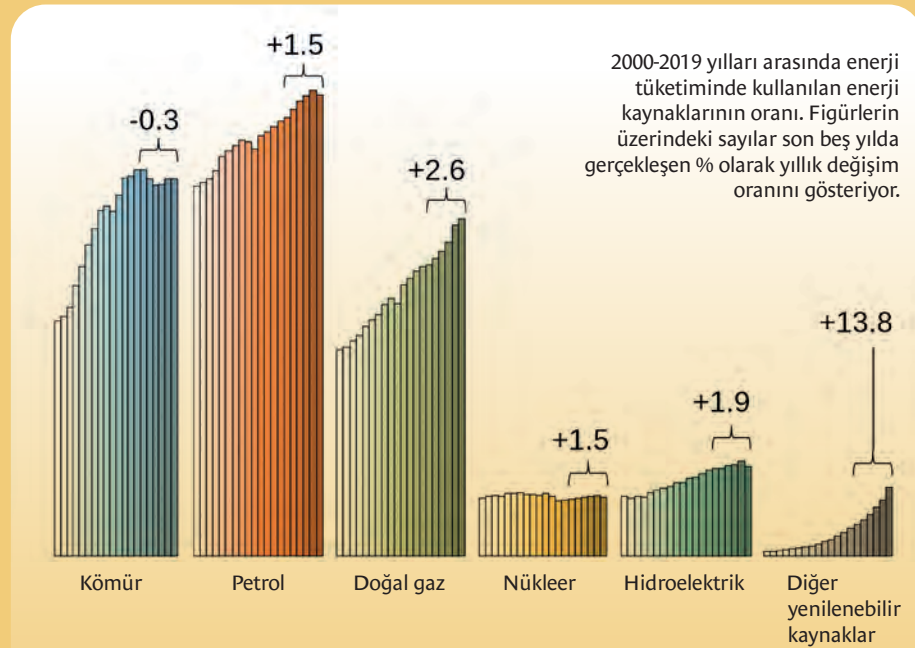
Bu iki örneğin dışında, uçan balon veya benzeri yapılara yerleştirilen türbinler; otoyolların ortasına, viyadüklere veya

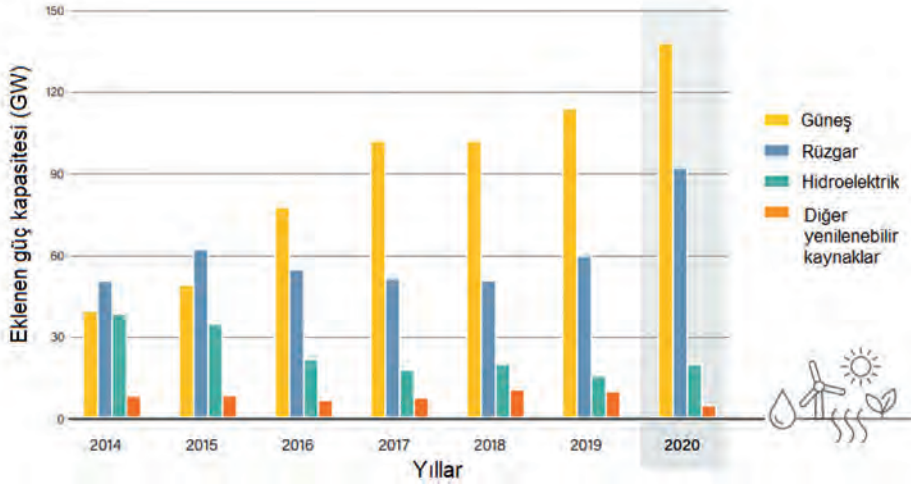
dev köprülerin altındaki rüzgâr kanallarına konulan türbinler; gökdelenlere veya aralarına yerleştirilen türbinler tasarımlarıyla dikkat çekiyor. Enerji teknolojisinde amaç; geliştirilen tasarımlarla maliyetlerin düşürülmesi, çevreye daha az zarar verecek şekilde daha fazla güç elde edilmesi, olağanüstü koşullara dayanıklı uzun ömürlü yapılar inşa edilmesi ve düşük bakım-onarım masraflarına ulaşılması olup bu kapsamda çok sayıda tasarım üzerinde çalışılıyor.

## Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Kullanımı

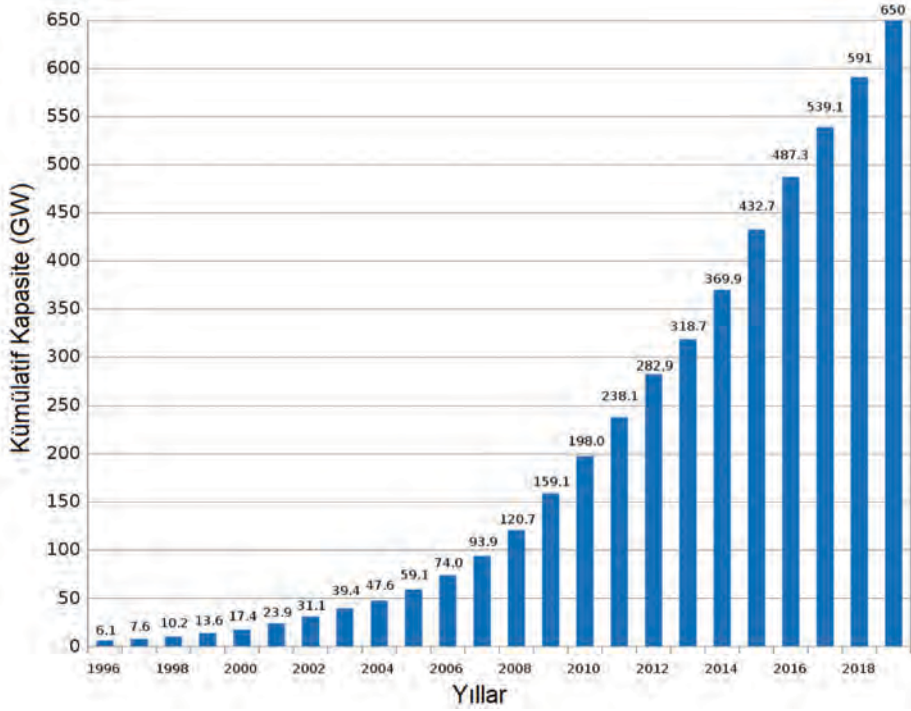
İnsanlık tarihi boyunca rüzgâr yaşamı kolaylaştırmak için farklı şekillerde kullanıldı. Yazımızın bu bölümünde, yelkenli gemilerden tahıl öğütmeye, su pompalamadan rüzgâr türbinlerine doğru uzanan bu yolculuğun son dönemine konuk olmaya çalışacağız. Özellikle son yıllarda, ihtiyaçlarımıza da paralel olarak, rüzgârın elektrik enerjisine dönüştürülmesi süreçleri gündemimizin ana konularından biri oldu. Tabii ki rüzgârın en temiz yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olması bu kaynağa verilen önemi açıklıyor.

Dünyadaki enerji tüketiminde enerji kaynaklarının kullanım dağılımına bakıldığında hâlâ fosil yakıtların en büyük pay sahibi olduğu açıktır. Buna karşın, 2000-2019 yılları arasında farklı





Yenilenebilir enerji kaynaklarında eklenen güç kapasitesinin 2014-2020 yılları arası değişimleri (Renewables 2021 Global Status Report)



Dünyada rüzgâr enerjisi kümülatif kapasitesinin (Gigawatt – GW cinsinden) yıllara göre değişimi (Kaynak: GWEC – Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi)

çekmektedir. Kilowatt gücünde tek tek rüzgâr türbinleriyle başlayan bu serüven, megawatt mertebesinde güçlerdeki rüzgâr türbinlerinden oluşan rüzgâr çiftliklerine ve daha da ilerisi okyanuslara kurulan (offshore) yüzen türbin alanlarına doğru ilerledi. Çin’de toplam gücü 7.965 MW olan “Gansu Rüzgâr Çiftliği”, İngiltere’nin kuzeybatı kıyılarında kurulan 659 MW gücündeki “Walney Extension Offshore Rüzgâr Çiftliği” öne çıkan büyük kapasiteli uygulamalar olarak dikkat çekiyor.

2019 sonu verilerine göre, dünyada rüzgâr enerjisini en fazla kullanan veya en fazla rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip ülkeler sıralamasında Çin (236.402 MW), Amerika Birleşik Devletleri (105.466 MW) ve Almanya (61.406 MW) ilk üç sırada yer alıyor. Yine aynı yıl için elektrik enerjisi tüketiminde rüzgâr enerjisinin en çok pay aldığı ülke ise %48’lik oranla Danimarka’dır.

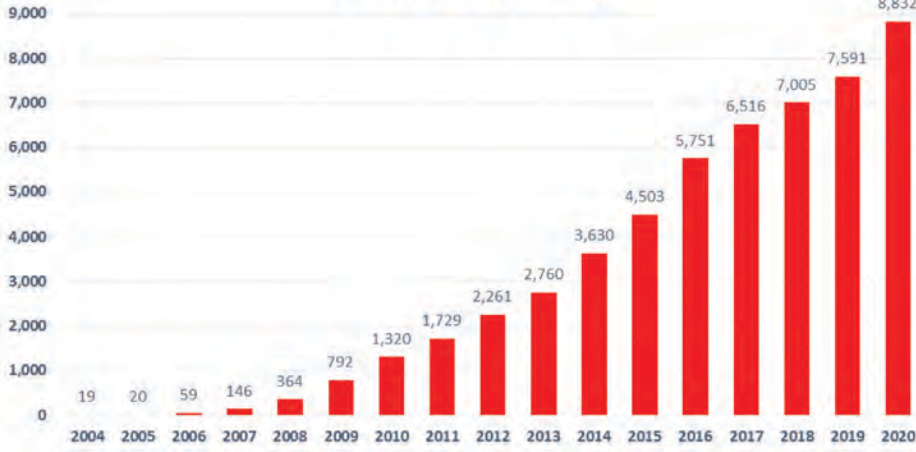
Ülkemiz toprakları ev sahipliği yaptığı farklı medeniyetlerde rüzgâr enerjisi kullanımına ilişkin örnekler sunuyor. En eski örneklerden biri, şu anda ülkemizde rüzgâr enerjisinin etkin üretildiği alanlarda bulunan, Çanakkale ili sınırlarındaki Troya’ya uzanıyor. 14. yüzyılda bölgede rüzgâr değirmenleri bulunduğu ilişkin elde edilen bilgilerden

enerji kaynaklarının kullanım oranındaki değişim yönelimleri izlendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaklaşık %14 oranında arttığı dikkat çekiyor. Rüzgâr enerjisi kullanımının yıllara göre değişiminde de

üstel bir artış göze çarpıyor. Dünyada 2020 yılı itibarıyla ulaşılan rüzgâr enerjisi kapasitesi 733 GW yöresindedir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki artışta rüzgâr enerjisi başı



## Kurulu Güç (MW)



Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kurulu gücünün kümülatif değerler üzerinden yıllara göre değişimi (<https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>)

Ülkemizde rüzgâr enerjisi potansiyelinin en yoğun olduğu ve en fazla kurulu güce sahip olan üç il Balıkesir, Çanakkale ve İzmir'dir. Doğal olarak yatırımlar, rüzgâr potansiyelinin fazla olduğu bu iller ve yukarıda rüzgâr hızı dağılımlarında yüksek rüzgâr alan bölgelerde yoğunlaşıyor. Kurulu rüzgâr enerjisi santrallerinin dağılımına bakıldığında Türkiye'nin batısı (Kuzey Ege ve Güney Marmara ağırlıklı olmak üzere) öne çıkıyor.

## Rüzgâr Enerjisi ve Çevre

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli avantajlarından biri çevre dostu olmalarıdır. Rüzgâr enerjisi, çevreye en az zarar veren kaynakların önde gelenlerindedir. Şimdi rüzgâr enerjisinin, çevre ve doğal hayat üzerindeki etkilerinden bazılarına değinelim:

**Temizdir.** Rüzgâr temiz, ücretsiz ve kolayca temin edilebilen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Örneğin, 2019'da rüzgâr enerjisi Avrupa'da 118 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonunun önüne geçmişti. Çalışan rüzgâr türbinleri, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gibi sera gazları veya nitrojen oksit (NOx), kükürt oksit (SOx) veya partikül madde (PM) gibi diğer hava kirleticileri yaymaz.

sonra 1960-61 yıllarında Tarım Bakanlığı tarafından yapılan taramalarda 749 adet rüzgâr değirmeni olduğu rapor ediliyor. Rüzgârdan elektrik enerjisi üretimine ilişkin ülkemizdeki ilk örnek denilebilecek uygulama ise İzmir'in Çeşme ilçesinde 1986 yılında kurulan ve 55 kW gücünde olan rüzgâr türbinidir. Bir duraksama döneminden sonra yine Çeşme yöresinde 1998 yılında kurulan Germiyan Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) ile (ülkemizin ilk RES'i) ülkemizin rüzgâr potansiyelinin kullanımında ivmelenme başladı. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından, 2006 yılında Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli atlası (REPA) düzenlendi. Bu rapor, rüzgâr enerjisi yatırımları için dikkat çekici ve teşvik edici bir kaynak olarak göze çarpıyor. Mayıs 2009 tarihli Elektrik Enerjisi

Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi'nde 2023 yılında rüzgâr enerjisine dayalı kurulu gücün en az 20.000 MW olmasının hedeflendiği belirtiliyor. Bununla beraber son yıllarda rüzgâr enerjisine eklediğimiz potansiyel güç olarak dünyada dikkat çeken ülkelerden biriyiz. 2021 yılında yayımlanan Küresel Rüzgâr Enerji Konseyi raporuna göre, Türkiye, yeni rüzgâr enerjisi santralleri kurulumları dikkate alındığında (eklenen rüzgâr enerjisi potansiyeli) dünya ölçeğinde ilk 10 ülke içerisinde yer alıyor.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, Türkiye'nin, rüzgâr enerjisi potansiyelinin yaklaşık 48.000 MW olduğu belirlendi. Aralık 2020 sonu itibarıyla, Türkiye'nin rüzgâr enerjisine dayalı kurulu elektrik gücü 8.832 MW'a yükseldi. Bunun, toplam elektrik üretimindeki payı ise %8,09'dur.

**Sürdürülebilirdir.** Rüzgâr enerjisinin su ayak izi, diğer birçok elektrik üretim biçiminin aksine neredeyse sıfırdır. Rüzgâr türbinlerinin yapımı, nakliyesi, işletimi ve sökülmesi sırasında CO<sub>2</sub> emisyonları yaşanmasına rağmen, bu emisyonlar bir yıldan daha kısa bir işletim süresinde atmosfere geri ödenir. Rüzgâr türbinleri beton ve çelik gibi standart malzemelerden, kanatları da kompozit malzemelerden yapılır. Türbin temellerinde kullanılan çimento, genellikle toprağı kirletmeyen bir malzemedir. Rüzgâr türbinleri endüstrisi ve tedarik zinciri, kaynakları verimli kullanan ve sürdürülebilir malzemeler (düşük karbonlu çelik, kanatlar için geri dönüştürülebilir kompozitler vb.) geliştirmek için çalışıyor. Belirli türbin modelleri, başta kalıcı mknatıslar olmak üzere, farklı miktarlarda

nadir toprak elementleri kullanır. Malzemelerde geri dönüşüm oranı arttırıldığında sürdürülebilirlikte önemli kazanımlar elde edilecektir. Bunun yanında 20-25 yıla kadar ömürleri olan rüzgâr türbinleri, gelişen teknolojiyle daha uzun ömürlü hâle getirilerek birim zamanda oluşacak atık miktarının azaltılması da bekleniyor.

**Rüzgâr çiftçiliği, tarıma ve denizciliğe en az zarar verecek, hatta katkı sağlayacak şekilde planlanabilir.** Rüzgâr türbin

çiftlikleri birçok tarımsal ve benzeri faaliyetlerle bir arada bulunabilir. Rüzgâr çiftlikleri, habitatların ve ekosistemlerin korunmasında rol oynayarak biyoçeşitlilik üzerinde olumlu etkilere sahip olabilir. Rüzgâr çiftlikleri kurulduktan sonra sahaları uzun yıllar bozulmadan

kalır. Açık denizlerde rüzgâr çiftlikleri bulunan bölgelerde dip trolü ve dip tarama yapılamaz, bu da deniz tabanını korumamıza yardımcı olabilir. Diğer yandan, kıyı uygulamalarında, kıyı güvenliği ve deniz ulaşımında sorunlar yaşanabilir. Rüzgâr çiftlikleri kurulmadan önce fizibilite çalışmaları hassas bir şekilde yapılmazsa verimli tarım alanlarında ve ekolojik ortamlarda zararlar oluşabilir. Bu yüzden çevresel etki değerlendirmeleri profesyonel şekilde hazırlanarak rüzgâr türbinleri ve özellikle çiftlikleri kurulmadan önce tüm olumsuz süreçler yapay benzetimlerle değerlendirilmeli ve ancak gerekli önlemler alınıp olumsuzluklar en aza indirildikten sonra kurulum gerçekleştirilmelidir.

**Rüzgâr çiftliklerinin kuşlar ve yarasalar üzerindeki etkisi, iklim değişikliğinin ve diğer insan faaliyetlerinin etkisiyle karşılaştırıldığında son derece düşüktür.** Aynı zamanda, bu etkinin diğer enerji üretim biçimlerinin etkisinden çok daha düşük olduğuna ilişkin çalışmalar da mevcuttur. Rüzgâr çiftliklerinin bu türler üzerindeki etkisini önlemek ve/veya azaltmak için yerel yetkililer ve kuş uzmanlarıyla birlikte çalışılmalıdır. İyi bir planlama ve konumlandırma yoluyla kuşları ve yarasaları rüzgâr türbinlerinden uzak tutmak için





## Rüzgâr Enerjisi

### ARTILARI

- Yenilenebilir, temiz ve bedava kaynak
- Düşük işletme maliyetleri ve uzun kullanım ömrü
- Rüzgâr yoğunluğu yeterli olan her yere - şebeke olmayan bölgelere - kurulma olanağı
- Gece ve gündüz enerji üretimi
- Paylaşım alan kullanımı

### EKSİLERİ

- Değişken ve kontrol edilemez kaynak yoğunluğu
- Yüksek kurulum maliyetleri
- Gürültü kirliliği
- Deniz ve kara ekolojisine, özellikle de kuşlara etkisi
- Kıyı uygulamalarında deniz ulaşım güvenliğine olumsuz etkileri

önlemler alınabilir ancak bu uzaklaştırmadan hayvanların ne kadar etkileneyeceği de titizlikle araştırılmalıdır. Özellikle büyük rüzgâr çiftliklerinin göç yolları üzerinde olmasının getireceği sonuçlar, çiftlikler kurulmadan önce iyi analiz edilmeli ve konumlandırmalar canlılara en az zarar verecek şekilde yapılmalıdır. Bu konuda bir başka çözüm de kuşlar veya yarasalar rüzgâr türbinlerine çok yakın uçtuğunda rotorun dönmesini durdurmaya yarayan özel bir ekipman kullanmak olabilir.

**Yeni nesil rüzgâr türbinleri, eskilerinden çok daha sessizdir.** Son dönemde tasarım ve teknolojiye büyük iyileştirmeler yapılarak mekanik olarak üretilen gürültü çok aza indirildi. Ayrıca kanatların rüzgârdaki hareketinin yarattığı aerodinamik gürültü de önemli ölçüde azaltıldı. Yasal düzenlemelerle rüzgâr türbini sesi için sınırlar getirilebilir. Avrupa'da izin verilen maksimum sınır; gündüz 40- 55 desibel, gece ise 5-10 desibel arasında değişiyor. Örneğin, 350 m uzaklıktaki (genellikle yerleşim yerlerinden

çok daha uzak mesafelere inşa edilirler) bir rüzgâr çiftliğinin üretebileceği gürültü 35-45 desibel iken şehir trafiğinin oluşturacağı gürültü 90 desibele kadar çıkabiliyor, hatta orta seviyede karşılıklı konuşmada gürültü seviyesi 40-50 desibele ulaşabiliyor. Yeni geliştirilen kanatsız rüzgâr türbinlerinde gürültünün çok daha aşağı seviyelerde olacağı öngörülmüyor.

Yukarıda söz edilen olumlu ve olumsuz yönler dikkate alındığında, rüzgâr, en sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarından biri

olarak öne çıkıyor. Ancak proje büyüklüğüne ve inşa edildikleri sahanın koşullarına bağlı olarak bazı çevresel olumsuzluklara da yol açabilecekleri unutulmamalıdır. Rüzgâr türbinleriyle ilişkili olumsuz çevresel etkilerin çoğu, ayrıntılı araştırma ve teknolojik gelişmeler sayesinde büyük ölçüde önlenebilir görünüyor.



**Sonuç olarak**, insanlık fosil kaynakların tükenmeye yakın olduğunun farkında ve bu kaynakların çevreye verdiği zararlar ve küresel ısınmanın getirdiği olumsuz sonuçlarla karşı karşıyadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji tüketimindeki payı gittikçe artıyor. Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisiyle birlikte kullanımı en çok artan

yenilenebilir kaynaklardandır. Ülkemizde de rüzgâr potansiyelinin kullanımı son 10 yıl içinde katlanarak arttı ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin aktifleştirilmesi açısından dünyada ve Avrupa'daki ülkeler arasında ön sıralarda yer almamızı sağladı. Bu ilerleme, son dönemde küresel ısınma konusunda gösterdiğimiz artan hassasiyete önemli bir dayanak oluşturuyor.

Ülkemizin rüzgâr potansiyeli en yüksek yerlerinden biri olan Çanakkale'nin rüzgârlı günlerinde, rüzgâr türbinlerine bakarak bu yazıyı tamamlamak ayrı bir keyif oldu. Biz Dünyalıların esen yel ile ferahlanmanın yanında, ondan gelen enerjiyi de kullanarak daha temiz bir Dünya için daha fazla katkı vermemiz dileğiyle... ■

## Kaynaklar

- A.Dhanola, H.C.Garg, "Tribological challenges and advancements in wind turbine bearings: A review", *Engineering Failure Analysis*, cilt 118, 104885, (2020).
- M. Ebrahimpour, R.Shafaghath, R. Alamian and M. S. Shadloo, "Numerical Investigation of the Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of the Overlap Parameter in Both Horizontal and Vertical Directions on Its Performance", *Symmetry*, 11, 821, (2019).
- P. Veers, K. Dykes, E. Lantz vd., "Grand challenges in the science of wind energy", *Science*, 366, 443, (2019).
- Y. Wittor, "Harvesting wind energy through electrostatic wind energy conversion - Comparison with common wind turbines and future possibilities", *EGU Master Journal of Renewable Energy Short Reviews*, 2021\_09, 48, (2021).
- F. Pierre; J., Matthew W.; O., Michael; vd., "Global Carbon Budget 2019". *Earth System Science Data*. 11 (4): 1783–1838. (2019).
- M. Acaroğlu, "Alternatif Enerji Kaynakları", *Nobel Yayınları*, Yayın No:1253, (2007).
- Offshore Wind Outlook 2019, International Energy Agency. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar>
- <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>
- <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar>
- <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>
- [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf)
- [https://www.emo.org.tr/ekler/dc375089b790ef9\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/dc375089b790ef9_ek.pdf)
- <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power)
- [https://energypedia.info/wiki/Wind\\_Energy\\_-\\_Physics](https://energypedia.info/wiki/Wind_Energy_-_Physics)
- <https://www.energy.gov/articles/how-wind-turbine-works>
- <https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-parts-functions/>
- <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-and-the-environment/>
- <https://www.powermag.com/changing-winds-emerging-wind-turbine-technologies/>
- <http://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-Rüzgâr%20Enerjisi%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>
- <https://www.wired.co.uk/article/bladeless-wind-turbine-ewicon>
- P. Jain, "Wind Energy Engineering", The McGraw-Hill Companies, Inc., ISBN: 978-0-07-171478-5, pg.33-35, (2011)
- S. Wang and S. Wang, "Impacts of wind energy on environment: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, 437-443, (2015)
- [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind\\_power#cite\\_note-4](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind_power#cite_note-4)
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Wind>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy#Wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy#Wind_power)