

ME 331
YENİLENEBİLİR ENERJİ

RÜZGAR ENERJİSİ

Ceyhun Yılmaz
Afyonkocatepe Üniversitesi

- ❑ Teknik olarak her iki cihaz da türbin olmasına rağmen, akışkandan enerji ürettiğinden, mekanik enerji üretimi için kullanılan **yel değirmeni** (tahıl öğütme, pompa su vb.) ve elektrik enerjisi üretimi için kullanılan **rüzgar türbini** terimleri arasında bu farkı not ederiz.
- ❑ Rüzgar türbinlerinin rotorlarının dönüş hızı genellikle 40 dev/dak'ın altındadır (büyük türbinler için 20 dev/dak'nın altında).
- ❑ Kaliforniya'daki Altamont Pass, 15.000 modern rüzgar türbiniyle dünyanın en büyük rüzgar santralidir. Bu çiftlik ve California'daki diğer ikisi yılda yaklaşık 3 milyar kWh elektrik üretiyorlar ve bu da San Francisco'nun elektrik ihtiyacını karşılamak için yeterli güce sahip.
- ❑ Dünya çapında mevcut rüzgar enerjisi üretim kapasitesinin yüzde 75'inden fazlasını ABD, Almanya, Danimarka ve İspanya oluşturmaktadır.
- ❑ Danimarka, ulusal elektrik enerjisinin yüzde 10'unu tedarik etmek için rüzgar türbinleri kullanıyor.
- ❑ Ticari rüzgar türbinleri, her biri peak tasarım koşullarında 100 kW ila 3.2 MW elektrik enerjisi üretir.
- ❑ Boeing Engineering tarafından inşa edilen 3.2 MW rüzgar türbininin kanat aralığı (veya rotor) çapı 320 ft (97.5 m) 'dir.

- ❑ Rüzgar türbinleri yalnızca rüzgar esince güç üretir ve bu nedenle rüzgar türbininin güç çıkışı kararsızdır.
- ❑ Rüzgar türbinleri, rüzgarın estiği yerde bulunmakta ve bu da geleneksel güç şebekelerinden uzaktadır, böylece yeni yüksek gerilim güç hatları inşa edilmesini gerektirmektedir.
- ❑ Rüzgar türbinlerinin yakın gelecekte küresel enerji arzında giderek artan bir rol oynamaları bekleniyor.



(a) Rüzgar çiftlikleri, küresel fosil yakıt talebinin azaltılmasına yardımcı olmak için dünyanın dört bir yanında hızla yayılıyor.

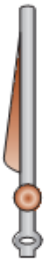


(b) Bazı rüzgar türbinleri binalara da yerleştirilebiliyor (Bu üç türbin, Bahreyn Dünya Ticaret Merkezi'ndeki bir binadadır.)

Rüzgar Türbin Çeşitleri ve Performans Güç Eğrisi

- ❑ Birçok yenilikçi rüzgar türbini tasarımı yüzyıllar boyu önerilmiş ve test edilmiştir.
- ❑ Rüzgar türbinlerini genellikle dönme eksenlerinin yönüne göre sınıflandırırız:
 - ❑ yatay eksenli rüzgar türbinleri (HAWTs)
 - ❑ dikey eksenli rüzgar türbinleri (VAWTs).
- ❑ Bunları kategorize etmenin alternatif bir yolu, dönen şafta tork sağlayan mekanizma: kaldırma veya sürüklenme kuvvetleri. Şimdiye kadar, VAWT tasarımlarının hiçbiri veya sürüklenme tipi tasarımlar, kaldırma tipi HAWT'nin verimliliğini veya başarısını sağlamamıştır (lift type HAWT).
- ❑ Bu nedenle, dünya genelinde inşa edilen rüzgar türbinlerinin büyük bir çoğunluğu bu türden olup, rüzgar santralleri veya çiftlikleri diye adlandırılan kümeler halinde bulunmaktadır.

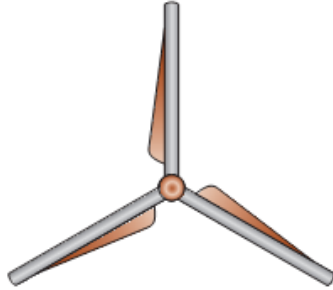
Yatay Eksenli Türbinler



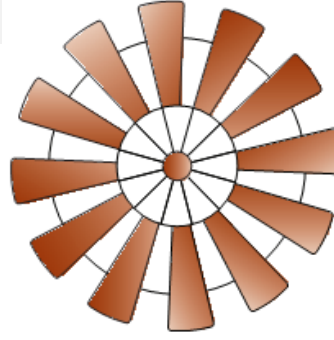
Single bladed



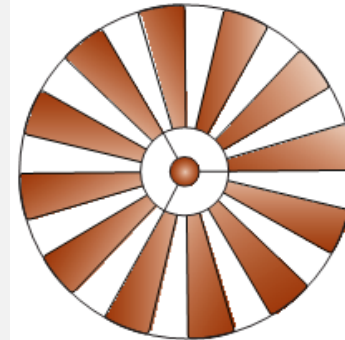
Double bladed



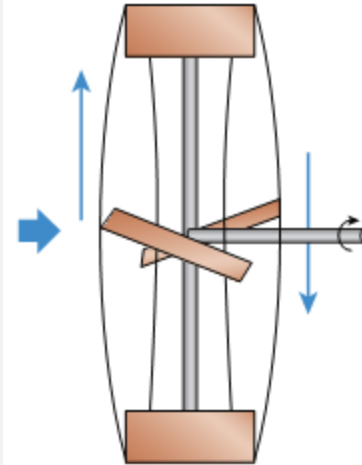
Three bladed



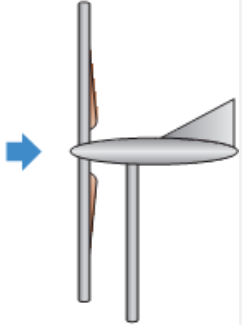
U.S. farm windmill
multi-bladed



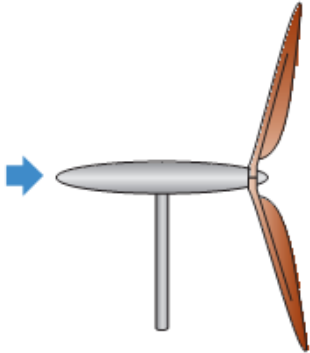
Bicycle
multi-bladed



Cross-wind
paddles



Up-wind



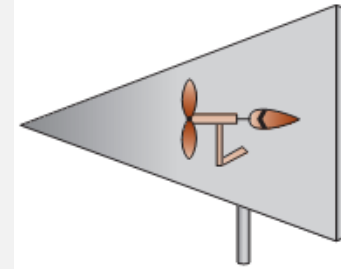
Down-wind



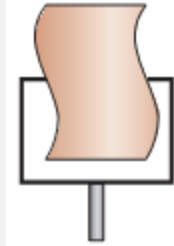
Concentrator



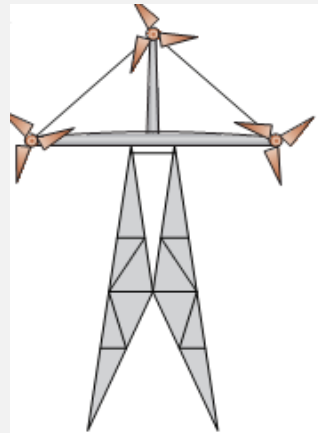
Diffuser



Unconfined vortex



Cross-wind
Savonius

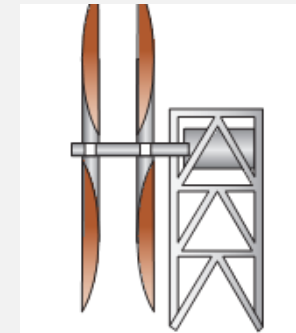


Multi-rotor

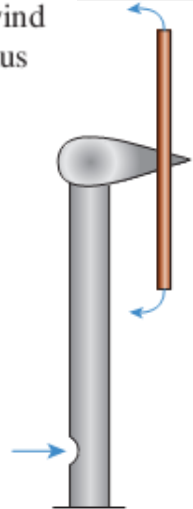


Sail wing

Çeşitli rüzgar türbini
tasarımları ve
sınıflandırılması.



Counter-rotating blades

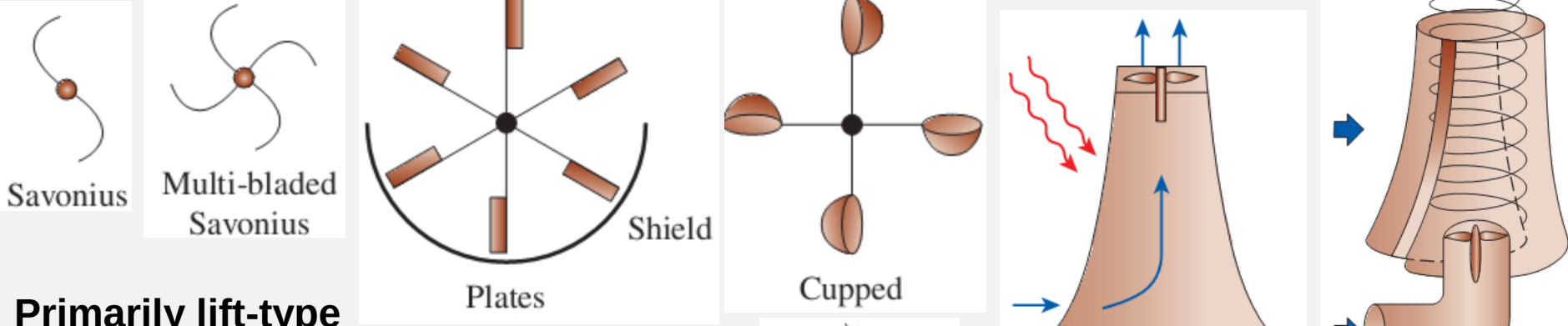


Enfield-Andreau

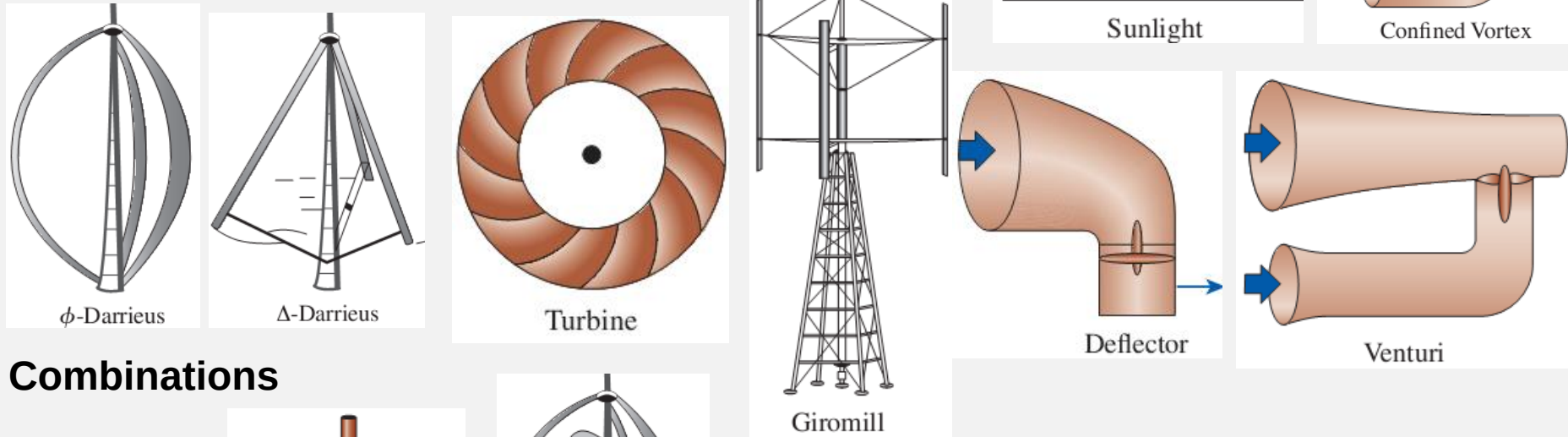
Dikey Eksenli Türbinler

Primarily drag-type

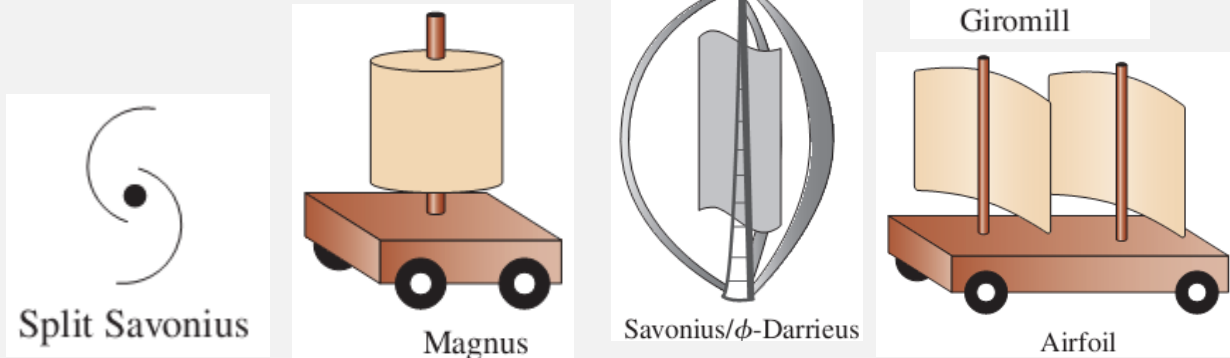
Others



Primarily lift-type



Combinations



Çeşitli rüzgar türbinlerinin tasarımı ve sınıflandırılması.

- ❑ Her rüzgar türbininin karakteristik bir performans güç eğrisi vardır. Elektrik gücü çıkışı, türbin eksen yüksekliğinde rüzgar hızı V 'nin bir fonksiyonu olarak çizilir.
- ❑ Rüzgar hızı skalasında üç anahtar bölgeyi şöyle tanımlayabiliriz:

Kesme hızı (Cut-in speed), faydalı güç üretilebilecek minimum rüzgar hızıdır.

Anma hızı (Rated speed), anma gücünü veren rüzgar hızı, genellikle maksimum güçtür.

Kesme hızı (Cut-out speed), rüzgar türbininin güç üretmek için tasarlandığı maksimum rüzgar hızıdır. Kesme hızından daha yüksek rüzgar hızlarında türbin kanatları hasar görmemesi ve güvenlik sorunları için bazı fren mekanizması ile durdurulur.

- ❑ Kesikli kırmızı çizginin kısa kesiti, kesme işlemi uygulanmadığında üretilen güçü gösterir.

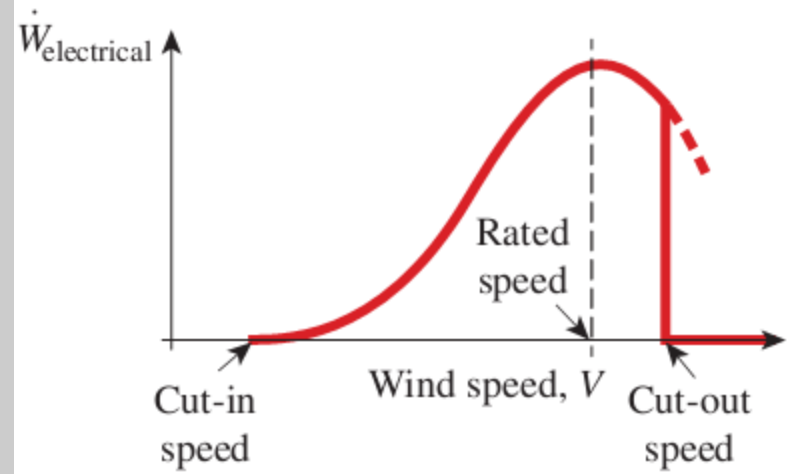


FIGURE 18-31

Kesme, anma ve kesme hızları tanımlamaları ile tipik bir rüzgar türbini güç performans eğrisi.

HAWT türbin kanatlarının tasarımı, performansı en üst düzeye çıkarmak için daralan ve bükülür.

Rüzgar türbini tasarımında en kritik akışkanlar mekaniği iken, güç performans eğrisi de elektrik jeneratörü, dişli kutusu ve yapısal sorunlardan da etkilenebilir. Verimsizlikler her bileşende görülür.

Rüzgar gücü potansiyeli

Mekanik enerji, ideal bir türbin gibi ideal mekanik bir cihazla tamamen ve doğrudan mekanik işe dönüştürülebilen enerji şekli olarak tanımlanabilir.

$$\dot{E}_{\text{mech}} = \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

P/ρ is the flow energy,
 $V^2/2$ is the kinetic energy
 gz is the potential energy of the fluid
 $\dot{m}$ is the mass flow rate of the fluid.

Bir rüzgar türbininin giriş ve çıkışındaki basınçlar hem atmosfer basıncına eşittir hem de yükseklik rüzgar türbini boyunca değişmez.

Bu nedenle, akış enerjisi ve potansiyel enerji rüzgar türbini boyunca değişmez.

Bir rüzgar türbini, akışkanın kinetik enerjisini güç haline dönüştürür.

$$\dot{W}_{\text{available}} = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \quad (\text{kW})$$

Available wind power: Bir rüzgar türbininin verilen rüzgar hızı V için üretebileceği maksimum güçtür.

$$\dot{m} = \rho A V \quad (\text{kg/s}) \quad \text{Kütleli debi}$$

$$\dot{W}_{\text{available}} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad \text{Rüzgar gücü potansiyeli}$$

ρ is the density
 A bir rüzgar türbininin disk alanıdır (dönen türbin kanatları tarafından süpürülmüş dairesel alan).

Elde edilebilir güç, bir rüzgar türbininin güç potansiyelinin, hava yoğunluğu ile orantılı olduğunu gösterir. Sonuç olarak, soğuk hava, sıcak havadan daha yüksek bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir.

$P = \rho RT$ Ideal gas relation Gas constant $R = 0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$

$A = \pi D^2/4$ The disk area. D is the blade diameter.

$$\dot{W}_{\text{available}} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad \dot{W}_{\text{available}} = \frac{\pi P D^2 V^3}{8 R T}$$

Bir rüzgar türbininin güç potansiyeli, rüzgar hızının kübik gücü ile orantılıdır.

Bir rüzgar türbininin güç potansiyeli, kanat çapının karesi ile orantılıdır.

Sonuç olarak, kanat çapının iki katına çıkması güç potansiyelini dört kat arttırır.

1.2 kg/m³ yoğunluğa ve 4 m/s hıza sahip bir rüzgarın üfleme yaptığı dikkate alınsın.

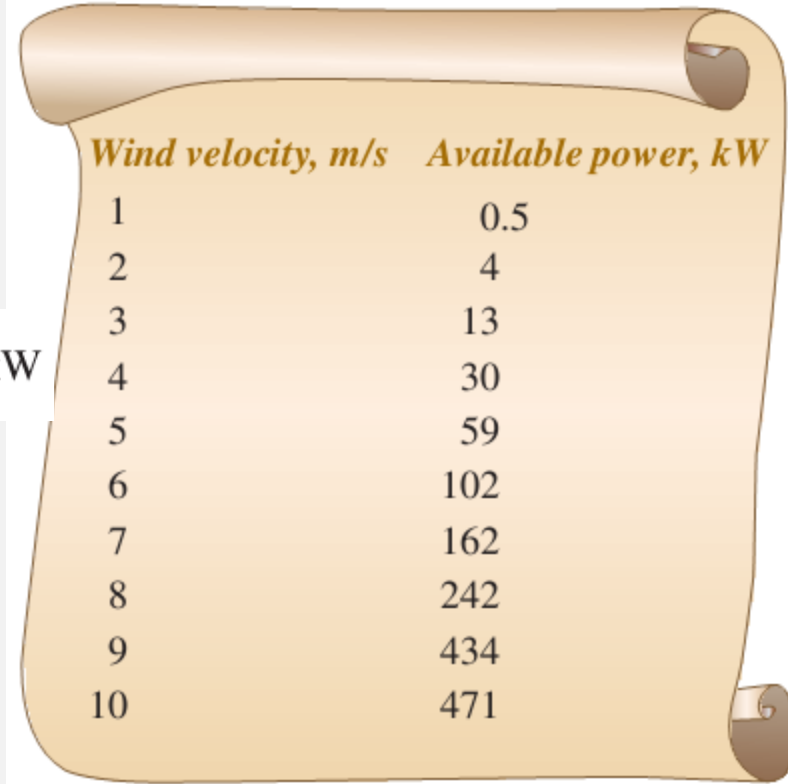
Rotor çapı 1 m olan bir rüzgar türbininin azami gücü şu şekildedir:

$$\dot{W}_{\text{available}} = \frac{1}{2} \rho A V^3 = \frac{1}{2} (1.2 \text{ kg/m}^3) \frac{\pi (1 \text{ m}^2)}{4} (4 \text{ m/s})^3 = 30 \text{ kW}$$

Rüzgar hızı iki katına çıkarsa, mevcut güç 242 kW olur.

Rüzgar hızının iki katına çıkması güç potansiyelini 8 kat artırır.

Bu kübik bağıntı için, eğer seçilen bölgede sabit ve 6 m/s veya daha fazla rüzgar hızı mevcut değilse yatırım mantıklı ve tatmin edici değildir.



Wind velocity, m/s	Available power, kW
1	0.5
2	4
3	13
4	30
5	59
6	102
7	162
8	242
9	434
10	471

FIGURE 18–32

Bir rüzgar türbininin güç potansiyeli, rüzgar hızının kübik gücü ile orantılıdır. Bu nedenle, rüzgar hızını iki katına çıkması, güç potansiyelini 8 kat artırır.

Rüzgar enerjisi yoğunluğu

Çeşitli rüzgar türbinlerinin ve yerlerinin karşılaştırılması için, rüzgar enerjisi yoğunluğu olarak adlandırdığımız birim alan başına mevcut rüzgar enerjisi açısından, genellikle W/m^2 biriminde düşünmek daha yararlı olacaktır:

Wind power density:
$$\frac{\dot{W}_{\text{available}}}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3$$

Ortalama rüzgar enerjisi yoğunluğu, yıl boyunca saatlik rüzgar hızı ortalamaları esas alınarak hesaplanmalıdır.

Genel bir kural olarak, rüzgar türbinlerinin yapımı için bir konumun zayıf olduğu düşünülürse, ortalama rüzgar enerjisi yoğunluğu

yaklaşık $100 W/m^2$ az ise, zayıf

$400 W/m^2$ civarı ise, iyi

$700 W/m^2$ 'den büyük ise, harika

$100 W/m^2$ rüzgar enerjisi yoğunluğunun $1.2 kg/m^3$ hava yoğunluğu için $5.5 m/s$ rüzgar hızına karşılık geldiğini unutmayın.

Atmosferdeki türbülans yoğunluğu, arazi, bazı yapısal engeller (binalar, ağaçlar, vs.), çevresel etki vb. gibi diğer faktörler, rüzgar türbini alanının seçimini etkiler.

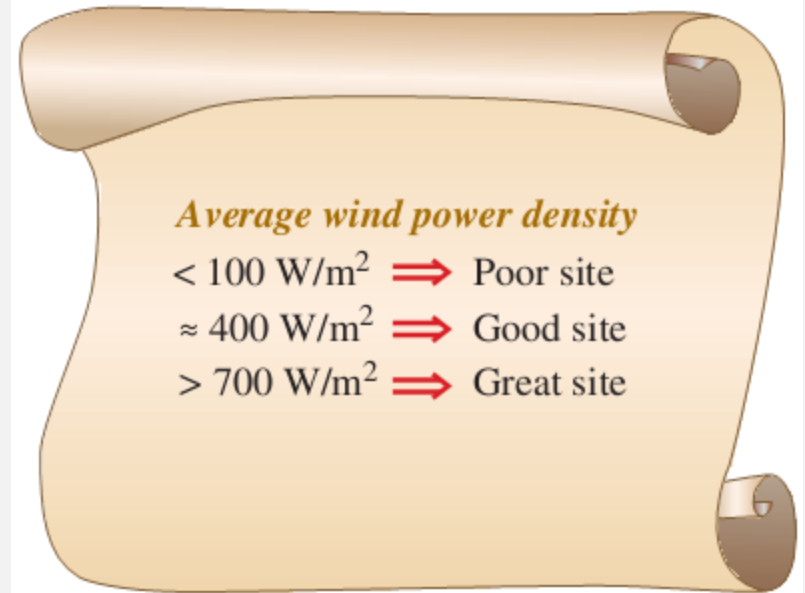


FIGURE 18–33

Önerilen bir yerde rüzgar türbini inşası için temel bir kural.

Rüzgar türbini verimi

Gerçek bir rüzgar türbini mevcut güç potansiyelinin sadece bir yüzdesini mevcut şaft gücüne çevirebilir. Bu yüzdeye rüzgar türbini verimliliği denir.

$$\eta_{wt} = \frac{\dot{W}_{shaft}}{\dot{W}_{available}} = \frac{\dot{W}_{shaft}}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

Rüzgar türbini verimi

$\dot{W}_{shaft}$: rotor mili güç çıkışı

Türbine bağlı bir dişli kutusu/jeneratör şaft gücünü elektrik gücü çıktısına dönüştürür $\dot{W}_{electric}$ ve bunlar birbirleriyle ilişkilidir:

$$\dot{W}_{electric} = \eta_{gearbox/generator} \dot{W}_{shaft} \quad (\text{kW})$$

$\eta_{gearbox/generator}$, dişli kutusu/jeneratör verimidir ve genellikle %80'in üzerindedir.

$$\eta_{wt, overall} = \frac{\dot{W}_{electric}}{\dot{W}_{available}} = \frac{\dot{W}_{electric}}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

Toplam rüzgar türbini verimliliği

The overall wind turbine efficiency is related to wind turbine efficiency by

$$\eta_{\text{wt, overall}} = \eta_{\text{wt}} \eta_{\text{gearbox/generator}} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft}}}{\dot{W}_{\text{available}}} \frac{\dot{W}_{\text{electric}}}{\dot{W}_{\text{shaft}}} = \frac{\dot{W}_{\text{electric}}}{\dot{W}_{\text{available}}}$$

Rüzgar türbinlerinin verimliliği genellikle yüzde 30 ila 40 arasındadır.

The efficiency of wind turbine is usually referred to as **power coefficient** C_p . Here, we use the notation η_{wt} . Using the wind turbine efficiency, the actual shaft power output from a wind turbine can be expressed as

$$\dot{W}_{\text{shaft}} = \frac{1}{2} \eta_{\text{wt}} \rho A V^3 \quad (\text{kW})$$

Bir rüzgar türbindeki sürtünme etkilerini ihmal edersek ve rüzgar hızını türbin girişindeki havanın ortalama hızı olarak alırsak, gelen kinetik enerjinin şaft gücüne dönüştürülmeyen kısmının rüzgar türbinine giden kinetik enerji olarak kaldığını söyleyebiliriz. Bu da,

$$\dot{m} \frac{V_1^2}{2} = \dot{W}_{\text{shaft}} + \dot{m} \frac{V_2^2}{2}$$

$$\eta_{\text{wt}} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft}}}{\dot{m} \frac{V_1^2}{2}}$$

$$\dot{m} \frac{V_2^2}{2} = \dot{m} \frac{V_1^2}{2} (1 - \eta_{\text{wt}})$$

$$V_2 = V_1 \sqrt{1 - \eta_{\text{wt}}}$$

Bu ilişki, türbin verimliliği bilindiğinde ve sürtünme etkileri ihmal edildiğinde çıkış hızını belirlememizi sağlar.

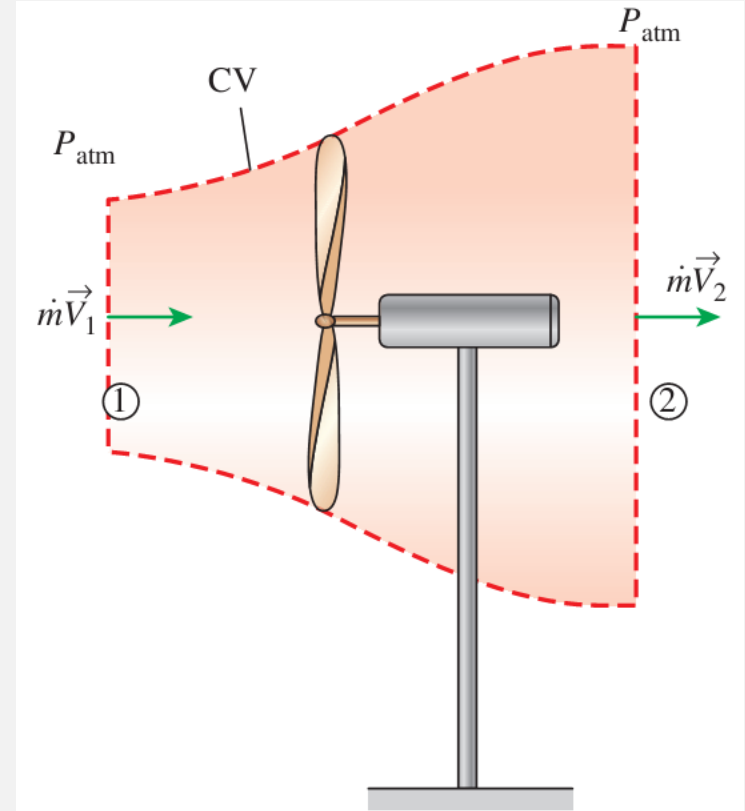


FIGURE 18–34

Rüzgar türbini boyunca hava akışı.

Rüzgar Türbin Verimliliği için Betz Limiti

- ❑ Bir rüzgar türbini, havanın kinetik enerjisini işe dönüştürür.
- ❑ Termodinamiğin ikinci kanununa dayanan ideal koşullar altında bu dönüşüm mükemmeldir (rüzgar türbini verimliliği yüzde 100).
- ❑ Bu, ancak türbin çıkışında havanın hızı sıfır olduğunda geçerlidir.
- ❑ Pratikteki sebeplerden dolayı bu mümkün değildir, çünkü türbin boyunca kütle akışını sağlamak için hava türbin çıkışından uzaklaştırılmalıdır.
- ❑ Bir rüzgar türbini için mümkün olan maksimum verimlilik olduğu anlaşıyor.
- ❑ Bu ilk olarak 1920'lerin ortasında Albert Betz (1885-1968) tarafından hesaplanmıştır.
- ❑ Disk alanını çevreleyen iki kontrol hacminin, yukarıdaki rüzgar hızı V 'in V_1 olarak alındığı, Şekil 18-35'de görüldüğü gibi geniş bir kontrol hacmi ve küçük bir kontrol hacmi göz önünde bulundurulur.

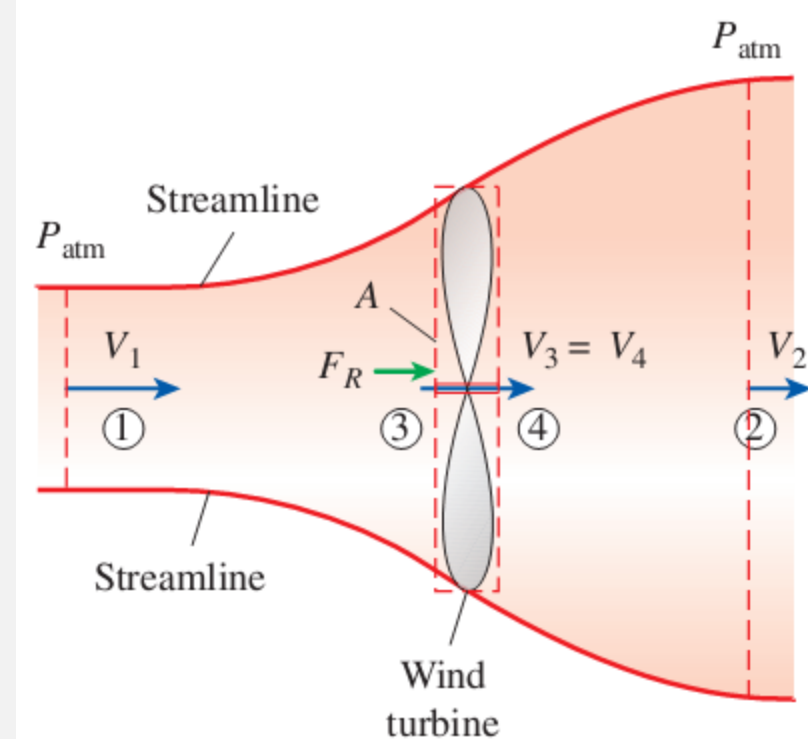


FIGURE 18–35

Eksenel simetrik bir akış tüpü ile sınırlandırılmış ideal rüzgar türbini performansının analizi için büyük ve küçük kontrol hacimleri.

$$F_R = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

$$F_R + P_3A - P_4A = 0 \rightarrow F_R = (P_4 - P_3)A \quad (18-46)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 \quad \text{and} \quad \frac{P_4}{\rho g} + \frac{V_4^2}{2g} + z_4 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (18-47)$$

$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{P_3 - P_4}{\rho} \quad V_3 = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$a = \frac{V_1 - V_3}{V_1} \quad V_3 = V_1(1 - a)$$

$$\dot{m} = \rho V_3 A = \rho A V_1(1 - a)$$

$$V_2 = V_1(1 - 2a)$$

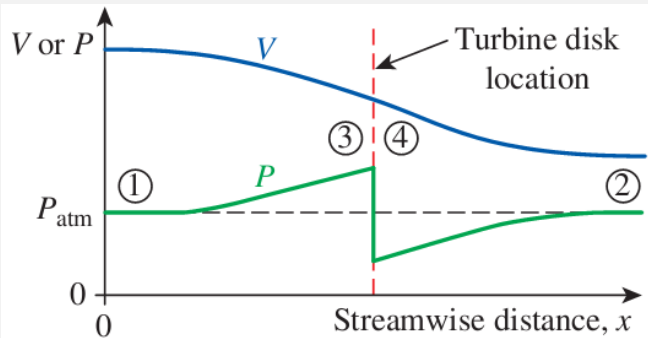


FIGURE 18-36

Rüzgar türbini vasıtasıyla ortalama akış yönünde hız ve basınç profillerinin nitel eskizleri.

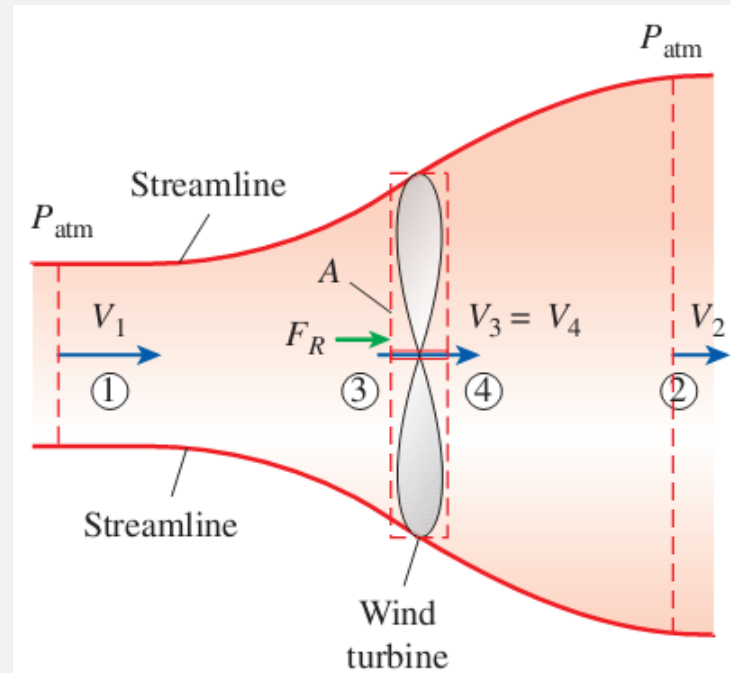


FIGURE 18-35

Eksenel simetrik bir akış tüpü ile sınırlandırılmış ideal rüzgar türbini performansının analizi için büyük ve küçük kontrol hacimleri.

$$\dot{W}_{\text{ideal}} = \dot{m} \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \rho A V_1 (1 - a) \frac{V_1^2 - V_1^2 (1 - 2a)^2}{2} = 2\rho A V_1^3 a (1 - a)^2 \quad (18-52)$$

$$\eta_{\text{wt}} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft}}}{\frac{1}{2} \rho V_1^3 A} = \frac{\dot{W}_{\text{ideal}}}{\frac{1}{2} \rho V_1^3 A} = \frac{2\rho A V_1^3 a (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho V_1^3 A} = 4a(1 - a)^2 \quad (18-53)$$

Finally, as any good engineer knows, we calculate the maximum possible value of η_{wt} by setting $d\eta_{\text{wt}}/da = 0$ and solving for a . This yields $a = 1$ or $1/3$, and the details are left as an exercise. Since $a = 1$ is the trivial case (no power generated), we conclude that a must equal $1/3$ for maximum possible power coefficient. Substituting $a = 1/3$ into Eq. 18-53 gives

$$\eta_{\text{wt, max}} = 4a(1 - a)^2 = 4 \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (18-54)$$

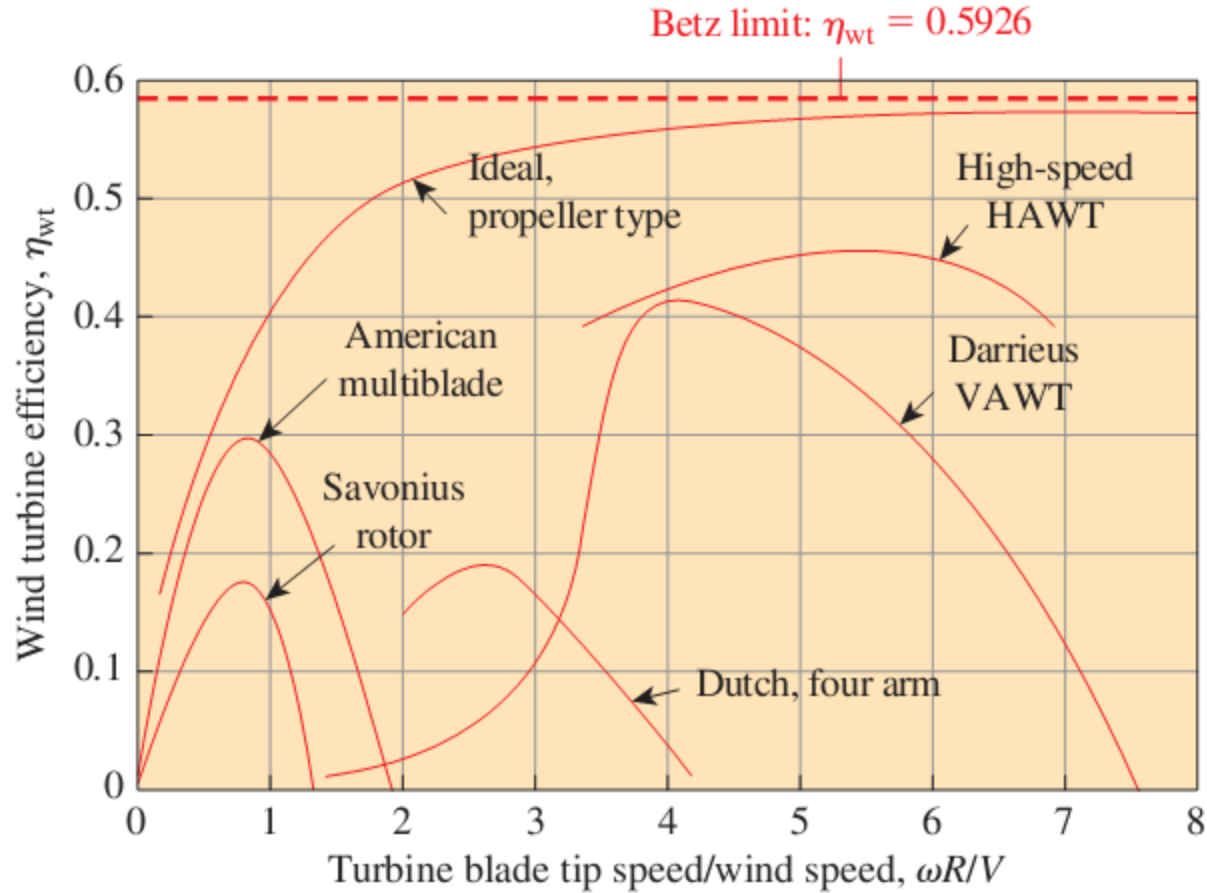


FIGURE 18–37

Türbin kanat uç hızının, rüzgar hızına oranının bir fonksiyonu olarak çeşitli rüzgar türbinlerinin verimliliği. Şimdiye kadar hiçbir tasarım, yatay eksenli rüzgar türbini (HAWT) 'den daha iyi bir performans göstermemiştir.

- ❑ Bu değer $\eta_{wt,max}$, herhangi bir rüzgar türbininin mümkün olan maksimum verimliliğini ve **Betz** limiti olarak bilinir.
- ❑ Tüm gerçek rüzgar türbinleri, bu ideal analizde ihmal edilen tersinmez kayıplardan dolayı, ulaşılabilir maksimum verimlilikten daha düşük bir verimliliğe sahiptir.

Figure 18–37 shows wind turbine efficiency η_{wt} as a function of the ratio of turbine blade tip speed $V_{tip} = \omega R$ to wind speed V for several types of wind turbines, where ω is the angular velocity of the wind turbine blades and R is their radius. The angular velocity of rotating machinery is typically expressed in rpm (number of revolutions per minute) and denoted by $\dot{n}$. Noting that velocity is distance traveled per unit time and the angular distance traveled during each revolution is 2π , the angular velocity of a wind turbine is $\omega = 2\pi\dot{n}$ rad/min or $\omega = 2\pi\dot{n}/60$ rad/s.

- ❑ Rüzgar türbini verimlilik eğrisinden, ideal bir pervane tipi rüzgar türbininin $\omega R/V$ oranı sonsuza yaklaştıkça **Betz** limitine yaklaştığını görüyoruz..
- ❑ Bununla birlikte, gerçek rüzgar türbinlerinin verimi, $\omega R/V$ 'nin bazı sonlu değerlerinde maksimuma ulaşır ve bundan öte düşer.
- ❑ Pratikte, üç ana etken, elde edilebilir maksimum verimliliğin Betz sınırından düşük olmasını sebep olur:
 - ❑ Rotorun arkasındaki zayıf döngü (girdap)
 - ❑ Sonlu sayıda rotor kanadı ve bununla bağlantılı uç kayıpları (uç vorteksleri, sonlu uçak kanatlarında üretildikleri gerekçesiyle "rotor bıçakları" nın oluşumunda ortaya çıkarlar, çünkü her ikisi de "kaldırma kuvveti" üretirler).
 - ❑ Rotor bıçakları üzerinde sıfır olmayan aerodinamik drag (sürtünme drag ve sürüklenmeye neden olan drag)
- Buna ek olarak, shaft sürtünmesine bağlı mekanik kayıplar, elde edilebilir maksimum verimliliğin daha da düşük olmasına yol açar.
- Dişli kutusu, jeneratör vb., diğer mekanik ve elektriksel kayıplar da rüzgar türbini verimliliğini düşürür.
- Şekil 18-37'de görüldüğü gibi, "en iyi" rüzgar türbini yüksek hızlı HAWT'dir, bu nedenle bu tür rüzgar türbinlerinin tüm dünyaya kurulduğunu görüyoruz.

EXAMPLE 18–5 **Efficiency of a Wind Turbine**

A wind turbine with a 50-m-diameter rotor is rotating at 25 rpm under steady winds at an average velocity of 10 m/s. The electrical power output from the turbine is 375 kW. The combined efficiency of the gearbox/generator is 90 percent. Taking the density of air to be 1.20 kg/m^3 , determine (a) the wind turbine efficiency, (b) the tip speed of the blade, in km/h, and (c) the air velocity at the turbine exit if the turbine operated ideally at the Betz limit.

SOLUTION A wind turbine is producing 375 kW of electricity for a specified wind speed. The wind turbine efficiency, the tip speed of the blade, and the air velocity at the turbine exit at the Betz limit are to be determined.

Assumptions Wind flows steadily at the specified speed.

Properties The density of air is given to be $\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$.

$$\dot{W}_{\text{shaft}} = \frac{\dot{W}_{\text{electric}}}{\eta_{\text{gearbox/generator}}} = \frac{375 \text{ kW}}{0.90} = 416.7 \text{ kW}$$

The blade span area is

$$A = \pi D^2/4 = \pi(50 \text{ m})^2/4 = 1963 \text{ m}^2$$

The wind turbine efficiency is determined from its definition to be

$$\begin{aligned} \eta_{\text{wt}} &= \frac{\dot{W}_{\text{shaft}}}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} = \frac{416.7 \text{ kW}}{\frac{1}{2} (1.20 \text{ kg/m}^3)(1963 \text{ m}^2)(10 \text{ m/s})^3 \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right)} \\ &= 0.354 \text{ or } \mathbf{35.4 \text{ percent}} \end{aligned}$$

(b) Noting that the tip of blade travels a distance of πD per revolution, the tip velocity of the turbine blade for a rotational speed of $\dot{n}$ becomes

$$V_{\text{tip}} = \pi D \dot{n} = \pi(50 \text{ m})(25/\text{min}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 65.45 \text{ m/s} = \mathbf{236 \text{ km/h}}$$

(c) If the turbine operated ideally at the Betz limit, its efficiency would be 0.5926. Then the air velocity at the turbine exit for this ideal operation could be determined from Eq. 18–44 to be

$$V_{2, \text{ideal}} = V_1 \sqrt{1 - \eta_{\text{wt}}} = (10 \text{ m/s}) \sqrt{1 - 0.5926} = \mathbf{6.38 \text{ m/s}}$$

Discussion The air velocity at the turbine exit would be 8.04 m/s if we used the actual wind turbine efficiency of 35.4 percent.