

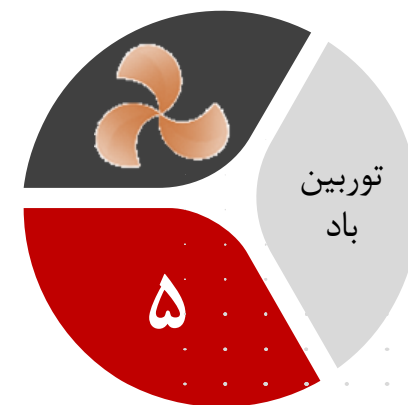
بسم الله الرحمن الرحيم

## توربو ماشین ها



محمدصادق کریمی

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

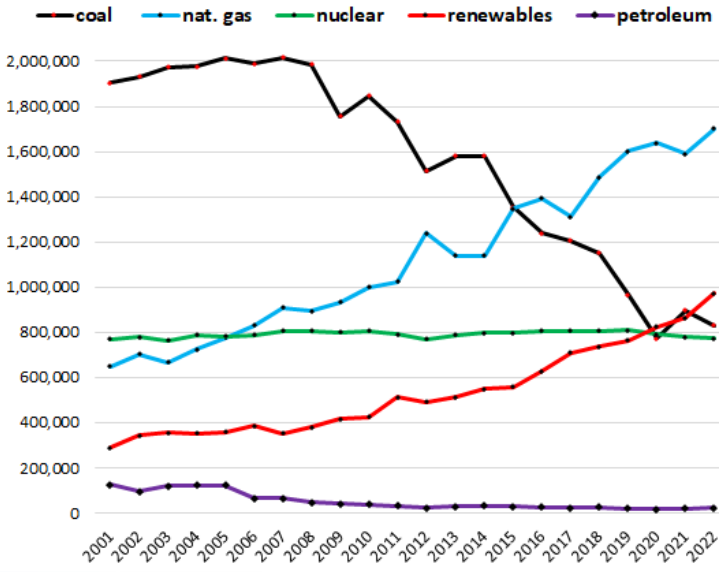


|                           |     |
|---------------------------|-----|
| مقدمه                     | ۱-۵ |
| اجزای توربین باد          | ۲-۵ |
| عملکرد توربین باد         | ۳-۵ |
| مدلسازی توربین باد        | ۴-۵ |
| ارزیابی عملکرد توربین باد | ۵-۵ |

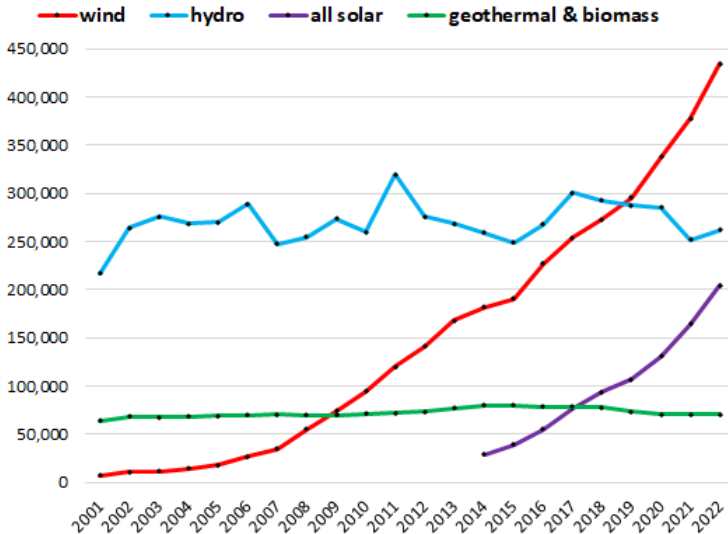




Electricity Generated by Source, Gigawatt Hours, Annual



Electricity Generated by Renewable Source  
Gigawatt Hours, Annual



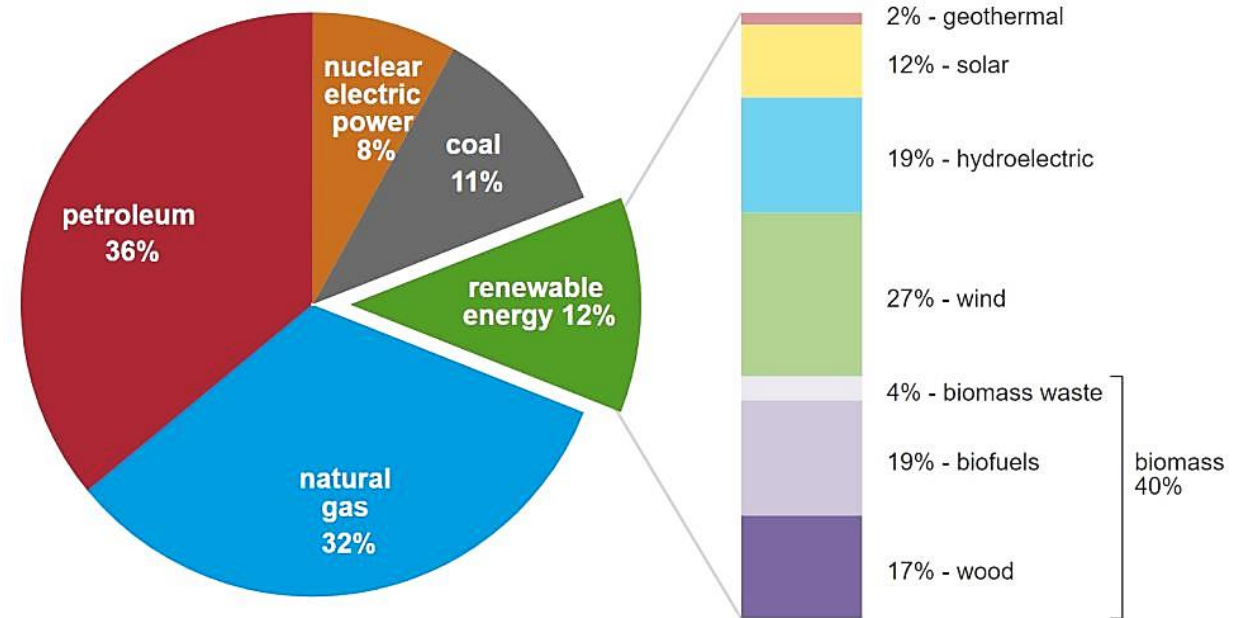
## مقدمه

❖ مقایسه سهم انواع منابع انرژی

## U.S. primary energy consumption by energy source, 2021

total = 97.33 quadrillion  
British thermal units (Btu)

total = 12.16 quadrillion Btu





## مقدمه

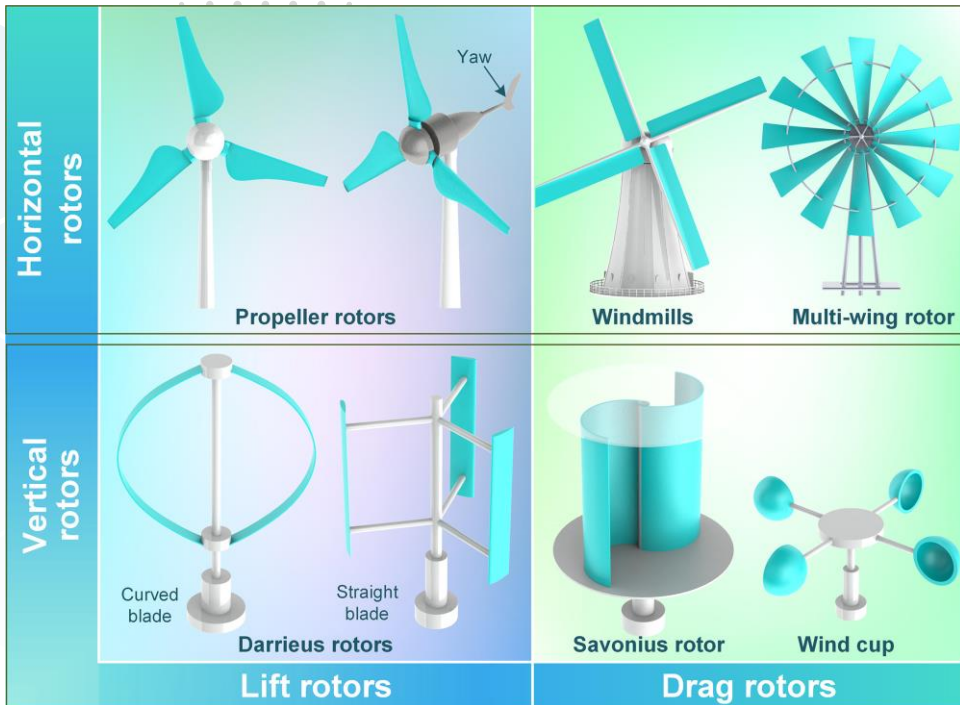
### ❖ انواع توربین های بادی

wind mill

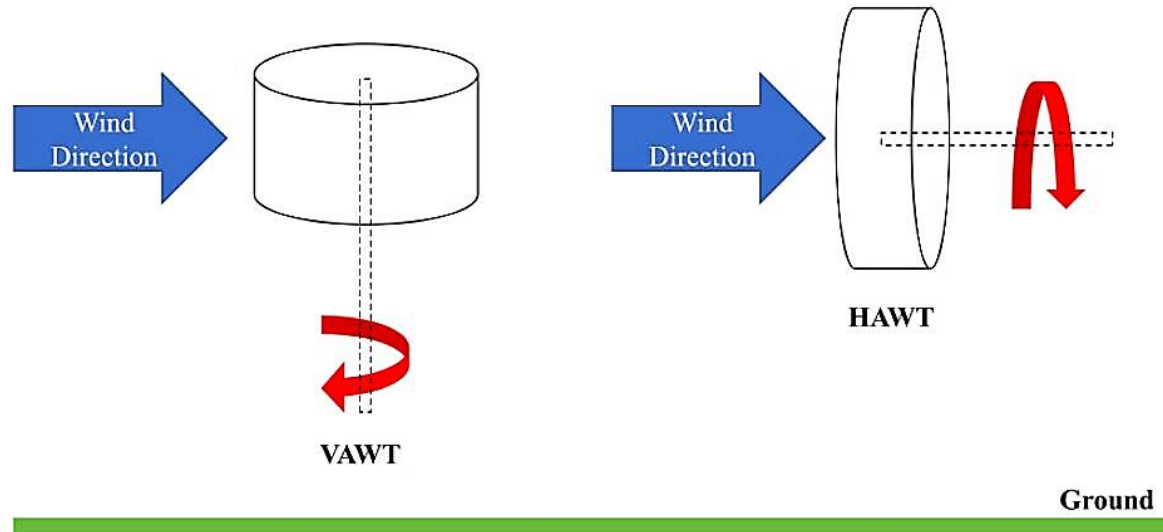
تولید انرژی مکانیکی (آسیاب کردن  
دانه ها، قایق بادبانی، پمپ کردن  
آب)

wind turbine

تولید انرژی الکتریکی



- وابسته نبودن به جهت باد
- امکان نصب ژنراتور و جعبه دنده روی زمین



- راندمان بالاتر
- توانایی کار با سرعت های پایین باد
- هزینه نصب بالاتر

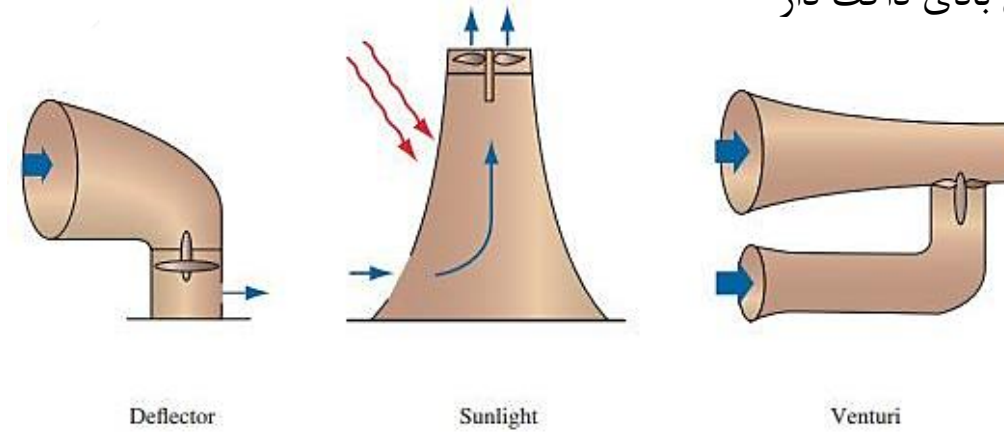
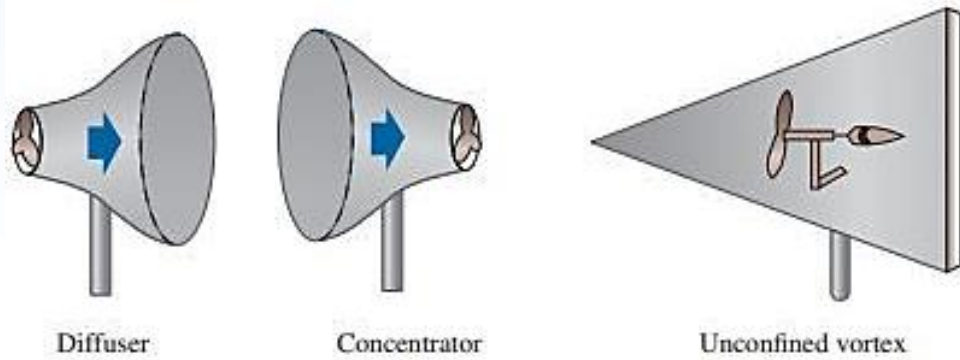




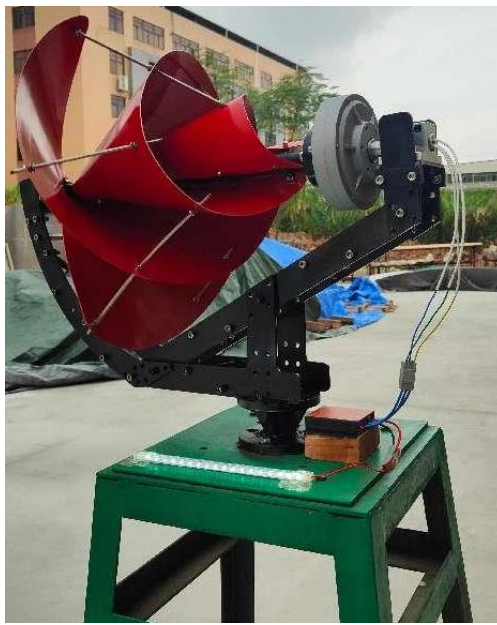
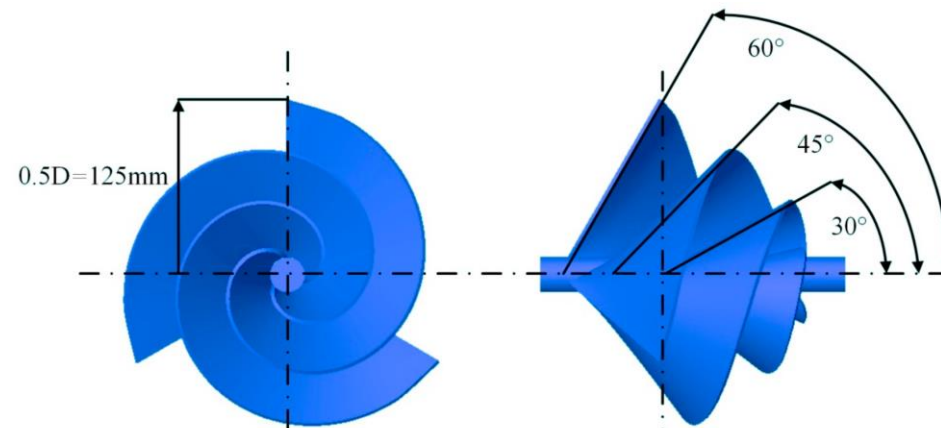
## مقدمه

### ❖ سایر انواع توربین های بادی

توربین بادی داکت دار



توربین ارشمیدس

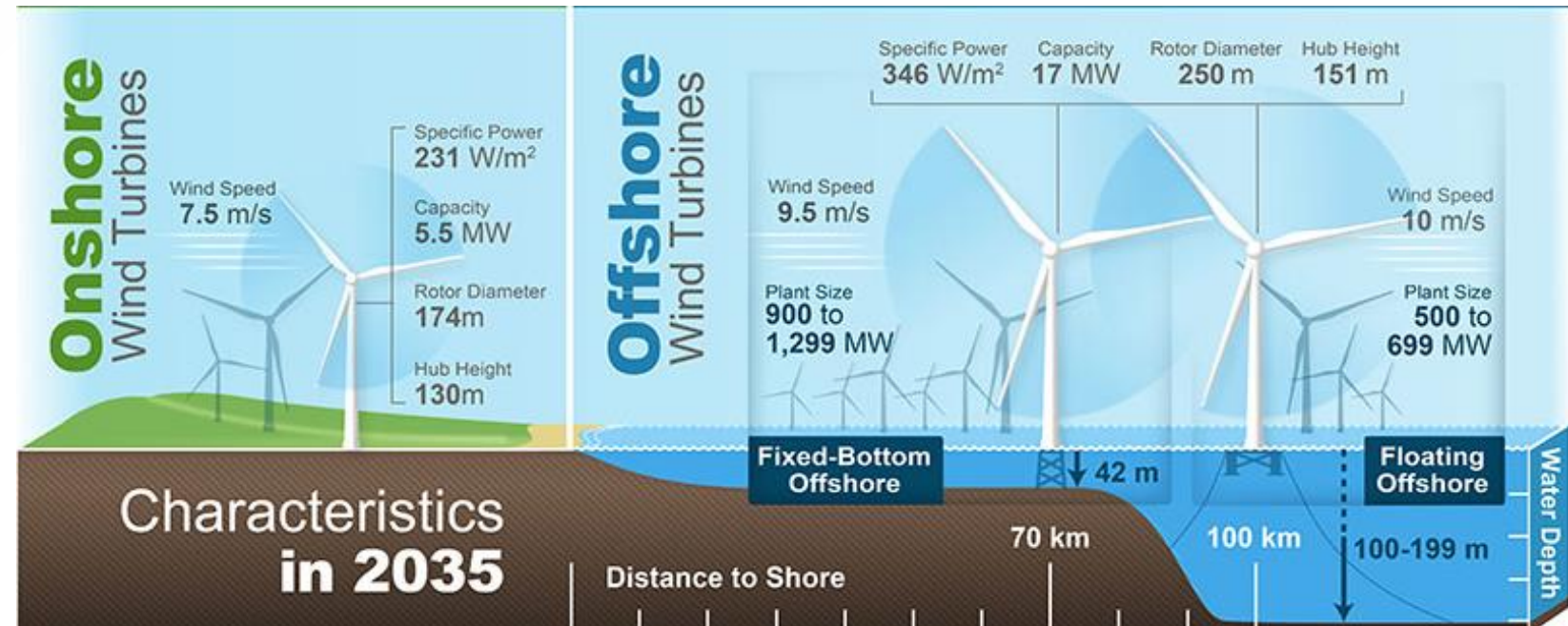






## مقدمه

### ❖ مقایسه انواع توربین باد محور افقی



| Term                         | Onshore wind turbines            | Offshore wind turbines      |
|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Cost                         | Lower                            | Higher                      |
| Efficient                    | Lower                            | Higher                      |
| Power generation             | Less                             | More                        |
| Installation and maintenance | Easy, quick                      | Hard, expensive             |
| Wind condition               | Various, no wind or intermittent | High wind speed, persistent |
| Installation site            | Geographic restrictions          | More Space to construct     |





## مقدمه

### ❖ سایر کاربردهای توربین محور افقی

توربین‌های جریان جزر و مدی محور افقی

Tidal Turbine



توربین هوای رم  
Ram Air Turbine



توربین‌های محور افقی مورد  
استفاده در ساختمان‌ها



ملخ یا پراپلر ساختاری  
مشابه توربین باد دارد با این  
تفاوت که با دریافت توان  
(معمولا از سوخت فسیلی)  
می‌چرخد و به هوای اطراف  
خود انرژی منتقل می‌کند.



Strata SE1  
(London)

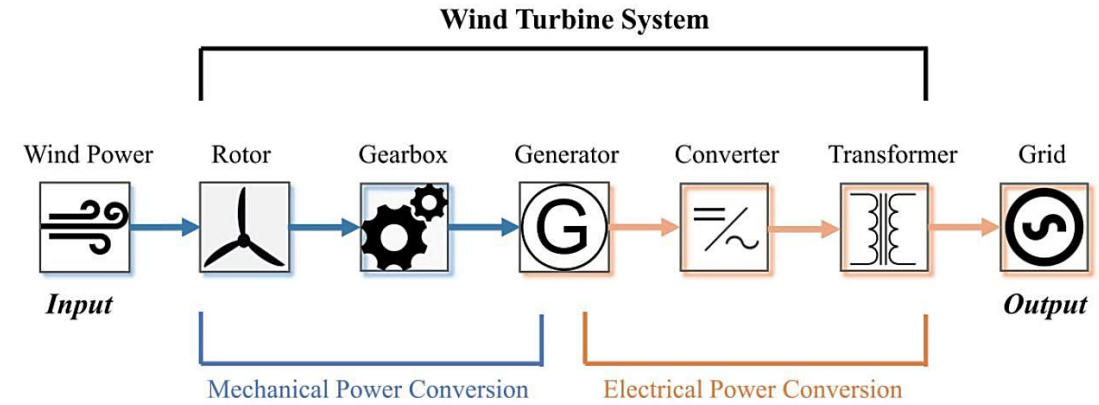
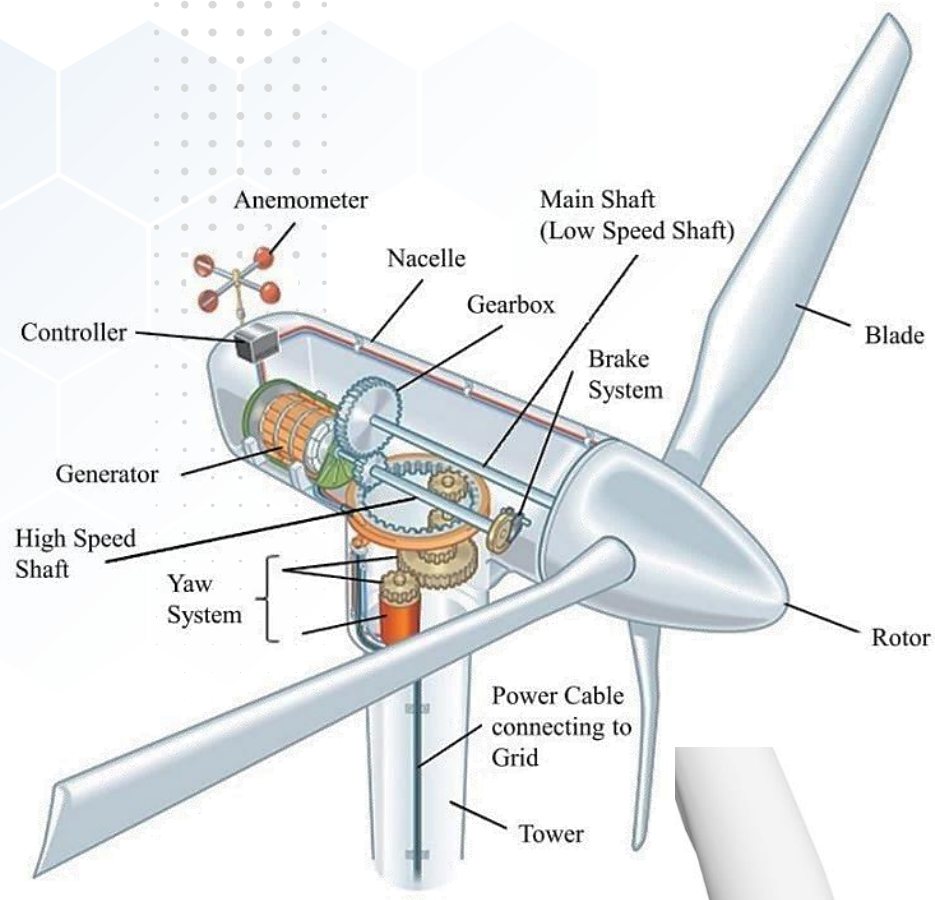
Bahrain World  
Trade Center



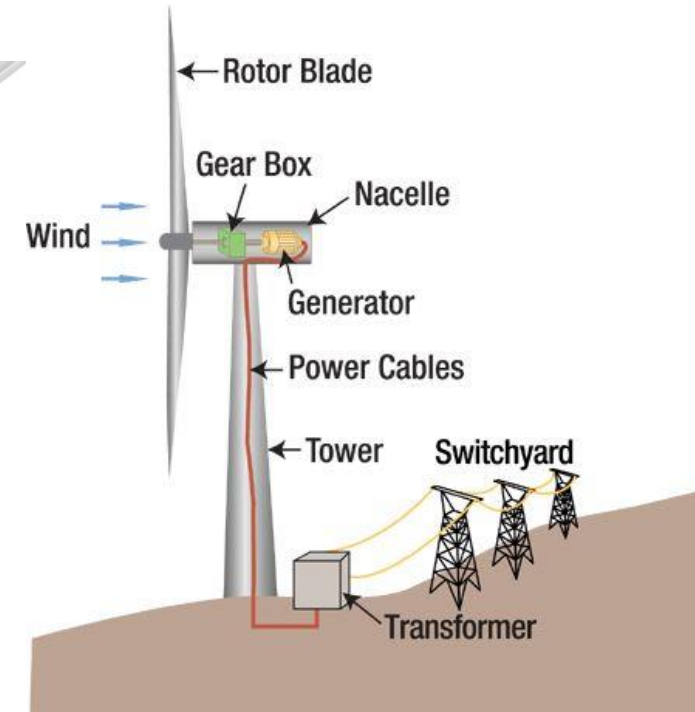




## اجزای توربین باد



Pitch Control System

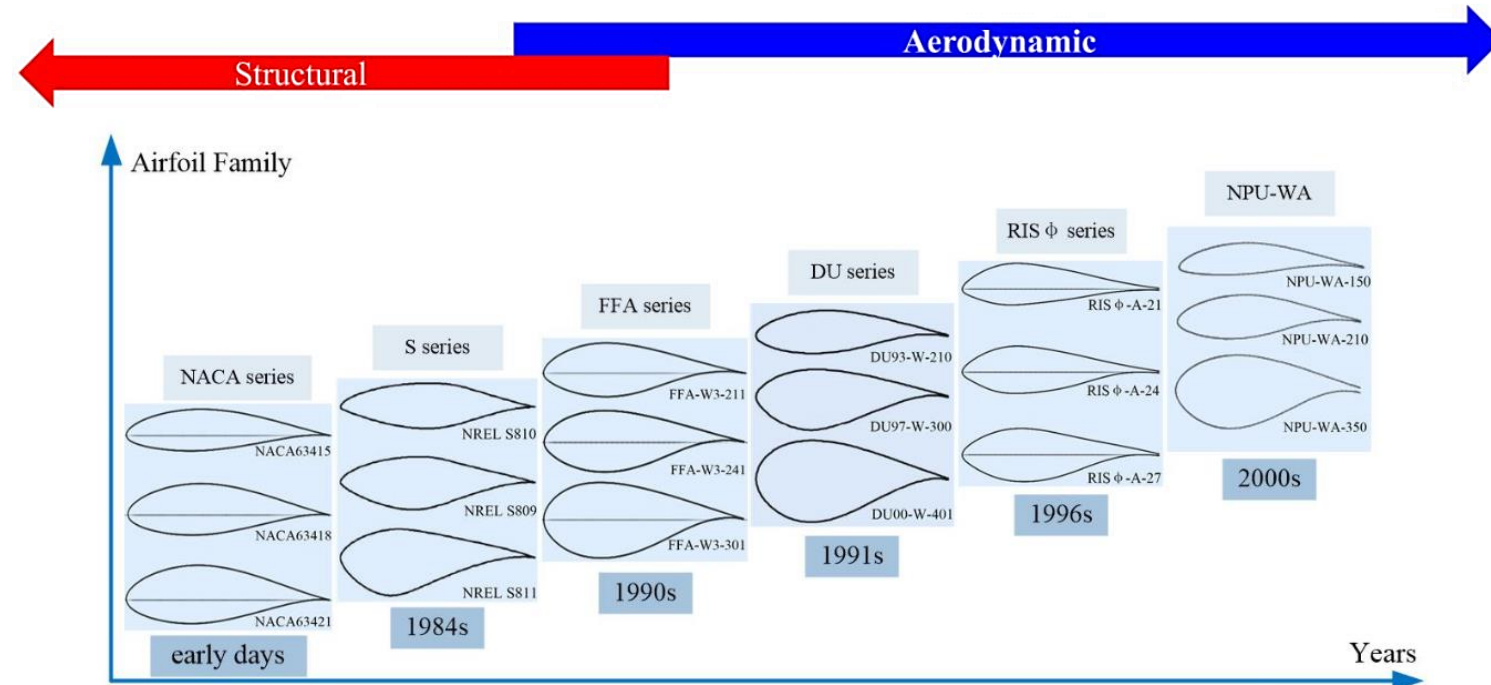
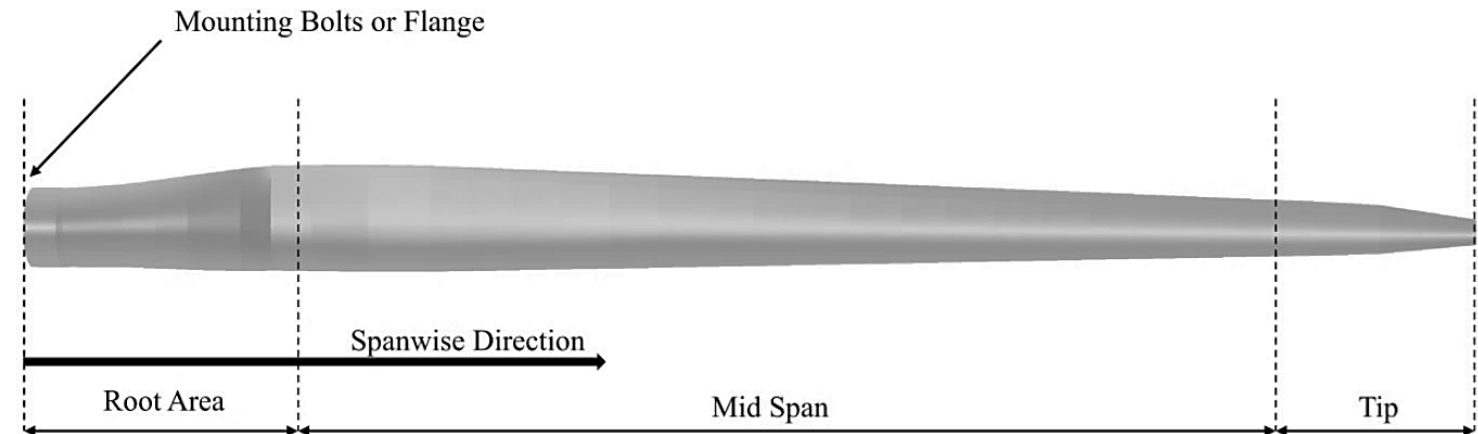






## اجزای توربین باد

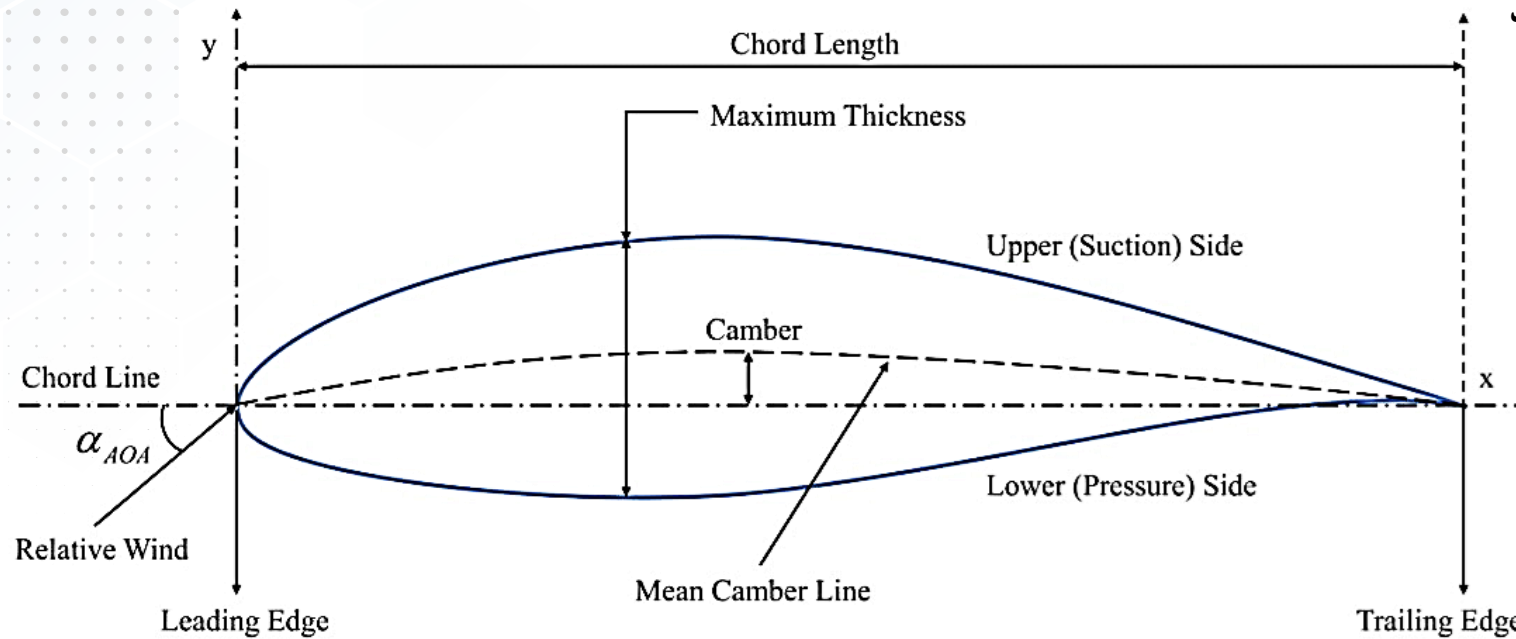
❖ پره توربین باد محور افقی





## اجزای توربین باد

### ❖ مشخصات پروفیل پره توربین باد



Camber (خمیدگی): فاصله بین خط خمیدگی و وتر

- Naca 2412 → بیش‌ترین مقدار خمیدگی 0.02 وتر در 0.4 وتر از لبه حمله با بیش‌ترین ضخامت 0.12 وتر
- Naca 0012 → ایرفویل متقارن

Naca □ □ □ □

بیش‌ترین مقدار خمیدگی بر حسب صدم وتر

محل قرارگیری بیش‌ترین مقدار خمیدگی از لبه حمله بر حسب دهم طول وتر

بیش‌ترین ضخامت بر حسب صدم وتر





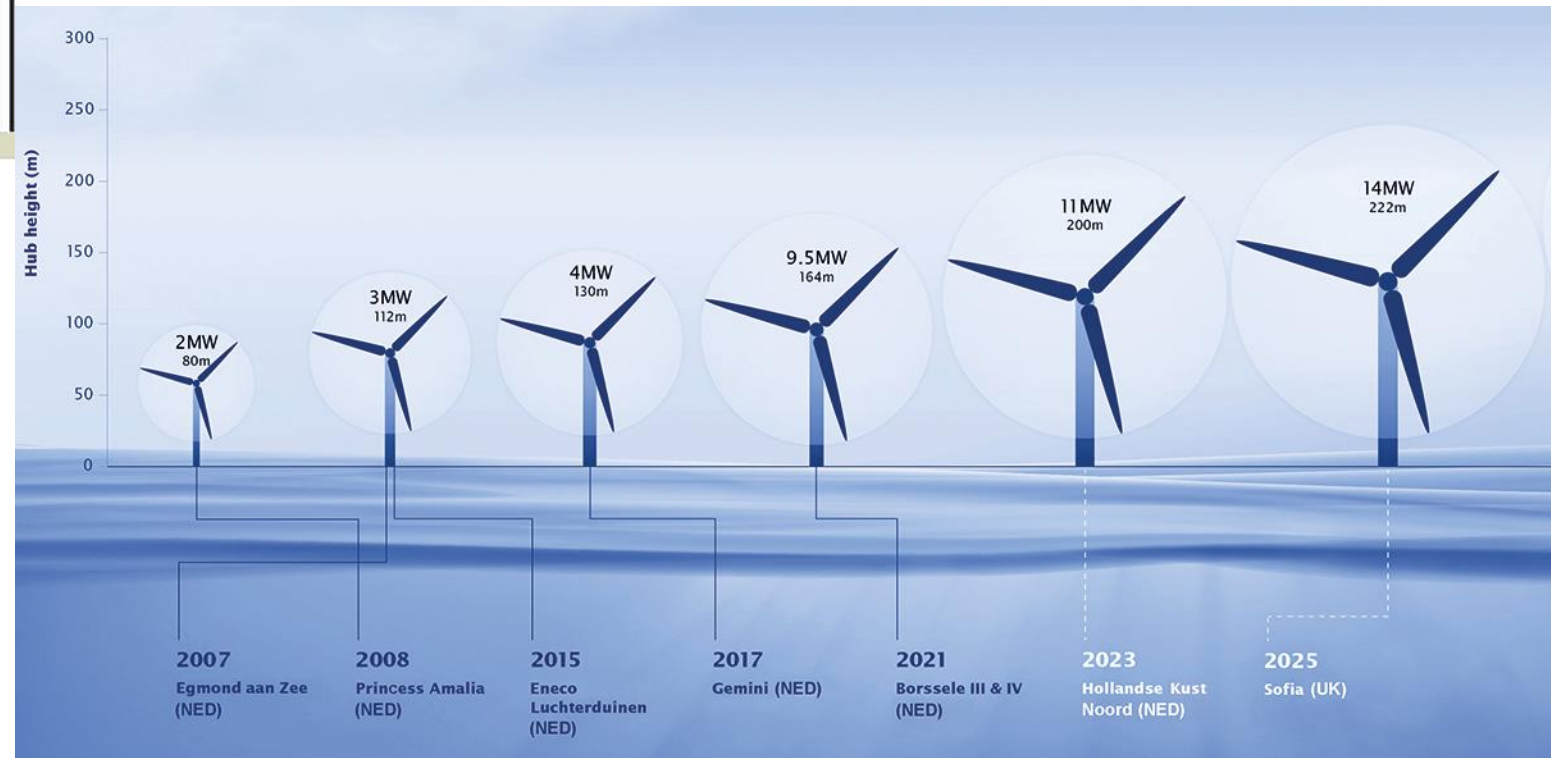
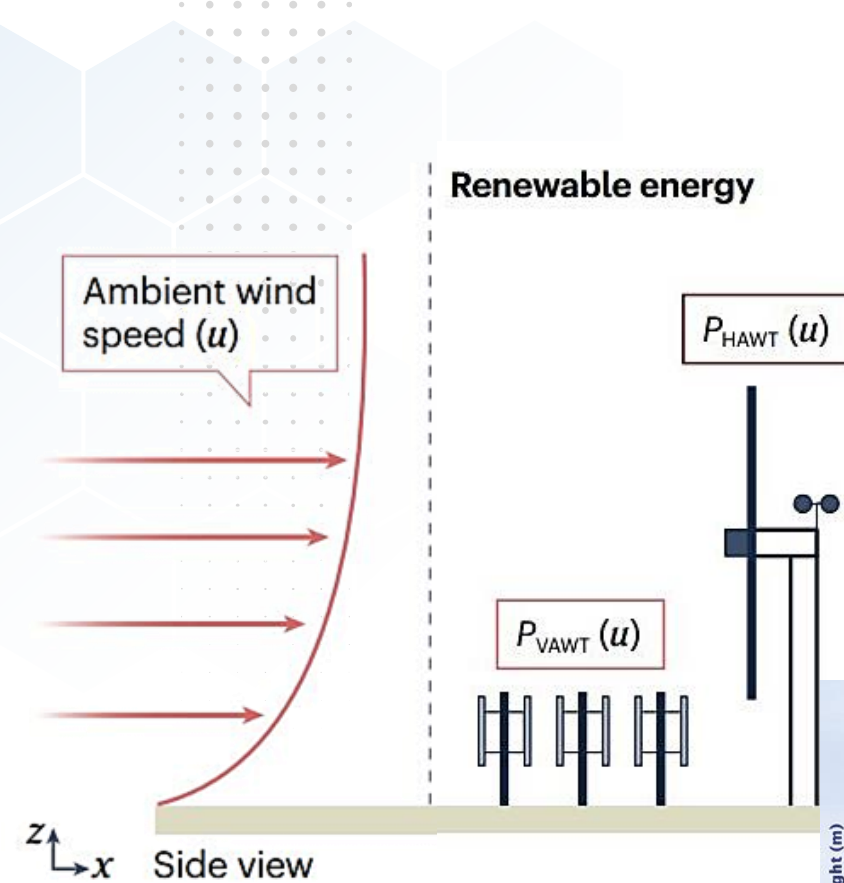
## عملکرد توربین باد

♦ پتانسیل توان بادی

$$P_{available} = \dot{m} \left( \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz \right) \xrightarrow[\text{قبل و بعد توربین ارتفاع ثابت}]{\text{فشار اتمسفر}}$$

$$P_{available} = \dot{m} \left( \frac{u^2}{2} \right)$$

$$P_{available} = \frac{1}{2} \rho A u^3 = \frac{1}{2} \frac{p}{RT} \frac{\pi D^2}{4} u^3$$

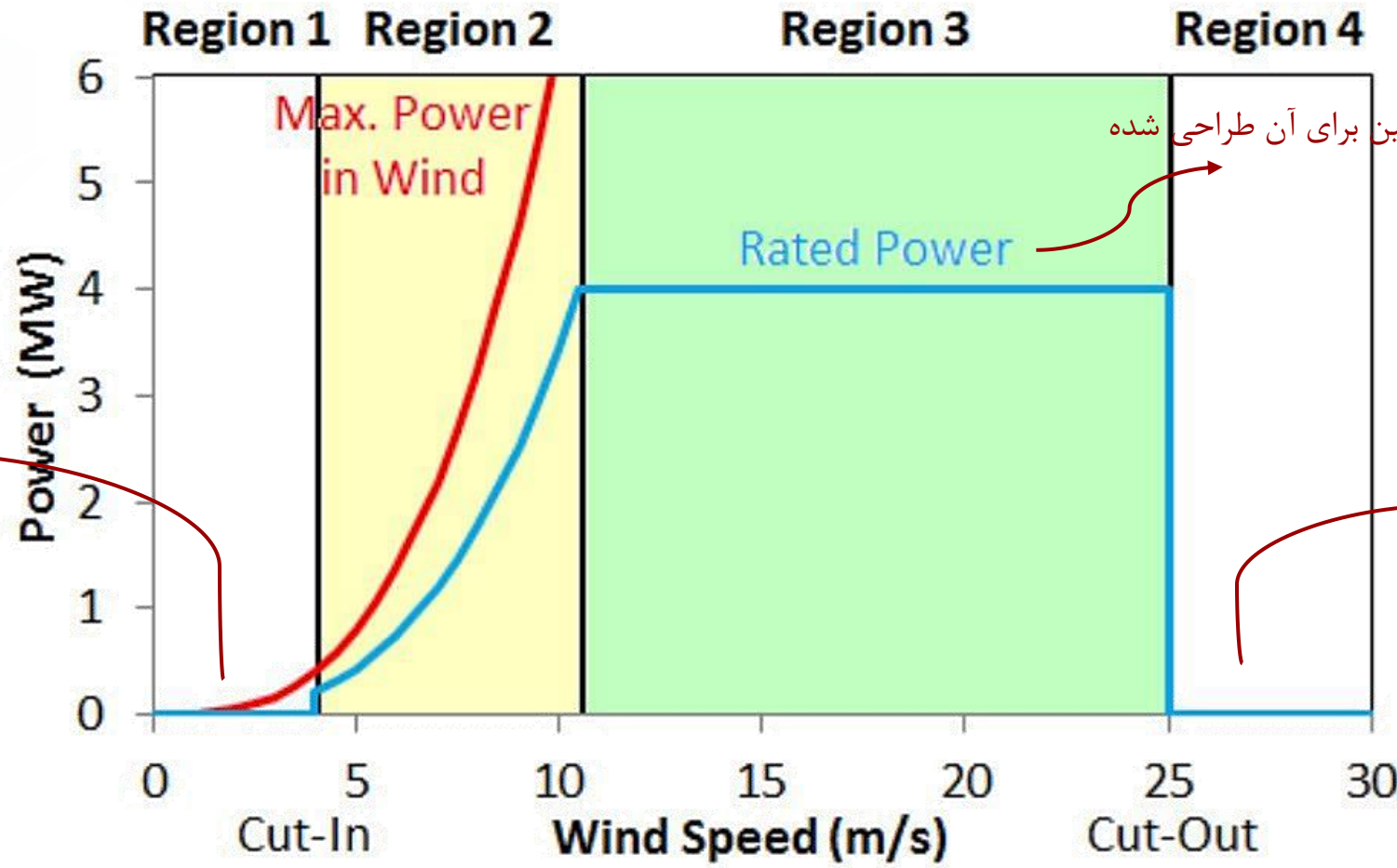






## عملکرد توربین باد

❖ محدوده کاری توربین‌های بادی



سرعت باد در ارتفاع توربین

توانی که توربین برای آن طراحی شده

Rated Power

دستگاه متلاشی می‌شود

برای ایمنی و جلوگیری از  
صدمه، مکانیزم ترمزی قرار  
داده می‌شود

توربین‌های بادی تنها در یک  
محدوده‌ای از سرعت باد کار  
می‌کنند.

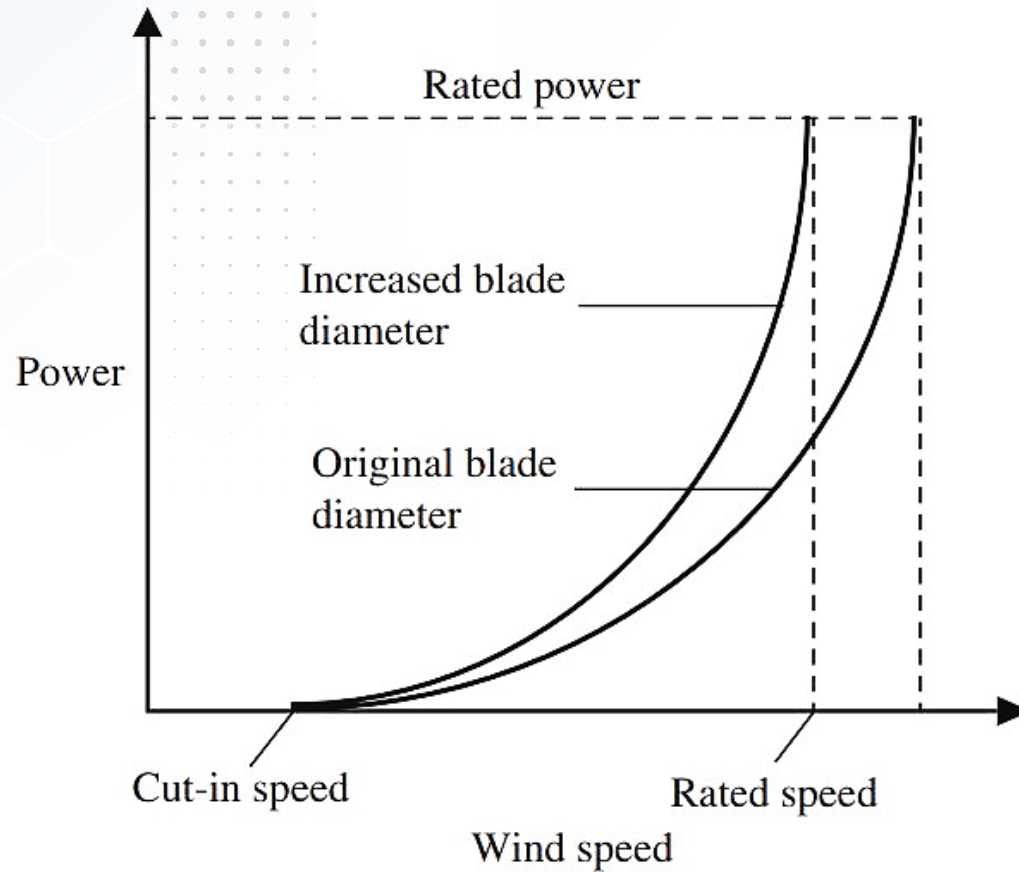
توان به قدری نبوده که  
سیستم راه بیفتد.





## عملکرد توربین باد

❖ تاثیر افزایش ارتفاع و قطر پره توربین



نمودار با فرض ثابت بودن اندازه ژنراتور به دست آمده است.

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

| Ground Conditions              | Friction Coefficient, $\alpha$ |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Smooth hard ground, calm water | 0.10                           |
| Tall grass on ground           | 0.15                           |
| High crops and hedges          | 0.20                           |
| Wooded countryside, many trees | 0.30                           |
| Small town with trees          | 0.30                           |
| Large city with tall buildings | 0.40                           |





## عملکرد توربین باد

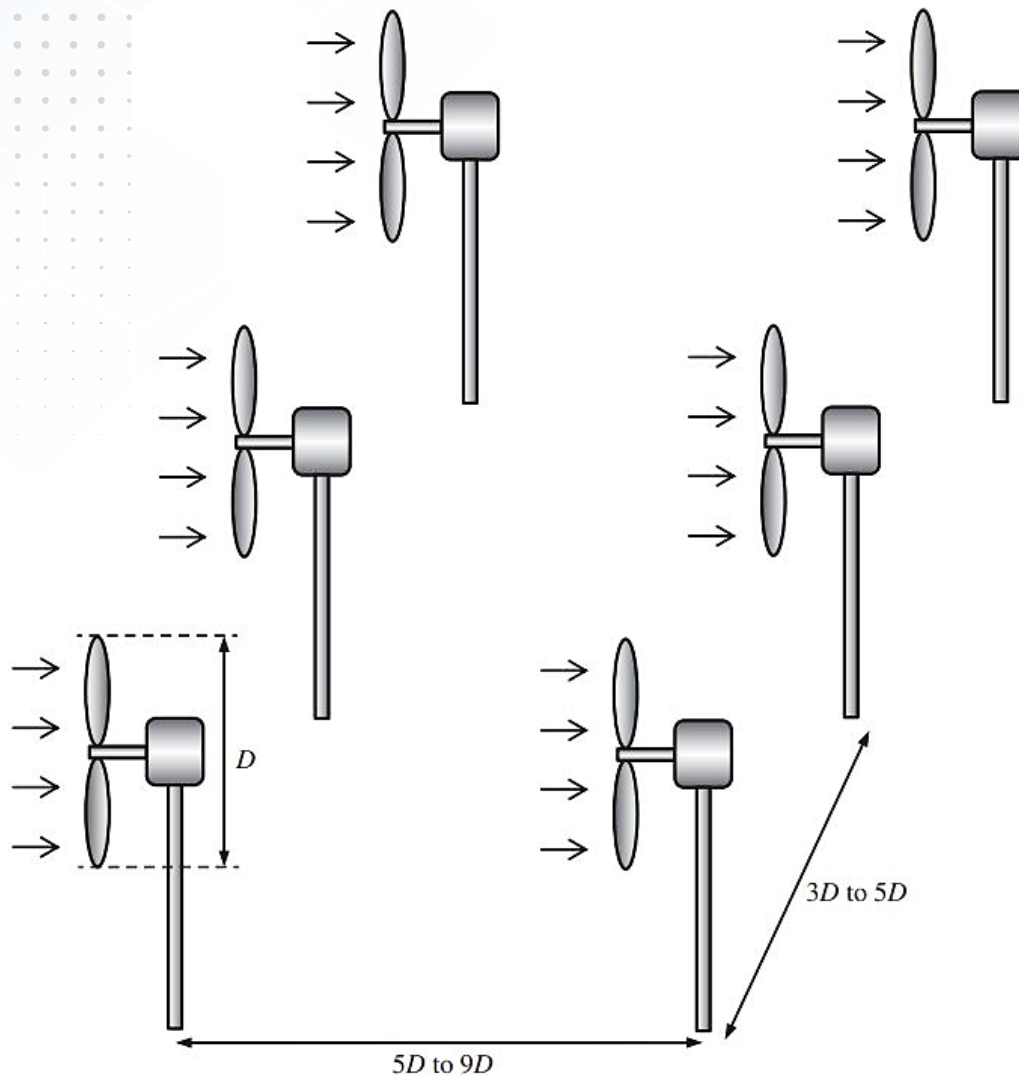
### ❖ فاصله بهینه توربین‌های بادی از یکدیگر

مشکلات بیش از حد نزدیک بودن:

- ✓ بهم ریختن جریان پشت توربین
- ✓ قرارگیری در ناحیه جدایش یا لایه مرزی
- ✓ پایین آمدن بازده

مشکلات بیش از حد دور بودن:

- ✓ دشواری خطوط انتقال
- ✓ هزینه ساخت، نگهداری و تعمیرات بالا
- ✓ استفاده کم از پتانسیل انرژی باد







## مدلسازی توربین باد

❖ نظریه دیسک محرک

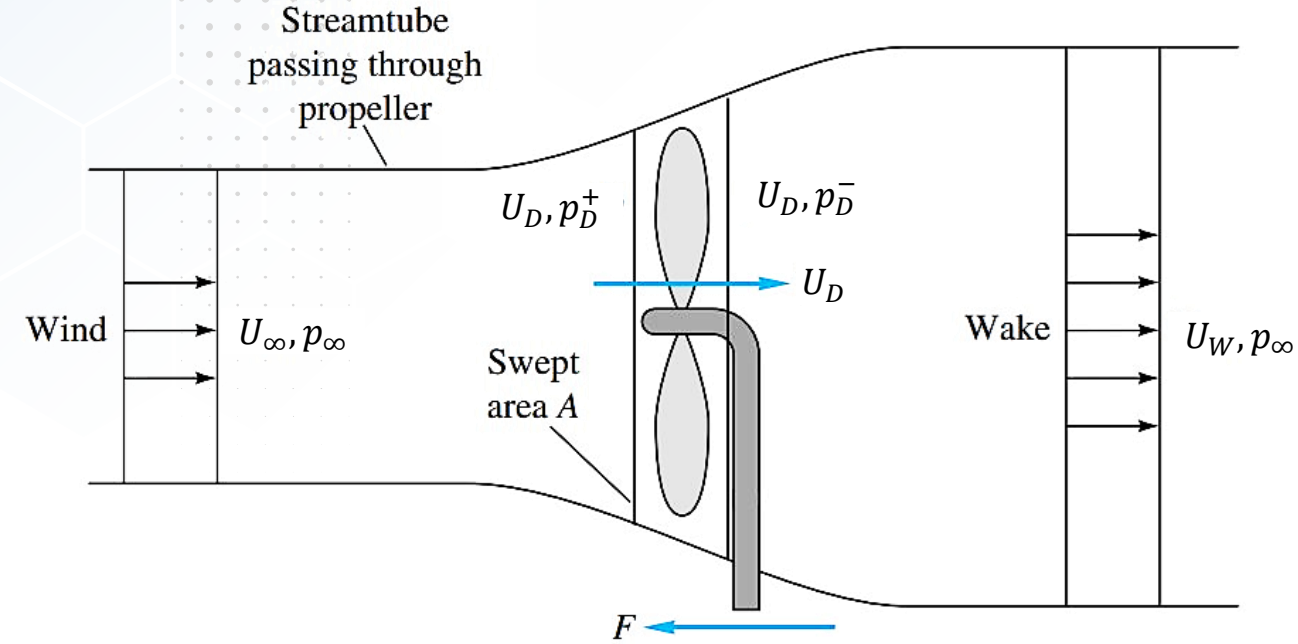
❖ فرضیات کلی

جریان تراکم‌ناپذیر  
جریان پایا و یکنواخت در بالادست  
جریان پایا و یکنواخت در پایین‌دست  
جریان پایا و یکنواخت در دیسک  
جریان چرخشی بعد از دیسک تولید نمی‌شود.  
ورود و خروج جرم از مرزهای جانبی حجم کنترل نداریم.  
از اصطکاک صرف‌نظر شده و تمام اختلاف انرژی جنبشی ورود و خروج به توان تبدیل می‌شود.





## ❖ نظریه دیسک محرک

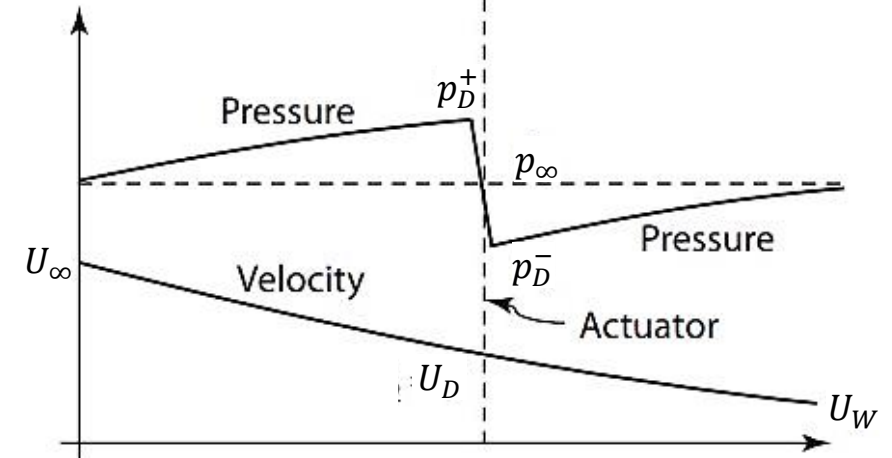
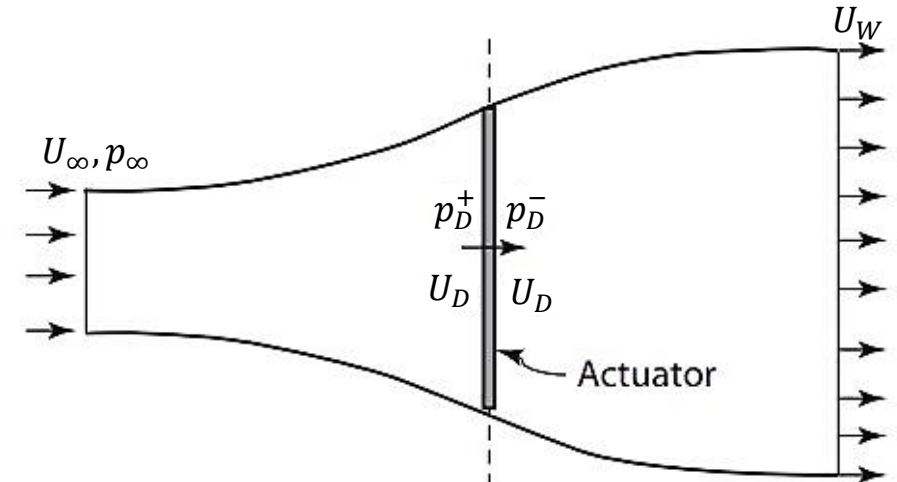


ممنتوم خطی بین بالادست و پایین دست جریان:

$$\sum F_x + \sum (\dot{m}U_x)_{inlet} - \sum (\dot{m}U_x)_{outlet} = -F + \dot{m}U_\infty - \dot{m}U_W = 0$$

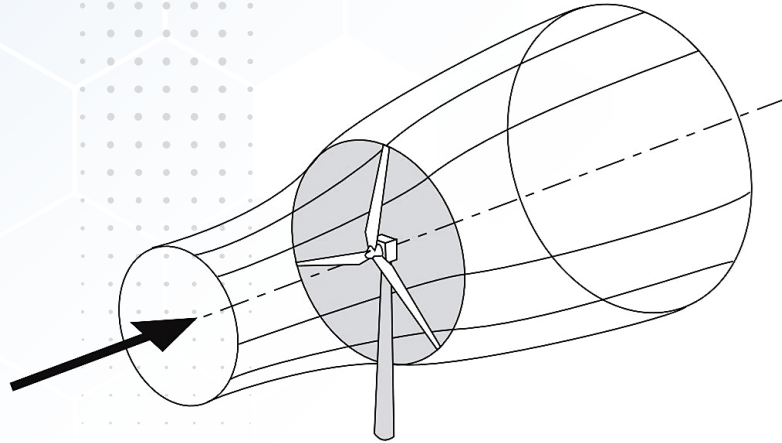
ممنتوم خطی بین قبل و بعد دیسک:

$$-F + p_D^+ A_D - p_D^- A_D + \dot{m}U_D - \dot{m}U_D = 0$$





## مدلسازی توربین باد

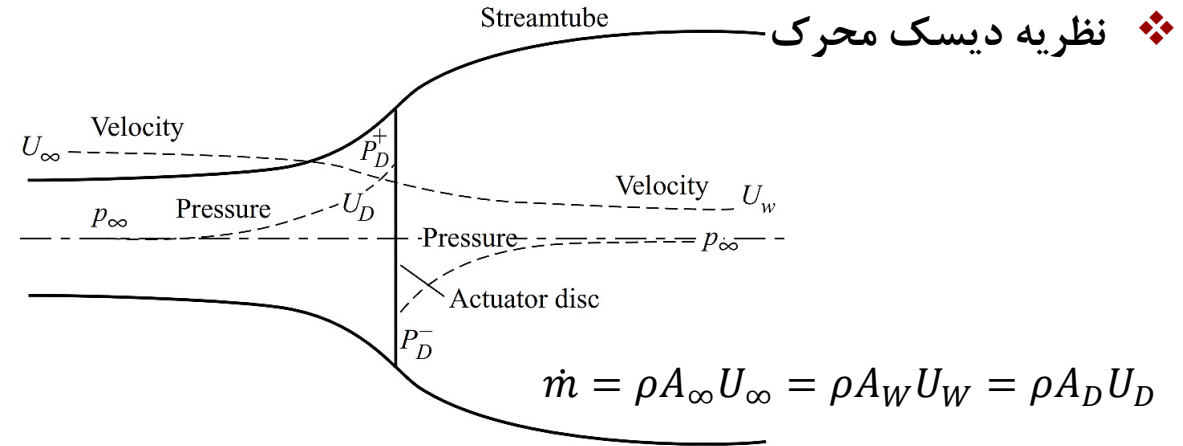


$$F = \dot{m}(U_\infty - U_W) = \rho A_D U_D (U_\infty - U_W)$$

$$\frac{1}{2} \rho U^2 + p + \rho g h = \text{const}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2} \rho U_D^2 + p_D^+ \\ \frac{1}{2} \rho U_W^2 + p_\infty = \frac{1}{2} \rho U_D^2 + p_D^- \end{cases} \quad -$$

$$(p_D^+ - p_D^-) = \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_W^2)$$



$$F = A_D (p_D^+ - p_D^-)$$

$$F = A_D \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_W^2)$$

$$\rho A_D U_D (U_\infty - U_W) = A_D \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_W^2)$$

$$U_D = \frac{1}{2} (U_\infty + U_W)$$

$$z = \frac{U_W}{U_\infty}$$

$$U_D = \frac{1}{2} U_\infty (1 + z)$$

$$a = \frac{1 - z}{2}$$

$$U_D = U_\infty (1 - a)$$

ضریب القای محوری





Power

❖ نظریه دیسک محرک

$$P = F U_D$$

$$P = A_D \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_W^2) \frac{1}{2} (U_\infty + U_W) = \frac{1}{4} \rho A_D U_\infty^3 \left[ 1 - \left( \frac{U_W}{U_\infty} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{U_W}{U_\infty} \right) \right] = \frac{1}{4} \rho A_D U_\infty^3 [1 - z][1 + z]^2$$

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{1}{4} \rho A_D U_\infty^3 [1 + z]^2 + 2 \frac{1}{4} \rho A_D U_\infty^3 [1 - z][1 + z] = 0 \quad \Rightarrow \quad z = \frac{1}{3} \quad \Rightarrow \quad a = \frac{1}{3}$$

$$P_{max} = \frac{1}{4} \rho A_D U_\infty^3 \left[ 1 - \frac{1}{3} \right] \left[ 1 + \frac{1}{3} \right]^2 = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho A_D U_\infty^3 \right)$$

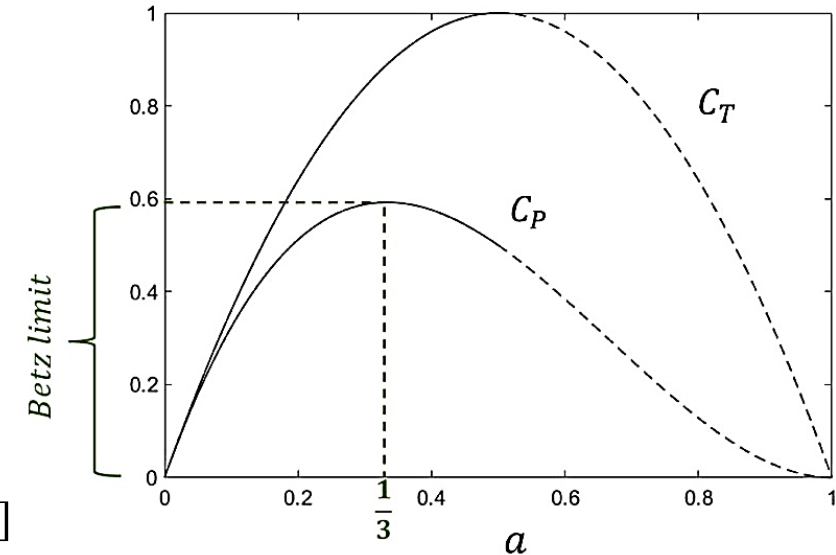
$$C_P = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A_D} \quad \Rightarrow \quad C_{P_{max}} = \frac{16}{27} = 0.593$$

بیشترین بازده ممکن توربین بادی

Thrust

$$F = \frac{1}{2} \rho A_D (U_\infty^2 - U_W^2) = \frac{1}{2} \rho A_D U_\infty^2 [1 - z][1 + z] = \frac{1}{2} \rho A_D U_\infty^2 [2a][2 - 2a]$$

$$C_T = \frac{Thrust}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_D} \quad \Rightarrow \quad C_{T_{max}} = 1 \quad a = \frac{1}{2}$$







## مدلسازی توربین باد

❖ نظریه مومنتوم المان پره

حالت پایا

سیال غیرلزج

جریان تراکم ناپذیر

صرف نظر از تغییر شکل پره

تعداد بی نهایت پره

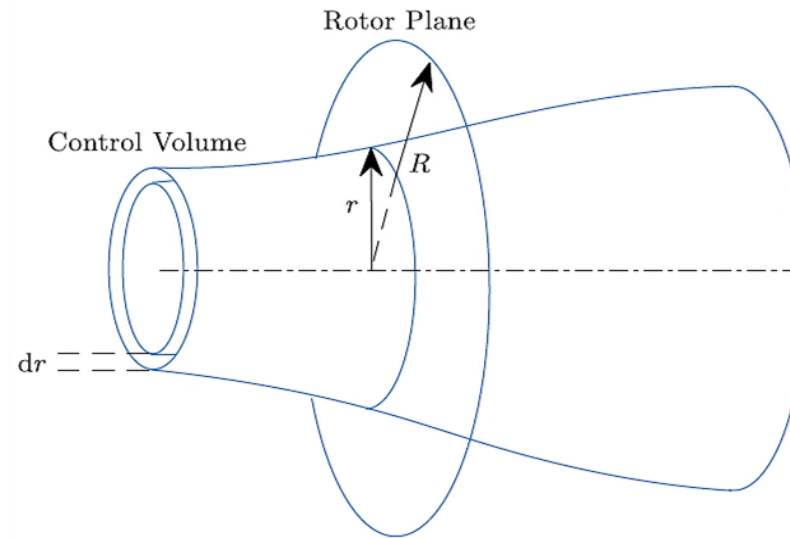
❖ فرضیات کلی

با نوشتن معادله مومنتوم زاویه ای داریم:

$$dM = 4\pi r^3 \Omega U_{\infty} a' (1 - a) dr$$

با نوشتن معادله مومنتوم خطی خواهیم داشت:

$$dT = 4\pi r (U_{\infty}^2 a (1 - a) + (a' r \Omega)^2) dr$$



Rotor Plane

 $U_d$  $U_{\infty}$  $U_{\infty}$ 

$$U_a = \frac{U_{\infty} + U_d}{2}$$

$$U_a = (1 - a) U_{\infty}$$

$$U_d = (1 - 2a) U_{\infty}$$

ضریب القای مماسی

$$U_{\theta} = a' r \Omega$$

$$U_{d,\theta} = 2a' r \Omega$$

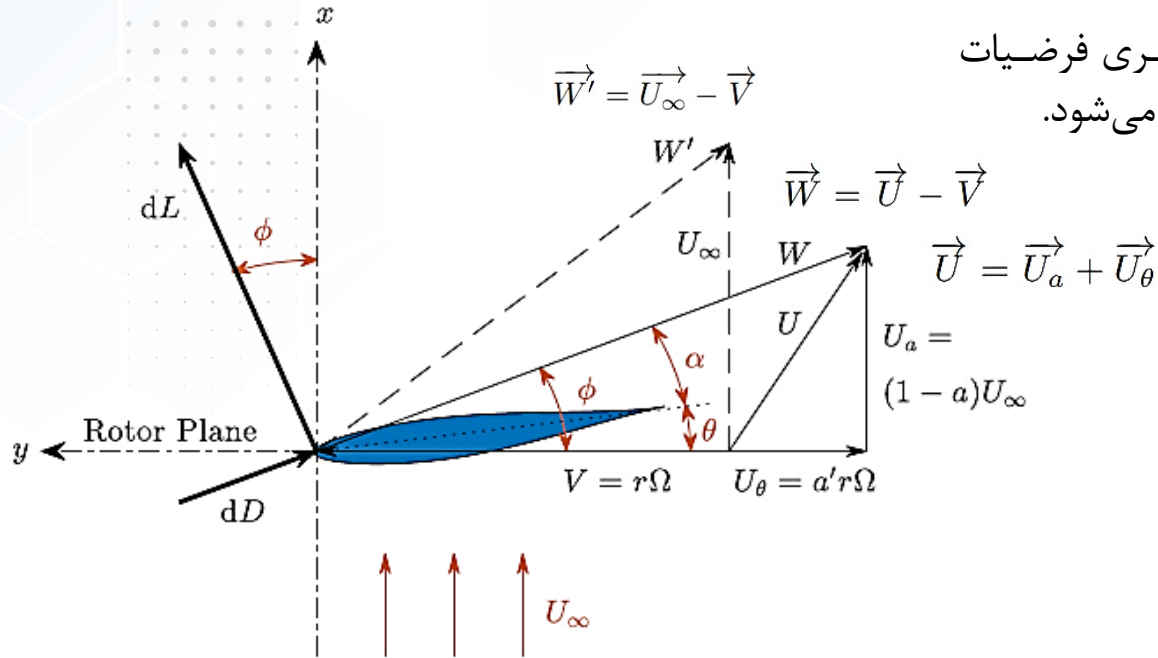
✓ تاثیر چرخش جریان در  
نظر گرفته شده

(نیروی از طرف پره توربین  
به جریان وارد شده)



## ◆ نظريه مومنتوم المان پره

روش مومنتوم المان پره به کمک اصل بقای جرم و مومنتوم با یک سری فرضیات جهت طراحی پره و پیش‌بینی عملکرد توربین‌های محور افقی استفاده می‌شود.



نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد (سرعت دورانی بی بعد شده)

## توان تولیدی توربین

ضریب توان

## ضریب نیروی رانش

$$TSR = \frac{R\Omega}{U}$$

$$P = M \Omega_P^\infty$$

$$C_P = \frac{1}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A}$$

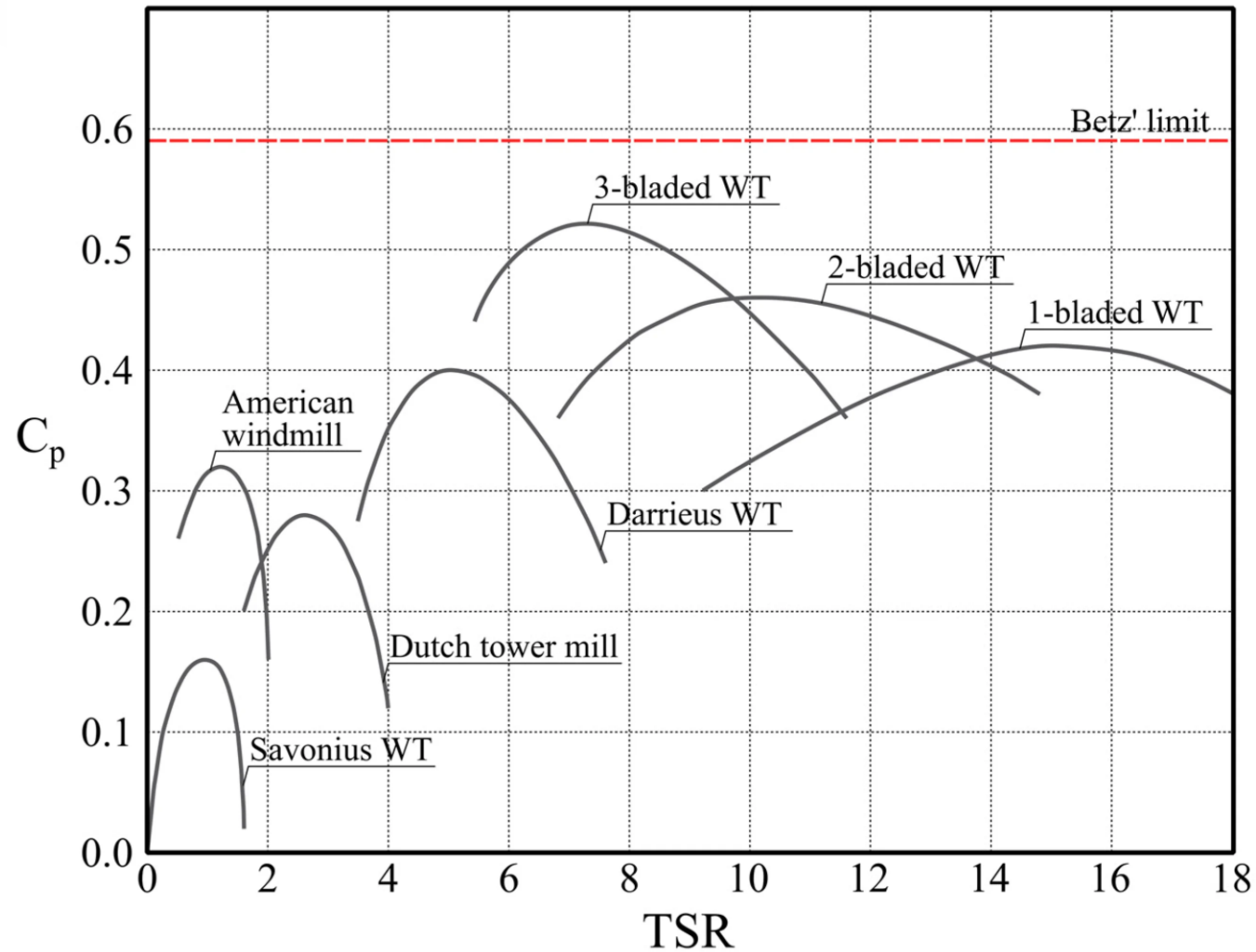
$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A}$$

$$dM = r(dL \sin\phi - dD\cos\phi)$$



## مدلسازی توربین باد

❖ مقایسه عملکرد انواع توربین باد

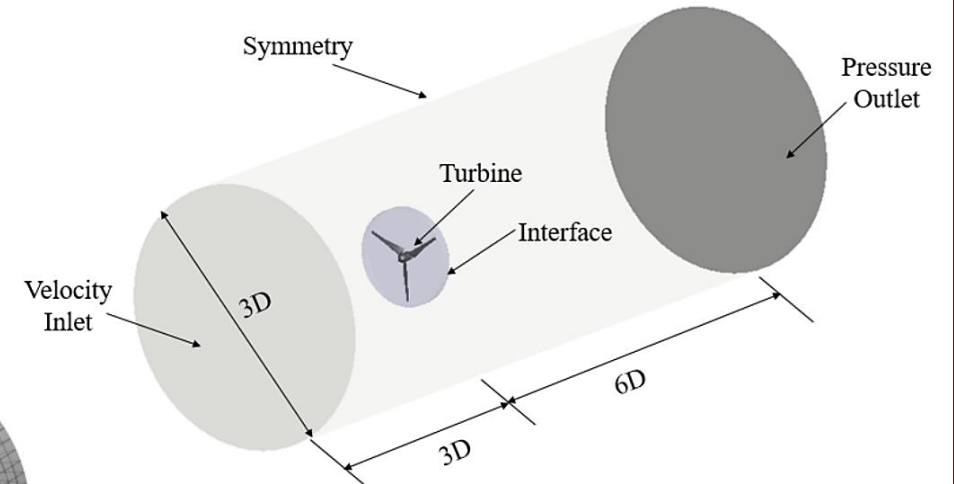
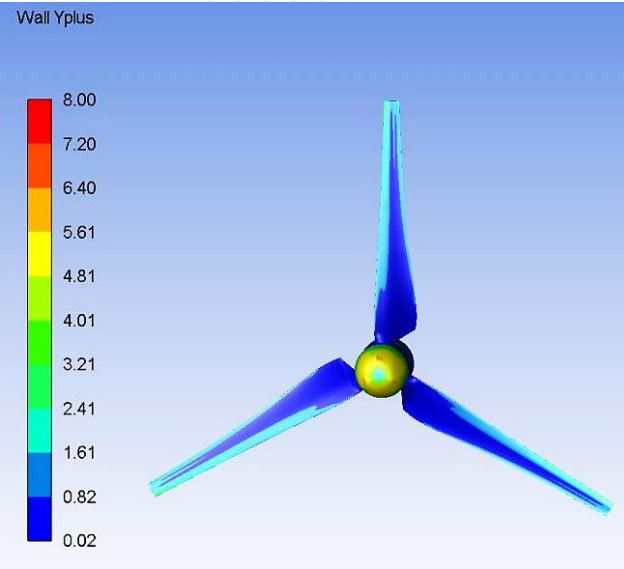




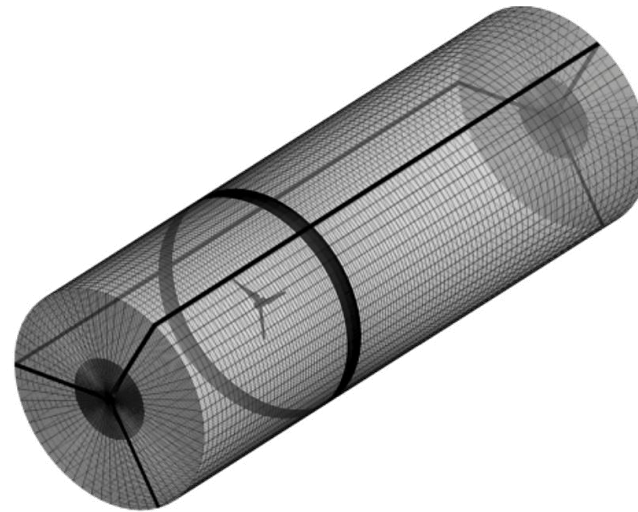
## ارزیابی عملکرد توربین باد

### ❖ ۱- روش عددی: دینامیک سیالات محاسباتی

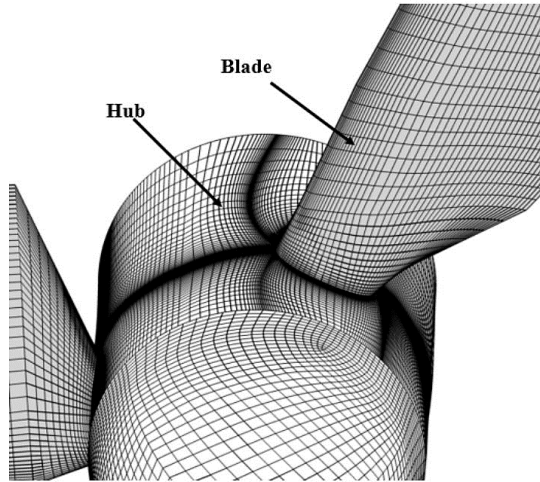
معیار  $Y^+$  برای  
اندازه مش



رعایت فواصل استاندارد در دامنه محاسباتی



شبکه بندی دامنه محاسباتی

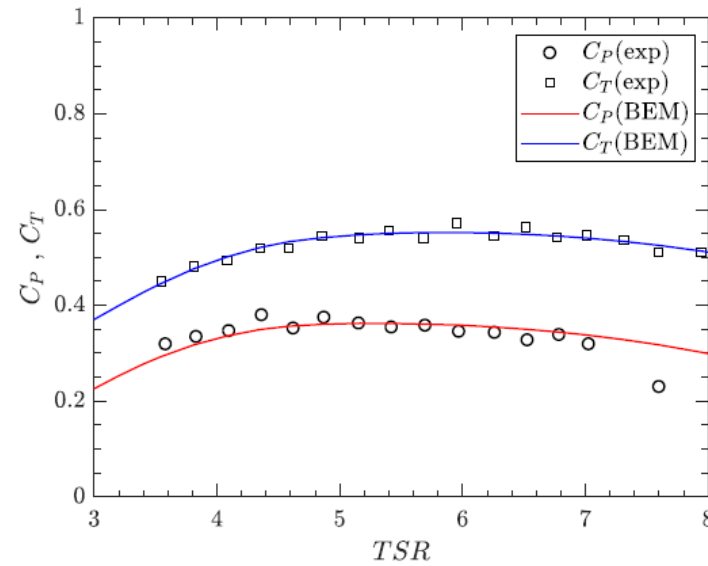
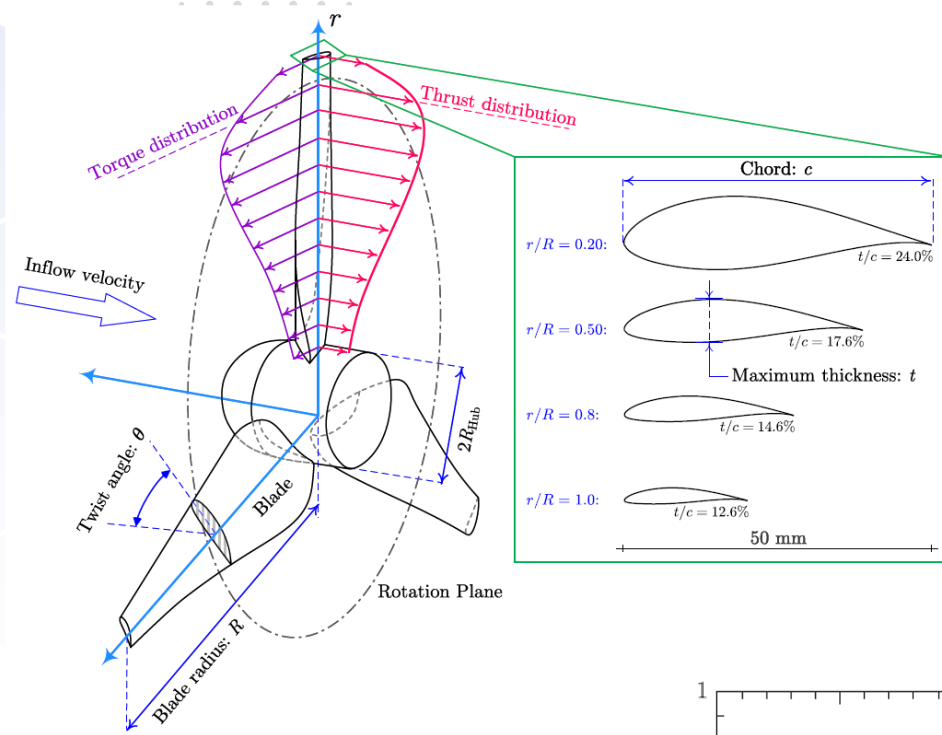




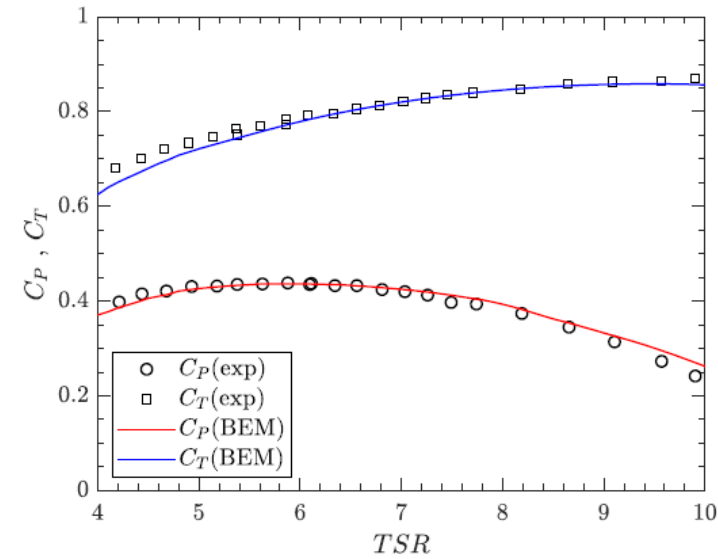


## ارزیابی عملکرد توربین باد

### ❖ ۲- روش عددی: مومنتوم المان پره



(a)  $U_\infty = 1.54$  m/s



(b)  $U_\infty = 1.73$  m/s





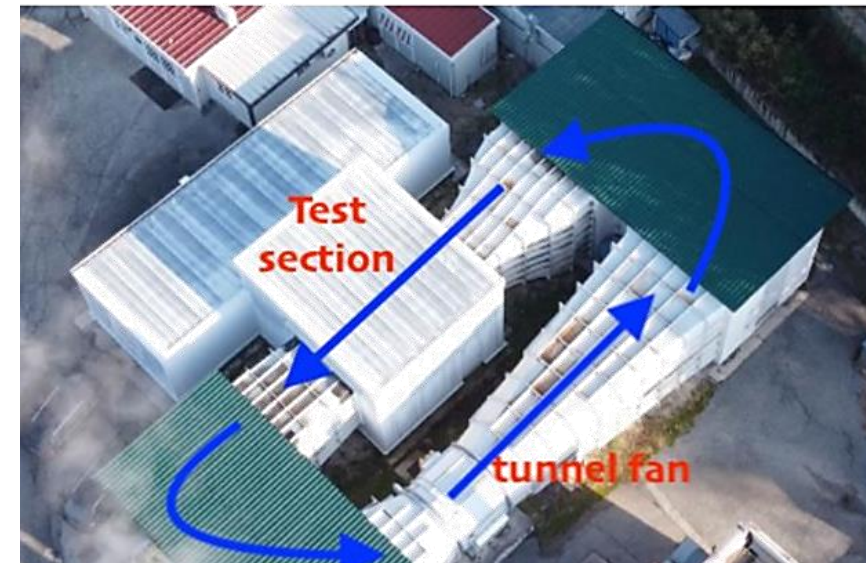
## ارزیابی عملکرد توربین باد

### ❖ ۳- روش تجربی: تونل باد

توربین باد  
در تونل باد



تونل باد مدار باز



تونل باد مدار بسته



# سپاس از توجه شما

---