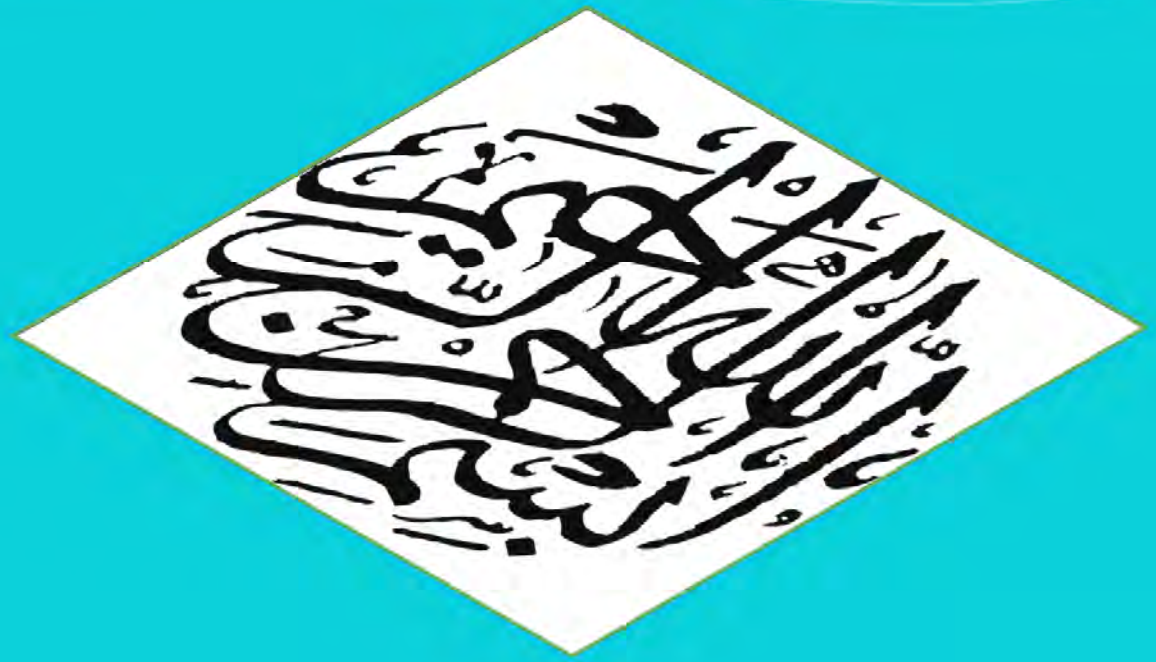


سیستمهای قدرت بادی

انرژی باد

- تاریخچه استفاده از انرژی باد به هزاران سال پیش بر میگردد.

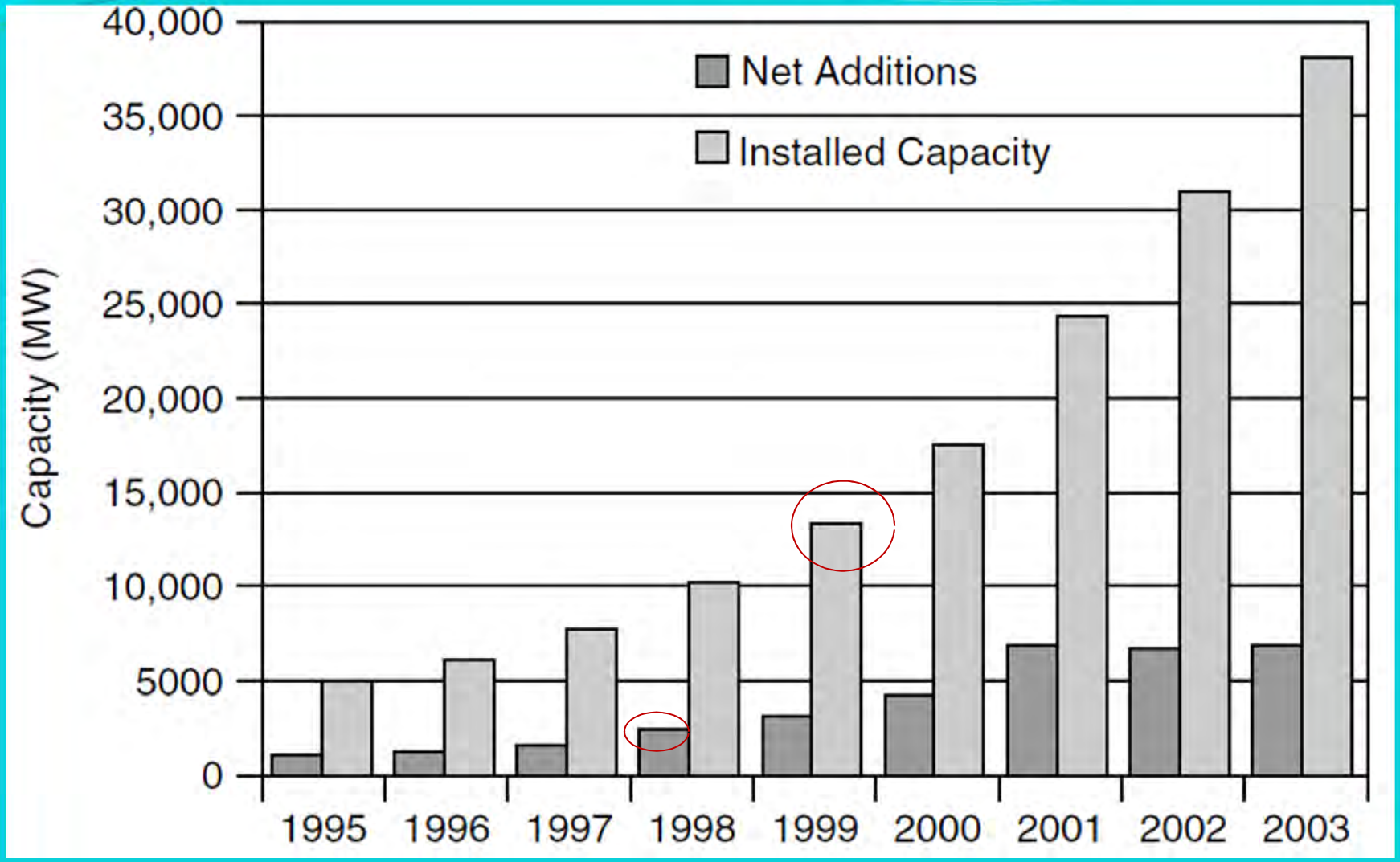
- در چند سال گذشته، میانگین رشد سالانه انرژی باد در دنیا حدود ۳۰ درصد گزارش شده است

- اروپا در حال حاضر؛ بیش از ۷۰ درصد از برق بادی جهان را تولید می کند

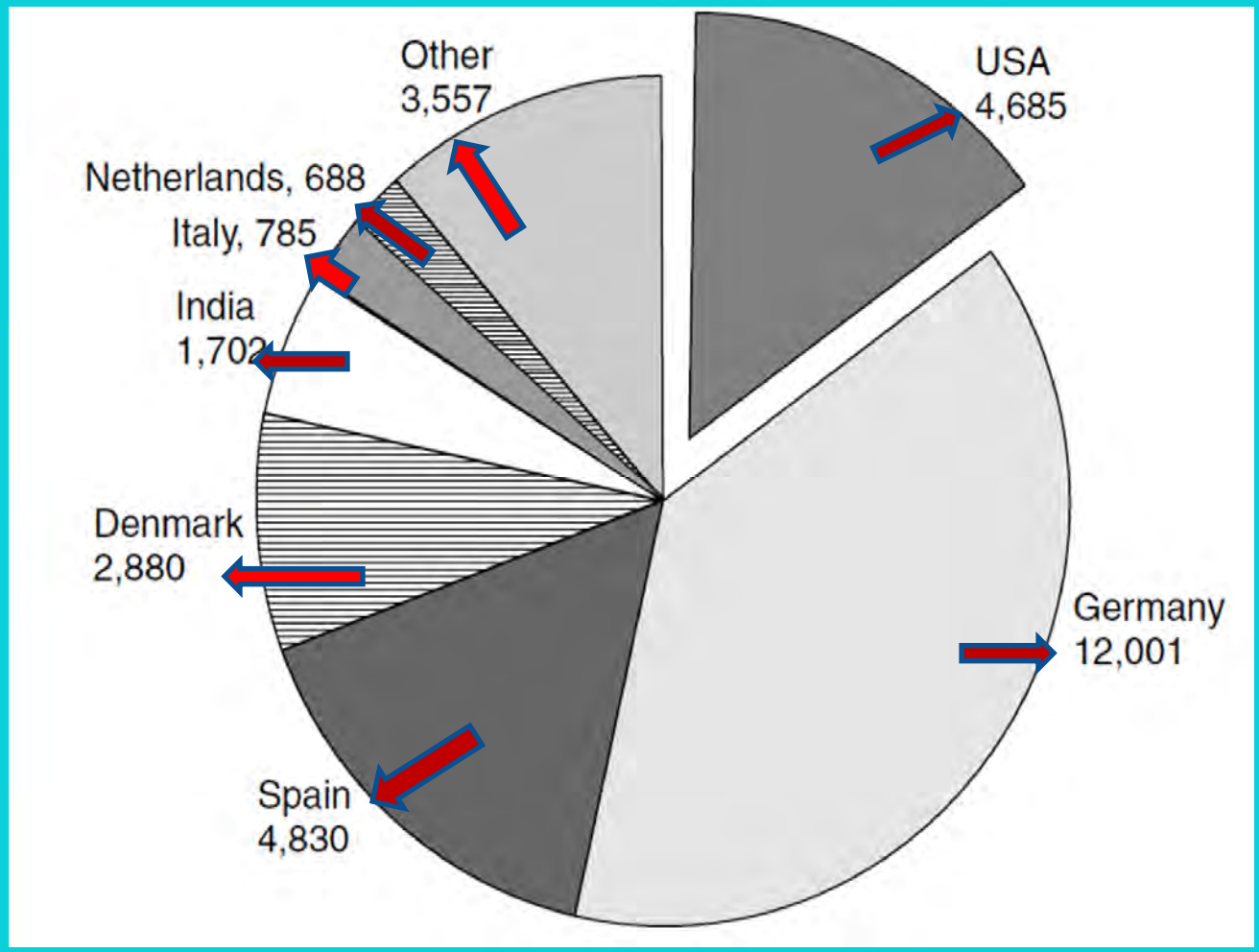
- در حال حاضر، مزرعه های بادی در آمریکا حدود ۱۵ میلیارد کیلو وات ساعت در سال برق تولید می کنند که از نظر ملاحظات زیست محیطی و مبارزه با تولید گازهای گلخانه ای، این میزان انرژی باد می تواند سالانه از انتشار ۸ میلیون تن دی اکسید کربن جلوگیری کند .

- کل ظرفیت نصب شده برق بادی در جهان ۱۸۰۰۰۰مگا وات است.

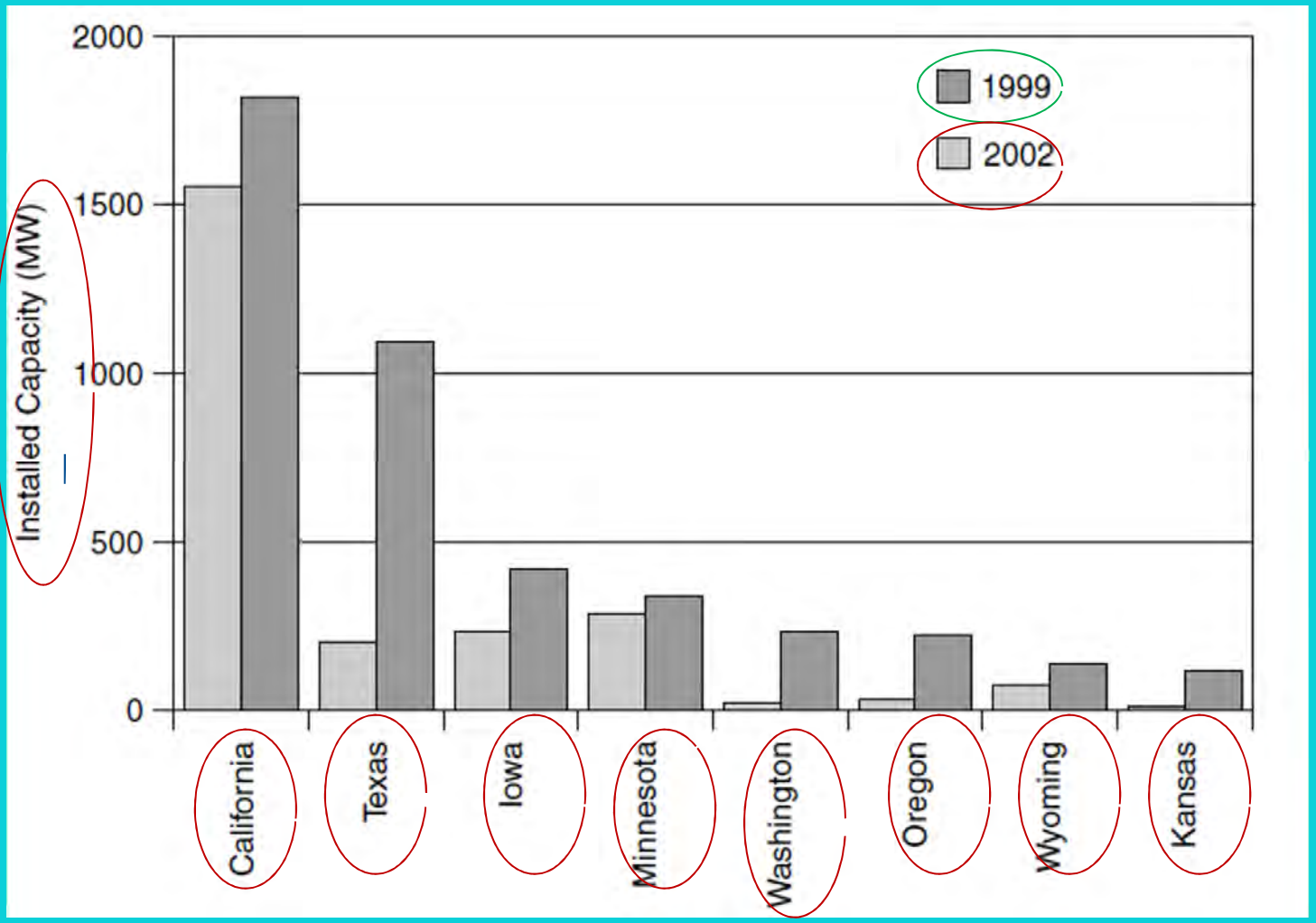
- کل ظرفیت نصب شده برق بادی در ایران در حدود ۷۰۰۰ مگا وات است.


Net Additions
Installed Capacity
Capacity (MW)
40,000
35,000
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5000
0
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003

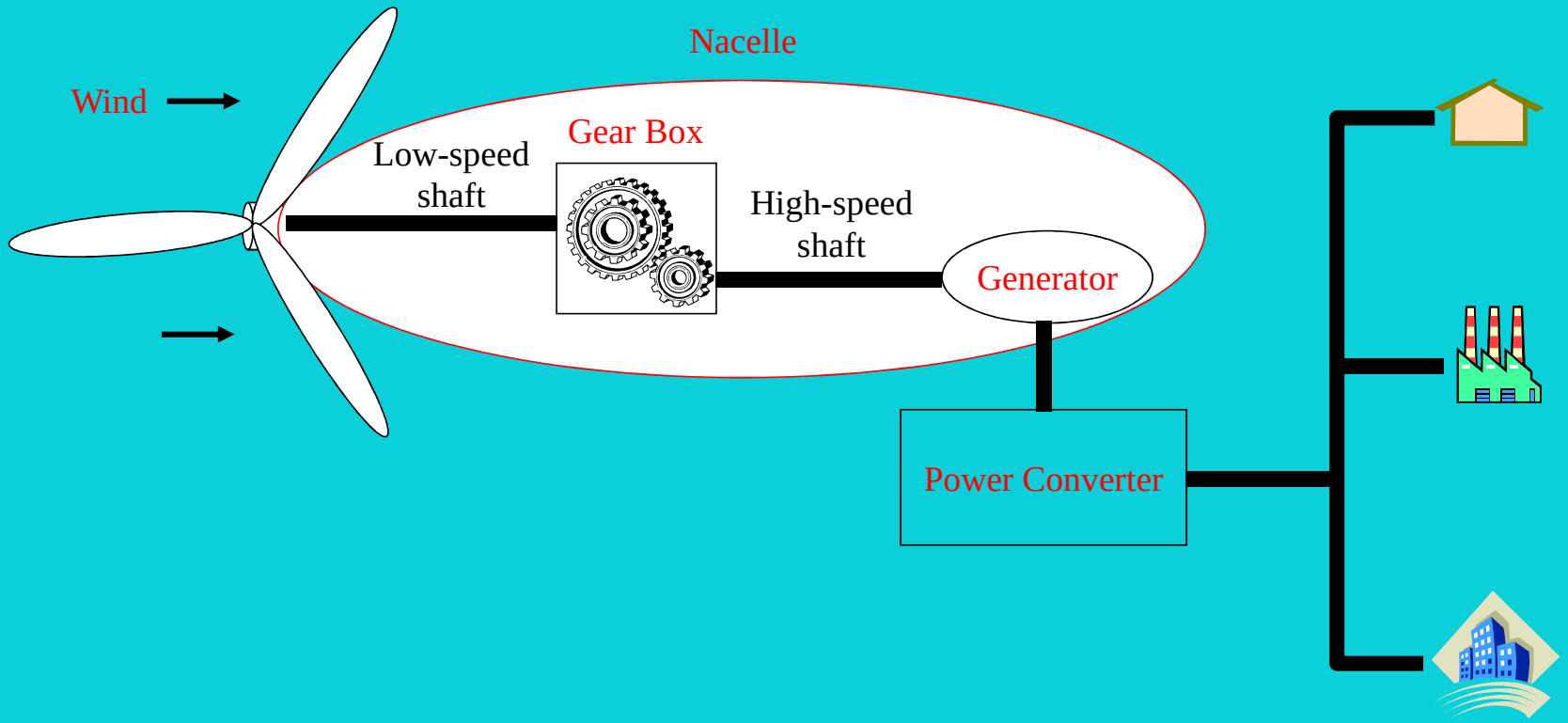
کل ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۰۲توسط کشورهای مختلف



کل ظرفیت نصب شده در سال ۱۹۹۹و۲۰۰۲در امریکا

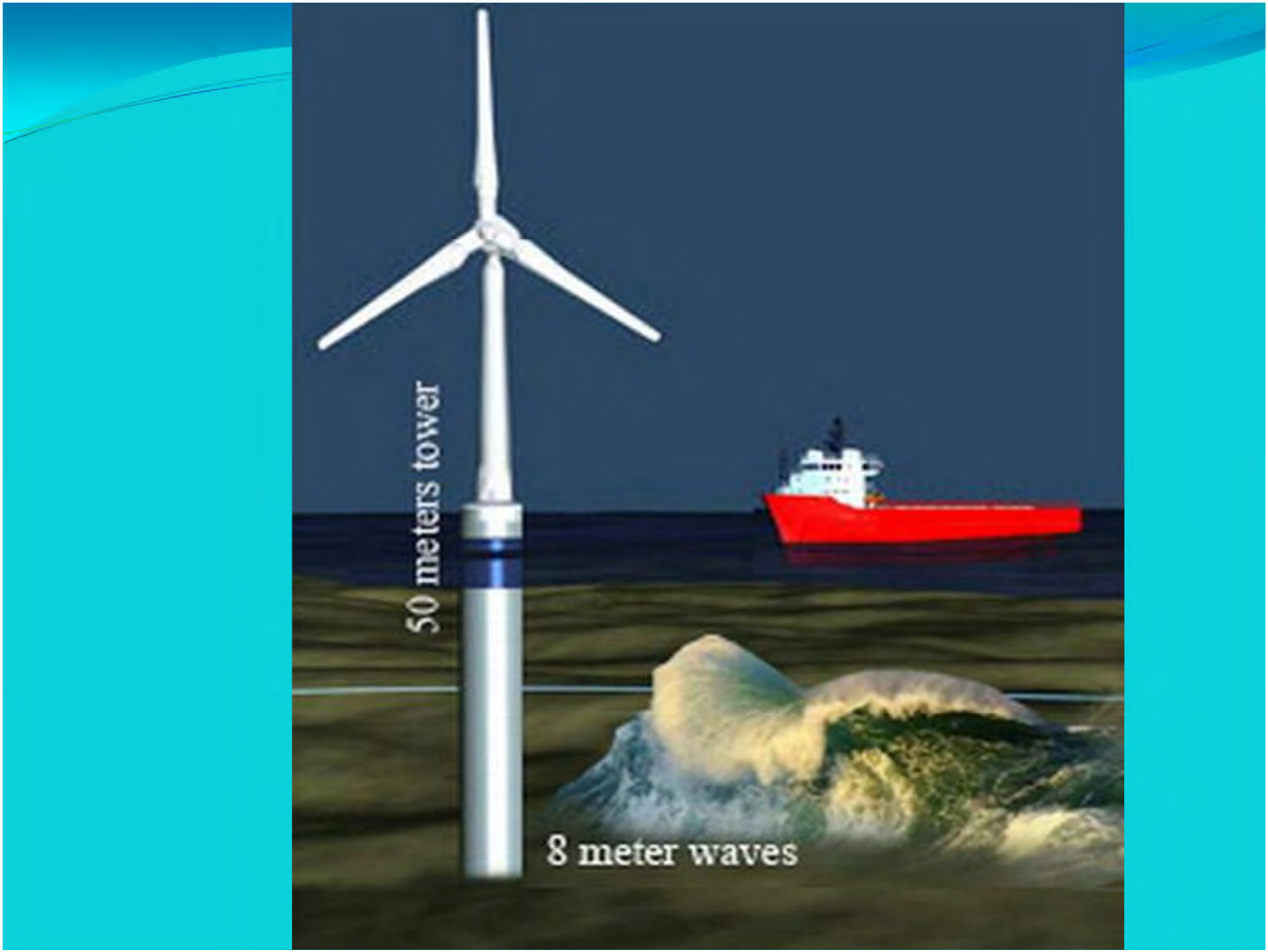


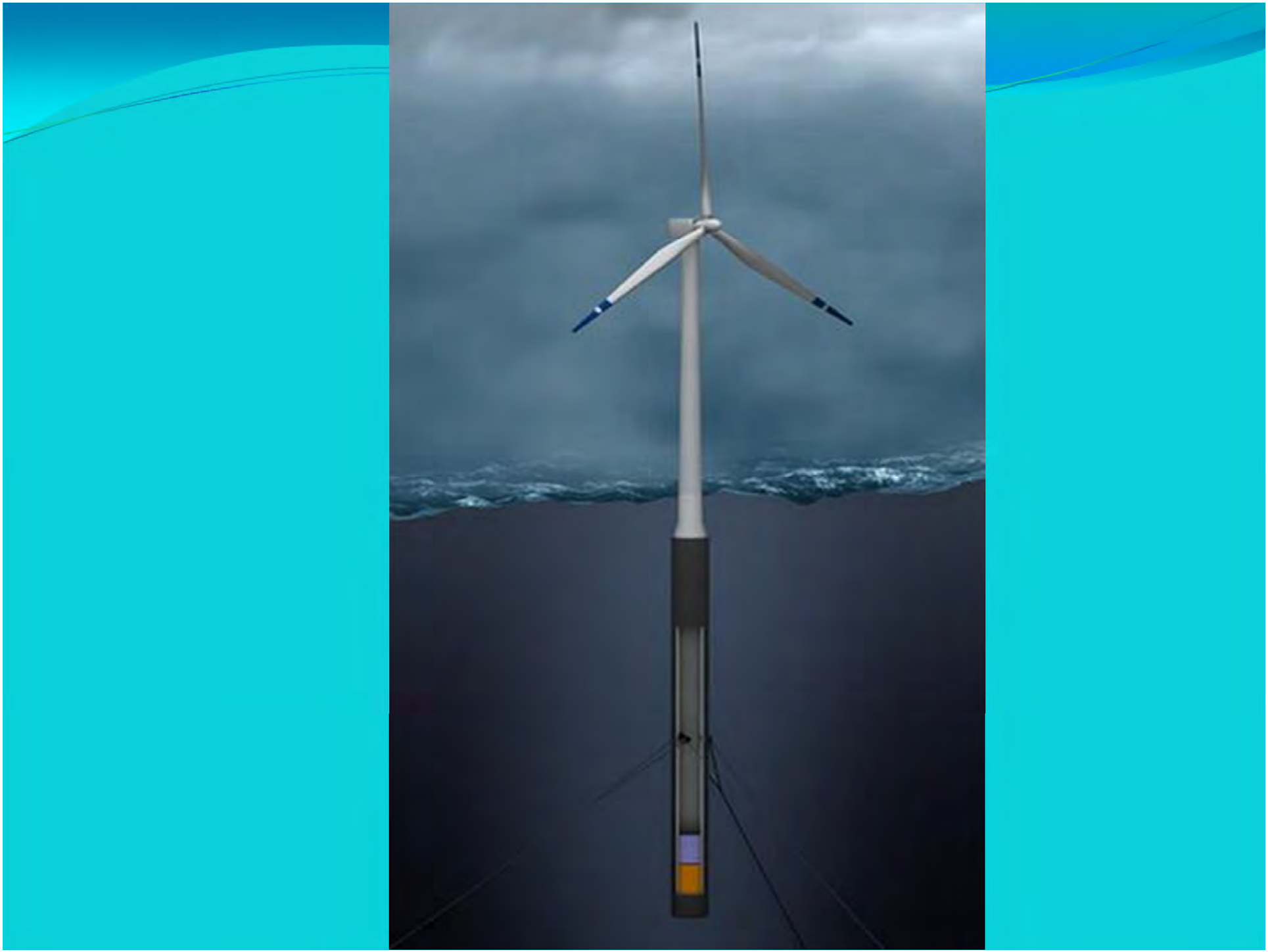
توربین بادی


Nacelle
Wind
Gear Box
Low-speed shaft
High-speed shaft
Generator
Power Converter

توربین ۶۰۰ کیلو وات واقع در روستای بابائیان منجیل

SKAN-BO
SCANIA
Lang last

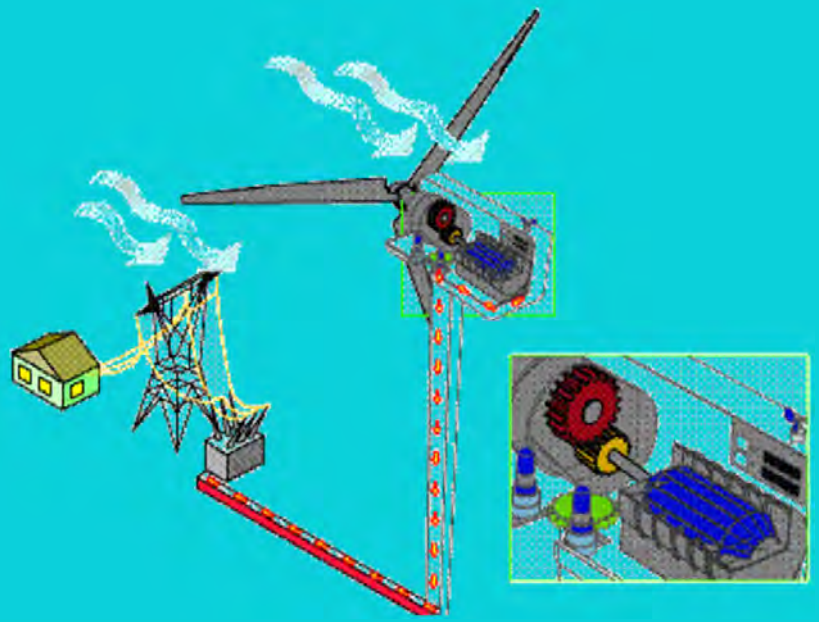

50 meters tower
8 meter waves



توربین های بادی

توربین بادی :

- توربین‌های بادی کوچک
- توربین‌های بادی متوسط
- توربین‌های بادی بزرگ (مزارع بادی)



اجزاء اصلی توربین بادی:

- پایه (base)
- برج (tower)
- نشیمنگاه (Nacelle)
- تیغه ها (blades)

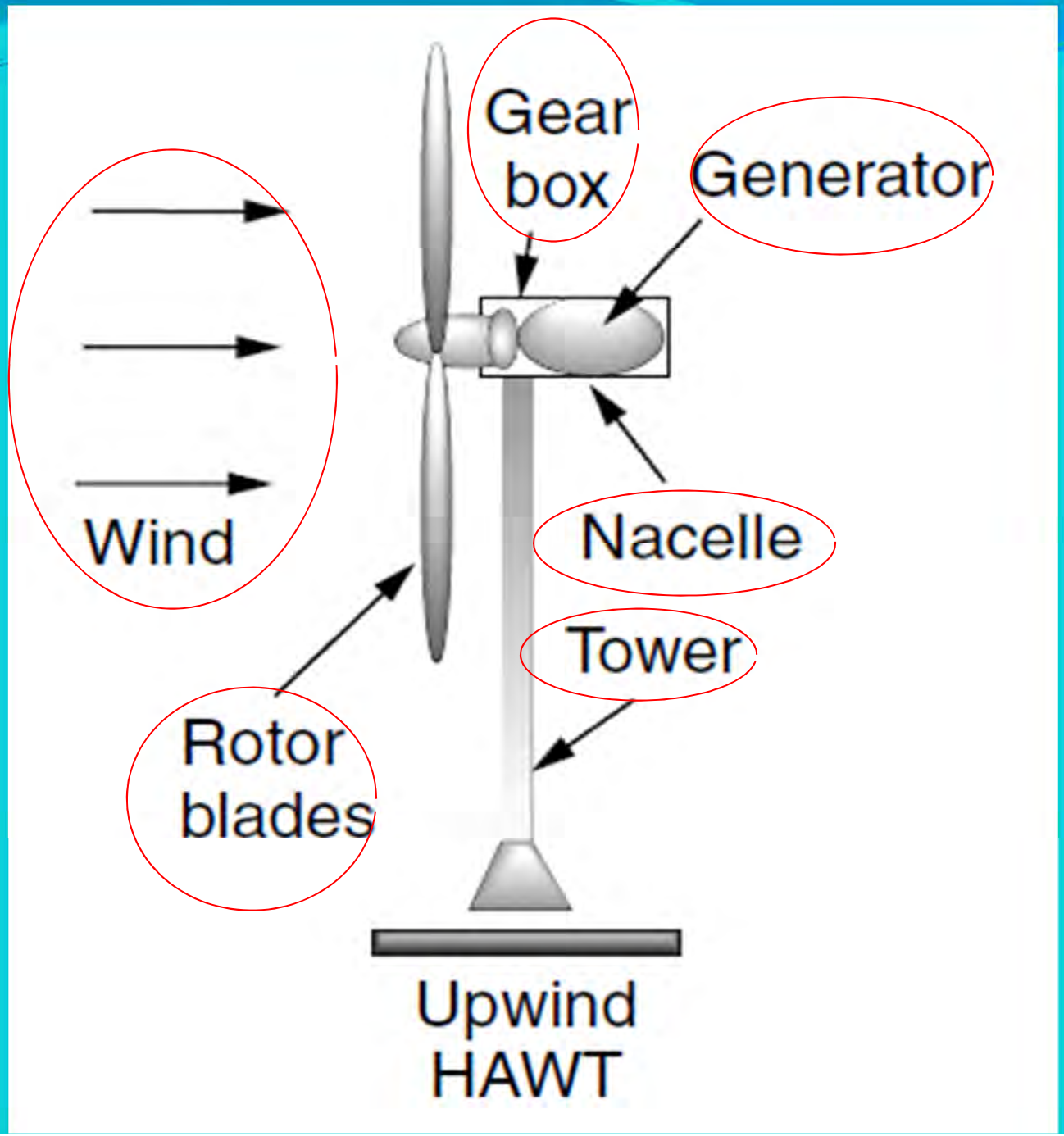
انواع توربین بادی

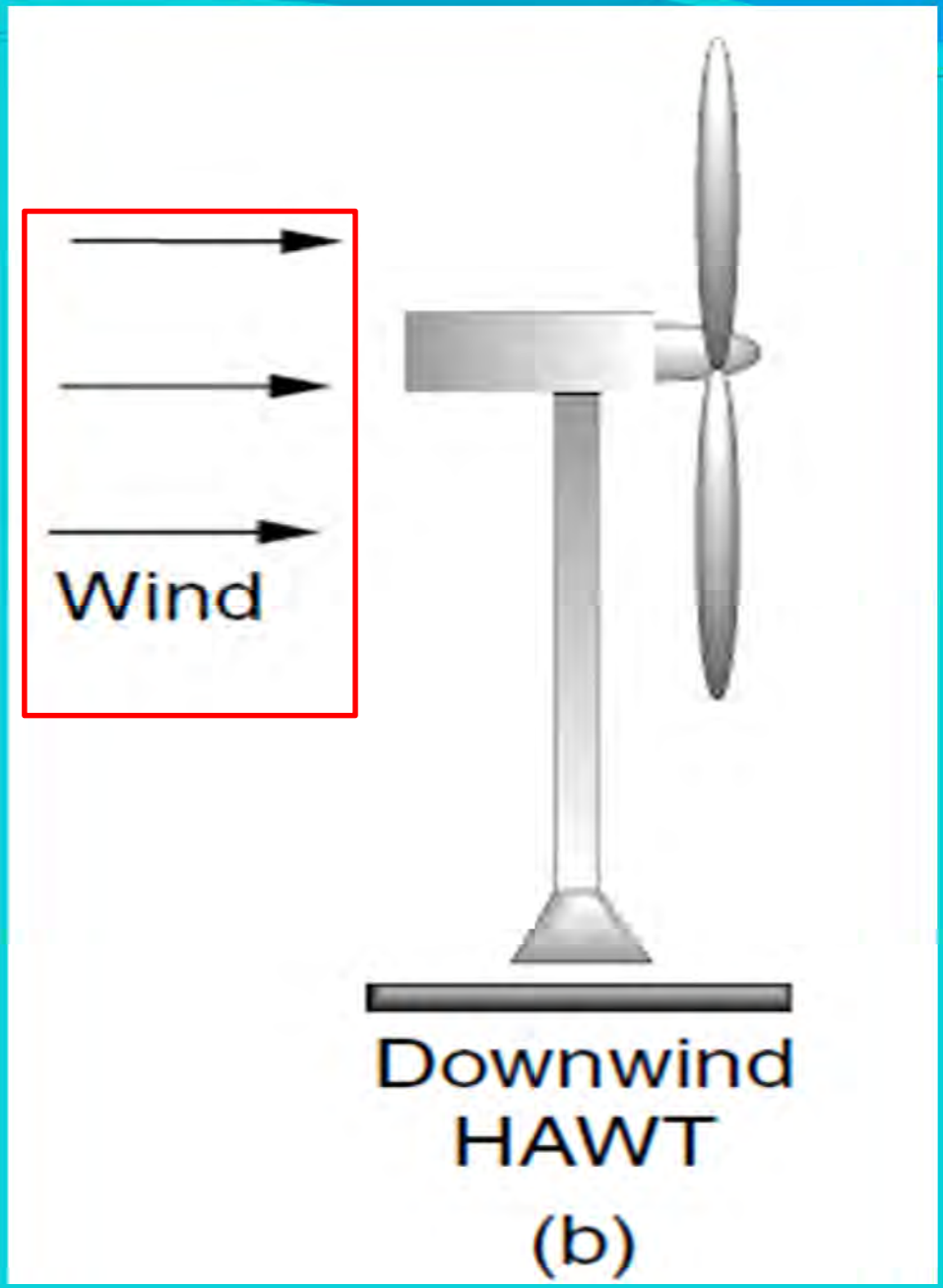
توربین های بادی با محور عمودی (نوع داریوس)

توربین های بادی با محور افقی

Up wind machines

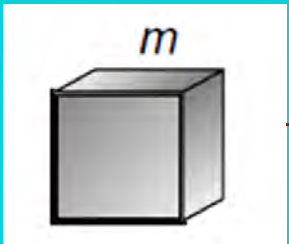
Down wind machines


Gear box
Generator
Wind
Nacelle
Tower
Rotor blades
Upwind HAWT

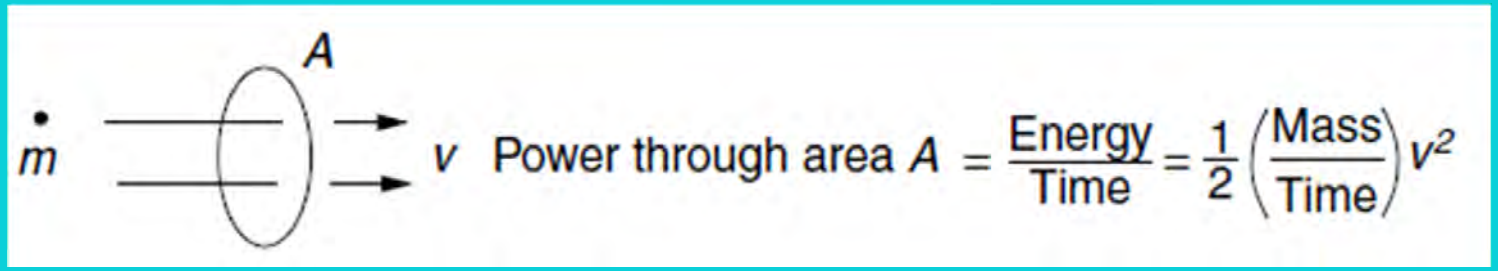

Wind
Downwind
HAWT
(b)

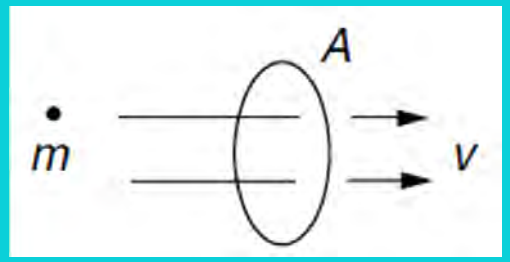
قدرت باد

قدرت سرعت باد



$$K.E = \frac{1}{2}mv^2$$



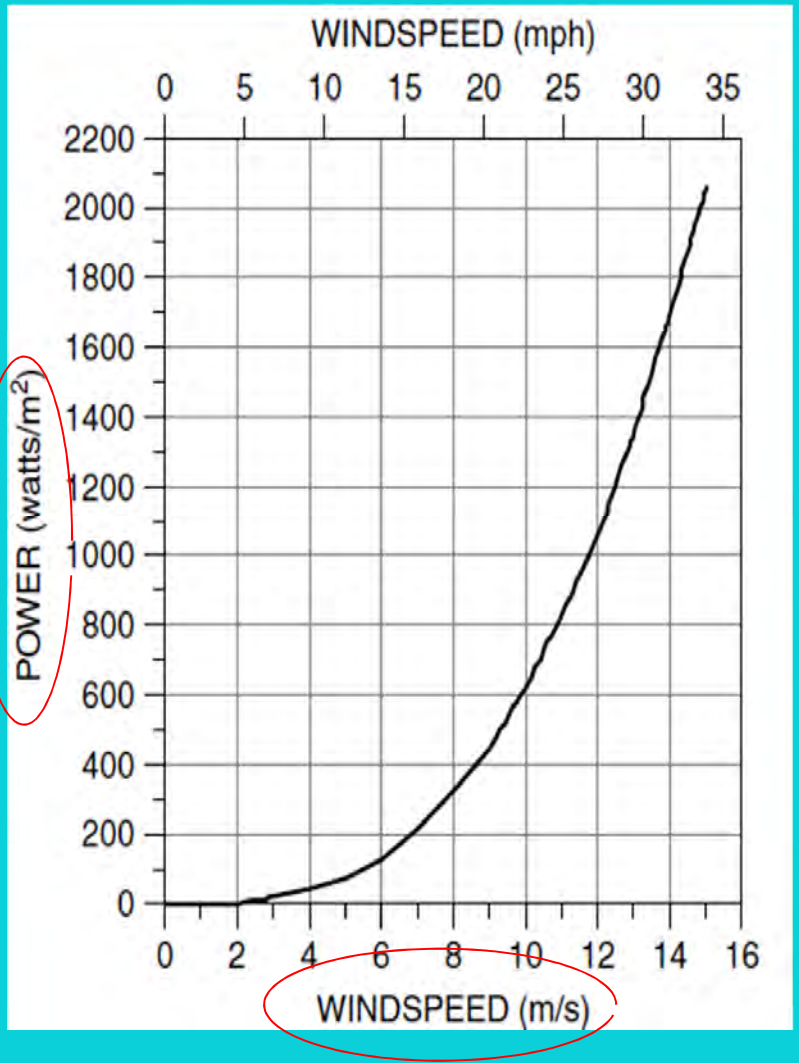


$$\left(\frac{mass\ passing\ through\ A}{Tim}\right) = \dot{m} = \rho A v$$

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

قدرت توربین باد

Windspeed (m/s)	Windspeed (mph)	Power (W/m^2)
0	0	0
1	2.24	1
2	4.47	5
3	6.71	17
4	8.95	39
5	11.19	77
6	13.42	132
7	15.66	210
8	17.90	314
9	20.13	447
10	22.37	613
11	24.61	815
12	26.84	1058
13	29.08	1346
14	31.32	1681
15	33.56	2067



E6.1

اثر دما بر قدرت باد

$$\rho = \frac{p * M.W * 10^{-3}}{R * T}$$

تصحیح دما برای چگالی هوا

Temperature (°C)	Temperature (°F)	Density (kg/m^3)
−15	5.0	1.368
−10	14.0	1.342
−5	23.0	1.317
0	32.0	1.293
5	41.0	1.269
10	50.0	1.247
15	**59.0**	**1.225**
20	68.0	1.204
25	77.0	1.184
30	86.0	1.165
35	95.0	1.146
40	104.0	1.127

چگالی هوا برای فشار یک اتمسفردر دماهای مختلف

E 6.2

تصحیح ارتفاع از سطح دریا برای چگالی هوا در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد

Altitude (meters)	Altitude (feet)	Pressure (atm)
0	0	1
200	656	0.977
400	1312	0.954
600	1968	0.931
800	2625	0.910
1000	3281	0.888
1200	3937	0.868
1400	4593	0.847
1600	5249	0.827
1800	5905	0.808
2000	6562	0.789
2200	7218	0.771

اثر ارتفاع برج و ناهمواری بر سرعت باد

ضریب اصطکاک برای عوارض زمین

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{\alpha}$$

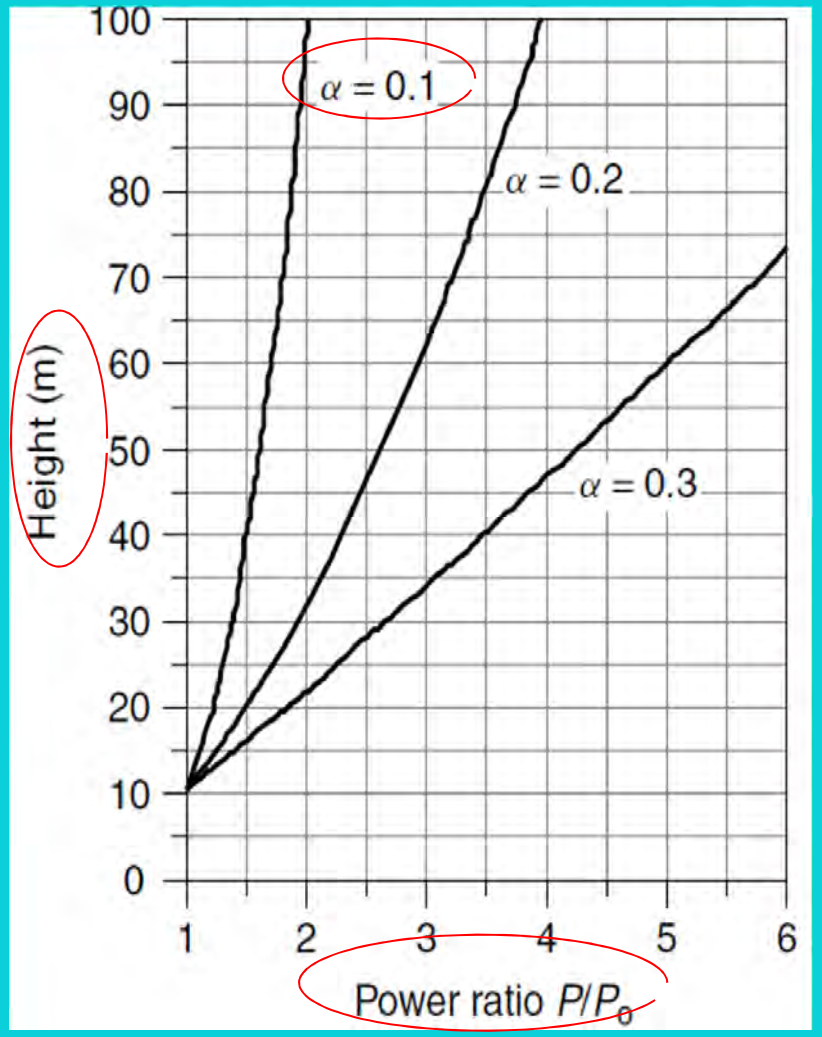
ضریب اصطکاک	عوارض زمین
.۱	زمین یکنواخت
.۱۵	سطح زمین چمن
.۲	بوته و حصارهای بلند
.۲۵	درختان زیاد
.۳	شهر کوچک با درخت و بوته
.۴	شهر بزرگ با ساختمان بلند

طبقه بندی ناهمواریها

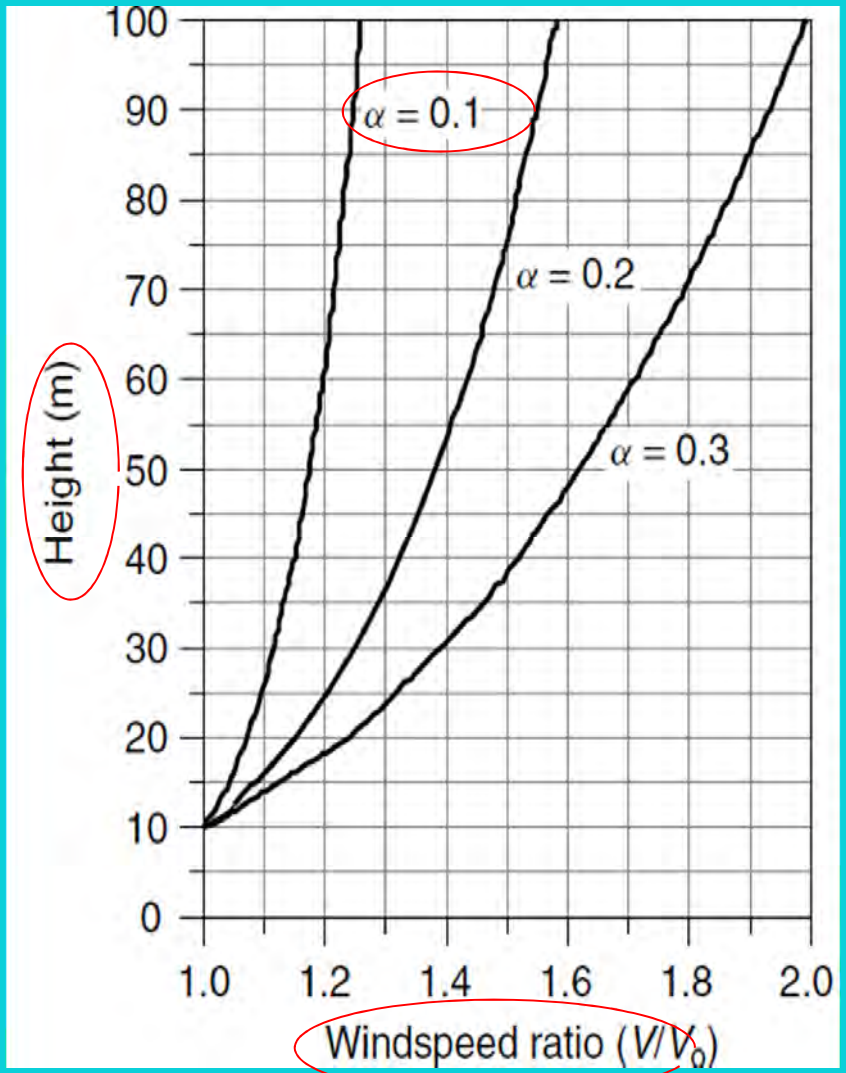
$$\left(\frac{v}{vo}\right) = \frac{l_n\left(H/z\right)}{l_n\left(H0/z\right)}$$

ضریب ناهمواری	توصیف	طبقه بندی ناهمواری
.۰۰۰۲	سطح آب	۰
.۰۳	ناحیه باز	۱
.۱	زمین کشاورزی	۲
.۴	ناحیه شهری	۳
۱.۶	نواحی جنگلی	۴

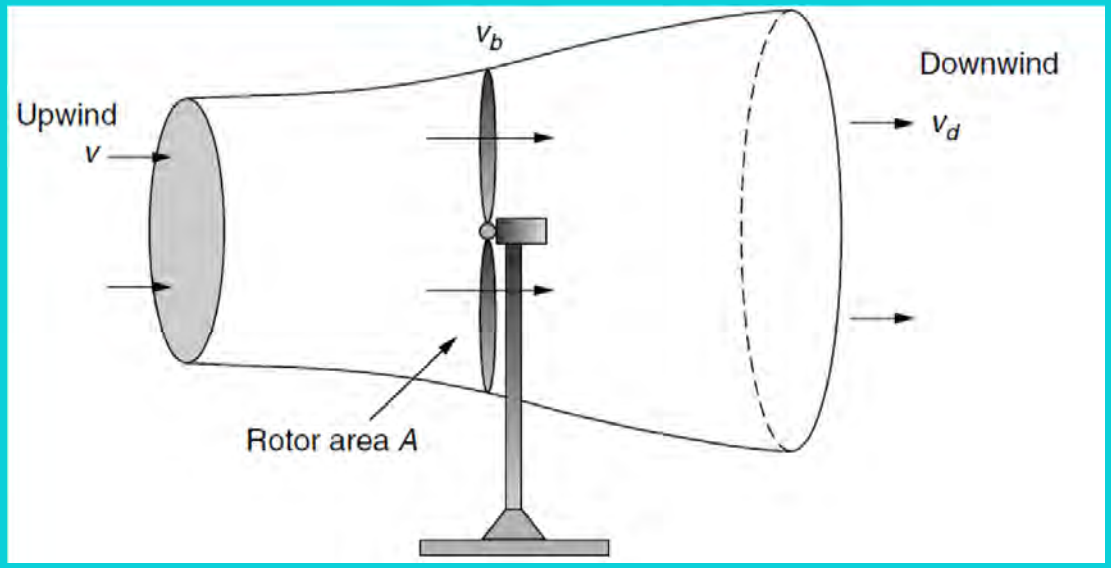
تاثیرتغییر ارتفاع و ضریب اصطکاک به نسبت
قدرت باد



تاثیرتغییر ارتفاع و ضریب اصطکاک به نسبت
سرعت باد



بازده توربین های بادی



چرا همه انرژی باد گرفته نمی شود؟
قانون بتز: کاهش سرعت باد تا یک سوم
برای یک توربین ایده آل

$$P_b = \tfrac{1}{2}\dot{m}(v^2 - v_d^2)$$

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

با فرض اینکه سرعت باد در پره ها میانگین باشد.

$$P_b = \frac{1}{2}\rho A\left(\frac{v + v_d}{2}\right)(v^2 - v_d^2)$$

$$\lambda = \left(\frac{v_d}{v}\right) \longrightarrow P_b = \frac{1}{2}\rho A\left(\frac{v + \lambda v}{2}\right)(v^2 - \lambda^2 v^2) = \underbrace{\frac{1}{2}\rho A v^3}_{\text{Power in the wind}} \cdot \underbrace{\left[\frac{1}{2}(1+\lambda)(1-\lambda^2)\right]}_{\text{Fraction extracted}}$$

$$\text{Rotor efficiency} = C_P = \tfrac{1}{2}(1+\lambda)(1-\lambda^2) \longrightarrow P_b = \tfrac{1}{2}\rho A v^3 \cdot C_p$$

بازده حداکثر توربین های بادی

$$\text{Rotor efficiency} = C_P = \tfrac{1}{2}(1+\lambda)(1-\lambda^2)$$

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2}[(1+\lambda)(-2\lambda)+(1-\lambda^2)] = 0$$

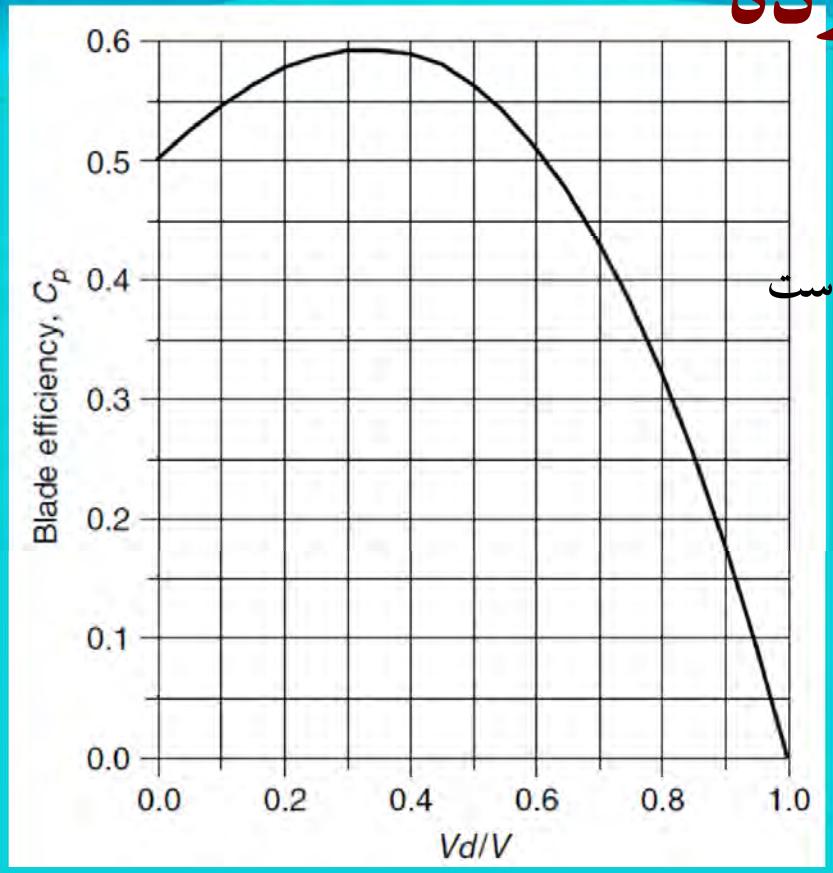
$$= \frac{1}{2}[(1+\lambda)(-2\lambda)+(1+\lambda)(1-\lambda)] = \frac{1}{2}(1+\lambda)(1-3\lambda) = 0$$

$$\rightarrow \quad \lambda = \frac{v_d}{v} = \frac{1}{3}$$

لذا حداکثر بازده توربین بادی عبارتست از (بازده بتز):

$$\text{Maximum rotor efficiency} = \frac{1}{2}\left(1+\frac{1}{3}\right)\left(1-\frac{1}{3^2}\right) = \frac{16}{27} = 0.593 = 59.3\%$$

تغییرات بازده

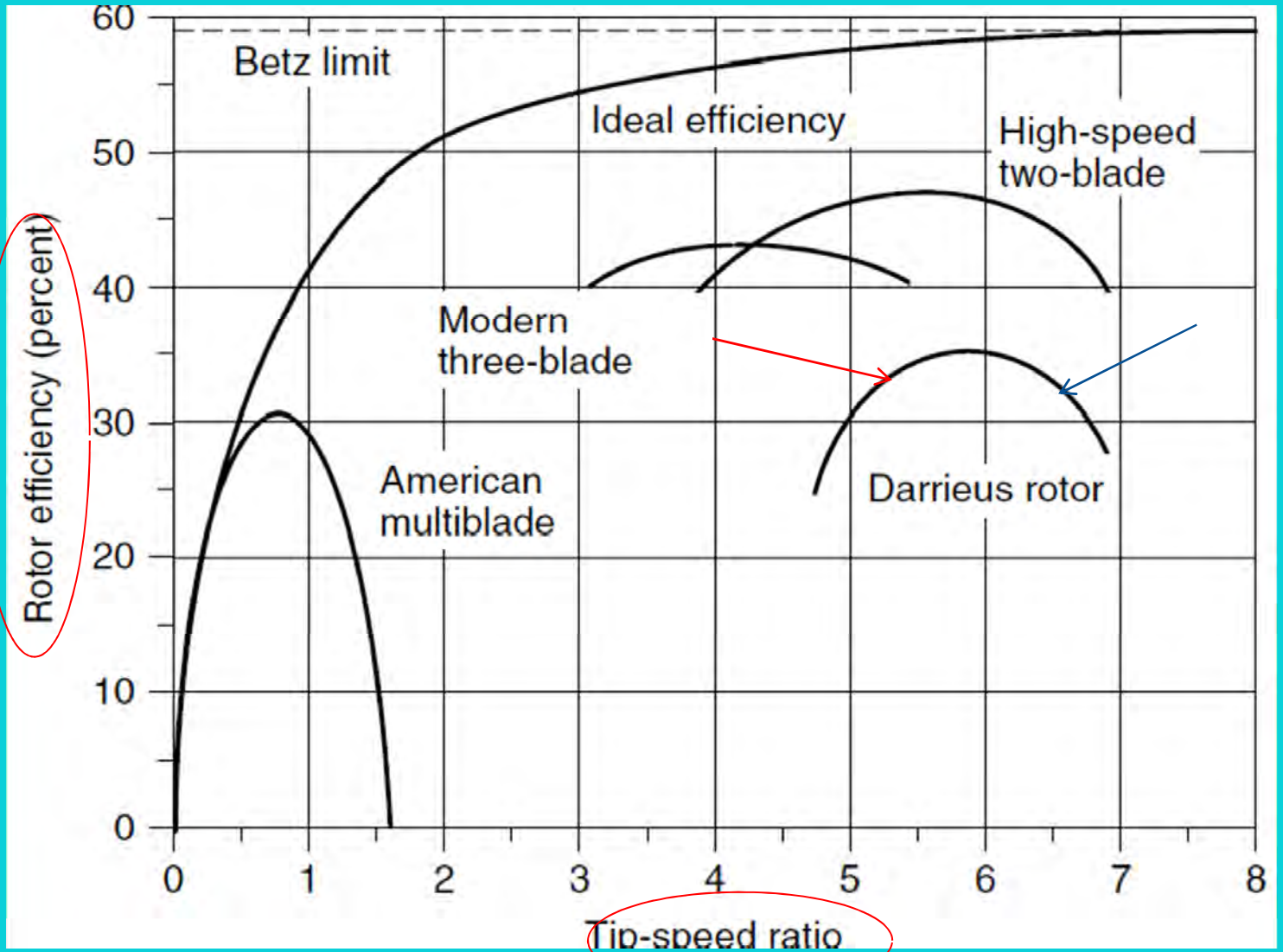


- در هر سرعت باد، بازده وابسته به سرعت چرخش پره ها است

- تعریف ضریب سرعت نوک پره

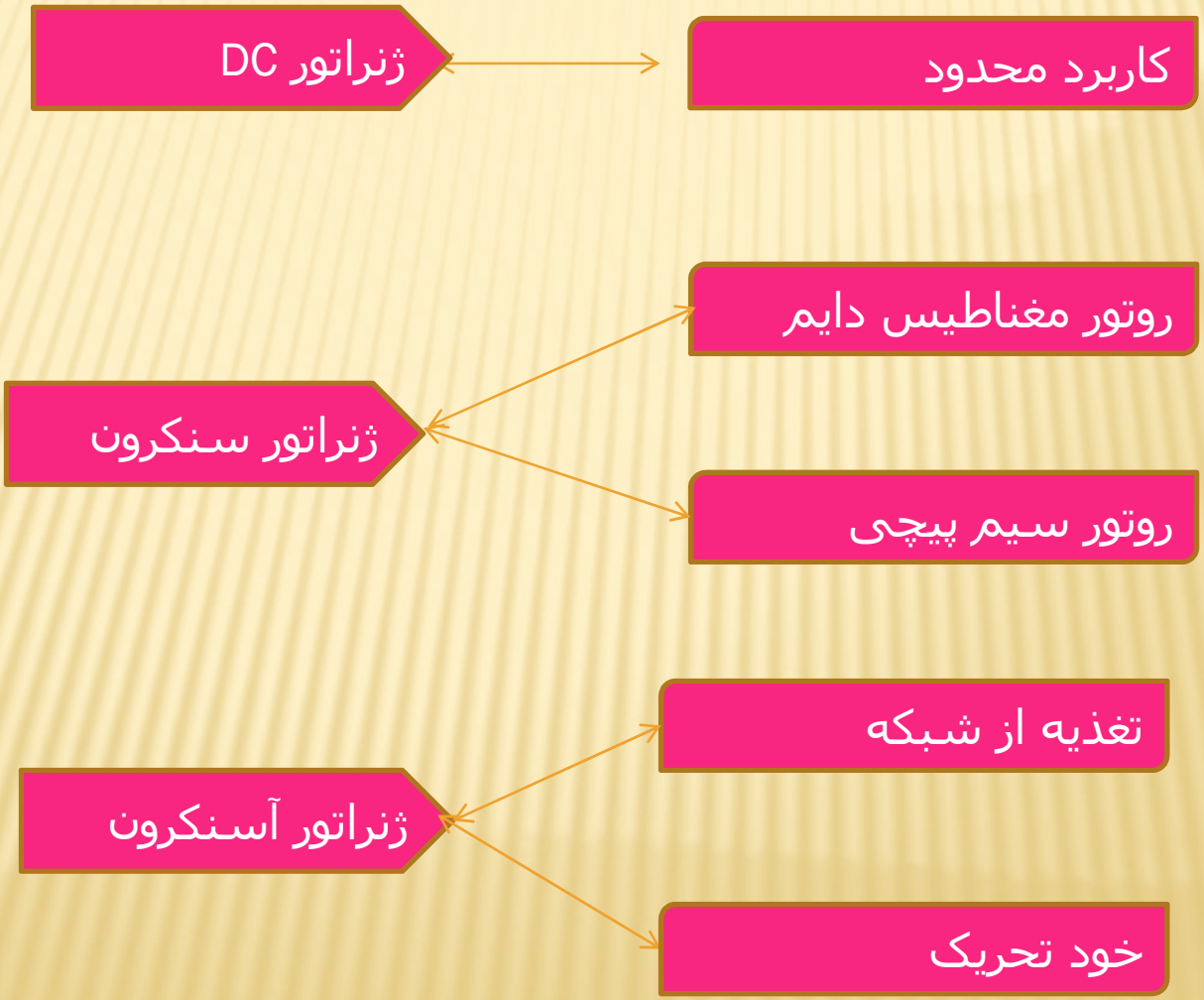
$$\text{Tip-Speed-Ratio (TSR)} = \frac{\text{Rotor tip speed}}{\text{Wind speed}} = \frac{\text{rpm} \times \pi D}{60\ v}$$

راندمان انواع توربینها

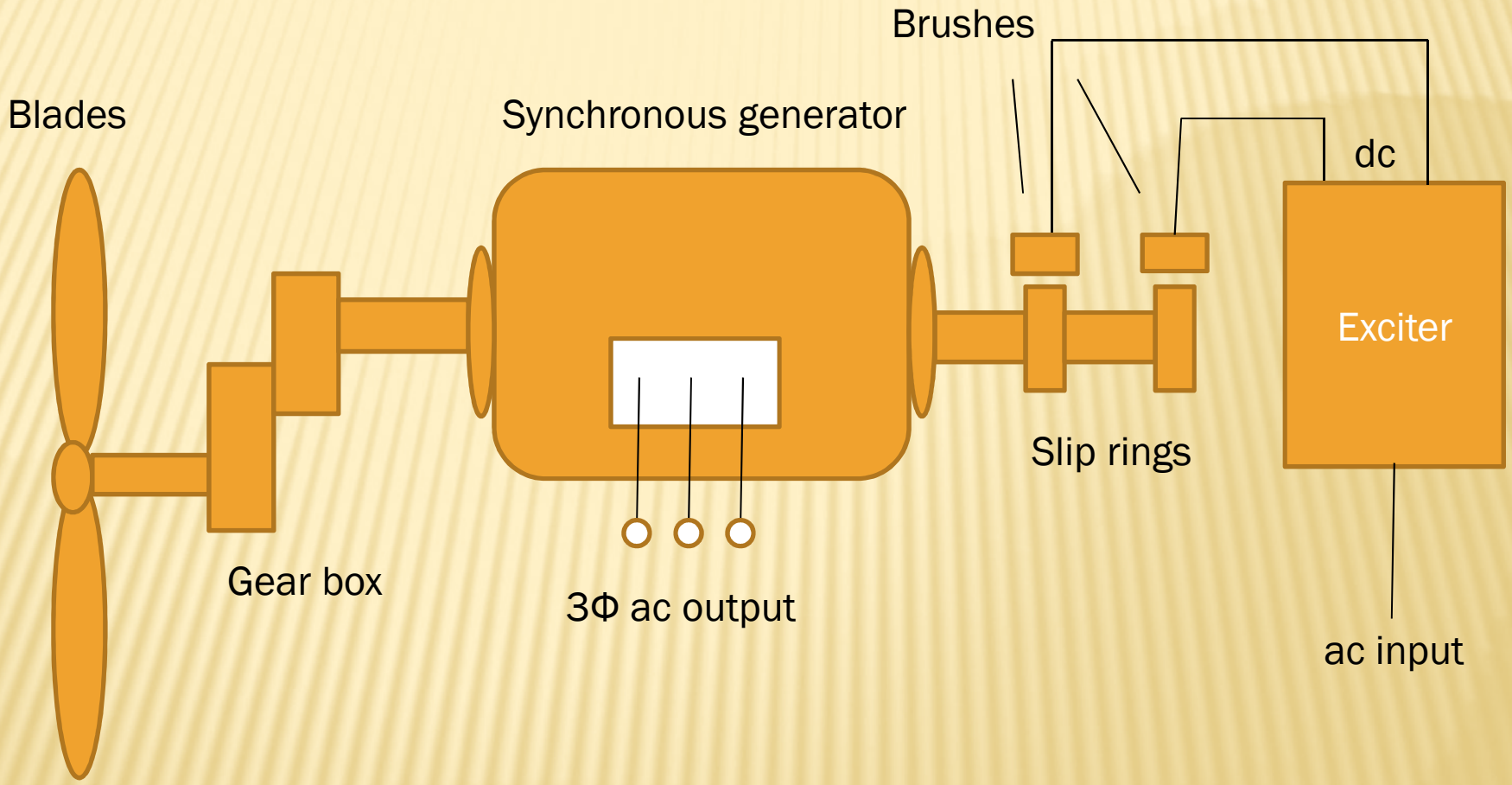


ژنراتور توربین های بادی

انواع ژنراتورهای توربین بادی



ژنراتور سنکرون با روتور تغذیه شونده با جریان مستقیم



ژنراتور القایی آسنکرون

مزیت اصلی ژنراتور آسنکرون

- عدم نیاز به اکسایتر
- عدم نیاز به جاروبک واسلیپ رینگ

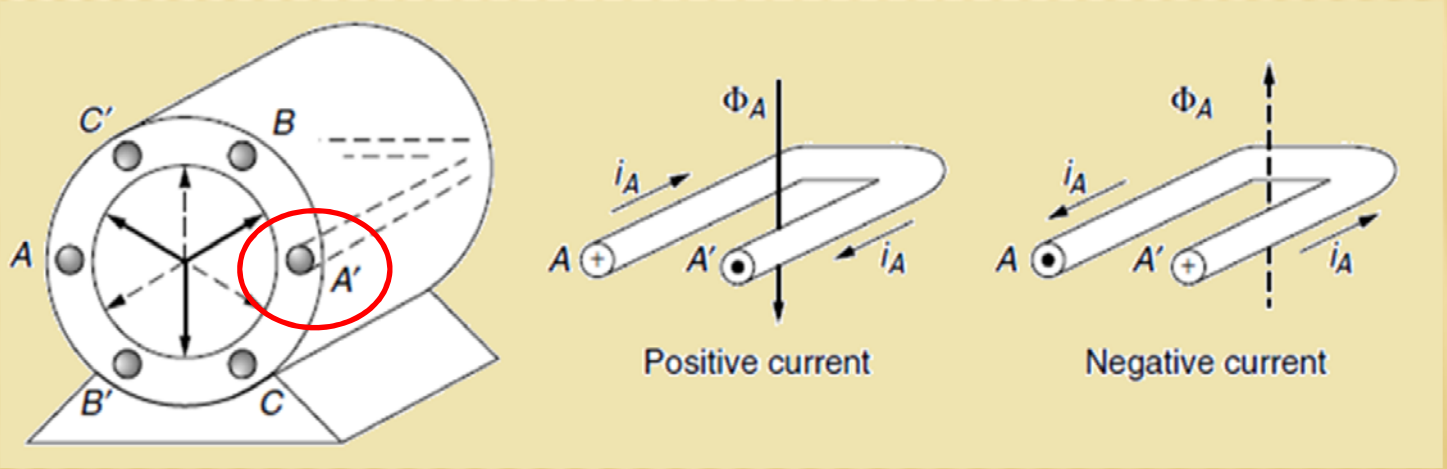
که نتیجتا ارزانتر و تعمیر و نگهداری آن ساده تر است.

مفهوم میدان مغناطیسی گردان

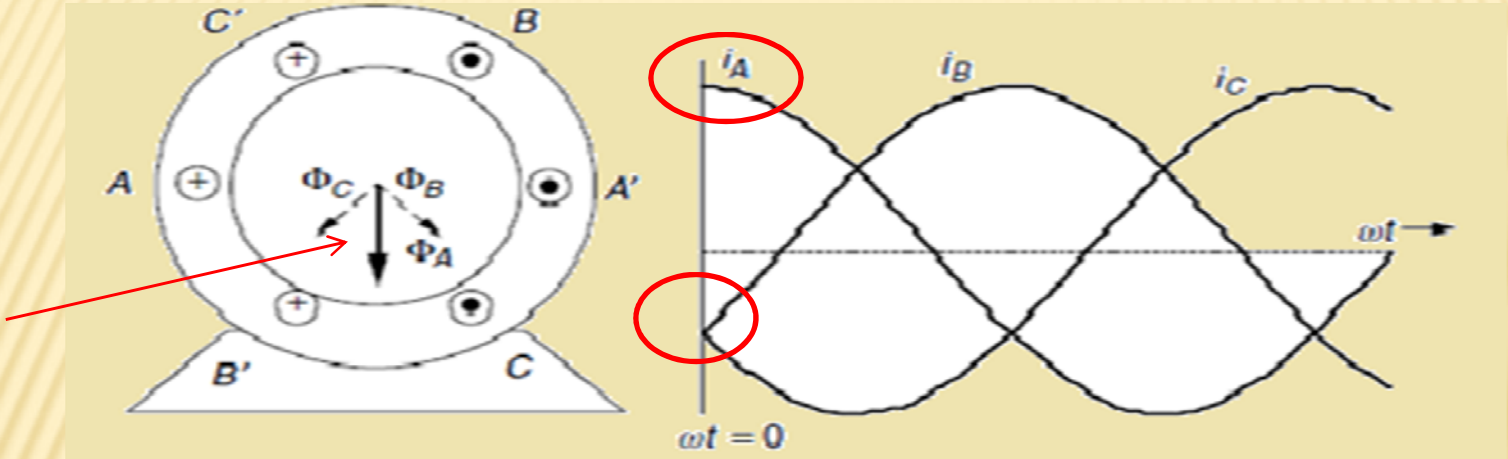
تشکیل میان گردان

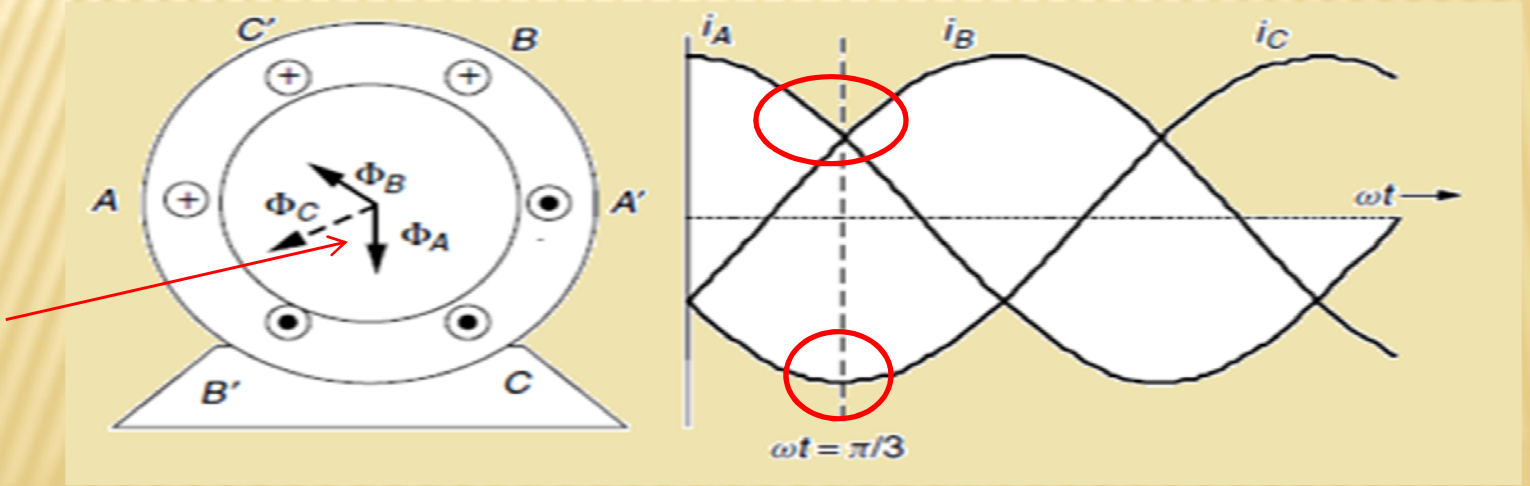
ایجاد شارگردان

عبور جریان متناوب از هادیهای استاتور

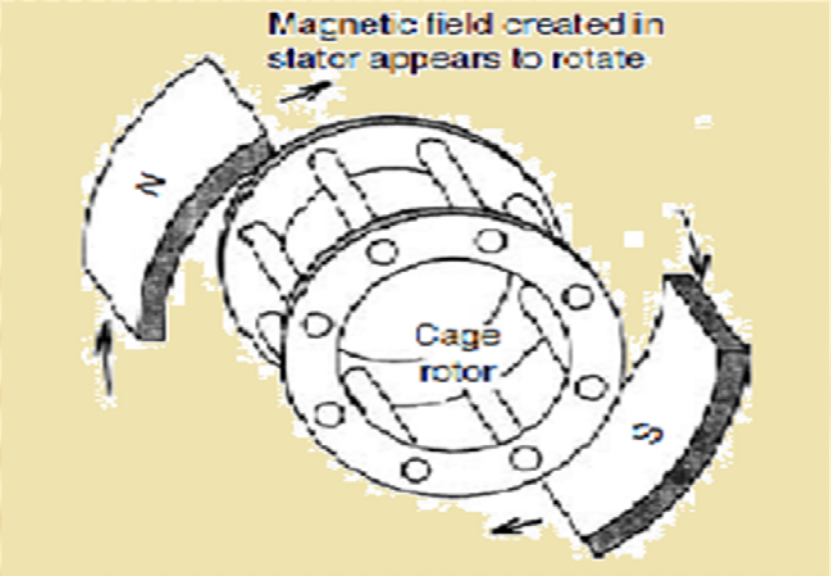


شار مغناطیسی ناشی از جریان ها

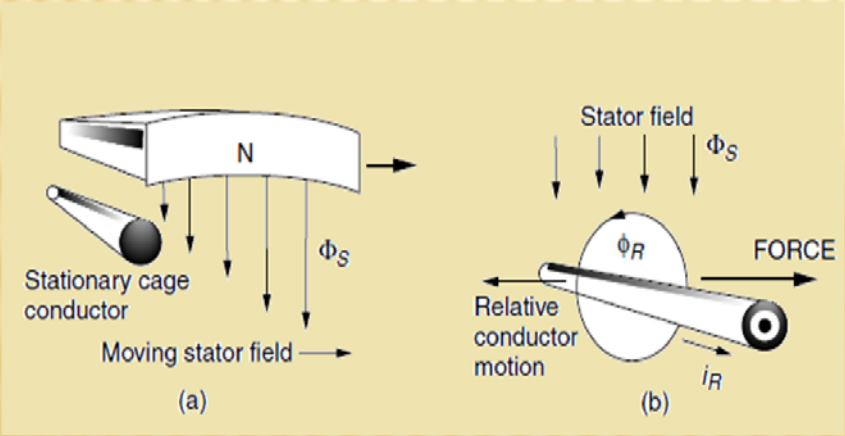




ساختار رتور قفس سنجابی



نحوه اثر میدان استاتور در رتور



نمایش قانون فاراده

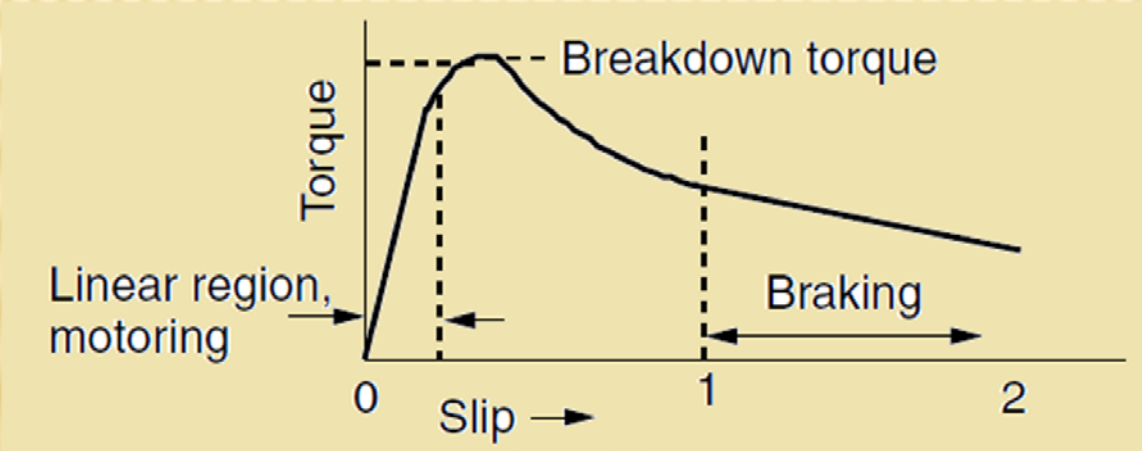
ماشین القایی به عنوان یک موتور

تشکیل میدان مغناطیسی گردان در استاتور

قطع توسط هادیهای روتور در حال گردش

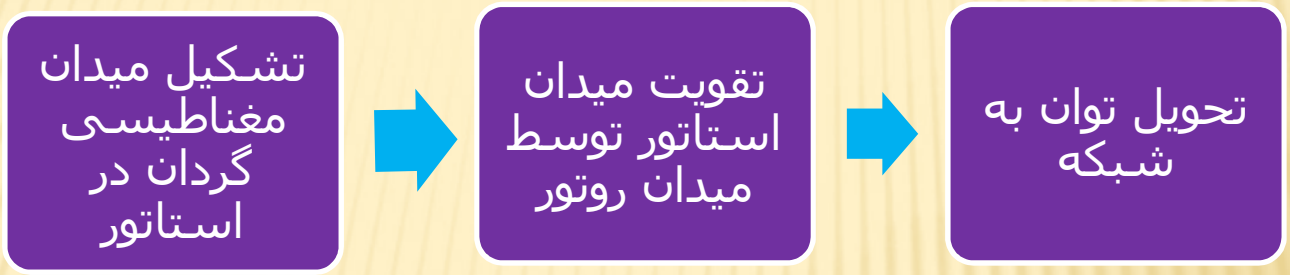
چرخش در جهت میدان استاتور

- لغزش ماشین



منحنی گشتاور-لغزش ماشین

ماشین القایی به عنوان ژنراتور

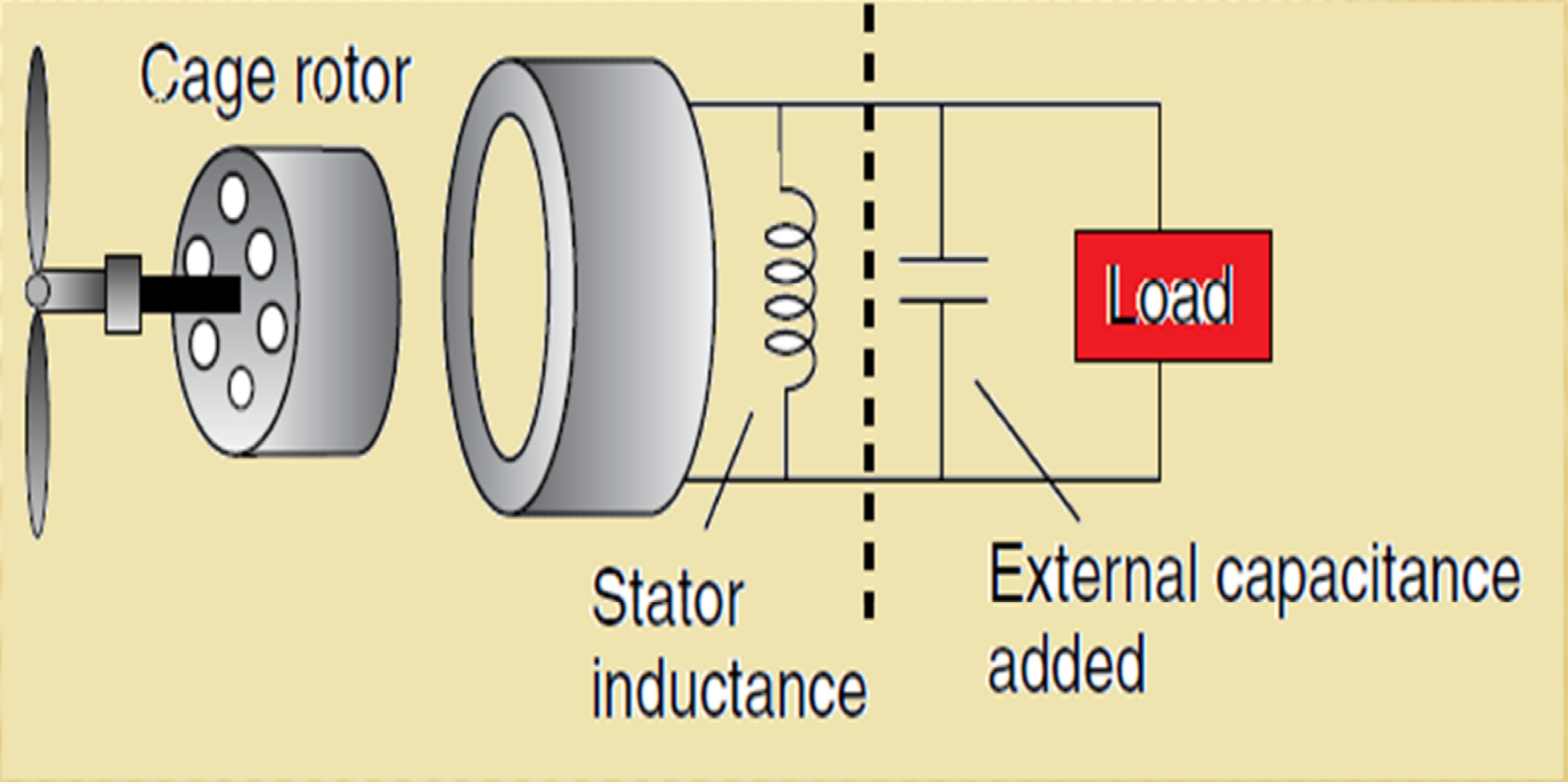


سرعت ژنراتور بیشتر از سرعت سنکرون است یعني لغزش ژنراتور منفي است

- تامین جریان مغناطیس شوندگی

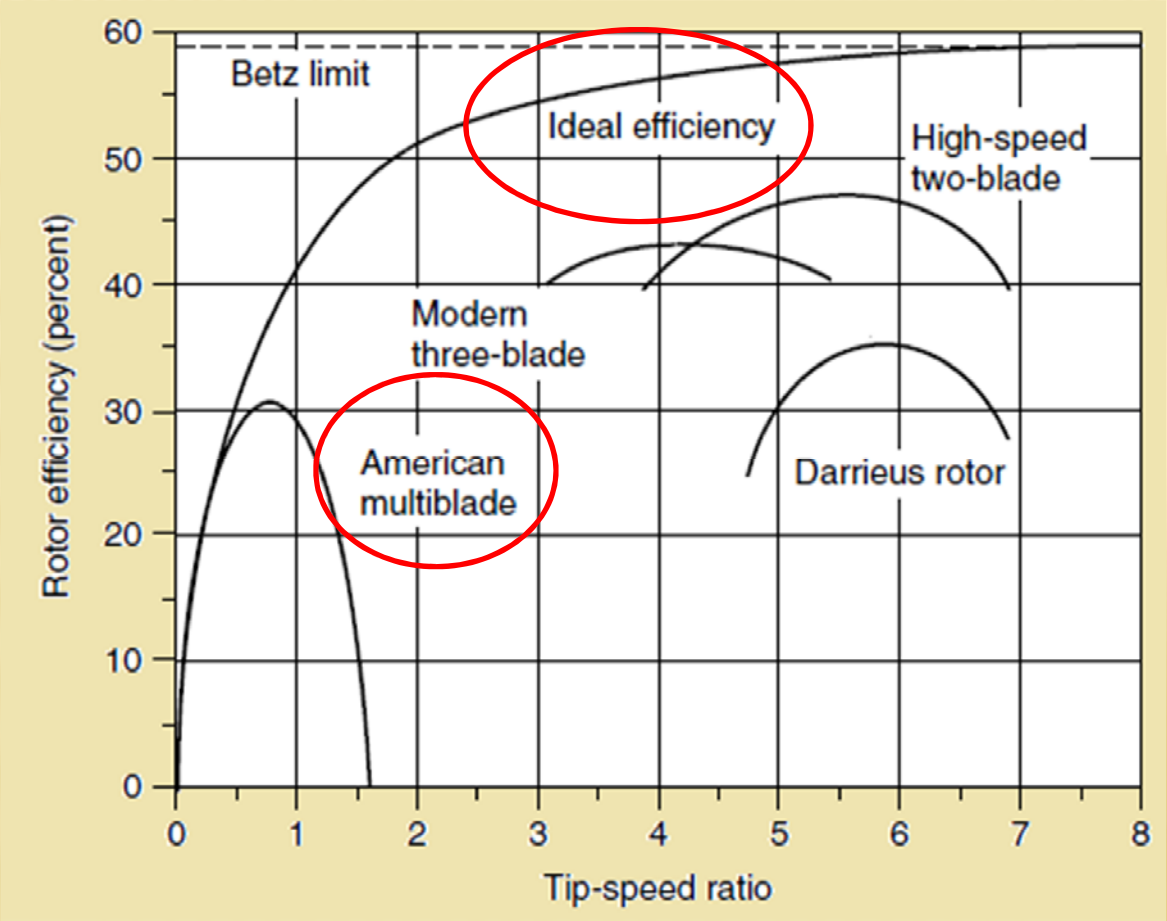
۱-توسط شبکه
۲-تحریک خودی

ژنراتور القایی خود تحریک



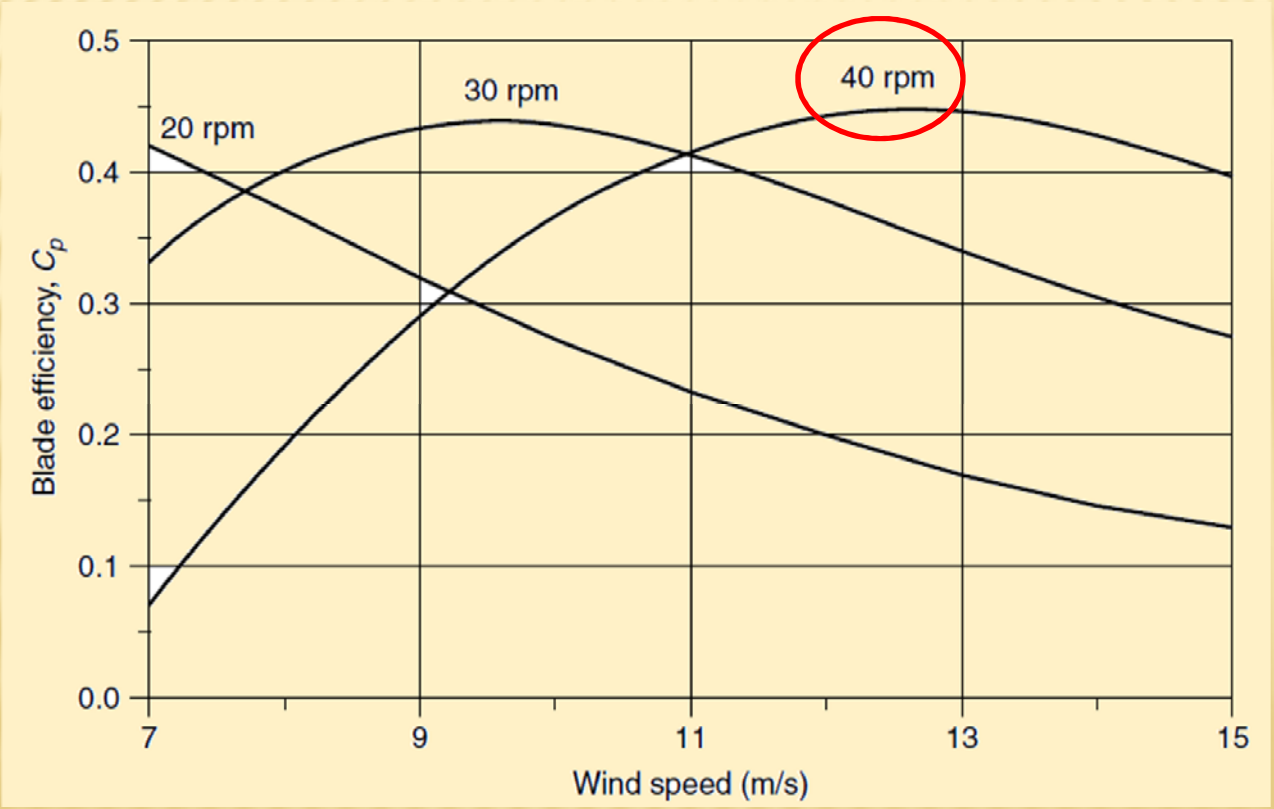
کنترل سرعت برای دریافت ماکزیمم توان

- اهمیت در نظر داشتن تغییرات سرعت روتور

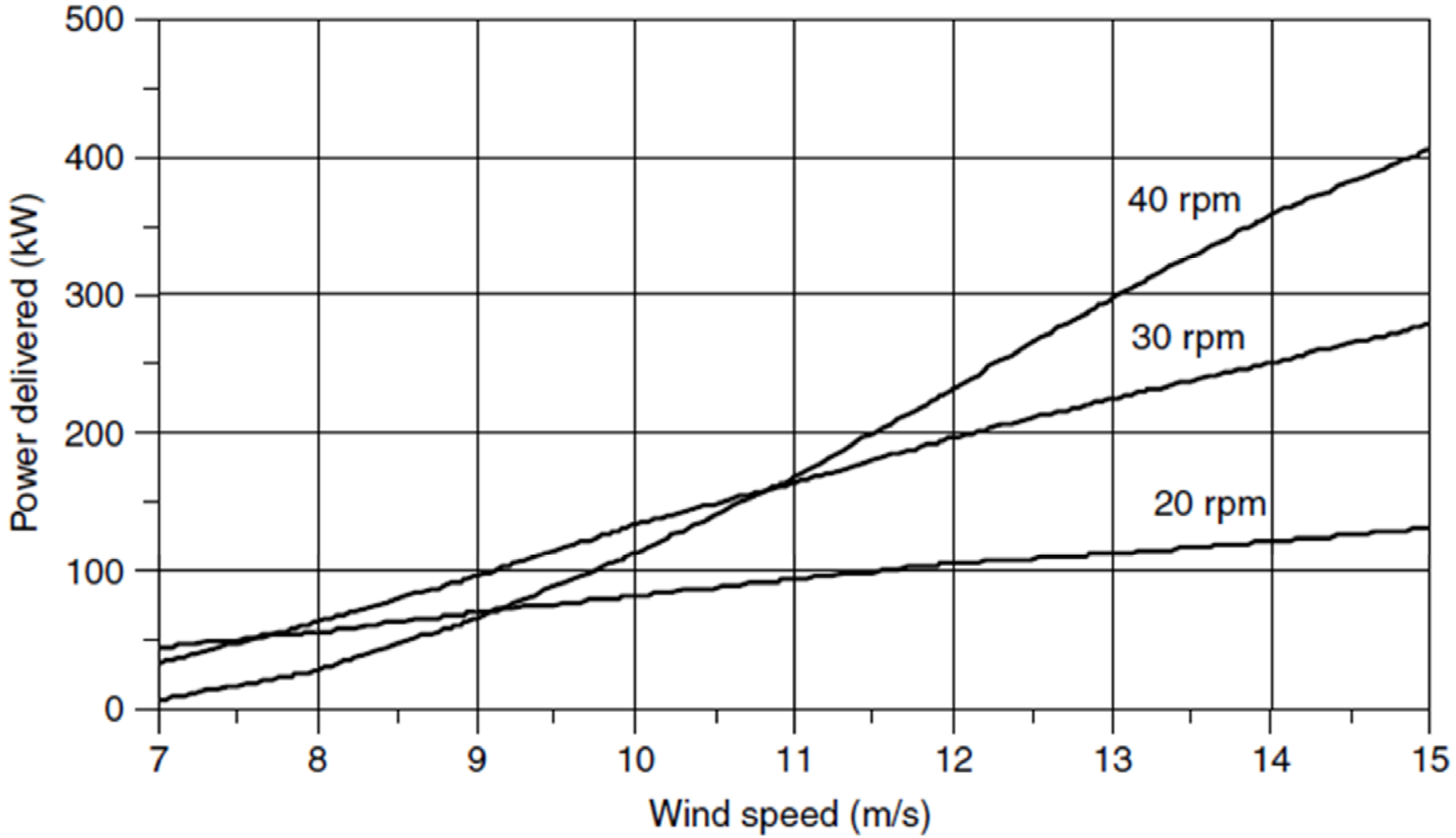


TIP-SPEED RATIO, TSR

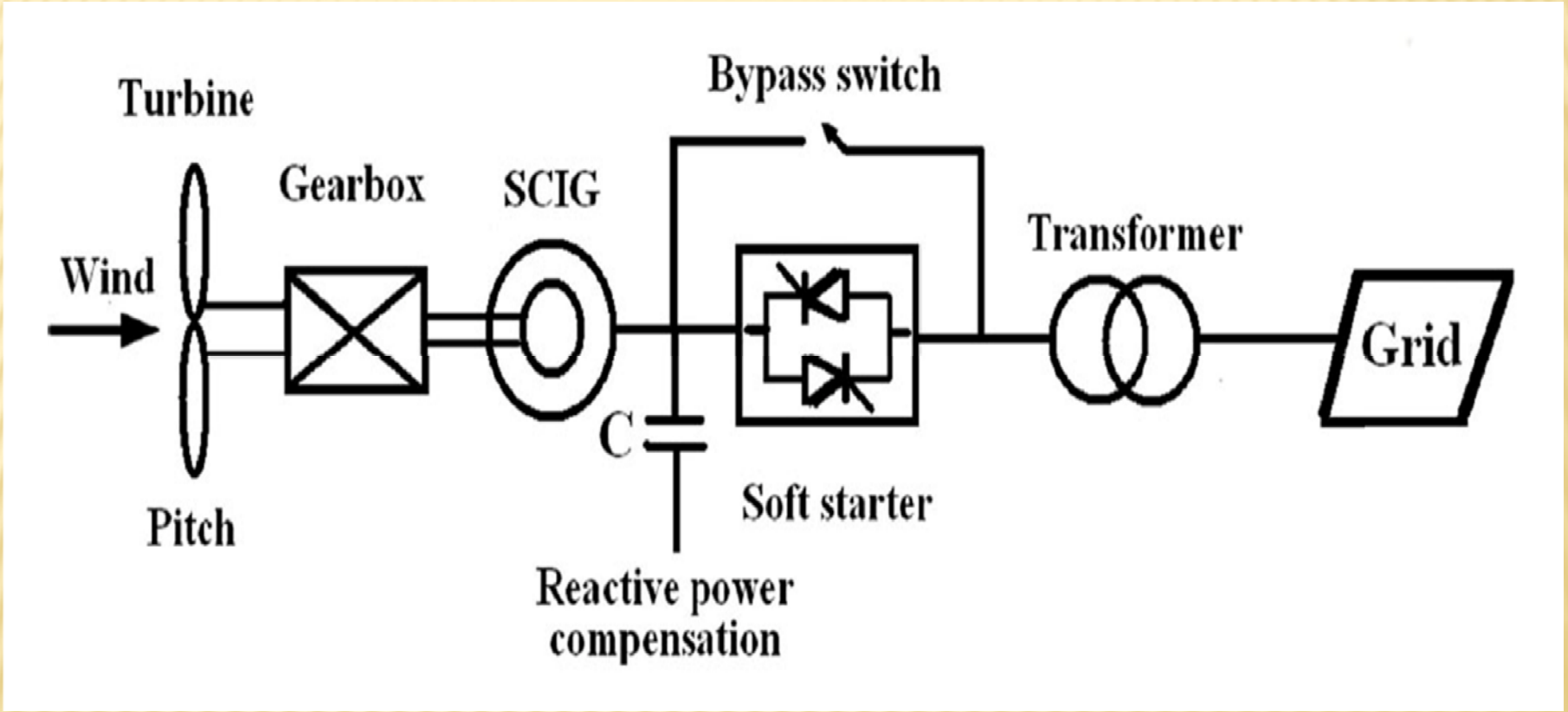
توربین های بادی مدرن دارای رنج TSR ۴-۶ می باشد



توان در سرعتهای مختلف



توربین بادی با ژنراتور القایی قفسه سنجابی

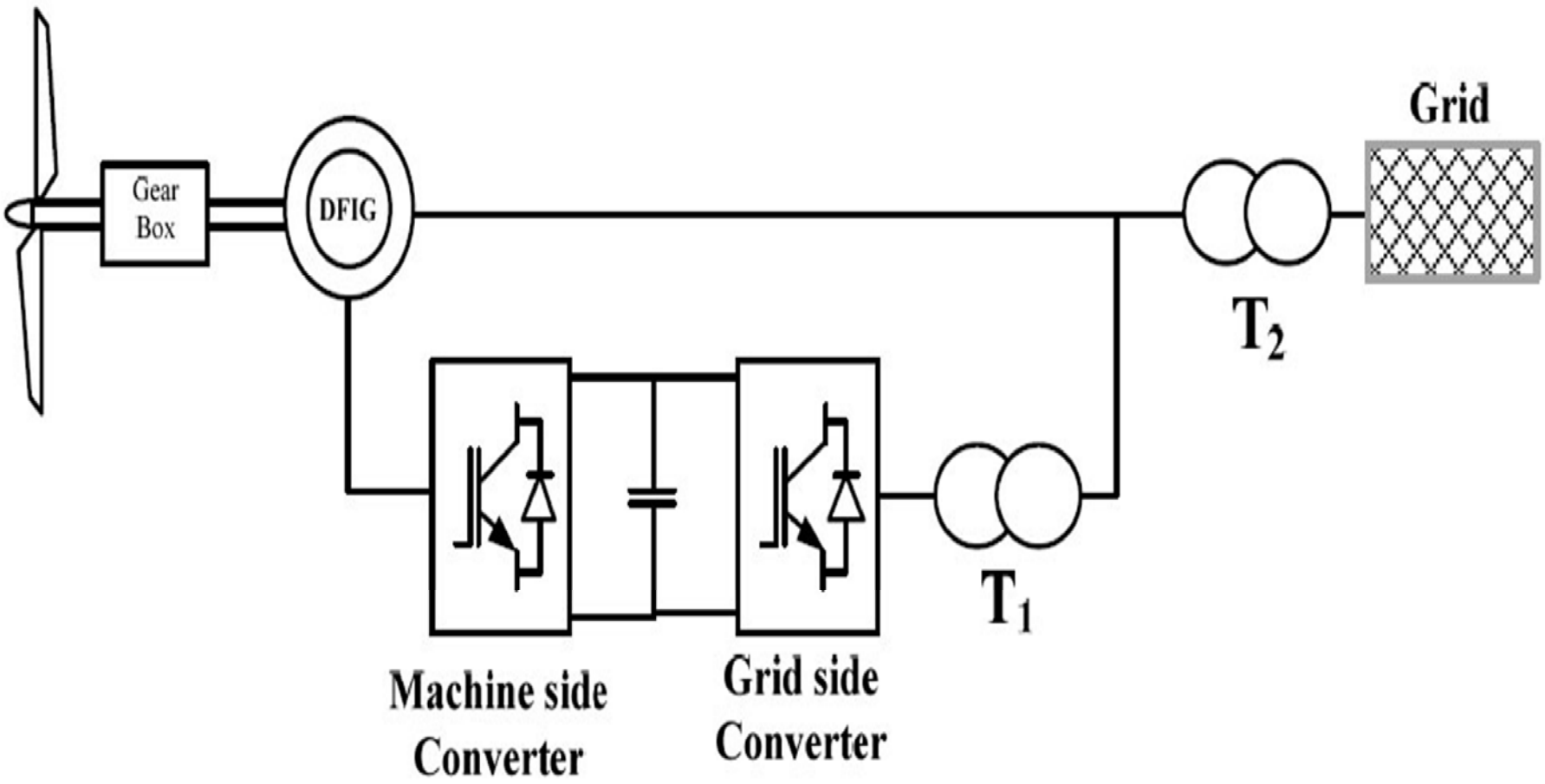


این توربین داراي سرعت ثابت (متناسب با فرکانس شبکه) است
عیب: عدم امکان ردیابي حداکثر توان و در نتیجه بازده کم
مزیت: سادگي

راههای تغییر سرعت در ژنراتورهای القایی

- ژنراتور القایی قطب متغیر
- استفاده از گیربکس های چنددنده
- ژنراتورهای لغزش متغیر با تغییر مقاومت روتور
- استفاده از ادوات الکترونیک قدرت برای تغیر مقاومت رتور (برش جریان روتور)

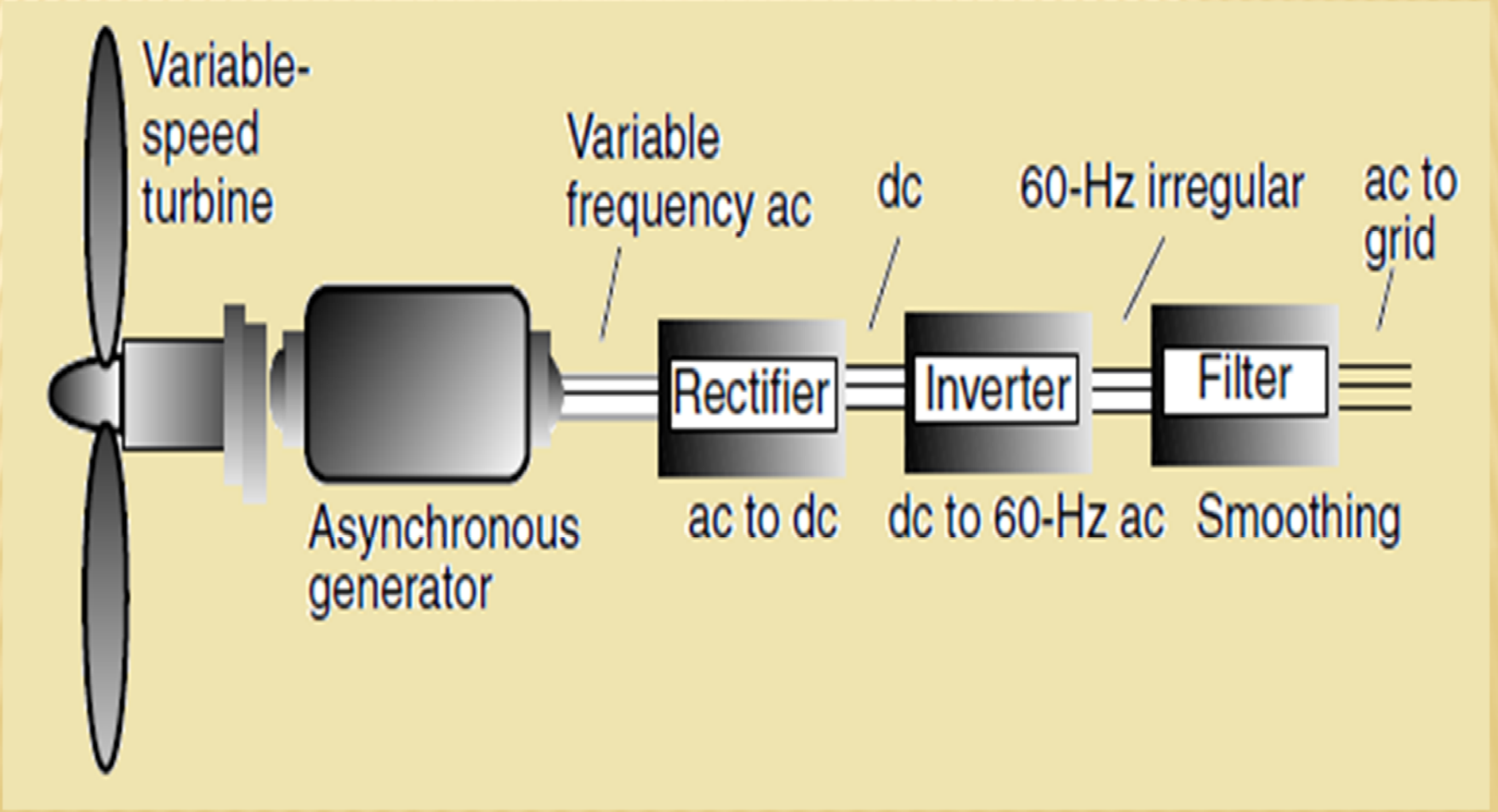
توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه DFIG



توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی دو سو تغذیه و مبدل کسری

توربین بادی به همراه مبدل کامل

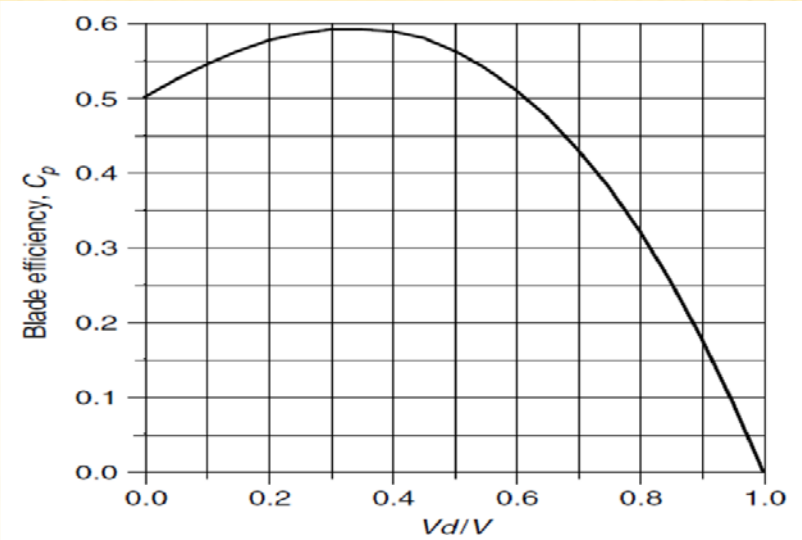
-ژنراتور میتواند القایی قفس سنجابی یا سنکرون آهنربای دائم باشد (حذف جاروبک)
- امکان حذف گیربکس



مقایسه ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی

ردیف	نوع ژنراتور	مزایا	معایب
۱	ژنراتور DC	ساده بودن کنترل	قیمت بالا ژنراتور و مبدل
۲	ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم	قیمت مناسب ، هزینه ی نگه داری کم	کنترل سخت ونیاز به مبدل اضافه برای کنترل
۳	ژنراتور سنکرون روتور سیم پیچی شده	کنترل آسان وعدم نیاز به مبدل	هزینه ی نگه داری بالا و عمل کرد نامناسب به دلیل متغیر بودن سرعت
۴	ژنراتور القایی قفس سنجابی	عدم نیاز به سیستم تحریک و قیمت مناسب و هزینه نگه داری کم	کنترل پذیری کم و نیاز به مبدل با ابعاد بزرگ
۵	ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده (DFIG)	کنترل پذیری فوق العاده بالا و اندازه ی کوچک مبدل	هزینه ی نگه داری بالا

ردیابی نقطه ی ماکزیمم توان MPPT



Mapping power technique

استفاده از منحنی های بازده بر حسب سرعت

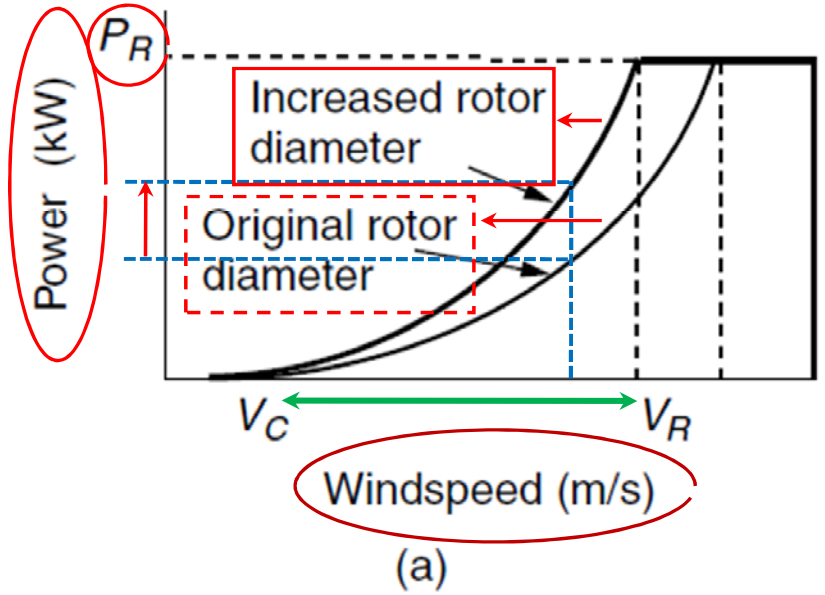
Hill climbing method

اندازه گیری تغییرات توان و تغییر مقدار سرعت تا رسیدن به قله منحنی

موضوع :

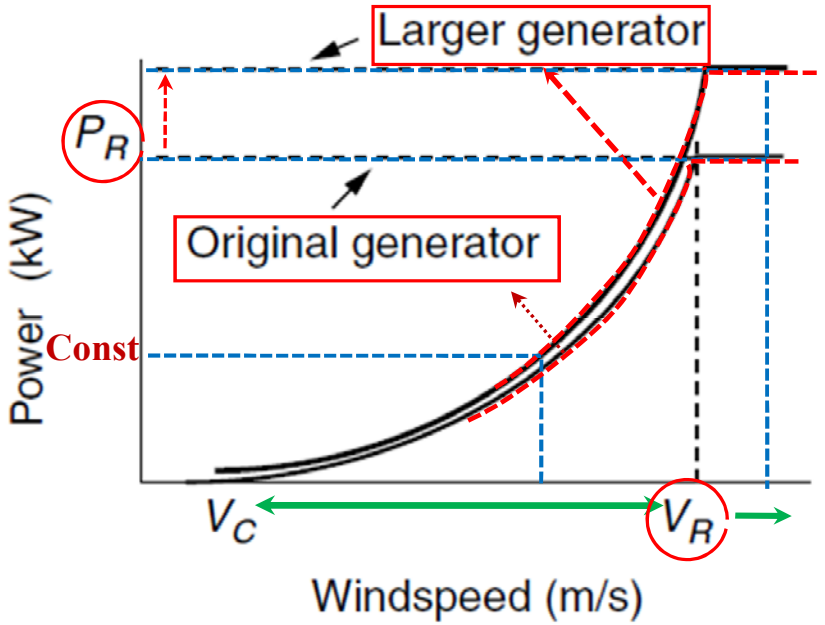
مطالعه رفتار باد

keeping the same generator



(a)

keeping the same rotor



(b)

نتایج منحنی بالا:

افزایش قطر روتور و ثابت نگه داشتن ژنراتور

شیفت پیدا کردن منحنی توان به بالا و دست یافتن به توان نامی بالاتر در سرعت باد پایین تر

استراتژی افزایش توان خروجی به ازای سرعت پایین بادها

افزایش سایز ژنراتور ثابت نگه داشتن روتور

گسترش منحنی توان و دست یافتن به توان نامی جدید بزرگتر

استراتژی افزایش توان نامی زنراتور در یک منطقه با سرعت های باد بالاتر

نتیجه
در مناطق با سرعت های باد نسبتاً کم
قطر روتور بزرگتر
درمناطق با سرعت های باد نسبتاً زیاد
افزایش مشخصه ژنراتور (rating)

تابع توزیع تجمعی سرعت باد:

$$\text{prob}(v \leq V) = F(V) = \int_0^V f(v)\, dv$$

F(v) تابع توزیع تجمعی

احتمال اینکه باد کمتر از سرعت باد مشخص V باشد

مشخصات تابع توزیع تجمعی

$$F(V) = \text{probability } v \le V, \qquad F(0) = 0, \qquad \text{and} \qquad F(\infty) = 1$$

احتمال اینکه سرعت باد V کمتر از سرعت مشخص V باشد:

حتمال اینکه سرعت باد V کمتر از صفر باشد، صفر است.

احتمال اینکه سرعت باد V کمتر از بی نهایت باشد، یک است.

مهمترین تابع چگالی احتمال (P.D.F) در زمینه انرژی باد

تابع Weibull

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right]$$

تابع توزیع تجمعی آن

$$F(V) = \text{prob}(v \le V) = \int_0^V \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] dv$$

تغییر متغیر

$$x = \left(\frac{v}{c}\right)^k \quad \text{so that} \quad dx = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} dv \quad \text{and} \quad F(V) = \int_0^x e^{-x} dx$$

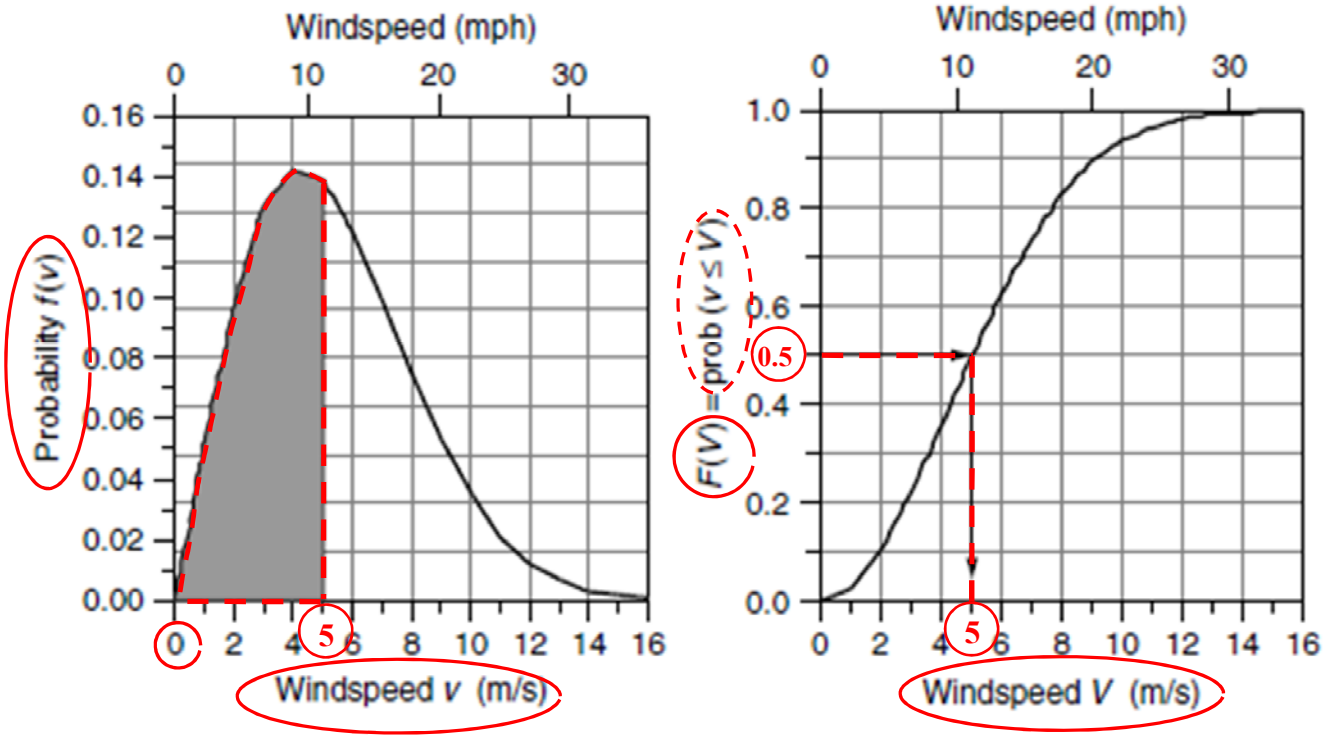
تابع توزیع تجمعی برای تابع احتمال Weibull

$$F(V) = \text{prob}(v \le V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]$$

برای نمونه خاص از آمار رایلی (Rayleigh statistics)، $k=2$ و $c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}}$:

$$F(V) = \text{prob}(v \le V) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{\bar{v}}\right)^2\right] \qquad \text{(Rayleigh)}$$

گراف تابع چگالی احتمال Weibull با k=2 و c=6



$$Prob(v \le 5) = \int_0^5 f(v)\,dv = F(5) = 0.5$$

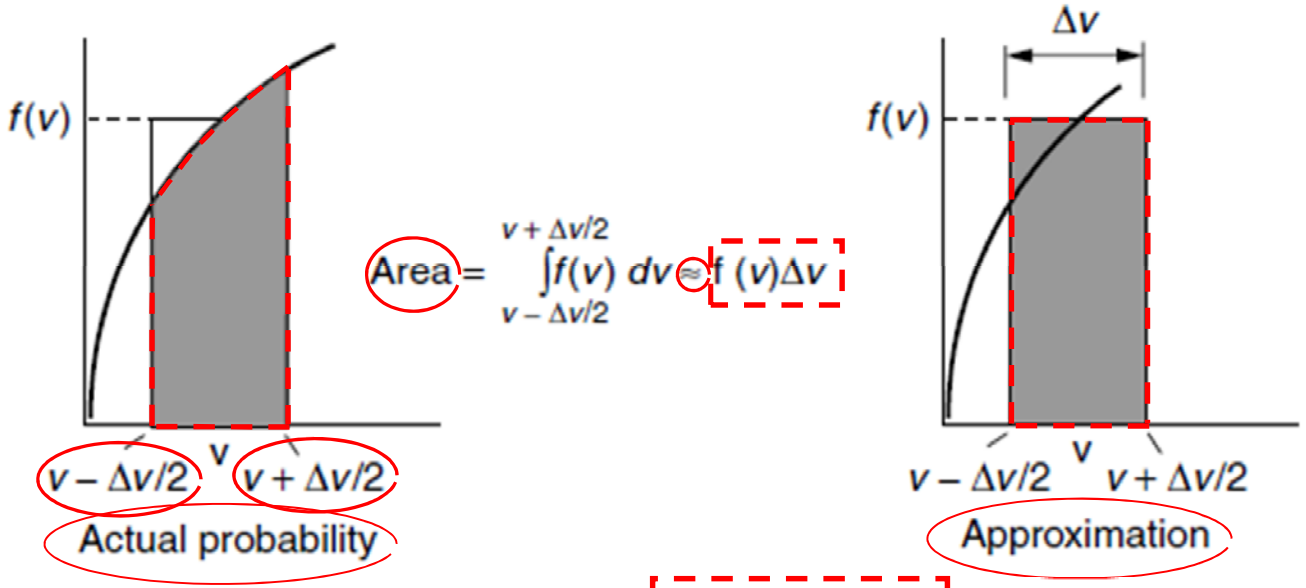
$$\bar{v} = c\sqrt{\pi}/2 = 6\sqrt{\pi}/2 = 5.32\ m/s$$

متوسط سرعت باد

سؤال: احتمال ای‌نکه باد در سرعت خاص v بورزد چقدر است؟

متخصص آمار : صفر !

سؤال تصحیح شده: احتمال ای‌نکه باد بین سرعت های $v+\Delta v/2$ و $v+\Delta v/2$ بورزد چقدر است؟



$$\text{prob}(v-\Delta v/2 \le V \le v+\Delta v/2) = \int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} f(v)\,dv \approx f(v)\Delta v$$

احتمال اینکه باد حوالی سرعت باد V با تلورانس ۰.۵ ، بورزد، تقریباً f(V) است.

$\Delta v=1$

با فرض $\Delta v/2=0.5$

بنابراین

احتمال اینکه باد در سرعت خاص v بورزد چقدر است؟

جواب: f(V)

Example

NEG Micon 60-m diameter wind turbine
rated power of 1000 kW
average windspeed is average windspeed

الف) محاسبه انرژی سالی‌انه تحوی‌لی ؟

محاسبه انرژی حاصل از تمامی سرعت باد ممکن

برای مثال انرژی حاصل درسرعت 6 m/s :

Manufacturer:		NEG Micon	NEG Micon	NEG Micon	Vestas	Whisper	Wind World	Nordex	Bonus
Rated Power (kW):		1000	1000	1500	600	0.9	250	1300	300
Diameter (m):		60	54	64	42	2.13	29.2	60	33.4
Avg. Windspeed									
v (m/s)	v(mph)	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0
1	2.2	0	0	0	0	0.00	0	0	0
2	4.5	0	0	0	0	0.00	0	0	0
3	6.7	0	0	0	0	0.03	0	0	4
4	8.9	33	10	9	0	0.08	0	25	15
5	11.2	86	51	63	22	0.17	12	78	32
6	13.4	150	104	159	65	0.25	33	150	52
7	15.7	248	186	285	120	0.35	60	234	87
8	17.9	385	291	438	188	0.45	92	381	129
9	20.1	535	412	615	268	0.62	124	557	172
10	22.4	670	529	812	356	0.78	153	752	212

احتمال ورزش باد با سرعت 6 m/s :

$$f(v) = \frac{\pi v}{2\bar{v}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right] = \frac{\pi \cdot 6}{2 \cdot 7^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{6}{7}\right)^2\right] = 0.10801$$

تعداد ساعت های‌ی که باد در طول ی‌کسال با سرعت 6 m/s می ورزد

$$\text{Hours @6 m/s} = 8760 \text{ h/yr} \times 0.10801 = 946 \text{ h/yr}$$

انرژی تولی‌دی توسط باد با سرعت 6 m/s :

$$\text{Energy (@6 m/s)} = 150 \text{ kW} \times 946 \text{ h/yr} = 141,929 \text{ kWh/yr}$$

Windspeed (m/s)	Power (kW)	Probability $f(v)$	Hrs/yr at v	Energy (kWh/yr)
0	0	0.000	0	0
1	0	0.032	276	0
2	0	0.060	527	0
3	0	0.083	729	0
4	33	0.099	869	28,683
5	86	0.107	941	80,885
6	150	0.108	946	141,929
7	248	0.102	896	222,271
8	385	0.092	805	310,076
9	535	0.079	690	369,126
10	670	0.065	565	378,785
23	863	0.000	1	1,158
24	840	0.000	1	554
25	822	0.000	0	257
26	0	0.000	0	0
			Total:	2,851,109

محاسبه انرژی تولی‌دی در دی‌گر سرعت ها به روش مشابه:

و در نهای‌ت محاسبه انرژی سالی‌انه

با تشکر از توجه شما