

نام درس: تولید و نیروگاه

بخش پنجم

نیروگاه های برق آبی

مدرس: دکتر علی کریمی



❖ مزایای نیروگاه های برق آبی:

- ✓ هیچگونه آلودگی زیست محیطی ندارد.
- ✓ راندمان بالا (۸۵ تا ۹۰ درصد)
- ✓ عمر مفید بیش از ۵۰ سال و تا ۱۰۰ سال
- ✓ هزینه بهره برداری بسیار کم بدلیل عدم مصرف سوخت
- ✓ زمان راه اندازی کم (در حد چند دقیقه) و پاسخ سریع به نوسان تقاضا
- ✓ پایداری بیشتر نسبت به نیروگاه های حرارتی
- ✓ عدم تغییر بازده با افزایش سن نیروگاه
- ✓ جلوگیری از سیلاب های فصلی
- ✓ ایجاد منبع مناسب جهت کشاورزی پشت سد و همچنین آب شرب
- ✓ ایجاد فضاهای تفریحی مناسب در اطراف نیروگاه

❖ معایب نیروگاه های برق آبی:

- ✓ هزینه های احداث سد (هزینه ثابت) بسیار بالا
- ✓ مشکل تولید در سال های کم آبی
- ✓ مدت زمان زیاد جهت ساخت
- ✓ زیر آب رفتن زمین های زیاد در اطراف سد
- ✓ قابلیت نصب در مکان های بسیار ویژه

❖ در حال حاضر **حدود ۱۵ درصد ظرفیت** نیروگاه های نصب شده از نوع برق آبی هستند که این نیروگاه ها در سال ۹۷، **حدود ۵/۱ درصد** انرژی کل شبکه را تامین کرده اند.

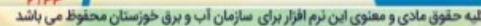
❖ ظرفیت بالقوه تولید انرژی برق آبی کشور حدود ۵۰ میلیارد کیلووات ساعت در سال برآورد شده است. این میزان انرژی تقریباً برابر ۲۴ درصد کل انرژی مورد نیاز در هر سال است (با توجه به آخرین آمار موجود، میزان کل مصرف انرژی برق در سال ۹۷ برابر ۲۵۹۷۲۴ گیگاوات ساعت بوده است).

❖ مهمترین حوضه های آبریز کشور عبارتند از:

- ✓ حوضه کارون با طول ۹۵۰ کیلومتر و متوسط دبی ۴۵۳ متر مکعب بر ثانیه شامل نیروگاه های شهید عباسپور (کارون ۱)، مسجد سلیمان، کارون ۳، کارون ۴ و گتوند
- ✓ حوضه دز با طول ۵۰۰ کیلومتر و متوسط دبی ۲۴۱ متر مکعب بر ثانیه شامل سد و نیروگاه دز (بر روی رودخانه دز) و سد رودبار (بر روی رودخانه رودبار)
- ✓ حوضه کرخه با طول ۹۰۰ کیلومتر و متوسط دبی ۱۷۷ متر مکعب بر ثانیه شامل سد کرخه، سد سیمره و سد سازبن

❖ بیشترین قدرت تولیدی مربوط به نیروگاه های شهید عباسپور، مسجد سلیمان، کارون ۳ و گتوند (هر کدام ۲۰۰۰ مگاوات) است. کل قدرت نصب شده در حدود ۱۰۲۶۲ مگاوات می باشد. البته، تعداد زیادی سد نیز در حوضه های کارون، دز، کرخه، سردشت، گرژال و مشمپا در دست مطالعه می باشد.

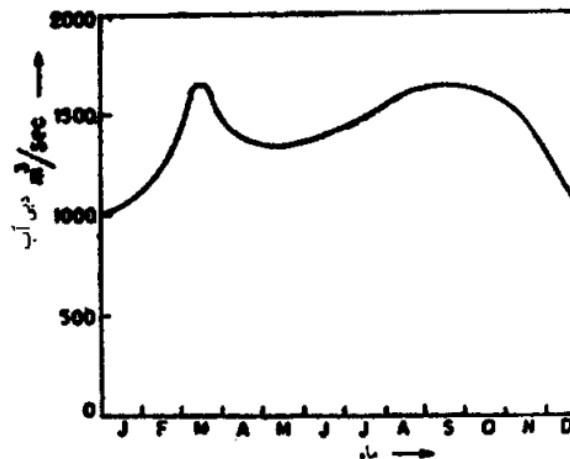
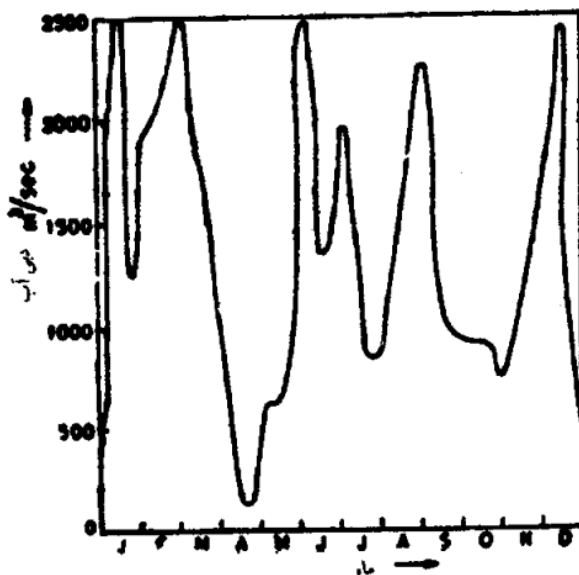
تاریخ: ۱۳۹۸/۰۱/۱۲ ساعت: ۱۴

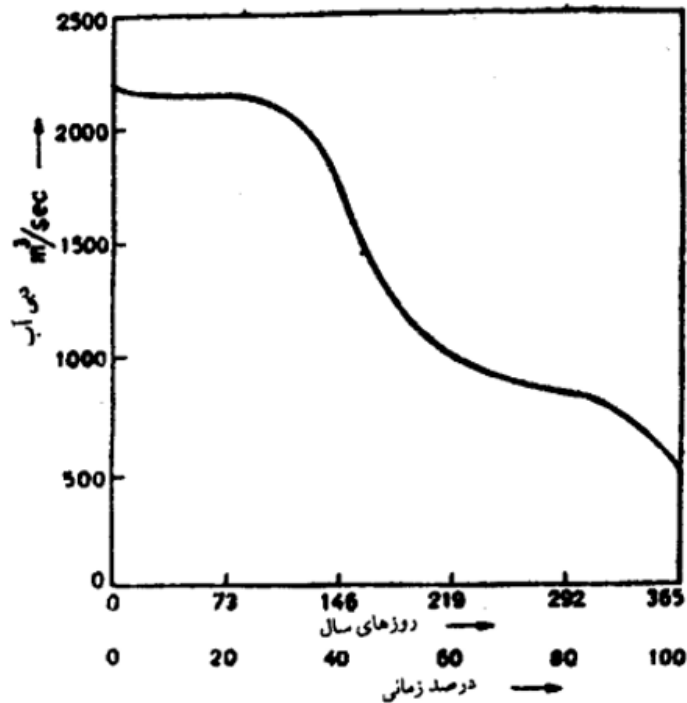


❖ یکی از مسایل مهم در طراحی نیروگاه برق آبی میزان دبی حجمی آب ورودی بر حسب مترمکعب بر ثانیه می باشد؛ که از روی آن می توان موارد زیر را تخمین زد:

- ✓ میزان متوسط انرژی قابل دسترس
- ✓ حداقل انرژی سالیانه قابل دسترس (ظرفیت همیشگی)
- ✓ ظرفیت مخزن آب
- ✓ میزان حداقل آب خروجی روزانه بدون ذخیره سازی
- ✓ ظرفیت مخزن کنترل سیلاب

❖ بررسی شرایط حداقل و حداکثر آب در طی یک دوره بلندمدت مثلا ۲۰ ساله انجام می شود (Hydrograph). این منحنی ها را میتوان در دوره های مختلف نمایش داد:





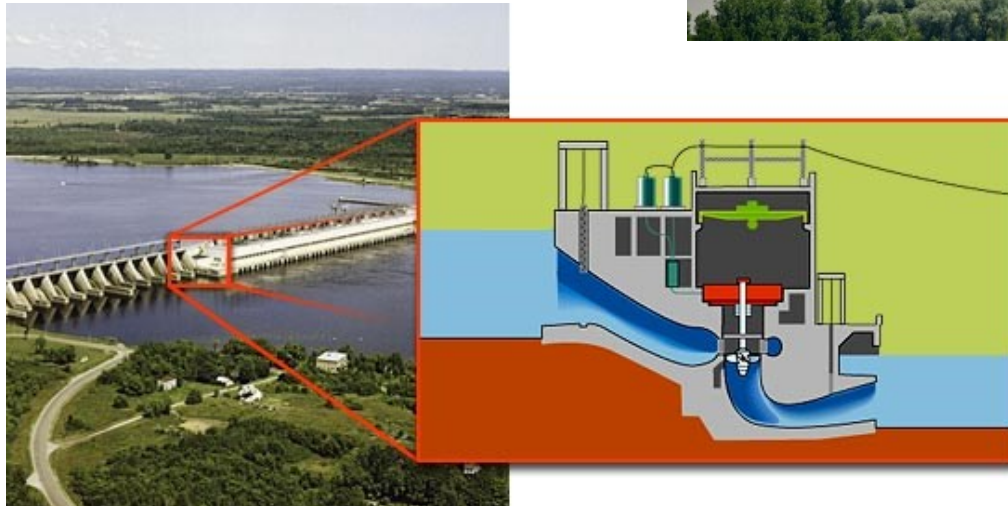
❖ در طراحی نیروگاه از منحنی مرتب شده دبی حجمی استفاده می شود (همانند منحنی LDC بار شبکه برق):
✓ به طور معمول، دوره زمانی یک سال در نظر گرفته می شود.

❖ انتخاب مکان مناسب برای نیروگاه های آبی:

- ✓ دسترسی به آب
- ✓ ذخیره ی آب
- ✓ ارتفاع آب در پشت سد احداث شده
- ✓ بررسی های زمین شناسی
- ✓ میزان آلودگی آب
- ✓ میزان رسوب گذاری رودخانه
- ✓ تاثیرات زیست محیطی
- ✓ دسترسی جاده ای

(۱) دسته بندی بر اساس دبی آب رودخانه:

۱-۱) نیروگاه های بر روی رودخانه های بدون ذخیره سازی آب (run of river): هیچ کنترلی بر روی جریان آب وجود ندارد از اینرو هنگامیکه مقدار آب زیاد است یا بار متصل به آن کم است آب تلف می شود.





۱) دسته بندی بر اساس دبی آب رودخانه:

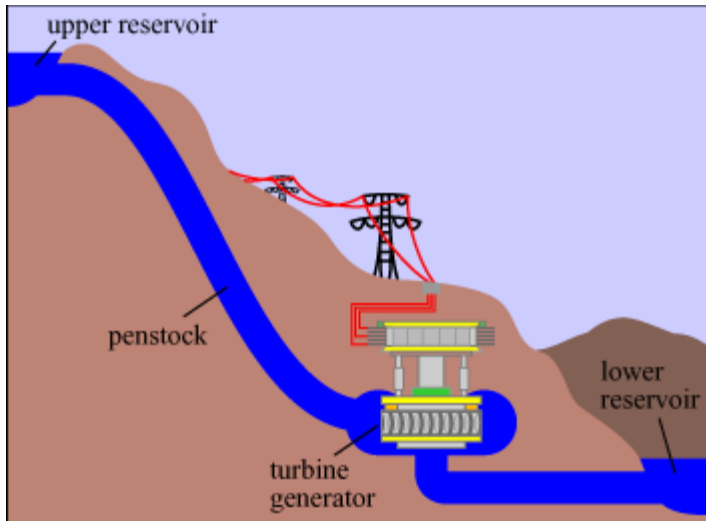
۱-۲) نیروگاه های بر روی رودخانه های با ذخیره سازی آب: با جمع آوری آب در بالادست موجب افزایش تولید در بازه های زمانی کوتاه (مدیریت کوتاه مدت در جهت تامین تقاضا)



۱-۳) نیروگاه مخزنی (hydraulic power plant): به علت حجم زیاد مخزن امکان ذخیره آب در فصل پرباران برای فصول خشک (اکثر نیروگاه های آبی از این نوع هستند)

(۱) دسته بندی بر اساس دبی آب رودخانه:

۱-۴) نیروگاه تلمبه ذخیره ای (pumped storage): دارای دو مخزن بالایی و پایینی است. در شرایطی که بار شبکه زیاد است، آب از سد بالایی به پایینی حرکت می کند و تولید انرژی صورت می گیرد. در شرایط کم باری شبکه آب از مخزن پایینی به بالایی پمپ می شود.



❖ مزایای نیروگاه تلمبه ذخیره ای:

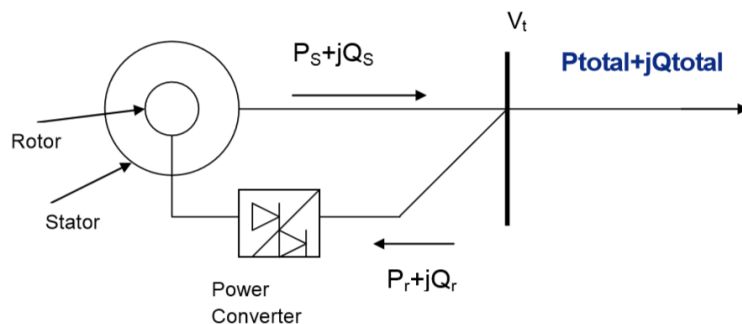
- ✓ تولید انرژی الکتریکی در زمان بار پیک
- ✓ راه اندازی سریع
- ✓ افزایش ظرفیت چرخان (Spinning Reserve)
- ✓ تنظیم فرکانس در مواقع تغییرات ناگهانی بار
- ✓ یکنواخت کردن منحنی بار شبکه

❖ این نیروگاه ها در دو طرح ساخته می شوند:

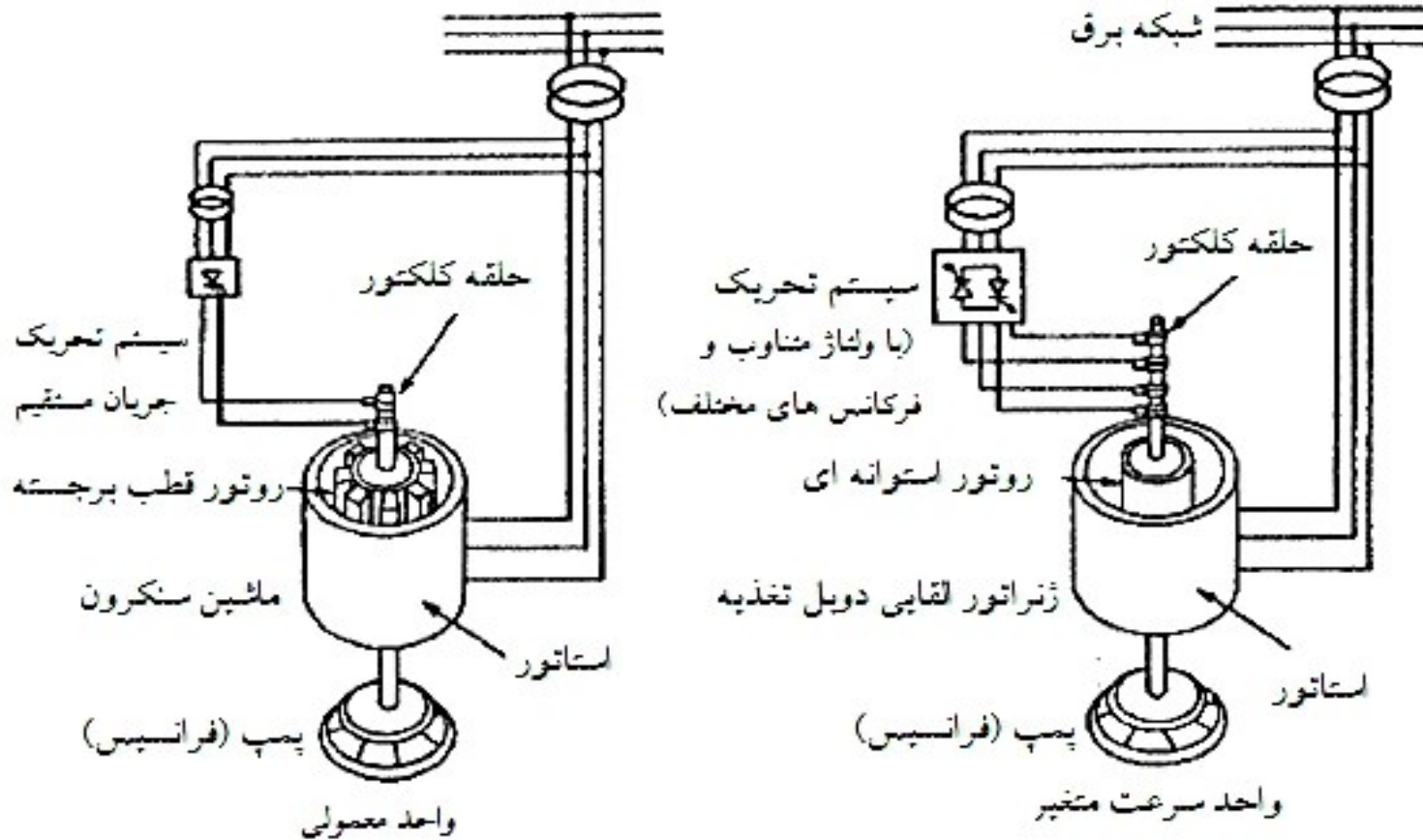
- ✓ ساختار مجزای توربین و موتور پمپ؛ محورهای توربین و پمپ با هم به یک ماشین سنکرون متصل هستند که این ماشین می تواند هم به صورت موتوری و هم به صورت ژنراتوری کار کند.
- ✓ توربین و موتور دارای یک ساختار (توربو پمپ)

❖ تقسیم بندی دیگر برای نیروگاه های تلمبه-ذخیره ای:

- ✓ واحدهای سرعت ثابت (دارای ماشین سنکرون، همانند نیروگاه های آبی معمولی)
- ✓ واحدهای سرعت متغیر (دارای ماشین های القایی دوسو تغذیه یا Doubly-Fed Induction Machines):



مقایسه واحدهای تلمبه-ذخیره‌ای سرعت ثابت (سمت چپ) و سرعت متغیر (سمت راست):

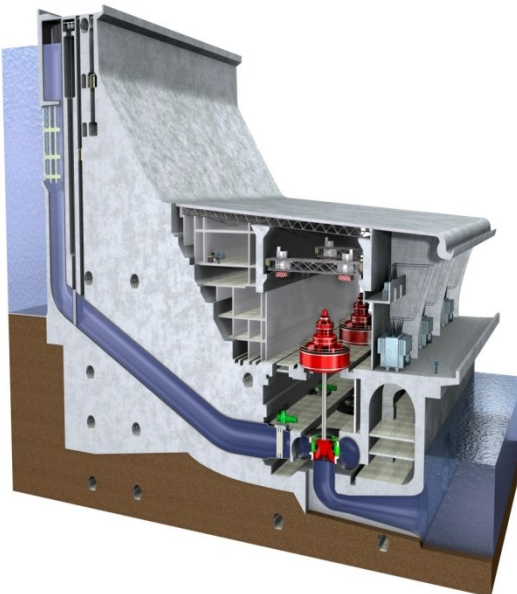


۲) دسته بندی بر اساس ارتفاع ریزش آب

۱-۲) نیروگاه های با ارتفاع کم: نیروگاه های با ارتفاع کمتر از ۳۰ متر (ارتفاع مابین سطح آب پشت سد و سطح آب خروجی از توربین) از این نوعند که معمولاً در مسیر رودخانه و بدون مخزن هستند. توربین های این نیروگاه ها از نوع کاپلان و یا فرانسیس جریان مختلط هستند.

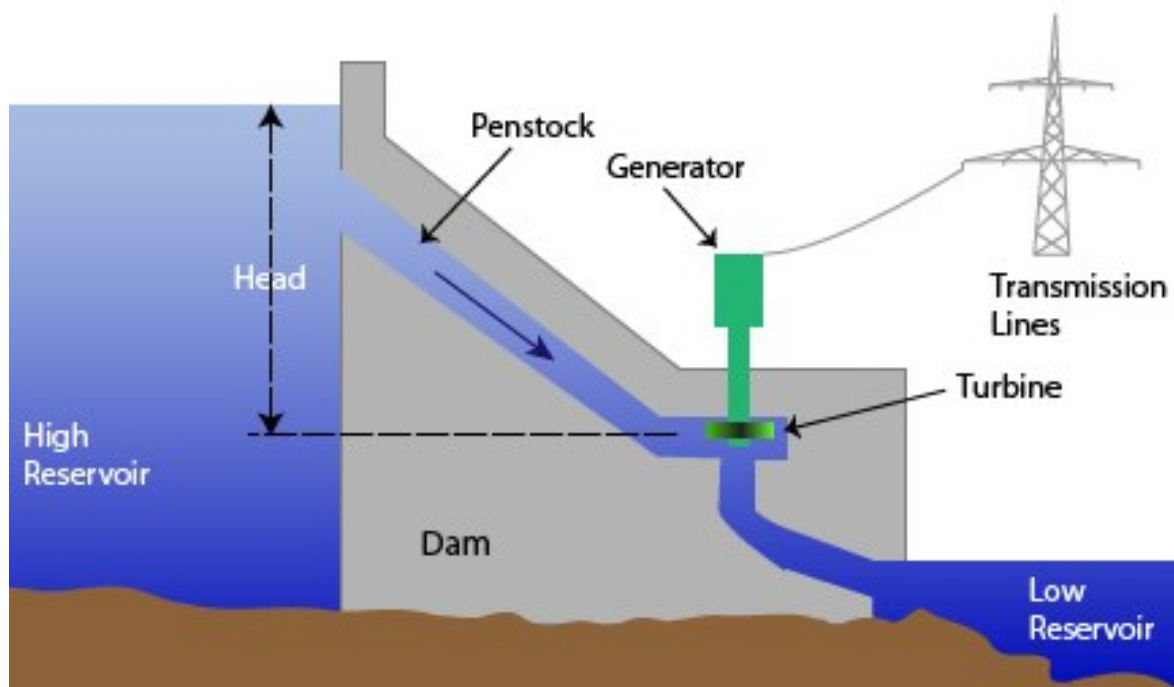


۲-۲) نیروگاه های با ارتفاع متوسط: نیروگاه های با ارتفاع بین ۳۰ تا ۳۰۰ متر (توربین های این نیروگاه ها از نوع کاپلان و یا فرانسیس جریان شعاعی هستند).



۲) دسته بندی بر اساس ارتفاع ریزش آب

۲-۳) نیروگاه های با ارتفاع زیاد: نیروگاه های با ارتفاع بیشتر از ۳۰۰ متر (توربین های این نیروگاه ها بیشتر از نوع پلتون هستند)



توربین های آبی در دو نوع کلی **عکس العملی** (سرعت و فشار آب در برخورد با پره ها کم می شود) و **ضربه ای** (در برخورد با پره ها، سرعت کم و فشار ثابت می ماند) ساخته می شوند.

(۱) توربین پلتون (Pelton Turbine)

✓ در سدهای با ارتفاع ریزش آب زیاد (بیش از ۲۰۰ متر) و جریان آب کم

✓ نصب بصورت افقی

✓ نوع ضربه ای: تمام فشار آب از طریق یک یا چند نازل موازی تبدیل به سرعت می شود.

✓ آب از طریق انژکتور و والو سوزنی داخل آن، به سمت قاشقک توربین پرمه های چرخنده

(حکم پره های متحرک را دارد) هدایت می شود

✓ با تغییر موقعیت والو سوزنی، دبی آب ورودی به قاشقک ها تنظیم می شود

(توسط سیستم گاورنر نیروگاه)

✓ در صورتی که آب خروجی در هر لحظه به چند قاشقک برخورد کند،

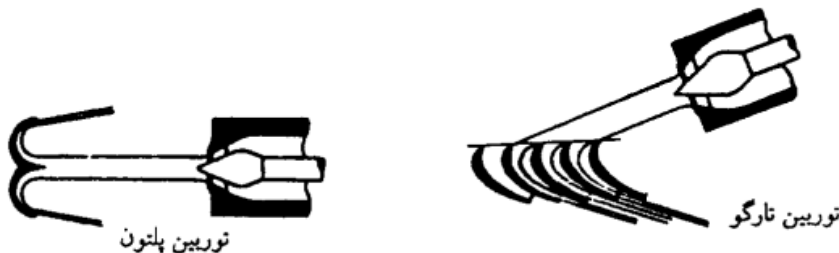
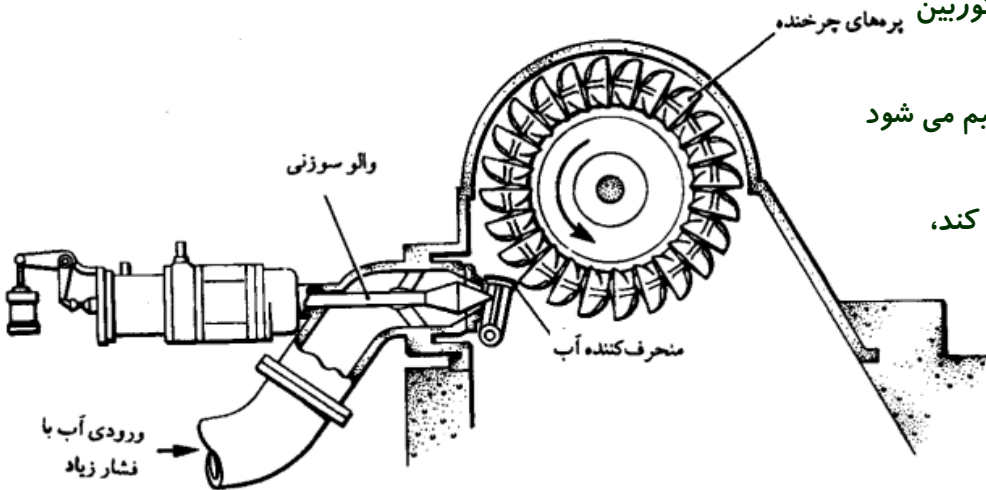
توربین تارگو (Turgo) نامیده می شود.

✓ وظیفه منحرّف کننده (Deflector): در هنگام کاهش سریع

بار نیروگاه در مقابل آب خروجی از انژکتور قرار می گیرد

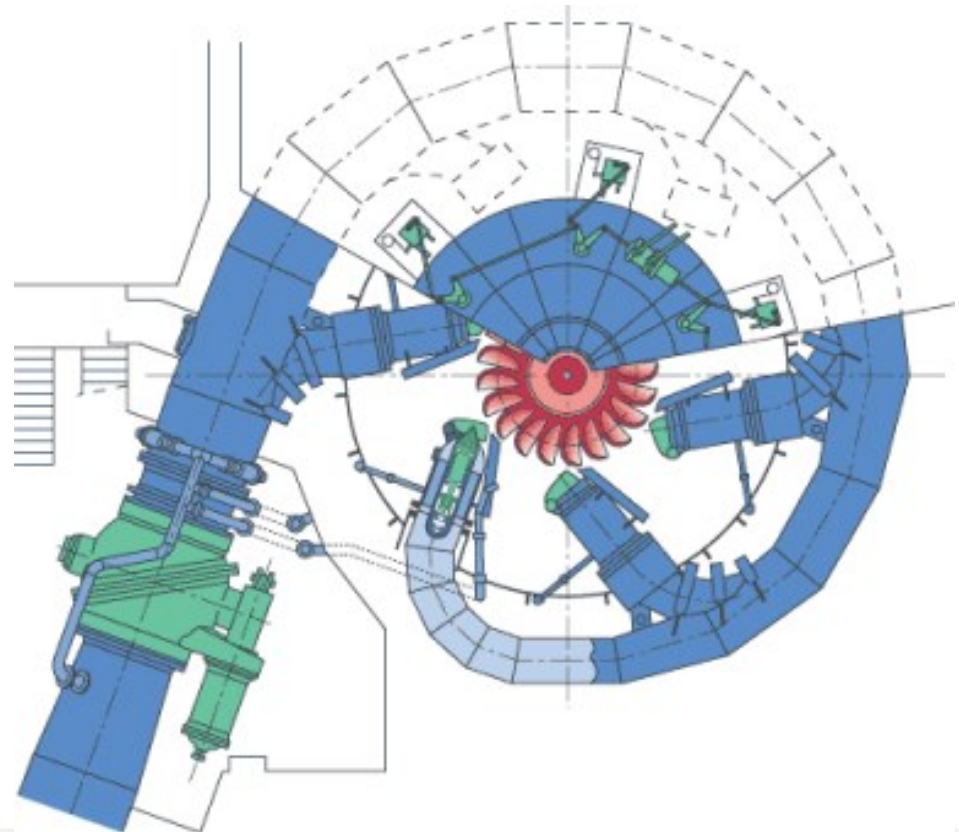
و سپس با حرکت آرام والو سوزنی و تنظیم دبی آب به جای

خود باز می گردد.



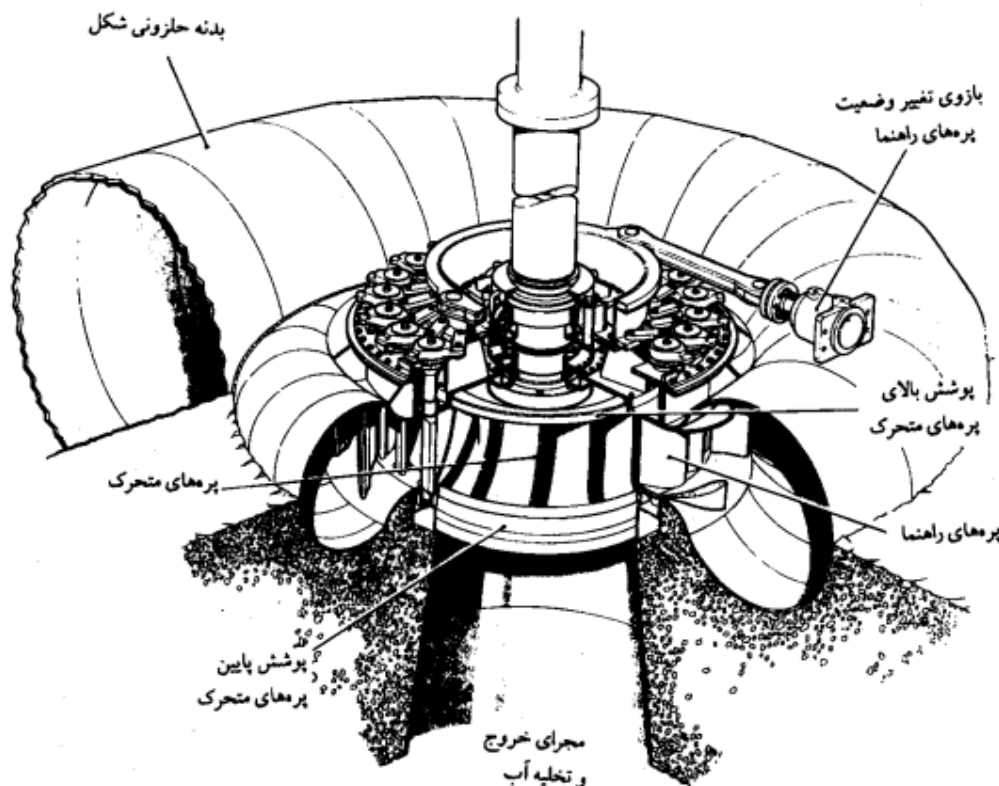
(۱) توربین پلتون (Pelton Turbine)

- ✓ به طور معمول، سرعت چرخش پره ها به سرعت آب پاششی بین 0.46 تا 0.47 است.
- ✓ بازده این توربین ها حدود ۹۳ درصد است.

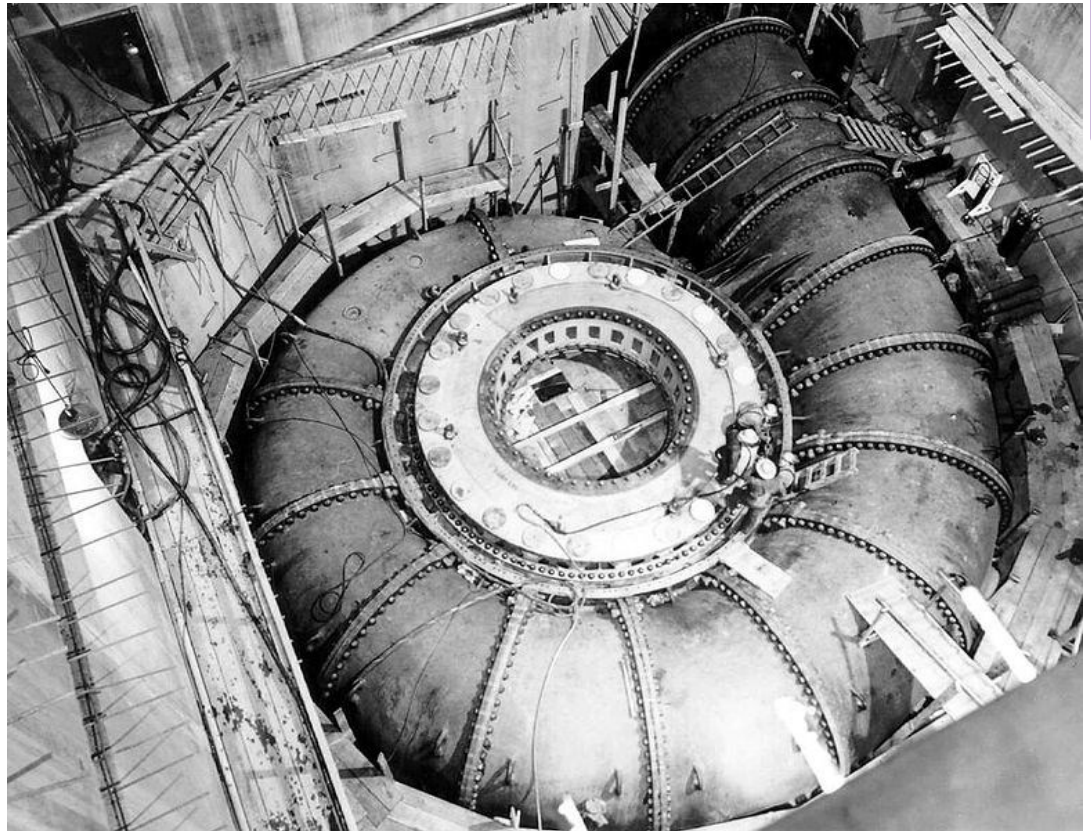
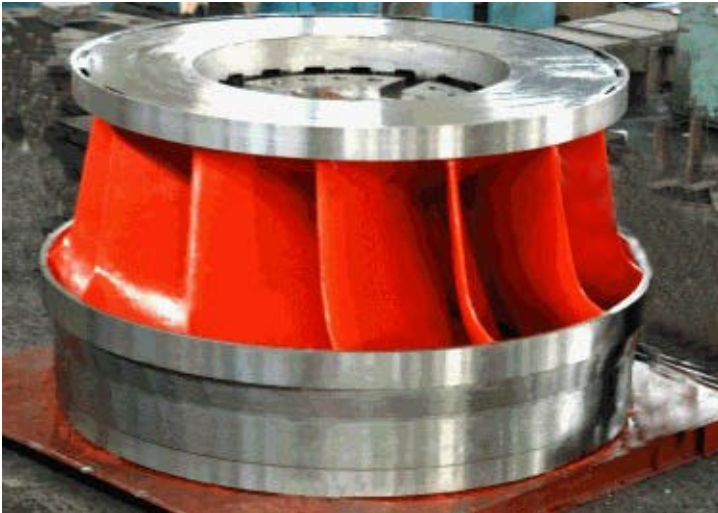


۲) توربین فرانسیس (Francis Turbine)

- ✓ استفاده در نیروگاه های با ارتفاع متوسط ریزش آب و دبی آب جاری متوسط
- ✓ نوع عکس العملی (سرعت و فشار آب در برخورد با پره ها کم می شود)
- ✓ جریان شعاعی و شعاعی-محوری (نوع مختلط)
- ✓ نصب بصورت افقی و عمودی
- ✓ لوله های حلزونی شکل: افزایش سرعت بطور یکنواخت
- ✓ پره های راهنما (Guide Vanes): افزایش نهایی سرعت آب، جهت دهی مناسب و تنظیم مقدار آب و قدرت خروجی
- ✓ حداکثر بازده آنها بین ۹۴ تا ۹۵ درصد است.



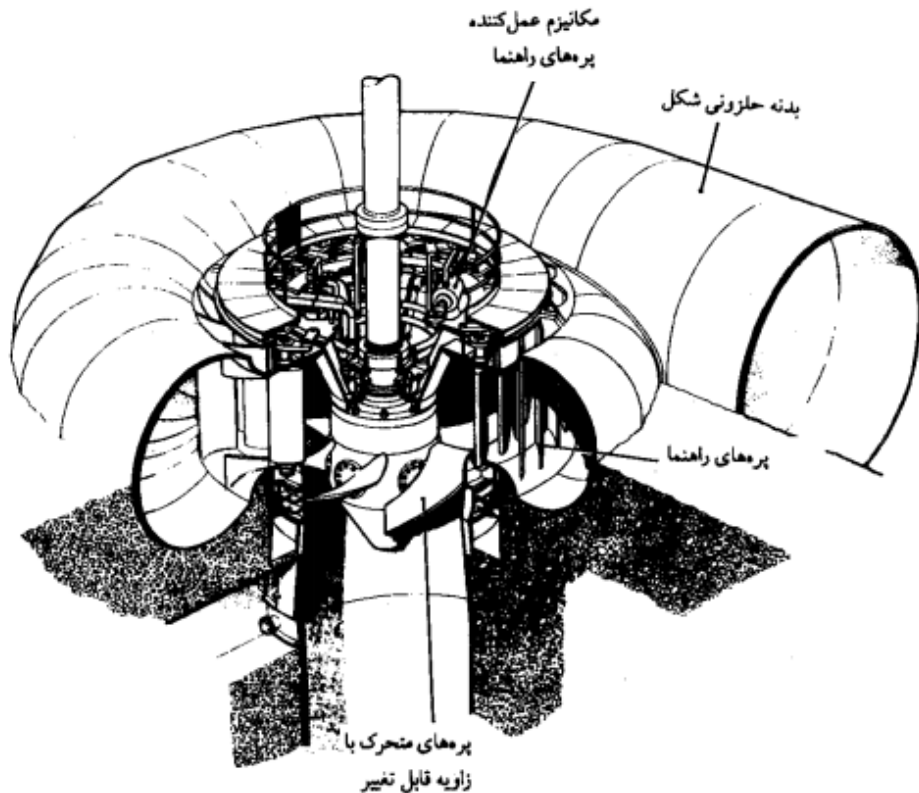
۲) توربین فرانسیس (Francis Turbine)



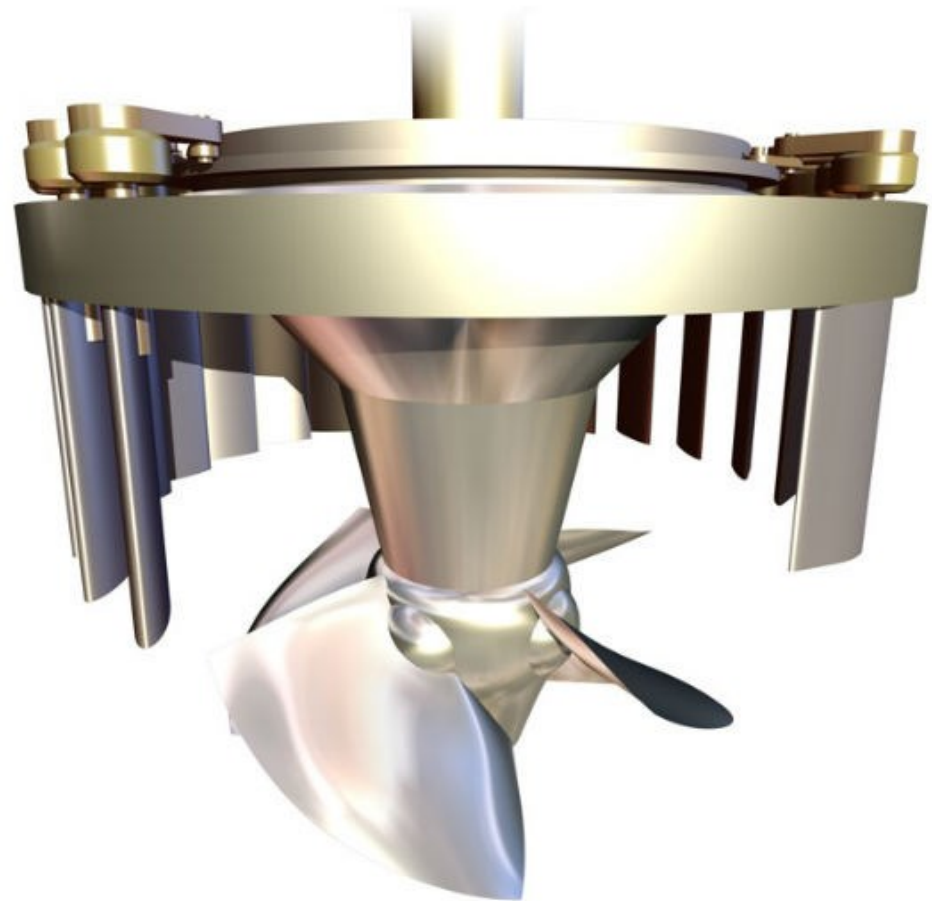
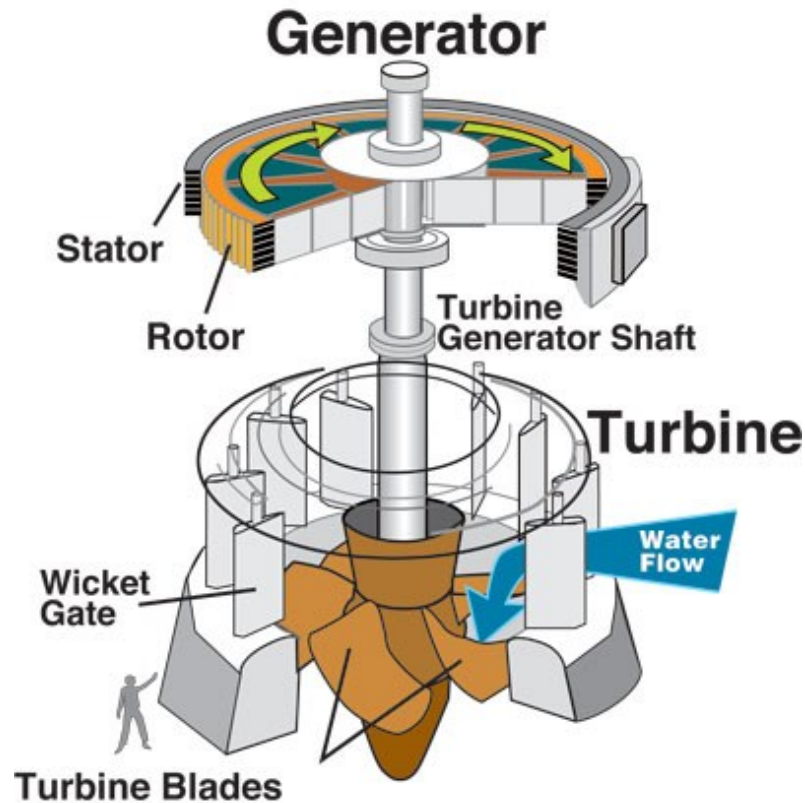
۳) توربین کاپلان و ملخی یا پروانه ای (Kaplan & Propeller Turbine)

- ✓ در سدهای با ارتفاع ریزش آب کم تا متوسط و دبی جریان زیاد
- ✓ نوع عکس العملی
- ✓ جریان محوری (جریان آب به صورت محوری به پره های متحرک برخورد می کند)
- ✓ لوله حلزونی و پره های راهنما شبیه توربین فرانسس
- ✓ پره های متحرک (۴ تا ۶ عدد) با زاویه قابل تغییر (در توربین کاپلان) و زاویه غیرقابل تغییر (در توربین های ملخی)
- ✓ حداکثر بازده ۹۴ درصد
- ✓ نصب بصورت عمودی:

- طراحی سیستم روغنکاری و یاتاقان ها راحتتر
- حفاظت توربین و سایر تجهیزات بهتر (با بتن ریزی)
- تعمیرات و نگهداری راحتتر (نصب بسیاری از تجهیزات در بالا)
- پدیده کاویتاسیون کمتر



۳) توربین کاپلان و ملخی یا پروانه ای (Kaplan & Propeller Turbine)



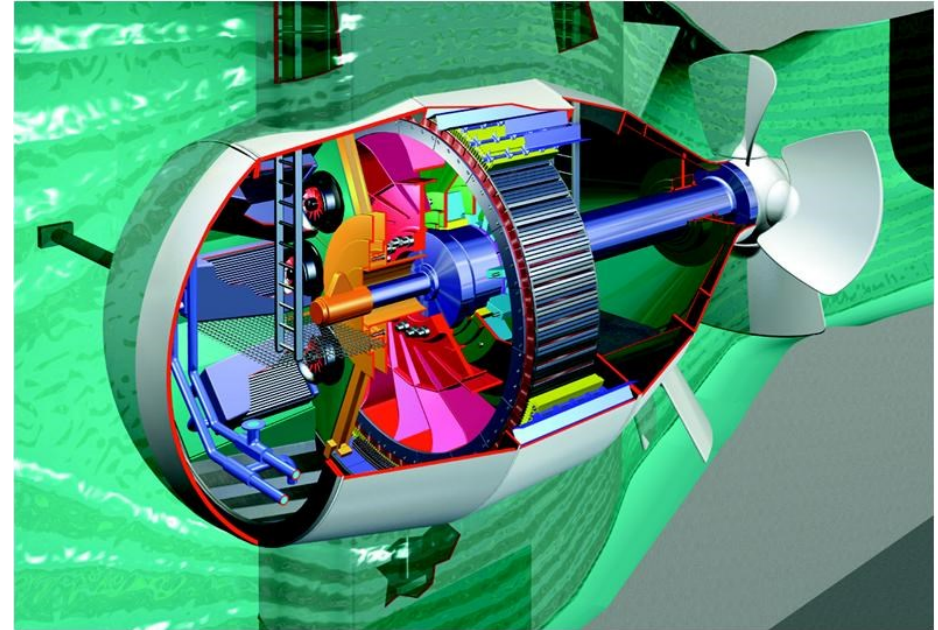
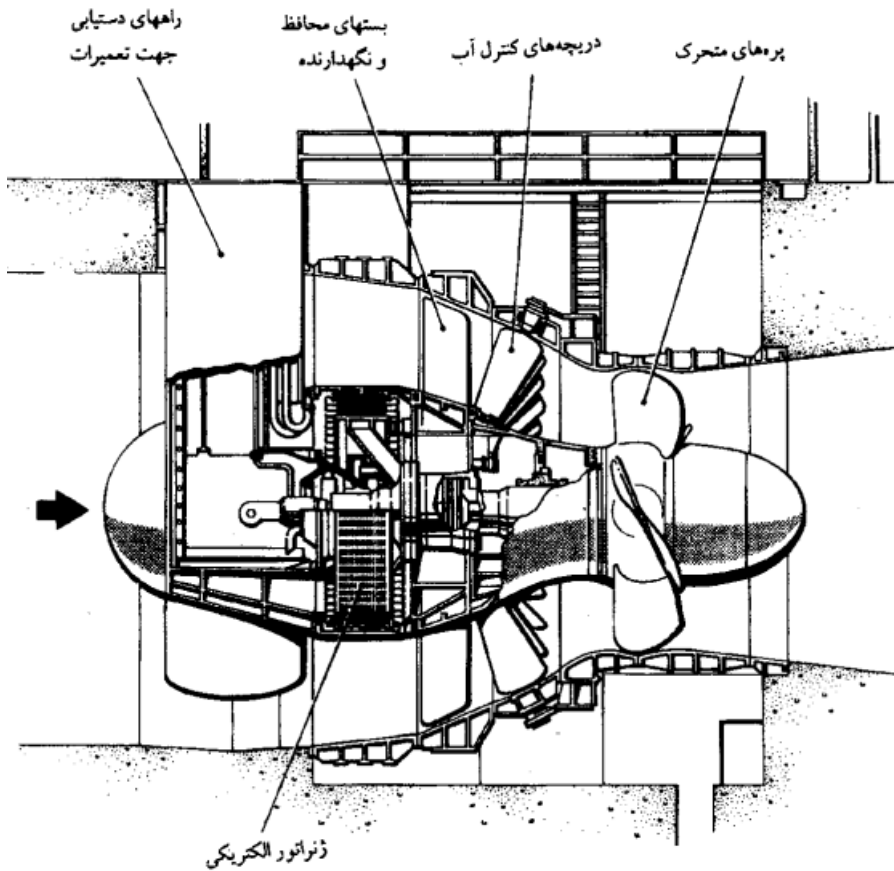
۴) توربین های لوله ای: این توربین ها در مسیر رودخانه ها، جایگزینی برای توربین های کاپلان هستند (با بازده تقریباً مشابه)

۱-۴) توربین بالب (Bulb Turbine)

✓ نصب بر روی رودخانه های کوچک

✓ دارای قدرت کم

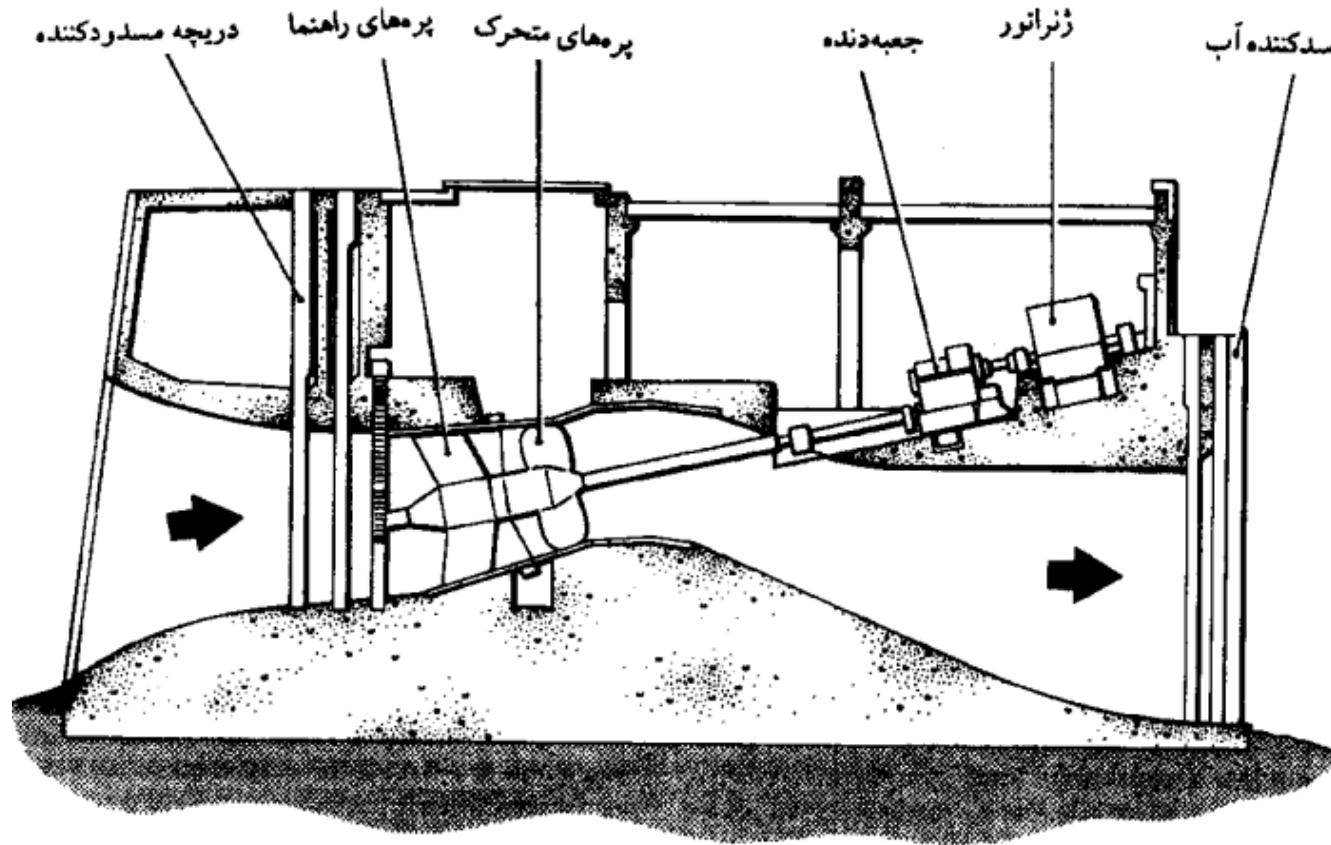
✓ ژنراتور و توربین در داخل محفظه ی اصلی توربین و کل مجموعه داخل آب قرار دارد.



۴) توربین های لوله ای

۲-۴) توربین تیوب (Tube Turbine)

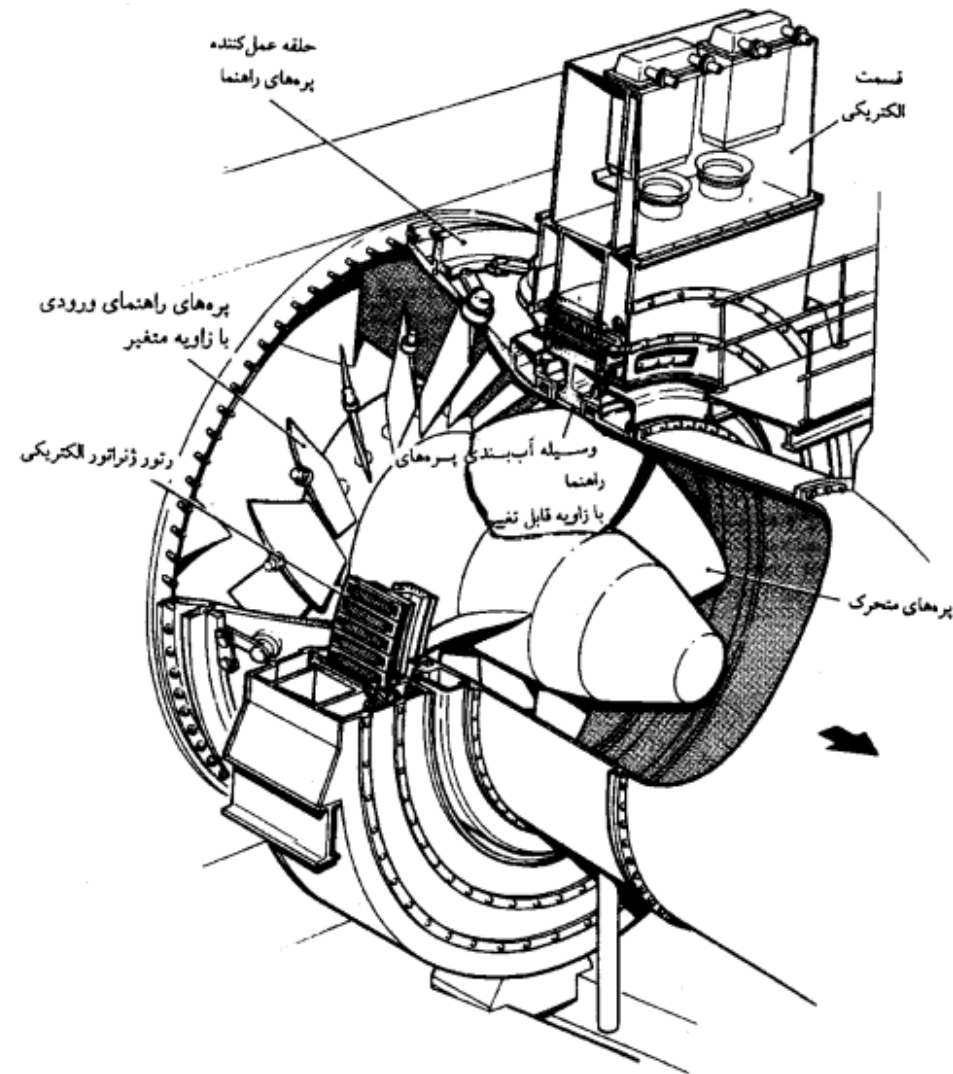
- ✓ در توربین بالب به علت فضای کم، نگهداری از توربین مشکل است و همچنین بخاطر اینرسی کم، کنترل فرکانس و سنکرائیزاسیون با شبکه مشکل است.
- ✓ توربین تیوب فاقد مشکلات فوق است و ژنراتور در خارج از محفظه توربین قرار دارد.



۴) توربین های لوله ای

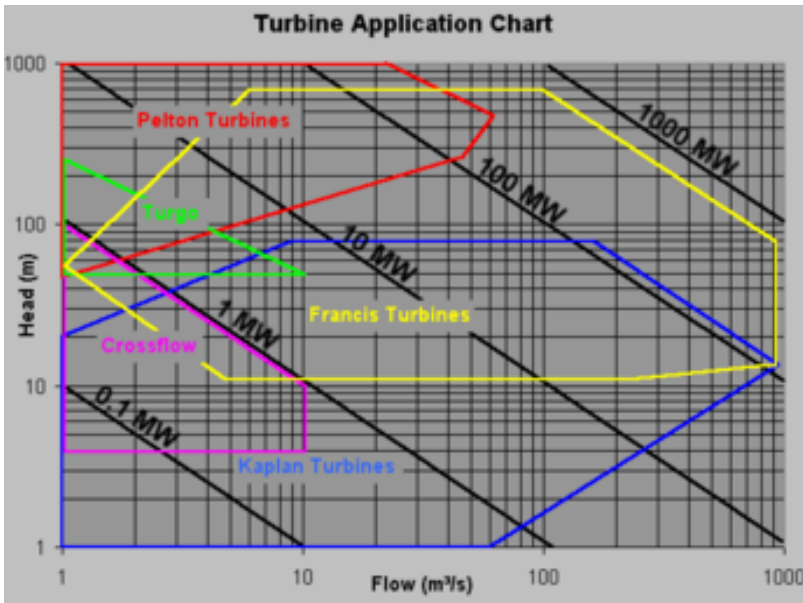
۳-۴) توربین ریم ژنراتور (Rim generator turbine)

- ✓ روتور ژنراتور و توربین یکی هستند (طرح Straflo یا استرافلو که توسط آقای اسپرویس ارائه شده).
- ✓ قسمت گردان دارای قطر بزرگ است (اینرسی بالا که از نظر پایداری بهتر است).
- ✓ به منظور جلوگیری از نفوذ آب به بخش الکتریکی، به لایه های پوششی مناسبی نیاز است.
- ✓ در صورتی که پره های متحرک غیرقابل تنظیم باشد، این نوع توربین قابل رقابت با دیگر توربین ها می شود.



❖ محدوده استفاده از توربین ها

- ✓ در ارتفاع ریزش پایین از توربین های کاپلان و فرانسیس جریان مختلط؛
- ✓ در ارتفاع ریزش متوسط از توربین های کاپلان و فرانسیس جریان شعاعی؛
- ✓ در ارتفاع ریزش بالا از توربین های پلتون و گاهی فرانسیس جریان شعاعی؛



$$P = \frac{Q.H.\omega.\eta}{102} = 9.8(Q.H.\eta)$$

❖ توان قابل دستیابی یک نیروگاه آبی بر حسب کیلووات (P):

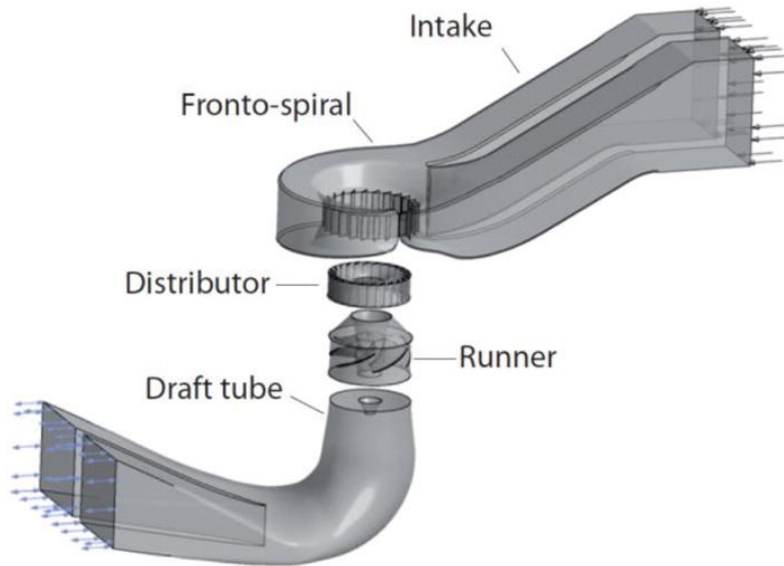
- ✓ H: ارتفاع موثر ریزش آب (m)
- ✓ Q: دبی تخلیه آب (m³/s)
- ✓ η : راندمان مجموعه توربین-ژنراتور
- ✓ ω : چگالی آب که در شرایط استاندارد برابر 1000kg/m³

تمرین (مهلت تحویل: جلسه آینده)

الف) در یک نیروگاه برق آبی ارتفاع مفید ۵۰ متر و سطح آبگیر مخزن ۲۵۰ کیلومترمربع می باشد. چنانچه تلفات ارتفاع ۴٪ و متوسط بارندگی سالیانه ۱۲۰ cm و درصد بارندگی هدر رفته ناشی از تبخیر ۲۰٪ باشد. با در نظر گرفتن راندمان توربین و ژنراتور به ترتیب ۸۲٪ و ۸۴٪ توان تولید شده چند مگاوات خواهد بود (فرض کنید در یک سال، حداقل ۷۰ درصد اوقات نیروگاه روشن باشد)؟

ب) در یک نیروگاه تلمبه-ذخیره ای با بازده ۷۵ درصد، ظرفیت ذخیره انرژی در مخزن بالایی برابر با ۱۰۰۰ MWh است. اگر این نیروگاه با توان نامی کار کند، مخزن بالایی در طول ۴ ساعت پر یا خالی می شود. اگر بهره بردار نیروگاه بخواهد در یک دوره ۱۲ ساعته تصمیم گیری کند و قیمت برق در این دوره به صورت زیر باشد، نحوه بهره برداری و درآمد نیروگاه را تعیین نمایید.

Hour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Price (\$/MWh)	18.3	13.2	12.5	17.4	33.3	75.4	75.4	82.4	93.2	81.4	63.7	46.9



❖ درفت تیوب (Draft Tube)

✓ در توربین های جریان محوری قسمت زیادی از انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل نمی شود. بدین دلیل، یک لوله بزرگ مخروطی به خروجی رانر (runner) وصل می شود و سر دیگر آن پایینتر از کمترین سطح آب قرار می گیرد.

✓ با استفاده از رابطه برنولی (قانون بقای انرژی در سیالات) می توان نشان داد فشار قسمت پایین درفت تیوب کمتر از فشار هواست و در نتیجه مکش ایجاد می شود.

$$z_1 + \frac{P_1}{g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{g} + \frac{v_2^2}{2g}$$



❖ سرعت مخصوص توربین (N_s):

$$N_s = \frac{N\sqrt{P_t}}{H^{5/4}}$$

✓ سرعتی که در ازای ارتفاع ریزش ۱ m توان ۱ kw تولید می کند (بر حسب rpm).

- Pt: توان خروجی توربین بر حسب kW
- N: سرعت چرخش توربین بر حسب rpm
- H: ارتفاع موثر ریزش آب (m)

❖ سرعت مخصوص اولیه توربین با استفاده از رابطه تجربی زیر تعیین می شود:

$$N_s = \frac{K}{\sqrt{H}}$$

✓ مقدار K برای توربین کاپلان و بالب ۲۶۲۵، برای توربین پروانه ای و تیوب (لوله ای) ۲۴۱۵، برای توربین فرانسیس ۲۲۰۵ و توربین پلتون ۴۲۰ لحاظ می شود.

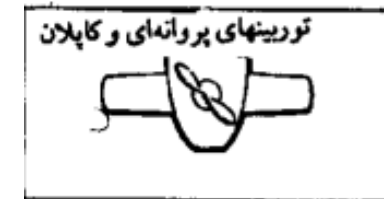
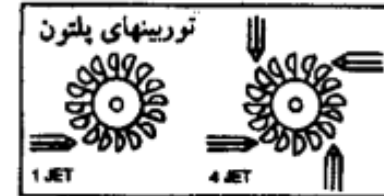
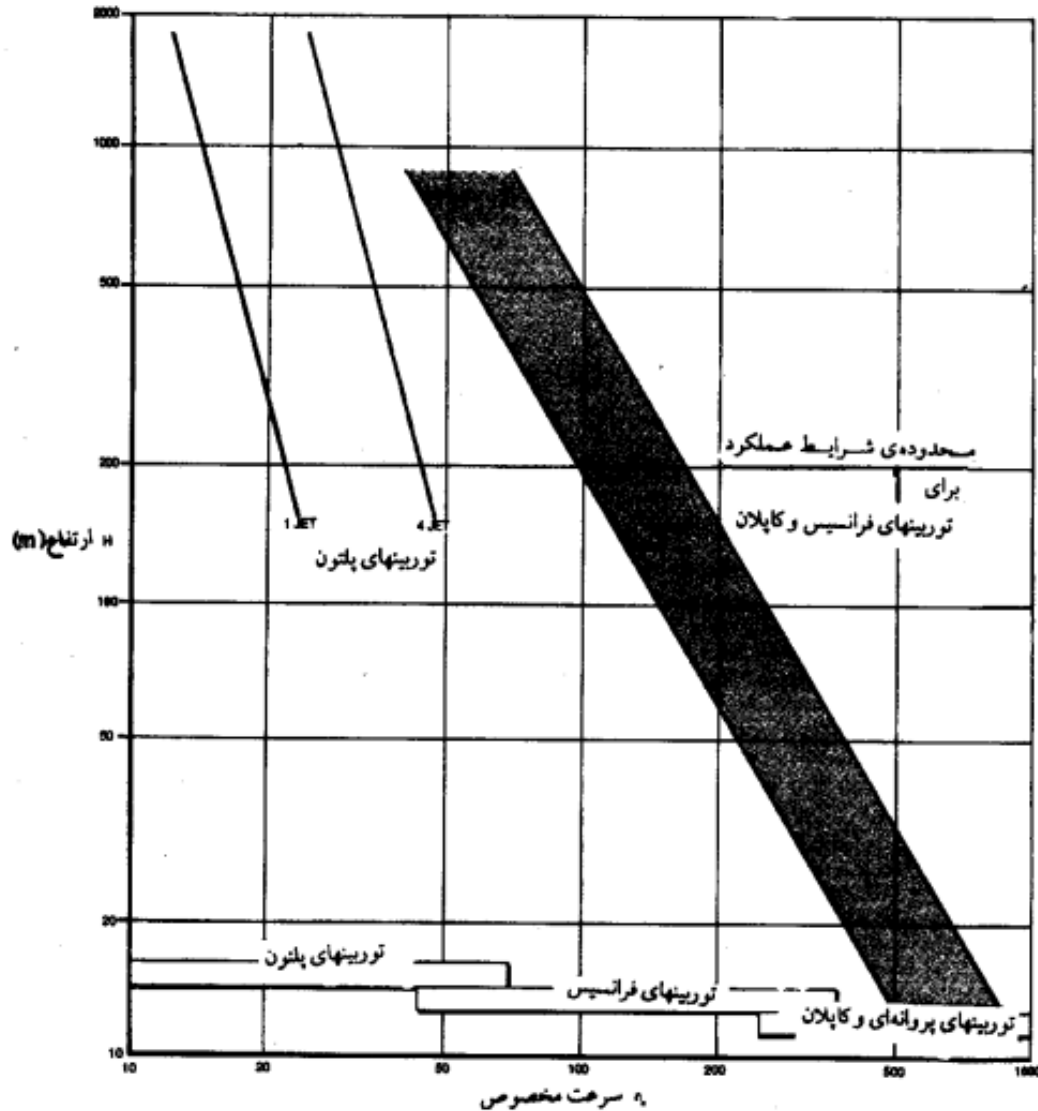
❖ برای یک مقدار توان مشخص خروجی استفاده از توربین با سرعت مخصوص بالاتر هزینه کلی نصب کاهش می یابد.

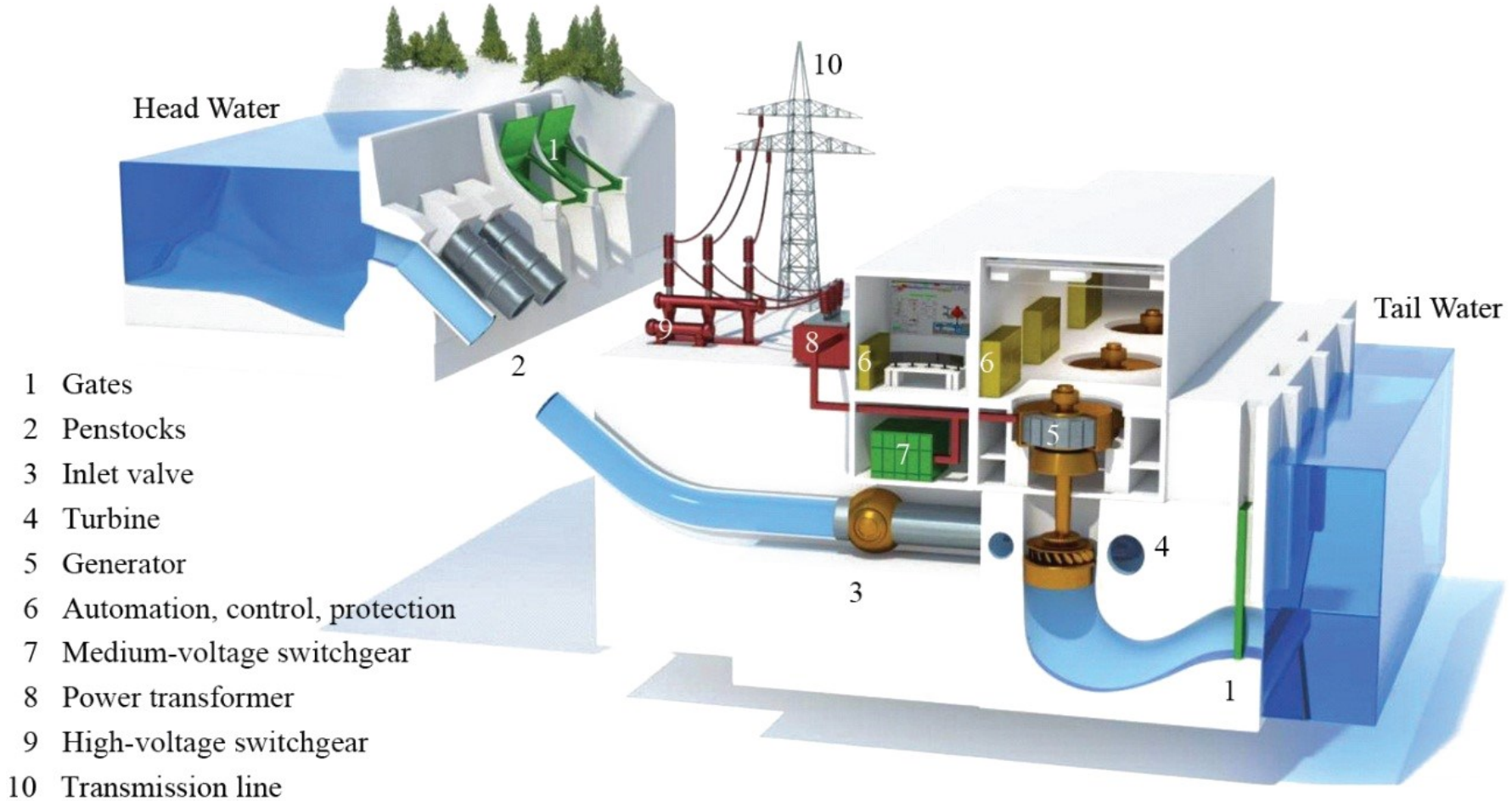
❖ دسته بندی توربین ها بر اساس ارتفاع ریزش آب و سرعت مخصوص:

نوع توربین	ارتفاع ریزش آب	سرعت مخصوص
پلتون	بالاتر از ۲۰۰ متر	۱۰-۶۰
فرانسیس	۲۰۰-۳۰ متر	۵۰-۴۰۰
کاپلان	کمتر از ۳۰ متر	۳۰۰-۱۰۰۰

❖ بدلیل ملاحظات بازده، توربین های با سرعت مخصوص بالا در نیروگاه های با هد پایین استفاده می شوند و بالعکس.

دسته بندی توربین ها بر اساس ارتفاع ریزش آب و سرعت مخصوص:





- ❖ پدیده کاویتاسیون در حین عبور آب از لوله های هدایت، اطراف پره ها و دریچه ها، توربین و لوله تخلیه آب ممکن است رخ دهد.
- ❖ هنگامی که فشار موضعی از فشار بخار آب در حال حرکت کمتر باشد حباب های هوا در اثر تبخیر آب بوجود می آیند. تولید و از بین رفتن مستمر این حباب ها باعث بروز فشار ضربه ای و فرسایش بر روی بدنه ی تجهیزات بویژه پره های توربین می گردد. افت فشار موضعی در اثر افزایش سرعت بوجود می آید.
- ❖ وقوع کاویتاسیون توام با ایجاد صدا، ارتعاش و افت عملکرد توربین است.
- ❖ ضریب کاویتاسیون توما (Thoma Cavitation Coefficient):
 - ✓ یکی از پارامترهای بسیار مهمی که در کارخانه ساخت توربین بکار گرفته می شود.
 - ✓ این ضریب بر اساس یک سری پارامترهای محیطی مانند فشار، ارتفاع توربین و ... بدست می آید.
 - ✓ توربین باید بتواند بدون تحت تاثیر قرار گرفتن پدیده کاویتاسیون، در محل موردنظر، کار کند.
- ❖ روش های جلوگیری از کاویتاسیون:
 - (1) رانر و توربین زیر آب نگه داشته شود یعنی سیستم توربین خیلی پایینتر از سطح پایین دست آب قرار گیرد (افزایش هزینه های پی کنی، بتن ریزی و ...).
 - (2) استفاده از رانر با سرعت مخصوص پایین (افزایش سرعت باعث کاهش قطر پره ها می شود و در نتیجه سرعت آب در حین عبور از پره ها افزایش می یابد؛ در این حالت احتمال وقوع کاویتاسیون افزایش می یابد)
 - (3) استفاده از یک لایه مقاوم تر در برابر این پدیده (فولاد آلیاژی با پوشش فولاد ضد زنگ)
 - (4) صیقلی کردن سطوح پره های رانر

۱) استفاده از داده های بهره برداری

- ✓ ارتفاع آب پشت سد (از مطالعات برنامه ریزی)
- ✓ ارتفاع سطح پایین دست آب
- ✓ ارتفاع حداکثر آب
- ✓ ارتفاع های موثر توربین شامل ارتفاع حداکثر (بالاترین نقطه دریچه خروج آب اضطراری با عملکرد یک واحد)، ارتفاع متوسط (با توجه به مقدار موردنظر در ذخیره آب پشت سد)، ارتفاع حداقل برای ظرفیت قابل قبول و ارتفاع کمتر از حداقل (با درصد احتمال وقوع بسیار کم)
- ✓ ارتفاع طراحی شده برای سد (ارتفاع خالصی که در آن بازدهی توربین حداکثر است)
- ✓ ارتفاع نامی سد (ارتفاع خالصی که در آن توربین قادر به تولید خروجی بطور مداوم باشد)

۲) تعیین محدوده ی ارتفاع ریزش آب از داده های بهره برداری

- ✓ البته، داده های این جدول قطعیت ندارد و در برخی مواقع، همپوشانی می شوند. در شرایط همپوشانی، باید به شرایط دیگر مانند مزایا و معایب توربین و ... توجه شود.

ارتفاع ریزش آب بر حسب متر	نوع توربین
۱۵۰-۱۷۰۰	ضربه ای
۱۵-۲۶۰	فرانسیس
۳-۷۵	پروانه ای

۳) انتخاب توربین

✓ ارتفاع خالص ریزش آب و خروجی موردنظر تعیین گردد؛

✓ نوع توربین تعیین شود؛

✓ با توجه به ضرایب K برای هر توربین (اسلاید ۲۵)، سرعت مخصوص (N_s) محاسبه شود:
 ○ H : ارتفاع موثر ریزش آب (m)

$$N_s = \frac{K}{\sqrt{H}}$$

$$N = \frac{N_s \cdot H^{1.25}}{\sqrt{P_t}}$$

✓ سرعت چرخش توربین (N) محاسبه شود:
 ○ Pt: توان خروجی توربین بر حسب kW

✓ سرعت چرخش واحد به نزدیکترین سرعت سنکرون استاندارد اصلاح شود. نزدیکترین سرعت هیدروژنراتور به سرعت سنکرون

$$N = \frac{120 \times f}{N_p}$$

براساس فرکانس شبکه (f) و تعداد قطب (N_p):
 ○ تعداد قطب ها مضربی از ۲ و یا ترجیحاً ۴ می باشد.

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P_t}}{H^{1.25}}$$

✓ سرعت مخصوص برای سرعت سنکرون انتخاب شده، محاسبه گردد:

$$D = \frac{84.47 \times \Phi \times \sqrt{H}}{N}$$

✓ قطر دهانه تخلیه آب در چرخنده توربین بر حسب متر (D) محاسبه شود:
 ○ Φ : تغییرات سرعت در دهانه تخلیه

۳) انتخاب توربین

○ برای توربین فرانسسیس: $\Phi = 0.0234 \times N_s^{2.3}$

○ برای توربین پروانه ای: $\Phi = 0.0258 \times N_s^{2.3}$

○ برای توربین ضربه ای (پلتون): $\Phi = 0.46$

$$D_o = (1.028 + 0.0137n_{sj})D$$

$$n_{sj} = \sqrt{\frac{P}{i}} \cdot \frac{N}{H^{1.25}}$$

✓ قطر خارجی یک پرۀ پلتون بر حسب متر (D_o) محاسبه شود:

○ n_{sj} : سرعت مخصوص برای هر انژکتور (تزریق کننده آب):

○ P : قدرت خروجی توربین بر حسب kW

○ i : تعداد انژکتورهای توربین

✓ مقدار ضریب کاویتاسیون محاسبه شود. این ضریب برای توربین های پروانه ای و فرانسسیس به صورت زیر است:

$$\sigma = \frac{N_s^{1.6}}{29000}$$

✓ در نهایت، موقعیت استقرار توربین تعیین شود.