فصل ۵

نیروگاه‌های برق آبی

۱.۵ مقدمه

برای تامین انرژی الکتریکی روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود که در حال حاضر نیروگاه‌های حرارتی و آبی بیشترین سهم را در تولید برق جهان دارند. بدلیل مشکلات و محدودیت‌های تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی (با سوخت فسیلی یا هسته‌ای) به لحاظ مسائل تکنولوژیک، رعایت ضوابط و معیارهای زیست‌محیطی، محدودیت منابع و ...، در حال حاضر گرایش عمومی تولید برق در جهان، بیشتر متوجه احداث نیروگاه‌های برق آبی [۲] است. البته در سال‌های اخیر، از میان نیروگاه‌های حرارتی، تنها نیروگاه‌های هسته‌ای مورد توجه بوده است. براساس آخرین اطلاعات موجود، در طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۶، رشد مصرف منابع انرژی در جهان برای انرژی‌های هسته‌ای، گاز طبیعی، برق آبی، نفت و زغال‌سنگ به ترتیب برابر ۵۶، ۲۶/۴، ۲۵/۴، ۱۵/۱ و ۵/۳ درصد بوده است. این امر نشان می‌دهد که نیروگاه‌های برق آبی به عنوان یکی از مهمترین منابع تامین انرژی مورد توجه جدی قرار گرفته‌اند.

همان‌گونه که از نام این نیروگاه مشخص است، برای تولید این نوع انرژی نیاز به احداث سد برروی رودخانه می‌باشد که در کشورها با توجه به وجود رودخانه‌هایی با دبی آب مختلف امکان نصب این نیروگاه‌ها بسیار زیاد است. مقدار درصد تولیدی برق آبی در کشور ما در سال ۱۳۸۵، به مقدار ۱۴/۵ درصد از کل انرژی تولید در آن سال می‌باشد. از مهمترین این نوع نیروگاه‌ها می‌توان به نیروگاه سد دز (که برروی رودخانه‌ی دز نصب گردیده است)، شهید عباسپور (که برروی رودخانه کارون نصب شده است)، امیرکبیر، سفیدرود، کلان، لتیان، زاینده‌رود و ارس اشاره نمود. از مزایای این نیروگاه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

[۲] Hydrolic power plant

- عمر مفید این نیروگاه‌ها بیش از ۵۰ سال است و به ۱۰۰ سال هم می‌رسد که در مقایسه با عمر نیروگاه‌های بخاری (حدود ۲۵ تا ۳۰ سال) بسیار زیاد است.
- به منظور تولید انرژی چرخشی توربین، نیازی به سوخت نمی‌باشد. در نتیجه، هزینه بهره‌برداری نیروگاه بسیار کم است. بعلاوه با توجه به عدم نیاز به سوخت، به مخزن‌های ذخیره سوخت هم نیاز نمی‌باشد.
- در این نیروگاه‌ها هیچگونه آلودگی ناشی از گازهای حاصل از احتراق وجود ندارد و از این نظر مشکلی برای محیط زیست ایجاد نمی‌کنند.
- هزینه تولید انرژی نیروگاه‌های بخاری با تغییر ضریب قدرت بار، متغیر است؛ اما این هزینه در نیروگاه‌های آبی مستقل از ضریب قدرت بار می‌باشد.
- زمان راه‌اندازی این نیروگاه‌ها بسیار کوتاه است و در زمان کمی (حدود چند دقیقه) قادر به هماهنگی با شبکه [۱] و وصل به آن می‌باشند.
- پایداری این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های بخار بسیار بالا است.
- هزینه تعمیر و نگه‌داری این نیروگاه‌ها بسیار پایین است.
- با گذشت زمان بازده این نیروگاه‌ها تغییری نمی‌کند.
- تولید انرژی آبی باعث صرفه‌جویی در سوخت و ذخایر مربوطه می‌شود.
- پرسنل مورد نیاز برای نیروگاه‌های آبی نسبت به بقیه نیروگاه‌ها بسیار کمتر است.
- عموما نیروگاه‌های آبی در جایی نصب می‌شوند که هزینه زمین مورد نیاز بسیار پایین است.

علاوه بر مزایای مذکور (که در مورد تولید برق آبی می‌باشد) مزایای مهم دیگری وجود دارد که عبارتند از:

- جلوگیری از سیل‌ها و سیلاب‌های فصلی (با ایجاد سد).

[۱] Synchronouse

- با ایجاد مخزن آب در پشت سد، زمین‌های اطراف این مخزن به صورت زمین‌های حاصلخیز در می‌آیند.
- ایجاد فضای تفریحی مناسب اطراف سد.
- ایجاد منابع مناسب برای آب مصرفی شهری.

اما این نیروگاه‌های آبی با مشکلاتی نیز همراه هستند که عبارتند از:

- با توجه به اینکه برای نصب نیروگاه‌های برق آبی نیاز به احداث سد می‌باشد در نتیجه هزینه ثابت این نیروگاه‌ها بسیار زیاد است؛ زیرا برای ساخت سد، ابتدا باید مسیر آب منحرف شده و سپس سد مناسب ایجاد شود که هزینه عمرانی این سدها بسیار زیاد است.
- با توجه به این که تولید این نیروگاه‌ها بستگی به میزان آب پشت سد دارد، در نتیجه در سال‌های کم آبی، تولید این نیروگاه‌ها با مشکل همراه خواهد بود.
- مدت زمان ساخت سد و نیروگاه آبی در مقایسه با نیروگاه‌های دیگر، بسیار زیاد است و برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت انرژی، مناسب نمی‌باشد.
- مخزن نیروگاه‌های آبی، زمین‌های بسیار زیادی را زیر آب می‌برد.
- قابلیت نصب نیروگاه‌های آبی در مکان‌های بسیار خاص می‌باشد.

۲.۵ پتانسیل‌های برق آبی رودخانه‌ای ایران

ظرفیت بالقوه و عملی تولید انرژی برق آبی در کشور، ۵۰ میلیارد کیووات ساعت در سال است که می‌تواند ۶۰ درصد برق مورد نیاز فعلی کشور را تامین کند. براساس مطالعات انجام شده، حوضه آبریز رودخانه کارون با ۳۰ میلیارد کیلووات ساعت در سال، حوضه آبریز دز با ۹ میلیارد کیلووات ساعت در سال و حوضه آبریز کرخه با ۶ میلیارد کیلووات ساعت در سال، بیشترین امکانات تولید برق آبی را دارا می‌باشند و ۵ میلیارد کیلووات ساعت بازمانده آن مربوط به سایر حوضه‌ها است. بدین ترتیب روشن می‌گردد که سرمایه‌گذاری بر روی طرح‌های برق آبی و استفاده از این پتانسیل بالقوه، از جمله ضروریاتی است که باید مدنظر قرار گیرد و با توجه به زمان به بهره‌برداری رسیدن این طرح‌ها لازم است تا هرچه سریعتر اقدام‌های عملی انجام شود.

۳.۵ منحنی دبی حجمی آب

یکی از مسائل بسیار مهم در احداث هر نیروگاهی، میزان دبی حجمی آب ورودی در زمان‌های مختلف از سال می‌باشد. با توجه به منحنی دبی حجمی سالیانه آب می‌توان موارد زیر را تخمین زد:

۱. میزان انرژی متوسط سالیانه قابل دسترس.

۲. حداقل انرژی سالیانه قابل دسترسی و ظرفیت همیشگی.

۳. میزان انرژی اضافی و افزایش ظرفیت ذخیره شده آب در پشت سد.

۴. ظرفیت مخزن آب برای یکنواخت کردن جریان آب به حداقل مقدار خود.

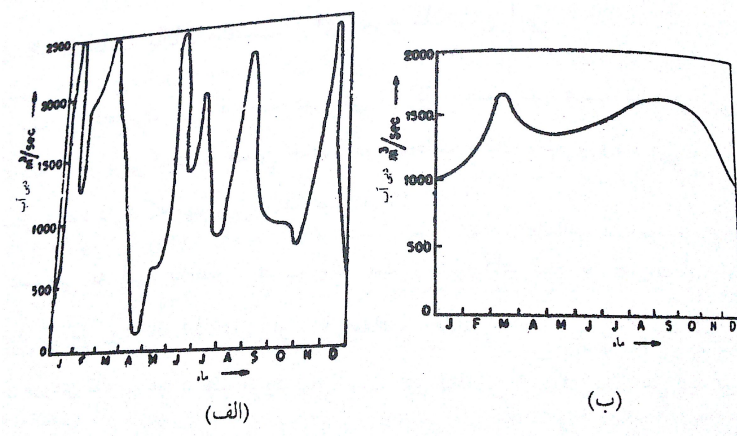
۵. میزان حداقل آب خروجی روزانه بدون ذخیره‌سازی

۶. ظرفیت [۱].

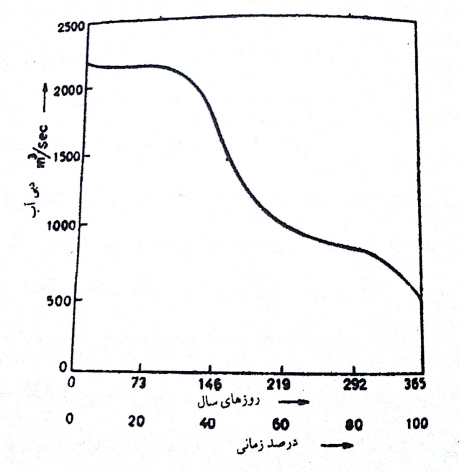
۷. ظرفیت مخزن کنترل سیلاب‌ها.

برای دست‌یابی به این اهداف باید بررسی دراز مدتی (حدود ۲۰ سال) برروی رودخانه موردنظر صورت گیرد تا شرایط حداقل و حداکثر دبی آب مشخص شود. بدین منظور، منحنی دبی آب ورودی برحسب دوره‌های مختلف از قبیل ساعت، هفته، ماه و یا سال تهیه می‌شود. در شکل ۱.۵ نحوه تغییرات دبی آب رودخانه‌هایی با تغییرات آب بسیار زیاد و کم نشان داده شده است. از این منحنی، حداکثر و حداقل دبی حجمی آب در دوره‌های متناوب موردنظر، مقدار متوسط دبی حجمی آب و میزان آب ورودی در هر لحظه مشخص می‌شود. اما این منحنی در مطالعه و طراحی نیروگاه کاربرد زیادی ندارد و بهتر است آن را به صورت منحنی مرتب‌شده دبی حجمی آب، مطابق شکل ۲.۵ در آوریم. هر نقطه از این منحنی، بیانگر درصدی از زمان دوره تناوب است (در این شکل، دوره تناوب، برابر سال در نظر گرفته شده است) که دبی حجمی آب، حداقل مقدار مذکور می‌باشد.

[۱] Spillway



شکل ۱.۵: منحنی تغییرات دبی آب رودخانه‌ها الف) با دبی آب بسیار متغیر ب) با دبی آب کم متغیر



شکل ۲.۵: منحنی مرتب شده دبی آب رودخانه

۴.۵ انتخاب مکان مناسب برای نیروگاه‌های آبی

یک نیروگاه برق آبی قسمت کوچکی از کل تجهیزات نصب شده برروی یک رودخانه را در برمی‌گیرد. به همین خاطر، در انتخاب مکان مناسب یک نیروگاه آبی، مسائل مهم مختلفی وجود دارند که مهمترین آن‌ها عبارتند از:

۱. **دسترسی به آب:** به منظور نصب یک سد و نیروگاه، نیاز به جریان آب رودخانه می‌باشد. از

این رودخانه اطلاعاتی از قبیل مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط دبی حجمی آب در دوره تناوب موردنظر مورد نیاز است. در تخمین آب در دسترس باید میزان آب بخار شده و آب‌های نشتی هم به حساب آورد.

۲. **ذخیره آب:** باتوجه به تغییرات آب رودخانه باید مکان سد به گونه‌ای باشد که امکان ذخیره آب (برای استفاده در مواقعی که دبی حجمی آب کم می‌شود) وجود داشته باشد. این مخازن می‌تواند در کنار نیروگاه یا مقداری دورتر از آن قرار گرفته باشد.

۳. **ارتفاع آب پشت سد احداث شده:** با توجه به اینکه با افزایش ارتفاع موثر آب، توانایی تولید انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. در نتیجه، میزان آب ذخیره شده کاهش پیدا می‌کند. بدین منظور باید آب زیادی توسط مجاری آب و توربین جابه‌جا شود تا انرژی مورد نظر تامین گردد. لازم به ذکر است که ارتفاع آب بستگی به تقشه‌برداری ناحیه دارد.

۴. **بررسی‌های زمین‌شناسی:** این بررسی‌ها به منظور یافتن پی‌های مناسب برای احداث سد و دیگر تجهیزات جانبی، ایجاد مخزن آب به اندازه کافی و ... لازم می‌باشد. همچنین زمین انتخاب شده نباید در مسیر گسل‌ها و زلزله‌ها باشد.

۵. **میزان آلودگی آب:** آلودگی آب باعث صدمه به تجهیزات فلزی در مسیر آب نیروگاه می‌شود. این مساله می‌تواند عملکرد نیروگاه را غیراقتصادی و نامطمئن سازد. در نتیجه بهتر است که در انتخاب مکان یک سد (برای احداث نیروگاه) به کیفیت آب رودخانه توجه شود تا مشکلاتی را در عملکرد نیروگاه ایجاد ننماید.

۶. **میزان رسوب‌گذاری رود:** رسوبات ته‌نشین شده تدریجی آب رودخانه در پشت سد، ظرفیت مخزن آب را کاهش می‌دهد. این رسوبات می‌تواند مشکلاتی را برای پره‌های توربین ایجاد کند. البته رسوبات ناشی از مناطق جنگلی قابل صرف‌نظر کردن است. به عبارت دیگر، در آن نواحی که در معرض طوفان‌های شدید هستند و توسط فضای سبز محافظت نشده‌اند، رسوبات بسیار زیادی در جریان رودخانه ایجاد می‌شود. در بیشتر حالات، این فاکتور جوابگو خواهد بود و در غیر این صورت، مکان در نظر گرفته شده مناسب نمی‌باشد.

۷. **تاثیرات زیست محیطی:** آب پشت سد، مقدار بسیار زیادی از زمین‌ها و بعضی دهکده‌ها را زیر آب می‌برد. لذا موقعیت مورد نظر باید محیطی امن و مناسب باشد تا مشکلاتی را از نظر بهداشتی ایجاد نکند و جنبه‌ای فرهنگی و تاریخی منطقه را حفظ کند.

۸. **دسترسی به مکان موردنظر:** در موقعیت انتخاب شده برای ایجاد سد و نصب نیروگاه باید تجهیزات بسیار زیادی به مکان مورد نظر انتقال یابد. به همین منظور باید مکان دسترسی به آن بوسیله ایجاد جاده‌ها یا خطوط راه‌آهن وجود داشته باشد.

۵.۵ دسته‌بندی نیروگاه‌های آبی

نیروگاه‌های آبی با توجه به عوامل مختلفی دسته‌بندی می‌شوند. این عوامل عبارتند از:

۱. **دسته‌بندی براساس دبی آب رودخانه**

نیروگاه‌های آبی را می‌توان با توجه به مقدار دبی آب آن به انواع زیر تقسیم نمود:

- **نیروگاه‌ها برروی رودخانه‌های بدون ذخیره‌سازی آب:** این نیروگاه‌ها برروی رودخانه‌هایی نصب می‌شوند که آب ورودی را بدون ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار می‌دهند. به عبارت دیگر، در این نیروگاه‌ها کنترلی برروی دبی آب ورودی وجود ندارد و در نتیجه در زمان‌هایی که دبی آب زیاد بوده و بار هم کم باشد، مقداری از آب هدر می‌رود. هدف از این نیروگاه‌ها، استفاده حداکثر از آب است و با توجه به دبی آب این رودخانه‌ها قدرت تولیدی این نیروگاه‌ها کم می‌باشد. نمونه‌ای از این نیروگاه‌ها به قدرت ۷۲ مگاوات، نیروگاهی برروی رودخانه اوهایو در آمریکا است.

- **نیروگاه‌ها برروی رودخانه‌های جاری با ذخیره‌سازی آب:** این نوع نیروگاه‌ها که همراه با مخزن ذخیره‌سازی آب می‌باشند، تامین‌کننده تغییرات ساعتی بار در پست‌ها هستند. این مخزن‌ها ظرفیت تولید قطعی نیروگاه‌ها را افزایش می‌دهند. با توجه به میزان آب جاری شده از این نیروگاه‌ها می‌توان در بار پایه یا بار حداکثر استفاده نمود. وقتی فراوانی آب به مقدار بسیار زیادی باشد، به صورت بار پایه عمل می‌کند و وقتی میزان دبی آب کم شود، می‌تواند به صورت یک بار حداکثر مورد استفاده قرار گیرد. نیروگاه آبی کاناوینگ [۱] به قدرت ۲۵۲ مگاوات و نبروگاه بندری سیف [۲] در آمریکا از این نوع هستند.

- **نیروگاه مخزنی:** اکثر نیروگاه‌های آبی دنیا از این نوع می‌باشند. در این نوع نیروگاه‌ها، آب به مقدار زیادی در پشت یک سد ذخیره می‌شود و در نتیجه این نیروگاه‌ها را می‌توان به

[۱] Conowing
[۲] Safe

عنوان بار پایه یا بار حداکثر شبکه مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال، دو نیروگاه شهید عباسپور و دز از این نوع نیروگاه‌ها می‌باشند.

۲. **دسته‌بندی براساس نوع بار**

با توجه به نوع بار، کاربرد نیروگاه‌های آبی را می‌توان به سه صورت نیروگاه بار پایه، بار حداکثر و نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای تقسیم‌بندی نمود:

- **نیروگاه بار پایه:** این نیروگاه‌ها بار پایه شبکه را تامین می‌کنند و در نتیجه، تقریبا یک بار ثابتی را تحت ضریب قدرت بالا تولید می‌کنند. این نوع نیروگاه‌ها دارای ظرفیت تولیدی بالایی هستند. نیروگاه‌هایی که بار پایه را تامین می‌کنند، باید دارای هزینه انرژی تولیدی پایینی باشند. نیروگاه‌های احداثی برروی سدهای بدون مخزن و آبگیر از نوع نیروگاه‌های بار پایه هستند.
- **نیروگاه بار حداکثر:** این نیروگاه‌ها به منظور تامین بار حداکثر شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. نیروگاه‌های احداثی برروی سدهایی با مخزن آبگیر، از این نوع هستند. البته نیروگاه‌های با سد مخزنی هم از این نوع می‌باشند. این نیروگاه‌ها دارای ذخیره‌های فصلی بسیار زیادی هستند. این نیروگاه‌ها در زمان غیر از بار حداکثر، آب را پشت سدها ذخیره می‌کنند و در مواقع بار حداکثر، از ذخیره آب استفاده می‌کنند و بدین جهت عملکرد نیروگاه با ضریب قدرت کم همراه است.
- **نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای:** نیروگاه‌های تلمبه‌ای ذخیره‌ای، نوع خاصی از نیروگاه‌های بار حداکثر هستند. آب در این نیروگاه‌ها در زمان غیر بار حداکثر (که شبکه دارای انرژی الکتریکی بیشتر از انرژی مصرفی می‌باشد) توسط پمپ‌هایی از مخازن پایین به سمت مخازن بالا منتقل می‌شود. آنگاه در مواقع بار حداکثر شبکه، از انرژی پتانسیل موجود در آب‌های مخازن بالا به عنوان ورودی به توربین‌های نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای استفاده و انرژی الکتریکی حاصل می‌شود.

۳. **دسته‌بندی براساس ارتفاع ریزش آب**

- **نیروگاه‌های با ارتفاع کم آب:** این نوع نیروگاه‌ها دارای ارتفاع ریزش آب کمتر از ۳۰ متر هستند. این ارتفاع بیانگر ارتفاع مابین سطح آب پشت سد و سطح آب خروجی از

توربین است. این نیروگاه‌ها نزدیک سد هستند و نیازی به مخزن ذخیره ندارند. نیمی از سد دارای دریچه‌های تخلیه آب مازاد است و نیروگاه در جلوی نیمه دوم و یا در مسیر رودخانه قرار می‌گیرد. در این نیروگاه‌ها، توربین‌های کاپلان [۱] یا فرانسیس [۲] جریان مختلط به کار می‌رود.

- **نیروگاه‌های با ارتفاع متوسط آب:** این نیروگاه‌ها برای ارتفاع ریزش آب ۳۰ تا ۳۰۰ متر به کار می‌روند. در این نیروگاه‌ها از یک کانال باز، آب پشت سد را از مخزن پشت سد و از طریق لوله‌های مجاری آب به سمت توربین هدایت می‌کنند. توربین فرانسیس جریان شعاعی یا کاپلان در این نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- **نیروگاه‌های با ارتفاع زیاد آب:** این نیروگاه‌ها دارای ارتفاع ریزش آب بیش از ۳۰۰ متر هستند. کارهای عمرانی این نیروگاه‌ها در حجم بسیار زیادی صورت می‌گیرد که از جمله ساخت سد، مخازن، تونل‌ها، تانک‌های ذخیره و مجاری آب است.

معمولا در ارتفاع ریزش آب کمتر از ۲۰۰ متر، از توربین‌های فرانسیس و در ارتفاع ریزش بیشتر از ۲۰۰ متر، از توربین پلتون [۳] استفاده می‌شود. با توجه به این ارتفاع و دبی تخلیه آب، قدرت الکتریکی قابل نصب برروی نیروگاه‌ها به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$P = \frac{Q.H.\omega.\eta}{۱۰۲} = ۹/۸Q.H.\eta \qquad (۱.۵)$$

که Q دبی تخلیه آب برحسب $\frac{m^۳}{sec}$ ، H ارتفاع آب برحسب متر، η بازده توربین و ژنراتور، ω وزن آب (که در شرایط استاندارد برابر $۱۰۰۰ \frac{kg}{m^۳}$ می‌باشد) و P قدرت الکتریکی برحسب kW می‌باشد.

۶.۵ توربین‌های آبی

۱.۶.۵ مقدمه

توربین‌های آبی وظیفه تبدیل انرژی موجود در آب را به انرژی مکانیکی (برای به چرخش درآوردن محور توربین) دارند. این توربین‌ها دارای بازده بسیار بالا (بالاتر از ۹۰ درصد در بار کامل) و ساختمان ساده‌ای هستند و براحتی قابل کنترل می‌باشند و در زمان بسیار کوتاهی راه‌اندازی می‌گردند.

[۱] Kaplan turbines
[۲] Francis Turbines
[۳] Pelton turbine

این توربین‌ها تا $۱Mhp$ و در محدوده سرعت‌های $۱۰۰rpm$ (برای توربین‌های بزرگ) تا $۱۰۰۰rpm$ (برای توربین‌های کوچک) ساخته می‌شوند.

توربین‌های آبی به دو نوع توربین‌های عکس‌العملی و ضربه‌ای تقسیم می‌شوند. همچون توربین‌های به کار رفته در نیروگاه‌های بخار و گاز، پره‌های متحرک توربین‌های عکس‌العملی در نیروگاه‌های آبی بگونه‌ای هستند که سرعت و فشار آب در برخورد با آن‌ها کم می‌شود. توربین‌های فرانسیس و پروانه‌ای [۱] از نوع توربین عکس‌العملی می‌باشند. توربین‌های فرانسیس برای ارتفاع ریزش آب متوسط و دبی آب جاری متوسط بکار می‌روند؛ ولی توربین‌های پروانه‌ای (ملخی) برای ارتفاع ریزش آب کم و دبی آب زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند.... توربین‌های کاپلان نوع خاصی از توربین‌های پروانه‌ای هستند که دارای پره‌ای قابل تنظیم می‌باشند.

اما توربین‌های ضربه‌ای دارای پره‌های متحرکی هستند که سرعت آب در برخورد با آن‌ها کم می‌شود، ولی فشار آب ثابت می‌ماند. توربین‌های پلتون دارای این نوع پره‌ها هستند که برای نیروگاه‌های بار ارتفاع ریزش آب زیاد و دبی آب جاری کم بکار می‌روند.

۲.۶.۵ سرعت دور مخصوص

سرعت دور مخصوص یک توربین، سرعت یک توربین مدلی است که قدرت $۱kW$ را در ازای ارتفاع ریزش آب $۱m$، تولید می‌کند به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N_s = \frac{N.\sqrt{P_t}}{H^{۱/۲۵}} \qquad (۲.۵)$$

که در این رابطه:

N_s = سرعت مخصوص بر حسب rpm

N = سرعت توربین بر حسب rpm

P_t = قدرت خروجی برحسب kW

H = ارتفاع موثر ریزش آب برحسب m

در جدول ۱.۵ دسته‌بندی توربین‌ها براساس ارتفاع ریزش آب و سرعت مخصوص آن‌ها نشان داده شده است.

[۱] Propeller turbines

جدول ۱.۵: دسته‌بندی توربین‌ها براساس ارتفاع ریزش آب و سرعت مخصوص آن‌ها

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

همانگونه که از جدول ۱.۵ متوجه می‌شویم، در ارتفاع ریزش آب کم، توربین‌های با دور مخصوص زیاد استفاده می‌شود؛ زیرا در غیر این صورت در اثر سرعت زیاد سیال، تلفات توربین زیاد و بازده سیستم کم می‌گردد. این موضوع را می‌توان از رابطه ۲.۵ هم مشاهده نمود که با افزایش ارتفاع ریزش آب، سرعت مخصوص توربین کم می‌شود. همچنین با توجه به این که در سدهای با ارتفاع ریزش آب زیاد، توربین خود به خود سریع می‌چرخد، لذا توربین‌های با سرعت دور مخصوص کم بکار برده می‌شود. گفتنی است که سرعت مخصوص اولیه یک توربین بکار رفته را می‌توان با استفاده از نتایج تجربی قبلی و براساس رابطه زیر تعیین نمود:

$$N_s = \frac{K}{\sqrt{H}} = \frac{K}{H^{0.5}} \qquad (۳.۵)$$

که ضریب K را می‌توان براساس تجربیات و نتایج بدست آمده از انواع توربین نصب شده قبلی که در جدول ۲.۵ آمده است، تعیین نمود. با تعیین تقریبی سرعت مخصوص توربین از رابطه ۳.۵، می‌توان سرعت واقعی توربین را با استفاده از رابطه ۲.۵ تخمین زد.

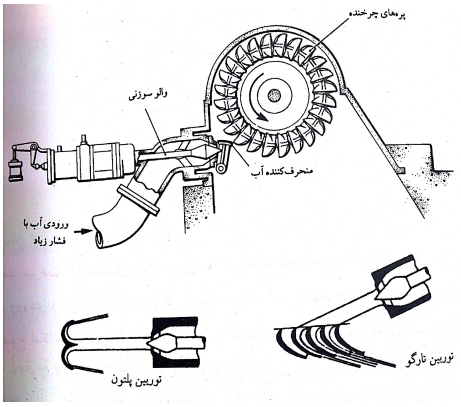
جدول ۲.۵: مقدار ضریب K برای انواع توربین‌های آبی

نوع توربین	ضریب K
کاپلان و بالب	۲۶۲۵
پروانه‌ای و لوله‌ای	۲۴۱۵
فرانسیس	۲۲۰۵
پلتون	۴۲۰

۳.۶.۵ توربین پلتون

طرح کلی این توربین‌ها در شکل ۳.۵ نشان داده شده است. همانگونه که قبلا هم بیان گردید، این توربین‌ها در سدهای با ارتفاع ریزش آب زیاد (معمولا بیشتر از ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر) و جریان آب کم بکار می‌روند. این نوع توربین‌ها از نوع ضربه‌ای هستند که در یا چند نازل موازی، تمام فشار آب، تبدیل به سرعت می‌شود. سپس آب با سرعت زیاد از طریق انژکتور و والو سوزنی داخل آن، به سمت قاشقک توربین (که

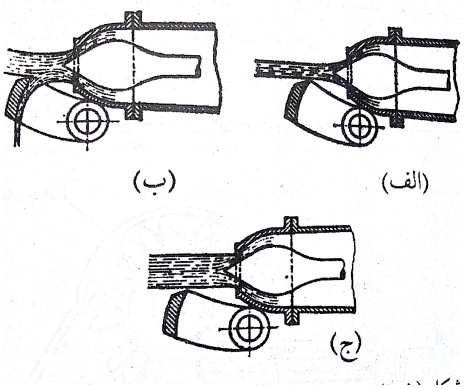
حکم پره‌های متحرک را دارند) هدایت می‌شود. با کنترل موقعیت والو سوزنی می‌توان دبی آب ورودی به قاشقک‌های توربین را تنظیم نمود. این عمل، توسط سیستم گاورنر نیروگاه صورت می‌گیرد. گفتنی است که در توربین پلتون، آب خروجی از نازل در هر لحظه، فقط به یک قاشقک برخورد می‌کند و در صورتی که آب خروجی در هر لحظه با چند قاشقک برخورد نماید، توربین تارگو [۱] نامیده می‌شود. این موضوع در شکل ۳.۵ مشخص شده است.



شکل ۳.۵: طرح کلی توربین پلتون

در مواقع کاهش سریع بار نیروگاه، باید آب ورودی توسط سوزن وسط انژکتور کم شود که این موضوع، توسط بسته شدن والو سوزنی انجام می‌پذیرد. اما این عمل، باعث ایجاد فشار شدید در لوله]ای منتهی به انژکتور می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل، از وسیله‌ای به نام منحرف‌کننده [۲] (دفلکتور) در مواقع کاهش سریع بار به سرعت در مقابل آب خروجی از انژکتور قرار می‌گیرد و سپس با حرکت آرام والو سوزنی و تنظیم دبی آب مورد نیاز، مجددا به محل خود برمی‌گردد. طرز کار این سیستم در شکل ۴.۵نشان داده شده است.

[۱] Turgo Turbines
[۲] Deflector



شکل ۴.۵: نحوه عملکرد منحرف‌کننده

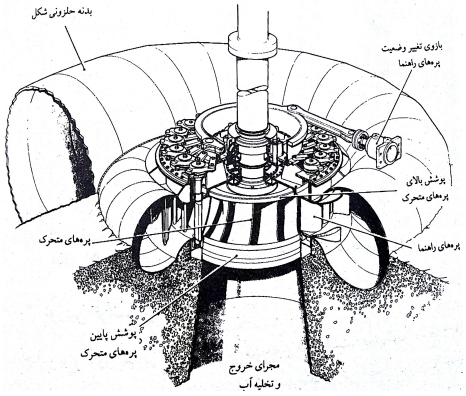
از نظر تئوری، حداکثر بازده توربین هنگامی اتفاق می‌افتد که سرعت محور توربین، نصف سرعت آب پاششی باشد و این موقعی است که پره‌های متحرک دقیقا ۱۸۰ درجه آب ورودی را برگرداند. البته در این زمان، سرعت آب تخلیه، صفر است که در عمل، این موضوع امکان‌پذیر نیست. در واقع نسبت سرعت چرخشی پره‌ها به سرعت آب پاششی بین ۰,۴۶ تا ۰,۴۷ می‌باشد. در نتیجه، بازده این نوع توربین حدود ۹۳ درصد می‌باشد.

۴.۶.۵ توربین فرانسیس

طرح این نوع توربین‌ها در شکل ۵.۵مشخص شده است. همانگونه که قبلا هم بیان گردید، این توربین‌ها برای نیروگاه‌های با ارتفاع آب متوسط ریزش آب و دبی آب جاری متوسط بکار می‌رود. آب پشت سد توسط کانال‌هایی وارد لوله‌های حلزونی شکل می‌گردد. سطح مقطع این لوله‌های حلزونی، مرتبا کاهش می‌یابد تا سیال بتواند با سرعت یکنواختی در تماس با پره‌های اصلی توربین قرار گیرد. آب با سرعت زیاد، پس از عبور از محفظه حلزونی شکل، توسط پره‌های راهنما [۱] به پره‌های اصلی برخورد می‌کند. وظیفه پره‌های راهنما، افزایش نهایی سرعت آب و جهت دادن مناسب به آب برای برخورد با پره‌های اصلی (به طور شعاعی) می‌باشد. با تغییر زاویه پره‌های راهنما می‌توان شدت جریان آب را تغییر داد که بالطبع، تعداد دور مخصوص هم تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، با بسته شدن کامل این پره‌ها، لبه‌های پره‌های مجاور با هم مماس می‌شوند و این موضوع، باعث قطع جریان آب به پره‌های اصلی می‌گردد. درجه باز شدن این پره‌ها، کمیت و جهت آب جاری شده (و طبیعتا قدرت توربین) را تغییر می‌دهد. در نتیجه با

[۱] Guide Vanes

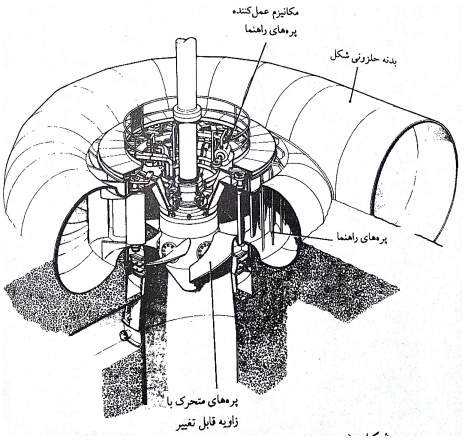
برخورد شعاعی آب با پره‌های اصلی متحرک، انرژی جنبشی به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل می‌شود. حداکثر بازده این نوع توربین‌ها بین ۹۴ تا ۹۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵.۵: طرح کلی یک توربین فرانسیس

۵.۶.۵ توربین کاپلان

طرح اساسی این توربین‌ها را می‌توان در شکل ۶.۵مشاهده نمود. خصوصیت اساسی این توربین‌ها آن است که جریان آب به طور محوری با پره‌های متحرک برخورد می‌کند. لوله حلزونی شکل و پره‌های راهنما دارای طرح و عملکردی مشابه توربین‌های فرانسیس هستند. آب با سرعت زیاد پس از عبور از پره‌های راهنما و قبل از برخورد به پره‌های متحرک، جهت محوری پیدا می‌کند تا حداکثر انرژی خود را به پره‌های متحرک منتقل نماید. معمولا تعداد این پره]ای متحرک بین ۴ تا ۶ عدد می‌باشد که عموما در نیروگاه‌ها قابل تنظیم می‌باشند. ابن موضوع باعث بالارفتن بازده این نوع توربین‌ها می‌شود و در توربین‌های بزرک تا مقدار ۹۴ درصد هم می‌رسد. با تغییر زاویه پره‌های متحرک، میزان آب جاری شده تغییر می‌کند و نهایتا قدرت مکانیکی محور تغییر می‌یابد.



شکل ۶.۵: طرح کلی یک توربین فرانسیس

عموما محور این توربین‌ها به صورت عمودی نصب می‌شود که در این حالت، مزایای زیر را به همراه خواهند داشت:

۱. طرح سیستم روغنکاری و یاتاقان‌ها به سادگی انجام می‌شود.

۲. نصب و تعمیر ژنراتور به آسانی انجام می‌شود.

۳. حفاظت توربین و دیگر تجهیزات جانبی با انجام بتن‌ریزی‌های محکم انجام می‌شود.

۴. تجهیزات را می‌توان برروی سطح بالای توربین نصب نمود که این موضوع، تعمیرات و نگه‌داری از تجهیزات را به آسانی مهیا می‌کند.

۵. غوطه‌ور نمودن پره‌های متحرک زیر دم آب خروجی به منظور از بین بردن کاویتاسیون، در مقایسه با غوطه‌ور نمودن مجموعه کامل با حداقل هزینه عمرانی همراه خواهد بود.

موضوع کاویتاسیون و راه‌های کاهش آن در انتهای این فصل آورده شده است.

۶.۶.۵ توربین‌های لوله‌ای

توربین‌های کاپلان بطور وسیعی در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوه رودخانه‌ها ارتفاع آب بسیار کم است. البته این طرح‌ها با مشکلاتی از جمله موارد زیر همراه است:

- غوطه‌ور کردن سیستم‌های توربین در داخل آب (به منظور جلوگیری از کاویتاسیون) نیاز به حفاری دارد که این موضوع هزینه زیادی را به همراه دارد.

- تغییرات متعدد جهت آب در لوله‌های باریک اتفاق می‌افتد و این موضوع باعث طراحی سیستم تیوب می‌شود که خود باعث افزایش تلفات هیدرولیکی می‌گردد.

این مشکلات باعث استفاده و گشترش توربین‌های لوله‌ای می‌شود که در آن‌ها سیستم چرخشی از نوع کاپلان با پره‌های ثابت یا متغیر است و محور ان کم و بیش به صورت افقی نصب می‌شود؛ بنابراین تا آن‌جا که ممکن است جهت آب از جهت محوری منحرف می‌شود. بازده این نوع توربین‌ها مشابه با توربین‌های کاپلان است. انواع این نوع توربین را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

(آ) توربین بالب [۱]

(ب) توربین تیوب [۲]

(ج) توربین ریم ژنراتور [۳]

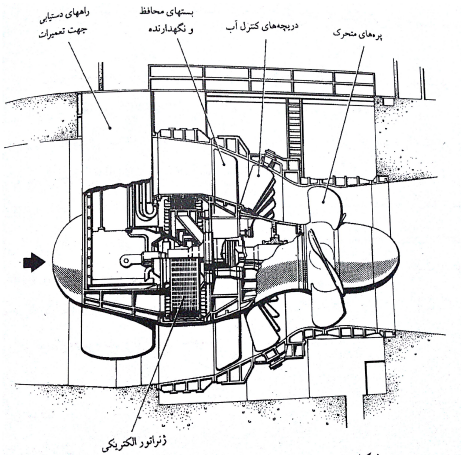
توربین بالب

طرح جداره این توربین به همراه ژنراتور آن در شکل ۷.۵مشخص شده است. پره‌های متحرک توربین در انتهای آن قرار گرفته‌اند و پره‌های راهنما قبل از توربین نصب می‌شوند.. شکل بدنه این توربین‌ها باید به طور مناسبی طراحی شوند تا تلفات هیدرولیکی آب به حداقل خود کاهش یابد. انواع مختلف طرح‌های این نوع توربین‌ها به سه صورت است: نوع اول آن که پره‌های متحرک روتور و پره‌های راهنما قابل تنظیم باشند. نوع دوم دارای پره‌های راهنما قابل تنظیم و پره‌های چرخنده ثابت می‌باشد. نوع سوم دربرگیرنده پره‌های راهنما ثابت و پره‌های چرخنده متحرک متغیر است.

این نوع توربین‌ها برروی رودخانه‌های کوچک نصب می‌شوند و در نتیجه دارای قدرت بسیار کمی هستند. ژنراتور به همراه توربین در داخل محفظه اصلی توربین واقع می‌شوند و کل این محفظه در داخل آب قرار می‌گیرد.

---

[۱] Bulb Turbine
[۲] Tube Turbine
[۳] Rim generator Turbine



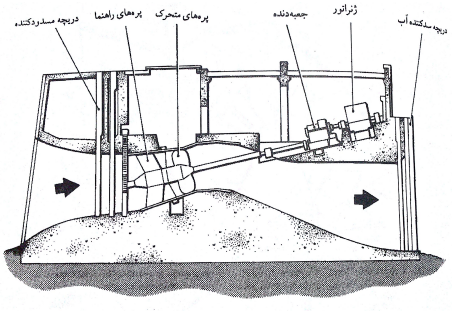
شکل ۷.۵: طرح کلی یک توربین بالب

توربین تیوب

دو عیب اساسی در توربین‌های بالب وجود دارد: اولا بخاطر فضای کم محفظه توربوژنراتور، نگه‌داری از ژنراتور با مشکل همراه است. ثانیا اینرسی بسیار کم قسمت‌های چرخشی (به خاطر فضای کم ژنراتور و قطر کم آن و سیستم چرخنده) در شبکه‌های تولیدی، ممکن است باعث ایجاد مسائل و مشکلاتی از قبیل عدم سنکرونیزم یا تغییرات فرکانس و سرعت ژنراتور شود.

با توجه به این دلایل، تیوب به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که فاقد مشکلات فوق باشد. به این ترتیب که به منظور دسترسی بهتر به ژنراتور، آن را در خارج از مسیر آب قرار می‌دهند و انرژی چرخشی از طریق یک محور بلند و یک جعبه‌دنده [۱] به محور ژنراتور منتقل می‌شود. در این حالت، کنترل فرکانس (و بالطبع کنترل سرعت) ژنراتور به راحتی امکان‌پذیر خواهد بود. البته در این نوع توربین‌ها، مشکلات دیگری از قبیل دراز بودن محور انتقالی و نیز ترتیب یاتاقان‌ها بوجود می‌آید. طرح کلی این نوع توربین‌ها را می‌توان در شکل ۸.۵ مشاهده نمود.

[۱] Gearbox



شکل ۸.۵: طرح کلی یک توربین بالب

توربین ریم ژنراتور

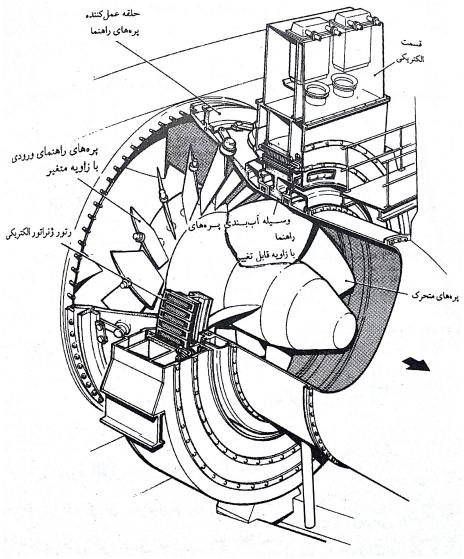
این نوع توربین که در آن روتور توربین و ژنراتور یکی می‌شوند در شکل ۹.۵ مشخص شده است. پره‌های گردنده توربین بوسیله یک حلقه محیطی پوشیده می‌شوند که قطب‌های الکتریکی ژنراتور متصل به این حلقه می‌باشند و این حلقه هم توسط استاتور ژنراتور محصور می‌گردد. این طرح به‌نام استرافلو [۱] می‌باشد که توسط آقای اسچرویس [۲] طراحی شده است. بازده این نوع توربین‌ها قابل مقایسه با دیگر توربین‌های لوله‌ای است. از خصوصیات این توربوژنراتور می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. دسترسی به ژنراتور بسیار راحت است و بخاطر قطر بزرگ سیستم چرخند، اینرسی آن بسیار زیاد خواهد بود و در نتیجه مشکلی از نظر ناپایداری محور وجود ندارد. مسائل طراحی این نوع توربوژنراتورها، بیشتر مربوط به توربین آن می‌باشد (تا قسمت‌های الکتریکی آن). همچنین در طراحی باید دقت نمود که با توجه به قطرهای بسیار زیاد محور توربین تعادل محور کنترل گردد.

۲. بمنظور جلوگیری از نفوذ آب به قسمت الکتریکی ژنراتور، نیاز به لایه‌های پوششی می‌باشد تا بین حلقه چرخشی توربین و بدنه ثابت مجرای آب قرار گیرد.

۳. با استفاده از پره‌های متحرک غیرقابل‌تنظیم، هزینه این واحدها در مقایسه با دیگر توربین‌های لوله‌ای قابل رقابت می‌باشد. با توجه به محدوده بسیار کم بالاترین بازده این نوع توربین‌ها و برای استفاده بهینه از انرژِ آب، باید در قسمت خروجی سیستم از تعداد زیادی توربوژنراتور استفاده شود؛ و یا این که پره‌های چرخنده قابل تنظیم باشند. استفاده از این نوع روش‌ها مسائل رقابتی را در شرمایه‌گذاری توربین‌های مذکور کم می‌کند.

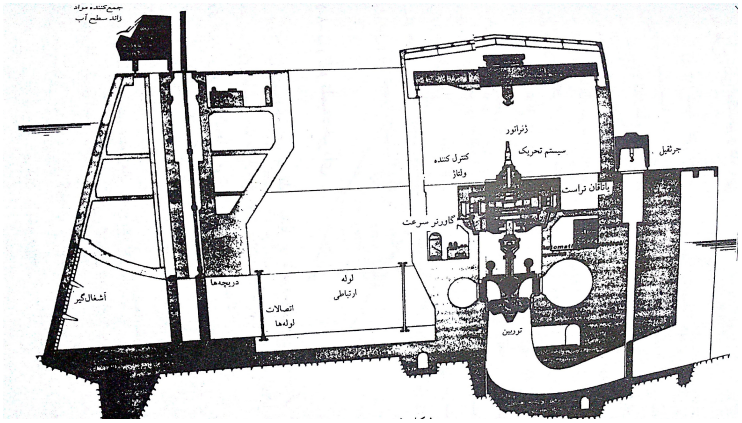
---
[۱] Straflo
[۲] Escher Wyss



شکل ۹.۵: طرح کلی یک توربین ریم ژنراتور

۷.۵ طرح کلی یک نیروگاه آبی

در شکل ۱۰.۵ شمای کلی یک نیروگاه برق آبی با تجهیزات عمرانی، مکانیکی و برقی نشان داده شده است. همانگونه که از روی شکل هم مشخص است، آب جمع شده در پشت سد وارد کانال‌ها و مجازی عبور آب توربین می‌شود. قبل از ورود آب به این کانال‌ها باید تمام مواد زائد و شناور موجود در آب در ابتدای کانال گرفته شود. با عبور آب از کانال‌های انتقال، سرعت و فشار آن به حد مناسبی می‌رسد تا با ریزش بر روی پره‌های توربین، حداکثر انرژی از آب سد به توربین منتقل شود. با اتصال محور توربین به محور ژنراتور، انرژی مکانیکی به روتور ژنراتور منتقل می‌شود و در ژنراتور، تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی صورت می‌گیرد. با توجه به این که در اکثر نیروگاه‌های آبی، محور توربین و ژنراتور، عمودی است، برای نگه‌داری این محور از یاتاقان‌های تراست استفاده می‌شود. در کنار ژنراتور و برای کنترل ولتاژ و فرکانس، باید از گاورنرهای سرعت و سیستم تحریک استفاده نمود. در قسمت بالایی محفظه‌های اتاق ژنراتور، جرثقیل بزرگی برای حمل و نقل تجهیزات نصب شده است.



شکل ۱۰.۵: طرح کلی یک نیروگاه آبی

۸.۵ پدیده کاویتاسیون در نیروگاه‌های آبی

۱.۸.۵ مراحل ایجاد کاویتاسیون

در حین عبور آب از لوله هدایت آب (محفظه حلزونی شکل)، اطراف پره‌های هادی و دریچه‌ها و همچنین خود توربین‌ها و لوله تخلیه آب [۱] ، ممکن است پدیده‌ای رخ دهد که به کاویتاسیون موسوم است و چگونگی به وقوع پیوستن و کنترل آن به سادگی قابل درک نمی‌باشد.

پدیده کاویتاسیون زمانی اتفاق می‌افتد که فشار موضعی از فشار بخار سیال مایع در حال حرکت کمتر شود. در چنین حالتی حباب‌هایی که نشان‌دهنده ذرات تبخیر شده می‌باشند، در داخل مایع پدیدار می‌گردد. در اثر ایجاد و از بین رفتن مستمر این حباب‌ها، پدیده‌ای فرسایشی برروی بدنه قطعات مذکور ایجاد می‌گردد. هر چند که چگونگی وقوع این پدیده تا حدود زیادی شناخته شده است، لکن حل نظری این پدیده به سادگی میسر نیست و بیشتر محققان در سه دهه گذشته بررسی‌های خود را بر مبنای آزمایش‌های تجربی و به کمک دستگاهی به نام "تونل کاویتاسیون" انجام داده‌اند. وارنیک [۲] در کتاب خود به برخی از مطالعات انجام شده اشاره نموده است. نپ و هلندر [۳] در سال ۱۹۴۸ از اولین افرادی بودند که پدیده مذکور را با روش عکس‌برداری سریع مورد مطالعه قرار دادند. عکس‌های آن‌ها نشان‌دهنده تشکیل، رشد و از بین رفتن حباب‌ها بود. قطر حباب‌های تشکیل شده به ۰,۲۵ اینچ می‌رسد و با سرعتی معادل $۲۳۳ \frac{m}{sec}$ (معادل با $۷۶۵ \frac{ft}{sec}$) از بین می‌روند که مدت زمان عمر هر حباب هم در حدود ۰,۰۰۳ ثانیه می‌باشد.

[۱] Draft Tube
[۲] Varnick
[۳] Knapp and Hollander

با استفاده از تئوری ضربه قوچ محاسبه می‌شود که فشار وارد بر بدنه جسم در اثر ایجاد و از بین رفتن حباب‌ها به مقدار $۳۴۰atm$ (معادل با $۵۰۰۰psi$) می‌رسد. ایجاد چنین فشاری به صورت متناوب برروی بدنه، موجب بروز پدیده خستگی در فلز و در نتیجه فرسایش آن می‌گردد. مطالعات نپ و دیلی [۱] در سال ۱۹۷۰ نشان داده است که عامل موثر در فرسایش پره‌های توربین آبی، پدیده کاویتاسیون می‌باشد.
ایجاد پدیده کاویتاسیون از بسیاری جهات شبیه پدیده جوش می‌باشد. در پدیده جوش نیز زمانی که در اثر افزایش دما مایع، فشار به بالای فشار بخار اشباع می‌رسد، حباب‌های بخار در جداره ظرف پدیدار شده، شروع به رشد می‌نمایند. پس از گذشت زمان اندکی (به علت تماس با مایع سرد اطراف)، مجددا فشار کاهش می‌یابد و حباب‌ها از بین می‌روند.
مکانیزم حرارت منتقل شده توسط تشکیل حباب و سپس حرارت منتقل شده از حباب به مایع در شکل ۱۱.۵ مشخص گردیده است که به ترتیب ذیل شرح داده می‌شود:

۱. مایع مجاور دیوار، حرارت داده می‌شود (درجه حرارت دیوار بالاتر از درجه حرارت اشباع مایع می‌گردد).

۲. یک ذره بخار در محل برجستگی‌ها و یا شکاف‌های کوچک دیواره ظاهر می‌گردد که بعدا رشد می‌کند تا به حباب تبدیل گردد.

۳. با رشد حباب ایجاد شده، این حباب، مایع مجاور دیواره را شکافته و مایع خارجی (مایع سردتر) را مطابق شکل در جهتی که با علامت پیکان نشان داده شده است، به طرف خارج هدایت می‌کند.

۴. در این حالت، حباب با مایع سردتر تماس پیدا می‌کند ولی کماکان به رشد خود ادامه می‌دهد. البته درجه حرارت آن کاهش می‌یابد؛ اما رشد آن (به علت دریافت حرارت کمتر بر واحد حجم) آهسته‌تر خواهد بود.

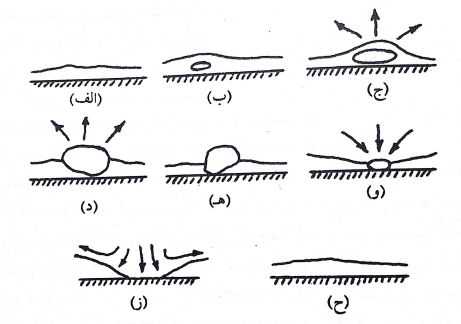
۵. در این حالت، حباب به حدی رشد کرده است که حرارت دریافتی (که از طریق هدایت از سطح حرارت‌دهنده می‌گیرد) کمتر از حرارتی است که (در اثر تبخیر و یا عمل جابجایی) به مایع سرد می‌دهد.

۶. در این مرحله نیروی اینرسی (رانش) کاهش می‌یابد و موجب می‌گردد تا مجددا از حجم حباب کاسته شود. این کاهش نیرو تا حدی است که حباب، ناپدید گردد.

[۱] Knapp Daily

۷. با از بین رفتن حباب، نیروی اینرسی موجود در مایع سرد (که موجب در هم ریختن و از بین بردن حباب شده است) باعث می‌شود تا این مایع، با سرعت زیادی به بدنه سطح حرارت‌دهنده برخورد کند.

۸. در این حالت، دوباره لایه مایع مجاور سطح حرارت‌دهنده به حالت پایدار می‌رسد و سیکل فوق تکرار می‌گردد.



شکل ۱۱.۵: مراحل ایجاد پدیده کاویتاسیون

معمولا وقوع کاویتاسیون توام با ایجاد صدا، ارتعاش و افت عملکرد توربین می‌باشد. همچنین تعیین موقعیت شروع کاویتاسیون نیز دشوار است؛ زیرا در زمان بسیار کوتاهی، حباب‌ها ایجاد شده و رشد می‌کنند و نهایتا در محل ناپدید شدن، ضربات فشاری را بر پیکر و بدنه جسم وارد می‌نمایند. در اغلب موارد با استفاده از ساخت مدل و بررسی در حول و حوش آن، می‌توان به مقابله با این پدیده پرداخت.

۲.۸.۵ ضریب کاویتاسیون توما

یکی از پارامترهای مهمی که در کارخانه‌های ساخت توربین و در صنایع، در زمینه پدیده کاویتاسیون بکار گرفته می‌شود، معروف به ضریب کاویتاسیون توما [۱] است. این ضریب یکی از عوامل بسیار مهم در انتخاب توربین می‌باشد که به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_P = \frac{H_a - H_v - H_s}{H} \qquad (۴.۵)$$

که در این رابطه،

σ_P = ضریب کاویتاسیون (سیگما دستگاه) [۲]

[۱] Thoma Cavitation Coefficient
[۲] Plant Sigma

H_a = ارتفاع فشار اتمسفر برحسب $mmHg$

H_v = ارتفاع فشار بخار آب برحسب m

H_s = فاصله بین دهانه خروجی یا خط وسط پره‌ها با حداقل سطح پایین‌دست آب [۱] خروجی از دهانه توربین برحسب m

H = حداکثر ارتفاع خالص در شرایط بهره‌برداری برحسب m

در جدول ۳.۵ مقدار ارتفاع فشار اتمسفر (H_a) برحسب m بیان شده است. همچنین مقادیر ارتفاع فشار بخار آب (H_v) در جدول ۴.۵ مشخص شده است. در شکل ۱۲.۵ مقدار ارتفاع H_s نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است، در توربین فرانسیس از نوع محوری، مقدار H معرف فاصله سطح پایین‌دست آب تا قسمت ته توربین (که در آن قسمت، آب از پره‌های توربین خارج می‌شود) می‌باشد. در مورد توربین‌های از نوع پروانه‌ای، این مقدار، معرف فاصله سطح پایین‌دست آب نسبت به خط مرکزی پره‌های توربین است. در ضمن، در توربین‌هایی با محور افقی نیز، فاصله بین سطح پایین‌دست آب تا قیمت بالای پره‌ها به عنوان H_s در نظر گرفته می‌شود.

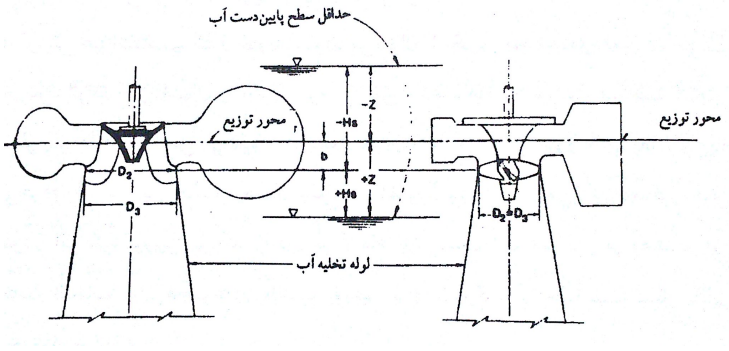
جدول ۳.۵: ارتفاع فشار اتمسفر

ارتفاع (m)	$H_s(mmHg)$	$H_a(m)H_2O$
۰	۷۶۰	۱۰,۳۵۱
۵۰۰	۷۱۵,۹۹	۹,۷۵۱
۱۰۰۰	۶۷۴,۰۷	۹,۱۸
۱۵۰۰	۶۳۴,۱۶	۸,۶۳۷
۲۰۰۰	۵۹۶,۱۸	۸,۱۲
۲۵۰۰	۵۶۰,۰۷	۷,۶۲۸
۳۰۰۰	۵۲۵,۷۵	۷,۱۶
۳۵۰۰	۴۹۳,۱۵	۶,۷۱۶
۴۰۰۰	۴۶۲,۲۱	۶,۹۲۵

جدول ۴.۵: ارتفاع فشار بخار آب

دما (^OC)	$H_v(m)$
۵	۰,۰۸۹
۱۰	۰,۱۲۵
۱۵	۰,۱۷۴
۲۰	۰,۲۳۹
۲۵	۰,۳۲۴

[۱] Tail Water



شکل ۱۲.۵: محل استقرار توربین‌های فرانسیس و پروانه‌ای با محور عمودی و نمایش H_s روی این توربین‌ها

۳.۸.۵ کنترل کاویتاسیون

راه‌های متعددی برای کنترل کاویتاسیون وجود دارد، ولیکن موثرترین روش این است که سیستم توربین بگونه‌ای طراحی و انتخاب شود که ضریب کاویتاسیون (و یا سرعت) از حد مجاز تجاوز ننماید. البته انجام این عمل بستگی به هزینه‌های احداث نیز خواهد داشت. به عنوان مثال، ممکن است لازم نباشد تا سیستم تورین خیلی پایین‌تر از سطح پایین‌دست آب قرار گیرد. در این صورت، هزینه خاک‌برداری، بتن‌ریزی و ... به هزینه‌های احداث اضافه می‌شود. از این رو در بعضی مواقع، وجود مقداری کاویتاسیون و در عوض، انتخاب توربینی با بدنه محکم‌تر در مقابل فرسایش می‌تواند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

در بسیاری از موارد، یک لایه مقاوم در مقابله با کاویتاسیون، برروی فلز اصلی جوش داده می‌شود. موقعیت، محل و وسعت این نواحی (که نیاز به پوشانده شدن توسط این لایه را دارد)، از طریق ساخت مدل و انجام آزمایش‌های تجربی بر روی آن بدست می‌آید. تقریبا تمام توربین‌های صنعتی، پدیده کاویتاسیون را تا حدودی تجربه می‌کنند و قسمت‌هایی که در اثر کاویتاسیون فرسوده می‌شوند، به کمک جوشکاری مجددا پر و بازسازی می‌گردند. در برخی موارد، با قرار دادن زوائد و فین‌هایی [۱] اضافی برروی پره‌های توربین، سعی می‌شود تا اثر کاویتاسیون به حداقل برسد.

در روش غیرمستقیم کنترل کاویتاسیون، می‌توان با تعیین محدوده تغییرات سرعت توربین، اثرات کاویتاسیون را کنترل نمود. افزایش سرعت آب در حین عبور از پره‌ها نیز زیاد می‌گردد. لذا در این حالت، احتمال وقوع کاویتاسیون نیز افزایش می‌یابد. به منظور خنثی نمودن اثر، توربین نیروگاه را در زیر ارتفاع پایین‌دست

[۱] Fins

آب سد قرار می‌دهند. از این لحاظ، انتخاب یک مجموعه مناسب توربین برای نیروگاه، از حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد.

۹.۵ روند انتخاب مشخصات توربین

۱.۹.۵ مقدمه

داده‌های مورد نیاز در انتخاب یک توربین آبی را می‌توان شامل ارتفاع قابل دسترس آب، میزان دبی، منحنی تغییرات سطح پایین‌دست آب، ارتفاع موقعیت نصب، دمای آب، میزان تقاضای بار، نیازمندی‌های بهره‌برداری و کیفیت آب دانست. بعد از انجام مطالعات اولیه و برآورد امکان ساخت سد و نصب توربین نیاز به مطالعات بهینه‌سازی انجام طرح می‌باشد تا مشخصاتی از قبیل ارتفاع سطح پایین‌دست آب، ارتفاع سد، محدودیت‌های بهره‌برداری، تعداد واحدهای نیروگاه، سرعت چرخش توربین، مقدار خروجی واحدها و ... بدست آید.

۲.۹.۵ داده‌های بهره‌برداری

از مهمترین داده‌های مورد نیاز بهره‌برداری در انتخاب توربین می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. ارتفاع آب پشت سد (منحنی آب پشت سد از مطالعات برنامه‌ریزی بدست می‌آید).

۲. ارتفاع سطح پایین‌دست آب (این ارتفاع از منحنی سطح پایین‌دست آب بدست می‌آید).

۳. ارتفاع حداکثر آب.

۴. ارتفاع‌های موثر توربین، شامل ارتفاع حداکثر (بالاترین نقطه دریچه خروج آب اضطراری با عملکرد یک واحد)، ارتفاع متوسط (با توجه به مقدار مورد نیاز در ذخیره آب پشت سد)، ارتفاع حداقل برای ظرفیت قابل قبول و ارتفاع کمتر از حداقل (با درصد احتمال وقوع بسیار کم).

۵. ارتفاع طراحی شده برای سد (ارتفاع خالصی که در آن بازده توربین حداکثر است).

۶. ارتفاع نامی برای سد (ارتفاع خالصی که در آن توربین قادر به تولید خروجی بطور مداوم باشد).

۷. ترتیب پیشنهادی کلی (موقعیت اتاق هیدروژنراتور با توجه به ارتفاع آب و ابعاد تقریبی طول و نقشه مجاری آب).

۳.۹.۵ محدوده ارتفاع ریزش آب

اولین قدم در انتخاب توربین، محدوده تقریبی ارتفاع ریزش آب است. در جدول ۵.۵نوع توربین مناسب با ارتفاع ریزش‌های متفاوت نشان داده شده است.

البته ارتفاع ارائه شده در جدول مذکور، قطعیت کاملی ندارد و در بعضی مواقع همپوشانی می‌شوند و حتی در شرایط خاص هم می‌توان از این محدوده‌ها خارج شد. در مواقعی که همپوشانی در انتخاب نوع توربین ایجاد می‌شود، لازم است به شرایط دیگری از قبیل مزایا و معایب توربین‌ها، ابعاد فیزیکی هر توربین و بازده هر یک از قسمت‌ها توجه خاصی صورت گیرد.

جدول ۵.۵: محدوده تقریبی ارتفاع ریزش آب با توجه به نوع توربین

نوع توربین	ارتفاع ریزش آب برحسب m
ضربه‌ای	۱۵۰ - ۱۷۰۰
فرانسیس	۱۵ - ۲۶۰
پروانه‌ای	۳ - ۷۵

به