

# شناسایی اکوسیستم توربین‌های آبی در ایران و رصد فناوری مربوطه

NRI-ER-677-PMEPN37-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.302

نام مدیر پروژه: علی صالحی شبستری  
نام مجری: احسان توکی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# شناسایی اکوسیستم توریین‌های آبی در ایران و رصد فناوری مربوطه

مدیر پروژه:

علی صالحی شبستری

همکار/همکاران پروژه:

حمیدرضا افضلی (ناظر)

مجری:

احسان توکلی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-677-PMEPN37-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.30

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی  
شناسایی اکوسیستم توربین‌های آبی در ایران و رصد فناوری مربوطه/ علی صالحی  
شبستری. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.  
۱۰۱ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. صالحی شبستری، علی، افضلی، حمیدرضا، همکاران پروژه. ۲. توکلی، احسان،  
مجری. ۳. پژوهشگاه نیرو، کارفرما. ۴. حرارت و سیالات، محور اصلی پروژه.



انتشارات پژوهشگاه نیرو  
گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: [www.nri.ac.ir](http://www.nri.ac.ir)

پست الکترونیک انتشارات: [publications@nri.ac.ir](mailto:publications@nri.ac.ir)

### فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب علی صالحی شبستری متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. علی صالحی شبستری

۲. حمیدرضا افضلی (ناظر)



## پیشگفتار

گزارش حاضر در راستای انجام پروژه «شناسایی اکوسیستم توریین‌های آبی در ایران و رصد فناوری مربوطه» تهیه شده است. در این گزارش ابتدا تاریخچه موضوع و اهداف و محدوده مطالعات بیان شده و سپس بازیگران کلیدی این حوزه مورد شناسایی قرار گرفته‌اند. در ادامه ویژگی‌های فناوری توریین‌های آبی شرح داده شده است. سپس حوزه‌های فناورانه شناسایی شده و روند تحولات آن‌ها بیان گردیده و پیشروان فناوری در این حوزه شامل شرکت‌های پیشرو، دانشگاه‌ها و مؤسسات مطرح و نیز پژوهشگران برجسته در سطح بین‌المللی مورد شناسایی قرار گرفته‌اند. در خاتمه نیز آینده‌پژوهی فناوری توریین‌های آبی انجام شده است.

| عنوان<br>صفحه | فهرست مطالب | شماره |
|---------------|-------------|-------|
|---------------|-------------|-------|

|                                                                          |         |
|--------------------------------------------------------------------------|---------|
| پیشگفتار.....                                                            | أ       |
| ۱- شناخت اکوسیستم توربین‌های آبی (فاز تشخیص).....                        | ۱       |
| ۱-۱- مقدمه.....                                                          | ۱-۱     |
| ۱-۲- تاریخچه توربین آبی.....                                             | ۱-۲     |
| ۱-۲-۱- اهمیت اقتصادی و صنعتی چرخ‌های آبی از قرون وسطی تا قرن نوزدهم..... | ۱-۲-۱   |
| ۱-۲-۲- ارتقای چرخ‌های آبی عمودی در سالهای ۱۸۲۴ تا ۱۸۹۰ میلادی.....       | ۱-۲-۲   |
| ۱-۲-۳- قرن توربین (۱۸۲۶ تا ۱۹۲۶ میلادی).....                             | ۱-۲-۳   |
| ۱-۲-۳-۱- توربین فرانسوی.....                                             | ۱-۲-۳-۱ |
| ۱-۲-۳-۲- توربین‌های ضربه‌ای برای هدهای بسیار زیاد.....                   | ۱-۲-۳-۲ |
| ۱-۲-۳-۳- توربین‌های پربازده برای هدهای بسیار پایین.....                  | ۱-۲-۳-۳ |
| ۱-۲-۴- توربین‌ها و توسعه نیروگاه‌های برق آبی.....                        | ۱-۲-۴   |
| ۱-۲-۴-۱- سیستم‌های پیچیده مدیریت آب.....                                 | ۱-۲-۴-۱ |
| ۱-۲-۵- خلاصه.....                                                        | ۱-۲-۵   |
| ۱-۳- انواع توربین آبی.....                                               | ۱-۳     |
| ۱-۳-۱- توربین‌های ضربه‌ای.....                                           | ۱-۳-۱   |
| ۱-۳-۱-۱- توربین پلتن.....                                                | ۱-۳-۱-۱ |
| ۱-۳-۱-۲- توربین تورگو.....                                               | ۱-۳-۱-۲ |
| ۱-۳-۲- توربین‌های عکس‌العملی.....                                        | ۱-۳-۲   |
| ۱-۳-۲-۱- توربین فرانسوی.....                                             | ۱-۳-۲-۱ |
| ۱-۳-۲-۲- توربین کاپلان.....                                              | ۱-۳-۲-۲ |
| ۱-۳-۲-۳- توربین دریاز.....                                               | ۱-۳-۲-۳ |
| ۱-۴- گروه پمپ - توربین.....                                              | ۱-۴     |
| ۱-۵- مقایسه محدوده کار توربین‌های آبی.....                               | ۱-۵     |
| ۱-۵-۱- سرعت مخصوص.....                                                   | ۱-۵-۱   |
| ۱-۶- هدف و محدوده موضوعی مطالعات.....                                    | ۱-۶     |
| ۱-۷- مدل استفاده شده برای شناسایی بازیگران کلیدی.....                    | ۱-۷     |
| ۱-۸- نهادهای حاکمیتی (سیاست‌ساز، سیاستگذار و تنظیمگر).....               | ۱-۸     |
| ۱-۸-۱- مجلس شورای اسلامی.....                                            | ۱-۸-۱   |
| ۱-۸-۲- مجمع تشخیص مصلحت نظام.....                                        | ۱-۸-۲   |
| ۱-۸-۳- معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری.....                            | ۱-۸-۳   |
| ۱-۸-۴- سازمان برنامه و بودجه کشور.....                                   | ۱-۸-۴   |
| ۱-۸-۵- وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.....                                 | ۱-۸-۵   |
| ۱-۸-۶- وزارت صنعت، معدن و تجارت.....                                     | ۱-۸-۶   |
| ۱-۸-۷- وزارت نیرو.....                                                   | ۱-۸-۷   |
| ۱-۸-۸- سازمان حفاظت محیط زیست.....                                       | ۱-۸-۸   |
| ۱-۸-۹- شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران.....                        | ۱-۸-۹   |
| ۱-۸-۱۰- پژوهشگاه نیرو.....                                               | ۱-۸-۱۰  |
| ۱-۸-۱۱- مؤسسه تحقیقات آب.....                                            | ۱-۸-۱۱  |

|    |                                                                           |        |
|----|---------------------------------------------------------------------------|--------|
| ۲۸ | سازمان ملی استاندارد ایران                                                | ۱-۸-۱۲ |
| ۲۹ | دانشگاهها و مراکز پژوهشی                                                  | ۱-۹    |
| ۲۹ | مؤسسه توربوماشینهای آبی دانشگاه تهران                                     | ۱-۹-۱  |
| ۳۰ | پژوهشگران و انجمنها                                                       | ۱-۱۰   |
| ۳۰ | انجمن هیدرولیک ایران                                                      | ۱-۱۰-۱ |
| ۳۰ | انجمن برق آبی ایران                                                       | ۱-۱۰-۲ |
| ۳۰ | پژوهشگران                                                                 | ۱-۱۰-۳ |
| ۳۱ | شرکت‌ها                                                                   | ۱-۱۱   |
| ۳۱ | شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران                                         | ۱-۱۱-۱ |
| ۳۲ | شرکت صنایع آذرآب                                                          | ۱-۱۱-۲ |
| ۳۳ | شرکت فراب                                                                 | ۱-۱۱-۳ |
| ۳۴ | شرکت مهندسی ساخت صنایع فولاد سایا                                         | ۱-۱۱-۴ |
| ۳۴ | شرکت مهتاب قدس                                                            | ۱-۱۱-۵ |
| ۳۴ | شرکت مهندسی قدس نیرو                                                      | ۱-۱۱-۶ |
| ۳۵ | شرکت غلتک سازان سپاهان                                                    | ۱-۱۱-۷ |
| ۳۵ | شرکت نصب، تعمیر و نگهداری نیروگاه‌های برق آبی خوزستان                     | ۱-۱۱-۸ |
| ۳۶ | جایگاه نیروگاه‌های برق آبی در صنعت برق                                    | ۱-۱۲   |
| ۳۷ | ویژگی‌های فناوری توربینهای آبی                                            | ۱-۱۳   |
| ۳۷ | طراحی هیدرولیکی                                                           | ۱-۱۳-۱ |
| ۳۸ | ساخت                                                                      | ۱-۱۳-۲ |
| ۳۸ | محدوده‌های عملکرد هموار توربین آبی                                        | ۱-۱۳-۳ |
| ۳۹ | تحلیل PESTEL                                                              | ۱-۱۴   |
| ۴۰ | مطالعه عوامل سیاسی                                                        | ۱-۱۴-۱ |
| ۴۰ | مطالعه عوامل اقتصادی                                                      | ۱-۱۴-۲ |
| ۴۱ | مطالعه عوامل اجتماعی                                                      | ۱-۱۴-۳ |
| ۴۱ | مطالعه عوامل فناوری                                                       | ۱-۱۴-۴ |
| ۴۲ | مطالعه عوامل زیست محیطی                                                   | ۱-۱۴-۵ |
| ۴۲ | مطالعه عوامل قانونی                                                       | ۱-۱۴-۶ |
| ۴۲ | خلاصه نتایج                                                               | ۱-۱۵   |
| ۴۳ | <b>۲-هوشمندی فناوری توربینهای آبی (فاز کاوش)</b>                          |        |
| ۴۴ | فناوری‌های در حال رشد                                                     | ۲-۱    |
| ۴۵ | فناوری‌های کنترلی به منظور کاهش ناپایداری جریان آب                        | ۲-۲    |
| ۴۵ | روشهای کنترل غیرفعال                                                      | ۲-۲-۱  |
| ۴۷ | روشهای کنترل فعال                                                         | ۲-۲-۲  |
| ۴۹ | روشهای کنترل مغناطیسی - رئولوژیکی                                         | ۲-۲-۳  |
| ۴۹ | فناوری‌های مرتبط با ناپایداری توربین فرانسوی در نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای | ۲-۳    |
| ۴۹ | برهمکنش سیال و سازه                                                       | ۲-۳-۱  |
| ۵۱ | شرایط کارکرد گذرا                                                         | ۲-۳-۲  |

|    |                                                                |        |
|----|----------------------------------------------------------------|--------|
| ۵۱ | دیجیتالی سازی عملکرد توربینهای آبی                             | ۲-۴    |
| ۵۴ | توربینهای آبی دور متغیر                                        | ۲-۵    |
| ۵۸ | توربینهای آبی دوستدار ماهی                                     | ۲-۶    |
| ۵۹ | طراحی توربینهای دوستدار ماهی                                   | ۲-۶-۱  |
| ۶۰ | شرکتهای پیشرو                                                  | ۲-۷    |
| ۶۰ | شرکت توشیبا                                                    | ۲-۷-۱  |
| ۶۲ | شرکت جنرال الکتریک                                             | ۲-۷-۲  |
| ۶۲ | شرکت هاربین الکتریک                                            | ۲-۷-۳  |
| ۶۳ | شرکت فویت                                                      | ۲-۷-۴  |
| ۶۴ | شرکت آندریتز                                                   | ۲-۷-۵  |
| ۶۶ | دانشگاهها و مراکز پژوهشی                                       | ۲-۸    |
| ۶۶ | لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر                                  | ۲-۸-۱  |
| ۶۷ | هیدروسن                                                        | ۲-۸-۲  |
| ۶۸ | مؤسسه تحقیقات منابع آب و انرژی برق آبی چین                     | ۲-۸-۳  |
| ۶۸ | انستیتو فناوری رورکی هند                                       | ۲-۸-۴  |
| ۶۹ | مؤسسه فناوری فدرال لوزان (بستر فناوری برای ماشین های هیدرولیک) | ۲-۸-۵  |
| ۶۹ | پژوهشگران                                                      | ۲-۹    |
| ۶۹ | فرانسوا اولان                                                  | ۲-۹-۱  |
| ۶۹ | اوله گونار دالهاگ                                              | ۲-۹-۲  |
| ۷۰ | میشل سروانتس                                                   | ۲-۹-۳  |
| ۷۰ | کریستف نیکولت                                                  | ۲-۹-۴  |
| ۷۰ | روش آینده پژوهی فناوری                                         | ۲-۱۰   |
| ۷۰ | پیمایش مقالات و اختراعات                                       | ۲-۱۱   |
| ۷۲ | زمینه‌های محتمل برای توسعه فناوری توربین آبی فرانسیس در آینده  | ۲-۱۲   |
| ۷۳ | گردابه و جریان در لوله رانش                                    | ۲-۱۲-۱ |
| ۷۳ | پره‌ها                                                         | ۲-۱۲-۲ |
| ۷۴ | کاویتاسیون                                                     | ۲-۱۲-۳ |
| ۷۵ | محفظه حلزونی                                                   | ۲-۱۲-۴ |
| ۷۶ | دینامیک سیالات محاسباتی                                        | ۲-۱۲-۵ |
| ۷۷ | ساخت و تولید                                                   | ۲-۱۲-۶ |
| ۷۸ | نتیجه‌گیری                                                     | ۲-۱۳   |
| ۷۸ | حوزه‌های محتمل برای توسعه فناوری توربین آبی در آینده           | ۲-۱۴   |
| ۸۰ | ۳-مراجع فارسی                                                  |        |
| ۸۲ | ۴-مراجع لاتین                                                  |        |

| عنوان       | شماره | صفحه |
|-------------|-------|------|
| فهرست مطالب |       |      |

| عنوان       | شماره صفحه |
|-------------|------------|
| فهرست شکلها |            |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| شکل ۱-۱: کارخانهای نساجی ساخته شده در شمال شرق ایالات متحده که با نیروی آب کار میکنند [2].....                                               | ۳  |
| شکل ۲-۱: توریسم فورنیرون که اولین توریسم آبی عکس العملی در دنیا بود. در این توریسم پره های توزیع کننده (B) داخل چرخ (C) قرار داشتند [2]..... | ۵  |
| شکل ۳-۱: نمای یک توریسم فرانسیس ۱۸۰ کیلوواتی که در سال ۱۸۸۲ میلادی ساخته شد [2].....                                                         | ۵  |
| شکل ۴-۱: نمای شماتیک توریسم کاپلان [3].....                                                                                                  | ۶  |
| شکل ۵-۱: افزایش توان تولیدی توریسم های آبی مختلف طی دو قرن اخیر [2].....                                                                     | ۸  |
| شکل ۶-۱: افزایش هد آب قابل استفاده در توریسم های آبی مختلف طی دو قرن اخیر [2].....                                                           | ۹  |
| شکل ۷-۱: اجزای اصلی توریسم پلتن [۱].....                                                                                                     | ۱۱ |
| شکل ۸-۱: چرخ توریسم پلتن [4].....                                                                                                            | ۱۱ |
| شکل ۹-۱: توریسم تورگو [5].....                                                                                                               | ۱۲ |
| شکل ۱۰-۱: نمای توریسم فرانسیس و اجزای آن [6].....                                                                                            | ۱۳ |
| شکل ۱۱-۱: چرخ توریسم فرانسیس با ۱۴ پره [7].....                                                                                              | ۱۴ |
| شکل ۱۲-۱: چرخ توریسم کاپلان با پره های قابل تنظیم [8].....                                                                                   | ۱۵ |
| شکل ۱۳-۱: نمای شماتیک توریسم دریا [9].....                                                                                                   | ۱۶ |
| شکل ۱۳-۱: محدوده تقریبی دی، هد و توان عملکرد توریسم های آبی [10].....                                                                        | ۱۸ |
| شکل ۱۴-۱: محدوده راندمان توریسم های مختلف بر حسب نسبت دی عبوری [11].....                                                                     | ۱۹ |
| شکل ۱۵-۱: محدوده کارکرد توریسم ها بر اساس سرعت مخصوص [12].....                                                                               | ۱۹ |
| شکل ۱۶-۱: حلزونی توریسم آبی ساخت شرکت آذر آب [30].....                                                                                       | ۳۲ |
| شکل ۱۷-۱: چرخ توریسم آبی ریخته شده توسط شرکت صنایع فولاد سایا [32].....                                                                      | ۳۴ |
| شکل ۱۸-۱: سد سه دره چین دارای بزرگترین نیروگاه برق آبی جهان به ظرفیت ۲۲۵۰۰ مگاوات است.....                                                   | ۳۶ |
| شکل ۱۹-۱: اجزای تشکیل دهنده تحلیل PESTEL [38].....                                                                                           | ۴۰ |
| شکل ۱-۲: نمای شماتیک سیستم بازخورد جریان [48].....                                                                                           | ۴۷ |
| شکل ۲-۲: نمای شماتیک سیستم بازخورد جریان فعال همراه با اجکتور [48].....                                                                      | ۴۸ |
| شکل ۳-۲: نمای شماتیک سیستم کنترل مغناطیسی - رئولوژیکی [49].....                                                                              | ۴۹ |
| شکل ۴-۲: چگونگی جریان اطلاعات و تبادل داده با استفاده از آواتار دیجیتالی یک نیروگاه برق آبی در شرایط دینامیک [47].....                       | ۵۳ |
| شکل ۵-۲: پیکربندی توریسم آبی دور متغیر (الف) ماشینهای سنکرون با ورودی از کانورتر (ب) ماشینهای القایی با ورودی دوگانه [47].....               | ۵۵ |
| شکل ۶-۲: مزایای استفاده از توریسم فرانسیس دور متغیر [47].....                                                                                | ۵۶ |

## فهرست مطالب

شماره

عنوان

صفحه

|         |                                                                                                                                                                                                                          |  |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| ۵۷..... | شکل ۷-۲: مزایای استفاده از پمپ دور متغیر [47]                                                                                                                                                                            |  |
| ۵۹..... | شکل ۸-۲: چرخ توربین آلدن [62]                                                                                                                                                                                            |  |
| ۶۱..... | شکل ۹-۲: چرخ اسپلیتر برای توربین فرانسویس در کاربرد پمپ - توربین                                                                                                                                                         |  |
| ۶۱..... | شکل ۱۰-۲: اولین پمپ - توربین دور متغیر واقع در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای یاگیساوا                                                                                                                                           |  |
| ۶۲..... | شکل ۱۱-۲: توربین فرانسویس ساخت هاربین الکتریک                                                                                                                                                                            |  |
| ۶۳..... | شکل ۱۲-۲: سیستم OnCare.Acoustic شرکت فویت                                                                                                                                                                                |  |
| ۶۵..... | شکل ۱۳-۲: توربین فرانسویس ساخت شرکت آندریتز                                                                                                                                                                              |  |
| ۷۱..... | شکل ۱۴-۲: روند تغییرات تعداد انتشارات و تعداد ارجاعات در خصوص توربین فرانسویس [77]                                                                                                                                       |  |
| ۷۲..... | شکل ۱۵-۲: روند تغییرات تعداد اختراعات ثبت شده در هر سال در خصوص توربین فرانسویس [65]                                                                                                                                     |  |
|         | شکل ۱۶-۲: انواع کاویتاسیون در توربین فرانسویس (الف) کاویتاسیون روی لبه حمله پره‌ها (ب) کاویتاسیون با حباب‌های در حال جابجایی (ج) کاویتاسیون به صورت جریان چرخشی در لوله رانش (د) کاویتاسیون به صورت گردابه در بین پره‌ها |  |
| ۷۵..... | شکل ۱۷-۲: محل اصلی وقوع سایش ناشی از رسوب که در اثر جریان ثانویه در محفظه حلزونی (پیکان‌های سمت راست) تشدید میشوند.                                                                                                      |  |
| ۷۶..... |                                                                                                                                                                                                                          |  |

## فهرست جداول

| عنوان                                                                  | شماره صفحه |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| جدول ۱-۱: انواع پمپ - توریینهای ادغام شده و محدوده هد کارکرد آنها..... | ۱۷         |
| جدول ۲-۱: پژوهشگران فعال در زمینه توریینهای آبی.....                   | ۳۰         |
| جدول ۱-۲: روشهای کنترل غیرفعال [47].....                               | ۴۵         |
| جدول ۲-۲: روشهای کنترل فعال [47].....                                  | ۴۷         |

## مقدمه

گزارش حاصل مشتمل بر دو فصل است. در فصل اول، ابعاد موضوع و محدوده مطالعات و نیز وضعیت و جایگاه نیروگاه‌های برق آبی و توربین آبی در صنعت تولید نیروی برق کشور در راستای انجام فاز اول پروژه «شناسایی اکوسیستم توربین‌های آبی در ایران و رصد فناوری مربوطه» تهیه شده است. در این فصل ابتدا درباره تاریخچه موضوع و اهداف و محدوده مطالعات توضیحاتی بیان شده و سپس بازیگران کلیدی اکوسیستم توربین‌های آبی شامل نهادهای دولتی، مؤسسات پژوهشی، پژوهشگران و شرکت‌های صنعتی مورد شناسایی قرار گرفته است. در فصل سوم ویژگی‌های فناوری توربین آبی و جایگاه آن در صنعت برق کشور بیان شده و در نهایت از مطالب نتیجه‌گیری شده است.

در فصل دوم گزارش حاضر شناسایی حوزه‌های فناورانه و روند تحولات آن‌ها، شناسایی پیشروان فناوری و نیز آینده پژوهی فناوری توربین آبی در راستای انجام فاز دوم پروژه «شناسایی اکوسیستم توربین‌های آبی در ایران و رصد فناوری مربوطه» انجام شده است. در این فصل ابتدا اجزا و زیرسیستم‌های فناوری توربین آبی شناسایی شده و تحولات آن‌ها بیان گردیده است. سپس پیشروان فناوری توربین‌های آبی شامل شرکت‌های پیشرو، دانشگاه‌ها و مؤسسات مطرح و نیز پژوهشگران برجسته در سطح بین‌المللی بررسی شده است. در ادامه حوزه‌های آینده فناوری توربین آبی با توجه به منابع مختلف شناسایی شده و در نهایت از مطالب نتیجه‌گیری شده است.

## ۱- شناخت اکوسیستم توربین‌های آبی (فاز تشخیص)

## ۱-۱- مقدمه

توربین‌های آبی انرژی آب را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌نمایند که به عنوان محرک اولیه برای انواع مختلف ماشین‌ها و به خصوص ژنراتورها به منظور تولید انرژی برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. توربین‌های آبی که از نوع توربوماشین‌های دهنده قدرت (مولد) می‌باشند دارای راندمان و قدرت تولیدی بالایی در هر واحد بوده و در نیروگاه‌های آبی جهت تولید انرژی الکتریکی به کار می‌روند. از بعد دیگر به علت مشکلات و مسائل زیست محیطی و ارزش مواد سوختی، امروزه در اغلب کشورهای جهان سعی می‌شود از حداکثر ممکن انرژی آب جهت تولید برق استفاده گردد. شاید تنها اشکال نیروگاه‌های آبی در مقایسه با نیروگاه‌های بخاری و گازی، بالا بودن سرمایه اولیه و مدت زمان زیاد برای اجرای پروژه می‌باشد. اما در عوض عمر این نیروگاه‌ها طولانی بوده و نگهداری آن‌ها نیز کم هزینه می‌باشد [۱].

نیروگاه‌های آبی را از نظر قدرت تولیدی به چند دسته تقسیم می‌نمایند. تعریف حدود این دسته‌بندی‌ها متفاوت است اما در زیر این دسته‌بندی بر اساس تعاریف وزارت انرژی آمریکا [1] آمده است:

- نیروگاه‌های آبی بزرگ (توان بیش از ۳۰ مگاوات)
- نیروگاه‌های آبی متوسط (توان بین ۱۰ تا ۳۰ مگاوات)
- نیروگاه‌های آبی کوچک (توان کمتر از ۱۰ مگاوات)
- نیروگاه‌های آبی ریز (توان کمتر از ۱۰۰ کیلووات)

لازم به ذکر است که در این گزارش بر نیروگاه‌های آبی متوسط و به ویژه بزرگ تمرکز خواهد شد. همچنین از نظر ارتفاع (هد) آبی که توربین با آن کار می‌کند (ارتفاع ریزش آب)، نیروگاه‌های آبی را به دو دسته زیر تقسیم می‌کنند:

- ارتفاع ریزش کم (هد کمتر از ۲۵ متر)
- ارتفاع ریزش متوسط (هد بین ۲۵ متر تا ۱۰۵ متر)
- ارتفاع ریزش زیاد (هد بیشتر از ۱۰۵ متر)

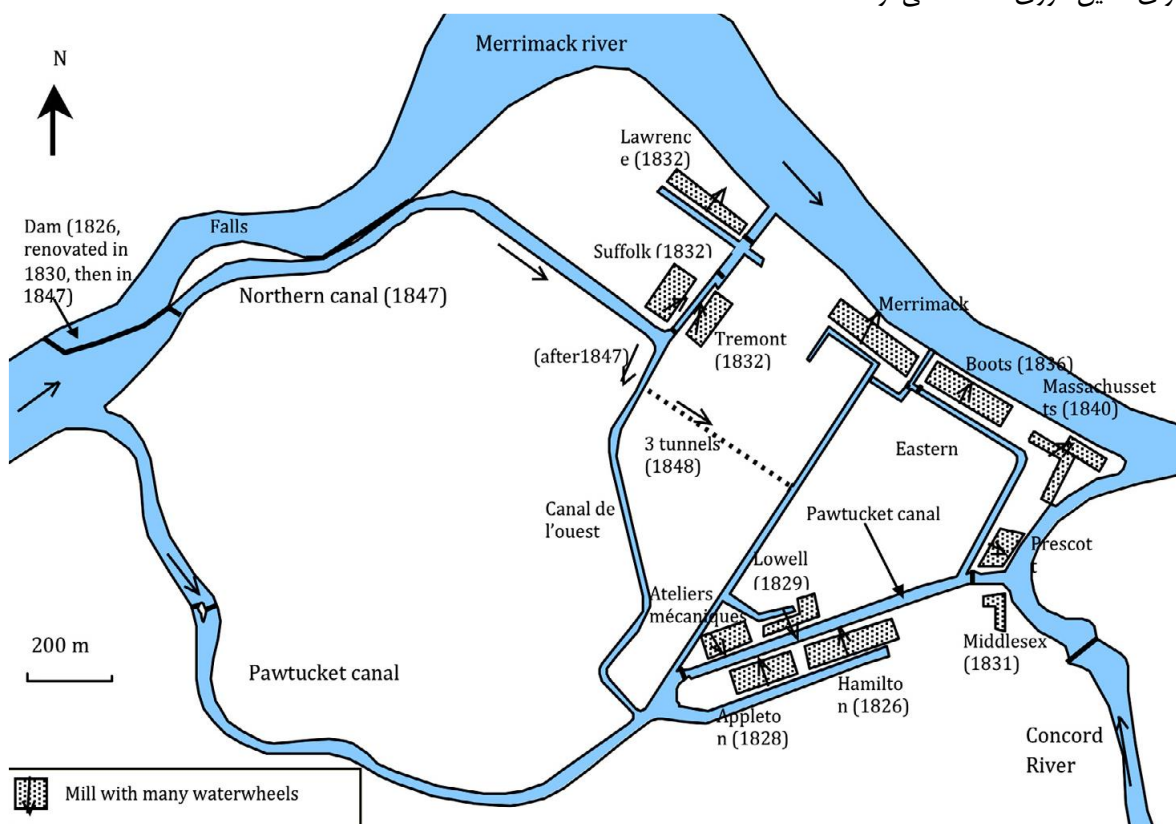
در ادامه این فصل، ابتدا تاریخچه توربین آبی ارائه شده و سپس ابعاد موضوع با توجه به انواع توربین‌های آبی بیان گردیده و هدف از مطالعه مشخص شده است.

## ۱-۲- تاریخچه توربین آبی

استفاده از نیروی آب برای بشریت به عنوان یک تحول بزرگ فناورانه محسوب می‌شد. تاریخچه استفاده از تأسیسات آبی برای آبیاری مزارع به هزاره چهارم پیش از میلاد در خاورمیانه و شرق آسیا باز می‌گردد. چرخ‌های آبی عمودی در حدود قرن اول پیش از میلاد در خاورمیانه به وجود آمدند. طی قرن‌های اول تا سوم میلادی استفاده از چرخ‌های آبی در امپراتوری‌های روم و چین به شدت گسترش یافت. عمده کاربرد این چرخ‌ها در روم برای کشاورزی و بعضاً (در قرن چهارم میلادی) برای برش سنگ مرمر بوده است. در چین کاربری این چرخ‌ها گسترده‌تر بوده و از آن‌ها در متالورژی، برش و بالا بردن اجسام استفاده می‌شد. قطر این چرخ‌ها در حدود ۱/۵ الی ۳/۵ متر بوده است. توسعه چرخ‌های آبی در قرون وسطی (تا قرن سیزدهم میلادی) نیز چه در غرب و چه در شرق ادامه یافت [2].

## ۱-۲-۱- اهمیت اقتصادی و صنعتی چرخ‌های آبی از قرون وسطی تا قرن نوزدهم

تا پیش از انقلاب صنعتی از چرخ‌های آبی در فعالیت‌های مختلفی از جمله آسیا کردن غلات، برش، چکش کاری فلزات و غیره استفاده می‌شد. به عنوان مثال در سال ۱۰۸۶ میلادی در انگلستان، ۵۶۲۴ آسیاب آبی وجود داشت. در فاصله بین قرن هفدهم تا قرن نوزدهم استفاده از انرژی آب برای فعالیت‌های صنعتی گسترش یافت. به عنوان مثال در سال ۱۷۷۲ میلادی در فرانسه ۱۴۰ کارگاه آهنگری از انرژی آب برای چکش کاری استفاده می‌کردند. همچنین در انگلستان، فرانسه و ایالات متحده از آسیاب‌ها برای به حرکت درآوردن ماشین‌های نخ ریزی در کارخانه‌های نساجی استفاده می‌شد. به عنوان مثال در فاصله سال‌های ۱۸۲۳ تا ۱۸۴۷ میلادی، ۱۰ کارخانه نساجی در حاشیه رودخانه‌ای در ایالات متحده ساخته شدند که از ۱۹۱ چرخ آبی برای تأمین انرژی استفاده می‌کردند.



شکل ۱-۱: کارخانه‌های نساجی ساخته شده در شمال شرق ایالات متحده که با نیروی آب کار می‌کنند [2].

استفاده از انرژی آب در معادن نیز رواج داشت. به عنوان مثال در آلمان تعداد زیادی سد و کانال به منظور تأمین انرژی مورد نیاز معادن در فاصله قرن شانزدهم تا هیجدهم میلادی ساخته شد [2].

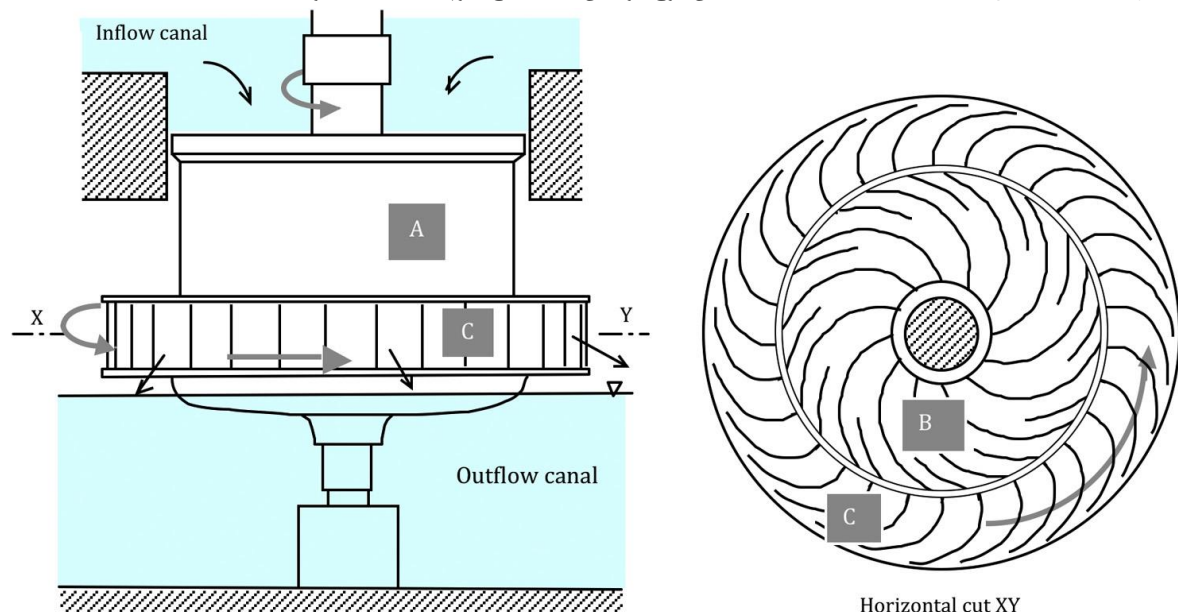
## ۱-۲-۲- ارتقای چرخ‌های آبی عمودی در سال‌های ۱۸۲۴ تا ۱۸۹۰ میلادی

اهمیت اقتصادی چرخ‌های آبی در قرن نوزدهم سبب ایجاد نوآوری‌هایی در راستای ارتقای بازده چرخ‌های سنتی شد که پیش از آن تنها در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد بود. دانشمندان این چرخ‌ها را از لحاظ مکانیک سیالات مورد بررسی قرار دادند. به عنوان

مثال جان اسمیتون<sup>۱</sup> با آزمایش مدل‌های این چرخ‌ها در مقیاس کوچک دریافت که سرعت نوک پاروها می‌بایست حدود ۴۰ درصد سرعت جریان آب ورودی باشد. در سال ۱۸۲۴ میلادی در فرانسه آکادمی علوم جایزه‌ای برای ارتقای طراحی چرخ‌های آبی تعیین نمود. به مرور در قرن نوزدهم میلادی طرح‌هایی ارائه شدند که بازده چرخ‌های آبی را تا حدود ۸۰ درصد و بیشتر افزایش دادند. توان این چرخ‌های بهبود یافته که از آهن ساخته می‌شدند در محدوده ۱۰ تا ۵۰ کیلووات بود. اما مشکلات چرخ‌های آبی عمودی نظیر تأثیر پذیری زیاد از سطح آب در پایین دست و عدم امکان استفاده در هدهای بالا زمینه‌ای برای نوآوری‌های بعدی بود [2].

### ۳-۲-۱- قرن توربین (۱۸۲۶ تا ۱۹۲۶ میلادی)

مفهوم توربین عکس‌العملی<sup>۲</sup> در حدود ۱۷۵۰ میلادی در انگلستان و آلمان توسعه پیدا کرد. در ادامه این مسیر اولر<sup>۳</sup> طراحی ارائه کرد که در آن یک توزیع کننده ثابت بالای چرخ قرار گرفته و جهت برخورد آب به پره‌های متحرک چرخ را تنظیم می‌نمود. در فاصله سال‌های ۱۸۲۰ تا ۱۸۲۴ میلادی، بوردین<sup>۴</sup> با یکپارچه کردن توزیع کننده داخل چرخ امکان استفاده از چرخ آبی به صورت مستغرق (داخل آب) را فراهم نمود. او از واژه توربین برای این چرخ استفاده کرد. در سال ۱۸۲۶ انجمن تشویق صنعت ملی<sup>۵</sup> در فرانسه جایزه‌ای برای طراحی توربین‌های کاربردی صنعتی تعیین نمود. برنده این جایزه فورنیرون<sup>۶</sup> بود که توربینی را ارائه نمود که آب از داخل آن به سمت بیرون جریان می‌یافت. این توربین‌ها قابلیت استفاده در هدهای بالا (بیش از ۱۰۰ متر) را نیز داشتند. تا سال ۱۸۴۳ میلادی ۱۲۹ عدد از این نوع توربین در صنایع اروپا نصب شده بودند [۳].



<sup>1</sup> John Smeaton

<sup>2</sup> Reaction turbine

<sup>3</sup> Euler

<sup>4</sup> Burdin

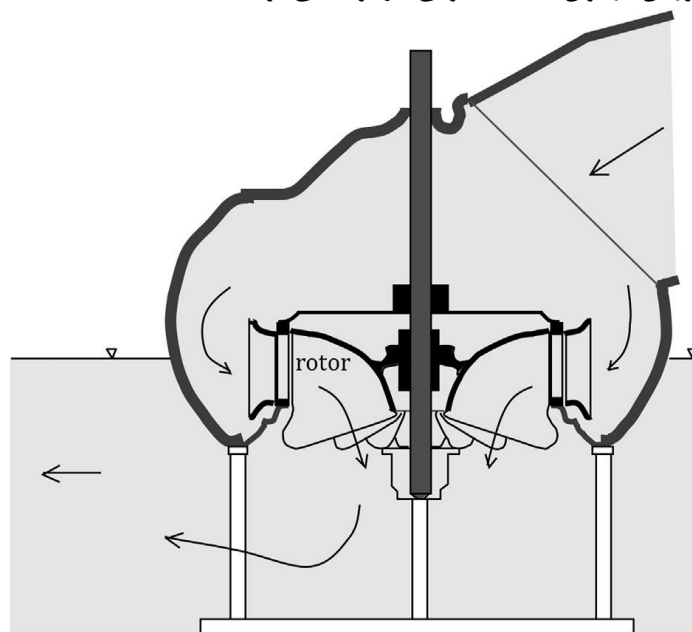
<sup>5</sup> Société d'encouragement à l'industrie nationale

<sup>6</sup> Fourneyron

شکل ۱-۲: توربین فورنیرون که اولین توربین آبی عکس‌العملی در دنیا بود. در این توربین پره‌های توزیع‌کننده (B) داخل چرخ (C) قرار داشتند [2].

### ۱-۲-۳-۱- توربین فرانسسیس

در سال ۱۸۵۵ میلادی مهندسی به نام فرانسسیس<sup>۱</sup> در ایالات متحده نتایج آزمایش‌های خود بر روی ارتقای توربین فورنیرون را منتشر نمود. در طرح ارائه شده توسط فرانسسیس، بر خلاف توربین فورنیرون، توزیع‌کننده‌ها در خارج و چرخ در داخل داشت و جریان آب کاملاً شعاعی بود. به تدریج طرح اولیه توربین فرانسسیس به گونه‌ای اصلاح شد که در آن جریان کاملاً شعاعی نبوده و جهت آن به تدریج تغییر می‌یافت. این طرح همچنان مبنای توربین‌های فرانسسیس امروزی است. توربین فرانسسیس ابتدا برای هدهای متوسط در نظر گرفته شده بود اما به تدریج کاربری آن، هدهای بالا (بیش از ۴۰۰ متر) را نیز شامل شد. امروزه این توربین در توان ۱۰۰۰ مگاواتی نیز تولید می‌شود [2].



شکل ۱-۳: نمای یک توربین فرانسسیس ۱۸۰ کیلوواتی که در سال ۱۸۸۲ میلادی ساخته شد [2].

### ۱-۲-۳-۲- توربین‌های ضربه‌ای برای هدهای بسیار زیاد

توربین‌های فورنیرون و فرانسسیس که در سال‌های ۱۸۵۰ تا ۱۸۸۰ میلادی تولید شده بودند هنوز امکان بهره‌برداری در هدهای بالای ۱۲۰ متر را نداشتند. به همین دلیل تقاضا برای توربین‌هایی که بتوانند با دبی‌های کم آب‌های جاری کوهستان و ارتفاع زیاد آن‌ها (به ویژه در کوه‌های آلپ) کار کنند وجود داشت. برای این منظور توربین‌های ضربه‌ای توسعه پیدا کردند که در آن‌ها جریان آب با سرعت به پره توربین برخورد می‌نمود که مشابه با طرح‌های چرخ‌های آبی قبل از انقلاب صنعتی بود. مشکل این توربین‌ها در هدهای بالا، سایش سریع چرخ در اثر کاویتاسون بود. بعداً پیشرفت‌هایی در راستای حل این مسئله و ارتقای

<sup>1</sup> Francis

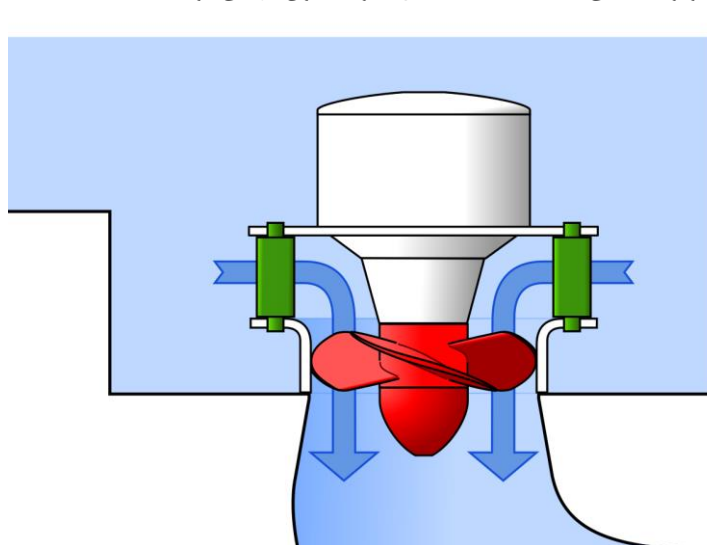
راندمن توربین حاصل شد. در فرانسه جرارد<sup>۱</sup> در سال ۱۸۵۴ میلادی توربین ضربه‌ای با محور افقی و جریان کنترل شده‌ای از جت آب طراحی نمود که راندمن آن در حدود ۶۰ درصد بود.

با نزدیک شدن به اواخر قرن نوزدهم، رفته رفته استفاده از توربین‌های آبی برای تولید برق آغاز شد. به عنوان مثال در ۱۸۸۴ میلادی یک توربین جرارد ۳۰ کیلواتی در اسکاتلند به منظور تولید برق برای روشنایی معابر عمومی مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

در ایالات متحده از جت آب برای به حرکت درآوردن چرخ‌های آبی در معادن طلا استفاده می‌شد. در سال ۱۸۷۸ میلادی آلن پلتن<sup>۲</sup> این ایده اولیه را توسعه داده و توربینی به نام خود اختراع نمود. توربین پلتن امروزه نیز برای استفاده در هدهای بالا متداول است. در حال حاضر بیشترین هد آب مورد استفاده در توربین‌های آبی متعلق به نیروگاه برق آبی بیودرن<sup>۳</sup> در سوئیس است. این نیروگاه با هد ۱۸۸۳ متر دارای سه توربین پلتن ۴۰ مگاواتی بوده و در سال ۱۹۹۸ میلادی شروع به کار کرد. این نیروگاه به دلیل شکستگی یک کانال انتقال آب در سال ۲۰۰۰ به مدت طولانی تعطیل شده و سپس در سال ۲۰۱۴ مجدداً مورد بهره‌برداری قرار گرفت [2].

### ۳-۲-۱- توربین‌های پربازده برای هدهای بسیار پایین

توربین فرانسویس برای هدهای بسیار پایین مناسب نیست. به همین دلیل اختراعی در سال ۱۹۱۲ توسط ویکتور کاپلان<sup>۴</sup> ثبت شد که در آن روتور توربین آبی به صورت ماریچ با محور افقی طراحی شده بود. بازده این توربین عالی (حدود ۹۰ درصد) بود اما در سرعت چرخش بالای روتور در دبی‌های زیاد، به مشکل کاویتاسیون بر می‌خورد.



شکل ۱-۴: نمای شماتیک توربین کاپلان [3]

<sup>1</sup> Girard

<sup>2</sup> Pelton

<sup>3</sup> Bieudron

<sup>4</sup> Kaplan

این مشکل توسط انگلسن<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۶ میلادی و با اضافه کردن قابلیت تنظیم زوایای پره به توربین کاپلان مرتفع شد. پس از این تاریخ، توربین کاپلان، به متداول‌ترین توربین برای استفاده در هدهای بسیار پایین، نظیر رودخانه‌ها، تبدیل شد [2].

#### ۴-۲-۱- توربین‌ها و توسعه نیروگاه‌های برق آبی

تولید برق از انرژی آبی به سال ۱۸۸۰ میلادی باز می‌گردد. در این سال یک توربین آبی ۷ کیلوواتی با هد آب ۸/۸ متر در انگلستان مورد بهره‌برداری قرار گرفت. از این تاریخ به بعد، نیروگاه‌های برق آبی به سرعت توسعه یافتند که در آن‌ها از انواع توربین‌های آبی استفاده می‌شد. گفتنی است که از سال ۱۸۸۹ میلادی به بعد تمام پروژه‌های بهره‌برداری از انرژی آب به صورت نیروگاه‌های برق آبی بودند. این امر دو عامل مهم داشت:

- توسعه صنایع (به ویژه شیمیایی و متالورژی) که در آن‌ها از برق برای تأمین انرژی استفاده می‌شد.
- استفاده از برق برای روشنایی شهرها و توسعه وسایل نقلیه‌ای مانند تراموا

از آن جا که در ابتدا امکان انتقال برق در مسافت‌های طولانی وجود نداشت، در کنار چندین شهر، نیروگاه‌های برق آبی ساخته شد. به عنوان نمونه می‌توان به شهر بوفالو و آبشار نیاگارا در ایالات متحده اشاره کرد که در سال ۱۸۹۵ میلادی نیروگاه برق آبی آن مورد بهره‌برداری قرار گرفت. این نیروگاه ابتدا دارای سه توربین فورنبرون بود که تعداد آن‌ها بعداً به ۱۰ عدد افزایش یافت. ظرفیت تولید برق این نیروگاه ۳۷ مگاوات بود. مثال دیگر شهر ژنو سوئیس است که در سال ۱۸۹۶ میلادی در نزدیکی آن یک نیروگاه برق آبی به ظرفیت ۴ مگاوات تأسیس شد. ظرفیت این نیروگاه در سال ۱۸۹۹ میلادی به ۱۳ مگاوات افزایش یافت. این نیروگاه دارای ۱۵ توربین فرانسسیس بود. از جمله موارد دیگر می‌توان به احداث نیروگاه پادرنو<sup>۲</sup> در نزدیکی میلان در سال ۱۸۹۸ میلادی (دارای ۷ توربین فرانسسیس ۱۵ مگاواتی) و احداث نیروگاه برق آبی در شهر لیون در سال ۱۸۹۹ میلادی (دارای ۱۶ توربین فرانسسیس جمعاً به ظرفیت ۱۶ مگاوات) اشاره نمود. گفتنی است که این نیروگاه برق آبی هنوز هم در لیون فعال است؛ در سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ میلادی به دلیل توسعه شبکه برق و امکان انتقال الکتریسیته، مقیاس پروژه‌های برق آبی بزرگتر شد [2].

#### ۴-۲-۱- سیستم‌های پیچیده مدیریت آب

از آن جا که تولید نیروگاه‌های برق آبی می‌بایست از تقاضای مصرف برق تبعیت کند، ذخیره‌سازی آب اهمیت یافت. به همین دلیل در برخی از نیروگاه‌ها، بخشی از توان تولید شده در ساعات کم‌باری صرف ذخیره آب می‌شد تا در ساعات اوج مصرف ذخیره آب برای تولید برق به حد کافی باشد. این مفهوم از ۱۹۳۸ میلادی به بعد مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافت. به طوری که امروزه نیروگاه برق آبی تلمبه ذخیره‌ای، متداول‌ترین فناوری ذخیره برق است. این فناوری طی دو دوره توسعه یافت:

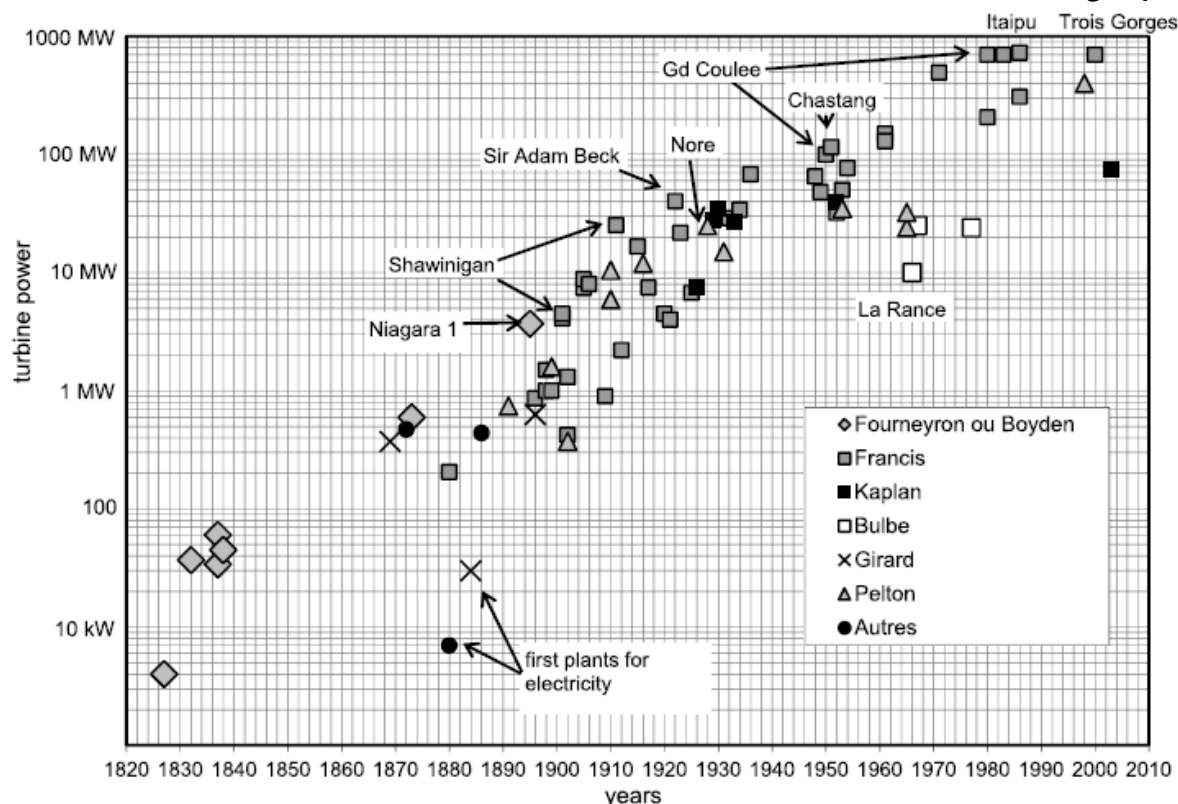
- سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ میلادی که در آن توسعه نیروگاه‌های بزرگ شدت یافت.
- از سال ۲۰۰۰ میلادی به بعد همراه با رشد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر بادی و خورشیدی [2]

<sup>1</sup> Engleson

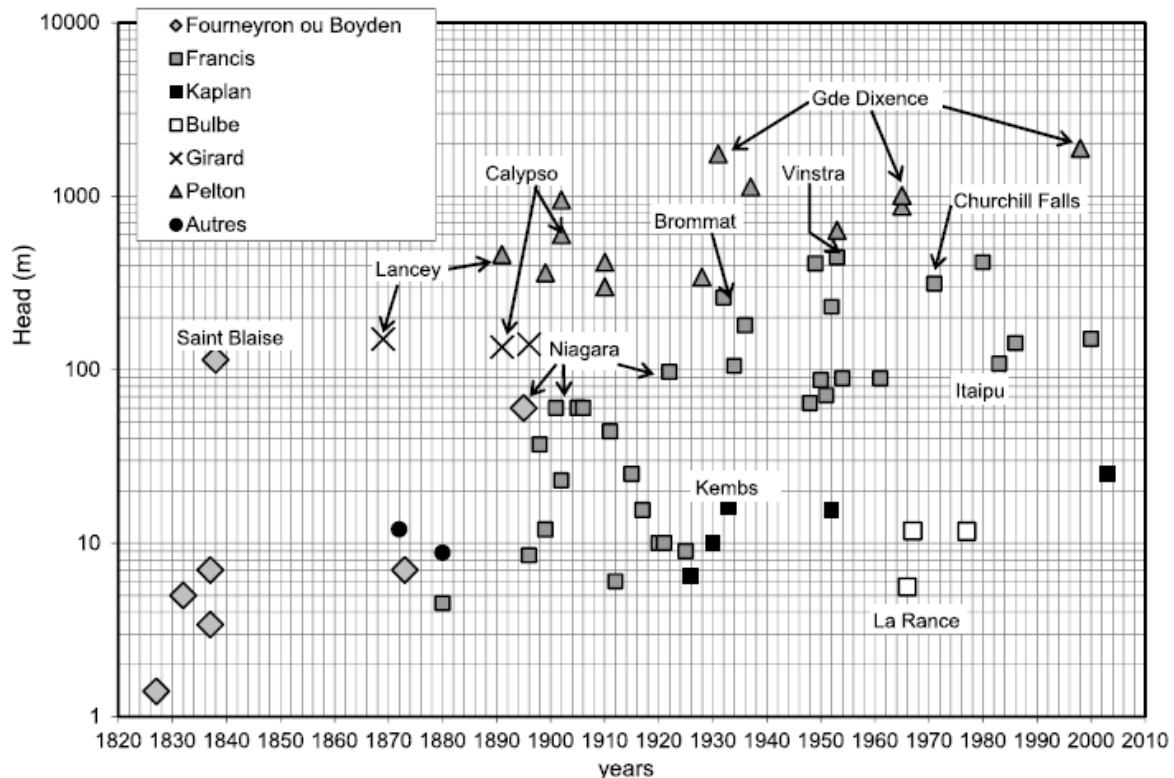
<sup>2</sup> Paderno

## ۵-۲-۱- خلاصه

چرخ‌های آبی از حدود قرن یکم میلادی به این سو مورد استفاده بودند و در قرون وسطی به توسعه فعالیت‌های انسانی کمک قابل توجهی نموده و قبل از زغال‌سنگ به نوعی زمینه‌ساز انقلاب صنعتی شدند. این چرخ‌ها تا قرن نوزدهم به نهایت توسعه طراحی خود دست یافتند. پس از آن از حدود نیمه قرن نوزدهم میلادی، توربین‌های آبی توسعه یافتند که با پوشش محدوده وسیعی از هد آب (از چند متر تا ۱۸۰۰ متر) و بازه گسترده‌ای از ظرفیت تولید (از چند کیلووات تا ۷۰۰ مگاوات) امکان استفاده از انرژی آب را به میزان چشمگیری افزایش دادند. در شکل‌های زیر رشد ظرفیت و هد توربین‌های آبی مختلف در طی دو قرن اخیر نشان داده شده است [۳].



شکل ۵-۱: افزایش توان تولیدی توربین‌های آبی مختلف طی دو قرن اخیر [2]



شکل ۱-۶: افزایش هد آب قابل استفاده در توربین‌های آبی مختلف طی دو قرن اخیر [2]

با توجه به این که نیروگاه‌های برق آبی از منابع تجدیدپذیر انرژی محسوب می شوند، در کشورهای دارای پتانسیل بالای منابع آبی (نظیر چین و کشورهای امریکای جنوبی)، به شدت توسعه یافته‌اند. علاوه بر این کشورها، قابلیت توسعه این نیروگاه‌ها در آفریقا نیز بالاست.

مهمترین چالش نیروگاه‌های برق آبی در حال حاضر انعطاف پذیری آن‌ها است. چرا که توسعه انرژی‌های تجدیدپذیری مانند بادی و خورشیدی به دلیل ماهیت متغیر منابع آن‌ها، نیاز به انعطاف پذیری در عملکرد منابع انرژی دیگر را افزایش داده تا پایداری تولید برق در شبکه حفظ شود [2].

### ۳-۱- انواع توربین آبی

توربین‌های آبی به دو دسته اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

- ضربه‌ای
- عکس العملی

در توربین‌های ضربه‌ای یا بدون عکس العمل، فشار استاتیک در داخل چرخ ثابت بوده و این چرخ معمولاً در فشار اتمسفر قرار دارد. کل ارتفاع ریزش آب توسط یک یا چند نازل (هدایت کننده) به سرعت تبدیل گشته و برخورد آب با سرعت بالا به چرخ موجب دوران آن می‌گردد.

در حالی که در توربین‌های عکس‌العملی فشار استاتیک آب در داخل چرخ ثابت نبوده و تنها بخشی از ارتفاع (هد) آن قبل از ورود به چرخ تبدیل به سرعت می‌گردد. فشار و سرعت آب در حین عبور از چرخ به تدریج کاهش یافته و در نتیجه انرژی موجود در آب به چرخ توربین واگذار می‌گردد. یک محفظه حلزونی و معمولاً دو هدایت کننده با پره‌های ثابت و متحرک وظیفه رساندن آب را به چرخ توربین عهده‌دار می‌باشند. چرخ همواره تحت فشار استاتیک سیال بین هدایت کننده و لوله خروجی آب کار می‌کند. در ادامه نحوه کار توربین‌های ضربه‌ای و عکس‌العملی به طور خلاصه آمده است [۱].

### ۱-۳-۱- توربین‌های ضربه‌ای

توربین‌های ضربه‌ای که در نیروگاه‌های آبی متوسط و بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- توربین پلتن
- توربین تورگو<sup>۱</sup>

#### ۱-۳-۱-۱- توربین پلتن

توربین پلتن از سه قسمت اصلی زیر تشکیل شده است:

- هدایت کننده یا نازل (که به نام انژکتور نیز نامیده می‌شود)
- چرخ
- منحرف کننده<sup>۲</sup>

این توربین برای هدایای بالای آب به کار می‌رود. هد آب توسط یک یا چند نازل (حداکثر تا ۶ نازل) تبدیل به سرعت می‌گردد. دبی آب می‌تواند با تغییر کورس سوزن<sup>۳</sup> انژکتور کم و یا زیاد شده و بدین ترتیب با تغییرات دبی می‌توان قدرت تولیدی توربین را نیز تغییر داد.

چرخ توربین به صورت یک استوانه می‌باشد که دور تا دور آن یک سری قاشقک<sup>۴</sup> به صورت متقارن قرار دارند. این قاشقک‌ها دارای شکل خاصی بوده، به طوری که آب خروجی از نازل به مرکز قاشقک برخورد نموده و از دو طرف بین دو قاشقک خارج می‌شود. طراحی قاشقک‌ها به ترتیبی است که آب خروجی از قاشقک به پشت قاشقک بعدی برخورد ننموده و موجب ترمز آن نگردد. محور چرخ توربین می‌تواند به صورت عمودی و یا افقی قرار گیرد. برای قدرت‌های بالا و تعدد نازل‌ها مواره محور به صورت عمودی است و ژنراتور در بالای توربین نصب می‌شود.

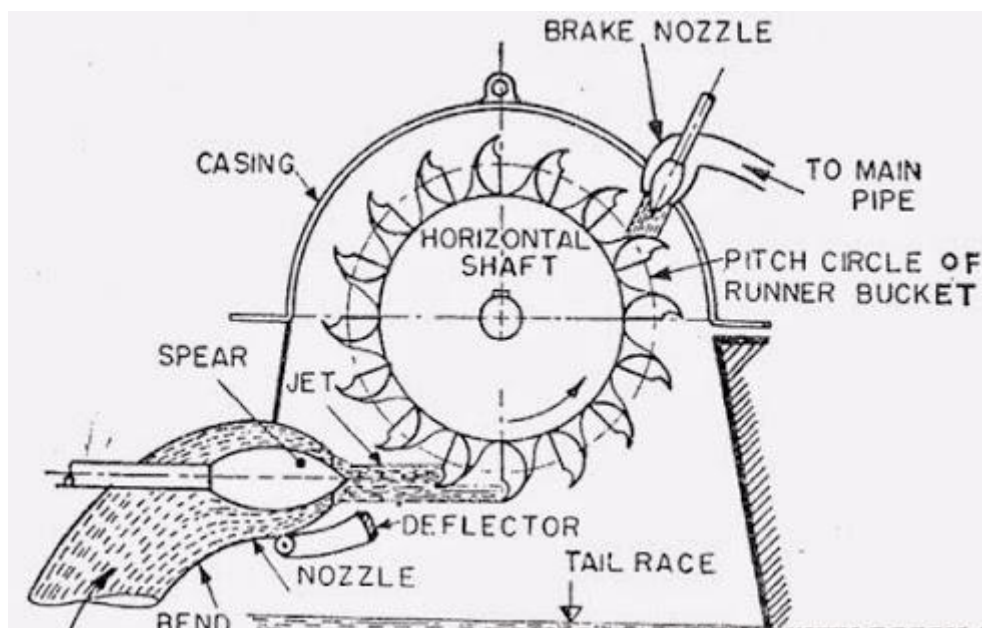
منحرف کننده بین چرخ و نازل قرار می‌گیرد و وظیفه آن این است که در مواقع اضطراری و هنگامی که بار به دلیلی از روی توربین برداشته شده و سرعت دورانی آن زیاد می‌گردد، بلافاصله جلوی جت آب قرار گرفته و از برخورد کلی یا جزئی آن به چرخ جلوگیری نماید تا سوزن مربوطه به تدریج دبی خروجی را کنترل نموده و از ظهور پدیده مخرب ضربه قوچ جلوگیری شود [۱].

<sup>1</sup> Turgo

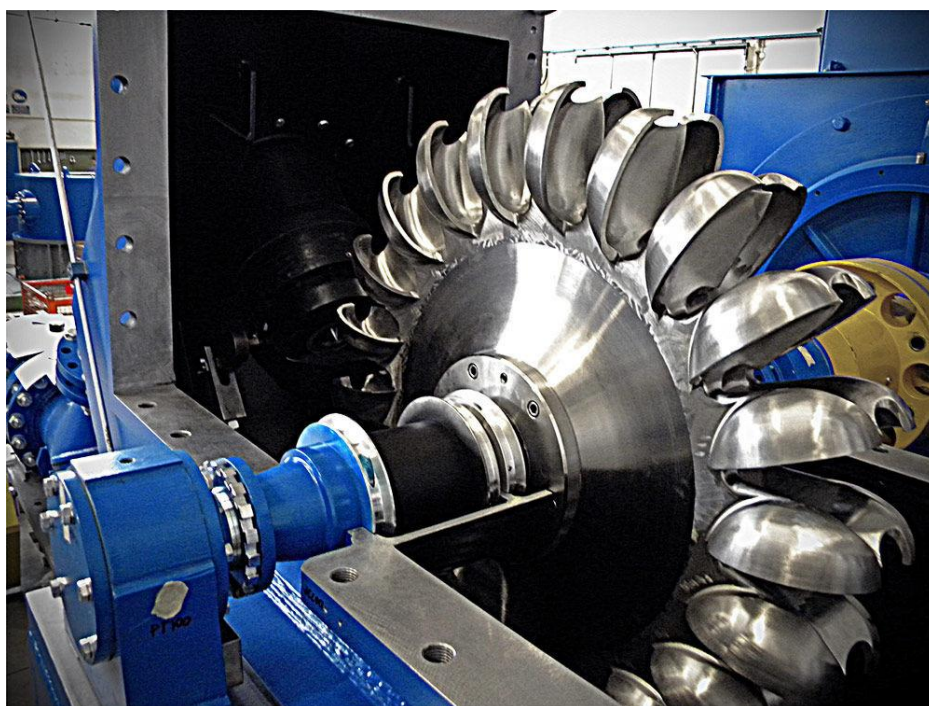
<sup>2</sup> Deflector

<sup>3</sup> Spear

<sup>4</sup> Bucket



شکل ۱-۷: اجزای اصلی توربین پلتن [۱]



شکل ۱-۸: چرخ توربین پلتن [۴]

### ۱-۳-۱-۲- توربین تورگو

نوعی توربین ضربه‌ای شبیه توربین پلتن است، با این تفاوت که جت آب به صورت مایل (زاویه حدود ۲۰ درجه) به قاشقک‌ها برخورد می‌نماید. توربین تورگو دارای سرعت مخصوص بالاتری نسبت به توربین پلتن بوده و مزیت آن داشتن جت بزرگتر و در نتیجه سرعت بالا و حجم کوچکتر ماشین است. این توربین در نیروگاه‌های آبی کوچک کاربرد دارد [۱].



شکل ۱-۹: توربین تورگو [5]

### ۱-۳-۲- توربین‌های عکس‌العملی

توربین‌های عکس‌العملی که کاربرد بیشتری در صنعت دارند عبارت‌اند از:

- توربین فرانسسیس
- توربین کاپلان
- توربین دریاز [۱]

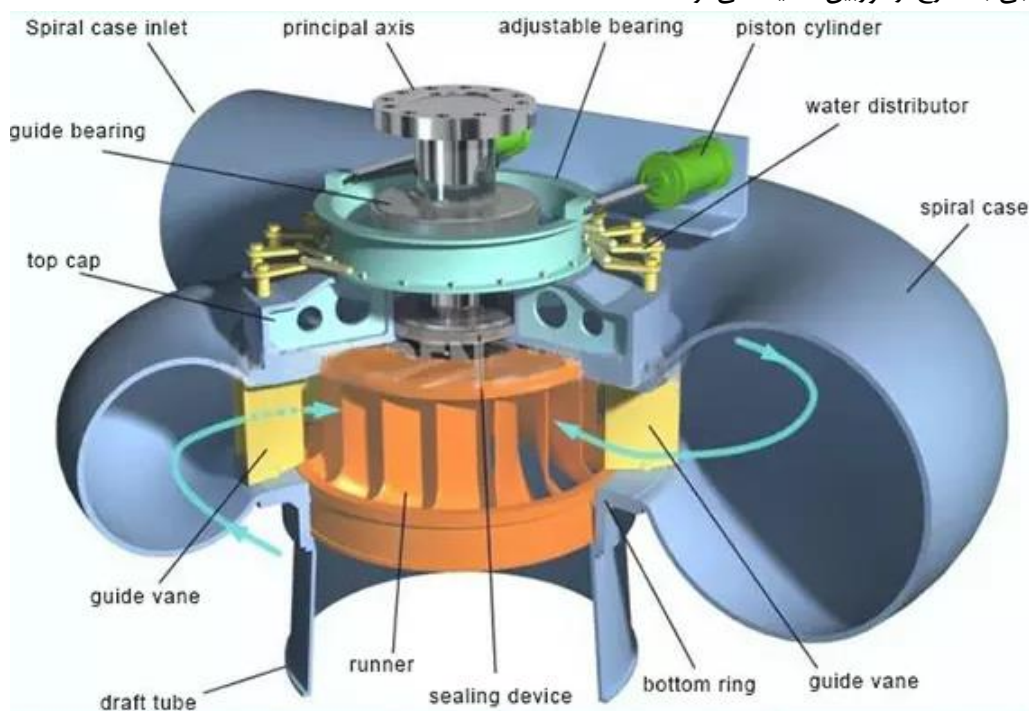
### ۱-۳-۲-۱- توربین فرانسسیس

این توربین برای هد متوسط آب به کار می‌رود و شامل بخش‌های اصلی زیر است:

- هدایت کننده که خود شامل سه قسمت است: ظرف حلزونی ورودی، هدایت کننده با پره ثابت و هدایت کننده با پره‌های متحرک<sup>۱</sup>
- چرخ
- دیفیوزر یا لوله خروجی

<sup>1</sup> Wicket gates

آب ابتدا وارد ظرف حلزونی می‌شود. وظیفه ظرف حلزونی درست عکس پمپ‌های گریز از مرکز است. یعنی تقسیم آب به دور تا دور چرخ، به طوری که سرعت آب در حلزونی با کم کردن تدریجی سطح مقطع آن ثابت بماند. سپس آب وارد هدایت کننده با پره‌های ثلث می‌شود. وظیفه این هدایت کننده تغییر جهت سیال و هدایت آن تحت زاویه معینی به طرف چرخ می‌باشد. پره‌های این هدایت کننده ثابت هستند و می‌توانند تا حدودی جهت آب را برای ورود به چرخ تأمین کنند. آب بعد از عبور از این قسمت وارد هدایت کننده با پره‌های متحرک می‌گردد. وظیفه اصلی این هدایت کننده تأمین جهت سرعت مناسب آب به ازای تغییرات دبی برای ورود به پره‌های چرخ می‌باشد تا تلفات شوک به حداقل ممکن برسد و راندمان توربین در دبی‌های مختلف تا حد امکان حفظ گردد. ضمن این که با تغییر مقدار دبی ورودی، توان خروجی توربین را نیز می‌توان متناسباً تغییر داد. آب سپس وارد چرخ می‌شود و بعد از واگذاری قسمت اعظم انرژی پتانسیل و جنبشی خود به چرخ از طریق لوله خروجی به خارج از توربین هدایت می‌گردد.



شکل ۱-۱: نمای توربین فرانسس و اجزای آن [6]

چرخ توربین فرانسس شبیه توربوپمپ‌ها است و می‌تواند به صورت جریان مختلط<sup>۱</sup> و یا شعاعی<sup>۲</sup> باشد. هر چقدر سرعت مخصوص بیشتر شود شکل چرخ به جریان شعاعی نزدیکتر می‌شود. تعداد پره‌های چرخ بین ۱۱ تا ۱۷ عدد انتخاب می‌گردد.

<sup>1</sup> Mixed

<sup>2</sup> Radial



شکل ۱-۱۱: چرخ توربین فرانسسیس با ۱۴ پره [7]

دیفیوزر این نوع توربین به صورت یک لوله با محور مستقیم و یا لوله منحنی، بسته به وضعیت قرار گرفتن آن نسبت به آب پایاب می‌باشد. مقداری از انرژی سرعتی خارج شده از دیفیوزر به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود. مطالعه حرکت سیال در داخل دیفیوزر بسیار حائز اهمیت است زیرا گرداب به وجود آمده در مرکز خروجی چرخ و انطباق فرکانس آن با فرکانس تجهیزات نیروگاه و همچنین تغییرات فشار در درون دیفیوزر می‌تواند اثرات بسیار مخربی بر کل نیروگاه داشته باشد. برای جلوگیری از خطرات احتمالی برداشته شدن بار از روی توربین می‌توان یک دریچه قبل از چرخ پیش‌بینی نمود تا آب قبل از ورود به چرخ از آن خارج شود. این دریچه بلافاصله بعد از زیاد شدن سرعت دورانی توربین و در مواقع اضطراری باز می‌شود. توربین فرانسسیس را با محور افقی و عمودی تولید می‌کنند. معمولاً نوع افقی برای قدرت‌های کم و در نیروگاه‌های آبی کوچک کاربرد دارد [۸].

## ۲-۲-۳-۱- توربین کاپلان

این توربین برای هد کم و دبی زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. قسمت‌های اصلی آن عبارتند از:

- هدایت کننده که شبیه توربین فرانسسیس است و از سه قسمت ظرف حلزونی، هدایت کننده با پره‌های ثابت و هدایت کننده با پره‌های متحرک تشکیل می‌شود.
- چرخ
- دیفیوزر

وظیفه اصلی هدایت کننده در توربین کاپلان شبیه همان است که در توربین فرانسسیس توضیح داده شد. چرخ متحرک از نوع محوری بوده و پره‌های آن می‌تواند ثابت و یا قابل تنظیم باشد. اگر پره‌ها قابل تنظیم باشد توربین را کاپلان و در غیر این

صورت توربین را هلیس<sup>۱</sup> می‌نامند. بنابراین توربین کاپلان دارای دو امکان تنظیم یکی روی پره‌های هدایت کننده و یکی روی پره‌های چرخ است. بدین ترتیب می‌توان با تغییرات دبی تا حد امکان راندمان توربین را حفظ کرد. دیفیوزر و یا لوله خارجی نقش عمده‌ای را در این توربین بر عهده دارد. زیرا هد آب در بالادست توربین بسیار کم بوده و در نتیجه انرژی جنبشی خارج شده از چرخ نسبت به کل انرژی، مقدار قابل توجهی را می‌تواند داشته باشد. از طرفی فشار خروجی از چرخ از نظر پدیده کاویتاسیون بسیار اهمیت دارد و لذا اغلب طراحی نیروگاه طوری است که آب خروجی در پایاب بر روی چرخ سوار است.

توربین‌های محوری و یا کاپلان برای قدرت‌های بالا به صورت عمودی و برای ارتفاعات ریزش کم آب و نیروگاه‌های کوچک می‌تواند به صورت افقی نصب گردد. همچنین می‌توان توربین کاپلان را طوری طراحی کرد که در مواقع خطر که بار از روی توربین برداشته می‌شود، با تغییر زوایای پره توربین برای مدت کوتاهی به صورت پمپ عمل می‌نماید تا شیرها بسته شده و توربین از کار بایستد [۱].



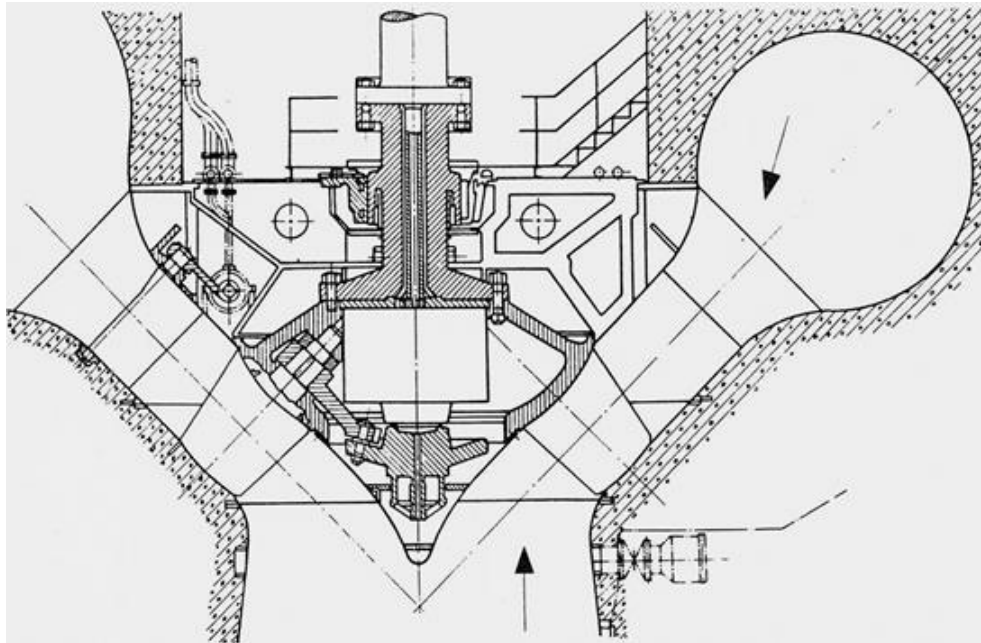
شکل ۱-۱۲: چرخ توربین کاپلان با پره‌های قابل تنظیم [8]

### ۳-۲-۱-۳-۱ - توربین دریاز

این توربین از نظر ساختمانی شبیه هر دو توربین فرانسس و کاپلان است. بدین معنی که شکل چرخ از نوع جریان مختلط است ولی پره‌های چرخ از نوع پره‌های محوری است. با تنظیم پره‌های هدایت کننده و چرخ می‌توان راندمان بالای توربین را

<sup>1</sup> Helice

در محدوده وسیعی از تغییرات دبی حفظ نمود. لیکن راندمان ماکزیمم آن از توربین‌های فرانسویس و کاپلان کمی پایین‌تر است. توربین درایز می‌تواند به عنوان پمپ - توربین نیز مورد استفاده قرار گیرد [۱].



شکل ۱-۱۳: نمای شماتیک توربین درایز [9]

#### ۴-۱- گروه پمپ - توربین

گروه پمپ - توربین نقش بسیار مهمی در شبکه‌های توزیع برق ایفا می‌کند. همان‌طور که می‌دانیم از نظر فنی - اقتصادی، ذخیره برق در مقادیر بالا امکان‌پذیر نیست. لذا با نصب نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای می‌توان هنگامی که انرژی الکتریکی تولیدی بیش از مصرف است، آب را توسط پمپ به بالادست سد و مخزن ذخیره هدایت نمود. در هنگام اوج مصرف که نیاز به انرژی الکتریکی می‌باشد آب ذخیره شده در منبع بالا دست به طرف توربین‌ها هدایت شده و انرژی خود را به توربین واگذار می‌کند. معمولاً مدت زمان پمپاژ آب بیشتر از مدت زمان کار توربین‌ها می‌باشد. گروه پمپ - توربین به سه صورت زیر می‌تواند طراحی و ساخته شود:

- پمپ و توربین به صورت دو ماشین مجزا کار کنند.
- کارکرد پمپ و توربین در یک ماشین ادغام شود. یعنی یک چرخ وجود دارد که هم به صورت پمپ و هم به صورت توربین کار می‌کند.
- چرخ پمپ و توربین به صورت یکپارچه ساخته شود (نظیر چرخ پمپ‌های دو مکشه) که در این صورت قسمتی از چرخ به صورت پمپ و قسمت دیگر به صورت توربین کار می‌کند.

در نوع اول پمپ و توربین معمولاً روی یک محور سوار می‌شوند و پمپ‌ها اغلب به صورت چندطبقه هستند. این نوع آرایش برای هدایت آب حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر کاربرد زیادی دارد. امروزه سعی می‌شود برای ارتفاعات خیلی بالاتر تا حدود ۶۰۰ متر نیز از همین روش استفاده شود. حسن این نوع نیروگاه در این است که پمپ و توربین از نظر دبی مستقل بوده و می‌توانند به طور جداگانه در نقطه بهینه خود کار کنند.

در نوع دوم با عوض کردن جهت دوران می‌توان از ماشین به صورت پمپ و یا توربین استفاده نمود. گروه‌های مختلفی از این نوع ساخته شده‌اند که در جدول زیر نشان داده شده است:

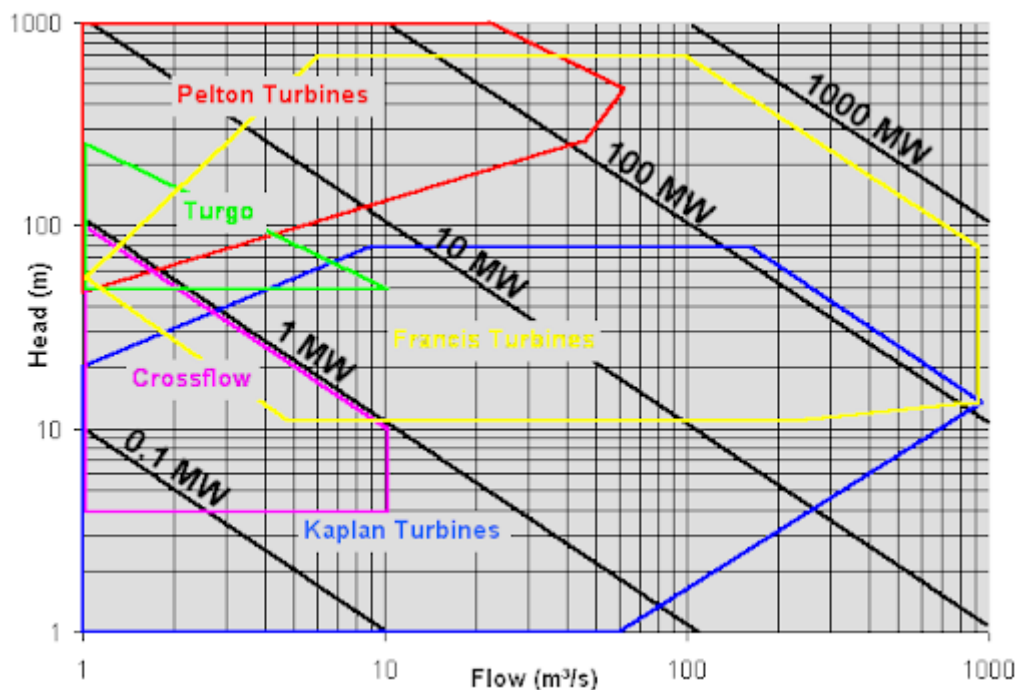
جدول ۱-۱: انواع پمپ - توربین‌های ادغام شده و محدوده هد کارکرد آن‌ها

| نوع پمپ - توربین | هد آب مناسب برای کارکرد |
|------------------|-------------------------|
| محوری            | کمتر از ۱۵ متر          |
| مختلط            | بین ۲۰ تا ۵۰ متر        |
| شعاعی            | بین ۴۰ تا ۶۰۰ متر       |

اشکال اساسی این راه حل این است که عملاً زوایای ورودی آب برای پمپ و توربین متفاوت بوده و طول کانال‌های بین دو پره پمپ بیشتر از توربین است و ماشین بیشتر به صورت پمپ طراحی می‌گردد و می‌تواند به عنوان توربین نیز مورد استفاده قرار گیرد. البته مزیت عمده آن کوچک بودن حجم ماشین نسبت به حالت قبل است. در نوع سوم دو چرخ پشت به پشت یکی به صورت پمپ و دیگری به صورت توربین کار می‌کنند. اشکال این راه حل پیچیده بودن قطعات ریخته‌گری و ساختمان داخلی ماشین است. طبیعی است که با توجه به شرایط محیطی، مسائل فنی - اقتصادی و قدرت کل نیروگاه بهترین گزینه انتخاب می‌شود.

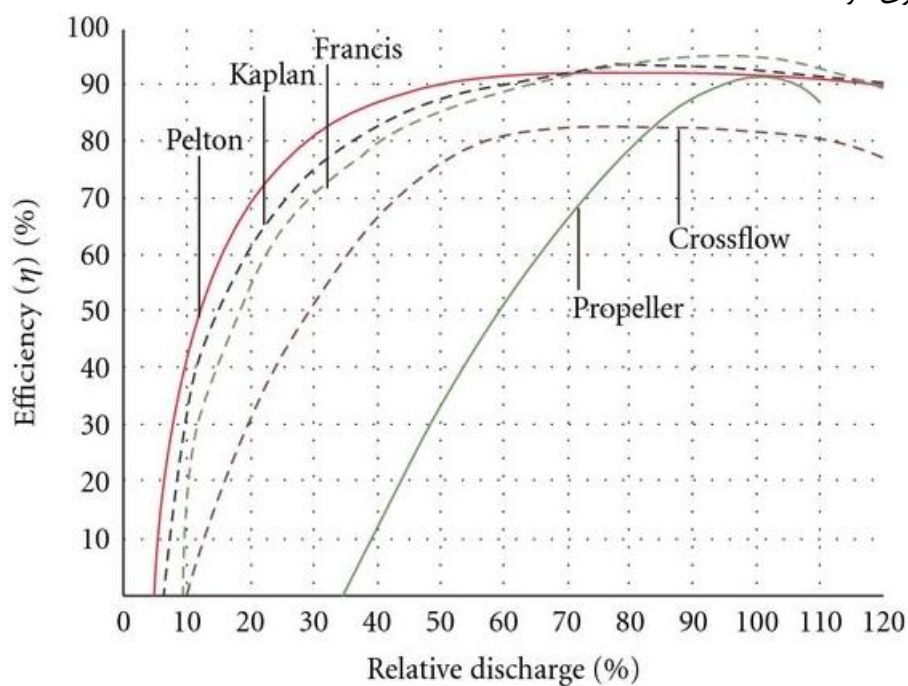
## ۵-۱- مقایسه محدوده کار توربین‌های آبی

توربین‌های آبی معمولاً در محدوده‌ای از دبی و هد آب راندمان و مشخصات هیدرولیکی مناسبی را ارائه می‌کنند. به طور کلی توربین پلتن برای هد بیش از ۴۰۰ متر، فرانس‌سیس برای هد بین ۴۰ تا ۴۰۰ متر، دریاز تا هد ۳۰۰ متر و کاپلان برای هد زیر ۵۰ متر استفاده می‌شوند. لازم به ذکر است که این مقادیر تقریبی است و در مراجع مختلف این محدوده‌ها یکسان نیستند [۸].



شکل ۱-۱۳: محدوده تقریبی دبی، هد و توان عملکرد توربین‌های آبی [10]

از طرف دیگر، توربین‌ها مشخصات کاری یکسانی از نظر تغییر دبی ندارند و بعضی در دامنه گسترده‌تری از دبی می‌توانند رانده‌مان بالایی را حفظ کنند. در شکل زیر چند نمونه از توربین‌ها از این نظر با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است توربین پلتن از این نظر از سایر توربین‌ها بهتر است و توربین فرانسویس با سرعت مخصوص زیاد، نسبت به تغییرات دبی حساسیت بیشتری دارد.



شکل ۱-۱۴: محدوده راندمان توربین‌های مختلف بر حسب نسبت دبی عبوری [11]

## ۱-۵-۱- سرعت مخصوص

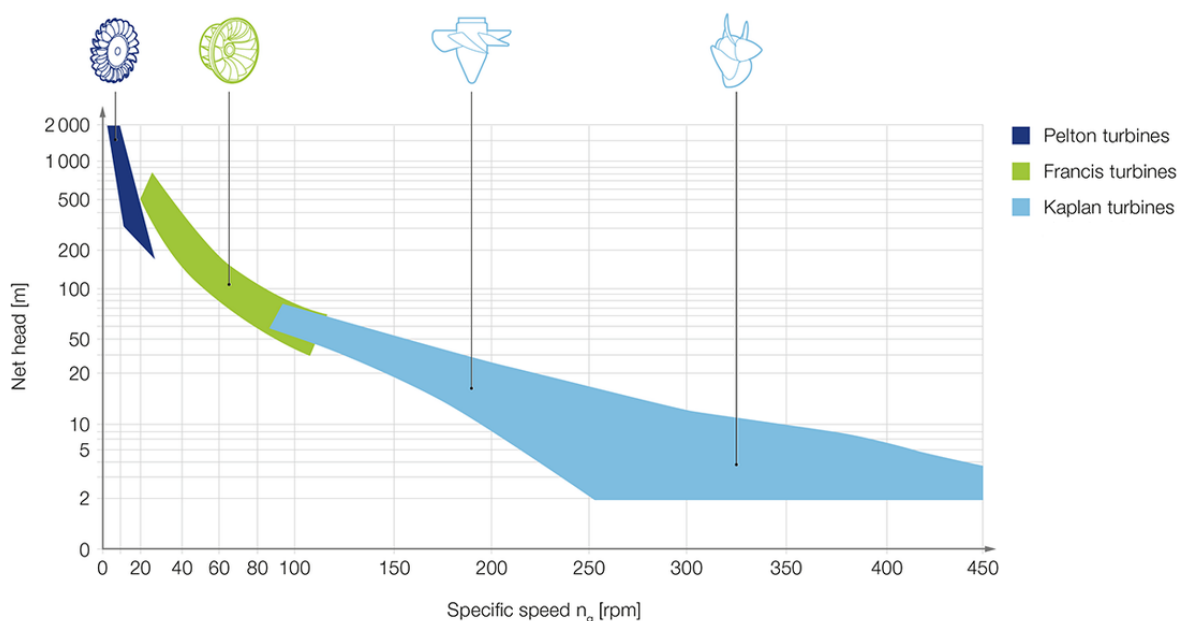
سرعت مخصوص در توربین‌های آبی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad 1-1$$

که در آن  $N$  سرعت دورانی توربین،  $P$  توان توربین و  $H$  هد توربین است. در حقیقت سرعت مخصوص یک توربین، سرعت توربینی است از همان خانواده که با استفاده از ۱ متر هد آب، توان ۱ کیلووات را تولید می‌کند. در برخی از مراجع سرعت مخصوص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_s = \omega \frac{Q^{1/2}}{(gH)^{3/4}} \quad 1-2$$

که در آن  $\omega$  سرعت دورانی توربین،  $Q$  دبی توربین و  $g$  شتاب جاذبه است. مانند پمپ‌ها، توربین‌های آبی را نیز بر اساس سرعت مخصوص تقسیم‌بندی می‌نمایند. شکل زیر محدوده کارکرد توربین‌ها را در سرعت‌های مخصوص مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود توربین‌های جریان محوری مانند کاپلان برای سرعت‌های مخصوص بالا، توربین‌های جریان مختلط مانند فرانسیس برای سرعت‌های متوسط و توربین‌های ضربه‌ای مانند پلتون برای سرعت‌های مخصوص کم مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۱۵: محدوده کارکرد توربین‌ها بر اساس سرعت مخصوص [12]

## ۶-۱- هدف و محدوده موضوعی مطالعات

با توجه به این که در این پروژه، هدف نیروگاه‌های برق آبی متوسط و بزرگ (با ظرفیت بیش از ۱۰ مگاوات) و ارتفاع ریزش متوسط و زیاد (بیش از ۲۵ متر) است، لذا تمرکز مطالعات بر توربین‌های فرانسویس قرار خواهد گرفت. هدف از این مطالعات شناسایی اکوسیستم این توربین‌های آبی شامل شناسایی بازیگران کلیدی، ویژگی‌های این توربین‌ها و نیز شناخت روند تحولات فناوری آن‌ها می‌باشد.

## ۷-۱- مدل استفاده شده برای شناسایی بازیگران کلیدی

باید توجه داشت که توسعه فناوری به ندرت حاصل فعالیت انفرادی نهادی خاص است، بلکه در اکثر موارد حاصل همکاری و فعالیت اجزای متعددی است که روابط اثربخشی در میان خود دارند. هر کشور با توجه به نهادهای متفاوتی که در آن وجود دارد و روابط میان این نهادها، نظامی را تشکیل می‌دهد که برای برخورداری از عملکرد مناسب و امکان رقابت باید در مسیر توسعه فناوری و تقویت نوآوری حرکت کند.

تاکنون مدل‌های متعددی برای نظام نوآوری ارائه شده است که یکی از مشهورترین آن‌ها مدل ماریپیچ سه‌گانه<sup>۱</sup> است که اولین بار توسط اترکویتز و لیدسدرف [13] در سال ۲۰۰۰ میلادی ارائه شد. بر اساس مدل ماریپیچ سه‌گانه، دانشگاه‌ها تولید کنندگان و انتقال دهندگان دانش و صنایع، تولید کنندگان خدمات و محصولات هستند. در حالی که دولت در میان آن‌ها نقش کنترل و تعدیل‌کنندگی را بر عهده دارد.

عموماً گسترش نقش دانش در اجتماع و توسعه نقش دانشگاه در اقتصاد بر اساس روابط ماریپیچ سه‌گانه دانشگاه، صنعت و دولت تحلیل می‌شود. وقتی دانشگاه، صنعت و دولت برای توسعه اقتصادی مشارکت می‌کنند شبکه‌ای از تعاملات ماریپیچی ایجاد می‌شود. تعاملات سه نهاد مذکور فراتر از مأموریت توسعه اقتصادی به طور فزاینده‌ای به ایجاد دانش پایه و تولید نظام‌مند نوآوری علمی کمک می‌کند [۲]. بر مبنای مدل ماریپیچ سه‌گانه، مدل دیگری با عنوان ماریپیچ چهارگانه<sup>۲</sup> توسعه داده شده است که در آن عنصر افکار عمومی (شامل جامعه مدنی و رسانه‌ها) و نقش آن در تعاملات دانشگاه، صنعت و دولت و توسعه فناوری در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به آن چه گفته شد در این فصل از مدل ماریپیچ چهارگانه به به منظور شناسایی بازیگران کلیدی استفاده شده است. لذا در ادامه، جستجو و شناخت بازیگران کلیدی اکوسیستم توربین‌های آبی در ایران شامل نهادهای دولتی و حاکمیتی (اعم از سیاست‌ساز، سیاست‌گذار و تنظیم‌گر)، مؤسسات پژوهشی، انجمن‌ها و پژوهشگران و شرکت‌های صنعتی فعال در این زمینه انجام خواهد شد.

## ۸-۱- نهادهای حاکمیتی (سیاست‌ساز، سیاست‌گذار و تنظیم‌گر)

در این بخش به معرفی نهادهای حاکمیتی فعال در حوزه توربین‌های آبی، شرح وظایف و مأموریت آن‌ها پرداخته شده است. این نهادها شامل نهادهای سیاست‌ساز، سیاست‌گذار و تنظیم‌گر می‌باشند.

<sup>1</sup> Triple helix

<sup>2</sup> Quadruple helix

## ۱-۸-۱- مجلس شورای اسلامی

مجلس شورای اسلامی رکن اصلی نهاد قانون‌گذاری در کشور ایران است که وظیفه انحصاری وضع قانون و نظارت بر اجرای آن را در جمهوری اسلامی بر عهده دارد.

از اواخر سال ۱۳۷۱ به دستور هیأت رئیسه محترم مجلس، نهادهای مستقل، دائمی و سازمان یافته به نام «مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی» برای ارائه خدمات مستمر کارشناسی و مطالعاتی در کنار مجلس قرار گرفت. مراحل قانونی تأسیس این مرکز در پاییز سال ۱۳۷۴ به انجام رسید. مطابق قانون «شرح وظایف مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی»، هدف از تأسیس مرکز، انجام دادن طرح‌های مطالعاتی و تحقیقاتی به منظور ارائه نظرهای کارشناسی و مشورتی به نمایندگان، کمیسیون‌ها و هیأت رئیسه مجلس شورای اسلامی است. وظایف این نهاد در ماده (۲) قانون «شرح وظایف مرکز پژوهش‌ها» مذکور به شرح زیر است:

- الف) مطالعه، بررسی و ارائه نظرهای کارشناسی بر روی تمام طرح‌ها و لوایح
- ب) گردآوری، نقد و تنظیم نظرهای محققان و پژوهشگران مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی، دستگاه‌های اجرایی، نهادها، گروه‌ها و احزاب سیاسی و افکار عمومی در مورد نیازهای جامعه
- ج) مطالعه، بررسی و تحقیق نسبت به حسن اجرای قوانین و سایر ابعاد نظارتی مجلس و ارائه پیشنهادها کارشناسانه برای رفع موانع و مشکلات اجرایی
- د) تأمین نیازهای اطلاعاتی کمیسیون‌ها و نمایندگان مجلس از طریق تدارک و برقراری نظام اطلاع‌رسانی
- هـ) انجام پژوهش‌های موردی حسب درخواست هیأت رئیسه، کمیسیون‌ها و نمایندگان مجلس
- و) انجام مأموریت‌های محوله در رابطه با کتابخانه‌های مجلس که این گونه موارد زیرنظر مستقیم رئیس مجلس قرار می‌گیرند؛
- ز) اشاعه نتایج مطالعات پژوهشی از طریق نشر کتب و نشریات و انعکاس نظرات به واحدها و دستگاه‌های ذیربط با نظر هیأت رئیسه مجلس [14].

## ۱-۸-۲- مجمع تشخیص مصلحت نظام

مجمع تشخیص مصلحت نظام در اجرای بند ۱ و ۸ اصل یکصد و دهم و اصل یکصد و دوازدهم و موارد دیگر مذکور در قانون اساسی و نیز اجرای حکم بیست و هفتم اسفندماه ۱۳۷۵ مقام معظم رهبری، موظف به «تشخیص مصلحت در موارد تعارض میان مصوبه مجلس و نظر شورای نگهبان» می‌باشد و در مقام «تعیین سیاست‌های کلی نظام» و «حل معضلات کشور» و نیز موارد مهمی که «رهبری به آن ارجاع می‌کنند»، «با توجه به مجموع وظائف مقرر در قانون اساسی» به عنوان «هیأت مستشاری عالی رهبری در نظام جمهوری اسلامی ایران»، انجام وظیفه می‌کند.

یکی از مهمترین وظایف مجمع تشخیص مصلحت نظام، ارائه مشاوره به مقام معظم رهبری در تعیین سیاست‌های کلی نظام جمهوری اسلامی ایران است. طبق اصل ۱۱۰ قانون اساسی، «تعیین سیاست‌های کلی نظام جمهوری اسلامی ایران» پس از مشورت با مجمع تشخیص مصلحت نظام از وظایف رهبری شمرده شده است. از سال ۱۳۷۷ تا اسفند ۱۳۸۴ جمعاً ۲۸ مورد سیاست کلی توسط مجمع تشخیص مصلحت نظام تصویب و تقدیم مقام معظم رهبری گردیده که از این میان تعداد ۱۴ سیاست کلی از سوی ایشان ابلاغ گردیده است. در زیر عناوین برخی از سیاست‌های کلی مصوب مجمع تشخیص مصلحت نظام در سال‌های اخیر در ارتباط با علم، پژوهش، فناوری، تولید و توسعه آمده است:

- سیاست‌های کلی تولید ملی، حمایت از کار و سرمایه ایرانی (ابلاغی ۱۳۹۱/۱۱/۲۴)

- سیاست‌های کلی علم و فناوری (ابلاغی ۱۳۹۳/۶/۲۹)
- سیاست‌های کلی «برنامه ششم توسعه» (ابلاغی ۱۳۹۴/۴/۹) [15]

### ۳-۸-۱- معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری

این معاونت با هدف ارتقای اقتدار ملی، تولید ثروت و افزایش کیفیت زندگی مردم از طریق افزایش توانمندی‌های فناوری و نوآوری در کشور و ارتقای «نظام ملی نوآوری» و تکمیل مؤلفه‌ها و حلقه‌های آن ایجاد شده است. اهداف و وظایف معاونت را می‌توان چنین برشمرد:

- ارتقای تولید ثروت از طریق افزایش توانمندی‌های فناوری و نوآوری در کشور
- ارتقای زیست‌بوم نوآوری و شتاب‌دهی اقتصاد دانش‌بنیان
- تحقق مرجعیت علمی، افزایش سهم اقتصاد دانش‌بنیان پژوهشی از تولید ناخالص داخلی و مصرف بهینه منابع
- گسترش حمایت از توسعه اقتصاد دانش‌بنیان و حمایت از نوآوری و پژوهش‌های مسئله محور
- ارتقا و تقویت فرآیند شتاب‌دهی به توسعه اقتصاد دانش‌بنیان در چارچوب قوانین، مقررات و اسناد بالادستی
- ایجاد و تقویت زیست بوم نوآوری و تکمیل مؤلفه‌ها و حلقه‌های آن و تقویت زیرساخت‌های نهادی آن
- حمایت از ایجاد، توانمندسازی و توسعه شرکت‌ها و مؤسسات دانش‌بنیان
- توسعه و تجاری‌سازی فناوری‌های راهبردی و مورد نیاز کشور در چارچوب نقشه جامع علمی کشور
- حمایت از نوآوری و پژوهش‌های مسئله محور و تجاری‌سازی دستاوردهای فناوری و نوآوری
- تقویت ارتباط میان مؤسسات آموزش عالی، پژوهشی و فناوری با بخش‌های صنعتی، اقتصادی و اجتماعی و تقویت زیرساخت‌های نهادی مورد نیاز برای اجرای این مأموریت
- تقویت فعالیت‌های تحقیق و توسعه بنگاه‌های اقتصادی با هدف افزایش تولید
- رصد، پایش و حمایت از تحریک تقاضای محصولات فناورانه و دانش‌بنیان
- ارتقای صادرات کالاها و خدمات دانش‌بنیان
- اعتلای ارتباطات بین‌المللی فناوری و نوآوری و توسعه دیپلماسی فناوری
- ایجاد نظام مدیریت یکپارچه فناوری و نوآوری در دستگاه‌های اجرایی
- ارتقای یادگیری فناوری در سطح ملی و تقویت توانمندی‌های فناورانه داخلی از طریق استفاده حداکثری از ظرفیت طرح‌های توسعه‌ای ملی، خریدهای دولتی از خارج و فعالیت و سرمایه‌گذاری شرکت‌های خارجی در داخل کشور

[16]

### ۴-۸-۱- سازمان برنامه و بودجه کشور

بنا بر مصوبه شورای عالی اداری مورخ ۱۳۹۵/۵/۲ با توجه به اختیارات اصل ۱۲۶ قانون اساسی، وظایف رئیس جمهور در امور برنامه و بودجه، در قالب سازمان برنامه و بودجه کشور توسط «معاون رئیس جمهور و رئیس سازمان برنامه و بودجه کشور» اداره می‌گردد. از مهم‌ترین وظایف این سازمان عبارت است از:

- راهبری و رصد توسعه کشور

- انجام مطالعات و بررسی‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی کشور
- انجام مطالعات و بررسی‌های علمی برای بهبود نظام‌های برنامه‌ریزی و بودجه‌ریزی
- تهیه و تنظیم راهبردهای توسعه و برنامه‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت
- ارائه پیشنهاد خط‌مشی‌ها و سیاست‌های مربوط به بودجه کل کشور به مراجع ذیربط
- تهیه و تنظیم بودجه سنواتی و ارائه آن به مراجع ذیربط
- نظارت مستمر بر اجرای برنامه‌ها و بودجه و پیشرفت دوره‌ای سالانه آنها و ارائه گزارش‌های لازم
- تهیه و تدوین طرح آمایش سرزمینی
- مدیریت، هدایت و راهبری نظام فنی و اجرایی کشور و تشخیص صلاحیت، رتبه‌بندی و ارزشیابی مهندسين مشاور و پیمانکاران در سطح کشور
- تهیه نقشه و ارائه اطلاعات مکانی کشور [17]

## ۵-۸-۱- وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

قانون اهداف، وظایف و تشکیلات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در ۱۸ مرداد ۱۳۸۳ به تصویب مجلس شورای اسلامی رسید. به موجب ماده ۲ این قانون، مأموریت‌های اصلی و حدود اختیارات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در زمینه انسجام امور اجرائی و سیاستگذاری نظام علمی و امور تحقیقات و فناوری به شرح زیر می‌باشد:

- شناسایی مزیت‌های نسبی، قابلیت‌ها، استعدادها و نیازهای پژوهش و فناوری کشور بر مبنای آینده‌نگری و آینده‌پژوهی و معرفی آن به واحدهای تولیدی، تحقیقاتی، دانشگاه‌ها و مراکز آموزشی و تحقیقاتی جهت بهره‌برداری.
- بررسی اولویت‌های راهبردی تحقیقات و فناوری با همکاری یا پیشنهاد دستگاه‌های اجرایی ذی‌ربط و پیشنهاد به شورای عالی علوم، تحقیقات و فناوری.
- حمایت از توسعه تحقیقات بنیادی و پژوهش‌های مرتبط با فناوری‌های نوین بر اساس اولویت‌ها.
- برنامه‌ریزی برای تدارک منابع مالی توسعه فناوری کشور و مشارکت در ایجاد، توسعه و تقویت فناوری ملی و حمایت از توسعه فناوری‌های بومی.
- اتخاذ تدابیر لازم به منظور افزایش کارایی و اثربخشی تحقیقات کشور و توسعه تحقیقات کاربردی با همکاری دستگاه‌های ذی‌ربط.
- اتخاذ تدابیر و تهیه پیشنهادهای لازم درخصوص انتقال فناوری و دانش فنی و برنامه‌ریزی به منظور بومی‌کردن فناوری‌های انتقال یافته به داخل کشور و ارائه آن‌ها به شورای عالی علوم، تحقیقات و فناوری.
- ایجاد زمینه‌های مناسب برای عرضه فناوری در داخل و خارج کشور و حمایت از صدور فناوری‌های تولید شده در کشور و کمک به ایجاد انجمن‌ها و شرکت‌های غیردولتی علمی، تحقیقاتی و فناوری.
- تمهید ساز و کارهای لازم برای ایجاد هم‌سویی میان فعالیت‌های آموزشی، تحقیقاتی و فناوری، تقویت ارتباط دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی با بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی کشور.
- اتخاذ راهکارهای مناسب برای کمک به توسعه پژوهش و فناوری در بخش‌های غیردولتی.
- اتخاذ تدابیر و ارائه پیشنهادهای لازم جهت حفظ دانشمندان و محققان و تأمین امنیت شغلی آنان و استفاده بهینه از توانمندی‌های آن‌ها [18].

## ۶-۸-۱- وزارت صنعت، معدن و تجارت

به استناد قانون تشکیل وزارت صنعت، معدن و تجارت مصوب ۱۳۹۰/۴/۱۲ مجلس شورای اسلامی با هدف یکپارچه‌سازی سیاستگذاری در زمینه صنعت، معدن و تجارت و به منظور دست یابی به جایگاه برتر در عرصه تولید ملی و استقلال صنعتی، با تأکید بر تولید صادرات محور، حفظ و صیانت از ظرفیتهای تولیدی موجود، توسعه سرمایه‌گذاری، توسعه ظرفیتهای و فناوری-های صنعتی، معدنی و تجاری مبتنی بر آمایش سرزمین و ملاحظات زیست محیطی، توسعه خدمات فنی، مهندسی و بازرگانی، توسعه صادرات غیرنفتی، مدیریت زنجیره تأمین و توزیع، ارتقای بهره‌وری و تبدیل مزیت‌های نسبی به مزیت‌های رقابتی در بخش‌های صنعت، معدن و تجارت، وظایف و اختیارات وزارت صنعت، معدن و تجارت شامل موارد زیر تصویب شد:

- تدوین و ابلاغ راهبردهای (استراتژی) توسعه صنعتی، معدنی و تجاری کشور و تعیین اهداف، سیاست‌ها، برنامه‌ها و ضوابط کلی بخش صنعت، معدن و تجارت هماهنگ با سیاست‌های اقتصادی کلان کشور با جلب مشارکت تشکلهای و سازمان‌های غیردولتی و مردم نهاد و نظارت بر اجرا و تحقق آن‌ها.
- تدوین و تعیین سیاست‌های توسعه صادرات غیرنفتی، توسعه صادرات محصولات صنعتی و فرآورده‌های معدنی و خدمات فنی و مهندسی و تجاری و تنظیم و اجرای مقررات مربوط به مشوق‌های صادراتی.
- سیاستگذاری، برنامه‌ریزی، حمایت و سرمایه‌گذاری برای انتقال و انتشار تکنولوژی و فناوری به کشور و تدوین ضوابط و مقررات مربوطه و نظارت بر اجرا و تحقق آن.
- سیاستگذاری، برنامه‌ریزی و ایجاد شرایط لازم برای بهره‌گیری حداکثری از ظرفیتهای طراحی، مهندسی و تولیدی کشور در جهت نیل به استقلال صنعتی.
- سیاستگذاری، برنامه‌ریزی، هدایت، و حمایت از ایجاد و توسعه زیرساختهای صنعتی، معدنی و تجاری بر اساس برنامه و نقشه راهبردی توسعه صنعتی، معدنی و تجاری و متناسب با توازن منطقه‌ای، آمایش سرزمین و ملاحظات زیست محیطی.
- برنامه‌ریزی، هدایت، حمایت و مدیریت تولید صادرات محور با ارزش افزوده بالا و فناوری‌های نوین و هدایت و حمایت از مدیریت واردات مبتنی بر تولید صادرات گرا تدوین و تعیین سیاستها و برنامه‌های بهبود نظام تولید و توزیع، نظارت بر شبکه‌های توزیع کالا و خدمات، توسعه رقابت و جلوگیری از انحصار در بازار، ساماندهی زنجیره‌های تأمین و توزیع کالا و خدمات و مدیریت تنظیم و کنترل بازار.
- برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری برای توسعه تکنولوژی و فناوری‌های نوین و پیشرفته و حمایت از توسعه و جذب سرمایه‌گذاری‌های داخلی و خارجی برای توسعه صنعت، معدن و تجارت.
- تهیه و تدوین ضوابط و مقررات مربوط به حوزه صنعت، معدن و تجارت از جمله ضوابط تأسیس و بهره‌برداری از واحدهای صنعتی و معدنی و تجاری، معافیت‌های مالیاتی، ضوابط هدایتی و حمایتی مرتبط با کالا و خدمات و تولید و تجارت و نظامات و مقررات ناظر بر قوانین صادرات و واردات، قانون نظام صنفی، قانون معادن، قانون تجارت، قانون نظام مهندسی معدن، قانون حمایت از حقوق مصرف کنندگان و سایر قوانین ذی‌ربط و نظارت بر اجرای آن‌ها.
- بررسی، تصویب و ابلاغ تعرفه‌های گمرکی و سود بازرگانی محصولات و خدمات
- حمایت و توسعه آموزش و پژوهش، تحقیق و توسعه و انتشار یافته‌ها و نتایج تحقیقات و بهره‌گیری از توانمندی‌های مراکز عالی آموزشی و پژوهشی جهت توسعه بخشهای صنعت، معدن و تجارت [19].

## ۷-۸-۱- وزارت نیرو

وزارت نیرو یکی از مهمترین وزارت خانه‌های اقتصادی دولت محسوب می‌شود. اهمیت تأمین و توزیع آب و برق با کیفیت مطلوب که از حیاتی‌ترین نیازهای جامعه است، مهمترین هدف این وزارت خانه محسوب می‌شود. اما می‌توان مهمترین اهداف وزارت نیرو را به شرح زیر در چند محور ذکر کرد:

- حفاظت، نگهداری، بهره برداری و بهبود کمی و کیفی منابع آب های سطحی و زیرزمینی.
- تأمین نیازهای انرژی با کیفیت مطلوب و تمام وقت برای انواع مصارف شهروندان
- دیدگاه بلند مدت (دورنگر) به صیانت از منابع آب و انرژی و انتقال آن به نسل های آینده
- وظایف مهم این وزارتخانه در حوزه آب و برق (مرتبط با اکوسیستم توربین‌های آبی و نیروگاه‌های برق آبی) به شرح زیر است:
- ساخت، بهره برداری، بازسازی، تعمیر و نگهداری تأسیسات مربوط به تأمین، انتقال و توزیع آب کشور (سدها، نیروگاه‌های برق آبی و ... ) در چارچوب سیاست‌ها، برنامه‌ها و استانداردهای مصوب وزارت نیرو
- سرمایه گذاری در سدهای کوچک و تأسیسات انتقال و توزیع آب
- بهینه سازی، بهبود و ارتقای کیفیت بهره برداری، نگهداری تأسیسات مربوط به تأمین، انتقال و توزیع آب کشور
- ساخت، تولید و بهبود مصالح، تجهیزات و ماشین آلات مورد نیاز صنعت آب و انجام مطالعات و تحقیقات توسعه‌ای و کاربردی در آن خصوص
- تأمین، صادرات و واردات انواع تجهیزات فنی
- برنامه ریزی کلان انرژی کشور به منظور حصول اطمینان از تامین و عرضه انرژی مورد نیاز بخشهای گوناگون
- سیاستگذاری و برنامه ریزی برای شناسائی و در اختیار گرفتن انرژی های دست نیافته (انرژیهای نو) و حمایت و ترویج کاربرد آن
- سیاستگذاری و برنامه ریزی در زمینه صیانت و بهره برداری بهینه از منابع انرژی کشور
- تصویب تعرفه های فروش برق
- تعیین نرخ انواع انرژی
- مطالعات و آینده نگری همه جانبه شرایط محیطی و جهانی
- حمایت از توسعه تحقیقات بنیادی و کاربردی و فن آوری
- انجام مطالعات لازم برای انتخاب فناوری های مناسب تولید و انتقال برق
- اتخاذ سیاست‌های لازم جهت حمایت و تقویت ظرفیت های پیمانکاری، مشاوره ای در ساخت و تولید تجهیزات نیروگاهها و شبکه های انتقال
- تهیه و تدوین دستورالعمل‌های تعمیراتی واحدهای تولید نیروگاه های مختلف در سطح بنگاه
- نظارت بر اجرای درست و به موقع طرحها و بهینه سازی تجهیزات در تولید برق
- بررسی و مطالعات امکان سنجی احداث نیروگاه بر اساس شرایط جغرافیایی و منابع سوخت
- احداث و توسعه نیروگاهها و افزایش ظرفیت تولید برق
- سرمایه گذاری در تأسیسات تولید صنعت برق
- مدیریت و بهره‌برداری از تأسیسات تولید برق [20]

## ۸-۱- سازمان حفاظت محیط زیست

هدف این سازمان تحقق اصل پنجاهم قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران به منظور حفاظت از محیط زیست و تضمین بهره‌مندی صحیح و مستمر از محیط زیست همراه با توسعه پایدار و بهبود، رشد و اعتلای کیفی انسان‌ها می‌باشد. در این راستا وظایف زیر برای این سازمان تعریف شده است:

- حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی کشور و ترمیم اثرات سوء گذشته در محیط زیست
- ارزیابی ظرفیت قابل تحمل محیط در جهت بهره‌وری معقول و مستمر از منابع محیط زیست و نظارت مستمر بر بهره‌برداری از منابع محیط زیست
- بررسی، مطالعه و تحقیق به منظور دستیابی یا حصول شناسائی در زمینه چگونگی استقرار پدیده‌های عمرانی و توسعه کشور مانند واحدهای صنعتی، نیروگاه‌ها و سدها و همچنین استفاده از تکنولوژی سازگار با محیط
- تهیه و تدوین ضوابط و استانداردهای زیست محیطی در زمینه طبقه‌بندی منابع و عوامل تغییر و تخریب مسیر رودخانه‌ها
- ارزیابی و نظارت به منظور حصول اطمینان از کاربرد و کارایی ضوابط و استانداردهای زیست محیطی
- ارزشگذاری اقتصادی منابع طبیعی و هزینه‌های زیست محیطی ناشی از توسعه [21]

## ۹-۸- شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران

موضوع فعالیت شرکت عبارت است از مدیریت سهام و سرمایه‌های شرکت در شرکتهای زیرمجموعه و انجام هر گونه فعالیت در راستای شناخت، مطالعه، توسعه، حفاظت، بهره‌برداری بهینه از منابع آب، تأسیسات و سازه‌های آبی (به استثنای امور مربوطه به توزیع آب، جمع‌آوری و انتقال و تصفیه فاضلاب شهری و روستایی) و ظرفیتهای برق آبی اعم از مدیریت نظارت، سرمایه‌گذاری در چارچوب تکالیف مندرج در قوانین و مقررات مربوط و سیاستهای وزارت نیرو که از طریق شرکتهای زیرمجموعه و یا عنداللزوم با تصویب مجمع عمومی توسط شرکت انجام خواهد شد. موارد ذیل از جمله آن می‌باشد:

- کارگزاری وزارت نیرو در اجرای قانون توزیع عادلانه آب و سایر قوانین و مقررات مربوط به آب، از جمله مدیریت و کنترل بهره‌برداری از منابع آب و انجام امور و مطالعات پایه و حفاظت کمی و کیفی منابع آب
- بررسی و تدوین پیشنهادهاى لازم در زمینه راهبردها، سیاستها، برنامه‌های بلند مدت و میان مدت بخش آب و آرایه آنها به وزارت نیرو
- راهبری و انجام نظارت در شناخت، مطالعه و اجرای طرحهای تأمین و انتقال آب، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، پایداری و ایمنی سدها، مهندسی رودخانه‌ها و سواحل، کنترل سیلاب و تغذیه مصنوعی و تولید انرژی برق آبی و همچنین راهبری و انجام نظارت در بهره‌برداری از تأسیسات و سازه‌های مربوط (تبصره: تولید انرژی برق آبی توسط شرکتهای زیرمجموعه با رعایت دستورالعمل‌های بهره‌برداری و تحت مدیریت مرکز ملی راهبری و پایش شبکه سراسری برق کشور (دیسپاچینگ) خواهد بود.)
- تهیه دستورالعمل‌ها، ضوابط، معیارها و استانداردهای فنی و تخصصی مورد نیاز در زمینه احداث، نگهداری و بهره‌برداری از تأسیسات و سازه‌های آبی و آرایه آن به وزارت نیرو برای تصویب
- انجام اقدامات لازم برای توسعه تحقیقات، فن‌آوری، انتقال دانش فنی، اطلاع‌رسانی در زمینه‌های آب و انرژی برق آبی و نیز تأمین منابع مالی و پشتیبانی از اینگونه فعالیتها

- حمایت از توسعه فعالیتهای آموزشی و پژوهشی و تحقیقات در زمینه‌های تخصصی مرتبط با بخش آب و پشتیبانی از برنامه‌های تربیت متخصصان مورد نیاز بخش آب کشور
- انجام معاملات و انعقاد قراردادهای مربوط به خرید و فروش عمده آب و انرژی برق آبی از طریق شرکتهای زیرمجموعه
- مدیریت، توسعه و تأمین منابع مالی و بخش آب جهت سرمایه‌گذاری در تأسیسات تأمین آب، انتقال آب و انرژی برق آبی برابر برنامه‌های مصوب و استفاده بهینه از این منابع از طریق برقراری تسهیلات و گردش منابع مالی، فی‌مابین شرکت و شرکتهای زیرمجموعه
- لازم به ذکر است که در سال ۱۳۹۹ معاونت آب و آبفای وزارت نیرو در این شرکت ادغام گردید. یکی از دفاتر زیرمجموعه معاونت آب و آبفا، دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا می‌باشد که تاکنون دستورالعمل‌های زیر را در راستای تهیه معیارها، ضوابط و استانداردهای تدسیسات آبی تدوین کرده است:
- راهنمای بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌های آبی سدهای بزرگ
- راهنمای تکمیل و تحویل تجهیزات در راه‌اندازی و بهره‌برداری اولیه از واحدهای نیروگاه‌های برق آبی جدیدالاحداث
- راهنمای IEEE برای نوسازی نیروگاه‌های برق آبی
- راهنمای تشخیص آثار فنی، اقتصادی و زیست محیطی و برآورد ارزش واقعی تولید برق نیروگاه‌های برقابی و خدمات ارائه شده این نیروگاه‌ها به شبکه سراسری از دیدگاه بنگاهداری [22]

## ۱۰-۸-۱- پژوهشگاه نیرو

- به منظور تحقق بخشی از وظایف پژوهشی وزارت نیرو و نیز ارتقای کیفی امور آن وزارتخانه، پژوهشگاه نیرو تأسیس گردیده است. مأموریت‌های پژوهشگاه نیرو در چهار محور زیر است:
- مدیریت تحقیقات کاربردی و توسعه‌ای صنعت برق و انرژی
  - اجرای مطالعات و تحقیقات راهبردی، کلان، بلندمدت و با ریسک بالای صنعت برق و انرژی
  - ایجاد، توسعه و اکتساب فن‌آوری
  - حمایت از توسعه فن‌آوری و نوآوری
- در راستای تحقق مأموریت‌های فوق راهبردهای زیر برای پژوهشگاه نیرو تعریف شده است:
- انجام مطالعات و اجرای پروژه‌های آینده‌نگاری و سیاست پژوهی صنعت برق و انرژی در سبد پروژه‌های پژوهشگاه نیرو
  - ظرفیت‌سازی و حمایت از فن‌آوری‌های صنعت برق و انرژی
  - فراهم‌سازی زیر ساخت‌های توسعه فناوری صنعت برق و انرژی (شامل: مرکز رشد شرکت‌های نوآور، پارک‌های فناوری و صندوق پژوهش و ...)
  - پژوهش با تمرکز بر پروژه‌های راهبردی و کلان ریسک بالا و حاکمیتی
  - ظرفیت‌سازی برای به عهده‌گیری مرجعیت در پژوهش‌های صنعت برق و انرژی
  - توانمندسازی پژوهشگران در صنعت برق و انرژی [23]

## ۱-۸-۱۱ - مؤسسه تحقیقات آب

مؤسسه تحقیقات آب به عنوان یکی از زیرمجموعه‌های وزارت نیرو در عرصه تحقیق و پژوهش در صنعت آب و فاضلاب کشور فعال بوده و دارای دو پژوهشکده در تهران و سه مرکز ملی مطالعاتی - تحقیقاتی در شهرهای تهران، ساری و شیراز می‌باشد. از جمله فعالیت‌های صورت گرفته در این مؤسسه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

تدوین نقشه راه توسعه فناوری در توربین‌های کوچک آبی (میکرو)

طراحی بومی سازی و تجاری سازی نیروگاه‌های آبی میکرو [24]

## ۱-۸-۱۲ - سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد ایران با تصویب قانون در سال ۱۳۳۹ تأسیس شد و کار خود را در چارچوب اهداف و مسئولیت‌های تعیین شده آغاز کرد و در همان سال به عضویت سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO) در آمد. طبق تصویب‌نامه شورای عالی اداری در سال ۱۳۹۰، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر نام داد و زیر نظر مستقیم ریاست جمهوری قرار گرفت. بر اساس وظایف، فعالیت‌های سازمان ملی استاندارد ایران در پنج حوزه استانداردسازی، ارزیابی انطباق تأیید صلاحیت، اندازه‌شناسی و فعالیت‌های پژوهشی استاندارد تعریف می‌شود. از جمله وظایف مهم سازمان استاندارد می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تعیین، تدوین و انتشار استانداردهای ملی (اجباری) به استثنای مواد دارویی
  - تعیین ویژگی کالاها و مقایسه آن با استانداردهای مربوطه (به استثنای مواد دارویی)
  - تأیید صلاحیت شرکت‌ها و مؤسسات بازرسی کننده داخلی و خارجی، آزمایشگاه‌ها، کارشناسان استاندارد و گواهی دهندگان نظام‌های سیستم مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی
- سازمان ملی استاندارد ایران تا کنون حدود ۲۷۰۰۰ عنوان استاندارد ملی را تدوین کرده است که بیشترین میزان استانداردهای تدوین شده در زمینه مکانیک و فلزشناسی است. در زیر عناوین استانداردهای تدوین شده توسط این سازمان در زمینه توربین‌های آبی (توربین‌های هیدرولیکی) آمده است:
- توربین‌های هیدرولیکی، پمپ‌های انبارش و پمپ توربین‌ها - آزمون‌های پذیرش مدل (مطابق با استاندارد IEC 60193)
  - توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - نوسازی و بهبود عملکرد (مطابق با استاندارد IEC 62256)
  - توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - اسناد مناقصه - قسمت ۱: کلیات و پیوست‌ها (مطابق با استاندارد IEC/TR 61366-1)
  - توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - اسناد مناقصه - قسمت ۳: راهنمای ویژگی‌های فنی توربین‌های فرانسوی (مطابق با استاندارد IEC/TR 61366-2)
  - توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - اسناد مناقصه - قسمت ۳: راهنمای ویژگی‌های فنی توربین‌های پلتون (مطابق با استاندارد IEC/TR 61366-3)
  - توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - اسناد مناقصه - قسمت ۴: راهنمای ویژگی‌های فنی توربین‌های کاپلان و ملخی (مطابق با استاندارد IEC/TR 61366-4)

- توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - اسناد مناقصه - قسمت ۵: راهنمای ویژگی‌های فنی توربین‌های لوله‌ای (مطابق با استاندارد IEC/TR 61366-5)
- توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - اسناد مناقصه - قسمت ۶: راهنمای ویژگی‌های فنی پمپ توربین‌ها (مطابق با استاندارد IEC/TR 61366-6)
- توربین‌های هیدرولیک، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - اسناد مناقصه - قسمت ۷: راهنمای ویژگی‌های فنی پمپ‌های ذخیره‌ای (مطابق با استاندارد IEC/TR 61366-7)
- راهنمای ویژگی‌های سامانه‌های کنترل توربین هیدرولیک (مطابق با استاندارد IEC 61362)
- راهنمای راه‌اندازی، عملکرد و نگهداری پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌های عمل‌کننده به عنوان پمپ (مطابق با استاندارد IEC 60805)
- توربین‌های هیدرولیکی، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها - ارزیابی حفره‌های ایجاد شده توسط کاویتاسیون - قسمت ۱: ارزیابی توربین‌های واکنشی، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها (مطابق با استاندارد IEC 60609-1)
- راهنمایی برای راه‌اندازی، بهره‌برداری و نگهداری توربین‌های هیدرولیکی (مطابق با استاندارد IEC 60545)
- توربین‌های هیدرولیکی - آزمون سامانه‌های کنترل (مطابق با استاندارد IEC 60308)
- آزمون‌های پذیرش میدانی جهت تعیین عملکرد توربین‌های هیدرولیکی و پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها (مطابق با استاندارد IEC 60041)
- راهنمای اندازه‌گیری میدان در ارتعاشات و ضربان‌های ماشین‌های هیدرولیک (توربین‌ها، پمپ‌های ذخیره‌ای و پمپ توربین‌ها) (مطابق با استاندارد IEC 60994)
- راهنمای بهینه‌سازی نیروگاه‌های برق آبی [25]

## ۹-۱- دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی

در این بخش به معرفی دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی فعال در حوزه توربین‌های آبی و محورهای پژوهشی آن‌ها در این زمینه پرداخته شده است.

### ۹-۱-۱- مؤسسه توربوماشین‌های آبی دانشگاه تهران

این مؤسسه با هدف ایجاد بستری مناسب جهت انجام پروژه‌های صنعتی، فعالیت‌های پژوهشی و آموزشی در زمینه‌های مختلف توربوماشین‌های آبی تأسیس گردیده است. نیمی از اعضای هیئت امنای این مؤسسه منتخب وزارت نیرو و نیم دیگر منتخب پردیس فنی دانشگاه تهران هستند. این مؤسسه با حمایت مالی ستاد توسعه فناوری حوزه انرژی معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری، آزمایشگاه تست و مرکز محاسبات خود را راه‌اندازی کرد. با این اقدام پتانسیلی بالقوه در زمینه طراحی و آزمایش توربین‌های آبی به مرکزیت دانشگاه تهران ایجاد شد [26].

## ۱-۱۰- پژوهشگران و انجمن ها

در این بخش به معرفی انجمن ها و افراد شاخص در زمینه پژوهش های مرتبط با توریسم های آبی پرداخته می شود.

### ۱-۱۰-۱- انجمن هیدرولیک ایران

انجمن هیدرولیک ایران از سال ۱۳۷۳ کار خود را آغاز نموده است. انجمن با هدف شناساندن جایگاه حرفه هیدرولیک و کارشناسان آن و نیز ایجاد همکاری و هماهنگی بین ایشان در زمینه های علمی، کاری و پژوهشی تشکیل شده است. اعضای انجمن از بین کارشناسان و متخصصان دانش آموخته رشته های مهندسی عمران، مهندسی آب، مهندسی مکانیک و سایر رشته های وابسته که در زمینه هیدرولیک فعالیت می نمایند، انتخاب شده اند. انجمن تاکنون گام هایی در زمینه هماهنگی فعالیت های حرفه ای، تدوین ضوابط کاری، تهیه آیین نامه ها، برپایی همایش های علمی و فنی، انتشار نشریه های خبری و علمی و نیز برقراری ارتباط با نهادهای داخلی و بین المللی فعال در زمینه هیدرولیک برداشته است. اهم فعالیت های صورت گرفته توسط این انجمن به شرح زیر است:

- برگزاری کنفرانس هیدرولیک ایران به صورت سالانه با مشارکت دانشگاه های کشور
  - انتشار مجله علمی - پژوهشی هیدرولیک
  - برگزاری دوره های کارگاه های آموزشی و سخنرانی های علمی
- لازم به ذکر است که یکی از کمیته های این انجمن کمیته ماشین های آبی است [27].

### ۱-۱۰-۲- انجمن برق آبی ایران

انجمن برق آبی ایران به منظور گسترش، پیشبرد و ارتقای دانش فنی این صنعت و توسعه کمی و کیفی نیروهای متخصص و بهبود بخشیدن به امور آموزشی، پژوهشی و اجرایی با مشارکت متخصصان و صاحب نظران این صنعت فعالیت می نماید. نشریه سد و نیروگاه برق آبی توسط این انجمن منتشر می شود [28].

### ۱-۱۰-۳- پژوهشگران

در زمینه توریسم های آبی پژوهشگران متعددی در کشور فعالیت می کنند که در زیر نام برخی از آن ها آمده است:

جدول ۱-۲: پژوهشگران فعال در زمینه توریسم های آبی

| نام             | موسسه                                          | سمت            | زمینه تخصصی                                                |
|-----------------|------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------|
| سید احمد نوربخش | دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران            | استاد بازنشسته | پمپ و توریسم های آبی                                       |
| شهرام درخشان    | دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران | استادیار       | توربوماشین ها و دینامیک سیالات محاسباتی                    |
| علیرضا ریاسی    | دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران            | دانشیار        | توربوماشین های آبی، سیالات غیرنیوتنی و انرژی های تجدیدپذیر |

|                     |                                                                            |                          |                        |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| علیرضا<br>مردوخ پور | گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و<br>مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان | استادیار                 | سد و نیروگاه آبی       |
| غضنفر<br>شاهقلیان   | دانشکده برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد<br>نجف آباد                           | دانشیار                  | دینامیک سیستم‌های قدرت |
| رضا سنگری           | شرکت غلتک سازی سپاهان                                                      | مدیر بازاریابی و<br>فروش | توربین آبی             |

## ۱۱-۱- شرکت‌ها

در این بخش شرکت‌های داخلی فعالی در زمینه نیروگاه‌های برق آبی و توربین‌های آبی معرفی می‌شوند.

### ۱۱-۱-۱- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران

شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران در سال ۱۳۶۸ تأسیس گردید. رسالت اصلی این شرکت بالفعل نمودن بخش قابل توجهی از پتانسیل‌های کشور در زمینه انرژی برق آبی و توسعه تأسیسات ذخیره و انتقال آب می‌باشد. در راستای تحقق مأموریت مذکور هدف از تشکیل شرکت ایجاد، توسعه و تکمیل طرح‌ها و پروژه‌های تأمین و انتقال آب و تولید انرژی برق آبی شامل نیروگاه‌های برق آبی و تأسیسات تلمبه ذخیره‌ای و همچنین انجام خدمات مدیریت طرح در زمینه‌های اشاره شده می‌باشد. به منظور تحقق هدف مذکور و حرکت به سمت رسالت سازمانی یاد شده، این شرکت در زمینه‌های زیر در حال تکمیل و توسعه فعالیت‌های خود می‌باشد:

- تهیه، اجرا و توسعه تأسیسات و سازه‌های تولید انرژی برق آبی.
- تهیه و اجرای طرح‌ها و پروژه‌های ملی در زمینه سازه‌ها و تأسیسات تأمین و انتقال آب و تأسیسات تلمبه‌ذخیره‌ای.
- ارائه خدمات مدیریت طرح در زمینه احداث و توسعه تأسیسات مربوط به آب و نیروگاه‌های برق آبی، براساس روش‌های مختلف سرمایه‌گذاری.
- تهیه طرح‌های اجرایی متناسب با نیازهای صنعت آب کشور و ارائه آن به شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران و اعمال نظارت در اجرای این گونه طرح‌ها.
- انجام مطالعات امکان‌سنجی برای ایجاد نیروگاه‌های برق آبی و ارائه آن به شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران.
- مشارکت در تهیه استاندارد در زمینه‌های مرتبط با اهداف و وظایف شرکت و ارائه خدمات مشاوره‌ای در این ارتباط.
- اجرای برنامه‌های شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران در زمینه حمایت و تقویت ظرفیت‌های پیمانکاری، مشاوره‌ای و ساخت و تولید تجهیزات نیروگاه‌های برق آبی و جلب مشارکت مردمی در اجرای طرح‌های توسعه منابع آب و انرژی برق آبی.

- انجام تحقیقات لازم و همکاری و اشتراک مساعی با مؤسسات ذیربط در پژوهش و بررسی به منظور توسعه علمی، فنی و اقتصادی در امور مربوط به اهداف و وظایف شرکت از جمله روش‌های جدید علمی و فنی در اجرای تأسیسات و سازه‌های آبی و برق‌آبی.
  - خرید خدمات از بخش غیردولتی برای انجام امور مطالعاتی، اجرای تأسیسات آب و سازه‌های آبی و انرژی برق‌آبی به منظور کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و ارتقای سطح خدمات.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران بزرگترین کارفرمای سد و نیروگاه آبی در کشور است. این شرکت یکی از زیر مجموعه‌های شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب محسوب شده و کلیه سهام آن متعلق به دولت می‌باشد [29].

## ۲-۱۱-۱- شرکت صنایع آذرآب

صنایع آذرآب اراک، هلدینگ ایرانی است که در زمینه احداث زیرساخت‌های صنعتی، ساخت پالایشگاه‌های گاز، پالایشگاه‌های نفت، مجتمع‌های پتروشیمی، سدها، کارخانجات سیمان، کارخانجات فولاد، نیروگاه‌های برق‌آبی، نیروگاه‌های گازی، نیروگاه‌های حرارتی، نیروگاه‌های هسته‌ای و تولید تجهیزات مربوط به آنان فعالیت می‌کند. همچنین این شرکت در زمینه ساخت کارخانجات قند و کارخانجات نیشکر و تولید تجهیزات آنان نیز تخصص دارد. صنایع آذرآب در کنار ماشین‌سازی اراک قرار گرفته و در ابتدا قصد از ساخت آذرآب، طرح توسعه ماشین‌سازی اراک بوده که پس از انقلاب به‌عنوان شرکتی جدا در سال ۱۳۶۳ به بهره‌برداری می‌رسد. این شرکت تنها تولیدکننده توربین آبی نیروگاه‌های برق‌آبی در ایران، تحت‌لیسانس فویت آلمان و آلستوم فرانسه است. دپارتمان نیروگاه‌های آبی و تجهیزات شرکت آذرآب با استفاده از تجربیات و دانش فنی کسب شده از آموزش‌های خارج از کشور و همچنین با استفاده از تجهیزات منحصر موجود در شرکت در خصوص ماشینکاری پیچیده قطعات نیروگاه‌ها و تجهیزات کارخانجات، توانایی طراحی، مشاوره صنعتی و فاینس، بازرگانی، مهندسی ساخت و نصب و راه اندازی و مدیریت پروژه در خصوص ساخت نیروگاه‌های آبی فرانسوی و کاپلان و شیرهای پروانه‌ای را ایجاد نموده است.



شکل ۱-۱۶: حلزونی توربین آبی ساخت شرکت آذرآب [30]

این دپارتمان تاکنون اقدام به مهندسی ساخت و یا واگذاری ساخت نیروگاه‌های بزرگ آبی کارون ۱، کارون ۲، کارون ۳، کارون ۴ یا مسجد سلیمان، طرح توسعه نیروگاه آبی مسجد سلیمان، نیروگاه آبی کرخه و تجهیزات کارخانجات کرده است. پروژه‌های مربوط به توربین آبی فرانسیس که از سال ۱۳۷۴ توسط این دپارتمان انجام شده است به شرح زیر می‌باشد:

- توربین آبی کارون ۱ به تعداد چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی
- توربین آبی کارون ۳ به تعداد هشت واحد ۲۵۰ مگاواتی
- توربین آبی کرخه به تعداد سه واحد ۱۳۳/۳ مگاواتی
- توربین آبی مسجد سلیمان به تعداد چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی
- توربین آبی طرح توسعه مسجد سلیمان به تعداد چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی
- توربین آبی گتوند به تعداد چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی
- توربین آبی کارون چهار به تعداد چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی
- توربین آبی سیاه بیشه به تعداد چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی
- توربین آبی سیمره به تعداد سه واحد ۱۶۳/۳ مگاواتی [30]

### ۳-۱۱-۱- شرکت فراب

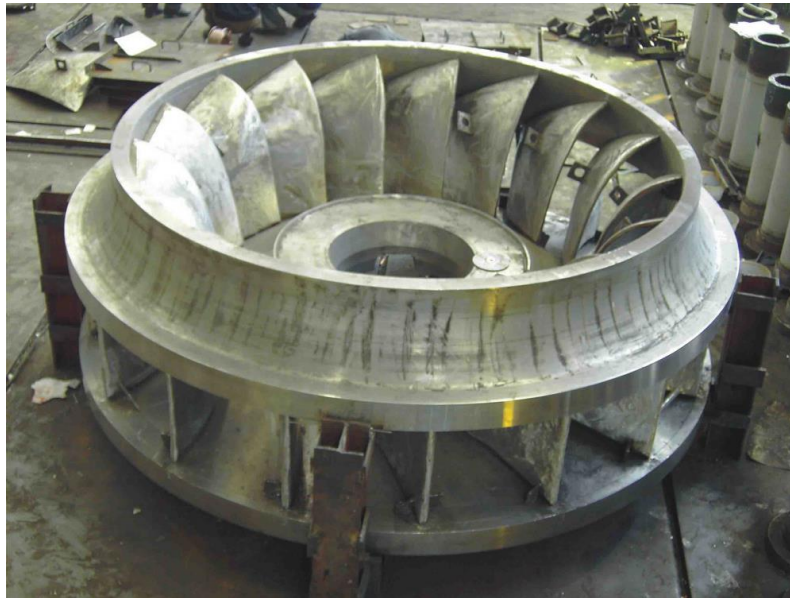
شرکت فراب (سهامی خاص) در سال ۱۳۷۱، فعالیت رسمی خود را به عنوان پیمانکار عمومی احداث نیروگاه‌های آبی در ایران آغاز نمود. هدف از تأسیس این شرکت، ایجاد دانش فنی طراحی، اجرا و مدیریت پروژه‌های نیروگاه آبی در یک شرکت ایرانی و کاهش هزینه احداث این نیروگاه‌ها در مقایسه با اجرای پروژه به صورت کلید تحویل توسط پیمانکاران خارجی بود.

در سال ۱۳۸۳، با گذشت بیش از یک دهه از فعالیت فراب در حوزه احداث نیروگاه‌های آبی در کشور، با توجه به محدود شدن پتانسیل رشد آتی بازار پروژه‌های برق آبی در ایران و ظرفیت و توانایی فنی و مهندسی و اجرایی در فراب برای ورود به سایر حوزه‌های زیربنایی، فراب را بر آن داشت تا عقد قراردادهای احداث نیروگاه‌های آبی در خارج از ایران و ورود به حوزه طرح‌های نفت، گاز و پتروشیمی و نیروگاه حرارتی را به عنوان هدف استراتژیک خود تعیین و فعالیت‌های خود را در این راستا برنامه‌ریزی و سازمان‌دهی کند. این شرکت تاکنون ۸۶ واحد نیروگاهی را با ظرفیت ۱۱۱۹۰ مگاوات اجرا نموده و ۲۷۹۷/۲ مگاوات، شامل ۷۸۴/۲ مگاوات نیروگاه آبی و ۲۰۱۳ مگاوات نیروگاه حرارتی، در دست اجرا دارد.

شرکت ساخت تجهیزات فراب در سال ۱۳۷۹ با نام «شرکت مهندسی و مدیریت ساخت توربین‌های برق آبی (توبا)» توسط شرکت فراب و با هدف انتقال دانش و تکنولوژی طراحی، مهندسی و ساخت تجهیزات نیروگاه‌های آبی با استفاده از منابع ساخت داخلی در ایران تأسیس شد. این شرکت، دانش طراحی انواع متعدد تجهیزات توربین آبی و شیر پروانه‌ای نیروگاه‌های آبی را در اختیار دارد. به علاوه از سوابق کاری خوبی در زمینه شبیه‌سازی سیستم‌های تهویه تونلی ریلی و جاده‌ای برخوردار است. شرکت ساخت تجهیزات فراب، تاکنون با همکاری سازندگان داخلی، تجهیزات نیروگاهی شامل توربین‌های آبی، دریچه‌های ورودی، ژنراتور، تجهیزات مکانیکی آبی، جرثقیل دروازه‌ای و سقفی، مخازن تحت فشار، سازه‌های فلزی و تجهیزات یوتیلیتی بویلر، در مجموع به وزن ۴۰,۰۰۰ تن، را به کارفرمایان خود تحویل داده است [31].

#### ۴-۱۱-۱- شرکت مهندسی ساخت صنایع فولاد سایا

شرکت مهندسی ساخت صنایع فولاد سایا از سال ۱۳۷۳ بعنوان اولین تولید کننده قطعات سنگین و فوق سنگین فولادی کشور فعالیت خود را آغاز نموده است و تاکنون پروژه های هسته مرکزی توربین آبی نیروگاه‌های سدهای دز و مارون را اجرا نموده است.



شکل ۱-۱۷: چرخ توربین آبی ریخته شده توسط شرکت صنایع فولاد سایا [32]

#### ۵-۱۱-۱- شرکت مه‌باب قدس

یکی از مهمترین فعالیت های شرکت مهندسی مشاور مه‌باب قدس، مطالعه، طراحی و نظارت بر ساخت انواع سدها، از جمله سدهای بتنی (وزنی، دوقوسی، بتنی غلتکی)، خاکی و سنگریزه‌ای می‌باشد. شرکت مه‌باب قدس از ابتدای تأسیس تاکنون، حدود ۲۰۰ سد با ارتفاع بیش از ۵۰ متر و حداکثر تا ۳۱۵ متر را مطالعه، طراحی و بر ساخت ۵۲ سد نظارت نموده است که از میان آن ها عملیات اجرایی ۲۳ سد به پایان رسیده و بهره برداری از آن‌ها آغاز شده است. مطالعه، طراحی و نظارت بر ساخت نیروگاه‌های برق آبی یکی دیگر از فعالیت‌های اصلی شرکت مه‌باب می‌باشد و تاکنون در طراحی و نظارت بیش از ۱۷۰۰۰ مگاوات فعالیت داشته است، که حدود ۸۰۰۰ مگاوات آن در دست بهره‌برداری است [33].

#### ۶-۱۱-۱- شرکت مهندسی قدس نیرو

شرکت مهندسی قدس نیرو یکی از بزرگترین شرکت‌های مهندسی ایرانی است که در اجرای پروژه‌های مختلف در حوزه انرژی و صنایع جانبی مرتبط با آن فعالیت دارد. در شرکت مهندسی قدس نیرو آرایه خدمات مهندسی، مشاوره و مدیریتی به کارفرمایان، در قالب ۶ معاونت مهندسی مجزا، ارائه می‌شود.

حوزه‌های مهندسی تحت پوشش این معاونت‌ها عبارت اند از احداث و توسعه نیروگاه‌های گازی، بخاری، سیکل ترکیبی، کلاس F، صنایع نیروگاهی، پست‌های انتقال نیرو، شبکه‌های انتقال و توزیع نیرو، سدسازی و شبکه‌های آب و آبیاری و فاضلاب،

نیروگاه‌های برقابی، نفت، گاز و پتروشیمی، مدیریت انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، CHP و غیره.

معاونت آب، ابنیه و محیط زیست شرکت مهندسی قدس نیرو در سال ۱۳۷۲ تشکیل و هدف آن انجام خدمات متنوع مهندسی در چارچوب کسب و کارهایی به شرح زیر است:

- سد و نیروگاه برق آبی (شامل توربین‌های آبی، شیرآلات، دریچه و تجهیزات وابسته، جانمایی و ...)
- شبکه آبیاری و زهکشی
- ساختمان و راه
- مطالعات محیط‌زیست و GIS
- آب و فاضلاب
- مطالعات پایه منابع آب
- پدافند غیرعامل [34]

## ۷-۱۱-۱- شرکت غلتک سازان سپاهان

شرکت غلتک سازان سپاهان هدف ریخته‌گری قطعات سنگین و فوق سنگین چدنی و فولادی، با ظرفیت تولید سالیانه ۲۰ هزار تن انواع قطعات چدنی و فولادی تا وزن ۱۰۰ تن و همچنین ۱۵۰ هزار تن شمش فولادی به روش ریخته‌گری مداوم در زمینی به مساحت ۴۰ هزار متر مربع همراه با ۱۴ هزار متر مربع سالن‌های تولیدی تأسیس گردید. از سالن‌ها و فضاهای تولیدی می‌توان به سالن ریخته‌گری قطعات سنگین، کوره‌های ذوب، سالن ریخته‌گری پیوسته CCM، سالن تولید غلتک‌های فوق سنگین از جمله غلتک‌های پشتیبان، سالن عملیات حرارتی، کارگاه مدلسازی، انبارهای مواد اولیه و محصول، آزمایشگاه‌ها و ... اشاره کرد. از جمله فعالیت‌های این شرکت در زمینه صنایع نیروگاهی، ساخت هسته مرکزی توربین آبی (رانر)، ویکیت گیت و آبراهه‌های توربین آبی است [35].

## ۸-۱۱-۱- شرکت نصب، تعمیر و نگهداری نیروگاه‌های برق آبی خوزستان

سازمان آب و برق خوزستان در سال ۱۳۸۱ نسبت به صدور مجوز تأسیس شرکت نصب، تعمیر و نگهداری نیروگاه‌های برق آبی خوزستان اقدام نمود تا ضمن استمرار تولید انرژی برق آبی استان، از مجموعه فنی مهندسی این شرکت برای پرورش منابع انسانی حرفه‌ای و توسعه امکانات فنی در زمینه نصب، بهسازی و نگهداری نیروگاه‌ها و تأسیسات صنعت آب و برق بهره‌مند گردد. این شرکت توانست علاوه بر تأسیسات آب و برق استان خوزستان، حوزه فعالیت خود را در سطح کشور نیز گسترش دهد. زمینه‌های فعالیت این شرکت عبارت اند از:

- نصب و راه اندازی نیروگاه‌ها
- بهینه‌سازی و تعمیرات اساسی نیروگاه‌ها
- کارهای ساختمانی و تأسیساتی سد و نیروگاه
- بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق آبی
- احداث و بهینه‌سازی پست و شبکه‌های فشار قوی
- احداث و بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ و تصفیه‌خانه‌ها
- عملیات نصب و راه‌اندازی و اجرای خط لوله تأسیسات آب و فاضلاب

- تعمیر و نگهداری تأسیسات و تجهیزات نیروگاهی، پست و شبکه، آب و فاضلاب و نفت و گاز
- عملیات ژئوتکنیک، حفاری و احیای زهکش‌ها
- ارائه خدمات مشاوره فنی، مهندسی و صنعتی [36]

## ۱-۱۲- جایگاه نیروگاه‌های برق آبی در صنعت برق

در حال حاضر نیروگاه‌های برق آبی یکی از کم هزینه‌ترین روش‌های تولید برق هستند و در جاهایی که امکان نصب داشته باشند مرجح می‌باشند. به عنوان مثال در کشور نروژ ۹۹ درصد از برق مورد نیاز توسط نیروگاه‌های برق آبی تولید می‌شود. بزرگترین نیروگاه برق آبی جهان نیز سد سه دره<sup>۱</sup> چین با ظرفیت ۲۲/۵ گیگاوات است. این نیروگاه سالانه بین ۸۰ تا ۱۰۰ تراوات ساعت برق تولید می‌کند.



شکل ۱-۱۸: سد سه دره چین دارای بزرگترین نیروگاه برق آبی جهان به ظرفیت ۲۲۵۰۰ مگاوات است

طبق آمار سال ۲۰۱۹ آژانس بین‌المللی انرژی، ظرفیت نصب شده برق آبی در جهان ۱۳۰۷ گیگاوات با تولید سالانه ۴۳۳۳ تراوات ساعت برق است. لازم به ذکر است که این مقدار برابر با دو سوم کل تولید برق تجدیدپذیر دنیا است. طبق آمار سال ۲۰۱۷ میلادی، نیروگاه‌های برق آبی به تنهایی حدود یک ششم از برق جهان را تولید می‌کنند [37]. در ایران نیز طبق آمار سال ۱۳۹۸، ظرفیت نصب شده برق آبی کشور حدود ۱۲۱۸۱ مگاوات (همگی تحت مالکیت وزارت نیرو) بوده است که با تولید ۳۰/۶ تراوات ساعت از ۳۲۸/۲ تراوات ساعت برق تولیدی در این سال، سهم ۹ درصدی در تولید برق کشور داشتند. ایران دارای ۱۳ نیروگاه برق آبی با ظرفیت بیش از ۱۰۰ مگاوات و ۱۳ نیروگاه برق آبی با ظرفیت ۱۰ تا ۱۰۰ مگاوات است. اکثریت قریب به اتفاق توربین‌های آبی نیروگاه‌های ساینز بزرگ و متوسط ایران از نوع فرانسوی هستند.

<sup>1</sup> Three Gorges Dam

بیش از نیمی از توربین‌های آبی نصب شده در ایران (به لحاظ ظرفیت) ساخت شرکت ماشین‌های الکتریکی هاربین (HEC) واقع در چین می‌باشند. گفتنی است که حداقل دو سوم از ظرفیت نصب شده برق آبی کشور در استان خوزستان واقع است [۳].

## ۱-۱۳- ویژگی‌های فناوری توربین‌های آبی

نیروگاه‌های آبی از جنبه‌های زیادی با انواع دیگر نیروگاه‌ها که عمدتاً در ردیف نیروگاه‌های حرارتی قرار می‌گیرند، تفاوت دارند. هر چند این نیروگاه‌ها نیز مانند بقیه نیروگاه‌ها دارای اجزای اصلی ضروری برای تولید قدرت یعنی توربین، ژنراتور، گاورنر و تحریک کننده مجهز به دستگاه تنظیم ولتاژ می‌باشند، لیکن این تجهیزات تفاوت‌هایی با تجهیزات متناظرشان در نیروگاه‌های حرارتی دارند. توربین - ژنراتور برق آبی اصولاً دارای وزن بیشتر و سرعت دورانی کمتری نسبت به واحدهای نوع بخاری و یا گازی می‌باشد.

همان طور که در فصل اول گفته شد، محدوده مطالعات شامل نیروگاه‌های سائز متوسط و بزرگ با ارتفاع ریزش متوسط و زیاد است و توربین‌های فرانسویس بیشترین کاربرد را در ساخت این نیروگاه‌ها دارند. لازم به ذکر است که در ایران تمام نیروگاه‌های موجود با واحدهای متوسط و بزرگ (غیر از نیروگاه سد ارس) و نیز نیروگاه‌های در دست احداث از نوع فرانسویس با محور عمودی می‌باشند.

### ۱-۱۳-۱ طراحی هیدرولیکی

برای طراحی توربین، رویکردهای متعددی وجود دارد. یکی از این رویکردها موسوم به روش بووت<sup>۱</sup> مبتنی بر پارامترهای اساسی توربین یعنی ارتفاع ریزش آب، دبی و سرعت چرخش است. از این پارامترها سرعت مخصوص چرخ به دست آمده و بر اساس آن ابعاد هندسی چرخ بر اساس روابط پیشنهادی به دست می‌آید. رویکرد دیگری که در ایران متداول است استفاده از روش CMM اپتیک برای مهندسی معکوس چرخ موجود است. در این روش ابر نقاط با استفاده از اسکن دیجیتال به دست می‌آید. در بخش طراحی هیدرولیکی، اخیراً استفاده از ابزارهای CFD<sup>۲</sup> بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. چرا که با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان جریان پیچیده داخل چرخ را شبیه‌سازی نمود و عملکرد توربین را پیش‌بینی کرد. همچنین به کمک روش‌های عددی، بسیاری از مشکلات موجود را می‌توان سریع‌تر و ارزان‌تر از روش‌های آزمایشگاهی حل نمود. در طراحی هیدرولیکی با استفاده از CFD، علاوه بر شبیه‌سازی و تحلیل عددی جریان داخل چرخ، پدیده کاویتاسیون نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین مدل‌های نیمه تجربی و عددی به منظور تعیین عملکرد هیدرولیکی توربین و استخراج منحنی-های مشخصه آن توسعه داده می‌شود. صحت‌گذاری طراحی هیدرولیکی پس از آزمایش نمونه ساخته شده انجام خواهد گرفت [۴].

<sup>1</sup> Bovet method

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

## ۲-۱۳-۱- ساخت

جنس چرخ توربین‌های آبی عمدتاً از فولادهای ضد زنگ است. ماده به کار رفته باید به گونه‌ای باشد که در برابر خوردگی حفره ای<sup>۱</sup> و سایش<sup>۲</sup> مقاوم باشد. برای ساخت چرخ معمولاً از ریخته‌گری استفاده می‌شود. در طراحی قطعات چرخ برای ریخته‌گری می‌بایست انقباض ریخته‌گری، درجه حرارت، نحوه فرم‌گیری مدل، نوع مواد مصرفی در قالب و ماهیچه‌ها، پوشش سطح قالب، چگونگی خشک کردن قالب، نحوه نصب مدل و ماهیچه‌ها و مبردگذاری تعیین گردد. به منظور بررسی صحت ریخته‌گری و بهینه‌سازی آن، شبیه‌سازی کامپیوتری نحوه انجماد، منحنی‌های انجماد خطوط همدمای سالیدوس و لیکوئیدوس ابزار مناسبی برای تولید موفقیت آمیز قطعات پیچیده صنعتی می‌باشد [۵].

## ۳-۱۳-۱- محدوده‌های عملکرد هموار توربین آبی

کارکرد توربین‌های فرانسسیس در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ درصد قدرت خروجی نامی معمولاً نرم و بدون مشکل خاصی می‌باشد. لذا در حالت‌های عادی کارکرد بهتر است نقطه تنظیم بار توربین در این محدوده قرار گیرد. بالاترین راندمان توربین فرانسسیس معمولاً در محدوده نزدیک به ۷۵ تا ۸۰ درصد حداکثر قدرت خروجی توربین (و یا در حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد قدرت نامی توربین) حاصل می‌شود. محدوده ذکر شده با دبی خروجی و ارتفاع آب مخزن تا حدی تغییر می‌کند.

به طور کلی در توربین فرانسسیس یک ناحیه کارکرد ناهموار وجود دارد که تقریباً در محدوده ۳۵ تا ۵۵ درصدی بازشدگی دریچه‌های تنظیمی توربین مشاهده می‌شود. توربین نباید به صورت مداوم در این ناحیه مورد بهره‌برداری قرار گیرد. محدوده فوق‌الذکر از هر واحد به واحد دیگر می‌تواند تا حدودی تغییر کند و تابعی از تراز سطح آب مخزن و تراز آب در پایاب نیروگاه می‌باشد. بهره‌برداری از این محدوده‌ها نیز به صورت کوتاه مدت امکان‌پذیر است. هنگام تغییرات بار واحد و نیاز به قرار گرفتن کوتاه مدت واحد در این نواحی (تا توزیع بار روی واحدها و انتقال نقطه کار توربین به نواحی نرم‌تر منحنی عملکرد توربین)، واحد در این محدوده‌ها نیز می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

هنگام راه‌اندازی و تغییرات بار واحد تا زمان توقف آن، یاتاقان‌های توربین و ژنراتور تحت بارهای مختلف ناشی از اجزای گردان (چرخ توربین، محور و سایر اجزای گردان) قرار می‌گیرد. در این رابطه بسیار اهمیت دارد که مشخص گردد کدام نیروها مخرب می‌باشد و کدام نیروها برای مدت زمان محدودی قابل تحمل است. اثر این نیروها در قالب تغییر حرکت نسبی محور به غلاف یاتاقان یا کفشک‌های یاتاقان‌ها بروز می‌کند و توسط سامانه اندازه‌گیری ارتعاشات مشاهده و ارزیابی می‌شود.

با تنظیم محدوده‌های مناسب بار و کنترل ارتعاشات، می‌توان دوره زمانی کارکرد واحد را در نواحی ناهموار به حداقل رساند. با استفاده از هوادهی طبیعی به لوله مکش یا استفاده از سامانه هوادهی با هوای فشرده و کمک به کاهش نوسانات فشار آب در لوله مکش، می‌توان دامنه ارتعاشات را کاهش داده و امکان بهره‌برداری از واحد را در نواحی ناهموار یا نزدیک به آن در صورت نیاز فراهم نمود.

در محدوده توان تقریباً ۵۰ درصد توان خروجی توربین در بازشدگی ۱۰۰ درصد، تا توان حدود صفر (محدوده بار کم)، معمولاً کار توربین فرانسسیس ناپایدار و همراه با سر و صدا می‌باشد و پدیده کاویتاسیون در این محدوده زیادتر از حد معمول است، لذا بهره‌برداری از توربین در این محدوده‌ها در طولانی مدت توصیه نمی‌شود. با این حال در برخی از نیروگاه‌های آبی که استفاده از واحد در این محدوده توران مورد نیاز می‌باشد، با تمهیدات خاص می‌توان از توربین بهره‌برداری نمود [۶].

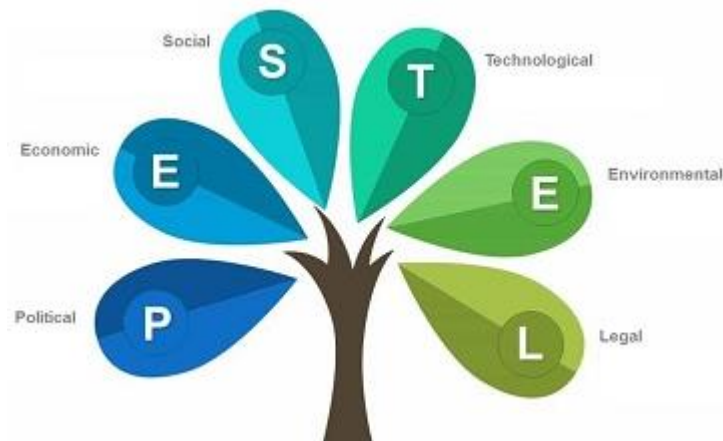
<sup>1</sup> Pitting

<sup>2</sup> Erosion

## ۱۴-۱- تحلیل PESTEL

به منظور توسعه یک فناوری یا راه‌اندازی یک کسب و کار، نگرش جامعی نسبت به محیط پیرامونی مورد نیاز است. در گذشته محیط کسب و کار محیط ثابتی بود که قدرت پیش‌بینی آن فراهم بوده و توانایی کنترل شرایط محیطی نیز وجود داشته‌است. اما با گذر زمان محیط از حالت ثابت گذر کرده و به محیطی پویا مبدل گشته‌است که علاوه بر تأثیرپذیری، تأثیرگذار نیز می‌باشد. تحلیل محیطی PESTEL ابزاری است که بسیاری از کسب و کارها برای شناسایی محیط پیرامون و تغییرات محیطی از آن استفاده می‌کنند. نکته حایز اهمیت در هنگام شناسایی عناصر پستل این است که باید در نظر داشت که هر یک از این عوامل متغیرهای زیادی را در بر می‌گیرد که ممکن است تنها تعدادی از آن‌ها مهم تلقی شود. هر کدام از حروف کلمه PESTEL، نماینده جنبه مهمی از محیط است. در واقع این کلمه سرنام واژه‌های زیر است:

- **P** سیاسی (Political): عوامل سیاسی شامل همه‌ی فعالیت‌های سیاسی درون یک کشور و نیز تأثیر احتمالی نیروی خارجی بر جنبه‌های مختلف کسب و کار است. این موارد مشخص‌کننده‌ی مزاج سیاسی و سیاست‌هایی است که یک دولت وضع می‌کند. تعرفه‌های تجاری و مالیات‌ها چیزهایی هستند که یک دولت بر روی تجار یا سازمان‌ها اعمال می‌کند و کسب و کارها تحت تأثیر این عوامل به‌شدت تغییر می‌کند.
- **E** اقتصادی (Economic): این جنبه از تحلیل PESTEL شرایط اقتصادی رایج در یک کشور را در نظر می‌گیرد. همچنین اگر سناریوهای اقتصاد جهانی هم تأثیری بر روی این شرایط بگذارند باید به آن‌ها توجه کرد. این عوامل شامل نرخ تورم، نرخ معاملات خارجی، نرخ سود و ... می‌شود. همه این موارد می‌توانند بر روی چرخه‌های عرضه و تقاضا تأثیر بگذارند و می‌توانند منجر به تغییرات بزرگی در فضای کسب و کار شوند.
- **S** اجتماعی (Social): عوامل اجتماعی ذهنیت اجتماعی افرادی را نشان می‌دهند که در یک کشور خاص زندگی می‌کنند. این عوامل جنبه‌های فرهنگی، سن، مردم‌شناسی، جنسیت و کلیشه‌های مرتبط با آن را بررسی می‌کنند. گاهی وقت‌ها لازم است که این تحلیل شامل عوامل دینی نیز بشود.
- **T** تکنولوژیک (Technological): امروزه به قدری سرعت توسعه فناوری زیاد است که نه تنها کسب و کارها، بلکه حتی زندگی روزمره انسان‌ها نیز متأثر از آن است. با توجه به این موضوع، در یک کسب‌وکار عوامل فناوری هم بر مصرف‌کنندگان و هم بر خود کسب و کار تأثیر دارد.
- **E** زیست محیطی (Environmental): با توجه به گستره فعالیت دوست‌داران محیط زیست و حامیان حقوق مصرف‌کننده، کسب و کارها باید به عوامل محیطی نظیر شرایط اقلیمی، بوم‌شناختی، نگرش کارمندان، ارزش‌های ذی‌نفعان و سبک‌های مدیریت و ... توجه داشته باشند.
- **L** قانونی (Legal): عوامل قانونی باید همه‌ی موارد حقوقی و روندهای موجود در اقتصاد را در نظر بگیرند. همچنین به استانداردهای ویژه‌ای که کسب‌وکار شما برای شروع تولید یا ارتقای یک محصول باید رعایت کند، توجه داشته باشد. این عوامل هم جنبه‌های داخلی دارند و هم جنبه‌های بیرونی. در هر کشور قوانین مشخصی وجود دارد که محیط کسب و کار را تحت تأثیر قرار می‌دهد، همچنین سیاست‌های مشخصی نیز هستند که شرکت‌های برای خودشان وضع می‌کنند. تحلیل قانونی هر دو جنبه را در نظر می‌گیرد و با توجه به این مقررات استراتژی مناسب را مشخص می‌کند. برای مثال این قوانین شامل قوانین مصرف‌کننده، استانداردهای ایمنی، قوانین کار و غیره می‌شود [۴۲].



شکل ۱-۱۹: اجزای تشکیل دهنده تحلیل PESTEL [38]

با توجه به آن چه گفته شد در ادامه تحلیل PESTEL به منظور ارزیابی محیط پیرامون فناوری توربین‌های آبی و نیروگاه‌های برق آبی انجام شده است.

## ۱-۱۴-۱ - مطالعه عوامل سیاسی

احداث سد و به تبع آن توسعه ظرفیت نیروگاه‌های برق آبی همواره جزء سیاست‌های دولت بوده است. ظرفیت نیروگاه‌های برق آبی کشور در ابتدای دولت یازدهم براساس گزارش شرکت مدیریت منابع آب ایران ۱۰۲۲۶ مگاوات بود که در پایان سال ۱۳۹۸ (حدود ۶ سال) به ۱۲۱۸۱ مگاوات رسیده است. تعداد سدهای کشور نیز در همین مدت از ۱۷۳ سد به ۲۳۴ سد افزایش یافت.

با توجه به این که انرژی برق آبی مانع انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور می‌شود، ایران در سال‌های اخیر بر اساس مقررات بین‌المللی زیست محیطی در مسیر توسعه این نیروگاه‌ها گام‌هایی برداشته است. هم اکنون ۱۶ پروژه برق آبی بزرگ در حال اجرا است. به علاوه ۲۱۷ نیروگاه برق آبی با ظرفیتی بالغ بر ۱۴ هزار و ۶۸۶ مگاوات در حال مطالعه هستند [39]. در میان عوامل سیاسی نباید اثر تحریم‌های اقتصادی را نادیده گرفت. تحریم‌های اقتصادی از طرفی مانع انتقال فناوری شده و تهیه تجهیزات از خارج را با دشواری روبرو می‌سازد. اما از طرف دیگر می‌تواند زمینه و انگیزه لازم برای حمایت از ساخت داخل را فراهم آورد.

## ۱-۱۴-۲ - مطالعه عوامل اقتصادی

به گزارش اداره اطلاعات انرژی آمریکا<sup>۱</sup>، در سال ۲۰۱۹ میلادی هزینه احداث هر کیلووات ظرفیت برق آبی حدود ۲۶۸۰ دلار است در حالی که این رقم برای نیروگاه سیکل ترکیبی حدوداً ۱۰۰۰ دلار می‌باشد. اما با توجه به عدم مصرف سوخت در این نیروگاه‌ها، هزینه تمام شده هر مگاوات ساعت برق تولید شده در نیروگاه‌های برق آبی حدود ۳۹/۵۴ دلار و نزدیک به هزینه تمام شده برق در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌باشد [40].

<sup>1</sup> U.S. Energy Information Administration (EIA)

کسری بودجه حدود ۵۰ درصدی دولت در سال ۱۳۹۹ و نیز عدم وجود چشم‌انداز مثبت از اقتصاد، سرمایه‌گذاری در پروژه‌های عمرانی نظیر توسعه نیروگاه‌های برق آبی را دشوار خواهد کرد. به علاوه عدم ثبات در بازار ارز نیز سبب ایجاد مشکلاتی در تدارکات پروژه‌هایی از این دست خواهد شد.

### ۳-۱۴-۱- مطالعه عوامل اجتماعی

توسعه فناوری نیروگاه‌های برق آبی و نیز ساخت داخل توربین‌های آبی موجب اشتغال زایی خواهد شد. در سال ۲۰۱۸ میلادی، بیش از ۲ میلیون نفر در جهان در صنعت برق آبی مشغول به کار بوده‌اند که در این بین سهم کشور ایران ۳ درصد (حدود ۶۰ هزار نفر) بوده که رقم قابل توجهی است [41].

نتایج یک پژوهش انجام شده در سال ۱۳۹۸ نشان می‌دهد که سدسازی (که لازمه احداث نیروگاه‌های برق آبی بزرگ است) بازده کشاورزی، ارزش تولیدات و سطح زیر کشت محصولات آبی را در شهرستانی که سد در آن واقع شده است افزایش می‌دهد، اما در شهرستان پایین‌دست اثری ندارد. همچنین سدسازی منجر به کشت بیشتر محصولات آبر در مقابل محصولات کم‌آبر در شهرستان محل سد می‌شود که این اثر در شهرستان پایین‌دست معکوس است [۷].

از طرف دیگر توسعه سدها باعث رونق گردشگری در حاشیه آن خواهد شد. در حال حاضر توسعه گردشگری در حاشیه سدها و رودخانه‌ها یکی از اهداف دولت دوازدهم محسوب می‌شود. در صورت بارندگی مناسب، بیش از ۵۰ تالاب و دریاچه ۱۹۰ سد مستعد اجرای طرح‌های گردشگری خواهند بود که با استفاده از این فضا می‌توان رونق گردشگری را در ایران ایجاد کرد. در این راستا، در خرداد سال ۱۳۹۸ تفاهم‌نامه همکاری بین وزارت نیرو و سازمان میراث فرهنگی و گردشگری با موضوع توسعه فعالیت‌های گردشگری در حاشیه سدها به امضا رسید [42].

### ۴-۱۴-۱- مطالعه عوامل فناوری

در حال حاضر شرکت‌های ایرانی از تجربه طولانی در مدیریت پروژه‌های نیروگاه‌های برق آبی و حتی ساخت توربین‌های آبی برخوردار هستند که خود ظرفیت بزرگی برای توسعه فناوری توربین‌های آبی در کشور فراهم آورده است. نکته دیگر این است که با توجه به بلوغ هسته فناوری توربین‌های آبی، تحولات فناوری در این صنعت سریع نیست. البته باید توجه داشت که امروزه توسعه فناوری ماشین‌های آبی بیشتر در حوزه کنترل و پایش وضعیت است.

به گزارش اداره اطلاعات انرژی آمریکا (EIA)، نیروگاه‌های برق آبی با دارا بودن ضریب ظرفیت<sup>۱</sup> حدوداً ۴۰ درصدی، مزیت قابل توجهی نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر دارند [43].

اما در ایران به دلیل محدودیت منابع آبی، زمان‌های تولید برق آبی در طول سال محدودتر بوده و ضریب دسترسی<sup>۲</sup> آن تا حدود ۱۶ درصد نیز کاهش می‌یابد که از منابع دیگر تولید برق پایین‌تر بوده و از منظر صرفه اقتصادی یک اشکال است [44]. از آن جا که این محدودیت در فصل تابستان که مصرف برق به اوج خود می‌رسد بیشتر است، این نقطه ضعف فناوری پررنگ‌تر نیز خواهد شد. به عنوان مثال در تابستان ۱۳۹۴ تنها ۵ درصد برق کشور در نیروگاه‌های برق آبی تولید می‌شد و بیشتر این نیروگاه‌ها متوقف بودند [45].

<sup>1</sup> Capacity factor

<sup>2</sup> Availablity factor

فناوری نیروگاه‌های برق آبی دارای مزایایی است که از آن جمله می‌توان به راندمان بالای ۸۰ تا ۹۰ درصد، بالا بودن عمر تجهیزات و زمان راه‌اندازی پایین اشاره نمود.

## ۵-۱۴-۱- مطالعه عوامل زیست محیطی

با این که معمولاً بیان می‌شود انرژی برق آبی و به دنبال آن ایجاد سد برای ذخیره آب از پاک‌ترین انرژی‌ها هستند، این نیروگاه‌ها آثار مخربی نیز بر روی محیط زیست دارند. به عنوان مثال رطوبت ناشی از دریاچه پشت سد، باعث ایجاد اثر گلخانه‌ای می‌شود. از طرف دیگر به دلیل جریان نداشتن، آب در دریاچه پشت سد، در کف مخزن گازهایی مانند متان تولید می‌شود که به شدت آلاینده هستند. همچنین اکوسیستم پایین دست رودخانه‌ها نیز در اثر سدسازی و کاهش دبی آبی عملاً از بین می‌رود، در حالی که در بالا دست به دلیل ایجاد دریاچه مصنوعی، جنگل‌ها، آثار باستانی و موجودات زنده زیر آب می‌رود که نمونه عینی آن جنگل‌های بلوط زاگرس است [46].

## ۶-۱۴-۱- مطالعه عوامل قانونی

از جمله عوامل قانونی مؤثر در توسعه فناوری توربین‌های آبی می‌توان به استانداردهای وضع شده توسط سازمان ملی استاندارد ایران و دستورالعمل‌های شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع ایران و نیز ضوابط سازمان حفاظت از محیط زیست که در فصل قبلی شرح داده شدند، اشاره نمود.

## ۵-۱۵- خلاصه نتایج

خلاصه نتایج به دست آمده از مرحله اول پروژه به شرح زیر است:

- در نیروگاه‌های برق آبی متوسط و بزرگ با ارتفاع ریزش آب متوسط و زیاد توربین فرانسس در درجه اول و توربین‌های کاپلان و پلتون در درجه دوم کاربرد هستند. در ایران اکثریت قریب به اتفاق توربین‌های آبی نصب شده در این نیروگاه‌ها از نوع فرانسس هستند.
- محدوده سباز نیروگاه‌های برق آبی مورد مطالعه ۱۰ مگاوات به بالا (نیروگاه‌های متوسط و بزرگ) و محدوده ارتفاع ریزش مورد نظر ۲۵ متر به بالا (متوسط و زیاد) است. همچنین با توجه به نوع توربین‌های استفاده شده در ایران و محدوده سباز انتخابی، نوع توربین مورد مطالعه صرفاً محدود به توربین فرانسس خواهد بود.
- در فصل دوم بازیگران کلیدی فعال در زمینه توربین‌های آبی شامل نهادهای سیاست‌گذار، موسسات پژوهشی، پژوهشگران و انجمن‌های علمی و همچنین شرکت‌های فعالی در این زمینه شناسایی شدند. لازم به ذکر است که افراد، انجمن‌ها و موسسات پژوهشی بسیار معدودی در کشور به صورت تخصصی در این زمینه به امر پژوهش اشتغال دارند. در زمینه طراحی، مشاوره و اجرای پروژه‌های برق آبی تجارب متعددی در داخل کشور وجود دارد. همچنین سابقه ریخته‌گری چرخ توربین آبی در ایران نیز وجود دارد. اما در زمینه طراحی پایه توربین آبی فعالیتی انجام نشده است.
- توربین‌های آبی با اختصاص یک ششم از تولید برق جهان جایگاه قابل ملاحظه‌ای در صنعت برق جهانی دارند. هزینه پایین و تجدیدپذیر بودن این فناوری اهمیت آن را بیشتر هم می‌کند. در ایران نیز ۲۶ نیروگاه برق آبی متوسط

و بزرگ وجود دارد که عمدتاً در استان خوزستان واقع هستند. نیروگاه‌های برق آبی کشور بیش از ۹ درصد از تولید برق ایران در سال ۱۳۹۸ را به خود اختصاص دادند.

## ۲- هوشمندی فناوری توربین‌های آبی (فاز کاوش)

## ۱-۲- فناوری‌های در حال رشد

بیش از یک قرن است که از انرژی آبی به منظور تولید برق استفاده می‌شود. از دوران باستان نیز از آن در قالب آسیاب برای تأمین انرژی مکانیکی استفاده می‌شد. لذا در مقایسه با سایر منابع انرژی پاک، فناوری برق آبی در سطح بالایی از بلوغ قرار دارد. به همین دلیل نیز موارد کمتری از توسعه فناوری برق آبی را می‌توان یافت که نحوه کارکرد آن را دچار تحول اساسی کند. با این وجود هنوز هم پتانسیل قابل توجهی برای رویکردهای نو به برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق آبی وجود دارد. این پتانسیل نیز از نقش مهم نیروگاه‌های برق آبی در دوره گذار برق است. چرا که این منبع انرژی قابلیت بالایی برای انعطاف پذیری شبکه برق ایجاد کرده و در حال حاضر اصلی‌ترین فناوری ذخیره انرژی در مقیاس بزرگ است. نوآوری‌هایی که در عرصه فناوری برق آبی بروز می‌کنند عمدتاً به دنبال افزایش راندمان، افزایش انعطاف پذیری در عملکرد، افزایش عمر و کاهش هزینه‌های نصب، بهره‌برداری و نگهداری هستند. افزایش سهم منابع تجدیدپذیر در تولید برق نیز چالش‌های جدیدی را به نیروگاه‌های برق آبی تحمیل می‌کنند. همزمان توسعه توسعه نیروگاه‌های جدید و نوسازی نیروگاه‌های قدیمی، ضرورت تطابق با استانداردهای سخت‌گیرانه زیست محیطی را اجتناب ناپذیر می‌کند. به صورت کلی و با نگاه سیستمی، سطح آمادگی فناوری<sup>۱</sup> برق آبی، به جز در موارد استثنائی، بسیار بالا است. با در نظر داشتن این نکته، در این فصل فناوری‌هایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هنوز به نوعی در حال رشد هستند. این فناوری‌ها را می‌توان در پنج گروه زیر دسته‌بندی نمود:

- فناوری‌های مرتبط با گسترش محدوده عملکرد توربین‌های آبی
  - فناوری‌های مرتبط با ناپایداری توربین فرانسيس در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای
  - دیجیتال سازی توربین‌های آبی
  - توربین‌های آبی دور متغیر
- توربین‌های آبی دوستدار ماهی<sup>۲</sup> [47]

<sup>1</sup> Technology Readiness Level (TRL)

<sup>2</sup> Fish-friendly

## ۲-۲- فناوری‌های کنترلی به منظور کاهش ناپایداری جریان آب

همان طور که در مقدمه این فصل گفته شد، ماهیت متغیر برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) لزوم عملکرد توربین‌های آبی در محدوده وسیع‌تر و نیز تحت شرایط متغیر را ایجاب می‌کند. لذا این توربین‌ها می‌بایست انعطاف‌پذیری بیشتری در عملکرد خود داشته و در نقاط و شرایط دور از نقطه بهترین بازده<sup>۱</sup> به خوبی کار کنند. هنگامی که توربین‌های آبی در نقاط دور از طراحی خود کار کنند، جریان چرخشی باقیمانده<sup>۲</sup> در لوله رانش<sup>۳</sup> ایجاد می‌شود. علت این امر ناهمخوان بودن چرخش ایجاد شده توسط پره‌های هدایت‌کننده متحرک<sup>۴</sup> با اندازه حرکت زاویه‌ای<sup>۵</sup> جذب شده توسط چرخ توربین است. در چنین شرایطی توربین‌های پره ثابت مانند توربین فرانسویس دچار افت شدید بازده شده و فشار در آن‌ها دچار نوسانات شدید می‌شود. نوسانات فشار باعث ایجاد ارتعاش شده و به قطعات مکانیکی توربین آسیب می‌رساند. علاوه بر این ممکن است نوسانات فشار منجر به خرابی چرخ شود. این حالت ناپایا در مواقعی مانند راه‌اندازی، خاموشی اضطراری یا پس زدن بار ممکن است رخ دهد.

روش‌های متعددی به منظور کاهش اثرات این حالت ناپایا مورد آزمایش قرار گرفته است که بسته به این که در این روش‌ها انرژی به جریان آب وارد شود یا خیر به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. یک روش موفق کنترل شرایط ناپایا و تسهیل کننده عملکرد در محدوده وسیعی از شرایط کاری، می‌بایست ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- به جای کنترل آثار، علت اصلی وقوع ناپایداری را کنترل کند.
- اثر منفی آن بر روی بازده توربین صفر یا ناچیز باشد.
- در نقاط کاری که به آن روش کنترلی نیازی نباشد بتوان آن را غیرفعال نمود [47].

### ۱-۲-۲- روش‌های کنترل غیرفعال

روش‌های کنترل غیرفعال نیازی به مصرف انرژی اضافه ندارند. برخی از این روش‌ها در سال‌های اخیر توسعه داده شده و یا مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در جدول زیر روش‌های کنترل غیرفعال و مزایا و معایب آن‌ها فهرست شده‌اند.

جدول ۱-۲: روش‌های کنترل غیرفعال [47]

| روش کنترل غیرفعال | مزایا | معایب | سطح آمادگی فناوری |
|-------------------|-------|-------|-------------------|
|-------------------|-------|-------|-------------------|

<sup>1</sup> Best Efficiency Point (BEP)

<sup>2</sup> Residual swirl

<sup>3</sup> Draft tube

<sup>4</sup> Wicket gates

<sup>5</sup> Angular momentum

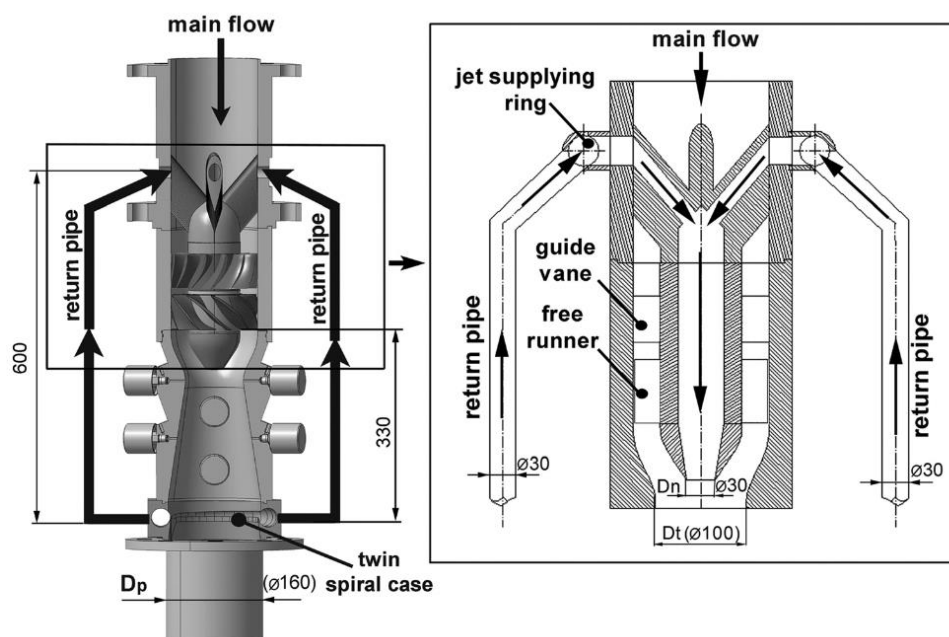
|   |                                                                                         |                                       |                                            |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|
| ۹ | افت هیدرولیکی، اثربخشی در رژیم‌های جریان محدود                                          | کاهش سرع در لوله رانش                 | فین‌های تعادل <sup>۱</sup>                 |
| ۴ | افت هیدرولیکی، اثربخشی در رژیم‌های جریان محدود                                          | کاهش سرع در لوله رانش                 | شیارهای J <sup>۲</sup>                     |
| ۶ | ایجاد نیروی جانبی، کاهش احیای انرژی جنبشی در مخروط چرخ، اثربخشی در رژیم‌های جریان محدود | کاهش سرع در لوله رانش                 | امتداد دادن مخروط چرخ                      |
| ۲ | افت هیدرولیکی، اثربخشی در رژیم‌های جریان محدود                                          | کاهش سرع در لوله رانش                 | پره ثابت در پایین دست چرخ                  |
| ۳ | افت هیدرولیکی                                                                           | کاهش سرع در لوله رانش                 | دیافراگم قابل تنظیم                        |
| ۳ | _____                                                                                   | کاهش سرع در لوله رانش، خود تنظیم بودن | تزریق آب با روش بازخورد جریان <sup>۳</sup> |

هر چند روش‌های کنترل غیرفعال عملکرد توربین در نقاط دور از شرایط طراحی را به طور چشمگیری ارتقا داده اند، قطعات و اجزاء اضافه شده در این روش‌ها را نمی‌توان در مواقعی که به آن‌ها نیازی نیست برداشت. این امر سبب افت‌های هیدرولیکی غیر ضروری و نوسانات فشار در برخی از رژیم‌های جریان می‌شود. البته کنترل جت آب با روش بازخورد جریان این معایب را ندارد. در این روش یک حلزونی به منظور جمع‌آوری جریان اضافه چرخشی در پایین دست چرخ تعبیه شده است که جریان آب جمع‌آوری شده را به بالا دست چرخ توربین منتقل می‌کند. این روش همان طور که در جدول ۱-۱ ذکر شده خود - تنظیم است. به این معنی که در صورت کارکرد توربین در نقطه بهترین بازده، اختلاف فشار لازم برای عبور دادن جریان آب از لوله‌های برگشتی ایجاد نخواهد شد. در شکل ۱-۱، نمای شاتیک این روش نشان داده شده است [48].

<sup>1</sup> Stabiliser fins

<sup>2</sup> J-grooves

<sup>3</sup> Flow Feedback Method (FFM)



شکل ۲-۱: نمای شماتیک سیستم بازخورد جریان [48]

## ۲-۲-۲- روش‌های کنترل فعال

روش‌های کنترل فعال معمولاً از تزریق هوا یا آب، به عنوان یک منبع انرژی خارجی، استفاده می‌کنند. این روش‌ها در جدول ۲-۲ فهرست شده‌اند.

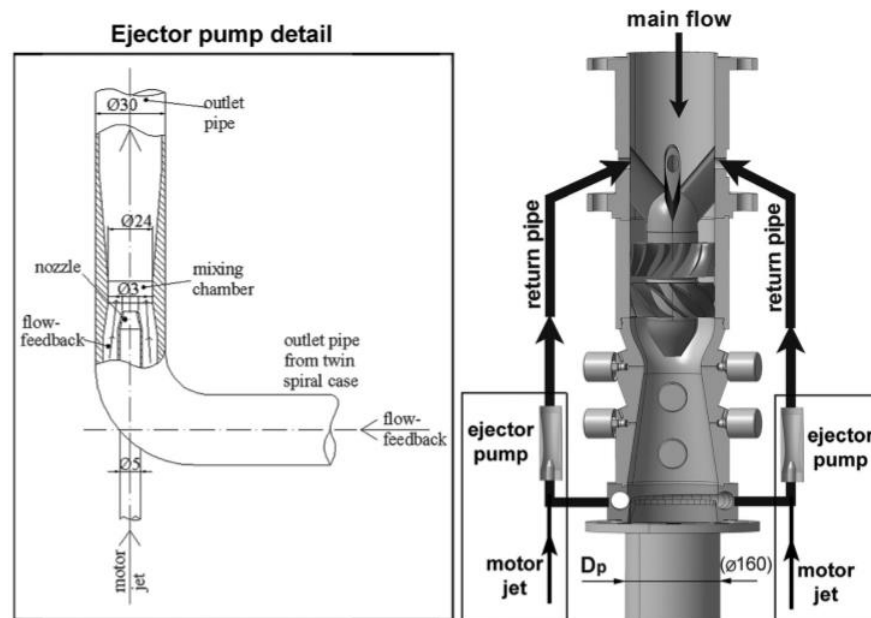
جدول ۲-۲: روش‌های کنترل فعال [47]

| روش کنترل غیرفعال                                                       | مزایا                                               | معایب             | سطح آمادگی فناوری |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| تزریق یا ورود هوا                                                       | کاهش سرچ در لوله رانش در محدوده وسیعی از رژیم جریان | افزایش تلفات      | ۹                 |
| تزریق آب به صورت مماسی در دیواره مخروطی                                 | کاهش سرچ در لوله رانش                               | افزایش تلفات حجمی | ۶                 |
| تزریق آب محوری با سرعت کم یا زیاد                                       | کاهش سرچ در لوله رانش                               | افزایش تلفات حجمی | ۴                 |
| تزریق آب با روش بازخورد جریان همراه با ورود انرژی از بیرون <sup>۱</sup> | کاهش سرچ در لوله رانش                               | —                 | ۳                 |

<sup>1</sup> Flow Feedback Method and additional energy (FFM+)

|   |                   |                                                       |                                                   |
|---|-------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| ۳ | افزایش تلفات حجمی | کاهش سرچ در لوله رانش                                 | جت آب با مؤلفه سرعت مماسی                         |
| ۴ | افزایش تلفات حجمی | کاهش سرچ در لوله رانش، تنظیم فرکانس در یک مقدار معلوم | جت آب تنظیم معکوس <sup>۱</sup>                    |
| ۴ | افزایش تلفات      | کاهش سرچ در لوله رانش در محدوده وسیعی از رژیم جریان   | تزریق جریان دوفازی آب و هوا                       |
| ۲ | افزایش افت حجمی   | کاهش برهمکنش روتور و استاتور                          | تزریق آب در لبه انتهایی پره‌های هدایت کننده متحرک |

روش تزریق آب در لبه انتهایی پره‌های هدایت کننده متحرک به منظور کاهش ناپایداری ناشی از برهمکنش استاتور و روتور توسعه داده شده است. در روش بازخورد جریان فعال، (FFM+) دو پمپ اجکتوری در لوله‌های برگشت جریان قرار داده شده است. این دو پمپ افت هیدرولیکی در مسیر برگشت را تا حدی جبران می‌کنند تا حداقل جریان آب برگشتی مورد نیاز برقرار شود. نتایج آزمایش‌های متعددی که بر روی این روش انجام شده، حاکی از این است که در حالت کارکرد کم بار توربین، اگر میزان دبی برگشتی حدود ۱۲ درصد دبی اصلی توربین باشد، نوسانات فشار در دیواره به خوبی کاهش پیدا می‌کند. حدود ۱۰ درصد از این دبی توسط روش غیر فعال بازخورد جریان تأمین می‌شود و پمپ‌های اجکتوری تنها برای تأمین ۲ درصد باقیمانده هستند. به همین دلیل این روش تلفات حجمی چندانی ندارد. در شکل ۲-۱ نمای شماتیک این روش و پمپ‌های اجکتوری تعبیه شده در آن نشان داده شده است [48].

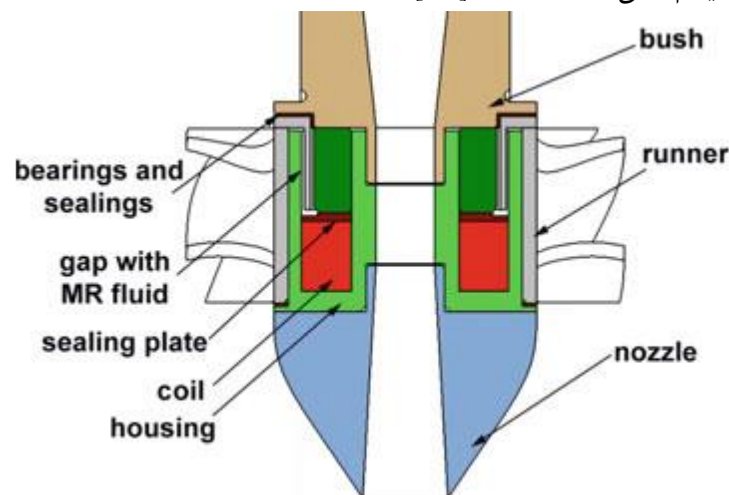


شکل ۲-۲: نمای شماتیک سیستم بازخورد جریان فعال همراه با اجکتور [48]

<sup>1</sup> Inverse modulate water jet

### ۲-۲-۳- روش‌های کنترل مغناطیسی - رئولوژیکی

در این روش‌ها که به تازگی مطرح شده اند از ترمز مغناطیسی - رئولوژیکی<sup>۱</sup> برای کاهش سرعت چرخ استفاده می‌شود تا به واسطه آن جریان چرخشی در پایین دست چرخ و ناپایداری‌های ناشی از آن کنترل شود. به وسیله سیستم ترمز مغناطیسی - رئولوژیکی، افت در لوله رانش کاهش یافته و حداکثر فشار احیا می‌شود. در این روش توربین شامل دو چرخ هم محور است. چرخ اول با سرعت ثابت کار کرده و چرخ دوم که به آن چرخ کم فشار نیز گفته می‌شود سرعت متغیر خواهد بود. سیال مغناطیسی - رئولوژیکی در چرخ دوم بین قسمت ثابت و متحرک قرار می‌گیرد. ویسکوزیته این سیال با شدت میدان مغناطیسی که توسط یک کویل ایجاد می‌شود تغییر پیدا می‌کند و همین امر سبب کاهش یا افزایش سرعت حرکت چرخ می‌شود. در شکل ۳-۱ نمای شماتیک این سیستم نشان داده شده است [49].



شکل ۳-۲: نمای شماتیک سیستم کنترل مغناطیسی - رئولوژیکی [49]

### ۲-۳- فناوری‌های مرتبط با ناپایداری توربین فرانسيس در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای

#### ۲-۳-۱- برهمکنش سیال و سازه<sup>۲</sup>

گستره بیشتر عملکرد و تغییرات مداوم شرایط کاری شامل دفعات روشن و خاموش شدن زیاد، پروفیل‌های نازک چرخ و پره‌های هدایت کننده (که به دلیل افزایش کارایی و کاهش وزن این گونه طراحی می‌شوند)، همگی به پیچیدگی تحلیل ارتعاشات و رفتار خستگی توربین‌های آبی اضافه می‌کنند. لذا شبیه‌سازی‌هایی که در مرحله طراحی این توربین‌ها انجام می‌شود می‌بایست دقت کافی در تعیین رفتار دینامیک توربین داشته باشند. این رفتار دینامیک شامل تنش‌های دینامیک، جرم هیدرودینامیکی و خواص میرایی است که با استفاده از شبیه‌سازی عددی قابل اطمینان برهمکنش سیال و سازه مدل‌سازی می‌شوند.

<sup>1</sup> Magneto-Rheological Brake (MRB)

<sup>2</sup> Fluid-Structure Interaction (FSI)

عامل مهمی که بر طول عمر توربین و کارکرد مطمئن آن تأثیرگذار است، ترک‌های ناشی از خستگی در چرخ توربین می‌باشد که عمدتاً ناشی از برهمکنش میان روتور و استاتور و نوسانات فشار مربوط به آن است. در صورتی که فرکانس طبیعی چرخ توربین نزدیک به فرکانس برهمکنش روتور و استاتور باشد، پارامتر میرایی هیدرودینامیکی<sup>۱</sup> به پارامتر مهمی در کنترل پاسخ دینامیکی پره توربین تبدیل می‌شود. به همین دلیل به روش‌های قابل اعتماد برای پیش‌بینی تغییرات فرکانس طبیعی چرخ و میرایی نیاز است. فرکانس عمدتاً به جرم افزوده<sup>۲</sup> وابسته است. اما از دبی و شرایط جریان در بالادست و پایین دست چرخ (به ویژه لوله رانش) نیز تأثیر می‌پذیرد. برای سازه‌هایی مانند چرخ توربین آبی، پاسخ مودال پیچیده بوده و شامل فرکانس‌های طبیعی متعدد و مودهای پیچیده است. از آن جا که برای توربین‌های فرانسویس که هد نسبتاً زیادی دارند، تحریک دینامیک ناشی از برهمکنش روتور و استاتور عامل اصلی خستگی است، همکاری‌های گسترده پژوهشی به منظور شناخت این پدیده در جریان است.

تحلیل برهمکنش سیال و سازه در توربین‌های آبی می‌تواند به صورت تحلیل‌های مرحله‌ای و جداگانه سیال و تنش در سازه باشد یا این که این دو کاملاً همزمان حل شوند. اثر جرم افزوده آبی که در اطراف چرخ است را می‌توان با رویکرد سیال آکوستیک به دقت مدل‌سازی کرد اما در نظر گرفتن اثرات میرایی هیدرودینامیکی و شناخت ناپایداری‌های هیدروالاستیکی نیازمند شبیه‌سازی‌های واقعی‌تر رفتار سیال با استفاده از حلگرهای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۳</sup> (حل معادلات نویر - استوکس<sup>۴</sup>) است. بر خلاف آیروالاستیسیته که در آن استفاده از معادلات با کوپلینگ ضعیف معمول است، معادلات هیدروالاستیسیته معمولاً به صورت کوپلینگ قوی (با روش‌های تکرار) و یا حتی به صورت کاملاً یکپارچه حل می‌شوند. کوپلینگ معادلات سیال و تحلیل تنش می‌تواند به صورت یک طرفه یا دو طرفه باشد. جابجا شدن سازه در نتایج کوپلینگ یک طرفه یا دو طرفه اثرگذار خواهد بود. با توجه به پارامترهای متعدد دخیل در این مسائل، تحلیل معادلات با کوپلینگ دو طرفه نیاز به توان محاسباتی و زمان زیادی دارد. به علاوه اگر سازه دچار تغییر شکل‌های بزرگ شود، لازم است شبکه محاسبات عددی نیز تغییر یافته و حتی هر بار مجدداً ساخته شود.

فارغ از این که معادلات به صورت کاملاً یکپارچه و یا مرحله به مرحله حل شوند می‌بایست آن‌ها را با هندسه ساده شده (دیسک یا مجموعه پره) یا هندسه اصلی چرخ و همچنین با مدل‌های با کیفیت و داده‌های تست فرکانس طبیعی، فشار (شامل سرعت انتشار فشار و میرایی دامنه نوسانات فشار)، تنش، سرعت و غیره در حالت دائم یا گذرا صحنه‌گذاری و اعتبارسنجی نمود. اخیراً در پروژه‌ای به نام HiFrancis، تحلیل‌های تجربی و عددی برهمکنش سیال و سازه با تمرکز بر نقش میرایی هیدرودینامیکی، اثرات جرم افزوده بر فرکانس و دامنه برهمکنش روتور و استاتور، رزونانس و شکل مودهای متناظر در توربین - های فرانسویس دارای هد بالا انجام گرفته است. با توجه به افزایش بارهای دینامیکی در کاربردهای امروزه توربین‌های آبی، درک صحیح از ساز و کارهای فیزیکی بنیادی به مدل‌سازی دقیق و طراحی مناسب این توربین‌ها کمک می‌کند.

یک چالش مهم، حصول اطمینان از کافی بودن کیفیت تست در آزمایشگاه و در محل است تا با آن بتوان نتایج عددی را صحنه‌گذاری کرد. در یکی دو دهه اخیر، روش‌های اندازه‌گیری در کرنش سنجی سیستم‌های دوار اساساً ارتقا یافته است. امروزه تنش و پارامترهای دیگر مربوط به چرخ توربین فرانسویس با استفاده از سیستم‌های تله‌متری اندازه‌گیری منتقل می‌شود. ارزیابی نتایج اندازه‌گیری کرنش در چرخ توربین فرانسویس حاکی از آن است که تنش‌های ناشی از برهمکنش روتور و استاتور به ویژه

<sup>1</sup> Hydrodynamic damping

<sup>2</sup> Added mass

<sup>3</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

<sup>4</sup> Navier-Stokes

در چرخ‌های دارای هد متوسط و بالا قابل توجه است. این اندازه‌گیری‌ها ثابت می‌کنند که در هنگام سنکرون شدن توربین آبی از حالت بدون بار، تنش مکانیکی بالایی به پره‌ها وارد می‌شود. همچنین نرخ کرنش در لبه انتهایی پره در نزدیکی هاب هنگام کارکرد در شرایط کم باری دچار نوسانات شدیدی می‌شود. به علاوه فرضیات مربوط به میرایی نیز بر مبنای اندازه‌گیری‌های نرخ کرنش حاصل شده‌اند. البته باید توجه داشت که تعمیم چنین نتایجی به طراحی‌های جدید چرخ توربین آبی ممکن است دقیق نباشد. چرا که هنوز اثر شکل‌های مودهای ارتعاشاتی و شرایط جریان در نقاط کارکرد مختلف، کاملاً شناخته نشده است [47].

## ۲-۳-۲- شرایط کارکرد گذرا

در کارکرد توربین‌هایی آبی، شرایط گذرا مانند راه‌اندازی، بی‌باری، پس‌زدن بار و بار بسیار کم، به شدت آسیب رسان هستند. چرا که در این شرایط به رغم عدم تولید برق، مقدار قابل توجهی از انرژی وارد سیستم می‌شود که می‌بایست دفع گردد. این دفع انرژی به ویژه در چرخ رخ می‌دهد که در آن جریان پیچیده سیال همراه با گردابه‌های گذرا ایجاد می‌شود. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزار خوبی برای تحلیل شرایط گذرا است و دقت آن در قیاس با اندازه‌گیری‌ها مناسب است. این شبیه‌سازی‌ها کمک می‌کنند تا نوسانات گذرای فشار در این شرایط کاری بررسی شده و به درک بهتر شرایط گذرا منجر شود. همچنین از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی نیز برای مطالعه اثرات تغییر شرایط جریان آب ورودی بر خروجی‌ها در شرایط گذرا استفاده می‌شود. باید توجه داشت که اغلب در شرایط گذرا با تغییرات قابل توجه در خروجی مواجه هستیم که باعث حرکت رفت و برگشت امواج ضربه قوچ (چکش آبی) در سیستم لوله‌کشی می‌شود. این اثرات تراکم‌پذیر، دینامیک فرآیندهای گذرا را بیشتر کرده و به پیچیدگی‌های شبیه‌سازی می‌افزایند.

در شبیه‌سازی‌های شرایط گذرا، جریان در توربین (از ورودی محفظه حلزونی تا خروجی لوله رانش) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی، و جریان در بقیه سیستم هیدرولیکی با استفاده از مدل‌های ساده شده یک‌بعدی (که با آن امواج ضربه قوچ در سیستم لوله‌کشی، شیرها و مخزن سرج مدل می‌شود) محاسبه می‌شود. همپوشانی مدل یک‌بعدی و سه‌بعدی در برخی از نقاط سبب کوپل شدن این معادلات می‌شود.

استفاده از شرایط مرزی متغیر با زمان (بر مبنای اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل) برای پیش‌بینی دقیق نوسانات فشار ضروری است. در صورتی که داده‌های تجربی در دسترس نباشد می‌توان این شرایط مرزی را از شبیه‌سازی‌های یک‌بعدی هیدرواستاتیکی استخراج نمود که در آن‌ها سرعت چرخ، دبی و نحوه قرارگیری پره‌های هدایت‌کننده (در مورد پس‌زدن بار) اعمال شده باشد.

درک بهتر شرایط کاری گذرا منجر به ارتقای طراحی هیدرولیکی و مکانیکی، پایداری ماشین و قابلیت اطمینان می‌شود. همچنین نتایج تحلیل شرایط گذرا، نواحی بحرانی از نظر بار سازه یا تغییرات بار را مشخص می‌کند. این نتایج کمک می‌کنند تا فرآیند راه‌اندازی توربین را به گونه‌ای بهبود بخشید تا منجر به کاهش تنش‌های وارده و افزایش طول عمر شود. همچنین مدل‌سازی کاویتاسیون در شبیه‌سازی‌ها نیز حائز اهمیت است [47].

## ۲-۴- دیجیتالی سازی عملکرد توربین‌های آبی

اغلب نیروگاه‌های برق آبی در چندین دهه قبل طراحی شده‌اند که در آن زمان شرایط کاری متفاوت از زمان حال بوده است. نفوذ گسترده برق خورشیدی و بادی در شبکه که ماهیت متغیر دارند سبب ایجاد شرایط جدیدی در سیستم‌های برقی شده و

پایداری آن‌ها را با ریسک مواجه کرده است. به همین دلیل چالش کلیدی نیروگاه‌های برق آبی جدید، افزایش انعطاف پذیری آن‌ها با ایجاد قابلیت ذخیره انرژی یا استفاده از سیستم‌های پیشرفته است تا به واسطه آن بتوان از یکپارچه شدن برق تجدیدپذیر با شبکه پشتیبانی نمود. البته باید توجه داشت که سیستم‌های هیدرودینامیکی اصولاً انعطاف کمتری در عملکرد دارند. به همین دلیل می‌بایست داده‌های فراوانی از شرایط کاری توربین‌ها جمع‌آوری نمود تا به افزایش قابلیت پشتیبانی آن‌ها از شبکه، بدون این که ایمنی یا قابلیت اطمینان آن‌ها کاهش یابد، کمک کند. این قابلیت‌های پشتیبانی در واقع قابلیت‌های رزرو به منظور مهار فرکانس<sup>۱</sup>، رزرو به منظور احیای فرکانس<sup>۲</sup> و راه‌اندازی سیاه<sup>۳</sup> هستند که به تازگی مورد تست و تحلیل تجربی قرار گرفته‌اند.

این فناوری‌های پیشرفته بر پایه دیجیتالی‌سازی برق آبی شکل می‌گیرند که در آن نحوه طراحی، توسعه، ارتقا، بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌های برق آبی متحول می‌شود. نیروگاه‌های برق آبی موجود ده‌ها سال قبل ساخته شده‌اند. لذا درجه دیجیتالی‌سازی ادوات آن‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های تجدیدپذیر مدرن (مانند توربین‌های بادی) پایین‌تر است. در واقع نوسازی و ارتقای ناوگان موجود فرصت مناسبی جهت دیجیتالی‌سازی نحوه عملکرد تجهیزات برق آبی است. جدای از افزایش طول عمر و برطرف ساختن ریسک‌های مربوط به امنیت سایبری، نوسازی و دیجیتالی‌سازی با افزایش کلی راندمان و انرژی تولید شده مرتبط است. برآورد شده است دیجیتالی‌سازی حدود ۱۲۲۵ گیگاوات ظرفیت نصب شده برق آبی جهان سبب افزایش تولید سالانه برق به میزان ۴۲ تراوات ساعت خواهد شد که معادله صرفه جویی سالانه ۵ میلیارد دلار در هزینه‌های عملیاتی بوده و علاوه بر آن انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد.

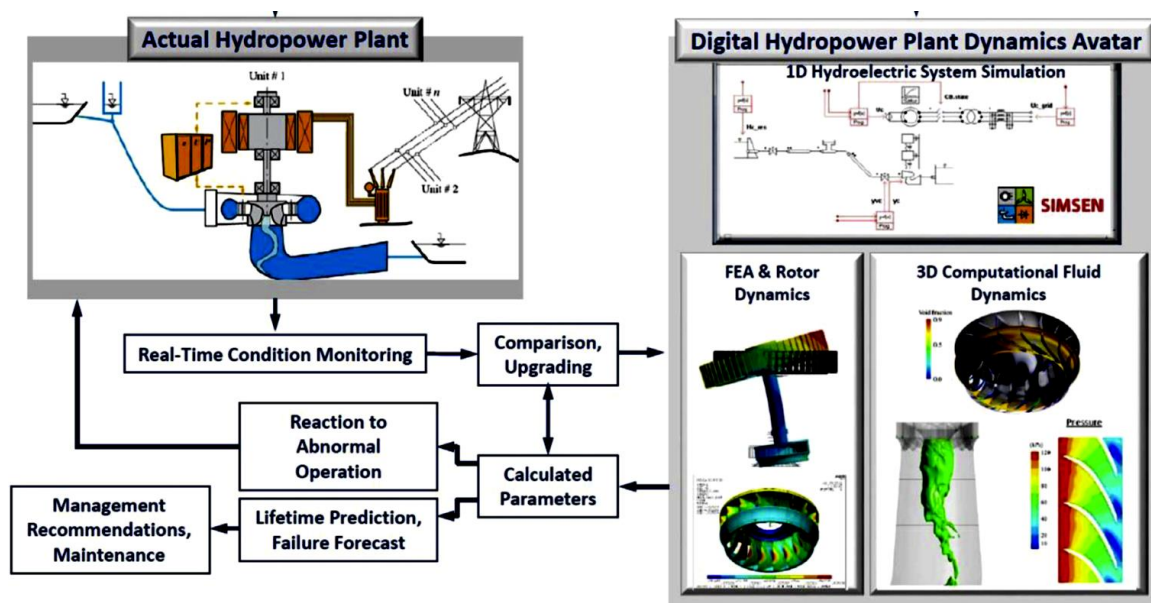
این ارتقای عملکرد توربین‌های آبی با افزایش محدوده کاری آن‌ها میسر می‌شود که امکان انعطاف پذیری در عملکرد نیروگاه‌های برق آبی را فراهم می‌آورد. دیجیتالی‌سازی زمان پاسخ واحدهای تولید برق یا پمپ - توربین‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین امکان ارزیابی اقتصادی مازاد ظرفیت رزرو قابل انعطاف را فراهم می‌سازد. دیجیتالی‌سازی در عین حال، از استانداردهای سخت‌گیرانه ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه‌های برق آبی نیز پشتیبانی می‌کند.

نیاز به گسترش محدوده عملکرد و نیز دینامیک سریع، بحث قابلیت اطمینان و ایمنی نیروگاه‌های برق آبی را پررنگ‌تر می‌کند. بنابراین تنها یک رویکرد خط‌اشکن می‌تواند بر ریسک از مدار خارج شدن غیر مرتقه این نیروگاه‌ها غلبه کند. رویکردی که در آن مهندسی و علوم داده به گونه‌ای با هم یکپارچه می‌شوند تا یک آواتار دیجیتالی برای توربین و سیستم برق آبی را توسعه داده و صحنه‌گذاری کنند و بدین وسیله دینامیک نیروگاه‌های برق آبی را مهار نمایند. بنابراین هدف از دیجیتالی‌سازی، توسعه روش‌ها و ابزارهای لازم برای ایجاد یک آواتار دیجیتال از دینامیک نیروگاه‌های برق آبی است تا به واسطه آن سرویس بهتری برای شبکه برق ارائه شود. برای این منظور یک رویکرد چندوجهی شامل هیدرولیک، سیستم قدرت، کنترل و مدل‌سازی خستگی مورد نیاز است.

<sup>1</sup> Frequency Containment Reserve (FCR)

<sup>2</sup> Frequency Restoration Reserve (FRR)

<sup>3</sup> Black start



شکل ۲-۴: چگونگی جریان اطلاعات و تبادل داده با استفاده از آواتار دیجیتالی یک نیروگاه برق آبی در شرایط دینامیک [47]

روشی که امروزه در مهندسی و بهره‌برداری توربین آبی به کار گرفته می‌شود شامل الکترومغناطیس پیشرفته و شبیه‌سازی‌های عددی جریان و سازه برای اجزای مختلف هیدرولیکی، مکانیکی و الکتریکی توربین است. به علاوه تست‌های متعددی نیز به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های ذکر شده و نیز حصول اطمینان از کارکرد مطمئن توربین انجام می‌گیرد. به همین دلیل جمع‌آوری تمامی اطلاعات به‌دست آمده در این فرآیند امکان توسعه آواتار دیجیتالی توربین را میسر می‌سازد. به وسیله این آواتار می‌توان انعطاف‌پذیری در عملکرد واحد را پشتیبانی نمود. به طور مشخص، اثرات شرایط گذرا مانند راه‌اندازی و خاموشی را می‌توان در قالب تنش، خستگی و غیره ارزیابی نمود.

به این ترتیب زیرساخت‌های هیدرولیکی با معرفی طراحی‌های جدید و الگوهای جدید بهره‌برداری، با شرایط دینامیک (اقلیم، بازار و ملاحظات زیست محیطی) سازگاری بیشتری خواهند داشت. در حال حاضر سطح آمادگی دیجیتالی‌سازی ۳ است ولی روش‌ها و ابزارهای در حال توسعه برای آن، بر اساس آخرین یافته‌ها و نیز پژوهش‌هایی است که هنوز در جریان هستند. توسعه این ابزارهای و روش‌ها ریسک مراحل بعدی توسعه فناوری توربین‌های آبی را کمتر می‌کنند. در حالی که گسترش محدوده کارکرد توربین‌های آبی تنش‌های جدیدی را بر تجهیزات الکترومکانیکی وارد می‌کند، آواتار دیجیتالی نیروگاه‌های برق آبی، شامل توربین، ژنراتور و کنترل با شبیه‌سازی دقیق رفتار دینامیکی این تجهیزات، از اثرات این تنش‌ها می‌کاهد. ابزارهای پیشرفته‌ای که برای ایجاد آواتار دیجیتالی استفاده می‌شوند شامل تحلیل داده، مدل‌سازی پیشرفته، تخمین طول عمر، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و پایش وضعیت است.

با وجود این که مفهوم توربین دیجیتال توجه زیادی را به خود جلب کرده است، هنوز دستاوردهای اندکی در راستای حل چالش‌های علمی مدل‌سازی و کنترل جریان آب در واحدهای هیدرولیکی حاصل شده است. به طور مشخص، پیشرفت‌های اخیر در حوزه مدل‌سازی و کنترل ناپایداری‌های جریان توربین و کاویتاسیون مسیر توسعه تکنولوژی آینده در راستای گسترش

محدوده عملکرد توربین‌های آبی را هموار می‌کند. در پروژه اروپایی هایپربول<sup>۱</sup>، روشی برای ارزیابی پایداری عملکرد توربین در شرایط دور از نقطه طراحی ارائه شده و به صورت مشخص، پیشبینی پایداری توربین فرانسوی بر مبنای مدل‌سازی و تست مدل کوچک مقیاس اعتبارسنجی شده است.

در مورد پمپ - توربین‌ها که نقش مهمی در پایداری شبکه دارند، به تازگی نشان داده شده است که زمان مورد نیاز برای تغییر حالت از پمپ به توربین را می‌توان به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش داد تا این فناوری با مقتضیات جدید شبکه برق هماهنگ شود.

هدف نهایی توسعه فناوری است که امکان تولید برق در توربین‌های آبی را در شرایط متغیر فراهم آورد. در این صورت اینرسی سیستم‌های قدرت بیشتر شده و امکان نفوذ بیشتر برق تجدیدپذیر در شبکه به وجود می‌آید. به علاوه پایش وضعیت پیشرفته نیز سطح ایمنی را بالاتر خواهد برد. فناوری‌های اشاره شده را برای ایستگاه‌های برق آبی موجود نیز می‌توان به کار گرفت. البته هر فناوری را می‌بایست با توجه به خصوصیات ویژه هر نیروگاه به کار گرفت. از چالش‌های دیگر تحقیق و توسعه در این زمینه می‌توان به هزینه و نیز ذخیره‌سازی آب و انرژی در مقیاس‌های مختلف در تطابق با استانداردهای زیست محیطی اشاره نمود [47].

## ۵-۲- توربین‌های آبی دور متغیر

شرایط کاری نیروگاه برق آبی می‌تواند بسیار متغیر باشد. این تغییرات باعث کاش راندمان و ایجاد ناپایداری در جریان، کاویتاسیون و غیره می‌شود که عمر واحدهای تولید برق آبی را کاهش می‌دهد. با تغییر سرعت دوران در واحدهای برق آبی نسبت به سرعت سنکرون آن‌ها، نیروگاه می‌تواند تطابق بیشتری با هیدرولوژی رودخانه پیدا کرده و راندمان و طول عمر آن افزایش می‌یابد.

کانورترهای الکترونیک قدرت امکان این تغییر سرعت را با یکی از دو روش زیر فراهم می‌آورند:

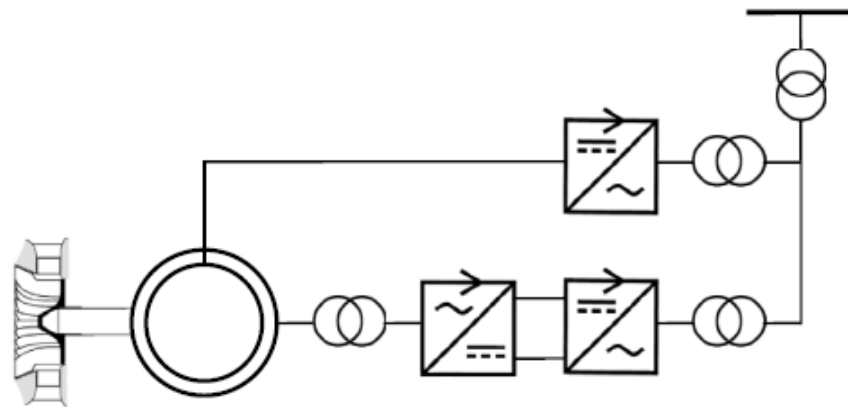
- ماشین‌های سنکرون با ورودی از کانورتر<sup>۲</sup>
- ماشین‌های القایی با ورودی دوگانه<sup>۳</sup>

امروزه که ضریب نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر غیرسنکرون در حال افزایش است، توربین‌های آبی سرعت متغیر می‌توانند مزایای مهمی برای کارکرد سیستم‌های قدرت ایجاد کنند. واحدهای تلمبه ذخیره‌ای سرعت متغیر توانایی کنترل توان اکتیو و راکتیو را در حالت کارکرد به عنوان پمپ از جمله در زمان راه‌اندازی را دارند. به علاوه زمان تغییر حالت کارکرد در آن‌ها کوتاه‌تر از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای متداول است.

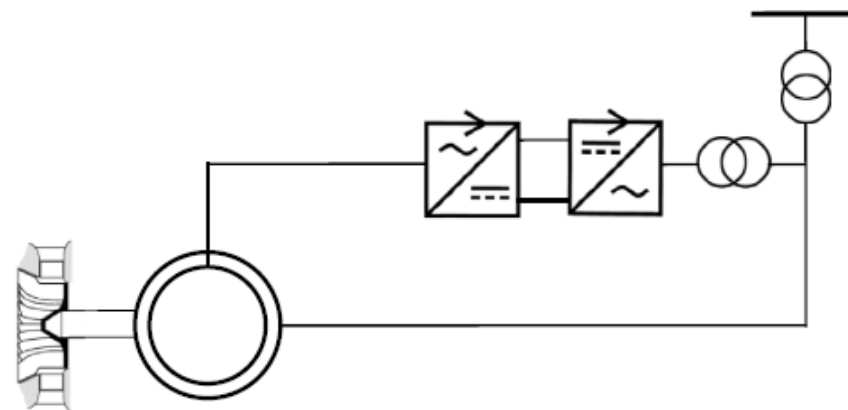
<sup>1</sup> HYPERBOLE

<sup>2</sup> Converter-fed synchronous machine

<sup>3</sup> Doubly-fed induction machine



(الف)



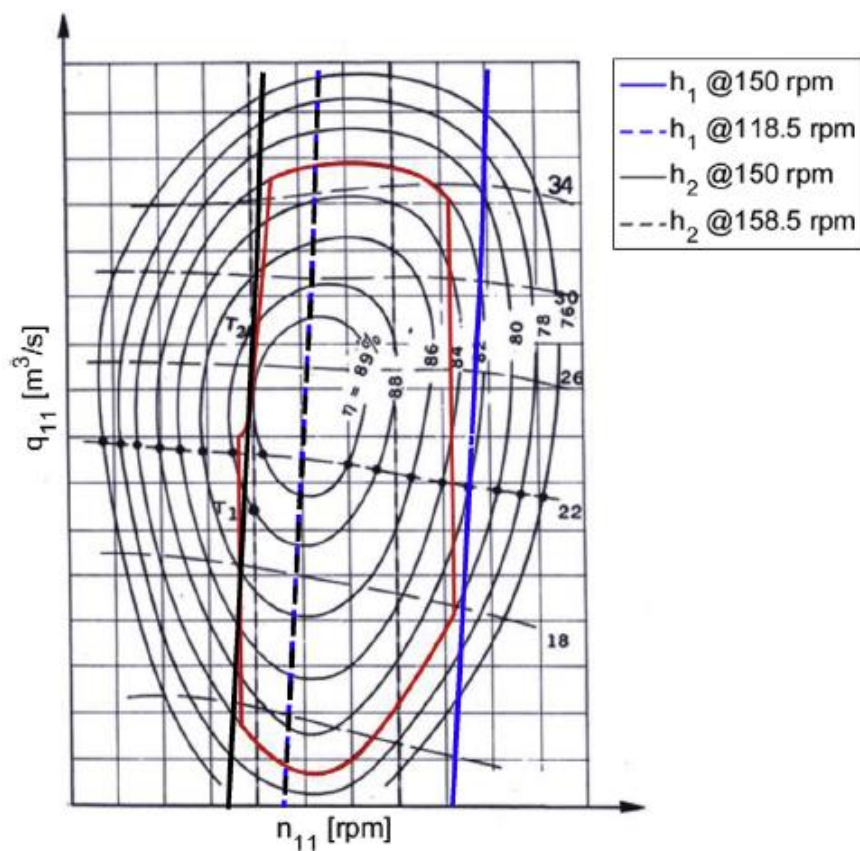
(ب)

شکل ۲-۵: پیکربندی توربین آبی دور متغیر (الف) ماشین‌های سنکرون با ورودی از کانورتر (ب) ماشین‌های القایی با ورودی دوگانه [47]

در شکل ۲-۶ مزیت استفاده از توربین فرانسویس دور متغیر نشان داده شده است. این شکل هیل چارت راندمان یک توربین فرانسویس را به صورت تابعی از سرعت ( $n_{11}$ ) و دبی واحد ( $q_{11}$ ) نشان می‌دهد که خود از طریق روابط زیر به سرعت دورانی ( $n$ )، دبی خروجی توربین ( $q$ )، هد خالص توربین ( $h$ ) و قطر توربین ( $D$ ) بستگی دارد:

$$n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{h}} \quad (5-1)$$

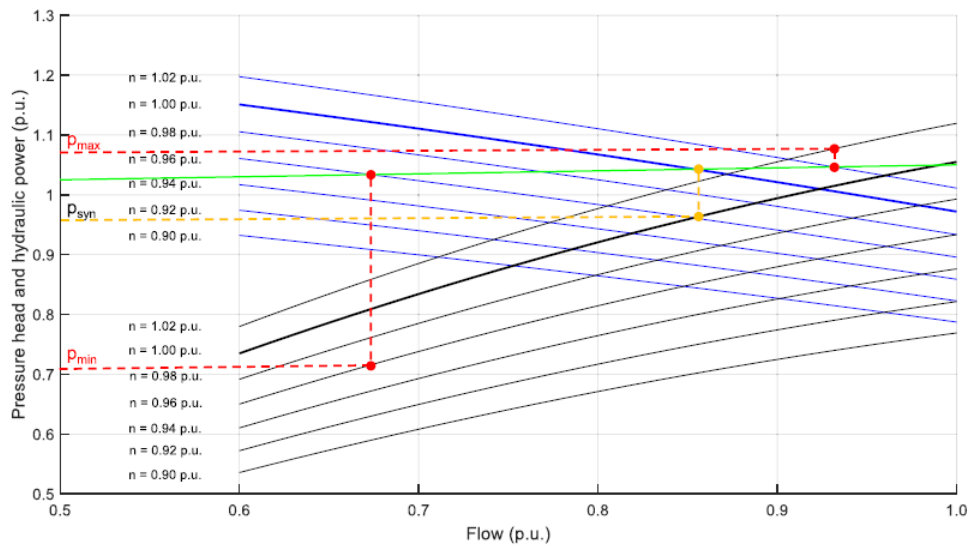
$$q_{11} = \frac{\sqrt{n}q}{D^2\sqrt{h}} \quad (9-2)$$



شکل ۲-۶: مزایای استفاده از توربین فرانسیس دور متغیر [47]

در شکل بالا محدوده داخل مرزهای قرمز رنگ، محدوده کاری توصیه شده برای توربین است. خطوط توپر آبی و سیاه، سرعت واحد و دبی واحد را برای دو هد ناخالص مختلف ( $h_1$  و  $h_2$ ) در سرعت سنکرون (۱۵۰ دور در دقیقه) نشان می‌دهند در حالی که خطچین‌های آبی و سیاه نمایانگر سرعت واحد و دبی واحد به ازای همان سطح آب در مخزن در سرعت‌های ۱۱۸/۵ و ۱۵۸/۵ دور در دقیقه هستند. در هر دو حالت ( $h_1$  و  $h_2$ ) با استفاده از توربین سرعت متغیر، راندمان در همه نقاط کاری افزایش می‌یابد. در حالت اول ( $h_1$ ) استفاده از توربین سرعت متغیر امکان کارکرد در هد ناخالص کمتر از حداقل هد توصیه شده برای توربین‌های سرعت ثابت را نیز فراهم می‌آورد. در حالت دوم ( $h_2$ ) محدوده عملکرد توربین به ازای مقدار معینی از هد ناخالص افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۱-۷ نیز مزیت استفاده از پمپ - توربین دور متغیر را در حالت عملکرد به عنوان پمپ نشان می‌دهد. خطوط توپر آب و سیاه نشان دهنده منحنی‌های هد (فشار) - دبی و توان هیدرولیکی - دبی به ازای سرعت‌های دورانی مختلف (از ۰/۹ سرعت نامی تا ۱/۰۲ سرعت نامی) برای یک پمپ توربین فرانسیس در حالت عملکرد به عنوان پمپ هستند. خط سبز توپر نمایانگر منحنی هد (فشار) - دبی نیروگاه به ازای یک هد ناخالص مشخص است.



شکل ۲-۷: مزایای استفاده از پمپ دور متغیر [47]

همان طور که در این شکل مشخص است، در سرعت سنکرون، پمپ توربین دارای یک نقطه کارکرد  $(P_{syn})$  است. تغییر سرعت دورانی این امکان را فراهم می‌آورد تا توان هیدرولیکی منتقل شده به سیال در محدوده  $P_{min}$  تا  $P_{max}$  تنظیم شود. در نتیجه امکان تغییر برق دریافتی از شبکه متناظر با این محدوده وجود دارد [47].

توجه به تولید برق آبی سرعت متغیر از حدود دهه ۱۹۸۰ جلب شد. گیش و همکاران در سال ۱۹۸۱ امکان استفاده از ماشین‌های القایی با ورودی دوگانه (DFIM) را در نیروگاه‌های برق آبی بررسی کردند [50]. در نیمه دوم دهه ۱۹۸۰ مهندسان شرکت هیتاچی، اختراعات متعددی را در ارتباط با قطعات مختلف تجهیزات و سیستم کنترل تولید برق آبی دور متغیر به ثبت رساندند [53-51]. اولین واحد تلمبه ذخیره‌ای سرعت متغیر در سال ۱۹۸۷ در ژاپن توسط شرکت KEPCO<sup>1</sup> تجاری سازی شد [54]. سه سال بعد شرکت TEPCO<sup>2</sup> دومین واحد از این نوع را تجاری سازی نمود. بعد از آن چند واحد دیگر نیز در ژاپن به بهره‌برداری رسیدند که از این بین می‌توان به دو واحد ۴۰۰ مگاواتی در اکاواشی، یک واحد ۱۰۰ مگاواتی در تاکامی، یک واحد ۳۰۰ مگاواتی در شیوبارا، یک واحد ۳۰۰ مگاواتی در اکوکیتسو، یک واحد ۳۰ مگاواتی در یانبارو، ۴ واحد ۳۴۰ مگاواتی در اماروگاوا و یک واحد ۴۰۰ مگاواتی در کازونوگاوا اشاره نمود. انگیزه اصلی برای توسعه نیروگاه‌های برق آبی سرعت متغیر در ژاپن، ضریب نفوذ بالای برق هسته‌ای است که بعضاً مشکلاتی را برای بهره‌برداری ایجاد می‌کند. به ویژه در ساعات غیر پیک که ضرورت دارد تعدادی از واحدهای تولید برق حرارتی به صورت اضافه برای کنترل فرکانس در مدار باشند [55-58]. در چین اولین (و تاکنون تنها) نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سرعت متغیر در ۱۹۸۹ به بهره‌برداری رسید. انگیزه نصب واحد سرعت متغیر در نیروگاه پانجیاکو چین، تغییرات زیاد شرایط کاری به ویژه به دلیل تغییر سطح آب در مخزن بالایی نیروگاه بود [59]. طی سال‌های دهه ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ پروژه‌های متعددی به منظور بررسی توجیه‌پذیری کارکرد سرعت متغیر در نیروگاه‌های برق آبی کوچک انجام گرفت. اما در سال ۲۰۰۴ بود که اولین واحد برق آبی سرعت متغیر بزرگ در اروپا آغاز به کار کرد. نیروگاه

<sup>1</sup> Kansai Electric Power Company

<sup>2</sup> Tokio Electric Power Company

تلمبه ذخیره ای گلدیستال<sup>۱</sup> دارای چهار واحد ۲۶۵ مگاواتی است که دو عدد از آن‌ها با استفاده از سیستم دور متغیر DFIM به شبکه متصل اند. این واحدهای دور متغیر به طور متوسط ۱۹ ساعت در روز کار کرده و به کنترل فرکانس شبکه کمک می‌کنند [60]. از آن زمان سه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر دیگر نیز در اروپا به بهره‌برداری رسید که هر سه مجهز به پمپ - توربین‌های فرانسوی و سیستم دور متغیر DFIM بودند. در سه سال آینده نیز ۳ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سرعت متغیر دیگر در اروپا و آسیا به بهره‌برداری خواهند رسید. به علاوه دو نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای قدیمی در ژاپن نیز به سیستم دور متغیر مجهز خواهند شد [47].

از آن چه گفته شد می‌توان دریافت که سطح آمادگی فناوری توربین‌های برق آبی دور متغیر بالا است. هر چند تعداد محدودی از آن‌ها (اغلب به صورت تلمبه ذخیره‌ای) در حال بهره‌برداری هستند. دلایل روند کند جایگزینی این فناوری متعدد است که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

- معمولاً از طراحی اولیه تا بهره‌برداری از پروژه‌های برق آبی زمان زیادی طول می‌کشد که بخشی از آن ناشی از فرآیندهای پیچیده اداری است.
- توسعه هر نیروگاه برق آبی جدید معمولاً سبب ایجاد نگرانی‌های زیست محیطی گسترده‌ای می‌شود.
- درآمد حاصل از بهره‌وری بالاتر نیروگاه‌های برق آبی در بازار برق لزوماً به اندازه‌ای نیست که هزینه تجهیز آن‌ها به سیستم دور متغیر را توجیه کند. هزینه نیروگاه‌های دور متغیر بین ۷ تا ۱۵ درصد بیش از نیروگاه‌های دارای سرعت ثابت است [61].
- در برخی از کشورها مقررات مربوط به سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های برق آبی ثابت یا الزامات اجرایی کافی را ندارند. علی‌رغم موارد مطرح شده، هنوز چالش‌های فناورانه‌ای نیز در راه توسعه سیستم‌های دور متغیر وجود دارد. دو چالش عمده‌ای که می‌توان از آن‌ها یاد کرد عبارتند از:
- لزوم گسترش بیشتر محدوده کارکرد مطمئن ماشین‌های آبی که به استفاده حداکثری از مزایای سیستم دور متغیر کمک می‌کند.
- ارتقای سیستم عایق‌کاری ماشین‌های دارای ورودی کانورت

## ۶-۲- توربین‌های آبی دوستدار ماهی

خصوصیات زیست محیطی و اکولوژی نیروگاه‌های برق آبی همواره محل توجه پژوهشگران بوده است. هدف از این پژوهش‌ها جمعیت ماهی‌ها، طراحی توربین‌های دوستدار ماهی و توسعه یاتاقان‌های قابل روانکاری با آب در توربین‌ها است تا به واسطه آن ریسک آلودگی آب کاهش پیدا کند. فعالیت‌های مرتبط با چالش‌های آب مانند تضمین جریان‌های آب لازم برای حفظ اکولوژی و یا همبست آب، انرژی و اکوسیستم نیز در جریان هستند که خارج از چهارچوب این گزارش قرار می‌گیرند. همان طور که در گزارش قبلی نیز اشاره شد، هر چند انرژی برق آبی بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر و پاک است، اما می‌تواند آثار نامطلوبی بر اکوسیستم بگذارد. فراهم آوردن امکان مهاجرت ماهی‌ها، به ویژه در زمان تخم ریزی، یکی از مهمترین مسائل در حفظ اکوسیستم است. به منظور حداقل کردن آثار مرگ و میر ناشی از توربین آبی در جمعیت ماهی‌های مهاجر پایین دست، از رویکردی به نام اکوهیدرولیک برای طراحی نیروگاه‌های برق آبی استفاده می‌شود. بر خلاف توربین‌های متداول امروزی،

<sup>1</sup> Goldisthal

توربین‌های دارای هد کم (مانند آسیاب‌ها) دوستدار ماهی هستند. از آن جا که این توربین‌ها دارای کاربرد بسیار محدودی هستند، دو راهبرد برای توربین‌های امروزی دارای هد بالا اتخاذ شده است. اولین راهبرد احداث تأسیساتی به منظور عبور امن ماهیان است که مستقیماً به موضوع این گزارش مربوط نمی‌شود و محدودیت‌هایی نیز دارد. اما در ادامه در خصوص دومین راهبرد که طراحی توربین‌های دوستدار ماهی است بیشتر توضیح داده خواهد شد.

## ۱-۶-۲- طراحی توربین‌های دوستدار ماهی

در راستای تحقیق و توسعه در زمینه توربین‌های دوستدار ماهی، توربین آلدن<sup>۱</sup> و توربین با چرخ دارای حداقل مجرا<sup>۲</sup> معرفی شده‌اند:

- توربین آلدن قابلیت کار تا هد ۲۵ متر را دارد. طراحی این توربین نسبتاً جدید بوده و دارای تنها سه پره می‌باشد تا باعث کاهش مرگ و میر ماهیان شود. به علاوه سرعت دورانی این توربین نیز نسبت به توربین‌های متداول کمتر است (حدود ۱۲۰ دور در دقیقه) توربین آلدن ابتدا با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی و تست در مقیاس پایلوت در لابراتوار تحقیقاتی آلدن مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور یک مدل در مقیاس ۱ به ۸/۷۱ ساخته و تست شد. نتایج حاکی از آن بود که راندمان هیدرولیکی ماکزیمم این توربین حدود ۹۳/۶ درصد و نرخ نجات ماهی‌های عبوری از آن حدود ۹۸ درصد (برای ماهی‌های کوچکتر از ۲۰ سانتی‌متر) است [62].



شکل ۲-۸: چرخ توربین آلدن [62]

- توربین با چرخ دارای حداقل مجرا (MGR) به نوعی شکل اصلاح شده توربین کاپلان است. در طراحی آن فاصله بین پره‌های قابل تنظیم چرخ و هاب و نیز فاصله بین پره‌ها و قسمت تخلیه کاهش یافته است. این تغییرات سبب کاهش آسیب ماهیان و در نتیجه کاهش نرخ مرگ و میر آن‌ها در حین عبور می‌شود. به علاوه راندمان توربین را نیز افزایش می‌دهد [63].

<sup>1</sup> Alden

<sup>2</sup> Minimum gap runner

## ۷-۲- شرکت‌های پیشرو

شرکت‌هایی که در این بخش معرفی خواهند شد شامل شرکت‌های زیر می‌باشند که بر اساس سهم بازار جهانی [64] و نیز تعداد ثبت اختراع [65] شناسایی شده‌اند:

- شرکت توشیبا (ژاپن)
- شرکت جنرال الکتریک (ایالات متحده)
- شرکت هاربین الکتریک (چین)
- شرکت فویت (آلمان)
- شرکت آندریتز (اتریش)

در ادامه در خصوص هر یک از شرکت‌های فوق و فعالیت‌های مهم آن‌ها در زمینه توربین آبی فرانسيس توضیحاتی آمده است.

### ۱-۷-۲- شرکت توشیبا

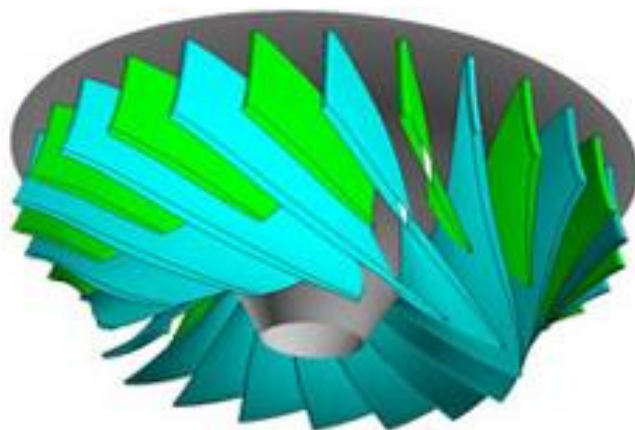
محصولات و خدمات گروه توشیبا در حوزه سیستم‌های انرژی، سیستم‌های زیرساختی، ساختمانی، خرده فروشی و چاپ، دستگاه‌های الکترونیکی و ذخیره‌سازی انرژی، دیجیتال و باتری می‌باشد. دامنه کسب و کار این شرکت شامل سیستم‌های تولید برق در مقیاس بزرگ برای انرژی هسته‌ای و حرارتی، همراه با سیستم‌های تولید انرژی تجدید پذیر برای انرژی‌های برق آبی، زمین گرمایی، خورشیدی و بادی است. سایر کسب و کارهای مرتبط شامل سیستم‌های انتقال و توزیع برق هستند که برق را مستقیماً به مصرف کنندگان نهایی می‌رسانند. همچنین سیستم انرژی مستقل مبتنی بر هیدروژن که شعار «تولید محلی برای مصرف محلی» را تحقق می‌بخشد.

در زمینه توربین‌های فرانسيس، که بیشترین استفاده را دارند، توشیبا از نظر بازده تولید در سطح بالای جهانی قرار دارد. همچنین در زمینه نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای، که برای پاسخ به اوج بار طراحی شده‌اند، توشیبا در حال حرکت به سمت ارتفاع ریزش بالاتر، ظرفیت بیشتر و سرعت متغیر است. توشیبا نه تنها تجهیزات اصلی، مانند توربین‌ها و ژنراتورهای برق آبی را طراحی، تولید و تحویل می‌دهد، بلکه اجزای مختلفی را که برای نیروگاه‌ها مورد نیاز است نیز فراهم می‌آورد.

توشیبا به منظور توسعه سیستم‌های تولید برق آبی با راندمان بالا و سازگار با محیط زیست، فعالیت‌های تحقیق و توسعه را در دستور کار دارد. این شرکت دارای یک آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک پیشرفته است که در آن آزمایش‌ها و مطالعات مربوط به عملکرد توربین و پدیده‌های مکانیک سیالات با استفاده از یک مدل کوچک از توربین‌های واقعی انجام می‌شود. توشیبا همچنین در تلاش برای بهبود فناوری‌های تجزیه و تحلیل از طریق آزمایش مدل‌های توربین است.

یکی از فناوری‌های توسعه یافته در شرکت توشیبا چرخ اسپلیتر<sup>۱</sup> است که در آن پره‌های بلند و پره‌های کوتاه به طور متناوب برای کاربری پمپ - توربین استفاده شده‌اند تا بازده تولید و عملکرد پمپاژ و همچنین ثبات کلی و عملکرد سیستم تولید برق تلمبه - ذخیره‌ای را بهبود بخشد.

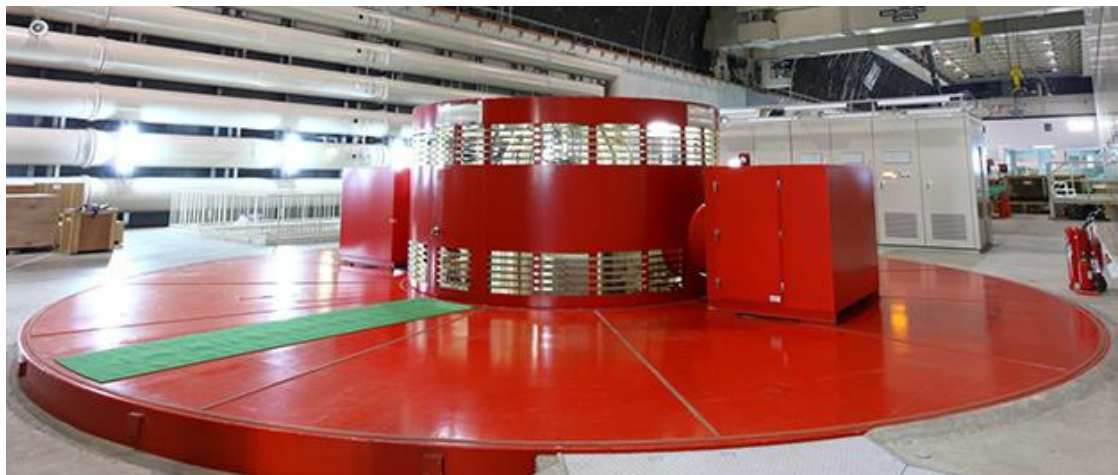
<sup>1</sup> Splitter runner



شکل ۲-۹: چرخ اسپلیتر برای توربین فرانسویس در کاربرد پمپ - توربین

همچنین در سال ۱۹۹۰، توشیبا برای اولین بار در جهان، یک سیستم تولید برق تلمبه ذخیره‌ای با سرعت دورانی قابل تنظیم را به شرکت برق توکیو عرضه کرد. از آن زمان و با مشخص شدن شناخت اثربخشی آن‌ها، سیستم‌های قدرت تلمبه ذخیره‌ای با سرعت دورانی قابل تنظیم مجهز به عملکرد کنترل فرکانس اتوماتیک<sup>۱</sup> در حالت پمپاژ و سایر عملکردهای مفید در ژاپن و سایر نقاط جهان طراحی و ساخته شده‌اند. سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای با سرعت دورانی قابل تنظیم دارای ویژگی‌های زیر هستند:

- عملکرد تنظیم فرکانس خودکار در حالت پمپاژ
- راندمان بالاتر و دامنه عملکرد گسترده در حالت تولید و پمپاژ
- بهبود پایداری شبکه برق [66]



شکل ۲-۱۰: اولین پمپ - توربین دور متغیر واقع در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای یاگیساوا<sup>۲</sup>

<sup>1</sup> Automatic Frequency Control (AFC)

<sup>2</sup> Yagisawa

## ۲-۷-۲- شرکت جنرال الکتریک

شرکت جنرال الکتریک<sup>۱</sup> طیف کاملی از توربین‌های آبی را با فناوری پیشرفته به بازار عرضه می‌کند. از آن جا که توربین‌های فرانسوی با در اختیار داشتن حدود ۶۰ درصد از ظرفیت برق آبی در جهان، پرکاربردترین نوع توربین‌های آبی هستند، شرکت جنرال الکتریک به طور مداوم در زمینه تحقیق و توسعه این توربین‌ها سرمایه گذاری کرده است تا بهره‌وری آن‌ها را افزایش دهد. این شرکت همچنین محصولات خاص دیگری را برای بهبود عملکرد توربین توسعه داده است. جنرال الکتریک تعداد زیادی از توربین‌های فرانسوی را با خروجی تا ۸۰۰ مگاوات در سراسر جهان نصب کرده است. از جمله آن‌ها می‌توان به یکی از بزرگترین توربین‌های فرانسوی که تاکنون ساخته شده است با قطر چرخ ۱۰ متر و وزن بیش از ۴۵۰ تن اشاره نمود [67].

## ۲-۷-۳- شرکت هاربین الکتریک

شرکت هاربین الکتریک<sup>۲</sup> از دل شش پروژه از ۱۵۶ پروژه مهم ساختمانی چین که با کمک اتحاد جماهیر شوروی سابق در طول برنامه پنج ساله اول چین اجرا شد، به وجود آمده است. این شرکت اکنون یکی از شرکت‌های اصلی چین در توسعه ملی تجهیزات تولید برق در حوزه نیروگاه هسته‌ای، نیروگاه برق آبی، نیروگاه زغال سنگی، نیروگاه گازی، نیروگاه‌های کشتی، تجهیزات الکتریکی و پروژه‌های نیروگاهی کلید در دست است. محصولات هیدروتوربین تولیدی شرکت هاربین الکتریک شامل توربین‌های مخلوط، جریان محوری، لوله‌ای، مورب، پمپ - توربین و پلتن است. مجموعه‌های تولید برق آبی این شرکت دارای ظرفیت واحد از ۰/۸ مگاوات تا ۱۰۰۰ مگاوات هستند [68].



شکل ۲-۱۱: توربین فرانسوی ساخت هاربین الکتریک

<sup>1</sup> General Electric (GE)

<sup>2</sup> Harbin Electric (HE)

## ۴-۷-۲- شرکت فویت

شرکت فویت<sup>۱</sup> در زمینه نیروگاه‌های برق آبی خدمات کاملی ارائه می‌دهد. این شرکت نسل‌های متعددی از نیروگاه‌های برق آبی را ساخته است که دامنه آن شامل نیروگاه‌های برق آبی بزرگ، نیروگاه‌های تلمبه - ذخیره‌ای، نیروگاه‌های برق آبی کوچک، سیستم‌های اتوماسیون و فناوری‌های نوآورانه برای استفاده از انرژی اقیانوس‌ها، نوسازی نیروگاه‌ها و همچنین خدمات کامل چرخه عمر می‌شود. فویت اولین توربین فرانسوی خود را در سال ۱۸۷۳ نصب کرد و با استفاده از آن بهینه‌سازی مداوم در طول سال‌ها بر اساس آخرین تحقیقات هیدرودینامیکی، این شرکت بزرگترین و قدرتمندترین توربین‌های فرانسوی جهان (با قطر چرخ تا ۹ متر و توان خروجی تا ۸۰۰ مگاوات) را توسعه داد. به دلیل طیف گسترده‌ای از کاربردهای آنها، بیش از نیمی از توربین‌های تولید شده توسط فویت از نوع فرانسوی هستند. در ادامه برخی از فعالیت‌های پژوهش و فناوری این شرکت در حوزه توربین‌های آبی (فرانسوی) ذکر شده است:

- سیستم OnCare.Acoustic: این سیستم با شناسایی ناهنجاری‌های صوتی، طبقه‌بندی آنها در قالب هشدارها و اخطارها برای تجهیزات مشخص شده، از بهره‌برداران نیروگاه‌های برق آبی در کشف حوادث بالقوه خطرناک پشتیبانی می‌کند. این سیستم امکان استخراج اطلاعات برای اتخاذ تصمیمات بهتر در حوزه نگهداری و بهره‌برداری را فراهم می‌آورد. این سیستم مبتنی بر پلتفرم اینترنت اشیاء صنعتی شرکت فویت بوده (OnCumulus) و مجهز به حسگر صوتی و یک BlueBox برای انتقال داده‌ها به حافظه ابری می‌باشد.



شکل ۲-۱۲: سیستم OnCare.Acoustic شرکت فویت

- پروژه XFLEX HYDRO: بخش برق آبی فویت یکی از اعضای اصلی پروژه XFLEX HYDRO (گسترش انعطاف پذیری سیستم برق آبی) است که یک پروژه بزرگ نوآورانه در حوزه انرژی است و نشان می‌دهد چگونه فن‌آوری‌های برق آبی هوشمند می‌توانند سیستمی قابل اعتماد و انعطاف پذیر ارائه دهند. بودجه ۱۸ میلیون یورویی این پروژه توسط کمیسیون اروپا و کنسرسیومی متشکل از ۱۹ همکار در کنفرانس تغییرات آب و هوایی

<sup>1</sup> Voith

سازمان ملل در اسپانیا اعلام شد. فناوری‌های XFLEX HYDRO شامل توربین با سرعت متغیر و ثابت پیشرفته، سیستم‌های کنترل هوشمند و سیستم ترکیبی توربین - باتری هستند که هر کدام در نیروگاه‌های آبی تعیین شده در سراسر اروپا پیاده‌سازی می‌شوند. این پروژه در سال ۲۰۲۳ با ارائه یک نقشه راه برای توسعه این فناوری‌ها در نیروگاه‌های برق آبی، همراه با سیاست‌پژوهی و توصیه‌های مربوط به بازار برای دولت‌ها، نهادهای نظارتی و صنعت به پایان می‌رسد. این طرح در راستای دستیابی به هدف تأمین ۳۲ درصد از انرژی اروپا از منابع تجدید پذیر تا سال ۲۰۳۰ میلادی است.

- پایش و ارزیابی اثرات کاویتاسیون: فویت و شرکت ملی برق ایسلند در حال انجام یک پروژه آزمایشی مشترک برای پایش کاویتاسیون در نیروگاه‌های برق آبی هستند. این سیستم نوآورانه به صورت یک عملگر اضافی بر روی سیستم پایش وضعیت OnCare.Health نصب خواهد شد. هدف از فرآیند جدید، اندازه‌گیری اثرات کاویتاسیون برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری و خرابی‌های دستگاه است. معمولاً با طراحی مناسب از کاویتاسیون جلوگیری می‌شود و عموماً در محدوده عملکرد طبیعی توربین اتفاق نمی‌افتد. با توجه به نیازهای روزافزون برای انعطاف پذیرتر شدن نیروگاه‌های موجود در ارتباط با سایر انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی باد، برای بهره‌برداران افزایش دامنه عملکرد موجود ارزشمند است، حتی اگر این امر باعث ایجاد کاویتاسیون شود. با کمک این سیستم پایش وضعیت، می‌توان بروز کاویتاسیون در صورت افزایش دامنه عملیاتی را ارزیابی و با مزیت حاصل از افزایش دامنه عملکرد مقایسه کرد [69].

## ۵-۷-۲- شرکت آندریتز

شرکت آندریتز<sup>۱</sup> یک شرکت بین‌المللی است که کارخانجات، سیستم‌ها، تجهیزات و خدمات مختلفی را برای صنایع مختلف ارائه می‌دهد. این شرکت یکی از پیشروان فناوری و بازار جهانی در کسب و کار برق آبی، صنعت کاغذ، فلزکاری و صنایع فولادی و جداسازی جامد و مایع در کاربری‌های شهری و صنعتی است. دفتر مرکزی این گروه در شهر گراتس اتریش قرار دارد. این شرکت با تقریباً ۱۷۰ سال تجربه، تقریباً ۲۷،۸۰۰ کارمند و بیش از ۲۸۰ مکان در بیش از ۴۰ کشور در سراسر جهان را در اختیار دارد.

این شرکت همچنین در زمینه تولید برق (نیروگاه‌های بخار، نیروگاه‌های زیست توده و بویلرهای بازیافت) و فناوری‌های مرتبط با حفظ محیط زیست (تأسیسات تصفیه گاز دودکش و گازهای خروجی) فعالیت می‌کند. کسب و کارهای مهم دیگر این شرکت، خوراک دام و اتوماسیون است که در آن آندریتز طیف گسترده‌ای از محصولات و خدمات نوآورانه را در بخش اینترنت صنعتی اشیاء با نام تجاری متریس<sup>۲</sup> ارائه می‌دهد.

آندریتز هیدرو یکی از سازندگان جهانی سیستم‌ها و خدمات الکترومکانیکی (از آب تا برق) برای نیروگاه‌های برق آبی و یکی از پیشروان بازار جهانی در این زمینه است. این بخش با بیش از ۱۷۵ سال تجربه در طراحی توربین آبی، بیش از ۳۱،۰۰۰ توربین (با ظرفیت بیش از ۴۳۰،۰۰۰ مگاوات) در سطح جهان نصب کرده است. آندریتز هیدرو محدوده وسیعی از توربین‌های آبی از نیروگاه‌های برق آبی کوچک گرفته تا توربین‌های بزرگ تا ۱۸۰۰ متر و ظرفیت بیش از ۸۰۰ مگاوات را پوشش می‌دهد.

<sup>1</sup> Andritz

<sup>2</sup> Metris

توربین‌های فرانسویس آندریتز هیدرو در پیکربندی افقی یا عمودی در حالت ایده‌آل برای کاربردهای با هد متوسط تا ۷۰۰ متر و خروجی توان تا ۸۰۰ مگاوات مناسب هستند. راندمان بسیار بالای آن بیش از ۹۶٪ است و از نوع توربینی است که در همه جا قابل استفاده است.



شکل ۲-۱۳: توربین فرانسویس ساخت شرکت آندریتز

به منظور پاسخگویی به نیازهای امروز بازار و آمادگی برای چالش‌های انتقال انرژی آینده، فعالیت‌های تحقیق و توسعه آندریتز با هدف بهینه‌سازی یکپارچه عملکرد هیدرولیکی، فنی و الکتریکی در جریان است که در آن فناوری‌های مرتبط با توربین‌ها و پمپ‌ها، آبگیرها و ورودی‌ها، ژنراتورها، سیستم‌های برق قدرت (EPS) و اتوماسیون پوشش داده می‌شود. لازم به ذکر است که چالش‌های مهم امروز حول محور انعطاف پذیری در عملکرد و عمر طولانی تجهیزات مکانیکی شکل گرفته است. به منظور اجرای فعالیت‌های تحقیق و توسعه ذکر شده، شرکت آندریتز آزمایشگاه‌ها و مدارهای تست مختلفی را در سرتاسر جهان در اختیار دارد که در آن روش‌های شبیه‌سازی عددی توسعه یافته و به کار می‌روند. این شبیه‌سازی‌ها در زمینه دینامیک سیالات، مکانیک، انتقال حرارت، فرآیندهای الکترومغناطیسی و همچنین رفتار دینامیکی سیستم هیدرولیکی - الکتریکی به صورت کلی با استفاده از پیشرفته‌ترین نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای کارآمد در دست انجام است. آندریتز سال‌ها است که از دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل اجزای محدود<sup>۱</sup> و همچنین مهندسی معکوس برای طراحی بهینه استفاده می‌کند. این شرکت از طریق همکاری تحقیقاتی با شرکای متعدد خود در سراسر جهان، تحقیقات دانشگاهی را مستقیماً به کار می‌گیرد. همچنین برای پروژه‌های بزرگ نوسازی، با تجزیه و تحلیل دقیق از ماشین موجود و سناریوهای مختلف نوسازی، در هر مورد ارجاع شده راه حل بهینه را ارائه می‌کند [70].

<sup>1</sup> Finite Element Analysis (FEA)

## ۸-۲- دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی

در این بخش به معرفی دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی مطرح در جهان که از پیشروان فناوری در حوزه توربین‌های آبی می‌باشند، پرداخته شده است.

### ۸-۲-۱- لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر

در لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر<sup>۱</sup> آمریکا بر روی پاسخ‌های خلاقانه به چالش‌های انرژی امروز تمرکز می‌گردد. محققان این لابراتوار با استفاده از تحقیق در علوم بنیادی و توسعه فناوری‌های نوین پاک و سیستم‌های انرژی یکپارچه سعی در تحول روش استفاده از انرژی دارند.

در زمینه برق آبی، هدف از تحقیقات لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر، حصول اطمینان از آمادگی انرژی برق آبی و فناوری‌های تلمبه ذخیره‌ای برای توسعه شبکه برق در آینده است. چرا که با افزایش سهم انرژی بادی و خورشیدی در شبکه ایالات متحده، نیاز سیستم به انعطاف‌پذیری بیشتر نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، انتظار می‌رود که این شرایط به دلیل تلاش ایالت‌ها در راستای دستیابی به اهداف تعیین شده خود در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، شتاب بیشتری بگیرد. نیروگاه برق آبی با توجه به ظرفیت و توانایی بالا در ذخیره‌سازی میان مدت و بلند مدت انرژی، از معدود فناوری‌های شبکه‌ای است که برای تأمین انعطاف‌پذیری شبکه از موقعیت مناسبی برخوردار است. لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر در چهار محور اصلی زیر بر روی انرژی برق آبی پژوهش می‌کند:

- طرح هیدرو وایر<sup>۲</sup>: تمرکز این طرح بر درک، توانمندسازی و بهبود پتانسیل کامل نیروگاه‌های برق آبی و تلمبه ذخیره‌ای برای کمک به قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و ادغام در شبکه الکتریکی است. پژوهش‌های این طرح در رابطه با توانایی‌ها، محدودیت‌ها، عملیات و برنامه‌ریزی است.
- تحلیل اقتصادی: تحلیل اقتصادی لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر در مورد فناوری‌های برق آبی مبتنی بر ده‌ها سال تجربه در مدل‌سازی عملکرد سیستم، برآورد هزینه و توسعه ابزارهای مربوطه در کل بخش‌های انرژی‌های تجدیدپذیر است.
- یکپارچه‌سازی شبکه: تحقیقات پیشرفته در زمینه یکپارچه‌سازی شبکه شامل نقش نیروگاه برق آبی در برنامه‌ریزی شبکه، مدل‌سازی عملیات و تحقیقات در زمینه قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری است. در این زمینه از موفقیت‌های به دست آمده در مطالعات یکپارچه‌سازی شبکه انرژی بادی و خورشیدی بهره‌برده می‌شود.
- تحلیل قوانین و مقررات: تحلیل قوانین و مقررات توسط لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر به ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا نیازهای مقرراتی مربوط به انرژی برق آبی و روش‌های پیمایش فرآیند قانونگذاری و داده‌های کمی و کیفی مورد نیاز را بهتر درک کنند [71].

<sup>1</sup> National Renewable Energy Laboratory (NREL)

<sup>2</sup> HydroWIREs

## ۲-۸-۲- هیدروسن

مرکز تحقیقاتی فناوری برق آبی نیروژ موسوم به هیدروسن<sup>۱</sup> یک مرکز تحقیقاتی ملی است که می‌خواهد از طریق راه حل‌های نوآورانه، بخش برق آبی نیروژ را قادر به مقابله با چالش‌های پیچیده و بهره‌گیری از فرصت‌های جدید سازد. زمینه‌های پژوهشی این مرکز عبارتند از:

- سازه‌های برق آبی
- توربین و ژنراتور
- بازار و خدمات
- طراحی دوستدار محیط زیست

دانشگاه علم و فناوری نیروژ<sup>۲</sup> نهاد میزبان این مرکز است که همراه با مرکز تحقیقات انرژی<sup>۳</sup> و انستیتوی تحقیقات طبیعت نیروژ<sup>۴</sup>، شریک اصلی تحقیقات هیدروسن می‌باشد. علاوه بر این شرکای اصلی، هیدروسن حدود ۵۰ شریک ملی و بین‌المللی دیگر از صنعت، مؤسسات تحقیق و توسعه و دانشگاه‌ها دارد. بودجه سالانه این مرکز حدود ۴۸ میلیون کرون نیروژ است که حدود ۵۰ درصد آن توسط شورای تحقیقات نیروژ، حدود ۲۵ درصد توسط مشتریان تحقیقات و حدود ۲۵ درصد دیگر توسط شرکای تحقیقاتی تأمین می‌شود.

لازم به ذکر است که هیدروسن یک مرکز تحقیقات انرژی دوستدار محیط زیست<sup>۵</sup> است. طرح مراکز تحقیقاتی دوستدار محیط زیست توسط شورای تحقیقات نیروژ ایجاد شده و هدف از آن ایجاد مراکز تحقیقاتی موقت است که برای حل چالش‌های خاص در این زمینه، تحقیقات متمرکز و بلند مدت بین‌المللی انجام می‌دهند. مراکز دوستدار محیط زیست را می‌توان برای مدت حداکثر هشت سال تأسیس کرد (یک دوره ۵ ساله اولیه با امکان تمدید سه ساله). هیدروسن در سال ۲۰۱۶ تأسیس شده است [72].

همان‌طور که اشاره شد توربین و ژنراتور یکی از چهار حوزه تحقیقاتی در هیدروسن است. در این حوزه سه محور تحقیقاتی مهم در هیدروسن تعریف شده است:

- کارکرد دور متغیر: تغییر پارادایم در طراحی و کار نیروگاه‌ها با معرفی کانورترهای الکترونیک قدرت به منظور کارکرد دور متغیر توربین و ژنراتور امکان‌پذیر است. چرا که دامنه عملکرد توربین‌های فرانسوی با استفاده از توربین‌ها و ژنراتورهای دور متغیر بیشتر خواهد شد.
- محاسبه بارهای خستگی توربین و تخمین عمر اجزای آن: توربین‌های آبی با هد بالا معمولاً با بارهای خستگی زیاد سر و کار دارند که علت آن شرایط عملیاتی خارج از محدوده طراحی، راه‌اندازی و توقف متعدد و عملکرد بدون بار است. مطالعات متعددی بر روی میزان بار خستگی زیاد ناشی از این شرایط کاری انجام شده است اما این مطالعات توانایی انجام تجزیه و تحلیل طول عمر خستگی برای اجزای توربین را ندارند. البته گفتنی است که عملکرد با سرعت متغیر شرایط کار در توربین‌ها را تغییر داده و بارهای خستگی را کاهش می‌دهد.

<sup>1</sup> Hydrocen

<sup>2</sup> NTNU

<sup>3</sup> SINTEF

<sup>4</sup> NINA

<sup>5</sup> FME

- نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای: نیروژ نیروگاه‌های آبی زیادی دارد که بین مخازن بزرگ کار می‌کنند که برای نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای ایده‌آل است. برای تحقق این امر، لازم است قابلیت‌های پمپاژ در نیروگاه‌های موجود ارتقا یابد. چرا که این نیروگاه‌ها به اندازه کافی مستغرق نیستند تا از وقوع کاویتاسیون در حالت پمپاژ جلوگیری شود. بنابراین نیاز به فناوری‌های جدید برای عملی ساختن پتانسیل تلمبه ذخیره‌ای در نیروژ احساس می‌شود [73].

### ۳-۸-۲- مؤسسه تحقیقات منابع آب و انرژی برق آبی چین

مؤسسه تحقیقات منابع آب و انرژی برق آبی چین<sup>۱</sup> در بخش غربی پکن واقع شده و متشکل از پردیس جنوب و پردیس شمال می‌باشد. این مؤسسه مجموعه آزمایشگاهی داکسینگ<sup>۲</sup> خود را در حومه جنوبی شهرداری پکن و دو بخش دیگر واقع در خارج از پکن، یعنی بخش منابع آب برای مناطق دامداری در هوهات<sup>۳</sup> و بخش تحقیقات مکانیک و برق را در تیانبجین در اختیار دارد. این مؤسسه اکنون به بزرگترین مؤسسه تحقیقاتی جامع در سطح بالا در زمینه منابع آب و انرژی برق آبی در چین تبدیل شده است. در حال حاضر، مؤسسه تحقیقات منابع آب و انرژی برق آبی چین بیش از ۱۳۰۰ کارمند، ۱۲ بخش تحقیقاتی و ۳۲ آزمایشگاه دارد. مساحت کل مؤسسه ۴۸۰،۰۰۰ مترمربع است. مجموعه آزمایشگاهی جدید داکسینگ با وسعت ۱۴۰،۰۰۰ مترمربعی برای مطالعات آزمایشگاهی در زمینه هیدرولیک، رسوب گذاری، آبیاری و زهکشی و ماشین آلات هیدرولیکی فعال است که برای بسیاری از پروژه‌های بزرگ مانند جانمایی بهینه سد و نیروگاه برق آبی سه دره، مشکلات رسوب در رودخانه زرد، فن آوری صرفه‌جویی در آبیاری و تست عملکرد هیدرولیکی توربین و غیره مورد استفاده قرار گرفته است [74].

### ۴-۸-۲- انستیتو فناوری رورکی هند

انستیتوی فناوری رورکی هند<sup>۴</sup> از مهمترین مؤسسات هند در آموزش عالی فناوری و تحقیقات مهندسی، پایه و کاربردی است. از زمان تأسیس، این مؤسسه نقش مهمی در تأمین نیروی انسانی فنی و دانش فنی در هند و پیگیری تحقیقات داشته است. این مؤسسه در میان بهترین مؤسسات فناوری در جهان قرار دارد و به همه بخشهای توسعه فناوری کمک کرده است. همچنین در حوزه آموزش و تحقیقات در زمینه علوم، فناوری و مهندسی، این مؤسسه به عنوان یکی از مؤسسات روند ساز در هند شناخته می‌شود. این مؤسسه با ۱۷۰ سال سابقه، دوره‌های کارشناسی را در ۱۰ رشته مهندسی و معماری و کارشناسی ارشد را در ۵۵ رشته مهندسی، علوم کاربردی، معماری و برنامه‌ریزی ارائه می‌دهد. این مؤسسه در تمام بخشها و مراکز تحقیقاتی امکانات لازم جهت کار در دوره دکتری را نیز فراهم آورده است. گروه انرژی آبی و تجدیدپذیر<sup>۵</sup> یک بخش دانشگاهی مؤسسه فناوری رورکی هند است که در سال ۱۹۸۲ تأسیس شد. این گروه در زمینه برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌های برق آبی کوچک، گزارش‌های تفصیلی پروژه، طراحی‌های مهندسی تفصیلی و نقشه‌های ساختمانی، مشخصات فنی اجرایی، بازسازی، نوسازی و ارزیابی فنی - اقتصادی فعالیت می‌کند. به علاوه این مؤسسه از

<sup>1</sup> IWHR

<sup>2</sup> Daxing

<sup>3</sup> Huhhot

<sup>4</sup> Indian Institute of Technology Roorkee

<sup>5</sup> Department of Hydro and Renewable Energy (HRED)

طریق دوره‌های آموزشی کوتاه مدت به مهندسان و تکنسین‌های عملیاتی، آموزش‌های لازم در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر را ارائه می‌کند [75].

## ۵-۸-۲- مؤسسه فناوری فدرال لوزان (بستر فناوری برای ماشین‌های هیدرولیک)

از سال ۱۹۶۹ میلادی، بستر فناوری برای ماشین‌های هیدرولیک<sup>۱</sup> واقع در مؤسسه فناوری فدرال لوزان<sup>۲</sup> سوئیس، یک مرکز برجسته علمی در تحقیق و توسعه ماشین‌های هیدرولیک، متخصص در اعتبار سنجی عملکرد، هیدرودینامیک، کاویتاسیون، هیدروآکوستیک، شبیه‌سازی عددی و روش‌های پیشرفته اندازه‌گیری می‌باشد. افزایش دامنه عملکرد توربین‌های آبی برای ایجاد انعطاف‌پذیری و ثبات سیستم برق قدرت الکتریکی به منظور ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهش‌های اساسی در زمینه کاویتاسیون و نیز توسعه ابزارهای عددی از جمله حوزه‌های پژوهشی در این مرکز است [76].

## ۹-۲- پژوهشگران

در این بخش به معرفی افراد شاخص و برجسته در زمینه پژوهش‌های مرتبط با فناوری توربین‌های آبی پرداخته می‌شود. مبنای شناسایی این افراد تعداد ارجاعات به تحقیقات آن‌ها در زمینه توربین آبی فرانسیس می‌باشد.

### ۱-۹-۲- فرانسوا اولان<sup>۳</sup>

اولان دانشیار دانشگاه مؤسسه فناوری فدرال لوزان و رئیس آزمایشگاه ماشین‌های هیدرولیکی در این مؤسسه سوئیس بوده و در زمینه هیدرودینامیک توربین‌های آبی، پمپ‌ها و پمپ - توربین‌ها، کاویتاسیون، هیدروآکوستیک، شبیه‌سازی عددی جریان و تحقیقات تجربی فعال است. وی بیش از ۳۰۰ عنوان مقاله در حوزه توربین‌های آبی به چاپ رسانده و حدود ۳۸ رساله دکتری را هدایت کرده است.

### ۲-۹-۲- اوله گونار دالهاگ

دالهاگ<sup>۴</sup> استاد دانشگاه علم و فناوری نروژ بوده و در زمینه توربین‌های آبی پژوهش‌های متعددی راجع به برهمکنش روتور و استاتور، شبیه‌سازی عددی، توربین دور متغیر، تشخیص خرابی و غیره به عمل آورده و دارای بیش از ۱۰۰ عنوان مقاله در این حوزه می‌باشد.

<sup>1</sup> Plateforme Technologique Machines Hydrauliques (PTMH)

<sup>2</sup> EPFL

<sup>3</sup> François Avellan

<sup>4</sup> Ole Gunnar Dahlhaug

### ۳-۹-۲- میشل سروانتس

سروانتس<sup>۱</sup> استاد دانشگاه صنعتی لولتا در سوئد است. پژوهش‌های وی بر روی توربین‌های آبی هم به صورت تجربی و هم عددی می‌باشد که عمده آن‌ها مربوط به اثرات رفتار گذرا در تلفات، برهم کنش روتور - استاتور، طراحی جریان و اندازه گیری جریان است. سروانتس بیش از ۱۰۰ مقاله در حوزه توربین‌های آبی منتشر کرده است.

### ۴-۹-۲- کریستف نیکولت

نیکولت<sup>۲</sup> که مدرس مؤسسه فناوری فدرال لوزان است، دارای ده‌ها مقاله در زمینه توربین‌های آبی می‌باشد. پژوهش‌های وی در زمینه محاسبات ضربه قوچ (چکش آبی)، رفتار گذرای نیروگاه‌های برق آبی، شبیه‌سازی عددی رفتار دینامیک توربین‌های فرانسویس، پلتون و کاپلان و همچنین پایداری سیستم‌های هیدرولیکی می‌باشد.

## ۱۰-۲- روش آینده پژوهی فناوری

با توجه به این که هدف از این پروژه شناسایی اکوسیستم توربین‌های آبی بوده است، در این بخش از روش اکتشافی به منظور تبیین حوزه‌های محتمل در آینده برای محدوده موضوعی این مطالعه (توربین فرانسویس با ارتفاع ریزش بیش از ۲۵ متر و ظرفیت بیش از ۱۰ مگاوات) استفاده می‌شود. برای این منظور از تکنیک پیمایش محیطی شامل پیمایش مقالات و اختراعات ثبت شده در این زمینه استفاده شده است.

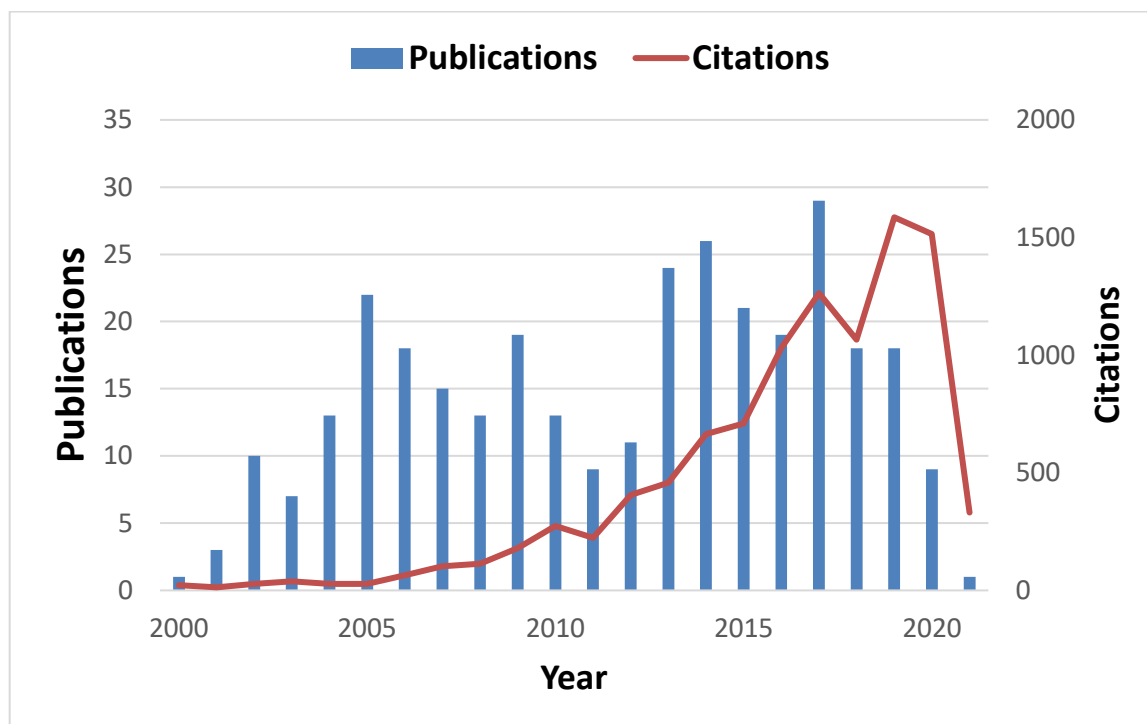
## ۱۱-۲- پیمایش مقالات و اختراعات

در این بخش مقالات منتشر شده طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ میلادی در حوزه مورد نظر با استفاده از پایگاه داده مایکروسافت آکادمیک<sup>۳</sup> [77] مورد بررسی قرار گرفت. این پایگاه داده به این علت انتخاب شد که یک موتور جستجوی وب رایگان برای انتشارات علمی است و در سال ۲۰۱۶ مجدداً راه اندازی شده و از ساختار داده و موتور جستجوی کاملاً جدیدی با استفاده از فناوری‌های جستجوی معنایی (و نه صرفاً مبتنی بر کلمات کلیدی) برخوردار است. به علاوه با جستجوی یک موضوع در این پایگاه داده، می‌توان به طیف وسیعی از اطلاعات شامل سازمان‌ها و مؤسسات مرتبط، پژوهشگران و ... نیز دسترسی پیدا کرد. طبق بررسی انجام شده با استفاده از مایکروسافت آکادمیک، ۷۴۶ عنوان مقاله ژورنالی و ۴۴ عنوان مقاله کنفرانسی در رابطه با توربین فرانسویس در بازه زمانی ذکر شده به چاپ رسیده است.

<sup>1</sup> Michel Cervantes

<sup>2</sup> Christophe Nicolet

<sup>3</sup> Microsoft Academic



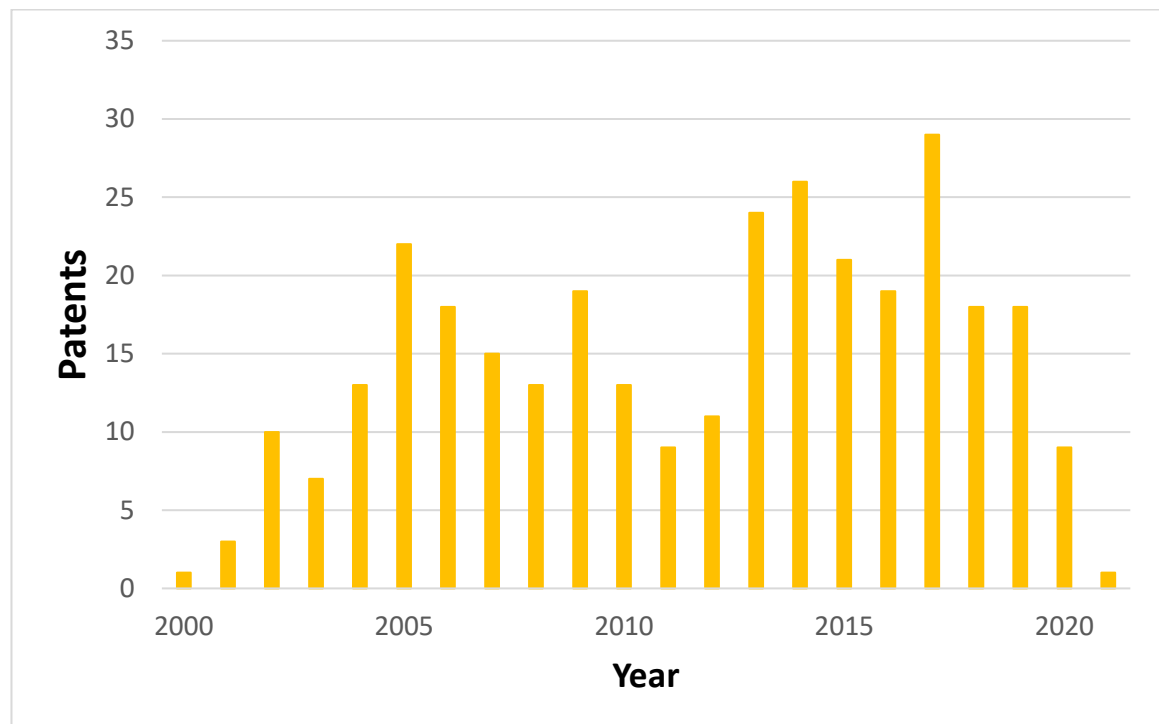
شکل ۲-۱۴: روند تغییرات تعداد انتشارات و تعداد ارجاعات در خصوص توربین فرانسسیس [77]

با استناد به نتایج جستجوی صورت گرفته در مایکروسافت آکادمیک، دسته‌بندی موضوعات فناورانه‌ای که بیشترین تعداد مقالات این حوزه در مورد آن‌ها به چاپ رسیده است به شرح زیر می‌باشد:

- لوله رانش
- گردابه
- کاویتاسیون
- دینامیک سیالات محاسباتی

به منظور پیمایش اختراعات به ثبت رسیده در حوزه توربین فرانسسیس به پایگاه داده پتنت اینسپایریشن<sup>۱</sup> [65] مراجعه شد که دسترسی به برخی از امکانات آن رایگان بوده و اطلاعات مختلفی درباره موضوع جستجو شامل کشورها و شرکت‌های ثبت کننده اختراع، مخترعین، دسته‌بندی موضوعی اختراع و ... ارائه می‌نماید. با استناد به این پایگاه داده، تعداد اختراعات ثبت شده در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ میلادی در خصوص توربین فرانسسیس ۳۱۹ عنوان می‌باشد که در شکل زیر تعداد اختراعات ثبت شده در هر سال مشخص است.

<sup>1</sup> Patent Inspiration



شکل ۲-۱۵: روند تغییرات تعداد اختراعات ثبت شده در هر سال در خصوص توربین فرانسسیس [65]

بر اساس جستجوی صورت گرفته، بیشترین ثبت اختراع در این زمینه به ترتیب مربوط به کشورهای ژاپن، کانادا، آلمان، فرانسه و سوئیس می‌باشد. با استناد به پتنت اینسپایریشن، دسته‌بندی موضوعات فناورانه‌ای که بیشترین تعداد ثبت اختراعات این حوزه در مورد آن‌ها بوده است به شرح زیر می‌باشد:

- کاویتاسیون
- پره‌ها
- ساخت و تولید
- محفظه حلزونی

## ۲-۱۲- زمینه‌های محتمل برای توسعه فناوری توربین آبی فرانسسیس در آینده

با توجه به دسته‌بندی موضوعات فناورانه که در نتیجه پیمایش به عمل آمده در خصوص توربین آبی فرانسسیس در مقالات منتشر شده (بر اساس پایگاه میکروسافت آکادمیک) و اختراعات ثبت شده (بر اساس پایگاه پتنت اینسپایریشن) و نیز شناسایی حوزه‌های فناورانه که در فصل اول این گزارش (با بررسی و تحلیل فناوری‌های در حال رشد) انجام یافت، می‌توان مسائل محتمل آینده در حوزه توربین آبی فرانسسیس را در قالب موارد زیر تجمیع نمود:

- گردابه و جریان در لوله رانش
- پره‌ها

- کاویتاسیون
- محفظه حلزونی
- دینامیک سیالات محاسباتی
- ساخت و تولید

در ادامه این زمینه‌های محتمل برای توسعه فناوری توربین آبی فرانسیس در آینده، تشریح می‌شوند. لازم به ذکر است که به منظور تحلیل وضعیت آینده این موضوعات، سعی بر این بوده که از مقالات مروری معتبر که خود حاصل بررسی و تحلیل مقالات مختلف می‌باشند، استفاده شود. چرا که در این مقالات علاوه بر مرور کلی پژوهش‌های صورت گرفته بر روی هر موضوع، معمولاً مواردی که نیازمند ارتقا و کار بیشتر در آینده دارند نیز مشخص شده است.

## ۱-۱۲-۲- گردابه و جریان در لوله رانش

رفتار جریان چرخشی در کاربردهای مختلف فنی همواره یکی از موضوعات تحقیق بوده است. معمولاً آثار چرخش جریان یا به عنوان نتیجه مطلوب طراحی یا پدیده‌ای غیرقابل اجتناب و عارضه جانبی محسوب می‌شود. با این حال، لوله رانش توربین آبی از یک طرف از چرخش جریان در خروجی چرخ سود می‌برد چرا که جدا شدن جریان در مخروط چرخ کاهش می‌یابد، اما از طرف دیگر ناپایداری جریان در لوله رانش منجر به نوسان فشار می‌گردد.

در لوله رانش با کاهش سرعت جریان، انرژی جنبشی به فشار تبدیل می‌شود. هنگام نوسازی نیروگاه‌های موجود، عمدتاً فقط چرخ و پره‌های هدایت کننده اصلاح شده و به دلیل مسائل اقتصادی و ایمنی، محفظه مارپیچ و لوله رانش به ندرت بازطراحی می‌شوند. حتی اگر این اجزا عملکرد نامطلوبی از خود نشان دهند. با این حال، نصب یک چرخ ارتقا یافته نیازمند پیش‌بینی قابل اطمینانی از جریان در لوله رانش است. این امر منجر به تعریف و اجرای پروژه بررسی جریان در لوله رانش توربین فرانسیس موسوم به پروژه فلیندت<sup>۱</sup> گردید. هدف اصلی این پروژه بررسی جریان در لوله رانش به منظور درک بهتر فیزیک این نوع جریان و نیز جمع‌آوری بانک اطلاعاتی از داده‌های تجربی در محدوده وسیعی از نقاط کاری توربین بود تا به واسطه آن اطلاعات لازم برای ارزیابی نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی لوله رانش ایجاد شود. شبیه‌سازی‌های عددی که پس از پروژه فلیندت انجام شد حاکی از این بود که هنگام طراحی و بهینه‌سازی توربین آبی، می‌بایست از نرسیدن پارامتر چرخش در جریان گردابه‌ای لوله رانش به حد بحرانی اطمینان حاصل نمود. در غیر این صورت فشار در لوله رانش دچار افت ناگهانی شده و راندمان توربین آبی کاهش می‌یابد [78].

## ۲-۱۲-۲- پره‌ها

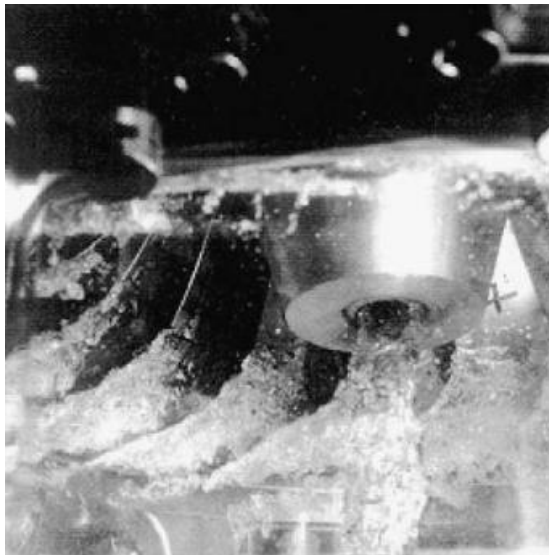
بر اساس داده‌های به دست آمده از دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل اجزای محدود به منظور شناسایی تنش‌های وارده بر روی چرخ و پره‌های توربین فرانسیس مشخص شده است که تنش‌های موجود در لبه انتهایی پره در نزدیکی تاج پره، می‌توانند به وضعیت بحرانی دچار شوند. نواحی پر تنش در حد فاصل بین دو پره و در قسمت بیرونی تاج قرار دارند که سبب ایجاد ترک‌های خستگی در این ناحیه می‌شود [79].

<sup>1</sup> FLOW INVESTIGATION IN A FRANCIS DRAFT TUBE (FLINDT)

### ۳-۱۲-۲- کاویتاسیون

توربین‌های عکس‌العملی از لحاظ ساختاری بسته بوده و تحت فشار متغیر کار می‌کنند. به علاوه این توربین‌ها بیشتر در معرض کاویتاسیون قرار دارند. به طوری که ناحیه‌ای در محدوده عملیاتی این توربین‌ها، به خصوص در مورد توربین فرانسسیس، تحت تأثیر کاویتاسیون قرار گرفته و به عنوان منطقه ممنوع در نظر گرفته می‌شود. مدیریت نیروگاه‌های آبی برای دستیابی به بازده بالاتر توربین‌های آبی در طول عمر کاری آن‌ها یک مسئله مهم است، اما توربین‌ها پس از چند سال کارایی خود را از دست می‌دهند. زیرا به دلایل مختلف آسیب جدی می‌بینند. یکی از دلایل مهم این مسئله، سایش<sup>۱</sup> توربین‌ها در هنگام کاویتاسیون است.

طبق معادله برنولی، اگر سرعت جریان افزایش یابد، فشار کاهش می‌یابد. در حالت مایع، فشار نمی‌تواند از فشار بخار کمتر شود. فشار بخار فشاری است که در آن مایعات در یک درجه حرارت مشخص بخار می‌شوند و بستگی به دما و ارتفاع از سطح دریا دارد. هرگاه فشار در هر قسمت توربین به زیر فشار بخار کاهش یابد، مایع می‌جوشد و تعداد زیادی حباب کوچک بخار تشکیل می‌شود. این حباب‌ها که عمدتاً به دلیل فشار کم تشکیل می‌شوند توسط جریان به مناطق فشار بالاتر منتقل می‌شوند که در آن نواحی بخارات متراکم شده و حباب‌ها ناگهان فرو می‌ریزند. این امر منجر به تشکیل یک حفره شده و مایع اطراف برای پر کردن آن هجوم می‌آورد. جریان مایع از جهات مختلف در مرکز حفره به یکدیگر برخورد کرده و فشار محلی را بسیار بالا می‌برد که اندازه آن ممکن است تا ۷۰۰۰ اتمسفر نیز باشد. تشکیل حفره و فشار زیاد هزاران بار در ثانیه تکرار می‌شود. این امر باعث ایجاد حفره روی سطح فلزی پره‌های چرخ یا لوله رانش می‌شود. پس از آن ماده به دلیل خستگی و یا حتی خوردگی دچار شکست می‌گردد. بعضی از قسمت‌های توربین مانند پره‌های چرخ ممکن است طی این فرآیند کاملاً شکافته شود. این پدیده که خود را به صورت سوراخ شدن سطوح فلزی قطعات توربین نشان می‌دهد به عنوان کاویتاسیون شناخته می‌شود. در شکل ۱۶-۲ انواع کاویتاسیون‌های مشاهده شده در توربین فرانسسیس نشان داده شده است.

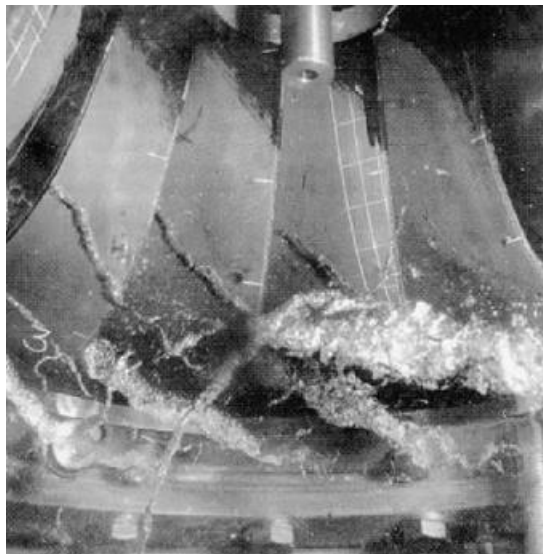


(ب)

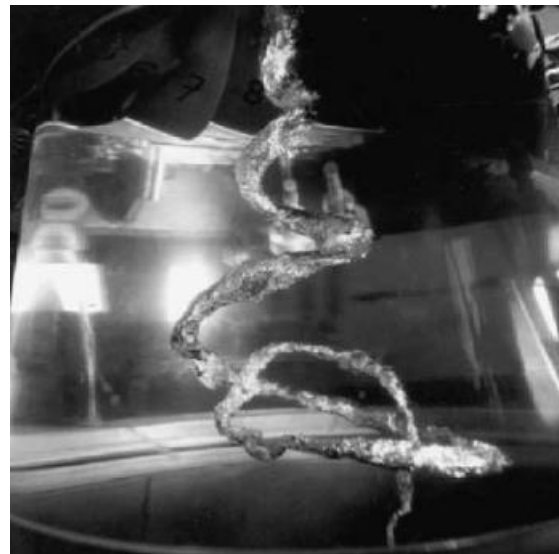


(الف)

<sup>1</sup> Erosion



(د)



(ج)

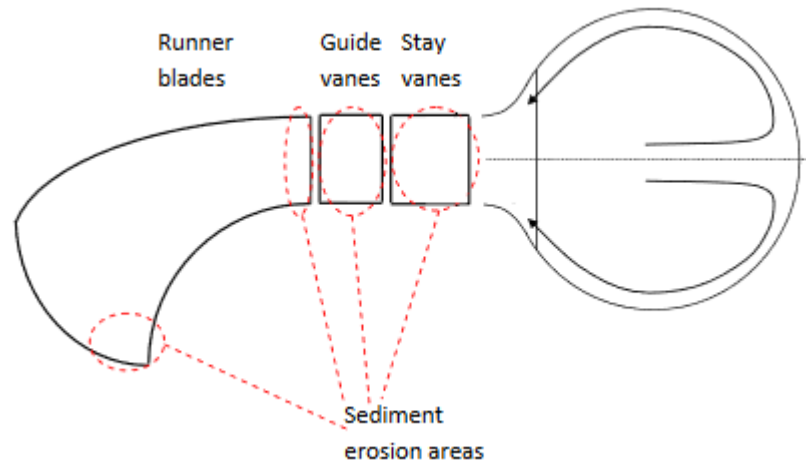
شکل ۲-۱۶: انواع کاویتاسیون در توربین فرانسس (الف) کاویتاسیون روی لبه حمله پره‌ها (ب) کاویتاسیون با حباب‌های در حال جابجایی (ج) کاویتاسیون به صورت جریان چرخشی در لوله رانش (د) کاویتاسیون به صورت گردابه در بین پره‌ها

جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون در توربین‌های آبی دشوار است و نمی‌توان به طور کامل از آن جلوگیری کرد. اما آثار و تبعات اقتصادی آن می‌تواند تا سطح قابل قبولی کاهش یابد. بسیاری از محققان از طریق مطالعات تجربی و تحلیلی، روند کاویتاسیون را در توربین‌های آبی بررسی کرده‌اند. برخی از محققان گزارش کرده‌اند که علی‌رغم تغییرات طراحی در اجزای توربین و استفاده از مواد و پوشش‌های مختلف در پره‌های توربین، پیشرفت در جلوگیری از وقوع کاویتاسیون در بیشتر موارد چندان قابل توجه نیست. بنابراین، مطالعات تجربی و نظری بیشتری برای بررسی تأثیر کاویتاسیون در توربین آبی مورد نیاز است. تجزیه و تحلیل کاویتاسیون در توربین‌های عکس‌العملی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، می‌تواند یک راه حل مقرون به صرفه باشد [80].

#### ۴-۱۲-۲- محفظه حلزونی

هدف از بکارگیری محفظه حلزونی، توزیع جریان به طور مساوی در اطراف چرخ است. بنابراین سطح مقطع این محفظه می‌بایست در پایین دست کاهش یابد. چرا که بخشی از جریان آب با گذر از پره‌های هدایت کننده از محفظه حلزونی خارج می‌شود. محفظه حلزونی از چند بخش، که تعداد آن توسط طراح تعیین می‌شود، ساخته شده است. تعداد زیاد بخش‌ها باعث کاهش بهتر و صحیح جریان از طریق محفظه حلزونی می‌شود اما به دلیل افزایش تعداد اتصالات جوشکاری، ساخت آن نیز گران‌تر است.

در طراحی محفظه حلزونی جلوگیری از ایجاد جریان ثانویه یا کاهش آن بسیار اهمیت دارد. چرا که فرسایش در پره‌های هدایت کننده ثابت ناشی از جریان ثانویه در محفظه حلزونی است که باعث تغییر زاویه جریان می‌گردد. فرسایش در مجاورت پوشش بالا و پایین توربین بیشتر از بقیه نقاط است [81].



شکل ۲-۱۷: محل اصلی وقوع سایش ناشی از رسوب که در اثر جریان ثانویه در محفظه حلزونی (پیکان‌های سمت راست) تشدید می‌شوند.

## ۵-۱۲-۲- دینامیک سیالات محاسباتی

توربین‌های آبی معمولاً برای کار در بهترین نقطه کارایی طراحی می‌شود، اما روند فعلی عملکرد نیروگاه‌ها اجازه نمی‌دهد توربین‌ها به طور انحصاری در آن نقطه کار کنند. لذا توربین‌ها مجبور به کار در شرایط دور از طراحی هستند. در این شرایط، توربین‌های آبی دچار ناپایداری جریان می‌شوند که به طور قابل توجهی بر پایداری دینامیکی آن‌ها اثر منفی می‌گذارد. دینامیک سیالات محاسباتی نقش مهمی در بررسی پیامدهای این امر و بهبود طراحی داشته است.

در یک دهه گذشته، شاهد رشد چشمگیری در استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی بوده‌ایم به طوری که طی این ده سال رویکردهای مختلف مدل‌سازی جریان، مدل‌سازی توربولانس و روش‌های عددی استفاده شده است. این که کدام یک از این رویکردها استفاده شود به میدان جریان، دقت مورد انتظار از نتایج، قدرت محاسباتی و زمان بستگی دارد. در این بین دسترسی به قدرت محاسباتی لازم برای شبیه‌سازی توربین‌های هیدرولیکی همواره چالش اصلی بوده است.

در حال حاضر سه روش برای مدل‌سازی توربین‌های آبی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به کار می‌رود:

- مدل‌سازی کامل توربین: از این روش به منظور مطالعه عملکرد کلی و برهمکنش میان توزیع کننده، چرخ و لوله رانش و نیز ارتقای طراحی استفاده می‌شود.
- مدل‌سازی اجزای توربین: از این مدل‌سازی به منظور بررسی مفاهیم خاصی مانند برهمکنش روتور - استاتور و گردابه در لوله رانش استفاده می‌شود.
- مدل‌سازی مجرای عبور جریان: این روش معمولاً در مطالعه میدان جریان و مدل‌سازی توربولانس و با استفاده از مش‌های ریز به کار می‌رود. مطالعات عددی نشان داده شده است که رویکرد مدل‌سازی مجرای عبور جریان که اخیراً به کار گرفته شده است در مقایسه با مدل‌سازی کامل توربین، سبب بیش از ۵۰ درصد صرفه‌جویی در توان محاسباتی می‌شود. ضمناً تفاوت نتایج به دست آمده از این روش با روش مدل‌سازی کامل توربین بین دو تا پنج درصد است. البته این رقم بسته به شرایط جریان شبیه‌سازی شده ممکن است تغییر کند.

در پنج سال گذشته، مطالعات عددی بسیاری بر روی توربین فرانسیس انجام شده است. در اغلب این شبیه‌سازی‌ها، مش محاسباتی استفاده شده بین ۱ میلیون تا ۵۰ میلیون گره داشته است. اکثر مطالعات عددی انجام شده است با استفاده از رویکرد مدل سازی اجزای توربین (تعداد گره مش محاسباتی کمتر از ۱۰ میلیون) انجام شده است. این رویکرد امکان بررسی دقیق با استفاده از روش‌های DES و LES را فراهم می‌آورد. با این حال، مدل‌سازی عددی توربین‌ها همواره چالش‌های خود در رابطه با انتخاب مدل توربولانس، تعداد مش محاسباتی و شرایط مرزی مناسب دارد. تاکنون تلاش بسیاری برای بهبود نتایج عددی صورت گرفته اما هنوز هم جای کار برای بهبود روش‌های کاربردی دینامیک سیالات محاسباتی و رویکردهای مدل‌سازی توربین وجود دارد. اکثر مطالعات عددی فاقد راستی آزمایی و اعتبار سنجی مناسب هستند. در صورت راستی آزمایی و اعتبارسنجی مناسب، روش‌های عددی می‌توانند راه حل‌های منطقی برای بهبود دقت حل ارائه کنند.

چالش دیگر، مدل‌سازی توربولانس در شرایط عملکرد دور از نقطه طراحی است. چرا که در این شرایط میدان جریان معمولاً ناپایدار است. تنها گزارش تفاوت بین نتایج عددی و تجربی، نیازهای مربوط به طراحی قابل اطمینان توربین و پایداری دینامیکی در تمام محدوده عملکردی آن را برآورده نمی‌کند. روش‌های عددی موجود در نقطه بهترین کارایی به خوبی جواب می‌دهند. به طوری که مدل‌های RANS در این شرایط خطای کمتر از ۵ درصد دارند. اما همان تکنیک‌ها و رویکردها در شرایط دور از طراحی دقت بالایی ندارند. لذا نیاز به بهبود تکنیک‌های مدل‌سازی جریان با در نظر گرفتن توازن میان دقت عددی و توان محاسباتی وجود دارد. انتظار می‌رود که روش‌های عددی بتوانند میدان جریان را با در نظر گرفتن مواردی مانند کاویتاسیون، تراکم‌پذیری آب، گردابه لوله رانش، برهمکنش روتور - استاتور هیدروآکوستیک، پیش‌بینی دامنه فشار گذرا و ارتقای دقت حل کنند.

یک مطالعه عددی باید امکان تجزیه و تحلیل ساختار را چه در حالت پایدار و چه در شرایط گذرا گذرا فراهم آورد. یک مطالعه عددی آینده نگر می‌بایست چالش‌های مرتبط با تغییر در روند کار هیدرولیک توربین‌ها را در نظر بگیرد. تحلیل‌های عددی در آینده می‌بایست شبیه‌سازی گذرا همراه با کوپلینگ دوطرفه را در نظر بگیرد. این امر مطالعه جریان را همراه با رفتار مکانیکی اجزای توربین تسهیل می‌کند. از آن جا که اندازه گیری‌های مکرر روی نمونه‌های اولیه یا مدل توربین مقرون به صرفه نیستند تحلیل‌های کامل دینامیک سیالات محاسباتی ضروری است. بنابراین، یک تجزیه و تحلیل قابل اعتماد مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به توسعه توربین‌های آبی کمک کند [82].

## ۶-۱۲-۲- ساخت و تولید

عمده‌ترین روش‌های تولیدی که برای ساخت توربین‌های آبی استفاده می‌شود شامل ریخته‌گری دقیق، ریخته‌گری، ماشینکاری CNC و آهن‌گری<sup>۱</sup> است. در حال حاضر، بیشتر تولید کنندگان بزرگ توربین در سراسر دنیا از فرایند ماشینکاری CNC برای تولید توربین‌های آبی استفاده می‌کنند. این فرایند شامل فرز CNC، سنگ‌زنی، پرداخت و بالانس استاتیکی و دینامیکی توربین‌ها است. ماشینکاری CNC یا به طور همزمان روی تمام بدنه چرخ انجام می‌شود و یا پره‌ها به صورت مستقل ساخته شده و به همراه سایر اجزای چرخ جوش داده می‌شوند. اجزای باقی مانده مانند محفظه حلزونی، پره‌های هدایت کننده و لوله رانش توسط سایر فرایندهای تولید مانند تراشکاری، آهن‌گری، نورد، خم‌کاری و غیره تولید شده و اتصالات نیز با جوشکاری انجام می‌گردد.

<sup>1</sup> Forging

هزینه ساخت توربین آبی به پارامترهایی مانند ارتفاع ریزش آب و دبی وابسته است. از آنجا که هزینه و اندازه توربین به مشخصات پارامترهای موجود در نیروگاه‌های آبی بستگی دارد تولید این توربین‌ها نیز باید بر اساس این پارامترها انجام شود. لذا هر روش ساخت ممکن را می‌توان در نظر گرفت و پارامترهای مختلف مورد نیاز از جمله پرداخت سطح، هزینه ابزار، هزینه هر توربین و اندازه ساخت را باید با خروجی مورد نظر مقایسه کرد تا بهترین روش ممکن را برای تولید انتخاب نمود. نیروگاه آبی بزرگتر به معنای توربین‌های آبی بزرگتر است. ساخت توربین‌های آبی در اندازه‌های بزرگتر از نظر مقیاس و پیچیدگی برای تولیدکنندگان یک چالش است. تولید توربین‌های آبی با استفاده از فناوری ریخته‌گری می‌تواند گزینه مناسبی تلقی شود. توسعه شبیه‌سازی ریخته‌گری و نیز نمونه‌سازی سریع مهم‌ترین مزیت این فناوری بوده است. البته تولید با این فناوری می‌تواند منجر به نقص‌های مختلفی گردد اما برنامه‌ریزی صحیح فرآیند و شبیه‌سازی رایانه‌ای این فرآیند می‌تواند به بهبود کیفیت محصول کمک کند. با وجود تمام این پیشرفت‌ها، در ساخت توربین‌های آبی با استفاده از فناوری ریخته‌گری می‌بایست در زمینه‌هایی مانند خنک‌کاری کارآمد، طراحی بهینه رایزرها و استفاده از قالب ماسه‌ای بهینه بهبود حاصل شود [83].

## ۱۳-۲- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در فصل قبلی توضیح داده شد، برای شناسایی حوزه‌های محتمل در آینده از موضوعات داغ مرتبط با توربین آبی فرانسیس که در پیمایش مقالات و اختراعات در پایگاه‌های داده مرتبط شناسایی شده استفاده شد. به علاوه، حوزه‌های فناورانه‌ای که هنوز در حال رشد هستند نیز در فصل اول بررسی شده بود که از نتایج این بررسی نیز در شناسایی حوزه‌های محتمل در آینده استفاده گردید. در نهایت پس از شناسایی این حوزه‌ها، با استفاده از مقالات مروری، وضعیت توسعه هر کدام از آن‌ها در بخش ۳-۲ بررسی گردید. در این فصل به منظور جمع‌بندی مطالعات انجام شده در فصل‌های پیشین، خلاصه‌ای از موارد مندرج در گزارش، در قالب حوزه‌های محتمل برای توسعه فناوری توربین آبی در آینده، ذکر شده است.

## ۱۴-۲- حوزه‌های محتمل برای توسعه فناوری توربین آبی در آینده

- فناوری‌های کنترل توربین آبی به منظور گسترش محدوده عملکرد و افزایش پایداری آن؛ هدف از توسعه این فناوری‌ها این است که تغییر در شرایط جریان آب ورودی توربین و تغییرات ناشی از نوسازی توربین، سبب ناپایداری شرایط کارکرد آن و افت کارایی توربین نشود. با توجه به افزایش سهم برق تجدیدپذیر در شبکه آینده که ماهیت متغیر دارد، اهمیت توسعه این فناوری‌ها به منظور افزایش انعطاف‌پذیری توربین‌های آبی بسیار بالا است. این فناوری‌های کنترلی که زمینه توسعه در آینده دارند شامل روش‌های کنترل غیر فعال، روش‌های کنترل فعال، روش‌های کنترل مغناطیسی - رئولوژیکی (شرح داده شده در فصل اول) می‌باشند. بحث دیگر در این حوزه لزوم مطالعات بیشتر بر روی شبیه‌سازی عددی جریان گردابه‌ای در لوله رانش (با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی) به منظور درک بهتر از این ناپایداری است. در این امر اهمیت انجام مطالعات تجربی به منظور جمع‌آوری بانک اطلاعاتی مورد نیاز برای اعتبارسنجی مطالعات عددی نیز بالاست که در فصل سوم در این زمینه به پروژۀ فلیندت اشاره شد.
- فناوری‌های مربوط به کنترل ناپایداری ناشی از برهمکنش سیال و سازه: گسترش محدوده عملکرد و شرایط گذرا در کارکرد توربین آبی در آینده باعث افزایش بارهای خستگی وارده بر چرخ و پره‌ها می‌شود. به همین دلیل مطالعه رفتار دینامیک توربین آبی شامل تنش‌های دینامیک وارده به پره‌ها، جرم هیدرودینامیکی و خواص میرایی (شرح داده شده

در فصل اول) اهمیت زیادی در پژوهش‌های آینده دارد. مجدداً این مطالعات نیز نیازمند مطالعات تجربی پشتیبان جهت اعتبارسنجی نتایج مطالعات عددی است.

- فناوری‌های دیجیتال سازی: همان گونه که در فصل اول اشاره شد، توسعه یک آواتار دیجیتال از توربین آبی زمان پاسخ واحدهای تولید برق یا پمپ - توربین‌ها را کاهش داده و از استانداردهای سخت‌گیرانه ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه‌های برق آبی نیز پشتیبانی می‌کند. به وسیله این آواتار می‌توان انعطاف پذیری در عملکرد واحد را پشتیبانی نمود. به طور مشخص، اثرات شرایط گذرا مانند راه‌اندازی و خاموشی را می‌توان در قالب تنش، خستگی و غیره ارزیابی نمود. ابزارهای پیشرفته‌ای که برای ایجاد آواتار دیجیتال استفاده می‌شوند و لازم است در آینده توسعه یابند شامل تحلیل داده، مدل سازی پیشرفته، تخمین طول عمر، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و پایش وضعیت است.
- فناوری‌های دور متغیر: به منظور تطبیق بیشتر عملکرد توربین آبی با شرایط متغیر جریان ورودی، کنترل دور توربین اهمیت بالایی دارد. برای این کار عمدتاً از دو فناوری ماشین سنکرون با ورودی از کانورتر و ماشین القای با ورودی دوگانه استفاده می‌شود. همان طور که در فصل اول اشاره شد، این فناوری‌های اگر چه بالغ هستند ولی هنوز استفاده از آن‌ها رواج نیافته است. به علاوه در مورد فناوری اول، سیستم عایقکاری نیازمند ارتقا و بهبود است.
- مطالعات مربوط به کاویتاسیون و سایش: از آن جا که کارکرد در شرایط گذرا باعث ایجاد تغییر در شرایط جریان آب ورودی می‌شود. ریسک وقوع پدیده‌هایی مانند کاویتاسیون و سایش که در فصل سوم شرح داده شدند افزایش می‌یابد. در خصوص کاویتاسیون استفاده از مواد و پوشش‌های مختلف در پره‌های توربین چندان مؤثر نبوده است. لذا شبیه سازی عددی و مطالعه آن به منظور پیشگیری از وقوع با استفاده از فناوری‌هایی نظیر کنترل دور متغیر، اهمیت بیشتری دارد. به حداقل رساندن سایش ناشی از رسوبات آب در توربین‌های آبی با استفاده از ارتقای طراحی اجزای توربین به ویژه محفظه حلزونی نیز دارای اهمیت است.
- فناوری‌های دینامیک سیالات محاسباتی: همان طور که در فصل سوم اشاره شد دینامیک سیالات محاسباتی نقش مهمی در بررسی پیامدهای کارکرد توربین در شرایط گذرا و ناپایداری‌های حاصل از آن و بهبود طراحی داشته است. به علاوه دینامیک سیالات محاسباتی یکی از ابزارهای ضروری در تحلیل کارایی همه فناوری‌های ذکر شده است. مدل سازی عددی توربین‌ها همواره چالش‌های خود در رابطه با انتخاب مدل توربولانس، تعداد مش محاسباتی و شرایط مرزی مناسب دارد. تاکنون تلاش بسیاری برای بهبود نتایج عددی صورت گرفته اما هنوز هم جای کار برای بهبود روش‌های کاربردی دینامیک سیالات محاسباتی و رویکردهای مدل سازی توربین وجود دارد. یکی از زمینه‌های بهبود در آینده، مدل سازی توربولانس در شرایط عملکرد دور از نقطه طراحی است. چرا که در این شرایط میدان جریان معمولاً ناپایدار است. تنها گزارش تفاوت بین نتایج عددی و تجربی، نیازهای مربوط به طراحی قابل اطمینان توربین و پایداری دینامیکی در تمام محدوده عملکردی آن را برآورده نمی‌کند.
- فناوری‌های ساخت و تولید: همان طور که در فصل سوم اشاره شد، ساخت توربین‌های آبی در اندازه‌های بزرگ از نظر مقیاس و پیچیدگی برای تولیدکنندگان یک چالش است. تولید توربین‌های آبی با استفاده از فناوری ریخته‌گری می‌تواند گزینه مناسبی تلقی شود. برنامه‌ریزی صحیح فرآیند و شبیه سازی رایانه‌ای این فرآیند می‌تواند به بهبود کیفیت محصول کمک کند. با وجود تمام این پیشرفت‌ها، در ساخت توربین‌های آبی با استفاده از فناوری ریخته‌گری می‌بایست در زمینه‌هایی مانند خنک کاری کارآمد، طراحی بهینه ریزرها و استفاده از قالب ماسه‌ای بهینه، بهبود حاصل شود.

### ۳- مراجع فارسی

- [۱] نوربخش، سید احمد، "توربوماشین‌ها"، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۲] جوکار، طاهره، عصاره، فریده، "جریان انتشار مقالات علمی در کشور ایران طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ بر اساس مدل مارپیچ سه گانه دانشگاه، صنعت و دولت"، پژوهشنامه پردازش و مدیریت اطلاعات. ۱۳۹۲؛ ۲۹ (۲): ۵۰۵-۵۳۳.
- [۳] "آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی، سال ۱۳۹۸"، شرکت مادر تخصصی توانیر، ۱۳۹۸.
- [۴] ذوقی، نیما؛ سیداحمد نوربخش و علیرضا ریاسی، "شبیه سازی پایا و غیر پایای جریان سیال در درفت تیوب توربین آبی"، کنفرانس ملی مهندسی مکانیک ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۲.
- [۵] سنگری، رضا، "ساخت و بهینه سازی توربین آبی فرانسوی"، سومین کنفرانس ملی نوآوری و تحقیق در مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر و مکانیک ایران، تهران، ۱۳۹۶.
- [۶] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، "راهنمای بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌های آبی سدهای بزرگ"، ۱۳۸۹.
- [۷] وصال، محمد، تجریشی، محمدسعید، "اثرات اقتصادی سدسازی در ایران"، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۹۸، ۱۵ (۱): ۲۴۷-۲۵۶.

## ۴- مراجع لاتین

- 
- [1] <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>
- [2] Viollet, P. L. (2017). From the water wheel to turbines and hydroelectricity. Technological evolution and revolutions. *Comptes Rendus Mécanique*, 345(8), 570-580.
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan_turbine)
- [4] <https://www.directindustry.fr/prod/zeco/product-213425-2191225.html>
- [5] <https://www.wkv-ag.com/en/produkte/turbinen-komplettanlagen/turgo-turbines.html>
- [6] [https://www.alibaba.com/product-detail/Blade-Runner-Generator-Hydraulic-Powered-Turbine\\_60812224480.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Blade-Runner-Generator-Hydraulic-Powered-Turbine_60812224480.html)
- [7] <https://www.gthec.cn/francis-turbine/francis-turbine-generator.html>
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan_turbine)
- [9] [https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011\\_0059\\_SCORM\\_MFKGT5050-EN/sco\\_05\\_01.scorm](https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0059_SCORM_MFKGT5050-EN/sco_05_01.scorm)
- [10] [http://www.hydroni.co.uk/images/Water\\_Turbine\\_Chart.png](http://www.hydroni.co.uk/images/Water_Turbine_Chart.png)
- [11] Kaunda, C. S., Kimambo, C. Z., & Nielsen, T. K. (2012). Potential of small-scale hydropower for electricity generation in Sub-Saharan Africa. *ISRN Renewable Energy*, 2012.
- [12] [http://voith.com/corp-en/products-services\\_hydropower-components\\_turbines.html](http://voith.com/corp-en/products-services_hydropower-components_turbines.html)
- [13] Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and “Mode 2” to a Triple Helix of university–industry–government relations. *Research policy*, 29(2), 109-123.
- [14] <https://www.parliran.ir/majles/fa/markaz-pajhohesh-ha>
- [15] <http://www.maslahat.ir>
- [16] <http://isti.ir>
- [17] <https://www.mporg.ir/tasks>
- [18] <https://rc.majlis.ir/fa/law/show/94172>
- [19] <https://www.isna.ir/news/91021608597/>
- [20] <http://www.moe.gov.ir>
- [21] <https://www.doe.ir>
- [22] <http://www.wrm.ir/SC.php?type=static&id=17>
- [23] <https://www.nri.ac.ir/About-the-Institute/Introduction-to-Research/Document-of-future-perspective#3928188-->
- [24] <https://www.wri.ac.ir>
- [25] <http://www.isiri.gov.ir/>
- [26] <https://www.mehrnews.com/news/4001220>

- 
- [27] <https://www.iha.ir>
- [28] <http://www.hydropower.org.ir/>
- [29] <http://www.iwpc.com/st/1>
- [30] <http://www.azarab.ir>
- [31] <http://www.farab.com/fa/>
- [32] <https://www.namabazaar.com/fa/detail/company/22503>
- [33] [http://46.32.2.170/ExternalSites/new/service\\_dam.aspx](http://46.32.2.170/ExternalSites/new/service_dam.aspx)
- [34] <http://www.ghods-niroo.com/Default.aspx>
- [35] <https://ghaltaksazan.com>
- [36] <http://www.khpimc.com/>
- [37] <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydropower>
- [38] <http://www.modirinfo.com>
- [39] <https://barghnews.com>
- [40] [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table\\_8.2.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf)
- [41] <https://www.statista.com/statistics/500872/employment-share-in-large-hydropower-industry-globally-by-country/>
- [42] <http://news.moe.gov.ir/News-List/52066>
- [43] [https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm\\_table\\_grapher.php?t=epmt\\_6\\_07\\_b](https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_07_b)
- [44] <http://irrea.ir>
- [45] <https://www.hamshahrionline.ir>
- [46] <http://www.qudsonline.ir>
- [47] Kougias, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., ... & Theodossiou, N. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109257.
- [48] Tănasă, C., Susan-Resiga, R., Muntean, S., & Bosioc, A. I. (2013). Flow-feedback method for mitigating the vortex rope in decelerated swirling flows. *Journal of fluids engineering*, 135(6).
- [49] Muntean, S., Bosioc, A. I., Szakal, R. A., Vékás, L., & Susan-Resiga, R. F. (2017). Hydrodynamic investigations in a swirl generator using a magneto-rheological brake. In *Materials Design and Applications* (pp. 209-218). Springer, Cham.
- [50] Gish, W. B., Schurz, J. R., Milano, B., & Schleif, F. R. (1981). An adjustable speed synchronous machine for hydroelectric power applications. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5), 2171-2176.
- [51] Kuwabara T. Method and apparatus for controlling variable-speed hydraulic power generating system. United States Patent; 1986. no. 4625125.

- [52] Haraguchi E, Nakagawa H, Kuwabara T, Nohara H, Ono K. Control system for variable-speed hydraulic turbine generator apparatus. United States Patent; 1987. no. 4694189.
- [53] Sakayori T, Kuwabara, Bando A, Ohno Y, Hayashi S, Yokohama I, Ogiwara K. Variable-speed pumped-storage power generating system. United States Patent; 1989. no. 4816696.
- [54] Desingu, K., Selvaraj, R., Chelliah, T. R., & Khare, D. (2019). Effective Utilization of Parallel-Connected Megawatt Three-Level Back-to-Back Power Converters in Variable Speed Pumped Storage Units. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 6414-6426.
- [55] Kuwabara, T., Shibuya, A., Furuta, H., Kita, E., & Mitsushashi, K. (1996). Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawachi power station. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(2), 376-384.
- [56] Fujihara, T., Imano, H., & Oshima, K. (1998). Development of pump turbine for seawater pumped-storage power plant. *Hitachi Review*, 47(5), 199-202.
- [57] Nagura, O., Higuchi, M., Tani, K., & Oyake, T. (2010). Hitachi's adjustable-speed pumped-storage system contributing to prevention of global warming. *Hitachi Review*, 59(3), 99-105.
- [58] Koritarov, V., Veselka, T. D., Gasper, J., Bethke, B. M., Botterud, A., Wang, J., ... & Gevorgian, V. (2014). Modeling and analysis of value of advanced pumped storage hydropower in the United States (No. ANL/DIS-14/7). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [59] Wang, D., Zhang, L., Yang, B., Li, G., Tao, Y., Fu, J., ... & Ji, L. (2012, January). Developing and simulation research of the control model and control strategy of static frequency converter. In *2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application* (pp. 1032-1035). IEEE.
- [60] Beyer, T. (2007). Goldisthal pumped-storage plant: more than power production. *Hydro Review Worldwide*, 15(1).
- [61] Hildinger, T., Ködding, L., Eilebrecht, P., Kunz, A., & Henning, H. (2018). Frades II—europe's largest and most powerful doubly-fed induction machine. A step ahead in variable speed machines. *Proc. HYDROVISION international*, charlotte, North Carolina, 26-28.
- [62] Foust, J., Hecker, G., Li, S., & Allen, G. (2011). Fish-Friendly Hydropower Turbine Development & Deployment: Alden Turbine Preliminary Engineering and Model Testing (No. DOEGO18167-1). Electric Power Research Institute.
- [63] Hogan, T. W., Cada, G. F., & Amaral, S. V. (2014). The status of environmentally enhanced hydropower turbines. *Fisheries*, 39(4), 164-172.
- [64] <https://www.wfmj.com>
- [65] <https://www.patentinspiration.com>
- [66] <https://www.toshiba-energy.com/en/renewable-energy/product>

- [67] <https://www.ge.com/renewableenergy/hydro-power/large-hydropower-solutions/hydro-turbines/francis-turbine>
- [68] [http://en.harbin-electric.com/cp\\_2.php](http://en.harbin-electric.com/cp_2.php)
- [69] <https://voith.com/at-en/turbines-generators/turbines/francis-turbines.html>
- [70] <https://www.andritz.com/products-en/group/products/turbines-hydropower>
- [71] <https://www.nrel.gov/water/hydropower-research.html>
- [72] <https://www.ntnu.edu/hydrocen/about-hydrocen1>
- [73] <https://www.ntnu.edu/hydrocen/turbine-and-generators>
- [74] [http://www.iwhr.com/IWHR-English/AI/Introduction/A580503index\\_1.htm](http://www.iwhr.com/IWHR-English/AI/Introduction/A580503index_1.htm)
- [75] <https://www.iitr.ac.in/departments/HRE/pages/Home.html>
- [76] <https://www.epfl.ch/schools/sti/ateliers/ptmh/>
- [77] <https://academic.microsoft.com/home>
- [78] Susan-Resiga, R., Dan Ciocan, G., Anton, I., & Avellan, F. (2006). Analysis of the swirling flow downstream a Francis turbine runner.
- [79] Saeed, R. A., Galybin, A. N., & Popov, V. (2010). Modelling of flow-induced stresses in a Francis turbine runner. *Advances in Engineering Software*, 41(12), 1245-1255.
- [80] Kumar, P., & Saini, R. P. (2010). Study of cavitation in hydro turbines—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 374-383.
- [81] Gjørøster, K. (2011). Hydraulic design of Francis turbine exposed to sediment erosion (Master's thesis, Institutt for energi-og prosessteknikk).
- [82] Trivedi, C., Cervantes, M. J., & Gunnar Dahlhaug, O. (2016). Numerical techniques applied to hydraulic turbines: A perspective review. *Applied Mechanics Reviews*, 68(1).
- [83] Kafle, A., Shrestha, P. L., Chitrakar, S., Thapa, B., Thapa, B. S., & Sharma, N. (2020, August). A review on casting technology with the prospects on its application for hydro turbines. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1608, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.