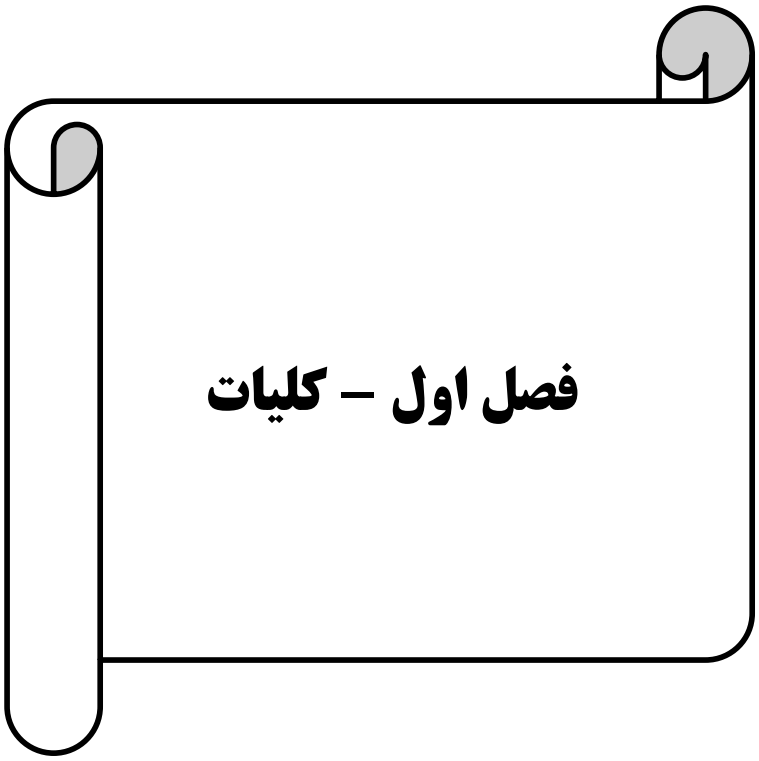
A-PDF Watermark DEMO: Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark



فصل اول – کلیات

http://www.mohandes-iran.com

در این فصل ابتدا تاریخچهٔ مختصری از پیدایش توربینها بیان می شود. در ادامه ماشینهای صنعتی به دو دستهٔ کلی ماشینهای ثابت و دوار تقسیم می شوند که علیرغم تفاوتهای جزیی دارای خصوصیات کلی مشترکی هستند. سپس در بین این ماشینها توربینها به عنوان ردهٔ خاصی از ماشینهای دوار مورد ارزیابی کلی قرار می گیرند و در انتها توربینهای فاز گاز که بیشترین کاربرد را در صنایع سنگین و نیمه سنگین دارند، به عنوان ماشین مبنای این بحث مورد توجه قرار می گیرند.

مقدمه و تاریخچه

پس از آنکه انسان موفق به ساختن ابزار و استفاده از آنها شد، به این فکر افتاد تا از نیروهای موجود در طبیعت نیز استفاده کند. این نیروهای طبیعی عمدتاً شامل نیروی حرکتی (انرژی جنبشی[1]) باد و آب رودخانه‌ها بود که تا به امروز هم مورد توجه بوده‌اند. بسیاری از آسیابهای آبی و بادی، که امروزه به عنوان مکانهای دیدنی و تاریخی حفظ شده‌اند، نشان از توانمندی بشر در استفاده از منابع طبیعی انرژی در طول تاریخ دارد. همچنین کشتیهای بادبانی

[1] - Kinetic Energy

http://www.mohandes-iran.com

هم نمونهٔ دیگری هستند که قایقهای تفریحی و تختههای موجسواری بادبان‌دار امروزی در مسابقات ورزشی بر اساس آنها طراحی و ساخته می‌شوند.

باید توجه داشت که آسیابهای آبی و بادی اولیه بر اساس محاسبات مهندسی و مکانیکی ساخته نشدند، بلکه حس فیزیکی و مشاهدات بشر و همچنین الهام گرفتن از طبیعت او را در جهت ساختن چنین دستگاههایی راهنمایی می‌کرد. اما با گذشت زمان و آشنایی انسان با علوم مختلف از جمله فیزیک، شاخهٔ مهندسی علم فیزیک با نام مهندسی مکانیک بوجود آمد که رویکرد جدیدی به طراحی و ساخت آسیابهای آبی و بادی داشت. امروزه با پیدایش چنین شاخه-هایی از علوم می‌دانیم که یک آسیاب در حقیقت ماشینی ساختهٔ بشر است که انرژی جنبشی یک سیال متحرک را به انرژی مکانیکی روی یک محور دوران تبدیل می‌کند.

با پیشرفت علم بشر و تدوین قوانین فیزیکی و شیمیایی، و نیز کسب تجربیات بیشتر از طریق آزمایشهای مختلف، مهندسین پی به انرژیهای نهفته در دل ذرات مادی بردند که البته به صورت طبیعی قابل استفاده نبودند. انرژی نهفته شده در سوختهای فسیلی و انرژی اتمی از جمله انرژیهایی هستند که انسان آنها را شناخته ولی برای استفاده از آنها نیاز به ساختن تجهیزات مناسبی دارد. یکی از این دستگاهها که تنها جزیی از مجموعهٔ بزرگ مورد نیاز است، توربین[1] می-باشد که برای معرفی و درک بهتر این ماشینها و اصول اساسی ساختمان و عملکرد آنها مطالب آتی ارائه می‌شوند.

دسته بندی ماشین آلات صنعتی

علم فیزیک و شاخهٔ کاربردی آن به نام مهندسی بر اساس قوانین خاصی از جمله قوانین بقایی[2] استوار است. شکل کلی یک قانون بقایی بیان می‌کند که در یک محدودهٔ فرضی از فضا (حجم معیار[3]) که ممکن است توسط مرزهای فیزیکی یک جسم (یک دستگاه) مشخص شود، نرخ

[1] - Turbine
[2] - Conservation laws
[3] - Control Volume

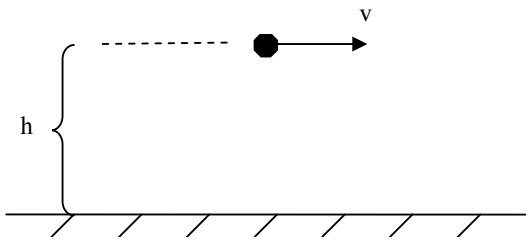
http://www.mohandes-iran.com

تغییرات هر کمیت فیزیکی درون این حجم با اختلاف مقادیر ورودی و خروجی همان کمیت در واحد زمان به درون و بیرون آن حجم برابر است:

نرخ تغییر کمیت فیزیکی درون حجم معیار=

نرخ خروج کمیت فیزیکی از حجم معیار – نرخ ورود کمیت فیزیکی به درون حجم معیار

قوانین بقایی شامل قانون بقای جرم[۱]، قانون بقای اندازهٔ حرکت[۲]، و قانون بقای انرژی[۳] هستند، که از بین آنها قانون بقای انرژی زیربنای اختراعات صنعتی بشر را تشکیل می‌دهد. لذا بهتر است که در ابتدا این قانون را یادآوری کنیم؛ مجموع انرژیها در جهان تغییر نمی‌کند، بلکه ممکن است انرژیها از صورتی به صورت دیگر تبدیل شوند. یک جرم مادی ممکن است صورتهای مختلفی از انرژی را داشته باشد، مثلاً یک جسم متحرک در یک ارتفاع معین نسبت به یک سطح مرجع در میدان جاذبه، شکل ۱، به صورت ظاهری دارای انرژیهای پتانسیل (mgh)، و جنبشی ($mv^2/2$) است.



شکل ۱. جسم متحرک با ارتفاع نسبت به یک سطح مرجع

همانطور که در عبارت بیان قانون بقای انرژی دیده می‌شود انرژی ممکن است از صورتی به صورت دیگر تبدیل شود. این تبدیل همیشه امکان‌پذیر نیست و برای انجام آن شرایطی را باید فراهم کرد. بسیاری از انرژیهای موجود در طبیعت به شکل حاضر آنها قابل استفاده نیستند. به عنوان مثال ممکن است که انرژی جنبشی یک کیلوگرم آب و یک کیلوگرم بنزین با هم برابر

[1] - Conservation of Mass
[2] - conservation of Momentum
[3] - Conservation of Energy

http://www.mohandes-iran.com

باشند، اما می‌دانیم که انرژی شیمیایی نهفته شده در یک کیلوگرم بنزین به مراتب از انرژی شیمیایی یک کیلوگرم آب و حتی انرژی جنبشی آن بیشتر است، ولی تا این انرژی در یک دستگاه به نام موتور احتراقی به ترتیب به انرژیهای حرارتی و مکانیکی تبدیل نشود، استفاده از آن ممکن نیست. با توجه به این توضیحات یک ماشین را می‌توان تعریف کرد؛ ماشین دستگاهی است که تمام یا قسمتی از یک صورت انرژی را به صورت یا صورتهای دیگری از انرژی تبدیل می‌کند. البته تنها یک صورت از انرژیهای مبدل شده مطلوب و مورد نظر استفاده کننده از ماشین است. به همین دلیل در کاربرد یک ماشین از مفهوم راندمان[1] استفاده می‌شود که میزان تبدیل انرژی مطلوب نسبت به انرژی مصرف شدهٔ اولیه را نشان می‌دهد.

ماشین‌آلات صنعتی را از دیدگاههای مختلف می‌توان دسته‌بندی کرد. به طور معمول بر اساس متحرک یا ساکن بودن ماشین، آنها را به دو دستهٔ ماشینهای متحرک و ماشینهای ثابت تقسیم می‌کنند. چون ماشینهای متحرک حرکت خود را از یک محور دوران کسب می‌کنند به آنها ماشینهای دوار نیز می‌گویند. دستگاههایی مانند مبدلهای حرارتی، برجها، مخازن، واتصالات از دستهٔ ماشین‌آلات ثابت هستند و دستگاههایی مانند پمپها، کمپرسورها، و توربینها معروفترین و البته مهمترین ماشینهای دوار به حساب می‌آیند.

مشخصهٔ ماشینهای دوار داشتن یک محور دوران است که روی این محور گشتاور مکانیکی با سرعت دورانی خاصی تولید یا مصرف می‌شود. لذا بر حسب اینکه ماشینهای دوار این انرژی مکانیکی را تولید یا مصرف کنند، آنها را به ترتیب ماشینهای دوار تولید کنندهٔ توان مکانیکی و ماشینهای دوار مصرف کنندهٔ توان مکانیکی می‌نامند. به این ترتیب توربین و الکتروموتور ماشینهای دوار تولید کنندهٔ توان مکانیکی و کمپرسور و پمپ ماشینهای دوار مصرف کنندهٔ توان مکانیکی هستند. نکتهٔ قابل توجه در مورد این دو دسته از ماشینهای دوار این است که همیشه یک تولید کننده و یک مصرف کنندهٔ توان مکانیکی با هم درگیر هستند، چرا که تا تولید کننده‌ای نباشد مصرف کننده کار نمی‌کند. مثلاً یک پمپ با یک الکتروموتور (یا هر محرک دیگری که

[1] - Efficiency

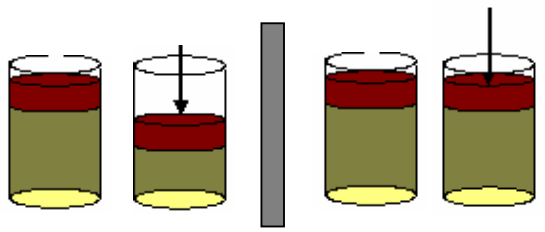
http://www.mohandes-iran.com

تولید کنندهٔ توان مکانیکی است) می‌چرخد. لذا این دو دسته ماشینهای دوار همیشه با هم وجود دارند و منظور از راه‌اندازی[1] یک ماشین دوار در حقیقت راه‌اندازی مولد توان مکانیکی آن مجموعه است.

با توجه به دسته‌بندی فوق در این متن به بررسی اصول اساسی یک ماشین مولد توان مکانیکی با نام توربین پرداخته خواهد شد. در ابتدا انواع توربینها به صورت اجمالی در صنعت معرفی خواهند شد و سپس جزییات نوع خاصی از توربینها که در صنایع نفت و پتروشیمی از آنها به وفور استفاده می‌شود، بررسی و معرفی خواهند شد.

دسته بندی فازی توربینها

در بسیاری از ماشینهای دوار مثل توربینها، پمپها و کمپرسورها یک سیال از درون ماشین عبور می‌کند. اصولاً سیال به دو شکل فازی از ماده اطلاق می‌شود؛ فاز مایع و فاز گاز. در کاربردهای صنعتی مایعات را سیالات تراکم‌ناپذیر و گازها را سیالات تراکم‌پذیر در نظر می‌گیرند. یک سیال را زمانی تراکم‌پذیر می‌گویند که در اثر اعمال فشار به حجم محدودی از آن، کاهش حجم پیدا کند و در نتیجه چگالی[2] آن افزایش یابد. لذا اگر در یک فرایند فشار اعمال شده بر یک سیال تراکم‌پذیر زیاد تغییر نکند، در آن محدودهٔ فشار از تغییر حجم و چگالی سیال می‌توان صرفنظر کرد. شکل ۲ به صورت شماتیک رفتار دو سیال تراکم‌ناپذیر و تراکم‌پذیر را تحت تأثیر اعمال فشار نشان می‌دهد.



شکل ۲. رفتار سیال تراکم‌پذیر (سمت چپ) و سیال تراکم‌ناپذیر (سمت راست) در مقابل اعمال فشار

[1] - Start-up
[2] - Density

http://www.mohandes-iran.com

از نظر نوع سیالی که از درون توربین می‌گذرد توربینها به دو نوع توربینهای فاز مایع و توربینهای فاز گاز تقسیم می‌شوند. توربینهای فاز مایع در تأسیسات نیروگاههای آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به علت حجم وسیع تأسیسات و آب مورد نیاز، از این توربینها در مجتمعهای پتروشیمی و شبیه به آن استفاده نمی‌شود، اما صرفاً جهت آشنایی با آنها فقط به ذکر نام آنها اکتفا می‌شود، که به صورت خلاصهٔ در ذیل آورده شده است:

انواع توربینهای آبی
- توربین ضربه‌ای[1] (چرخ پلتون[2])
- توربین عکس‌العملی[4]
  - توربین فرانسیس[3] (شعاعی)
  - توربین کاپلان[5] (محوری)

توربینهای فاز گاز نیز بر حسب نوع گازی که از آنها عبور می‌کند به سه دسته تقسیم می‌شوند که به صورت خلاصه در ذیل معرفی شده‌اند:

انواع توربینهای فاز گاز
- توربینهای بخار[6]
- توربینهای گازی[7]
- توربینهای بادی[8]

[1] - Impulse Turbine
[2] - Pelton Wheel
[3] - Francis turbine
[4] - Reaction turbine
[5] - Kaplan Turbine
[6] - Steam Turbine
[7] - Gas Turbine
[8] - Wind Turbine

http://www.mohandes-iran.com

در صنایع پتروشیمی از دو نوع توربینهای بخار و توربینهای گازی استفاده می‌شود. بنابراین در این متن از توضیحات بیشتر در مورد توربینهای دیگر اجتناب می‌شود. خوانندگان علاقه‌مند جهت کسب اطلاعات بیشتر می‌توانند به مراجع معرفی شده در انتهای این متن مراجعه کنند.

پرسشهای خودآزمایی فصل اول

۱- قانون بقای یک کمیت فیزیکی عبوری از یک حجم معیار را بیان کنید.

۲- ماشین را از دیدگاه انرژی تعریف کنید.

۳- ماشینهای صنعتی را از دیدگاه حرکتی دسته بندی کرده و در هر مورد مثالهایی ذکر کنید.

٤- ماشینهای دوار را از دیدگاه توان مکانیکی دسته بندی کرده و در هر مورد مثالهایی ذکر کنید.

۵- آیا ماشینهای سؤال ٤ مستقل از هم کار می کنند؟ چرا؟

۶- سیال تراکم پذیر و تراکم ناپذیر را تعریف کنید.

۷- توربینهای آبی کدامند؟

۸- توربینهای فاز گاز کدامند؟ کدام یک از آنها بیشترین کاربرد را در صنایع دارند؟

http://www.mohandes-iran.com

فصل دوم – اصول ترمودینامیکی

http://www.mohandes-iran.com

در این فصل مبانی ترمودینامیکی[1] لازم برای مطالعهٔ توربینهای گازی و بخار به ساده ترین شکل ممکن معرفی می شوند. سیکلهای ترمودینامیکی، جریان درون مجراها و اصول انتقال نیرو به یک جسم در اثر برخورد یا عبور جریان مواردی هستند که در این فصل مورد بررسی قرار می گیرند.

سیکلهای توربین بخار و توربین گاز

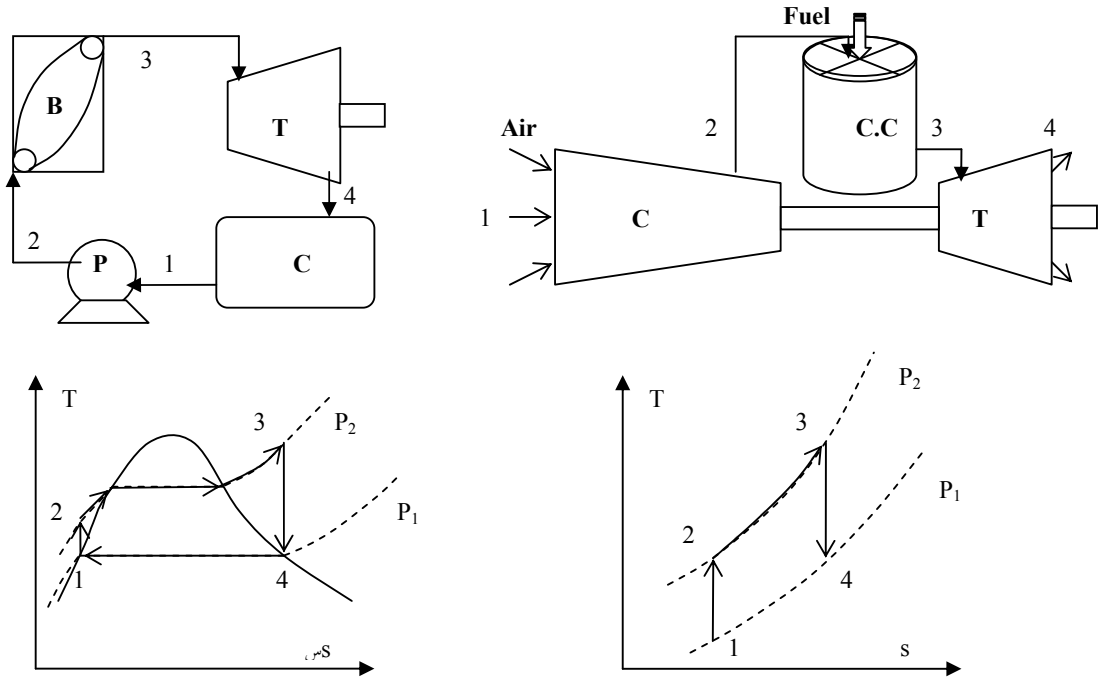
هرچند از نظر عملکرد و برخی خصوصیات ظاهری توربینهای بخار و توربینهای گازی با هم تفاوتهای اندکی دارند، اما اصول اساسی آنها کاملاً به هم شباهت دارد. بنابراین بررسی و معرفی توربینهای بخار به خوبی خصوصیات اساسی توربینهای گازی را هم بیان می‌کند. برای درک بهتر این شباهتها و مقایسهٔ دو نوع توربین فوق، باید سیکلهای استانداردی که این دو نوع توربین در آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند بررسی شوند. از توربین بخار در سیکل استاندارد رانکین[2]، و از توربین گازی در سیکل استاندارد برایتون[3] استفاده می‌شود. این دو سیکل به صورت

[1] - Principles of Thermodynamics
[2] - Standard Rankine Cycle
[3] - Standard Bryton cycle

http://www.mohandes-iran.com

دستگاهی و بر حسب فرآیندهای ترمودینامیکی در نمودار دما بر حسب انتروپی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

سیکلهای توربین بخار و توربین گازی را از چند جهت با هم می‌توان مقایسه کرد. در اینجا فقط تفاوتها و شباهتهای مهم این دو سیکل بررسی می‌شوند. از نظر دستگاهی یک تناظر یک به یک بین تجهیزات این دو سیکل وجود دارد؛ پمپ متناظر با کمپرسور، بویلر[1] متناظر با محفظهٔ احتراق[2]، و توربین متناظر با توربین. چون سیکل توربین گازی یک سیکل بسته نیست متناظر با کندانسور[3] در سیکل توربین بخار دستگاهی در سیکل توربین گازی نداریم، زیرا هوا به مقدار زیادی در دسترس بوده و نیازی به بازگرداندن آن به چرخهٔ توربین گازی نیست.

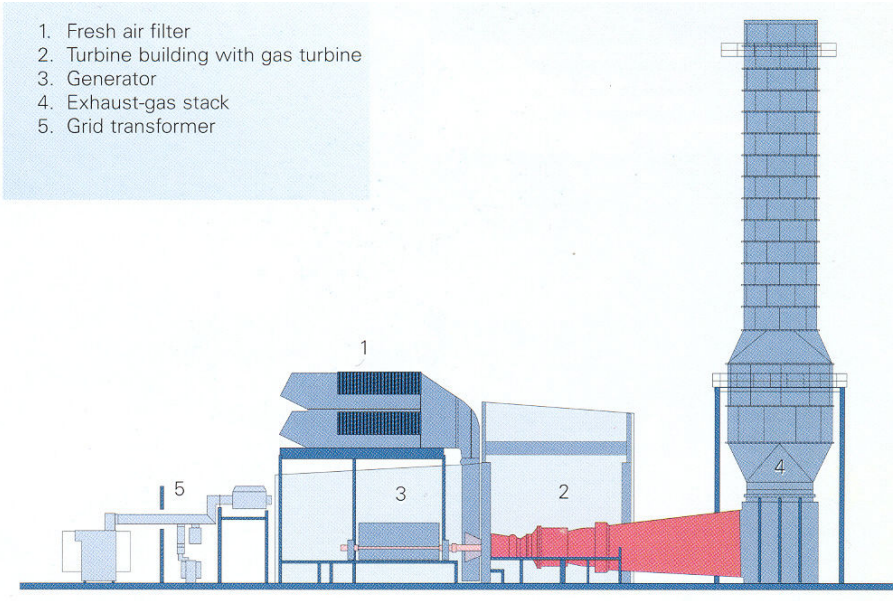


شکل ۳. سیکل رانکین (سمت چپ) و سیکل برایتون (سمت راست)

[1] - Boiler
[2] - Combustion Chamber
[3] - Condenser

http://www.mohandes-iran.com

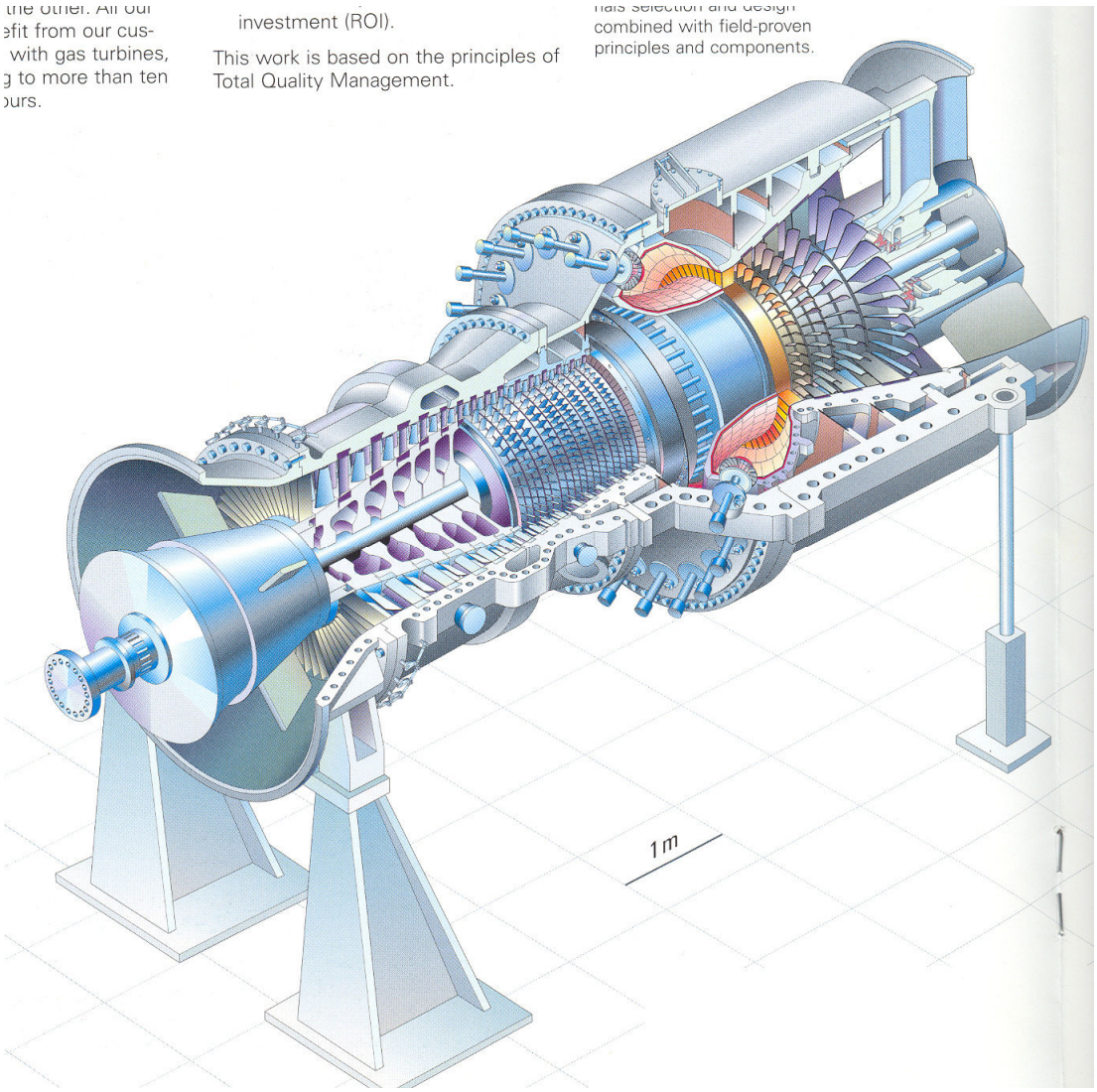
همانطور که در نمودار T-s دیده می‌شود فرایندهای سیکل توربین بخار در دو فاز مایع و گاز اتفاق می‌افتند، در حالیکه فرایندهای سیکل توربین گازی فقط در فاز گاز انجام می‌شوند. عمل افزایش فشار در فاز مایع این توانایی را به سیکل توربین بخار می‌دهد که بتواند انرژی حرارتی بیشتری را در سیال عامل سیکل ذخیره کند، زیرا امکان افزایش فشار در فاز مایع به مراتب بیشتر از فاز گاز تراکم‌پذیر است. با توجه به اینکه توان مکانیکی تولیدی سیکل به مقدار انرژی حرارتی ذخیره شده در سیال عامل وابسته است ظرفیت سیکل توربین بخار از مقدار متناظر در سیکل توربین گازی بیشتر است. اما مجموعه تجهیزات سیکل توربین بخار از مجموعهٔ متناظر در سیکل توربین گازی بیشتر است و به همین دلیل راه‌اندازی سیکل توربین بخار طولانی‌تر و دشوارتر از سیکل توربین گازی است. به عنوان مثال راه‌اندازی یک واحد از نیروگاه بخار با ظرفیت ۲۵۰ مگاوات حدود ده ساعت طول می‌کشد، در حالیکه راه‌اندازی یک واحد نیروگاه گازی با ظرفیت ۷۰ مگاوات حدود چهل و پنج دقیقه تا یک ساعت زمان نیاز دارد.



شکل ۴. نمای جانبی تجهیزات سیکل توربین گازی

http://www.mohandes-iran.com

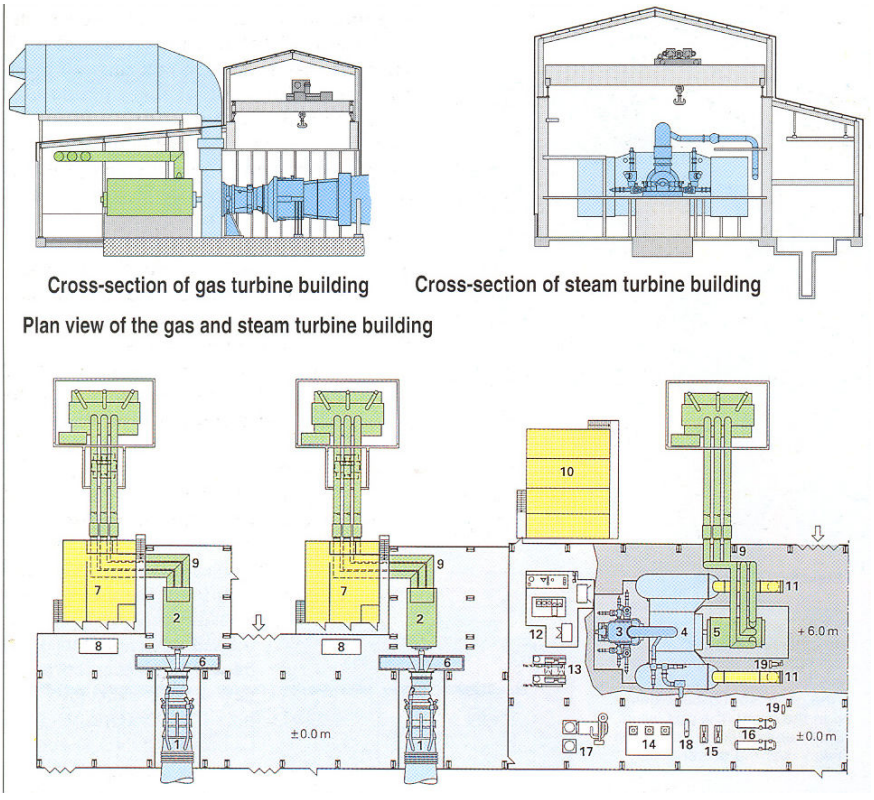
شکل ٤ نمای یک سیکل توربین گازی را نشان می‌دهد. شکل ٥ نیز نمای برش خوردهٔ یک توربین گازی را نشان می‌دهد که قسمتهای مختلف درون این سیکل از روی این شکل مشخص می‌شوند. شکل ٦ نمای یک سیکل ترکیبی را که ترکیب دو سیکل توربین بخار و توربین گازی است نشان می‌دهد. این سیکل ترکیبی از دو سیکل توربین گازی و یک سیکل توربین بخار تشکیل شده است.



شکل ٥. نمای برش خوردهٔ توربین گازی، شامل کمپرسور، محفظهٔ احتراق، و توربین

http://www.mohandes-iran.com

علیرغم تمام این تفاوتها اصول اساسی عملکرد توربین هر دو سیکل یکی است. از طرفی حداکثر فشار در سیکل توربین بخار معمولاً بیشتر از این مقدار در سیکل توربین گازی است، و لذا در یک توربین بخار بزرگ همهٔ انواع توربینها از نظر فشار عملکرد آنها، که در ادامه معرفی می‌شوند وجود دارد. در حقیقت به علت پایین بودن فشار عملکرد توربین گازی نسبت به توربین بخار، توربینهای سیکل توربین گازی زیرمجموعه‌ای از انواع توربینهای موجود در سیکل توربین بخار هستند. به همین دلیل در ادامهٔ متن فقط توربینهای بخار بررسی می‌شوند. برای این کار مفاهیم مقدماتی در رابطه با جریان درون مجراها و اصول ضربه و عکس‌العمل تشریح می‌شوند.



شکل ۶. نماهای جانبی و فوقانی یک سیکل ترکیبی، دو واحد توربین گازی سمت چپ و یک واحد توربین بخار سمت

http://www.mohandes-iran.com

جریان درون مجراها

یکی از قسمتهای مهم در ماشینهای دوار که در آنها تغییرات فشار سیال اتفاق می‌افتد، مجراها هستند که بر حسب تغییری که در فشار سیال ایجاد می‌کنند نام‌گذاری می‌شوند. برای درک بهتر و استناد به مشاهدات فیزیکی جریان سیالی را از درون یک مجرای افقی بدون اصطکاک، و از نظر تبادل حرارت کاملاً ایزوله در نظر می‌گیریم. شکل مجراهای مورد نظر در جدول ۱ مشخص شده‌اند. قوانین فیزیکی حاکم بر این جریان عبارتند از: قانون بقای جرم، و قانون بقای انرژی، که بین مقاطع ورودی و خروجی مجرا برقرار هستند و در جدول ۱ شکل کلی آنها در سطر اول نوشته شده است (توجه داشته باشید که تغییر انرژی پتانسیل در نظر گرفته نشده است). اگر جریان عبوری از مجرا مادون صوت باشد تغییرات کیفی در خواص فیزیکی سیال از جمله فشار و سرعت، شبیه به جریان سیال تراکم‌ناپذیر است (در توربینها جریانهای بخار یا گاز معمولاً مادون صوت طراحی می‌شوند). با این فرض اگر جریان از یک مقطع بزرگتر به سمت یک مقطع کوچکتر برقرار باشد قانون بقای جرم ایجاب می‌کند که سرعت سیال افزایش یابد. آنگاه قانون بقای انرژی در این حالت ایجاب می‌کند که انتالپی[1] سیال که معیاری از مجموع انرژی داخلی و فشار سیال است، کاهش یابد. لذا کاهش انتالپی سیال به کاهش فشار و انرژی داخلی سیال منتهی می‌شود.

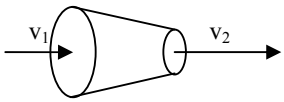
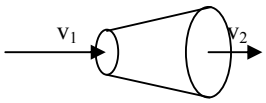
از آنجا که در یک سیال تراکم‌ناپذیر مثل آب انرژی داخلی فقط تابع دما است، کاهش انتالپی جریان از درون مجرای همگرا فقط باعث کاهش فشار سیال شده و دمای آن تغییر نمی‌کند. چنین مجرایی را شیپوره[2] می‌نامند. در صورتی که جریان از یک مقطع کوچکتر به سمت یک مقطع بزرگتر برقرار باشد، تغییرات فوق به صورت عکس اتفاق می‌افتند و مجرا با چنین خصوصیتی پخش کننده[3] نامیده می‌شود. بنابراین یک شیپوره در حقیقت ماشینی است که انرژی نهفته شده در یک سیال را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند، به شرط اینکه فشار سیال در ورودی آن بالا باشد. شرط بالا بودن فشار در ورودی شیپوره نسبت به خروجی آن یک شرط اساسی

[1] - Enthalpy
[2] - Nozzle
[3] - Diffuser

http://www.mohandes-iran.com

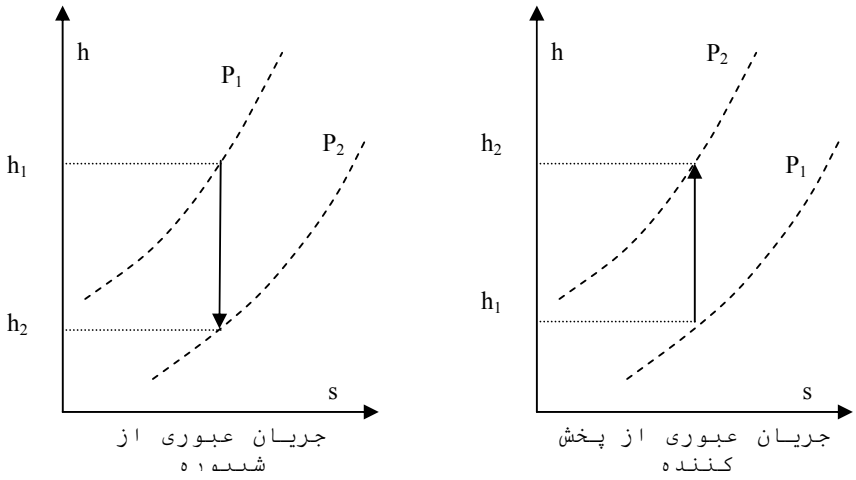
است و به همین علت در هر دو سیکل توربین که در قسمت قبل بررسی شدند یک دستگاه فشارنده وجود دارد. تغییرات خواص فیزیکی سیال در عبور از این دو مجرا در نمودار مولیر[1]، که نمودار انتالپی بر حسب انتروپی است (h-s)، در شکل ۷ مشخص شده است.

جدول ۱. تغییرات ترمودینامیکی و فیزیکی سیال در عبور از مجرا های مختلف

شکل مجرا	نام مجرا	قانون بقای جرم $(\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2)$	قانون بقای انرژی $(h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2})$
	شیپوره	نتیجه اینکه: $V_1 \langle V_2$	نتیجه اینکه: $h_1 \rangle h_2$ $\Rightarrow p_1 \rangle p_2$
	پخش کننده	نتیجه اینکه: $V_1 \rangle V_2$	نتیجه اینکه: $h_1 \langle h_2$ $\Rightarrow p_1 \langle p_2$

[1] - Mollier Diagram

http://www.mohandes-iran.com



شکل ۷. تغییرات فشار و انتالپی جریان عبوری از مجرا در نمودار مولیر

اصول ضربه و عکس‌العمل

توان مکانیکی تولید شده توسط توربین به صورت گشتاور مکانیکی روی محور آن مورد استفادهٔ هر مصرف کننده‌ای قرار می‌گیرد. این گشتاور از طریق اعمال نیرو توسط جریان سیال به پره‌هایی که روی محور نصب شده‌اند بوجود می‌آید. انسان از دیرباز بر اساس تجربیات خود از سرعت یک جرم مادی که دارای اندازهٔ حرکت است، برای اعمال نیرو به یک جسم دیگر استفاده کرده است. در اصطلاح برخورد جسم متحرک به جسم ساکن ضربه‌ای به آن وارد می‌کند که نیروی ناشی از ضربه باعث حرکت کردن جسم ساکن می‌شود.

برای درک بهتر مطلب شکل ۸ (سمت چپ) را در نظر بگیرید. این شکل یک مخزن آب را نشان می‌دهد که در پایین آن یک شیپوره نصب شده است. مخزن در جای خود ثابت شده و آب با سرعت زیاد (اندازهٔ حرکت[1] زیاد $\dot{m}\vec{V}_1$) از شیپوره خارج می‌شود. افشانهٔ آب به یک صفحهٔ عمودی که در مقابل آن قرار دارد برخورد می‌کند. در تمام مسیر جریان افشانه از محل خروج آن از شیپوره تا پس از برخورد با صفحه فشار جریان سیال همان فشار محیطی است که جریان سیال در آن تخلیه می‌شود. بنابراین فشار سیال در فرایند برخورد با صفحه تغییر نمی‌کند.

[1] - Momentum

http://www.mohandes-iran.com

در صورتیکه این صفحه روی یک چرخ قرار داشته باشد نیروی ضربهٔ[1] ناشی از افشانهٔ آب مجموعهٔ صفحه و چرخ را به حرکت در می‌آورد. اگر صفحه با سرعت ثابت $\vec{U}$ حرکت کند، با توجه به تغییر اندازهٔ حرکت بوجود آمده قبل و بعد از برخورد افشانهٔ آب با صفحه، نیروی اعمال شده به صفحه را می‌توان محاسبه کرد. چون اندازهٔ حرکت مثل نیرو یک کمیت برداری است، تغییر اندازهٔ حرکت هم باید به صورت دو مؤلفهٔ عمود بر هم محاسبهٔ شود. در شکل ۸ بردارهای سرعت جریان سیال قبل و بعد از برخورد با صفحه و همچنین مؤلفه‌های آنها نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل داریم:

$$F_x = \left\|\vec{F}\right\| = (\dot{m}V_{1x}) - (\dot{m}V_{2x}) \qquad (۱)$$

که در این رابطه V_{1x} مؤلفهٔ افقی سرعت قبل از برخورد به صفحه است.

در شکل ۸ (سمت راست) همان مخزن دوباره نشان داده شده است، اما در این شکل مخزن ثابت نیست و با بیرون زدن جریان از شیپوره حرکت می‌کند. چون در مجموع از بیرون نیرویی به مخزن وارد نمی‌شود، اندازهٔ حرکت افشانه و اندازه حرکت مخزن باید از نظر مقدار با هم برابر و از نظر جهت خلاف یکدیگر باشند. حرکت یک شلنگ آب و یا آب‌پاشهای دورانی باغچه‌ها نمونه‌هایی از این نیروی عکس‌العملی[2] هستند. از دیدگاه ناظر واقع بر مخزن تغییر اندازهٔ حرکت سیال قبل از دهانهٔ خروجی شیپوره (که تقریباً صفر است) تا مقدار بعد از دهانهٔ خروجی مخزن (که برابر با $\dot{m}\vec{V}_1$ است)، نیروی عکس‌العملی را بر مخزن وارد می‌کند که باعث تغییر اندازهٔ حرکت مخزن به همان میزان و در جهت مخالف می‌شود. مقدار این نیروی عکس-العمل برابر با تغییر اندازهٔ حرکت افشانه یا کل مخزن است:

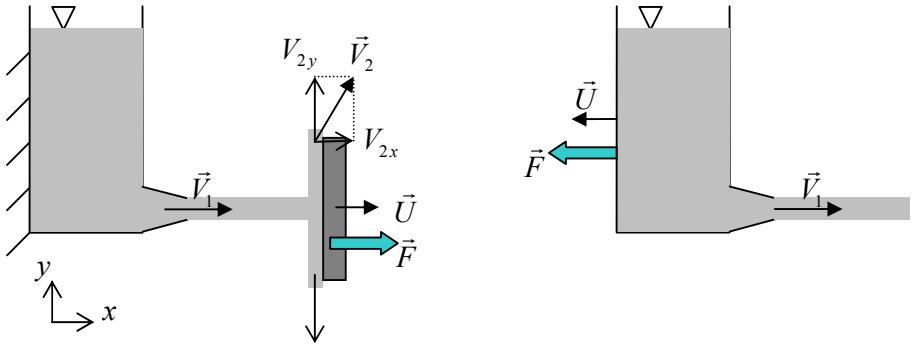
$$F_x = \left\|\vec{F}\right\| = (\dot{m}V_{1x}) = -\frac{d}{dt}(MU_x) \qquad (۲)$$

[1] - Impulse Force
[2] - Reaction Force

http://www.mohandes-iran.com

که در این رابطه M جرم مخزن و آب درون آن است. در حالت جدید نیز باز با تغییر اندازهٔ حرکت سیال نیرو بوجود می‌آید اما تغییر اندازهٔ حرکت سیال در این حالت همراه با تغییر فشار سیال در محل تغییر اندازهٔ حرکت سیال است (محدودهٔ شیپوره در مخزن).

به طور خلاصه نیروی ضربه‌ای در اثر تغییر اندازهٔ حرکت سیال ناشی از برخورد با یک سطح در یک محیط با فشار ثابت بوجود می‌آید و نیروی عکس‌العملی در اثر تغییر اندازهٔ حرکت سیال در گذر از یک مجرا به بدنهٔ آن وارد می‌شود که با تغییر فشار سیال در عبور از مجرا همراه است. این دو اصل مبنای طراحی و ساخت پرهٔ توربینها هستند که در ادامه ابتدا توربینهایی که براساس اصل ضربه ساخته می‌شوند (توربینهای ضربه‌ای)، و سپس توربینی که براساس اصل عکس‌العمل ساخته می‌شود (توربین عکس‌العملی) معرفی خواهند شد.



شکل ۸ توصیف اصول ضربه (سمت چپ) و عکس‌العمل (سمت راست)

پرسشهای خودآزمایی فصل دوم

۱- سیکلهای استاندارد توربین بخار و توربین گازی کدامند؟ آنها را به صورت دستگاهی ترسیم کنید و فرایندهای هر کدام را با ترسیم در نمودار مولیر تشریح کنید.

۲- چه تناظری بین فرایندهای سیکل توربین بخار و توربین گازی مشاهده می کنید؟ آنها را با هم مقایسه کنید.

http://www.mohandes-iran.com

۳- به طور کلی از چند جنبهٔ مختلف سیکل توربین بخار و سیکل توربین گازی را با هم مقایسه کنید.

٤- تبدیل انرژی در شیپوره چگونه انجام می شود؟ شرط لازم برای این تبدیل چیست؟

۵- نیروهای ضربه ای و عکس العمی ناشی از جریان یک سیال چگونه بوجود می آیند؟

http://www.mohandes-iran.com

فصل سوم – دسته‌بندی توربینهای بخار

http://www.mohandes-iran.com

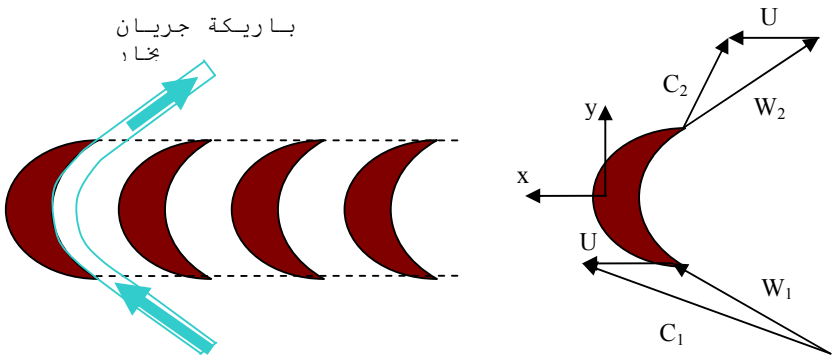
در این فصل به معرفی ساختمان داخلی و اصول عملکرد توربینهای بخار که براساس اصول معرفی شده در فصل گذشته کار می کنند، پرداخته می شود. ساختمان توربینهای ضربه ای و عکس العملی، انواع آنها، آرایش ترکیبی یک توربین بزرگ شامل هر دو نوع توربین، و خصوصیات نیرویی این دو نوع توربین، به انضمام معرفی توربینهایی که دارای کندانسور هستند، مطالب این بخش را به خود اختصاص داده است.

توربین ضربه‌ای

همانطور که از نام این نوع توربینها مشخص است اساس کار این توربینها اصل ضربه است. در این توربینها ابتدا جریان پرفشار بخار از یک شیپوره عبور کرده و به محیطی با فشار کمتر (این فشار ممکن است خیلی از فشار اتمسفر بزرگتر باشد) تخلیه می‌شود. در این فرایند انرژی فشاری بخار به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. سپس بخار خروجی با انرژی جنبشی زیاد در مسیر حرکت خود در یک فرایند فشار ثابت به پره‌ای که در مقابل مسیر حرکت آن قرار دارد برخورد کرده و به آن نیرو وارد می‌کند. به این ترتیب پره در اثر اعمال نیروی وارده از طرف

http://www.mohandes-iran.com

بخار عبوری از سطح داخلی آن به حرکت درآمده و موجب چرخش چرخ و در نتیجه محور توربین می‌شود. لازم به توضیح است که جریان بخار به صورت یک باریکه از روی سطح داخلی پره عبور کرده و تمام فضای بین دو پرهٔ متوالی را اشغال نمی‌کند (شکل ۹).



شکل ۹. مثلثهای سرعت در ورود و خروج از پرهٔ توربین ضربه‌ای

در اینجا باید به صورت مختصر توضیحی در مورد مثلث سرعت ارائه کرد. توجه داشته باشید که بهترین وضعیت عبور جریان از روی سطح داخلی پره زمانی است که جریان بخار درست مماس بر پره از سطح آن عبور کند. در غیر اینصورت تلفاتی ناشی از جریانهای غیر مماسی بوجود می‌آید که باعث کاهش انرژی منتقل شده به محور توربین خواهد شد. پس برای تبدیل حداکثر انرژی جنبشی بخار به انرژی مکانیکی روی محور بخار باید به صورت مماس بر پره وارد آن و همینطور به صورت مماس بر پره از آن خارج شود. چون پره دارای سرعت محیطی (U) می‌باشد، و ما به ناچار در صفحهٔ کاغذ پره را ثابت ترسیم می‌کنیم پس باید در نظر داشته باشیم که امتداد سرعت بخار نسبت به پره مماس بر آن باشد، یعنی امتداد سرعت نسبی بخار باید مماس بر لبهٔ پره باشد. لذا ما با سه بردار سرعت در ورود به (یا خروج از) پره سرو کار داریم که البته این سه بردار سرعت باید اضلاع یک مثلث سرعت را تشکیل دهند. رابطهٔ بین این سه بردار سرعت به صورت زیر است:

http://www.mohandes-iran.com

(۳) بردار سرعت پره + بردار سرعت بخار نسبت به پره = بردار سرعت مطلق بخار

$C=W+U$

توجه داشته باشید که انرژی جنبشی بخار بر حسب اندازهٔ بردار سرعت مطلق بیان می‌شود نه بردار سرعت نسبی.

در شکل ۹ مثلث سرعت در ورود و خروج از پره نمایش داده شده‌اند. در این شکل C، W و U به ترتیب بردارهای سرعت مطلق، نسبی، و پره هستند. زیرنویسهای ۱ و ۲ به ترتیب نشان دهندهٔ ورودی و خروجی جریان بخار از پره هستند و دو جهت x و y هم به ترتیب جهت دوران و امتداد محور توربین را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل ملاحظه می‌کنید که در گذر از پره اندازهٔ بردار سرعت مطلق بخار کاهش پیدا کرده است. در نتیجه در گذر از پره انرژی جنبشی بخار هم کاهش یافته است. این کاهش در انرژی جنبشی درست برابر با انرژی مکانیکی تولید شده روی محور دوران توربین می‌باشد (بدون در نظر گرفتن تلفات اصطکاکی). از رابطهٔ (۱) می‌توان نیروی وارد بر پره را در جهت دوران محور (که نیروی مطلوب است) محاسبه کرد:

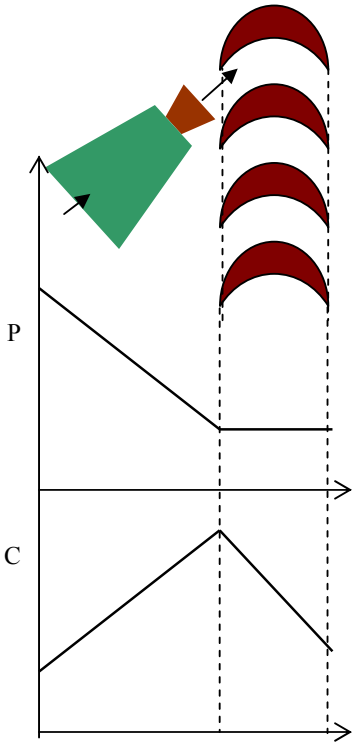
$$F_x = (\dot{m}C_{1x}) - (\dot{m}C_{2x}) = (\dot{m}W_{1x}) - (\dot{m}W_{2x}) \qquad (٤)$$

انواع توربینهای ضربه‌ای

در بخش قبل شکل کلی یک توربین ضربه‌ای معرفی شد. بر اساس این شکل کلی یک توربین ضربه‌ای شامل یک شیپوره و یک ردیف پره در مقابل این شیپوره می‌باشد. اولین بار این

http://www.mohandes-iran.com

ساختار توسط فردی به نام دولاوال[1] پیشنهاد و ساخته شد. نمایی از این توربین و توزیع فشار و اندازهٔ سرعت مطلق در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود جریان بخار خروجی از شیپوره از سطح داخلی یک پره عبور می‌کند. لازم به توضیح است که نیرو تنها به پره‌ای که در مقابل شیپوره قرار دارد وارد می‌شود و بقیهٔ پره‌ها تحت تأثیر نیرو نیستند. در عبور از شیپوره فشار بخار کاهش یافته و در عوض سرعت مطلق افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر انرژی فشاری به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. سپس در گذر از پره در یک محیط با فشار ثابت انرژی جنبشی به انرژی مکانیکی روی محور تبدیل می‌شود که این فرایند موجب کاهش سرعت مطلق بخار می‌شود. توربین دولاوال در حقیقت یک توربین ضربه‌ای یک طبقه است.



شکل ۱۰. توربین دولاوال و توزیع فشار و سرعت مطلق در آن

[1] - Delaval

http://www.mohandes-iran.com

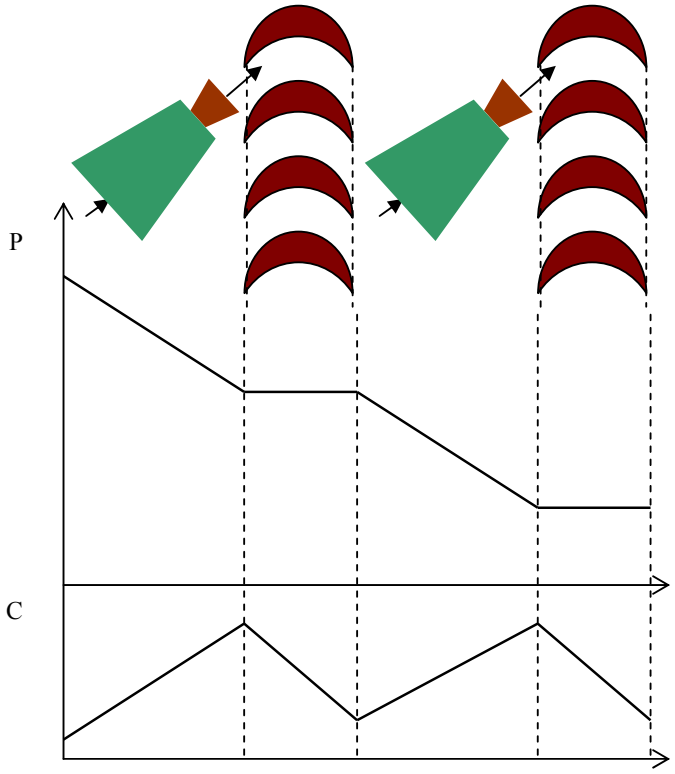
در زمان دولاوال دیگهای بخاری که ساخته می‌شدند تحمل فشار زیادی نداشتند. به همین علت میزان تبدیل انرژی فشاری به انرژی جنبشی زیاد نبود. با پیشرفت مهندسی دیگهای بخار با قدرت و تحمل فشار بیشتر ساخته شدند. با زیاد شدن انرژی فشاری تولید شده توسط دیگ استفاده از توربین دولاوال با مشکل مواجه شد. زیرا با تولید انرژی جنبشی زیاد (سرعت مطلق بزرگ) سرعت پره نیز بزرگ می‌شد که باعث نواسانات شدید در محور می‌شد. برای رفع این مشکل دو نفر دو راه حل مختلف ارائه کردند تا از زیاد شدن سرعت دورانی محور جلوگیری کنند.

اولین ایده که بسیار هم ساده بود این بود که از توربین دولاوال و مراحل دو گانهٔ تبدیل انرژیها چند بار استفاده شود. بدین ترتیب که در اولین مرحله فقط بخشی از انرژی فشاری را به انرژی جنبشی تبدیل کرد تا اندازهٔ سرعتها در همان حد سرعت توربین دولاوال باقی بماند و سپس در یک مرحلهٔ دیگر بخش دیگری از انرژی فشاری به انرژی جنبشی تبدیل و این راه حل تکرار شود. در شکل ۱۱ این راه حل که اولین بار توسط راتو[1] (و به روایتی زلی[2]) پیشنهاد شد، به صورت توزیع فشار و سرعت شبیه به شکل ۱۰ نشان داده شده است.

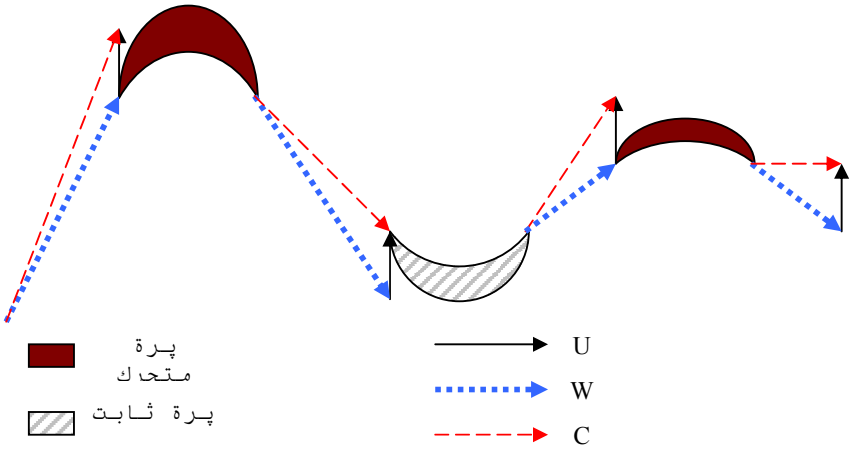
راه حل دوم این بود که درابتدا همهٔ انرژی فشاری به انرژی جنبشی تبدیل شود اما تبدیل انرژی جنبشی به انرژی مکانیکی در چند مرحله و توسط چند ردیف پرهٔ متحرک انجام شود، به نحوی که سرعت دورانی محور (سرعت پره) از حد مجاز بیشتر نشود. از آنجا که بعد از هر ردیف پرهٔ متحرک مسیر جریان نسبت به جهت چرخش محور عکس می‌شود (شکل ۹) بین هر دو ردیف پرهٔ متحرک و در مسیر جریان بخار (فقط این محدوده نه بیشتر) یک پرهٔ ثابت که جهت جریان را دوباره با الگوی قدرت دهی سازگار کند، باید قرار گیرد. این راه حل که اولین بار توسط کورتیس[3] پیشنهاد شد، در شکل ۱۲ به صورت مثلثهای سرعت نشان داده شده است.

[1] - Rautto
[2] - Zelly
[3] - Curtis

http://www.mohandes-iran.com



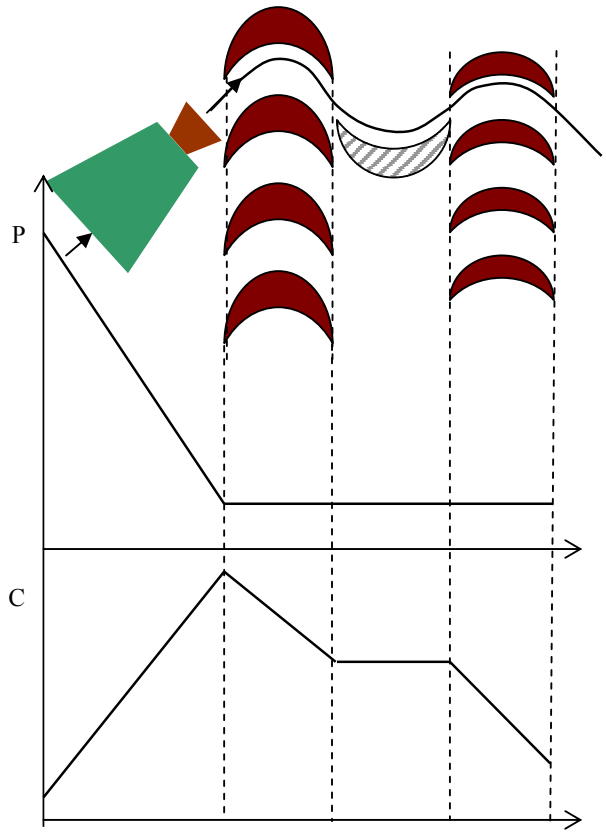
شکل ۱۱. توربین راتو و توزیع فشار و سرعت مطلق در آن



شکل ۱۲. توزیع سرعتها و پره‌های ثابت و متحرک در یک توربین کورتیس دو طبقه

http://www.mohandes-iran.com

شکل ۱۳ توزیع سرعت و فشار را در دو طبقهٔ توربین کورتیس شکل ۱۲ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌کنید که در هر دو طبقه فشار ثابت است زیرا هر دو طبقه در یک محیط با فشار یکسان قرار دارند. در عوض اندازهٔ سرعت مطلق (انرژی جنبشی جریان بخار) در گذر از هر طبقه کاهش یافته و به انرژی مکانیکی روی محور توربین تبدیل می‌شود. در ضمن در این شکل به وضوح می‌بینید که پرهٔ ثابت فقط در مسیر جریان عبوری از طبقه قرار می‌گیرد و بنابراین تعداد این پره‌ها بسیار اندک است.



شکل ۱۳. توربین کورتیس و توزیع فشار و سرعت مطلق در آن

دو نوع توربین ضربه‌ای راتو و کورتیس به نامهای دیگری که به تغییر کمیت فیزیکی در هر طبقهٔ آن وابسته است نیز نامگذاری می‌شوند. در توربین راتو هر طبقه دارای یک فشار مجزا است، لذا این توربین را توربین ضربه‌ای با طبقات فشاری هم می‌نامند. در توبین کورتیس هر طبقه دارای

http://www.mohandes-iran.com

سرعت مطلق مجزا می‌باشد و لذا این توربین را توربین ضربه‌ای با طبقات سرعت هم می‌نامند. به علت حجم کوچکتر توربینهای کورتیس امروزه از این توربین نسبت به توربین راتو استفادهٔ بیشتری می‌شود.

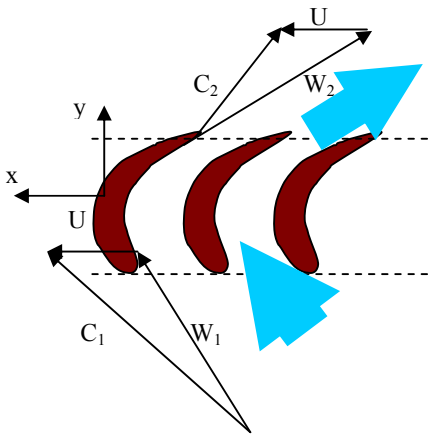
توربین عکس‌العملی

این نوع توربینها بر اساس اصل عکس‌العمل کار می‌کنند. به این ترتیب که در این توربینها جریان بخار از درون یک مجرا عبور کرده و مسیر جریان بخار به طور کلی یک شیپورهٔ طویل می‌باشد که البته بخشی از جدارهٔ این شیپوره قابلیت حرکت داشته و بنابراین می‌تواند نیروی عکس‌العمل وارد به خود را به صورت یک گشتاور دورانی به محور توربین انتقال دهد. در حقیقت جریان بخار از مجرای بوجود آمده توسط دو پرهٔ متحرک متوالی و بخشی از سطح محور که این دو پره روی آن نصب شده‌اند و سطح پوستهٔ توربین، که به واقع سطح فوقانی مجرای مورد نظر را تشکیل می‌دهد، عبور می‌کند. لذا باید شکل مقطع پرهٔ عکس‌العملی به گونه‌ای باشد که در راستای عبور جریان بخار سطح مقطع عمود بر جریان کاهش یافته و با کاهش فشار بخار در طی عبور جریان بخار از این مجرا، عمل تبدیل انرژی فشاری به انرژی جنبشی و انرژی جنبشی به انرژی مکانیکی به صورت همزمان در این پره‌ها انجام گیرد. در حقیقت پره‌های متحرک این توربینها به نوعی شیپوره‌های متحرکی هستند که با بیرون زدن جریان بخار از این شیپوره‌ها، که به محور دوران توربین متصل هستند، گشتاوری ناشی از نیروی عکس‌العمل بوجود آمده روی محورتوربین اعمال می‌شود.

با توضیحات فوق دو تفاوت عمده بین توربین ضربه‌ای و عکس‌العملی دیده می‌شود، اول اینکه شکل پرهٔ توربین عکس‌العملی نمی‌تواند متقارن باشد، و دوم اینکه جریان بخار از فضای بین همهٔ پره‌ها عبور می‌کند و در ضمن کل فضای بین پره‌ها را هم اشغال می‌کند. اما آنچه باید یادآوری کرد این است که علیرغم این تفاوتها، نیروی عکس‌العمل وارد به پره (یا همان محور توربین) باز هم ناشی از اختلاف اندازهٔ حرکت جریان بخار در ورود و خروج پره‌های متحرک است. لذا در

http://www.mohandes-iran.com

این توربینها هم مثلث سرعتها از اهمیت خاصی برخوردار هستند. به همین خاطر شکل یک ردیف پرهٔ متحرک و مثلثهای سرعت را در ورود و خروج از آن در نظر می‌گیریم. جهت اختصار فقط یکی از پره‌ها را در نظر گرفته و نتایج را با اعمال کل دبی جرمی بخار می‌توان به تمامی پره‌ها تعمیم داد. نیروی محیطی را هم باز از رابطهٔ (٤) می‌توان محاسبه کرد. در شکل ١٤ مثلثهای سرعت در ورودی وخروجی پره‌های عکس‌العملی نشان داده شده‌اند. همچنین در این شکل ملاحظه می‌کنید که سطح مقطع جریان در عبور از مجرای بین دو پرهٔ متوالی کاهش یافته است.

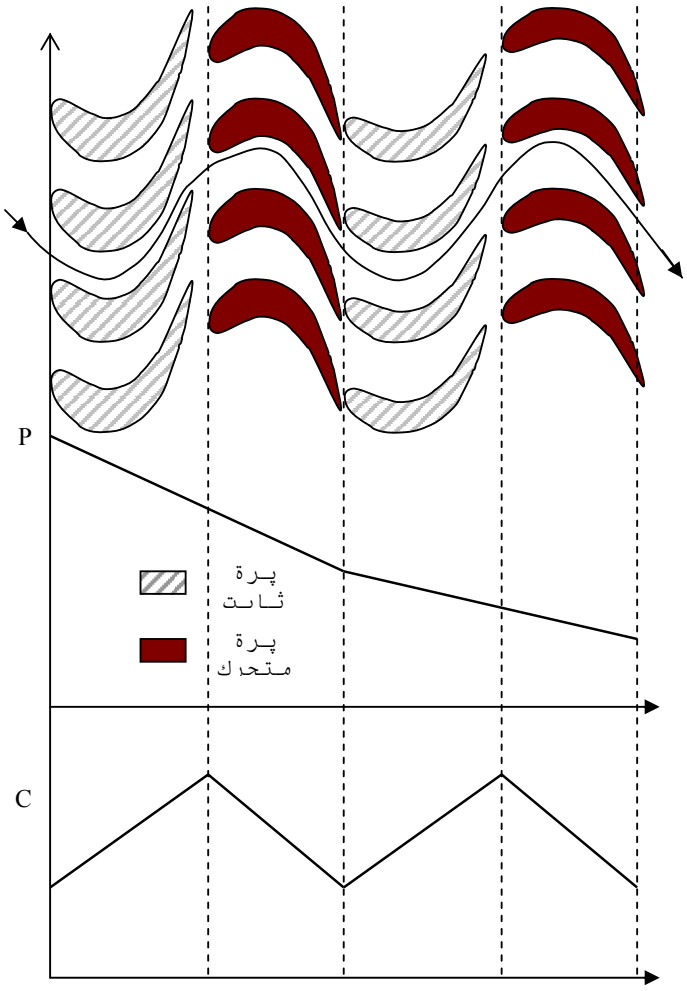


شکل ۱۴. مثلثهای سرعت در ورود و خروج از پرهٔ توربین عکس‌العملی

مثل توربین کورتیس پس از عبور جریان بخار از یک ردیف پرهٔ متحرک جهت جریان بخار عوض می‌شود و برای تکرار کردن الگوی انتقال قدرت در همان جهت مرحلهٔ قبل باید از یک ردیف پرهٔ ثابت در بین دو ردیف پرهٔ متحرک استفاده کرد. این پره‌های ثابت دارای این ویژگی هستند که فضای بین دو تا از آنها یک مجرای همگرا شونده یا همان شیپوره است. بنابراین شکل مقطع این پره‌ها نیز مانند پره‌های متحرک نامتقارن و از نظر جهت پیچش درست عکس پره-های متحرک است. از آنجا که این پره‌ها بدون حرکت هستند در آنها فقط انرژی فشاری به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه شده ساختار و توزیع فشار و سرعت در

http://www.mohandes-iran.com

یک توربین عکس‌العملی را که اولین بار توسط فردی به نام پارسون[1] پیشنهاد شد، به صورت شکل ۱۵ می‌توان نشان داد.



شکل ۱۵. توربین پارسون و توزیع فشار و سرعت مطلق در آن

طبقات مختلف یک توربین بخار با فشار ورودی زیاد

همانطور که در قسمت قبل بیان شد مسیر جریان بخار از میان یک ردیف از پره‌های عکس‌العملی، یک شیپوره می‌باشد. با اینحال تفاوت عمدهٔ این شیپوره با شیپورهٔ توربین ضربه‌ای

[1]- Parson

http://www.mohandes-iran.com

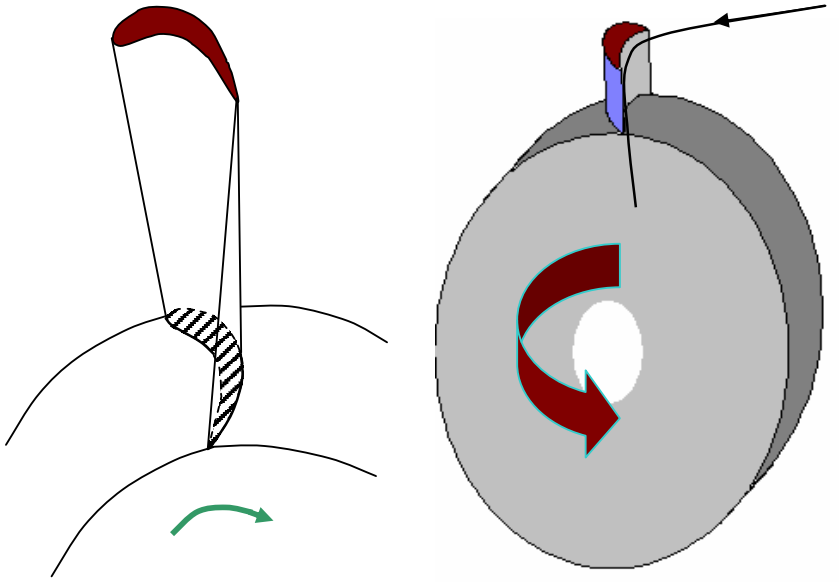
این است که نسبت تغییر مقطع در شیپورهٔ توربین ضربه‌ای به مراتب بزرگتر از توربین عکس-العملی است. لذا تبدیل انرژی فشاری به انرژی جنبشی در یک مرحلهٔ توربین ضربه‌ای (و پس از آن تبدیل انرژی جنبشی به انرژی مکانیکی) خیلی بیشتر از یک مرحلهٔ توربین عکس‌العملی است. البته این میزان تبدیل انرژی در یک مرحله فقط در طبقات پر فشار امکان‌پذیر است. به مرور که جریان بخار از توربین عبور می‌کند فشار آن کاهش یافته و امکان استفاده از شیپوره‌های قوی مثل توربینهای ضربه‌ای وجود ندارد. لذا در طبقات پایین تر که فشار بخار کاهش می‌یابد باید از توربینهای عکس‌العملی بهره گرفت تا عمل تبدیل انرژی به آرامی صورت گرفته و در عین حال پره و شیپوره را در هم ادغام کرد. علاوه بر این با کاهش فشار بخار حجم مخصوص آن افزایش یافته و بنابراین در مسیر بخار باید فضای لازم برای عبور جریان انبساط یافته بوجود آید. به همین علت اندازهٔ توربینهای عکس‌العملی که در طبقات کم فشار قرار می‌گیرند پیوسته به سمت خروجی توربین افزایش می‌یابد. این افزایش حجم با افزایش ارتفاع پره (فاصلهٔ بین پایهٔ پره که محل اتصال پره به محور است، تا نوک پره که در مجاورت پوستهٔ توربین است) همراه است. جریان بخار در توربین ضربه‌ای به صورت یک باریکهٔ نازک است (شکل ۹) و بنابراین ارتفاع پرهٔ توربین ضربه‌ای کوتاه می‌باشد. در شکل ۱۶ به صورت نمادین دو پرهٔ ضربه‌ای و عکس‌العملی از نظر ارتفاع با هم مقایسه شده‌اند. شکل ۱۷ نیز تصویر روتور یک توربین بخار عکس‌العملی را نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع پره در آن به خوبی دیده می‌شود.

چون سرعت خطی پره در مثلث سرعتها حاصلضرب سرعت زاویه‌ای محور توربین در فاصلهٔ شعاعی مقطع پره است، بنابراین مقدار U از پایه تا نوک پره به صورت خطی افزایش می-یابد. اگر زوایای ورودی و خروجی لبه‌های پرهٔ توربین عکس‌العملی ثابت بمانند مثلث سرعتها در راستای ارتفاع پره به گونه‌ای تغییر خواهند کرد که اختلاف فشار ایجاد شده بین پایه و نوک پره نمی‌تواند از بوجود آمدن جریان ثانویهٔ[1] بین پایه و نوک پره جلوگیری کند. این جریان ثانویه باعث هدر رفتن انرژی بخار و کاهش راندمان توربین خواهد شد. به همین علت در هنگام

[1] - Secondary Flow

http://www.mohandes-iran.com

طراحی زوایای ورودی و خروجی هر مقطع از پرهٔ عکس‌العملی به گونه‌ای طراحی می‌شود که از ایجاد جریانهای ثانویهٔ فوق‌الذکر جلوگیری شود. این امر باعث پیچ‌دار شدن پره از پایه تا نوک آن می‌شود (شکلهای ۱۶ و ۱۷). مقدار پیچش پره از نظر عملکرد آن بسیار اهمیت دارد، تا حدی که اگر پیچش پره از حد طراحی آن کمتر یا بیشتر شود باعث کاهش راندمان توربین خواهد شد.



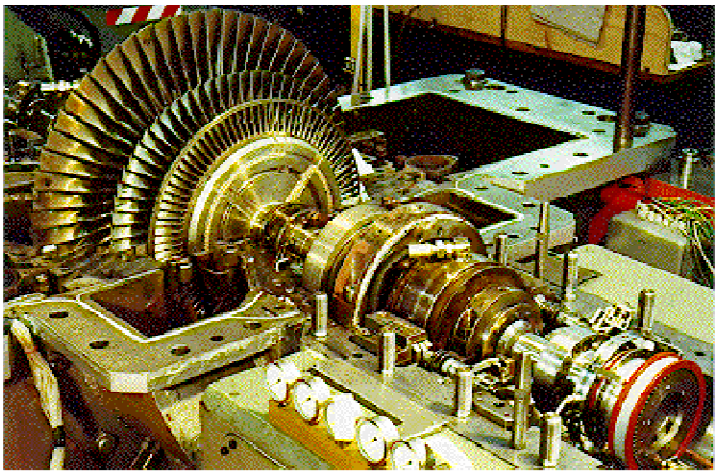
شکل ۱۶. پرهٔ توربین ضربه‌ای (سمت راست)، و پرهٔ توربین عکس‌العملی (سمت چپ)

حال می‌توان ساختار کلی یک توربین بخار بزرگ را با فشار ورودی بالا، که بخار در عبور از آن تا فشارهای کوچک (زیر اتمسفر) منبسط می‌شود از طریق شکل ۱۸ نمایش داد. در این شکل توربین فشار بالا[1] از نوع توربین ضربه‌ای (اصولاً توربین کورتیس)، توربین فشار متوسط[2] یک توربین ترکیبی (با توربین ضربه‌ای شروع و به تدریج به توربین عکس‌العملی تبدیل شود)، و در

[1] - HP Turbine
[2] - IP Turbine

http://www.mohandes-iran.com

نهایت توربین فشار پایین[1] عکس‌العملی هستند. در ضمن خروجی توربین فشار پایین توسط یک کندانسور تحت تأثیر خلأ نسبی قرار دارد.

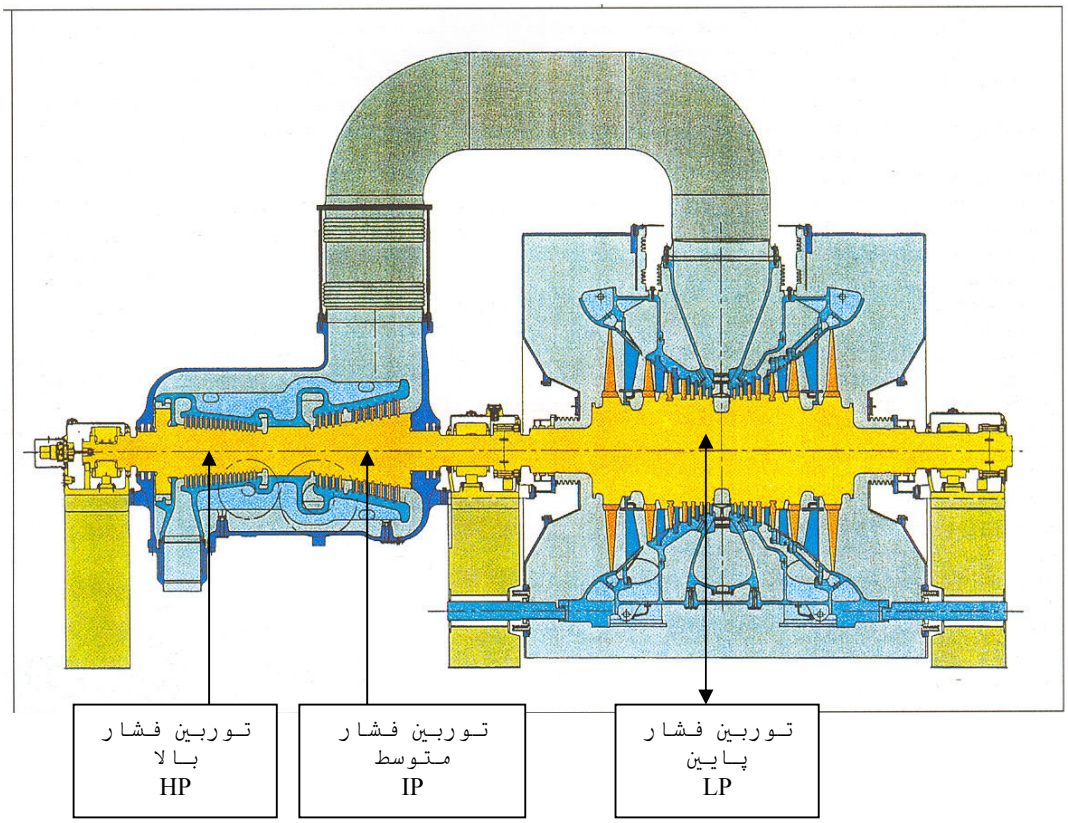


شکل ۱۷. افزایش ارتفاع و پیچش پره در روتور یک توربین عکس‌العملی

باید توجه داشت که ساختار قرار گرفتن توربینها همیشه به صورت توصیف شده در شکل ۱۸ نمی‌باشد، بلکه ممکن است تفاوتهایی وجود داشته باشد که این تفاوتها به مجموعه‌ای که توربین در آن قرار دارد بستگی دارد. شکل ۱۸ ساختار توربینهای بخار در نیروگاههای حرارتی را نشان می‌دهد که با توان بسیار بالایی کار می‌کنند. اما اگر یک توبین فقط برای چرخاندن یک پمپ مورد استفاده قرار گیرد نیازی به ساختار پیچیدهٔ شکل ۱۸ نیست، چرا که از یک طرف نیازی به توان بالا وجود ندارد، و از طرف دیگر توربین لازم برای این کار بسیار کوچک خواهد بود که در این موارد تنها از یک توربین کورتیس دو طبقه استفاده می‌شود که از نظر ابعاد تقریباً به اندازهٔ پمپ متصل به آن است. شکل ۱۹ نمونه‌ای از این نوع توربینها را نمایش می‌دهد.

[1] - LP Turbine

http://www.mohandes-iran.com



شکل ۱۸. ترتیب قرار گرفتن توربینها در یک توربین بخار با فشار ورودی بالا و فشار خروجی کم

طبقه بندی توربینها از نظر فشار بخار خروجی از آنها

توربینهای بخار را از نظر فشار بخار خروجی از آنها به دو دسته می توان تقسیم کرد. امکان استفاده از کندانسور در سیستم توربینهای باعث می شود این نوع از توربینها جدای از ساختمان داخلی آنها که در قسمت قبل بررسی شد، به دو دستهٔ زیر طبقه بندی شوند:

۱ – توربینهای با کندانسور

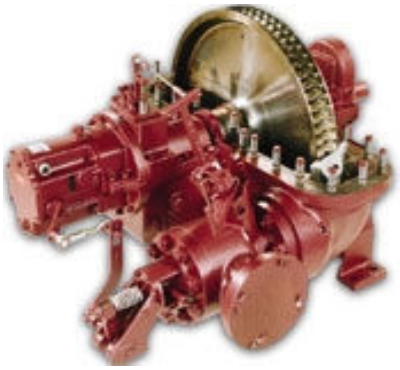
۲ – توربینهای بدون کندانسور

توربینهای دستهٔ اول به نام توربینهای تحت کندانس[1] نیز مشهورند.

[1]- Condensed Turbine

http://www.mohandes-iran.com

اگر توربینی تحت کندانس باشد فشار خروجی آن کمتر از فشار اتمسفر خواهد بود. کاهش فشار پشت توربین به مقادیری کمتر از فشار اتمسفر اجازه می دهد که از انرژی بخار به مقدار بیشتری استفاده شود. این مطلب در بخش روشهای تنظیم قدرت توربین با جزییات بیشتری بررسی خواهد شد. بنابراین چون در این توربینها فشار در طبقات انتهایی بسیار پایین است، الزاماً طبقات انتهایی باید از نوع عکس العملی باشند. حال اگر صرفاً از یک توربین کورتیس استفاده شود، بدون شک فشار خروجی توربین کمتر از فشار اتمسفر نخواهد بود و کندانسوری هم پس از توربین وجود نخواهد داشت.



شکل ۱۹. تصویر یک توربین ضربه‌ای کوچک که برای چرخاندن پمپ به کار می‌رود

نیروی محوری در توربین بخار

همانطور که می‌دانید نیرو یک کمیت برداری است و در فضا دارای سه مؤلفه می‌باشد. با این حال در مبحث توربینها دو مؤلفه از سه مؤلفهٔ نیرو دارای اهمیت هستند. این دو مؤلفه عبارتند از مؤلفهٔ محیطی[1] (مماس بر دایرهٔ دورانی محور) که گشتاور لازم برای تبدیل انرژی جنبشی به انرژی مکانیکی را تأمین می‌کند و نیروی مطلوب در توربین محسوب می‌شود، و مؤلفهٔ محوری[2] که در امتداد محور توربین است و از نظر تولید توان نه تنها مفید نیست بلکه به

[1] - Circumferential Force
[2] - Trust Force

http://www.mohandes-iran.com

علت ایجاد اصطکاک بیشتر بین محور و سطح یاتاقان محوری[1] مضر هم می‌باشد. بنابراین به هنگام طراحی باید سعی شود تا حد امکان از ایجاد نیروی محوری جلوگیری شود.

ابتدا دلایل ایجاد نیروی محوری را بررسی می‌کنیم. همانطور که برای محاسبهٔ نیروی محیطی از رابطهٔ (٤) در راستای x استفاده شد، از همین رابطه در راستای y هم می‌توان استفاده کرد. در اینصورت رابطهٔ زیر برای نیروی محوری القاءِ شده توسط تغییر اندازهٔ حرکت بخار در عبور از پره بدست می‌آید:

$$F_y = (\dot{m}C_{1y}) - (\dot{m}C_{2y}) = (\dot{m}W_{1y}) - (\dot{m}W_{2y}) \qquad (۵)$$

بنابراین نیروی محوری روی پره زمانی وجود خواهد داشت که بین مؤلفه‌های سرعتها در امتداد محور، در ورود و خروج اختلاف وجود داشته باشد. حال پرهٔ یک توربین ضربه‌ای را در نظر بگیرید. چون این پره متقارن است در صورتیکه از اصطکاک بین جریان بخار و سطح پره صرفنظر کنیم (که در اینصورت ضخامت باریکهٔ جریان بخار روی پره ثابت می‌ماند) و در ضمن امتداد سرعتهای نسبی در ورود و خروج مماس بر سطح پره باشد، آنگاه مؤلفه‌های محوری سرعتها در ورود و خروج از پره با هم برابر بوده و نیروی محوری طبق رابطهٔ (۵) صفر خواهد شد. اصولاً در پرهٔ توربینهای ضربه‌ای این شرایط در اکثر مواقع برقرار است. اما در پرهٔ توربینهای عکس‌العملی همیشه این شرایط برقرار نیست، هرچند که در شرایط طراحی که متناظر به سرعت دورانی، دبی جرمی، و توان خروجی خاصی است (که به آن شرایط کارکرد نامی دستگاه می‌گویند و روی هر دستگاهی این شرایط نوشته می‌شود)، نیروی محوری ناشی از تغییر اندازهٔ حرکت صفر می‌باشد.

[1] - Trust Bearing

http://www.mohandes-iran.com

همانطور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود پره‌ها ممکن است روی یک چرخ نصب شده و سپس چرخ روی محور متصل شود، به خصوص در توربینهای ضربه‌ای که دارای پره‌های کوچکی هستند این کار متداول است (به شکل ۱۹ رجوع کنید). فضای دو طرف چرخ توسط بخار اشغال شده است. فشار بخار هر طرف درست برابر با فشار جریان بخار عبوری از پره در آن قسمت است. بنابراین چرخ را می‌توان سطح حایل بین دو طرف پره در نظر گرفت که تحت تأثیر اختلاف فشار متناظر با اختلاف فشار دو طرف پره قرار دارد. حاصلضرب این اختلاف فشار در سطح چرخ معادل نیرویی است که امتداد آن در جهت محور توربین می‌باشد. لذا با توجه به اینکه در توربینهای ضربه‌ای فشار در گذر از پره‌ها ثابت می‌ماند پس نیروی محوری ناشی از اختلاف فشار طرفین چرخ هم وجود نخواهد داشت. اما در توربینهای عکس‌العملی به علت کاهش فشار بخار در گذر از پره نیروی محوری از سمت فشار بالاتر (ورودی پره) به طرف فشار پایینتر (خروجی پره) به چرخ وارد می‌شود.

بنابراین دو عامل اساسی باعث ایجاد نیروی محوری در توربین می‌شوند؛ اول انحراف بردارهای سرعت نسبت به شرایط طراحی و دوم وجود اختلاف فشار در طرفین چرخ پره‌ها. همانطور که گفته شد عامل دوم در توربینهای ضربه‌ای منتفی است و تنها در توربینهای عکس-العملی که دارای چرخ پره[1] هستند بوجود می‌آید. اصولاً در توربینهای عکس‌العملی هم برای حذف عامل دوم از نصب پره روی چرخ اجتناب می‌شود، مگر اینکه توسط روشهای مناسبی نیروی محوری خنثی شود. از بین این روشها به دو مورد معمول آن اشاره می‌کنیم.

در یک روش ساده برای حذف نیروی محوری در یک جهت کافیست نیروی محوری دیگری خلاف جهت نیروی اول ایجاد کرد. برای این کار می‌توان از آرایش متقارن پره‌ها استفاده کرد؛ به این ترتیب که بخار از وسط توربین وارد آن شده و به طرفین جریان پیدا کند. با این آرایش یک نیروی محوری به سمت چپ و یک نیروی محوری درست به اندازهٔ نیروی قبلی و به سمت راست ایجاد می‌شود که این دو نیروی مساوی و مخالف جهت با هم خنثی می‌شوند. البته

[1] - Blade Wheel

http://www.mohandes-iran.com

این روش به فضای کافی و بدنهٔ بزرگ نیاز دارد. در شکل ۱۷ توربین فشار پایین به همین ترتیب ساخته شده است.

در روش دوم که اصولاً برای توربینهای کوچکتر که فضای کمی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد، از یک استوانه متصل به محور بهره می‌گیرند که به آن پیستون تعادل[1] می‌گویند. در حقیقت دو طرف این استوانه کاملاً نسبت به هم آب‌بندی شده‌اند و در یک طرف آن بخار با فشار پایین (فشار خروجی توربین) و در طرف دیگر بخار با فشار بالا (فشار ورودی توربین) قرار دارد. لذا به این استوانه هم مثل یک چرخ پره تحت تأثیر اختلاف فشار موجود یک نیروی محوری اعمال می‌شود که البته خلاف جهت نیروی محوری ناشی از چرخ پره‌ها است.

در بحث فوق فقط خود توربین در نظر گرفته شد و روشهایی برای مقابله با نیروی محوری در توربین معرفی شد. در بسیاری از موارد که توربین یک مصرف کنندهٔ بزرگ مثل یک کمپرسور را می‌چرخاند ممکن است نیروی محوری توربین توسط نیروی محوری مصرف کننده که در خلاف جهت نیروی محوری توربین است، و یا به کار گرفتن روشهای مشابهی در مصرف کننده، خنثی شود. به هر حال آنچه مسلم است این است که از ایجاد نیروی محوری باید جلوگیری کرد.

پرسشهای خودآزمایی فصل سوم

۱- چرا در شرایط نامی عملکرد توربین باید جریان سیال مماس بر سطح پره های روتور باشد؟

۲- کدامیک از سرعتهای مطلق یا نسبی جریان سیال باید بر پره مماس باشد؟

۳- انواع توربینهای ضربه ای کدامند؟

٤- توزیعهای فشار و سرعت مطلق را در توربین دولاوال نشان دهید.

۵- توزیعهای فشار و سرعت مطلق را در توربین راتو نشان دهید.

[1] - Balance Piston

http://www.mohandes-iran.com

۶- توزیعهای فشار و سرعت مطلق را در توربین کورتیس نشان دهید.

۷- توزیعهای فشار و سرعت مطلق را در توربین پارسون نشان دهید.

۸- به صورت خلاصه فرایندهایی را که در یک طبقه توربین ضربه ای و یک طبقه توربین عکس العملی اتفاق می افتد شرح دهید.

۹- تفاوتهای یک طبقه توبین ضربه ای و یک طبقه توربین عکس العملی را بیان کنید.

۱۰- چرا در توربین عکس العملی از پایه تا نوک پره پیچش وجود دارد؟

۱۱- پره های طبقات ضربه ای و عکس العملی را از نظر ارتفاع و الگوی جریان با هم مقایسه کنید.

۱۲- یک توربین بخار با فشار ورودی زیاد شامل چه طبقاتی می تواند باشد؟ به صورت شماتیک این توربین را نشان دهید.

۱۳- پیچیدن پره های توربین عکس العملی نسبت به پیچش طراحی چه مشکلاتی را ایجاد می کند؟ دلایل پیچیدن پره های این توربین کدامند؟

۱٤- توربینهای بخار از نظر فشار بخار خروجی چگونه طبقه بندی می شوند؟ آیا این طبقه بندی شامل توربینهای گازی هم می شود؟ چرا؟

۱۵- علل ایجاد نیروی محوری در توربینها چیست؟ آیا این نیرو مضر است؟ چرا؟

۱۶- روشهای مقابله با نیروی محوری را شرح دهید.

http://www.mohandes-iran.com

فصل چهارم – تنظیم قدرت در توربین بخار

http://www.mohandes-iran.com

در این فصل ابتدا اصول تنظیم قدرت در توربینهای بخار معرفی می شود. سپس بر اساس این اصول مکانیزمهای موجود برای انجام این روشها معرفی و ساختمان آنها، مزایا، و معایب هر روش بررسی می شوند. اصول کار گاورنرها[1] و سروموموتورها[2] و ساختمان هر یک از آنها در مطالب این فصل گنجانده شده اند.

اصول تنظیم قدرت در توربین بخار

توربین به عنوان یک مولد توان مکانیکی باید به اندازه‌ای توان تولید کند که مصرف کننده از آن می‌طلبد. در حقیقت میزان عرضه و تقاضا باید با هم متعادل باشند. مثلاً اگر مقدار مصرف توان مکانیکی کاهش یابد توربین هم باید مقدار تولید خود را کاهش دهد، در غیر اینصورت ممکن است خسارتهای جبران‌ناپذیری به توربین و دستگاه مصرف کننده وارد شود. لذا باید به روش مناسبی و با تأخیر زمانی کمی کار تنظیم قدرت توربین متناسب با میزان مصرف

[1] - Governors
[2] - Servomotors

http://www.mohandes-iran.com

توان مکانیکی صورت گیرد. برای درک بهتر روشهای تنظیم قدرت (یا همان توان مکانیکی) ابتدا مدل ریاضی مسأله را معرفی و بررسی می‌کنیم.

توان مکانیکی شامل دو کمیت مهم در توربین می‌باشد. این دو کمیت گشتاور و سرعت دورانی توربین هستند. به واقع توان مکانیکی حاصلضرب این دو کمیت است:

$$\dot{W} = T.\omega \qquad (۶)$$

در رابطهٔ فوق T گشتاور و ω سرعت زاویه‌ای محور هستند. پس هر کدام از دو کمیت گشتاور و یا سرعت دورانی می‌توانند باعث تغییر قدرت لازم شوند. ممکن است دستگاه مصرف کننده به گونه‌ای باشد که دور آن باید همیشه ثابت باشد و تنها گشتاور آن در شرایط مختلف تغییرکند. مثلاً در یک ژنراتور برق که با دور ثابت کار می‌کند فقط گشتاور وارد بر محور آن تغییر می‌کند. در اینصورت منظور از تنظیم قدرت ثابت نگه داشتن سرعت دورانی و تنظیم گشتاور مورد نیاز ژنراتور است. از طرف دیگر در یک کمپرسور برای تغییر دبی جرمی ممکن است نیاز به تغییر دور و گشتاور به صورت همزمان باشد. در اینصورت باید هر دو کمیت توسط مکانیزم مناسب در حد مورد نیاز تنظیم شوند.

آنچه باید مد نظر داشت این است که توربین انرژی بخار را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. پس از دیدگاه تبدیل انرژی و تعریف ماشین، عبارت ترمودینامیکی زیر را برای توان می-توان نوشت:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_i - h_e) \qquad (۷)$$

که در رابطهٔ اخیر h_i و h_e به ترتیب انتالپی (انرژی نهفته در بخار) ورودی و خروجی بخار هستند. به کمک رابطهٔ (۷) اصول تنظیم قدرت در توربینها مشخص می‌شود. برای روشن شدن

http://www.mohandes-iran.com

مطلب فقط افزایش توان را بررسی می‌کنیم. جهت افزایش سمت چپ رابطهٔ (۷) باید سمت راست آنرا افزایش داد. این امر با افزایش دبی جرمی و انتالپی ورودی و کاهش انتالپی خروجی ممکن است. از آنجا که انتالپی بخار به دما و فشار آن وابسته است تغییر انتالپی بخار از طریق تغییر این دو کمیت باید صورت بگیرد. در صورتیکه دما و فشار بخار در ورود و خروج ثابت بمانند امکان تغییر انتالپیها وجود نخواهد داشت و در این شرایط تنها راه حل (که ساده‌ترین راه حل نیز می‌باشد) تغییر دبی جرمی بخار است. برای این کار باید بخار ورودی از چند مسیر مجزا وارد توربین شود تا بتوان دبی‌های مختلف را وارد توربین کرد. این روش ساده در توربینهای کوچک متداول است.

باید توجه داشت که امکان افزایش انتالپی ورودی به توربین تنها از طریق واحد تولید بخار امکان‌پذیر است. چون این امر معمولاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و فشار و دمای بخار تولید شده در واحد بخار ثابت است، تنها می‌توان انتالپی بخار را قبل از ورود به توربین طی یک فرایند خفگی[1] کاهش داد. به این منظور به شیر فشارشکن نیاز داریم. برای کاهش (یا افزایش) انتالپی خروجی باید از تغییر فشار پشت توربین استفاده کرد. در توربینهایی که دارای کندانسور هستند به کمک کندانسور می‌توان فشار پشت توربین را تغییر داد. در توربینهایی که دارای زیرکش[2] هستند با تنظیم میزان بازشدگی مسیر زیرکش می‌توان به منظور فوق دست یافت. به هر صورت این دو روش به صورت دستی امکان‌پذیر است و چون در ادامه می‌خواهیم مبانی تنظیم خودکار[3] را بررسی کنیم، از بحث بیشتر پیرامون این روشهای دستی پرهیز می‌کنیم. بنابراین اصول تنظیم خودکار قدرت را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱- تنظیم دبی جرمی بخار

۲- ایجاد خفگی در مسیر ورود بخار

۳- ترکیب دو روش فوق

---

[1] - Throttling Process
[2] - Extraction
[3] - Automatic Control

http://www.mohandes-iran.com

روشهای تنظیم قدرت در توربین بخار و گاورنرها

در بخش قبل مبانی تنظیم قدرت در توربین تشریح شد. هرکدام از روشهای سه‌گانه که مورد استفاده قرار گیرند، نیاز به مکانیزمی دارند که با اندازه‌گیری یک کمیت بتواند تشخیص دهد قدرت توربین باید افزایش یا کاهش یابد. در هر صورت پس از تشخیص این سیستم شیرهای جرمی و خفگی باید حرکت کنند، و حرکت این شیرها به یک مکانیزم محرک نیاز دارد.

وضعیتی را در نظر بگیرید که بار مقاوم روی محور توربین کاهش یابد. در اینصورت چون انرژی داده شده به توربین هنوز با وضعیت جدید سازگار نشده است، سرعت دورانی توربین به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابد. زیرا حاصلضرب گشتاور روی محور و سرعت زاویه-ای برای مدت کوتاهی ثابت خواهد ماند. طبق همین توضیح در وضعیتی که بار روی محور توربین افزایش یابد، به صورت لحظه‌ای سرعت توربین کاهش خواهد یافت. بنابراین بهترین کمیتی که می‌تواند برای تنظیم قدرت لازم توربین اندازه‌گیری شود سرعت توربین است. به این ترتیب که در صورت کاهش سرعت توربین باید انرژی ورودی به توربین افزایش یابد، و در صورت افزایش سرعت توربین باید انرژی ورودی به آن کاهش یابد. تحریک شیرهای جرمی و خفگی به سه روش امکان‌پذیر است:

۱- روش مکانیکی

۲- روش هیدرولیکی

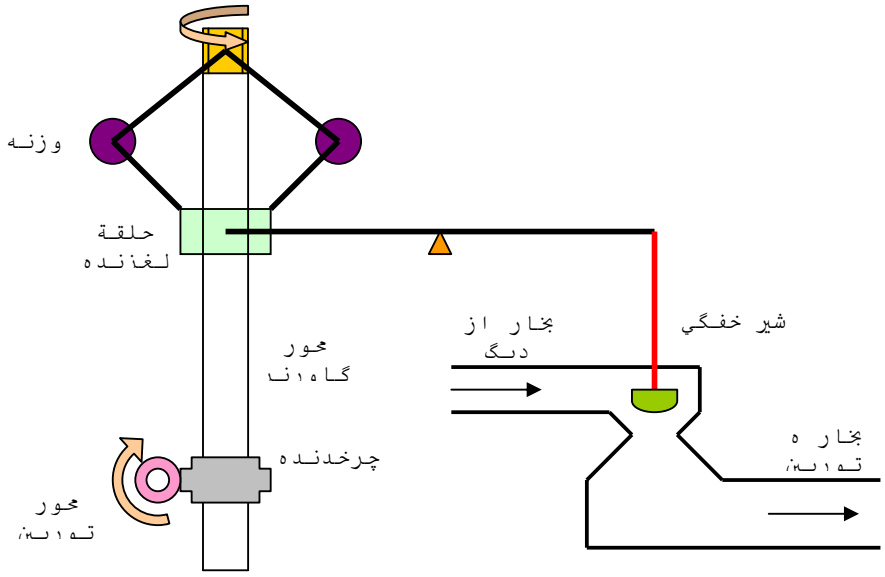
۳- روش هیدرولیکی - مکانیکی

اصولاً به مکانیزمی که بر اساس یکی از سه روش فوق عمل می‌کند گاورنر می‌گویند. بنابراین سه نوع گاورنر داریم؛ گاورنرهای مکانیکی، گاورنرهای هیدرولیکی، و گاورنرهای هیدرولیکی - مکانیکی. گرچه اساس کار هر سه نوع گاونر فوق مکانیکی است (زیرا هیدرولیک نیز بخشی از علم مکانیک است)، اما این گاورنرها به این اسامی مشهور هستند. ساده‌ترین نوع گاورنر همان گاورنری است که اولین بار توسط جیمز وات[1] در موتور بخار ساخت او به کار رفت. این گاورنر

[1] - James Watt

http://www.mohandes-iran.com

که ساختمان آن در شکل ۲۰ نشان داده شده است، شامل دو وزنهٔ[1] متقارن است که هرکدام توسط دو میله از یک طرف به محور دوران متصل به توربین و از طرف دیگر به یک حلقهٔ استوانه‌ای که به راحتی می‌تواند روی این محور بلغزد، لولا شده‌اند. نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران وزنه‌ها باعث بالا آمدن حلقهٔ لغزنده در امتداد محور دوران می‌شود، وزنه‌ها تا جایی بالا می‌آیند که نیروی گریز از مرکز، وزن وزنه‌ها، و نیروی کشش میله‌ها با هم به تعادل برسند. به حلقهٔ لغزنده میلهٔ دیگری متصل است که یک طرف آن به همراه حلقه حرکت کرده و طرف دیگر آن به شیر خفگی[2] متصل است. در نقطه‌ای واقع بین حد فاصل دو سر این میله، یک تکیه‌گاه لولایی وجود دارد که میلهٔ مذکور به آن لولا شده است. به این ترتیب بالا رفتن حلقه باعث پایین رفتن شیر خفگی و پایین آمدن آن باعث بالا رفتن این شیر می‌شود.

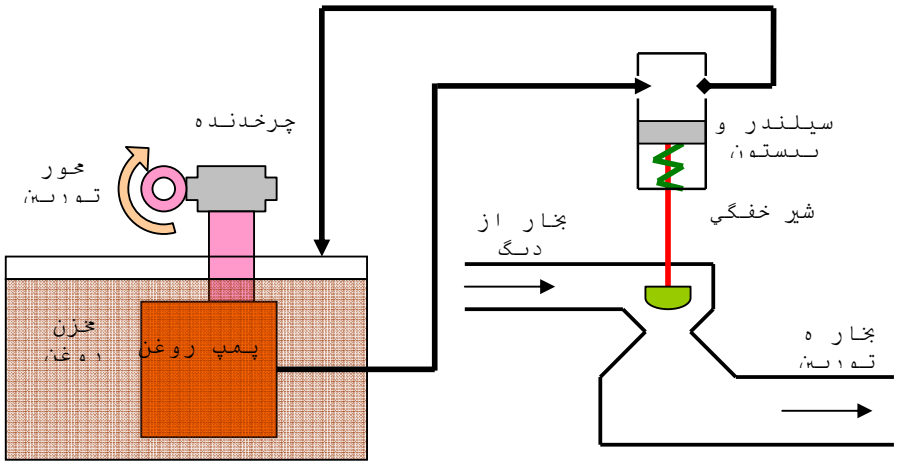


شکل ۲۰. ساختار یک گاورنر مکانیکی ساده

[1] - Fly Ball
[2] - Throttle Valve

http://www.mohandes-iran.com

در گاورنرهای هیدرولیکی از فشار روغن برای بالا و پایین بردن شیر استفاده می‌شود. در این گاورنرها افزایش سرعت محور توربین باعث افزایش سرعت پمپ روغن، که محور آن با محور توربین می‌چرخد، می‌شود. افزایش سرعت دورانی پمپ روغن نیز باعث افزایش فشار روغن شده و به این ترتیب فشار روغن افزایش یافته شیر مسیر بخار ورودی به توربین را به سمت پایین به حرکت درآورده و موجب کاهش انرژی ورودی به توربین می‌شود. در شکل ۲۱ ساختمان این نوع گاورنر به صورت ساده نشان داده شده است. با افزایش سرعت دورانی توربین و پمپ روغن، فشار روغن در مسیر جریان آن افزایش پیدا می‌کند. افزایش فشار روغن نیروی اعمال شده بر پیستون را افزایش می‌دهد. این نیرو بر نیروی مقاوم فنر زیر پیستون غلبه کرده و پیستون به سمت پایین حرکت می‌کند. پایین رفتن پیستون تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که نیروی ناشی از فشار روغن با نیروی مقاوم فنر برابری کند. به این ترتیب شیر خفگی هم پایین رفته و انرژی ورودی به توربین کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۲۱. ساختار یک گاورنر هیدرولیکی ساده

دو سیستم گاورنر فوق نسبت به هم دارای معایب و مزایایی هستند. اصولاً گاورنرها یک سیستم کنترل خودکار هستند. در سیستمهای کنترلی دو کمیت مهم مورد توجه قرار می‌گیرند.

http://www.mohandes-iran.com

اولین کمیت مهم عقب ماندگی زمانی[1] سیستم کنترلی است. هر سیستم کنترلی با یک عقب ماندگی زمانی نسبت به کمیت اندازه‌گیری پاسخ می‌دهد. در یک سیستم کنترلی هرقدر این عقب‌ماندگی زمانی کوچکتر باشد، بهتر است. کمیت دوم مقدار نوسانات[2] در پاسخ سیستم کنترلی است. برای روشن شدن مطلب فرض کنید که می‌خواهید با ترکیب آب داغ و آب سرد دوش حمام آب گرم مناسب بوجود آورید. پر مسلم است که در اولین باز کردن شیرهای آب داغ و سرد موفق به این امر نمی‌شوید، بلکه با حدس و خطا یک بار آب سردتر از میزان مورد نظر شما و یک بار بیشتر از آن می‌شود و این عمل چندین بار تکرار شده تا در نهایت به میزان مورد نظر شما می‌رسد. در حقیقت شما یک عمل کنترلی با نواسانات میرا شونده انجام داده‌اید. البته در سیستمهای گاورنر سرعت میرایی سریعتر از مثال فوق می‌باشد، اما به هر حال این نوسانات وجود دارند. حال اگر در یک سیستم کنترلی این نوسانات کمتر باشد سیستم کنترلی بهتری خواهد بود.

گاورنرهای مکانیکی نسبت به نوع هیدرولیکی دارای عقب‌ماندگی زمانی بسیار کمی هستند اما نواسانات آنها به هنگام تنظیم قدرت نسبت به نوع هیدرولیکی بیشتر است. از طرف دیگر قدرت گاورنرهای مکانیکی برای جابجا کردن شیر (شیرها) در مقایسه با نوع هیدرولیکی کمتر است. به خصوص در توربینهای بزرگ که فشار بخار زیاد است نیروی زیادی برای بالا و پایین بردن مجموعهٔ شیرها مورد نیاز است، که گاورنر مکانیکی به تنهایی توان انجام چنین کاری را ندارد. در عوض در سیستمهای هیدرولیکی چون از فشار روغن برای این کار استفاده می‌شود، توان لازم در گاورنر وجود دارد. بنابراین به راحتی می‌توان پیش‌بینی کرد که در گاورنرهای هیدرولیکی - مکانیکی از تمامی مزیتهای هر دو دستهٔ قبل استفاده می‌شود. در اینجا شکل خاصی برای ساختار این گاورنر ارائه نمی‌شود، زیرا اساس و ساختمان هر یک از اجزای سازندهٔ آن قبلاً مشخص شد. فقط این نکته ذکر می‌شود که اهرم قسمت مکانیکی که به وزنه‌های دوار اتصال دارد به جای بالا و پایین بردن شیر مسیر بخار، یک شیر در مسیر روغن را بالا و پایین می‌برد که

[1]- Delay Time
[2]- Oscillation

http://www.mohandes-iran.com

میزان دبی جرمی روغن را در مسیر روغن تنظیم می‌کند. گاورنرهای وودوارد[1] معمولترین نوع این گاورنرها هستند که در توربینهای بزرگ صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

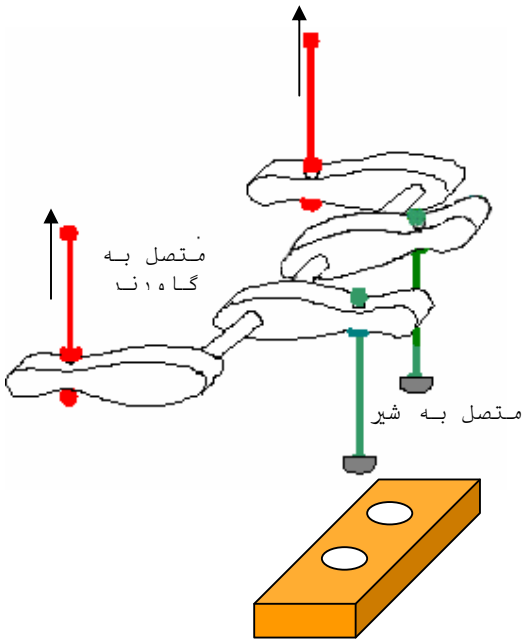
سروموتورها

در دو بخش قبل اصول و روشهای عملی تنظیم قدرت در توربین بررسی شد. همانطور که در قسمت اصول تنظیم قدرت بیان شد برای تنظیم به روش جرمی و یا ترکیبی باید از چند شیر مختلف استفاده کرد. همهٔ این شیرها توسط یک گاورنر به حرکت درمی‌آیند. لذا حرکت خطی محور خروجی گاورنر که در شکلهای ۲۰ و ۲۱ به شیر خفگی متصل بود، باید به یک سیستم خاص منتقل شود و این سیستم واسطه بتواند طبق یک الگوی طراحی شده شیرهای مختلف را به شکلی مناسب برای تنظیم قدرت در طیف گسترده‌ای باز و بسته (یا نیمه باز و بسته) کند. به این سیستم واسطه سروموتور می‌گویند.

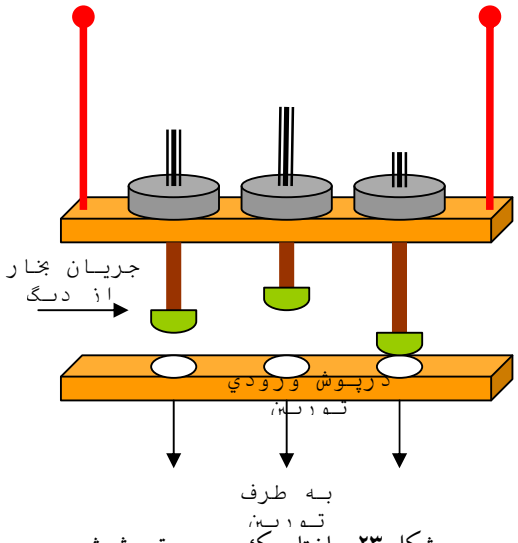
سروموتورها شکلهای مختلفی دارند که در اینجا به شکلی ساده ساختمان و نحوهٔ عملکرد دو نوع معمول از آنها بررسی می‌شوند. در شکل ۲۲ سروموتور نوع میل بادامکی[2] نشان داده شده است. این سروموتور از یک میل بادامک، که خیلی به میل بادامک موتور اتومبیل شباهت دارد، تشکیل شده است. حرکت اهرم خروجی گاورنر توسط یک بادامک دیگر که در انتهای میله قرار دارد به مجموعهٔ میل بادامک انتقال می‌یابد و باعث گردش زاویه‌ای آن می-شود. هر کدام از بادامکهای متصل به اهرمهای تنظیم شیرها در یک وضعیت زاویه‌ای مختلف قرار دارند. بنابراین گردش زاویه‌ای میل بادامک موجب قرار گرفتن شیرهای تنظیم در وضعیتهای متفاوت روی دریچه‌های درپوش ورودی توربین می‌شود. به این ترتیب کار تنظیم قدرت توربین انجام می‌گردد.

[1]- Woodward Governor
[2] - Cam-Rod Servomotor

http://www.mohandes-iran.com



شکل ۲۲. ساختار یک سروموتور میل بادامکی



شکل ۲۳. ساختار یک سروموتور شمشی

http://www.mohandes-iran.com

نوع دیگر سروموتور، سروموتور شمشی[1] است. از آنجا که درپوش ورودی توربین شکل یک شمش را دارد از این عبارت برای توصیف سروموتور مورد نظر استفاده می‌کنیم. یک شمش شبیه به درپوش ورودی توربین را در نظر بگیرید. میلهٔ شیرها از درون سوراخهای این شمش می‌گذرند. انتهای میلهٔ شیرها رزوه شده است به نحوی که می‌توان روی قسمت رزوه شده یک مهره بست. مهره‌ها در قسمتهای مختلف میله‌ها بسته می‌شوند، لذا ارتفاع میلهٔ شیرها با هم تفاوت دارد. حال اگر مجموعهٔ شامل شمش و شیرها بالا رود طبق شکل ۲۳ که ساختمان این نوع سروموتور را به صورت ساده‌ای نمایش می‌دهد، ابتدا شیر وسطی از نشیمنگاه[2] خود بلند می‌شود. این در حالی است که دو شیر طرفین هنوز روی نشیمنگاه خود قرار داشته و بخار از مجرای متناظر به آنها که بر درپوش ورودی توربین واقع است، عبور نمی‌کند. پس فقط از مجرای وسط بخار به داخل توربین وارد خواهد شد. اگر توربین به انرژی بیشتری نیاز داشته باشد، گاورنر مجموعهٔ فوقانی را بیشتر به سمت بالا حرکت داده و نوبت به بلند شدن شیر سمت چپ از روی نشیمنگاه آن می‌رسد. با افزایش نیاز بیشتر توربین به انرژی بخار شیر سوم هم از نشیمنگاه خود برخاسته و در نهایت حداکثر انرژی بخار وارد توربین خواهد شد. در صورت کاهش بار روی محور توربین تمامی عملیات فوق‌الذکر به صورت عکس اتفاق خواهد افتاد و انرژی بخار ورودی به توربین کاهش خواهد یافت.

دو نوع سروموتوری که در این مبحث معرفی شدند و اساس کار آنها بررسی شد، معمولترین سروموتورهایی هستند که در توربینهای صنعتی، که باید محدودهٔ وسیعی از قدرت را تولید کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر نوع سروموتور دیگری که در توربینهای بخار استفاده می‌شود به نحوی شبیه به یکی از این دو نوع سروموتور می‌باشد. لذا آشنایی با ساختمان و درک صحیح عملکرد این دو سروموتور اهمیت زیادی دارد.

[1] - Bar Servomotor
[2] - Seat

http://www.mohandes-iran.com

پرسشهای خودآزمایی فصل چهارم

۱- توان تولیدی توربین را چه چیز محدود و یا معین می کند؟

۲- توان مکانیکی در یک محور دوران چگونه محاسبه می شود؟ فرمول آن را بنویسید.

۳- توان مکانیکی توربین بر حسب مشخصات سیال چگونه محاسبه می شود؟ فرمول آن را بنویسید.

٤- اصول تنظیم خودکار قدرت توربین را نام برده و شرح دهید.

۵- روشهای تنظیم شیرهای بخار توربین رانام ببرید.

۶- گاورنر چیست؟

۷- انواع گاورنرها را بر حسب روش تحریک آنها نام ببرید.

۸- گاورنرهای مکانیکی و هیدرولیکی را با هم مقایسه کنید.

۹- سروموتور چیست؟ و دو نوع از آن را شرح دهید.

۱۰- فرق گاورنر و سروموتور چیست؟

http://www.mohandes-iran.com

فصل پنجم –ارتعاشات در توربین بخار

http://www.mohandes-iran.com

ارتعاشات مکانیکی[1] یکی از مهمترین پدیده های نامطلوب در ماشینهای دوار است. در این فصل این ارتعاشات در توربینها بررسی می شوند. ارتعاشات در توربینها به دلایل متعددی به وجود می آیند که در این فصل مهمترین مودهای ارتعاشی[2] مانند عدم بالانسینگ روتور[3]، دور بحرانی روتور[4]، و ارتعاش در یاتاقانها[5] معرفی و بررسی می شوند.

ارتعاشات ناشی از عدم بالانسینگ

به هنگام طراحی یک دستگاه مکانیکی نیروهای وارد بر آن باید مشخص باشند و یا حداقل تخمینی از آنها در نظر گرفته شود. این نیروها در تداوم طول عمر دستگاه دخیل هستند و افزایش بیش از حد مجاز آنها می‌تواند موجب شکست و از بین رفتن دستگاه شود. بسیاری از دستگاههای مکانیکی تحت تأثیر نیروهای تقریباً ثابتی قرار دارند. مثلاً یک برج تقطیر یا یک مبدل حرارتی عملاً متأثر از نیروهای ثقلی و نیروهای ناشی از جریان سیال است، که این نیروها معمولاً

[1] - Vibrations
[2] - Vibration Mode
[3] - Rotor Unbalancing
[4] - Rotor Critical Speed
[5] - Bearing Vibration

http://www.mohandes-iran.com

مقدار تقریباً ثابتی دارند. با اینحال در موارد انگشت شماری ممکن است این نیروها نوساناتی داشته باشند، که البته فرکانس و دامنهٔ این نوسانات زیاد نیست. اما دستگاههای دوار به علت حضور یک عضو دورانی در آنها، که معمولاً با سرعت زیادی هم می‌چرخد، همیشه در معرض خطر لرزش و ارتعاش با دامنه و فرکانس بالا هستند.

توربین هم به عنوان یک ماشین دوار همیشه در معرض خطر ارتعاش می‌باشد. در طراحی (شرایط کارکرد طراحی) روتور توربین دارای بالانسینگ نسبتاً کاملی است. بالانس بودن محور دوران توربین باعث می‌شود که نیروهای گریز از مرکز موجود روی محور به هنگام دوران آن به حداقل مقدار خود برسند. اشاره شد که بالانس محور نسبتاً کامل است، این بدان معنی است که میزان ارتعاشات محور ناشی از عدم بالانسینگ بسیار کوچک است اما صفر نیست. اصولاً به علت محدودیتهای ساخت و محدودیت دقت دستگاههای اندازه‌گیری هیچگاه نمی‌توان یک محور را به صورت کامل بالانس کرد. ریخته گری یک محور و سپس تراشکاری آن دارای محدودیتهای مذکور بوده و تنها به صورت نسبی و در حد خطای ابزار می‌توان یک محور را بالانس کرد. به همین خاطر اگر یک محور بیش از حد مجاز سرعت دورانی آن بچرخد خطر افزایش دامنهٔ نوسانات کوچکی که در شرایط کارکرد طبیعی سیستم اندک هستند، وجود دارد و ممکن است خسارت جبران‌ناپذیری به دستگاه وارد کند.

ارتعاشات در توربین به شکلها و دلایل مختلفی ممکن است اتفاق بیفتد. ساده‌ترین نوع ارتعاش در یک توربین ناشی از عدم بالانسینگ محور آن است. بالانس بودن محور توربین یعنی متقارن بودن کلیهٔ نیروهایی که محور را در یک یا چند نقطه روی محور قطع می‌کنند. بنابراین نیروهای محیطی و محوری روی بالانسینگ روتور تأثیر مستقیم ندارند، مگر اینکه این نیروها (و اصولاً تغییر این نیروها) باعث تغییر نیروهای متقاطع با محور شده و تقارن آنها را به هم بزنند.

عوامل مختلفی می‌توانند موجب به هم خوردن بالانس محور توربین شوند. اما به طور کلی هر عامل جرمی که تقارن هندسی و جرمی روتور را برهم زند می‌تواند موجب غیر بالانس شدن محور توربین شود. لازم به توضیح است که اولین و ساده‌ترین راه نزدیک شدن به حالت

http://www.mohandes-iran.com

بالانس یک محور، حفظ تقارن هندسی شکل محور است. این مطلب ذاتاً در شکل طراحی شدهٔ توربین منظور شده است. از جمله عواملی که تقارن هندسی و جرمی روتور توربین را به هم می‌زنند، شکسته شدن پره‌ها، پیچیدن پره‌های بلند عکس‌العملی نسبت به پیچ طراحی آنها، ساییده شدن پره، تشکیل رسوب روی پره، و تاب برداشتن شفت توربین هستند. البته مورد آخر نسبت به موارد قبل از آن کمتر اتفاق می‌افتد، زیرا ضخامت و استحکام شفت[1] به مراتب از پره‌ها بیشتر است. اما علیرغم این موضوع هرگونه امکانی باید در نظر گرفته شود. به عنوان مثال اگر بخار ورودی به توربین دارای ناخالصیهای معلق جامدی در خود باشد، مثلاً رسوبات[2] داخل دیگ بخار توسط جریان بخار به سمت توربین حمل شوند، این رسوبات ممکن است در قسمتهای کم-فشار توربین، که ممکن است طبقات عکس‌العملی با شعاع بزرگ باشد، روی پره ته‌نشین شده و بالانس روتور را به هم بزنند. حتی اگر همین ذرات جامد روی پره رسوب نکنند ممکن است در اثر برخورد با سطح پره موجب شکسته شدن لبه‌های نازک پره در قسمت خروجی آن و یا ساییده شدن بیش از حد سطح پره شده، و باز هم بالانسینگ روتور به هم بخورد. به هر حال با ثبت فرکانس و دامنهٔ ارتعاشات توربین شرایط بالنسینگ توربین را می‌توان بازرسی کرد و در صورت لزوم نسبت به بالانس کردن روتور توربین اقدام کرد. اصولاً فرکانس ارتعاشات ناشی از عدم بالانسینگ روتور با فرکانس دوران محور توربین (یا ضریب صحیحی از آن) برابر است.

ارتعاشات ناشی از عدم بالانسینگ روتور توربین شعاعی هستند. البته باید توجه داشت که ارتعاشات شعاعی توربین فقط به ارتعاشات ناشی از عدم بالانسینگ روتور خلاصه نمی‌شود، بلکه انواع دیگری از ارتعاشات شعاعی ممکن است ایجاد شوند که علت آنها پدیده‌های جریانی بخار در روتور یا روغن در یاتاقانها است. الگوی جریان سیال در یک مسیر به اختلاف فشار تحمیلی به دو طرف مسیر بستگی دارد. به هنگام طراحی براساس یک اختلاف فشار نامی، شکل هندسی پره-ها و مثلثهای سرعت به گونه‌ای که سرعتهای نسبی مماس بر پره‌ها باشند، انتخاب می‌شود. در حقیقت شرایط دائم کارکرد توربین که اپراتور پیوسته مراقب آن است همین شرایط مطلوب

[1] - Shaft
[2] - Scales

http://www.mohandes-iran.com

طراحی است. لذا اگر در عمل بنا به دلایلی اختلاف فشار در نظر گرفته شده در طراحی تغییر کند الگوی جریان هم عوض می‌شود. تغییر الگوی جریان در پره به دو صورت تأثیر گذار است؛ اگر الگوی جدید هم مثل الگوی طراحی پایدار باشد ارتعاشی در توربین القا نمی‌شود، زیرا باز هم همهٔ شرایط نسبت به محور متقارن است. فقط اندازهٔ نیروها تفاوت می‌کند که اصولاً این تغییر باعث کاهش راندمان توربین می‌شود، اما خسارتی به توربین وارد نمی‌کند. اگر الگوی جدید پایدار نبوده و پیوسته و با یک فرکانس خاص تغییر کند آنگاه نیروهای القایی نیز نوسانی شده و در نهایت یک ارتعاش نامطلوب را به توربین تحمیل می‌کند. این ارتعاش علاوه بر اینکه راندمان توربین را کاهش می‌دهد ممکن است خسارت جبران‌ناپذیری به آن وارد کند. معمولاً الگوهای ناپایدار با نوسانات فشار و دبی بخار همراه هستند. به این معنی که نوسانات فشار (و دبی جرمی) الگوهای جریانی نوسانی را ایجاد می‌کنند و الگوهای جریانی ناپایدار موجب نوسان فشار (و دبی جرمی) می‌شوند. مهمترین الگوی جریان دراین وضعیت تشکیل جریانهای گردابه‌ای روی پره‌ها (اعم از پره‌های ثابت و متحرک) است. در علم آئرودینامیک این پدیده به استال[1] موسوم است. نوسان فشار و دبی روغن در یاتاقانها نیز نیروی وارد به شفت را در محل یاتاقان نوسانی کرده و موجب نوسان شفت توربین می‌شود.

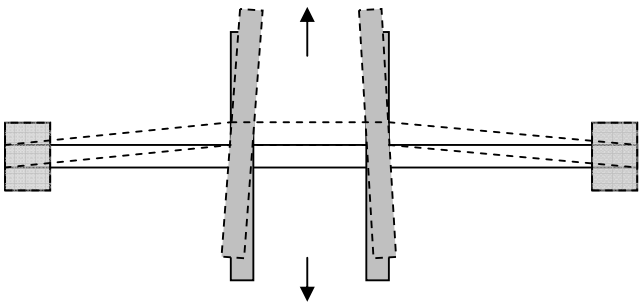
اما دستهٔ دیگری از ارتعاشات وجود دارند که در راستای محور توربین اتفاق می‌افتند. در یک عبارت کوتاه و مفید نوسانی شدن نیروها در راستای محوری باعث ارتعاش محوری در توربین می‌شود. عواملی که باعث نوسانی شدن نیروی محوری می‌شوند عموماً همان الگوهای جریانی سیال (جریان بخار روی پره‌ها و روغن در یاتاقانها) هستند. بنابراین توضیحی که در بالا آورده شد برای این دسته از ارتعاشات نیز مصداق دارد. آنچه در مورد این دسته از ارتعاشات نسبت به ارتعاشات شعاعی باید بیان شود این است که خطر ارتعاشات محوری نسبت به ارتعاشات شعاعی به مراتب بیشتر است. در ارتعاشات شعاعی جابجایی شعاعی در یک نقطه (یا چند نقطهٔ محدود) دارای مقدار ماکزیمم است و بنابراین احتمال تماس روتور با پوسته در یک نقطه وجود

[1] - Stall

http://www.mohandes-iran.com

دارد. اما در ارتعاش محوری احتمال تماس روتور با پوسته در تمام نقاط وجود دارد و در صورت بروز این پدیده تمام روتور (و پوسته) خسارت خواهد دید. علاوه بر این معمولاً لقی‌های محوری[1] روتور نسبت به لقی‌های شعاعی[2] آن بیشتر است. بنابراین اگر روتور توربین وزن زیادی داشته باشد ضربات ناشی از حرکت محوری روتور بر یاتاقان محوری و پوسته بسیار شدید خواهد بود.

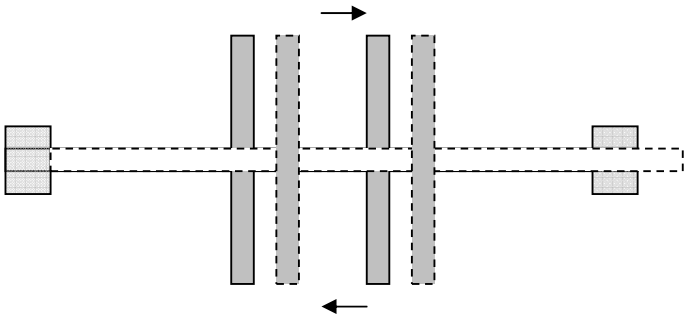
نوع دیگری از ارتعاشات در توربین وجود دارد که به علت اهمیت آن در هنگام راه‌اندازی و خاموش کردن نرمال[3] توربین، به صورت مجزا بررسی می‌شود. این ارتعاش در محور ذاتی هستند و به هیچ وجه نمی‌توان آنرا حذف کرد. به هر حال تشدید دامنهٔ هر یک از ارتعاشات فوق‌الذکر موجب تشدید دامنهٔ ارتعاشات دیگر نیز می‌شود. گویی همهٔ این ارتعاشات منتظر هستند تا یکی سر بلند کرده و بقیه به دنبال آن وارد عمل شوند. لذا بخش مهمی از سیستمهای اندازه‌گیری و مونیتورینگ اتاق کنترل به این پدیده اختصاص داده شده است. در شکلهای ۲۴ و ۲۵ به ترتیب به صورت نمادین ارتعاشات شعاعی و محوری یک روتور با دو ردیف پره نمایش داده شده است.



شکل ۲۴. ارتعاش شعاعی یک روتور

[1] - Axial Clearance
[2] - Radial Clearance
[3] - Normal Shutdown

http://www.mohandes-iran.com



شکل ۲۵. ارتعاش محوری یک رتور

دور بحرانی در توربین

نوع دیگری از ارتعاشات شعاعی در روتور توربین وجود دارد که به صورت ذاتی و جزیی از محور توربین (هر محور دورانی) است. یک محور دوران در حقیقت از بی‌نهایت سیستم جرم و فنر تشکیل شده است که به صورت یکپارچه به هم متصل هستند. لذا مثل هر سیستم جرم و فنری دارای مود ارتعاشی و فرکانس تشدید[1] است. این مودهای ارتعاشی با کوچکترین اختلالی رشد کرده و به ترتیب فرکانسهای کوچک به بزرگ تشدید می‌شوند. یعنی ابتدا مود ارتعاشی اول که دارای فرکانس تشدید کوچکتری است به دامنهٔ حداکثر خود می‌رسد، و سپس این پدیده برای مودهای ارتعاشی بعدی اتفاق می‌افتد.

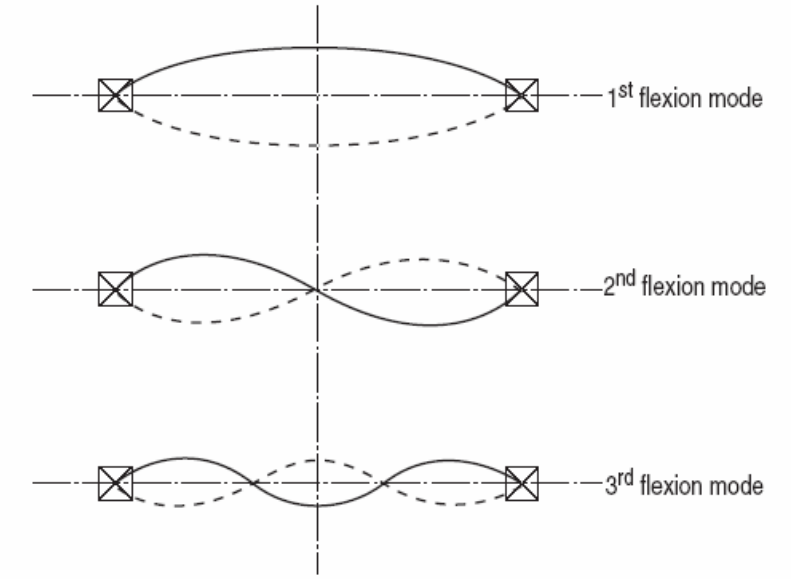
محوری را در نظر بگیرید که بین دو یاتاقان تکیه داده شده است. اصولاً چون هر محور دورانی دارای وزن است از ابتدا دارای یک انحراف نسبت به خط افق می‌باشد، که شکل اولیهٔ محور را به صورت شکم دار و به سمت پایین تغییر می‌دهد. در حقیقت اولین مود ارتعاشی محور همین وضعیت می‌باشد. دورانی شدن حرکت محور باعث می‌شود که این تغییر شکل به یک ارتعاش شعاعی تبدیل شود. با افزایش سرعت دورانی محور دامنهٔ این ارتعاش افزایش پیدا کرده و در یک سرعت خاص به حداکثر میزان خود می‌رسد. افزایش بیشتر سرعت باعث افزایش دامنهٔ ارتعاش این مود ارتعاشی نمی‌شود، بلکه موجب تغییر مود ارتعاشی محور دوران

[1] - Resonance Frequency

http://www.mohandes-iran.com

خواهد شد. در این زمان مکانیزم ارتعاشی محور به مود دوم حرکت ارتعاشی آن تبدیل می‌شود که در حقیقت دارای دو شکم و یگ نقطهٔ گره‌ای در وسط دو شکم می‌باشد. این بار با افزایش سرعت دورانی محور، دامنهٔ ارتعاشی مود دوم افزایش یافته و در یک سرعت خاص به حداکثر میزان خود می‌رسد. این پدیده برای مودهای بعدی هم به همین ترتیب تکرار می‌شود.

در شکل ۲۶ سه مود ارتعاشی اول یک محور به صورت شماتیک نشان داده شده است. توجه داشته باشید که در این شکل فرض شده که محور در محل یاتاقانها دارای حرکت شعاعی نیست و مثل یک تیر دو سر لولا در نظر گرفته شده است. سرعتهایی که در آنها دامنهٔ ارتعاش هر مود ارتعاشی ماکزیمم مقدار خود را احراز می‌کند سرعت بحرانی محور نامیده می‌شود، زیرا در این سرعتها خسارات فیزیکی زیادی ممکن است به محور و توربین وارد شود. بنابراین در هنگام طراحی، طراح دور نامی و شرایط طراحی را جایی در نظر می‌گیرد که به اندازهٔ کافی از دورهای بحرانی (متناظر به سرعت بحرانی) دور باشد.



شکل ۲۶. سه مود ارتعاشی اول یک محور

http://www.mohandes-iran.com

همانطور که از شکل ۲۶ معلوم است دامنهٔ تشدید مود اول (یا همان دامنهٔ ارتعاش دور بحرانی اول) از مودهای بعدی بزرگتر است. اما از آنجا که انرژی ارتعاش علاوه بر توان دوم دامنهٔ ارتعاش، به تعداد مودهای ارتعاشی نیز وابسته است، انرژی ارتعاشی دورهای بحرانی بعدی از انرژی دور بحرانی اول بیشتر است. به همین دلیل خسارات ناشی از دور بحرانی اول بیشتر به صورت تماس فیزیکی بین محور و پوسته دیده می‌شود، حال آنکه خسارات ناشی از دورهای بحرانی بعدی بیشتر روی یاتاقانها تأثیر نامطلوب و مخرب ایجاد می‌کند، به خصوص که محور در محل خود یاتاقانها هم دارای ارتعاشاتی است که در بخش بعد به بررسی آن پرداخته می‌شود.

دور بحرانی یک محور به عوامل مختلفی بستگی دارد که البته مهمترین آنها جنس محور، قطر محور، و طول محور (فاصلهٔ دو یاتاقان متوالی) هستند. در اینجا فقط به مشخصات فیزیکی پرداخته می‌شود. اصولاً هرچه‌قدر طول محور بیشتر شود عدد دورهای بحرانی محور کاهش یافته (دامنهٔ ارتعاش زودتر تشدید می‌شود) و هرچه‌قدر قطر محور افزایش یابد عدد دور بحرانی افزایش می‌یابد (دامنهٔ ارتعاش دیرتر تشدید می‌شود). این مطلب را به صورت رابطهٔ تناسبی زیر می‌توان نشان داد:

$$N_{cr} \propto \frac{d^4}{l} \qquad (۸)$$

که در آن Ncr دور بحرانی محور، l طول محور، و d قطر محور می‌باشند.

از رابطهٔ (۸) نتایج کیفی مناسبی به دست می‌آیند که در تعمیرات و بهره برداری اهمیت دارد. مثلاً اگر محور یک توربین تراش داده شود، قطر آن کاهش پیدا می‌کند. بنابراین انتظار داریم که دور بحرانی آن کوچکتر شود. هرچند که میزان تراشی که در عمل روی یک محور به صورت مجاز می‌تواند انجام شود بسیار اندک (در بعضی موارد اصلاً غیر مجاز) است، اما توجه به این نکته در موارد تراشکاری شده بسیار حایز اهمیت است. یک محور توربین بزرگ ممکن است روی چندین یاتاقان متوالی نصب شود، بنابراین هر قسمت از محور دارای هندسه و

http://www.mohandes-iran.com

مشخصات خود می‌باشد که این امر باعث می‌شود یک محور دارای چندین دور بحرانی متناظر به قسمتهای مختلف آن باشد.

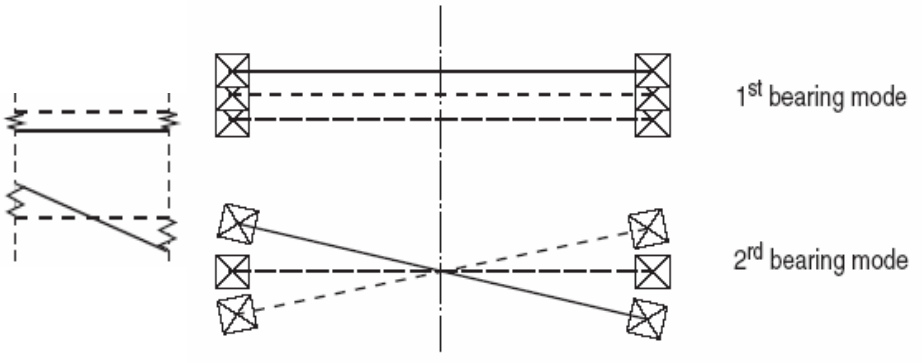
همانطور که گفته شد به هنگام طراحی توربین سرعت (دور) نامی کارکرد دستگاه به اندازهٔ کافی از دور (دورهای) بحرانی محور آن با فاصله انتخاب می‌شود. لذا هر محوری دارای یک دور نامی می‌باشد که در شرایط طبیعی و در اکثر مدت زمان سرویس‌دهی آن با این سرعت کار می‌کند. حال باید دورهای بحرانی محور را با این دور نامی مقایسه کرد. اگر دور نامی دستگاه کمتر از اولین دور بحرانی محور آن باشد اصطلاحاً می‌گویند شفت دستگاه صلب[1] است. زیرا در محدودهٔ کارکرد دستگاه که شامل راه‌اندازی آن (از سرعت دورانی صفر تا سرعت نامی آن) نیز می‌شود هیچگاه دامنهٔ ارتعاش طبیعی محور حداکثر نمی‌شود. اما اگر دور نامی دستگاه لااقل بیشتر از اولین دور بحرانی محور آن باشد، در اصطلاح می‌گویند شفت دستگاه انعطاف‌پذیر[2] است. کلمهٔ انعطاف‌پذیر به خاطر این است که اپراتور متوجه باشد به هنگام راه‌اندازی دستگاه باید از دور بحرانی هم عبور کند و در نزدیکی این دور با کمترین تأمل از آن عبور کند. به عنوان مثال فرض کنید دور نامی یک توربین ۱۶۰۰ دور در دقیقه و اولین دور بحرانی آن ۱۰۰۰ دور در دقیقه باشد. اگر در فرایند راه‌اندازی دور توربین را ۵۰ دور ۵۰ دور اضافه کنیم در نزدیکی دور بحرانی باید مقدار افزایش دور را به بیش از ۵۰ دور رساند. مثلاً پس از رسیدن به دور ۸۵۰ دور در دقیقه به یکباره ۳۰۰ دور به سرعت توربین افزوده شود. این کار باعث می‌شود که توربین مدت زمان زیادی با سرعت بحرانی نچرخد و فرصت لازم برای تشدید دامنهٔ ارتعاش مود اول بوجود نیاید. در صورتیکه دور نامی توربین از دورهای بحرانی بعدی هم بیشتر باشد، باید این روش در دورهای بالاتر هم تکرار شود.

[1] - Rigid Shaft
[2] - Flexible Shaft

http://www.mohandes-iran.com

ارتعاش در یاتاقانها

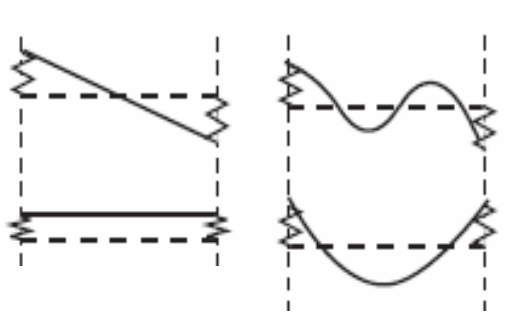
آخرین نوع ارتعاشاتی که در محورها ممکن است اتفاق بیفتد، ناشی از لقی محور در یاتاقانها است. برای مجزا کردن این نوع از ارتعاشات محور از انواع قبلی فرض می‌کنیم که یاتاقان مثل یک فنر ارتجاعی عمل می‌کند و محور کاملاً مستقیم و در امتداد یک خط راست قرار می-گیرد. بنابراین با میله‌ای صلب و بدون ارتعاش روبرو هستیم که روی دو فنر تکیه دارد. تنها امکان ارتعاش این سیستم از محلهای تکیه‌گاهی آن است. دو حالت مختلف ارتعاشی (دو مود ارتعاشی) برای این سیستم ارتجاعی می‌توان در نظر گرفت. طبق شکل ۲۷ مود اول ارتعاش حالتی است که هر دو تکیه‌گاه هم جهت با هم ارتعاش کنند، . مود دوم ارتعاش حالتی است که تکیه‌گاهها در خلاف جهت یکدیگر ارتعاش کنند. مثل هر ارتعاش دیگری این مودهای ارتعاشی نیز دارای دامنهٔ تشدیدی هستند که در یک سرعت و فرکانس خاص اتفاق می‌افتد. در اینجا هدف بررسی این حالتهای تشدید نیست، زیرا دامنهٔ ارتعاش این تکیه‌گاهها در مقایسه با ارتعاشاتی که قبلاً بررسی شدند کوچکتر است، و در ضمن ترکیب این مودهای ارتعاشی تکیه‌گاهی با ارتعاشات قبلی اهمیت بیشتری دارد و موجب تقویت ارتعاشات فوق‌الذکر می‌شود.



شکل ۲۷. دو مود ارتعاشی یاتاقانها

http://www.mohandes-iran.com

شکل ۲۸ ترکیب مودهای ارتعاش طبیعی و ارتعاش تکیه‌گاهی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود ترکیبات مختلفی بوجود می‌آیند که می‌توانند خسارات جبران‌ناپذیری به توربین وارد کنند. بدترین وضعیت زمانی اتفاق خواهد افتاد که فرکانس تشدید دو یا چند مود ارتعاشی مختلف بر هم منطبق یا به هم نزدیک باشند. البته در یک طراحی خوب ، طراح با انتخاب ابعاد مناسب فاصلهٔ کافی بین این فرکانسها ایجاد می‌کند تا احتمال خسارت را در محدودهٔ عملکرد توربین کاهش دهد.



شکل ۲۸. ترکیب مودهای ارتعاشی طبیعی و تکیه‌گاهی

پرسشهای خودآزمایی فصل پنجم

۱- انواع ارتعاش در محور یک توربین کدامند؟

۲- دلایل عدم بالانسینگ یک محور دوران را نام ببرید.

۳- آیا از نظر عملی یک محور دوران می تواند به صورت مطلق بالانس شود؟ چرا؟

٤- آیا به هم خوردن الگوی جریان در پره های توربین نسبت به حالت طراحی، همیشه خسارت ایجاد می کند؟ پاسخ خود را شرح دهید.

۵- دور بحرانی در یک محور چیست؟

۶- آیا یک محور می تواند دور بحرانی نداشته باشد؟ چرا؟

۷- آیا دور بحرانی در تمام ماشینهای دوار به هنگام بهره برداری اتفاق می افتد؟

http://www.mohandes-iran.com

۸- دورهای بحرانی یک محور را شرح دهید.

۹- کدامیک از دورهای بحرانی خطر بیشتری دارند؟ چرا؟

۱۰- دور بحرانی یک محور به چه عواملی وابسته است؟

۱۱- ارتعاشات یاتاقانهای دو طرف یک محور چند مود نوسانی دارند؟ آنها را به صورت ترسیمی نمایش دهید.

۱۲- کدامیک از ارتعاشات سؤال ۱ را می توان تقلیل داد؟ چگونه؟

http://www.mohandes-iran.com

فصل ششم – سیستم روغن در توربین

http://www.mohandes-iran.com

دستگاههای دواری مثل توربین، کمپرسور، و غیره، ماشینهایی هستند که دو مشخصهٔ عملیاتی خاص دارند. در این دستگاهها اولاً یک محور دوران وجود دارد که باید به راحتی در یاتاقانهای خود بچرخد، و ثانیاً بین درون و برون آن اختلاف فشارهای قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. از طرف دیگر سیستمهای کنترلی و اندازه‌گیری این دستگاهها هم برای انجام وظیفهٔ خود به جریان سیالی به غیر از سیال عامل عبوری از درون دستگاه نیاز دارد. این سیال ثانویه ممکن است هوا (سیستمهای پنوماتیک[۱]) یا روغن (سیستمهای هیدرولیک[۲]) باشند.

به هر شکل اگر روانکاری[۳] یاتاقانهای توربین را به عنوان یک عمل لازم و حیاتی برای توربین در نظر بگیریم، یک سیستم روغنکاری[۴] برای توربین باید وجود داشته باشد. یک سیستم روغن ممکن است سه وظیفهٔ مختلف را داشته باشد که بر حسب درجهٔ اهمیت این سه وظیفه عبارتند از:

الف- روانکاری یاتاقانها (وخنک کاری آنها) (Lubrication Oil)

[1] - pneumatic System
[2] - Hydraulic System
[3] - Lubrication
[4] - Lubrication System

http://www.mohandes-iran.com

ب- استفاده از فشار روغن در آب‌بندی (Sealing Oil)

ج- استفاده از فشار روغن در سیستمهای کنترلی

البته روغن مورد استفاده در سیستم کنترلی اصولاً روغن هیدرولیکی است که کمی با روغن مورد استفاده در روانکاری تفاوت دارد. روغن روانکاری در مقابل حرارت مقاوم بوده و خواص آن خیلی به دما وابسته نیست. زیرا در صورتیکه لزجت روغن در اثر تماس با یاتاقانهای توربین که داغ هستند، کاهش یابد کار روانکاری یاتاقان به خوبی انجام نشده و توربین صدمه خواهد دید.

روغن در یاتاقانها علاوه بر روانکاری یاتاقان، ذرات ریز گرد و غبار، پلیسه‌ها و کثافات وارد شده به یاتاقان، و همچنین حرارت یاتاقان را جذب می‌کند. بنابراین برای حمل ذرات و حرارت از درون یاتاقان به بیرون از آن باید روغن در گردش باشد. خلوص روغن و دمای پایین از مهمترین پارامترهای روغن ورودی به یاتاقانها (و دیگر قسمتها از جمله آب‌بندها) هستند. لذا در مسیر گردش روغن باید تجهیزاتی نصب شود تا علاوه بر اعمال فشار لازم برای به گردش درآمدن روغن، کار پالایش و جذب حرارت منتقل شده توسط روغن و دفع این حرارت به محیط دیگر را انجام دهند.

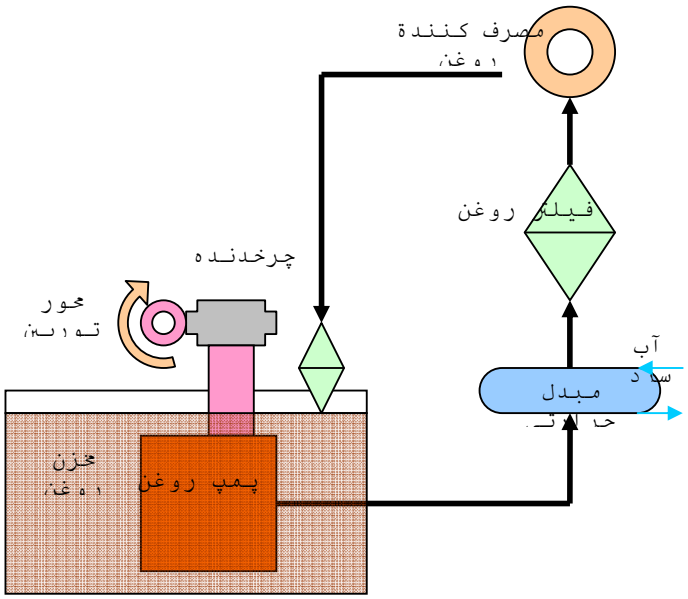
برای تصفیه کردن روغن از فیلتر روغن[1] استفاده می شود، و برای دفع حرارت از روغن هم از مبدل حرارتی می‌توان استفاده کرد. البته کار فیلتر کردن روغن را در چند مرحله می‌توان انجام داد، اما خنک‌کاری روغن در یک مرحله کفایت می‌کند. در اینجا یک سیستم روغن به صورت بسیار ساده معرفی می‌شود. در عمل ممکن است یک سیستم روغن به مراتب پیچیده‌تر از سیستم معرفی شده در این مبحث باشد، اما آنچه در اینجا مورد نظر است این است که خواننده با حداقل تجهیزات لازم در یک سیستم روغن و ترتیب قرار گرفتن آنها آشنا شود.

شکل ۲۹ به صورت شماتیک یک سیستم روغن ساده و حداقل تجهیزات لازم برای این سیستم را نشان می‌دهد. این سیستم شامل یک مخزن روغن[2]، پمپ روغن[1] ، مبدل حرارتی، فیلتر

[1] - Oil Filter
[2] - Oil Reservoir

http://www.mohandes-iran.com

مسیر رفت، و فیلتر مسیر برگشت می‌باشد. مخزن روغن باید به اندازهٔ کافی روغن داشته باشد چرا که اولاً پس از استارت کردن توربین بخشی از روغن مخزن به درون مسیرهای گردش روغن و یاتاقانها می‌رود و ثانیاً در مسیر روغن مقداری نشتی، تبخیر و پرت روغن وجود دارد. روی مخزن روغن باید دو خط نشانه که نشان دهندهٔ مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم روغن هستند وجود داشته باشد. پر مسلم است که کاهش سطح روغن در مخزن از مقدار می‌نیمم آن خطر کاهش فشار روغن و کمبود روغن در یاتاقانها را دارد. اما در مورد مقدار ماکزیمم روغن کمی توضیح لازم است.



شکل ۲۹. ساختار یک سیستم روغن ساده

روغنی که در مسیر روغنکاری گردش دارد، مقداری گاز و بخار را در خود حل می‌کند. اگر این گازها در چرخهٔ مجدد روغن بمانند خطر خوردگی و آسیب دیدن یاتاقانها وجود خواهد

[1] - Oil Pump

http://www.mohandes-iran.com

داشت. برای آزاد شدن یک گاز محلول در یک مایع یکی از دو شرط زیر لازم است؛ کاهش فشار محلول یا افزایش دمای محلول. این دو شرط از قوانین هانری برای حلالیت یک گاز در یک مایع نشأت می‌گیرند. اگر روغن تمام فضای مخزن را اشغال کند فشار محلول روغن برگشتی کاهش نمی‌یابد و گازهای محلول در روغن آزاد نمی‌شوند. از طرف دیگر فضای لازم برای حرکت گازهای آزاد شده به علت تلاطم یا غلیان روغن در مخزن از بین می‌رود.

همانطور که قبلاً گفته شد تأمین روغن و فشار کافی آن یکی از حیاتی‌ترین وظایف سیستم روغن می‌باشد. از آنجا که هیچ قطعیتی در مورد درست و دائم کار کردن پمپ روغن وجود ندارد، نمی‌توان به نصب یک پمپ روغن تنها در این سیستم کفایت کرد. چرا که این احتمال وجود دارد که پمپ روغن بنا به دلایلی از کار بیفتد. برای پیشگیری از چنین وضعیت خطرناکی علاوه بر پمپ اصلی[1] از یک پمپ یدکی هم استفاده می‌شود. معمولاً پمپ اصلی توسط خود توربین می‌چرخد و پمپ یدکی توسط یک الکتروموتور چرخانده می‌شود. در بعضی از توربینهای بزرگ حتی به این پمپ یدکی هم اکتفا نکرده و از یک پمپ آماده برای سرویس[2] هم استفاده می‌کنند تا در صورت از کار افتادن هر دو پمپ قبلی از این پمپ استفاده شود. این پمپ به صورت خودکار با کاهش فشار روغن در سیستم روشن می‌شود. علاوه بر سه پمپ فوق در بعضی از توربینها از یک مخزن بالایی[3] هم استفاده می‌شود که در صورت از کار افتادن همزمان هر سه پمپ، از روغن ذخیره شده در این مخزن که نسبت به توربین ارتفاع دارد، بتوان استفاده کرد و تا مدت زمانی کافی فشار روغن مورد نیاز توربین را تأمین کرد.

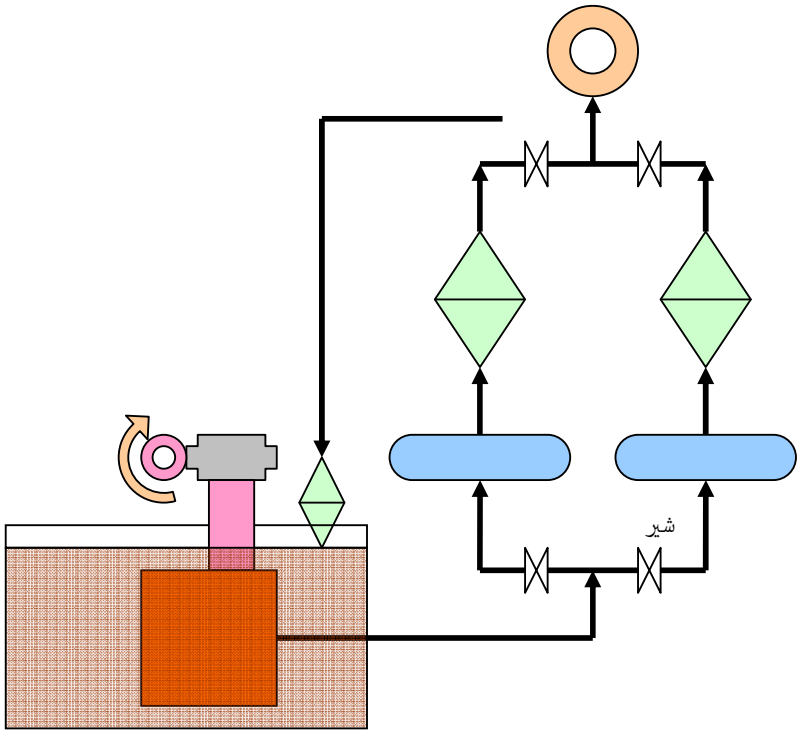
از آنجا که در مبدل حرارتی ممکن است ذرات آب یا آشغال وارد روغن شود، فیلتر نهایی را پس از مبدل و درست قبل از مصرف کنندهٔ روغن قرار می‌دهند. بنابراین ابتدا روغن وارد مبدل شده و پس از سرد شدن وارد فیلتر می‌شود. چون روغن سرد در فیلتر بهتر تصفیه می‌شود، این ترتیب به بالا رفتن خلوص روغن نیز کمک می‌کند.

---

[1] - Main Pump
[2] - Standby Pump
[3] - Overhead Tank

http://www.mohandes-iran.com

از سرویس خارج شدن سیستم روغن موجب از سرویس خارج شدن توربین می‌شود و در اکثر موارد خاموش شدن توربین به معنی از کار افتادن کارخانه است. لذا قسمتهایی که در مدت زمان کوتاهی نیاز به سرویس و تمیزکاری پیدا می‌کنند باید به شیوه‌ای ساخته و نصب شوند که سرویس کردن آنها خللی به کار کردن توربین وارد نکند. این کار با دومسیره کردن جریان روغن از درون مبدل و فیلتر امکان‌پذیر است. به این ترتیب که مسیر رفت روغن پس از پمپ معمولاً به دو شاخهٔ مشابه تقسیم می‌شود، که هر شاخه شامل یک مبدل حرارتی و یک فیلتر روغن است. در شکل ۳۰ نمایی از این مسیر دو راهه نشان داده شده است. یکی از این دو مسیر در سرویس قرار داشته و همزمان مسیر دیگر نظافت و تمیزکاری می‌شود. پس از تمیزکاری، تا زمان کثیف شدن مسیر در حال سرویس‌دهی، این مسیر به صورت آماده به کار باقی می‌ماند و در آن زمان با باز کردن مسیر تمیز شده، مسیری که به تمیزکاری نیاز دارد بسته می‌شود.



شکل ۳۰. مسیر دو راههٔ مبدل حرارتی و فیلتر در سیستم روغن

http://www.mohandes-iran.com

پرسشهای خودآزمایی فصل ششم

۱- وظایف یک سیستم روغن کدامند؟

۲- روانکار چه وظایفی را در یاتاقانها انجام می دهد؟

۳- چرا باید گازهای محلول در روغن از آن جدا شوند؟

٤- روشهای جدا کردن گازهای محلول از روغن کدامند؟

۵- اجزای یک سیستم روغن را شرح دهید.

۶- چرا بهتر است سیستم روغن دو راهه باشد؟

۷- به نظر شما اولین واحد جنبی که باید در فرایند راه اندازی یک سیستم توربین بازرسی شود کدام است؟ چرا؟

http://www.mohandes-iran.com

فصل هفتم – سیستم حفاظتی توربین

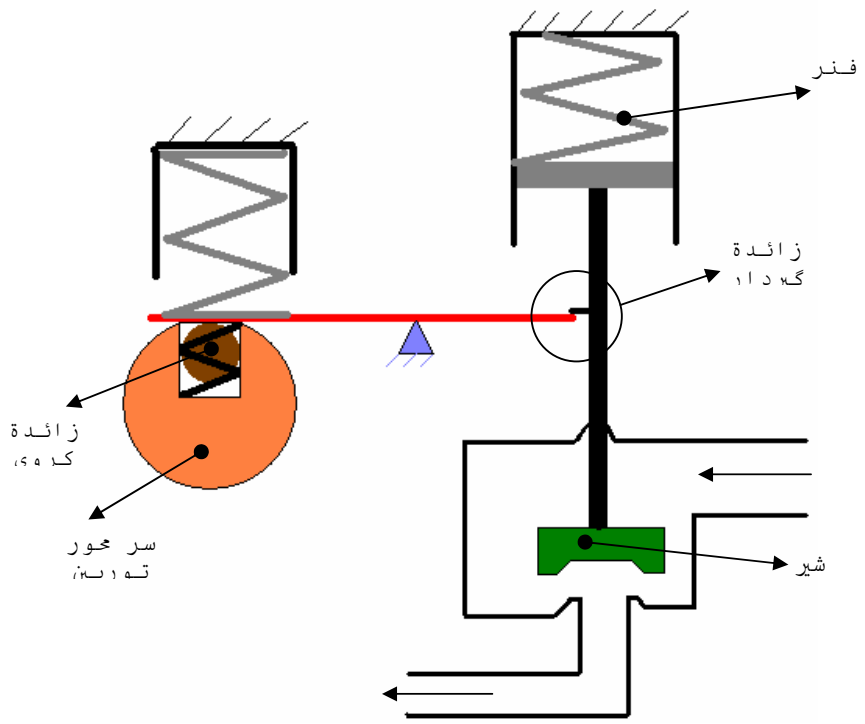
http://www.mohandes-iran.com

در بخشهای گذشته در مورد تنظیم قدرت توربین و روشها و دستگاههای خاص این امر صحبت شد. همانطور که گفته شد معیار اندازه‌گیری گاورنر برای تنظیم قدرت توربین سرعت دورانی محور است. اگر گشتاور مقاوم از روی محور توربین برداشته شود خطر بالارفتن سرعت توربین، افزایش ارتعاشات و از بین رفتن یاتاقانها، و همینطور شکسته شدن محور توربین وجود دارد. حال دو وضعیت بحرانی را در نظر بگیرید. اول اینکه بنا به دلایلی سیستم تنظیم قدرت و گاورنر درست عمل نکند. مثلاً اهرم گاورنر یا اهرم یکی از شیرهای سروموتور گیر داشته و یا شکسته شده باشد. در اینحالت اگر گشتاور روی توربین کم شود سرعت توربین بدون اینکه گاورنر قادر به تنظیم آن باشد افزایش پیدا می‌کند. دوم اینکه فرض کنید گاورنر عمل می‌کند اما گشتاور مقاوم روی محور توربین به صورت ناگهانی صفر می‌شود. در اینحالت چون سیستم تنظیم قدرت مثل هر سیستم کنترلی دیگر با یک تأخیر زمانی مواجه است، گاورنر به تنهایی نمی‌تواند از حد مجاز گذشتن سرعت توربین[1] جلوگیری کند.

[1] - Over Speed

http://www.mohandes-iran.com

در هر دو وضعیت توصیف شده باید یک سیستم حفاظتی روی توربین قرار داد تا با کمترین تأخیر زمانی و به صورت سریع انرژی ورودی به توربین را کاملاً قطع کند. از این سیستم برای خاموش کردن توربین به صورت غیر نرمال هم می‌توان استفاده کرد. برای این کار همانطور که قبلاً هم گفته شد از یک سیستم کاملاً مکانیکی باید بهره گرفت تا تأخیر زمانی آن حداقل باشد. کافیست یک شیر در سر راه جریان بخار و قبل از ورود آن به گاورنر و سروموتور قرار دهیم، به نحوی که در چنین شرایطی این شیر به سرعت بسته شود. این شیر که بین لولهٔ بخار و توربین قرار دارد، شیر ایست اصلی[1] نامیده می‌شود.



شکل ۳۱. مکانیزم عملکرد شیر ایست اصلی

شکل ۳۱ به صورت ساده مکانیزم عملکرد این شیر را نشان می‌دهد. در یک سر انتهایی محور توربین شکافی در راستای شعاعی ایجاد می‌شود. درون این شکاف یک زائدهٔ کروی که توسط یک

[1] - Main Stop Valve

http://www.mohandes-iran.com

فنر مهار شده است، قراردارد. یک اهرم که زیر زائدهٔ گیردار متصل به اهرم محرک شیر ایست اصلی است، پیوسته با فشار فنر به سطح جانبی محور توربین تماس دارد. زائدهٔ کروی تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز تمایل به خارج شدن از شکاف را دارد. هرچه قدر سرعت دورانی محور بیشتر شود این تمایل هم افزایش می‌یابد. اما نیروی فنری که زائدهٔ کروی را مهار می‌کند به گونه‌ای تنظیم می‌شود که تا حدود ده درصد افزایش سرعت، نسبت به سرعت نامی اجازهٔ خارج شدن از شکاف را به این زائدهٔ کروی نمی‌دهد. بنابراین اگر سرعت دورانی محور به دلایلی که قبلاً ذکر شد بیش از حد مجاز شود، فنر دیگر توانایی مهار کردن زائدهٔ کروی را نخواهد داشت و اولین بار که این زائده به زیر اهرم مهار کنندهٔ محور شیر ایست اصلی برسد آنرا از روی محور توربین بلند کرده و این اهرم حول لولای میانی می‌چرخد. چرخش این اهرم حول این لولا زائدهٔ گیردار را از زیر زبانهٔ متصل به اهرم شیر ایست اصلی کنار زده و شیر ایست اصلی به کمک نیروی فنری که پشت آن قرار دارد به سرعت به سمت پایین حرکت کرده و روی نشیمنگاه خود که محل عبور بخار به درون سیستم گاورنر است قرار می‌گیرد. به این ترتیب مسیر جریان بخار (انرژی) به درون توربین به کلی قطع می‌شود.

پرسشهای خودآزمایی هفتم

۱- چرا از سیستم حفاظتی در توربین استفاده می شود؟

۲- چرا سیستم شیر ایست اصلی باید کاملاً مکانیکی باشد؟

۳- ساختمان و نحوهٔ عملکرد یک سیستم شیر ایست اصلی را شرح دهید.

http://www.mohandes-iran.com

فصل هشتم – کاربردهای توربین در صنعت

http://www.mohandes-iran.com

پس از آشنایی با ساختمان و نحوهٔ تنظیم قدرت و سرعت در توربینها می‌توان کاربردهای آنها را در صنعت برشمرد. بدون آشنایی با موارد فوق فهم و درک کاربردهای توربین در صنعت به خوبی امکان‌پذیر نیست. همانطور که تا به حال متوجه شده‌اید خصوصیتهای مهم توربینها از نظر بهره‌برداری انعطاف‌پذیری و قابلیت تنظیم قدرت و سرعت دورانی در این نوع از مولدهای توان مکانیکی است. لذا توربینها برای هر مصرف کنندهٔ توان مکانیکی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. اما مهمترین مورد مصرف آنها برای تولید انرژی الکتریکی است که خود کاربردهای زیادی از جمله در الکتروموتورها دارد.

در مقابل توربینها الکتروموتورها کاربرد وسیعی در صنعت دارند، اما این دسته از مولدهای توان مکانیکی دارای محدودیتهای زیادی هستند. برای چرخاندن کمپرسورهای بزرگ نمی‌توان از الکتروموتور استفاده کرد. در عوض به کمک توربینها به راحتی می‌توان این کار را انجام داد. از طرف دیگر الکتروموتورهای معمولی دارای دور ثابتی هستند و استفاده از آنها برای چرخاندن پمپها و کمپرسورهایی که ظرفیت جرمی آنها از طریق تغییر دور صورت می‌گیرد، یا مقرون به صرفه نیست و یا اصلاً امکان‌پذیر نیست. در این دستگاهها نیز استفاده از توربینها

http://www.mohandes-iran.com

قابلیتهای مورد نظر را بوجود می‌آورد. بسیاری از پمپها توسط توربینهای کورتیس کوچکی می-چرخند که اصولاً این پمپمها باید دبی های مختلف را در دورهای متفاوت از خود عبور دهند.

با این توضیحات مهمترین کاربردهای توربین در صنعت را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

الف- تولید انرژی الکتریکی (چرخاندن ژنراتور برق)

ب- چرخاندن کمپرسورهای بزرگ و دور متغیر

ج- چرخاندن پمپهای بزرگ و دور متغیر

پرسشهای خودآزمایی فصل هشتم

۱- به عنوان مولد توان مکانیکی یک توربین و یک الکتروموتور را با هم مقایسه کنید.

۲- مهمترین کاربردهای توربین در صنعت کدامند؟

http://www.mohandes-iran.com

مراجع

۱- " توربوماشینهای جریان هیدرولیکی و قابل تراکم "، نوشتهٔ ا- تی- سایرز، ترجمهٔ دکتر محمد حسن شجاعی فرد، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران

2- " Fundamentals of Classical Thermodynamics ", Gordon J. Van Wylen, John Wiley & Sons

۳- جزوهٔ درس توربوماشینها، نوشتهٔ دکتر محسن گودرزی، دانشگاه بوعلی سینا

٤- " تأسیسات دیگهای بخار و توربین بخار " نوشتهٔ دکتر سینا، دفتر مدارس عالی

http//:www.energy.alstom.com

http//:www.siemens.de/kwu

http://www.mohandes-iran.com