

بسم الله الرحمن الرحيم

## توربوماشین‌ها



محمدصادق کریمی

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف



## طرح درس

مقدمه‌ای بر توربوماشین‌ها

پمپ‌های هیدرولیکی

پمپ و مدار

توربین‌های هیدرولیکی

توربین‌های بادی

کاربرد توربوماشین‌های تراکم‌پذیر

کمپرسورهای گریز از مرکز

کمپرسورهای محوری

توربین‌های محوری (گاز و بخار)

توربین‌های شعاعی

تمرکز بر توربوماشین‌های تراکم ناپذیر

تمرکز بر توربوماشین‌های تراکم پذیر





|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| مقدمه‌ای بر توربوماشین‌ها و تجهیزات سیالی            | ۱-۱ |
| مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت                  | ۲-۱ |
| دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن | ۳-۱ |
| کمیت‌های اصلی و تعاریف                               | ۴-۱ |
| منحنی‌های مشخصه توربوماشین‌ها                        | ۵-۱ |
| تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر و تراکم پذیر  | ۶-۱ |





## مقدمه‌ای بر توربوماشین‌ها و تجهیزات سیالی

توربوماشین: توربو (چرخنده) + ماشین

تعریف: یک تجهیز مکانیکی که در اثر عکس العمل‌های دینامیکی بین قطعه دوار و سیال، انرژی را از سیال استخراج یا به آن اضافه می‌کند.

مثال: انواع پمپ، کمپرسور، توربین (توربین بخار/گاز، آب، باد و غیره)

سوال: آیا قلب یک توربوماشین است؟







## مقدمه‌ای بر توربوماشین‌ها و تجهیزات سیالی

ماشین‌های سیالی (Fluid machinery): هر تجهیزیه که به منظور به کارگیری، کنترل یا اصلاح جریان سیال استفاده شود.

□ کنترل و تغییر جریان سیال عمدتاً همراه با تغییر ممنتوم سیال و تغییر انرژی آن است. از این رو به ماشین‌های سیالی، ماشین‌های تبدیل انرژی سیال نیز گفته می‌شود.

ماشین‌های توان‌ده (Power Producing): انرژی از سیال به ماشین منتقل شده و برای ما کار انجام می‌دهد. مانند توربین، آسیاب و موتور ماشین

ماشین‌های توان‌گیر (Power absorbing): انرژی از ماشین به سیال منتقل شده و کار مصرف می‌گردد. مانند پمپ، فن و کمپرسور

انواع ماشین‌های سیالی  
(جهت تبادل انرژی)



## مقدمه‌ای بر توربوماشین‌ها و تجهیزات سیالی

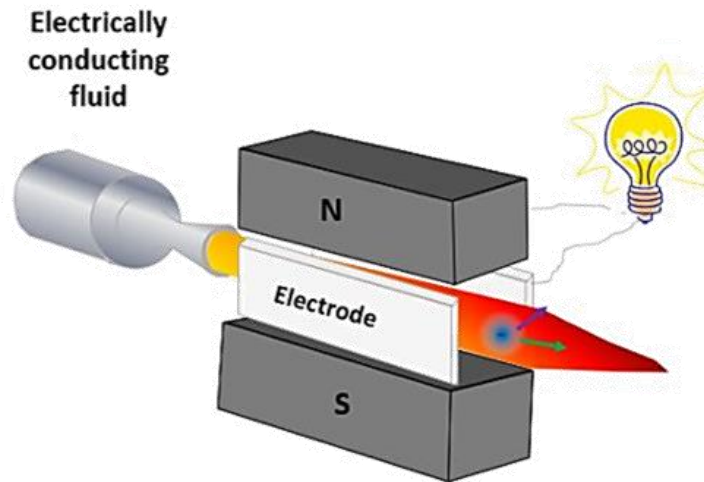
✓ ماشین‌های سیالی ممکن است قطعه محرک داشته و یا فاقد هرگونه قطعه متحرک باشند.

انواع ماشین‌های سیالی  
(ساختمان)

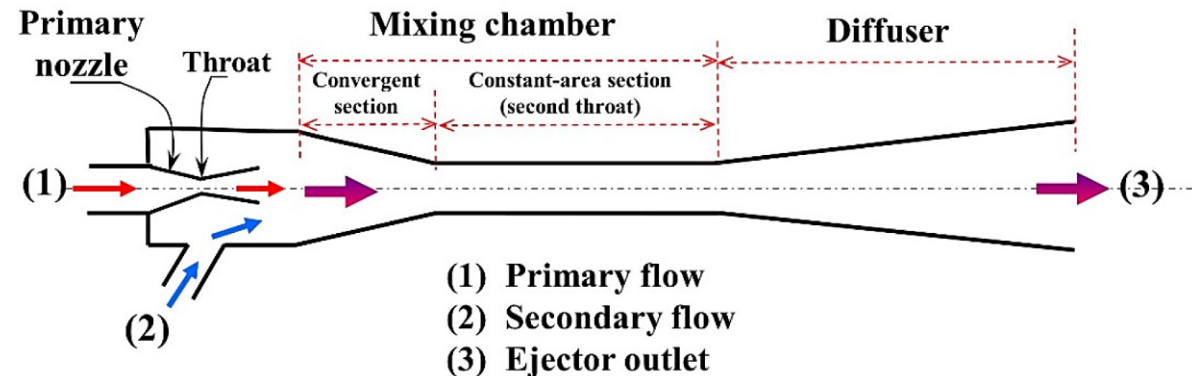
تجهیزات محرک

تجهیزات ثابت

MHD Generator



Ejector or Thermo-compressors or Jet Pump





## مقدمه‌ای بر توربوماشین‌ها و تجهیزات سیالی

ماشین‌های سیالی دارای قطعه متحرک (محرک): در این ماشین‌ها تغییرات و تبادل انرژی بین سیال و ماشین می‌تواند به دو صورت عمده صورت پذیرد.

توربوماشین‌ها (Turbomachines): عمده تبادل انرژی به صورت تغییرات انرژی جنبشی و فشار دینامیکی بوده که در اثر یک قطعه دوار (چرخ) اتفاق می‌افتد.

انواع ماشین‌های سیالی  
دارای قطعه محرک  
(نوع تبادل انرژی)

تجهیزات جابه‌جایی مثبت (Positive displacement): عمده تبادل انرژی به صورت تغییرات فشار استاتیکی بوده که معمولاً محفظه‌ای وجود داشته که با محبوس شدن و تخلیه آن سیال جریان می‌یابد.

➤ در تجهیزات جابجایی مثبت جریان سیال معمولاً به صورت ناپایا بوده و به صورت بسته‌ی سیال در طول ماشین حرکت می‌کند.

➤ در تجهیزات جابجایی مثبت، در اثر ایجاد مانع جلوی جریان، فشار افزایش می‌یابد.





## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت

ماشین‌های جابجایی مثبت

توان گیر

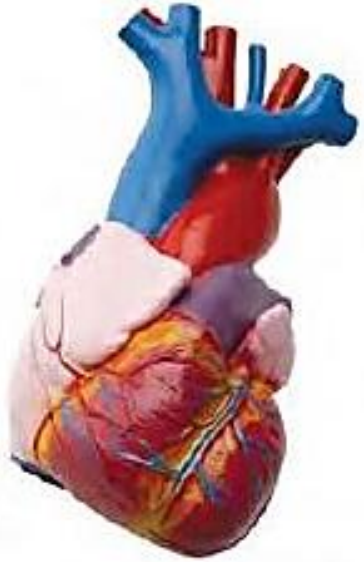
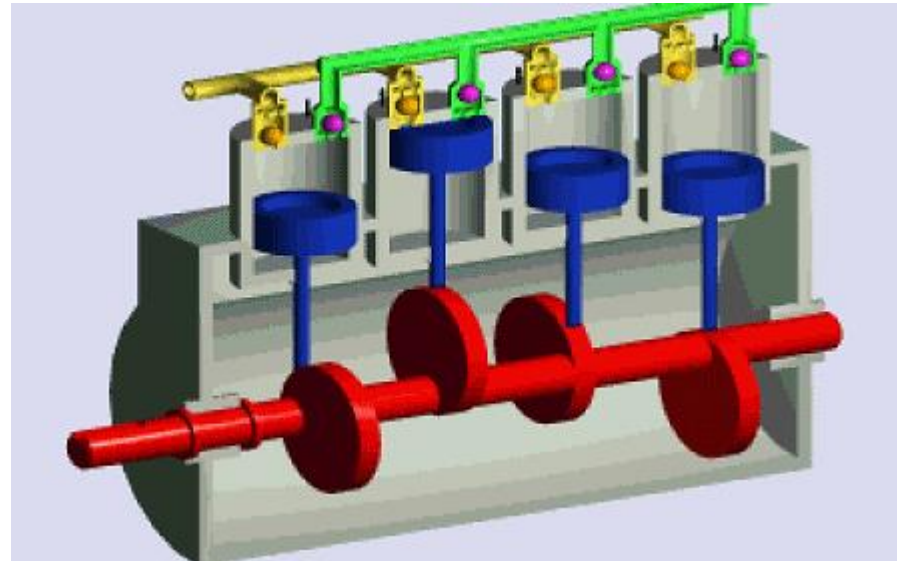
تراکم‌ناپذیر

تراکم‌پذیر

توان ده

تراکم‌ناپذیر

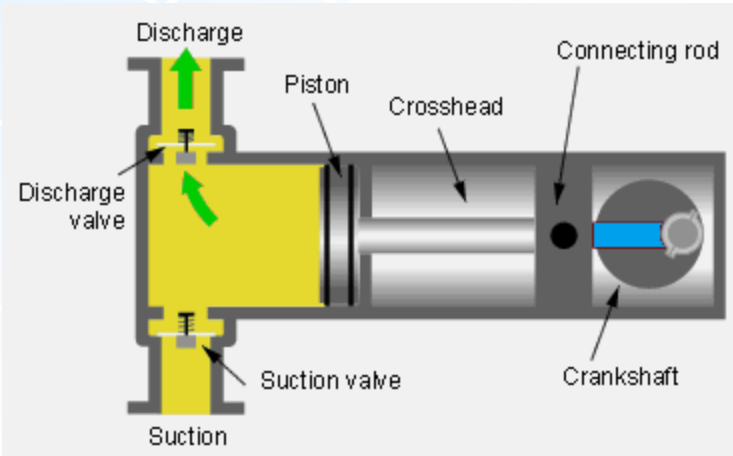
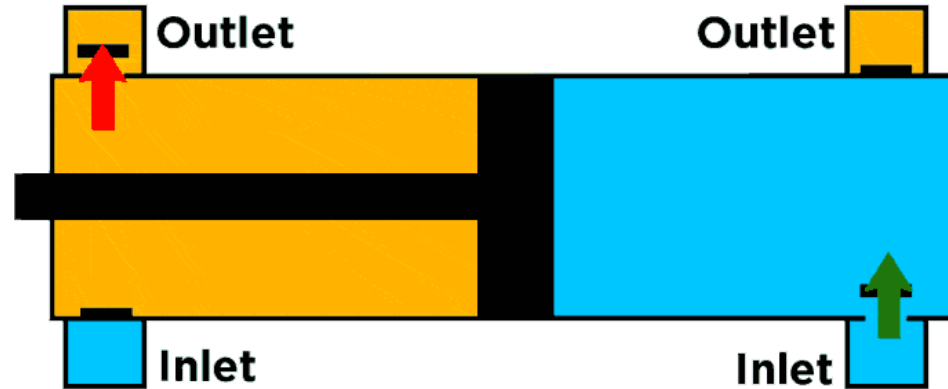
تراکم‌پذیر



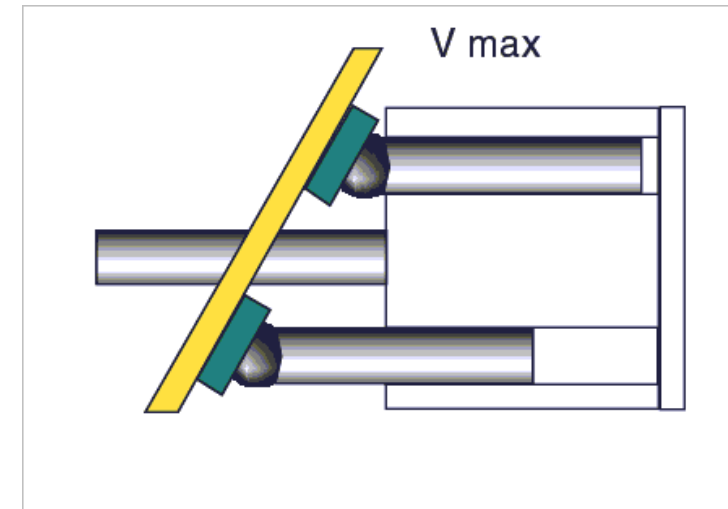
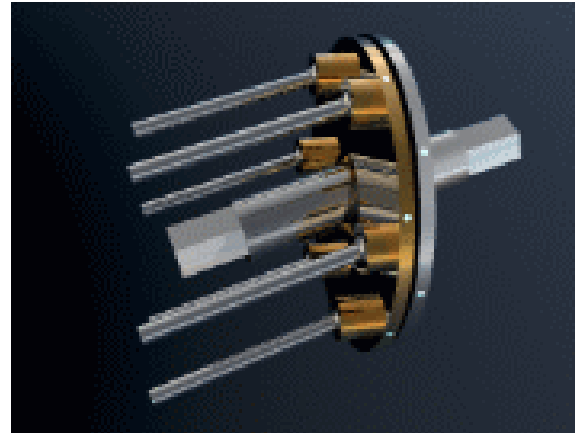
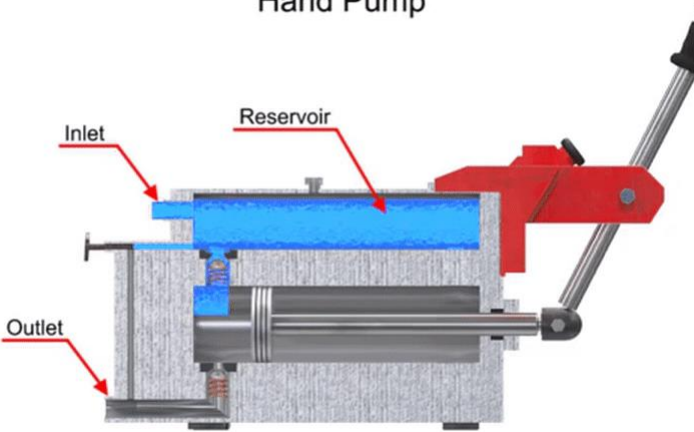


## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت

### پمپ‌های پیستونی



### Hand Pump



□ در تجهیزات جابه‌جایی مثبت دبی پایین بوده و در عوض فشار زیادی ایجاد می‌شود.

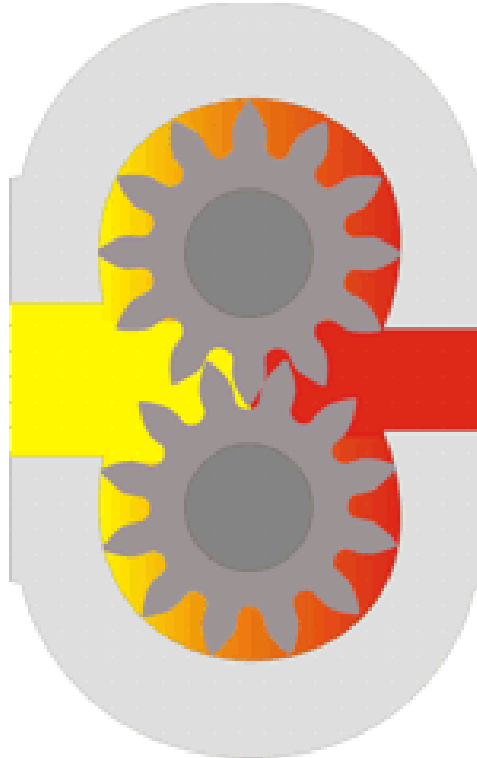
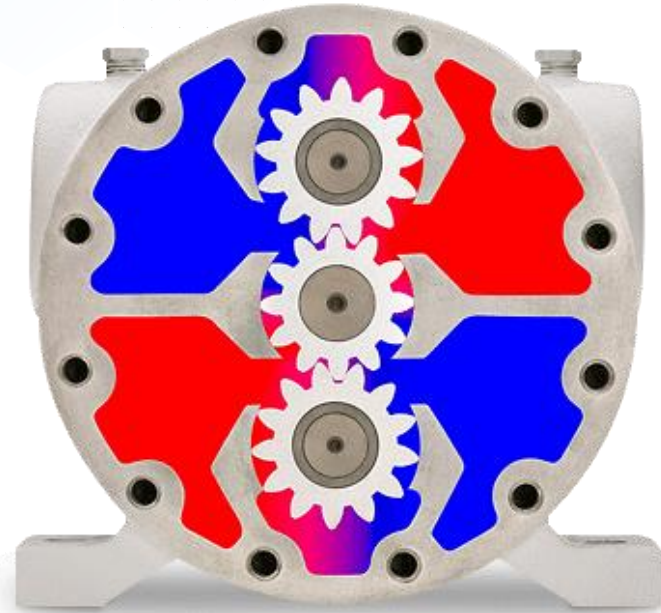
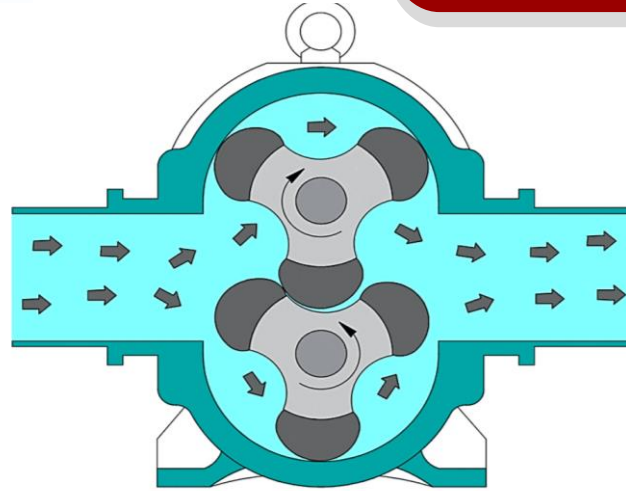
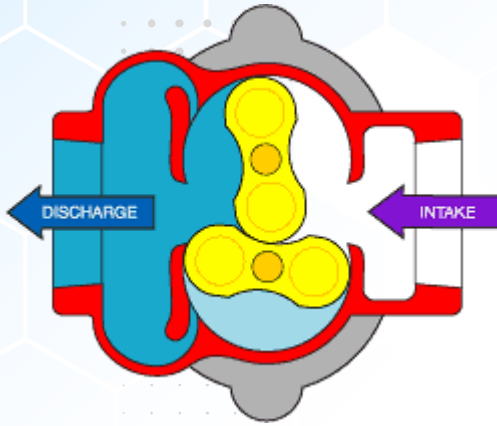






## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت

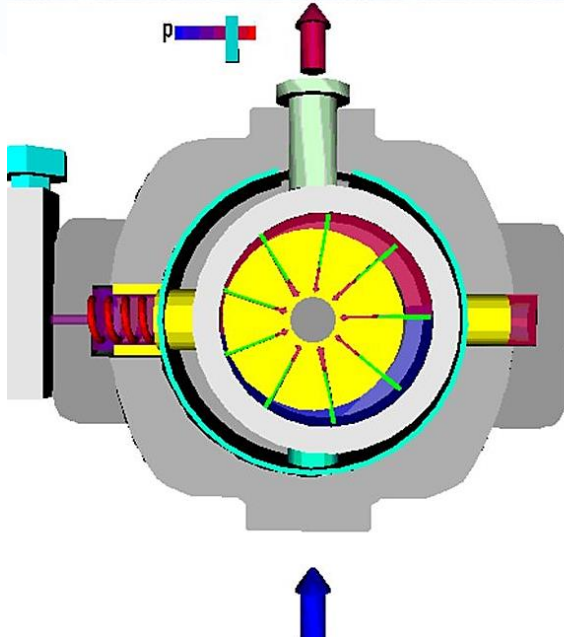
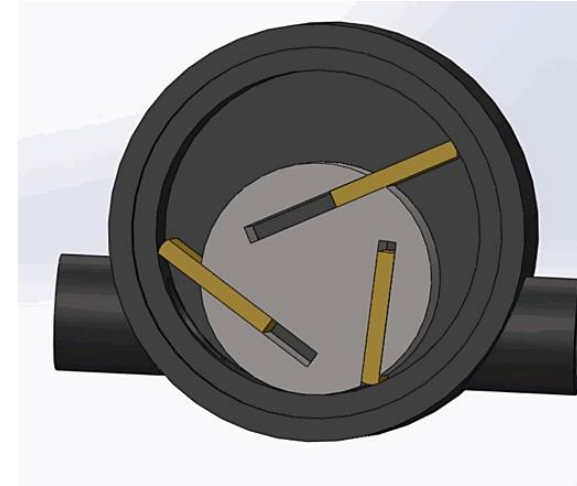
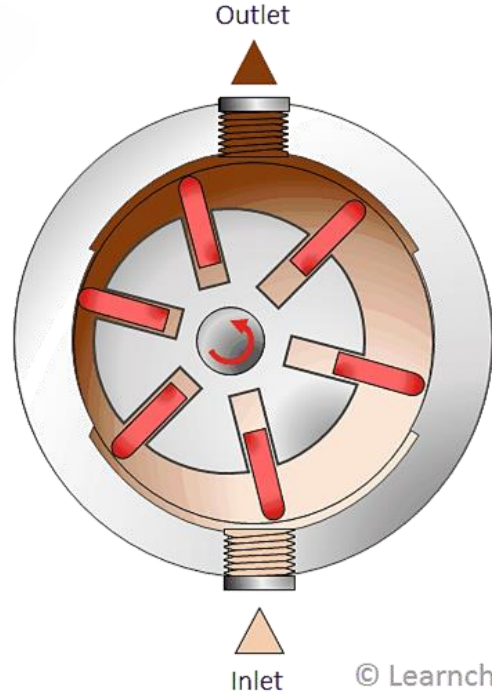
### پمپ‌های دنده‌ای





## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت

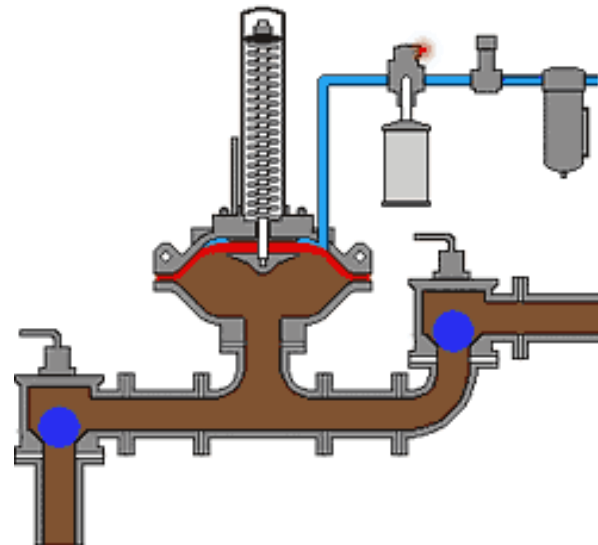
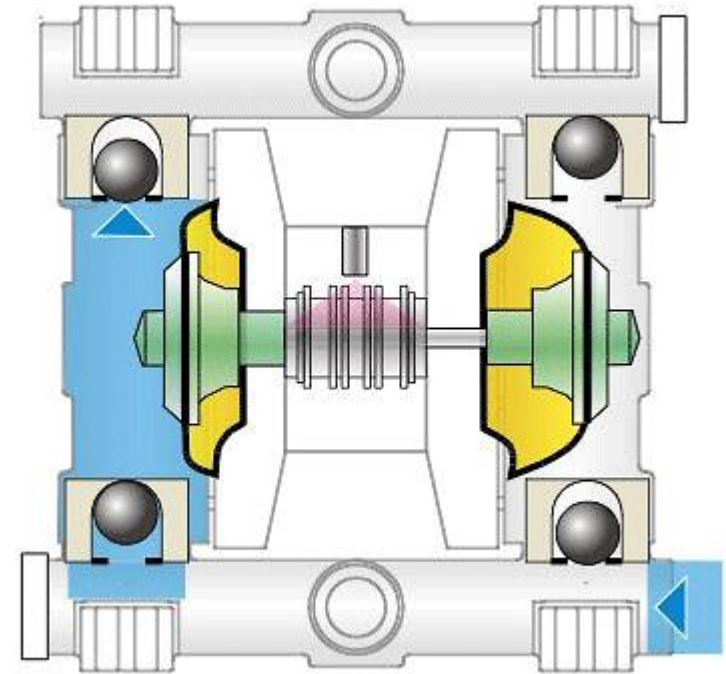
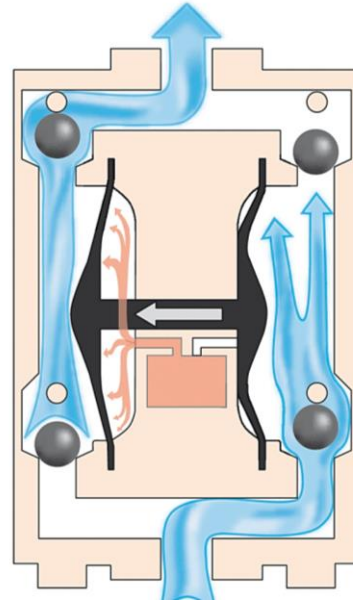
### پمپ‌های پره‌ای (تیغه‌ای)





## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت

### پمپ‌های دیافراگمی







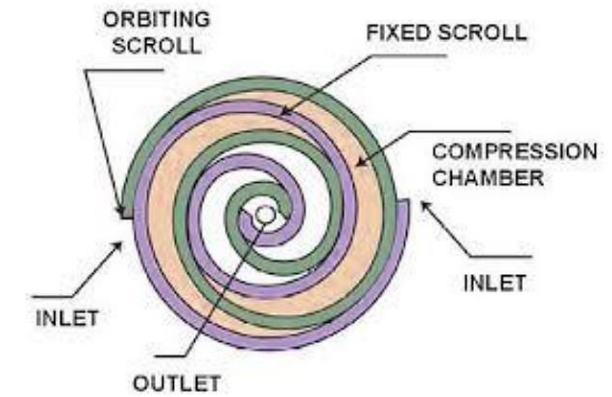
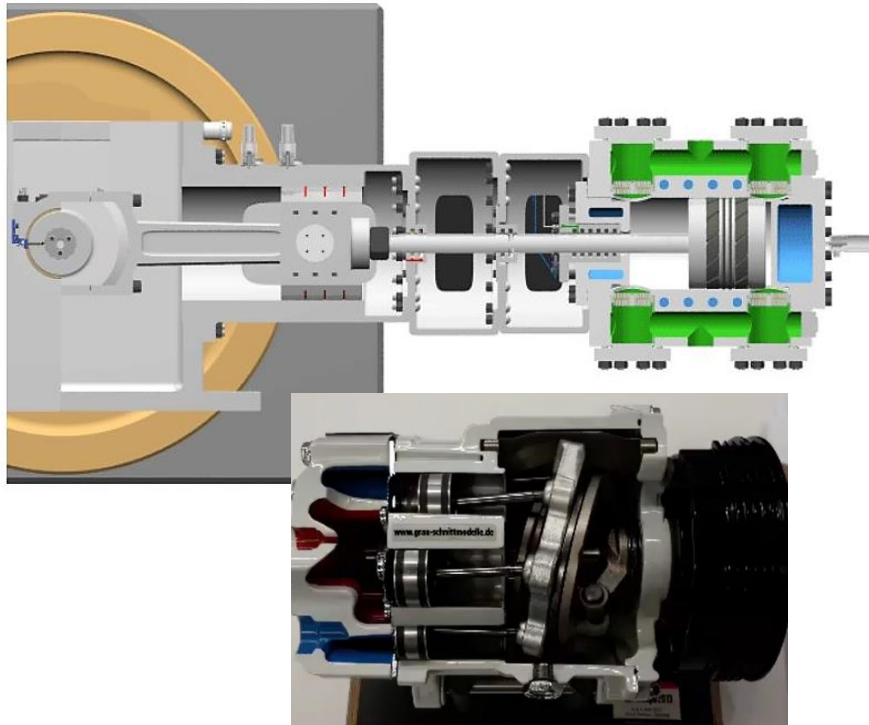
## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت

### انواع کمپرسور از نوع جابجایی مثبت

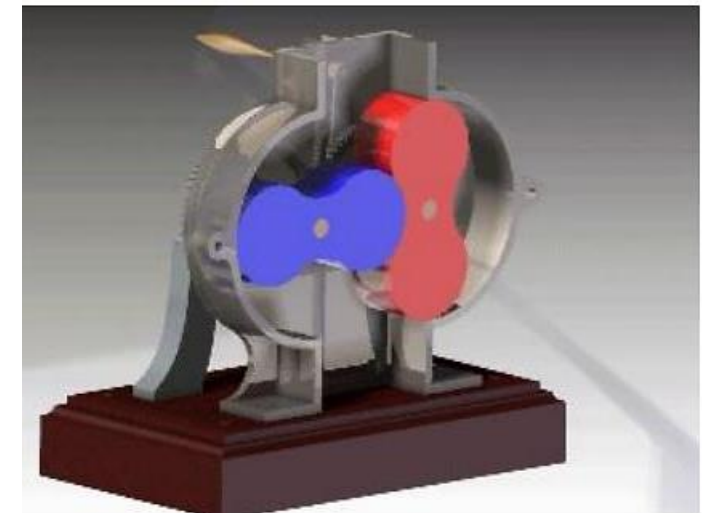
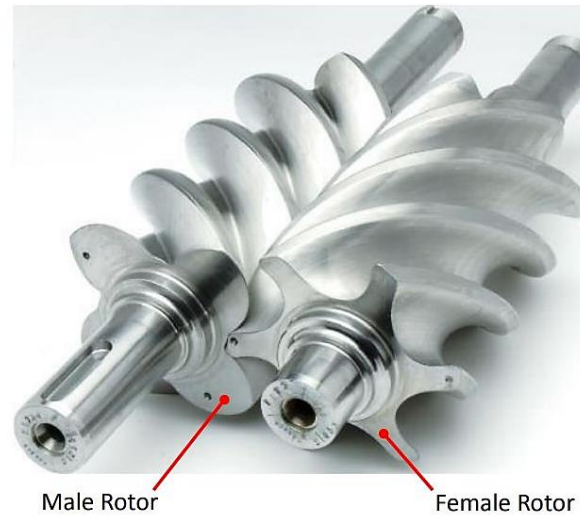
Diaphragm



Reciprocating



Rotary



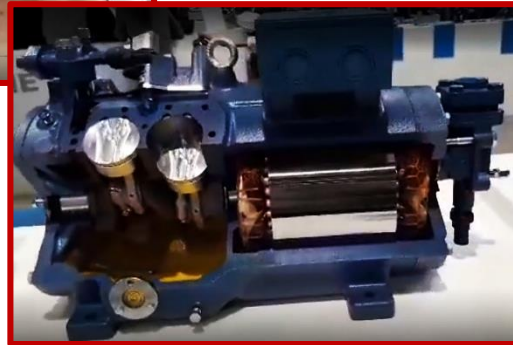


## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت

### انواع کمپرسور از نوع جابجایی مثبت

- کمپرسورهای بسته (Hermetic Compressors)
- کمپرسورهای نیمه بسته (Semi-hermetic Compressors)
- کمپرسورهای باز (Open Compressors)

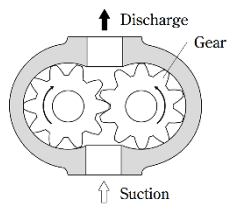
- ارتباط بین الکتروموتور و کمپرسور به دو صورت اتصال مستقیم و اتصال توسط تسمه صورت میگیرد.
- بعضی مبردها مانند آمونیاک سبب خرابی الکتروموتور شده و نوع باز نیاز است.



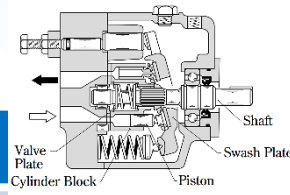




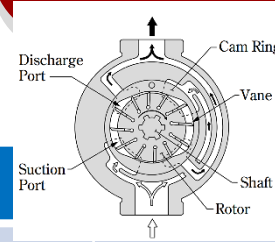
## مروری بر انواع تجهیزات جابجایی مثبت



دنده‌ای



پیستونی



تیغه‌ای دورانی

| نوع عملکرد             | انبساط و فشرده سازی حجم سیال بین تیغه‌ها و بادامک.                                                   | انبساط و فشرده سازی حجم سیال داخل بلوک سیلندر به وسیله پیستون.                                                                 | حرکت حجم سیال بین دنده و کیس پمپ.                                                                                        |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| راندمان                | بطوری کلی راندمان پایینی دارند. این در حالیست که راندمان می تواند در صورت فرسوده شدن تیغه جبران شود. | به طور کلی از بقیه راندمان بالاتری دارد. صفحه plate داخل پمپ بسیار حساس است بطوری که در صورت فرسودگی راندمان کاهش پیدا می کند. | بطوری کلی راندمان پایینی دارند و در صورت فرسوده شدن دنده‌ها، راندمان کاهش می یابد.                                       |
| مقاومت در برابر آلودگی | بطور کلی به آلاینده‌های درون روغن حساس هستند ولی نه به اندازه پمپ پیستونی.                           | بسیار حساس به آلاینده‌های درون روغن.                                                                                           | حساس به آلاینده‌های درون روغن ولی این حساسیت در فشارهای پایین کمتر می شود.                                               |
| قدرت ساکشن             | معمولی.                                                                                              | کم.                                                                                                                            | زیاد.                                                                                                                    |
| توانایی جابجایی متغیر  | می توان از آن با تغییر مرکزیت (Eccentricity) بادامک به عنوان جابجایی متغیر استفاده کرد.              | به راحتی می توان با تغییر زاویه سواچ یا محور بنت خود پمپ از آن به عنوان جابجایی منغیر استفاده کرد.                             | به سختی می توان از آن به عنوان جابجایی متغیر استفاده کرد؛ در حالی که امکان پذیر هست و مواردی در بازار نیز موجود می باشد. |
| اندازه و قیمت          | کوچکترین بین هر سه نوع و به نسبت ارزان تر هستند.                                                     | بطور کلی از لحاظ ابعادی بزرگ، سنگین و گران قیمت هستند.                                                                         | کوچک، سبک و ارزان قیمت هستند.                                                                                            |





## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ قسمت اصلی توربوماشین‌ها: چرخ

✓ چرخ یا چرخ‌ها روی محوری محکم شده و با آن دوران می‌کنند و دارای تعدادی پره هستند.

✓ سیال به هنگام عبور از بین پره‌ها با چرخ تبادل انرژی می‌کند.

### ❖ مزایای اصلی توربوماشین‌ها

✓ انتقال قدرت بالا در حجم و وزن کم در مقایسه با سایر ماشین‌ها

✓ داشتن بازده بالا

✓ عدم نیاز به تبدیل حرکت رفت و برگشتی به حرکت دورانی

✓ قیمت ارزان ماشین نسبت به قدرت مفید تولیدی

✓ دائمی بودن تبادل انرژی بین ماشین و سیال





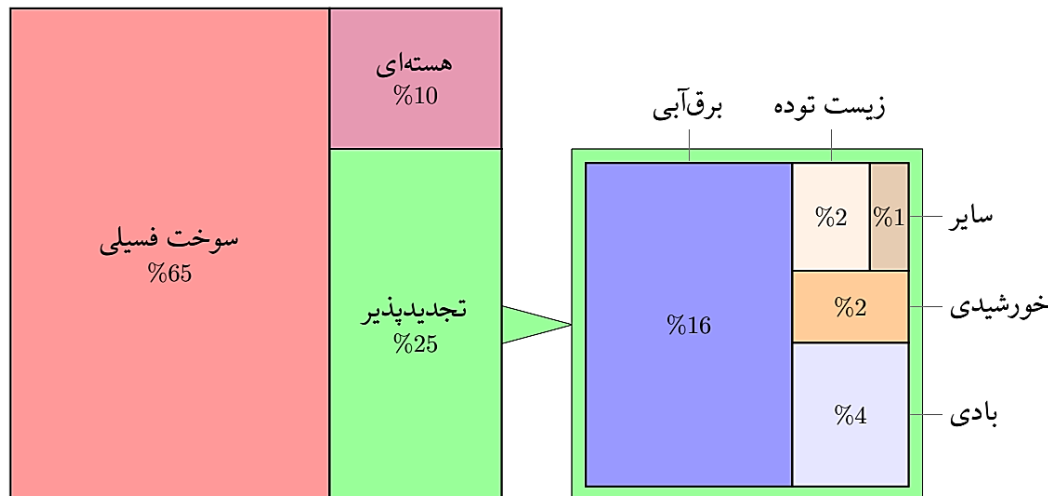
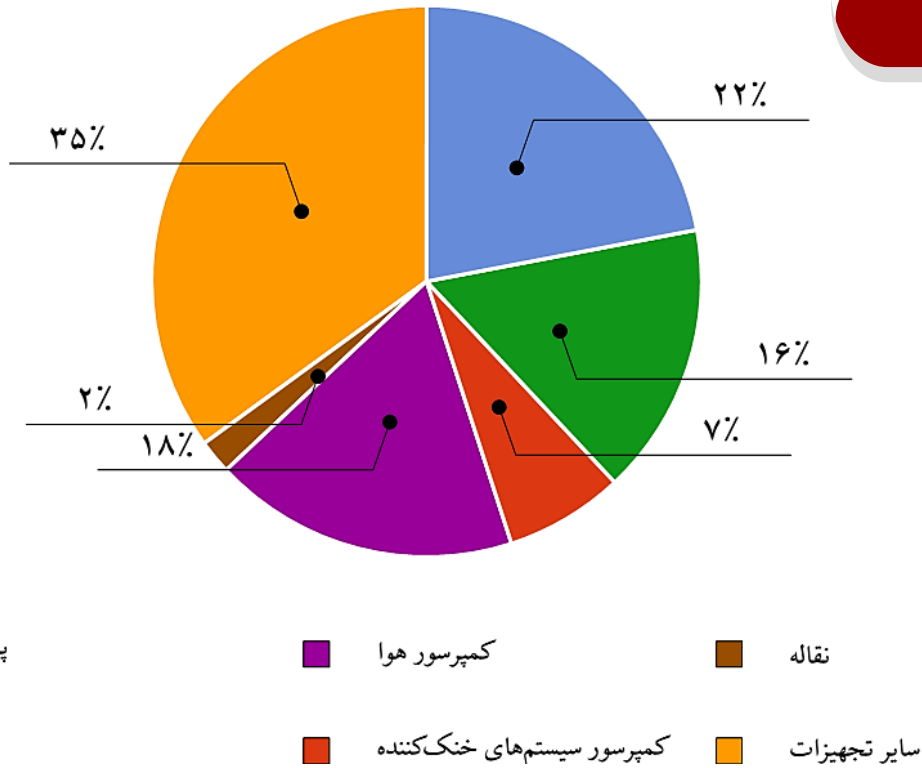
## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ کاربردها:

- ✓ صنایع تولید برق
- ✓ صنایع هوایی
- ✓ شبکه‌های آبرسانی
- ✓ صنایع نفت و پتروشیمی
- ✓ .....

### ❖ چهار نوع تقسیم بندی متداول:

- ✓ مسیر حرکت سیال در چرخ
- ✓ تراکم‌پذیری سیال
- ✓ طرز تغذیه چرخ
- ✓ جهت تبادل انرژی





## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

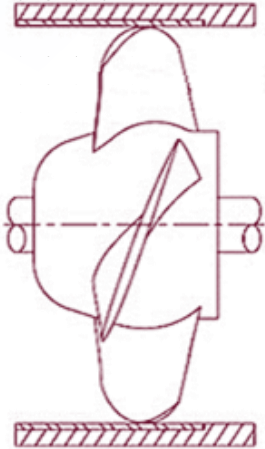
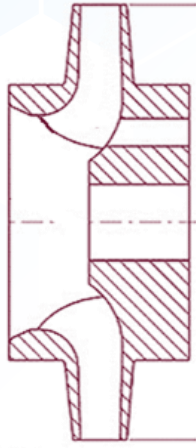
### ❖ الف. مسیر حرکت سیال

✓ توربوماشین‌های سانتریفوژ یا با جریان شعاعی

○ امتداد ورود و خروج سیال در چرخ بر هم عمود است.

○ کاربرد: ایجاد فشارهای زیاد در دبی‌های کم

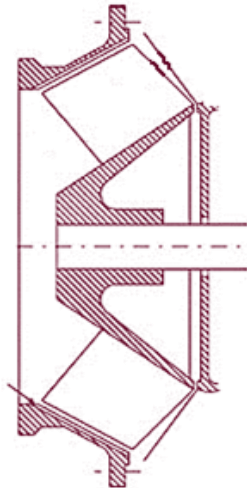
■ تذکر: از کلمه سانتریفوژ فقط در توربوماشین‌های توان‌گیر استفاده می‌شود.



✓ توربوماشین‌های محوری

○ سیال موازی با محور چرخ وارد و از آن خارج می‌گردد.

○ کاربرد: ایجاد دبی‌های زیاد در فشارهای کم



✓ توربوماشین‌های نیمه سانتریفوژ یا با جریان مختلط

○ امتداد ورود و خروج سیال در چرخ نسبت به یکدیگر مایل است.

○ کاربرد: ایجاد فشار و دبی متوسط



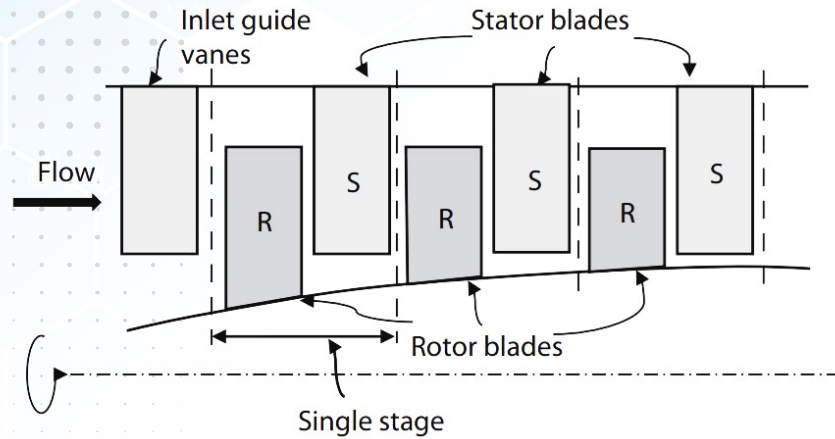
## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ ب. تراکم‌پذیری سیال (یا جریان سیال)

✓ توربوماشین‌های با سیال قابل تراکم

○ امکان مطالعه‌ی توربوماشین به کمک مبانی  
ترمودینامیک و انتقال حرارت

○ نام دیگر: توربوماشین‌های گازی یا توربوماشین‌های  
حرارتی



✓ توربوماشین‌های با سیال غیر قابل تراکم

○ امکان بررسی پدیده‌های مختلف به کمک قوانین  
اصلی مکانیک سیالات

○ نام دیگر: توربوماشین‌های آبی

○ فن‌ها با فشار کم یا توربین‌های بادی نیز در این  
دسته قرار دارند.

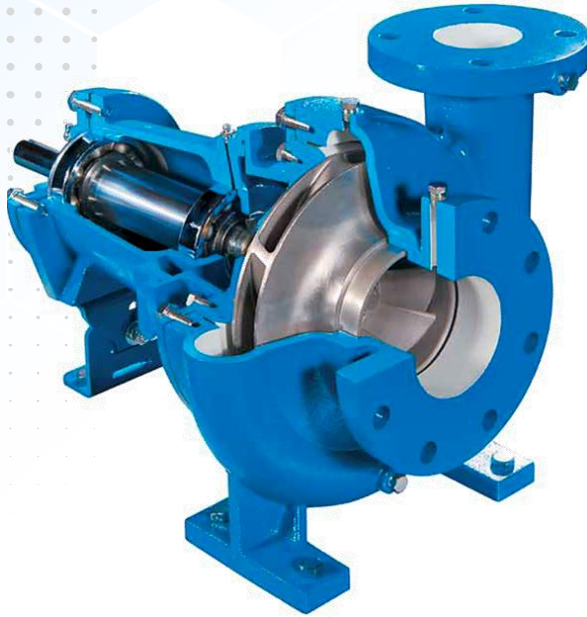


## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ ج. طرز تغذیه چرخ:

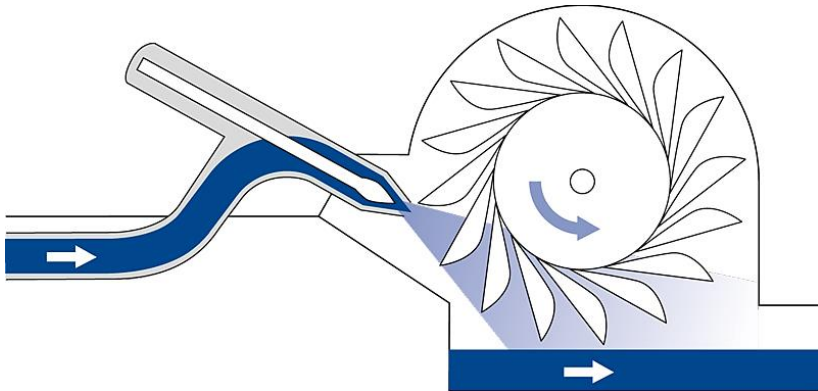
✓ تغذیه‌ی کامل

- سیال از تمامی سطح چرخ وارد آن می‌شود.
- نام دیگر: ماشین عکس‌العملی
- فشار استاتیک سیال از ورود تا خروج تغییر می‌کند.



✓ تغذیه‌ی جزئی

- سیال فقط از یک یا چند قسمت از سطح ورودی داخل
- نام دیگر: توربین‌های ضربه‌ای (مثل توربین پلتون)
- فشار استاتیک سیال در عبور از چرخ ثابت است.





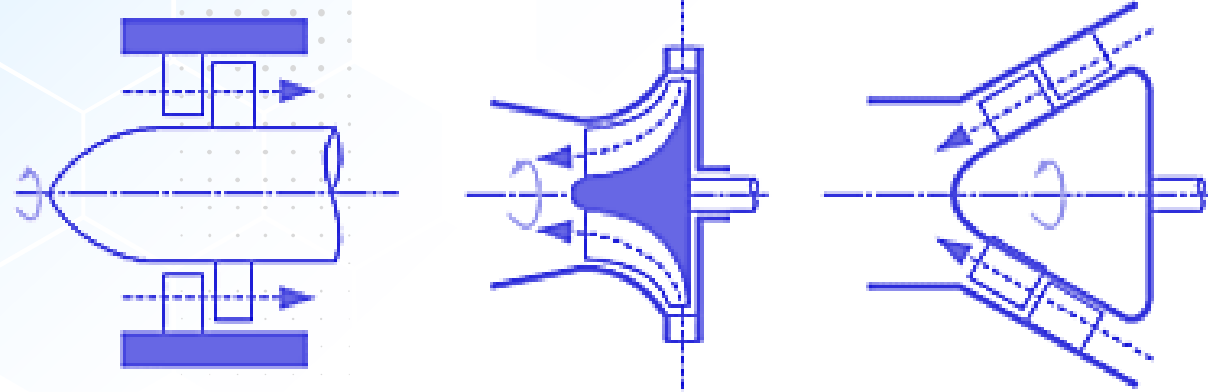
## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ د. جهت تبادل انرژی:

✓ ماشین‌های توان‌ده

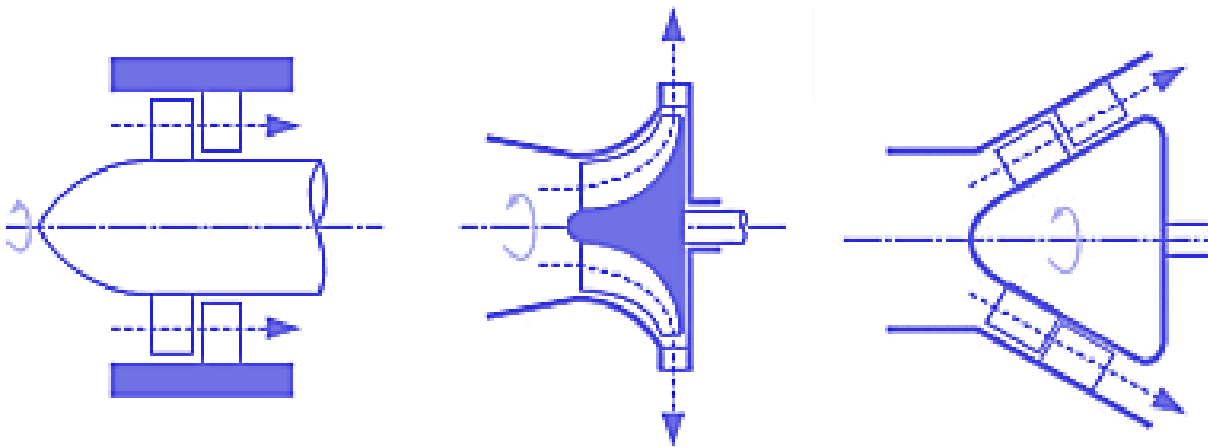
- انرژی‌های پتانسیل و جنبشی سیال به چرخ منتقل می‌گردد و توان مکانیکی تولید شده و چرخ دوران می‌کند.

○ انواع توربین‌ها



✓ ماشین‌های توان‌گیر

- انرژی مکانیکی روی محور از طریق چرخ به سیال منتقل گردیده و منجر به افزایش فشار و سرعت آن می‌شود.
- سایر توربوماشین‌ها (غیر از توربین‌ها) همانند پمپ‌ها، کمپرسورها، پروانه‌ی کشتی، ملخ هواپیما و بالگرد





## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

□ بر حسب اینکه یک توربوماشین از یک یا چند چرخ تشکیل شود آن را یک طبقه یا چند طبقه می‌نامند.

### ❖ اجزای یک توربوماشین یک طبقه:

✓ هدایت کننده

- وظیفه‌ی تامین بردار سرعت مناسب در ورود به چرخ به منظور توزیع یکنواخت سیال در ورود به آن و افزایش کارایی چرخ

✓ چرخ

- قسمت اصلی و گردنده‌ی توربوماشین (در توبین آب رانر (Runner)، در پمپ و فن پروانه (Impeller)، در کمپرسور محوری و توربین گاز روتور (Rotor) نام دارد).

✓ دیفیوزر یا نازل

- تغییر دهنده‌ی برخی مشخصات مورد نیاز سیال همچون تبدیل انرژی جنبشی به فشار (نازل) و یا برعکس

✓ جمع کننده

- جمع کننده‌ی سیال خروجی از چرخ و هدایت کننده‌ی آن به خروجی ماشین

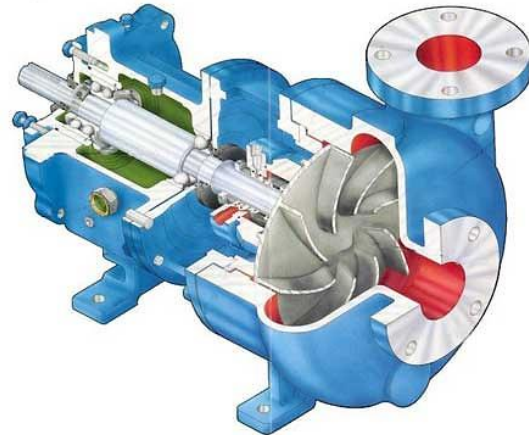
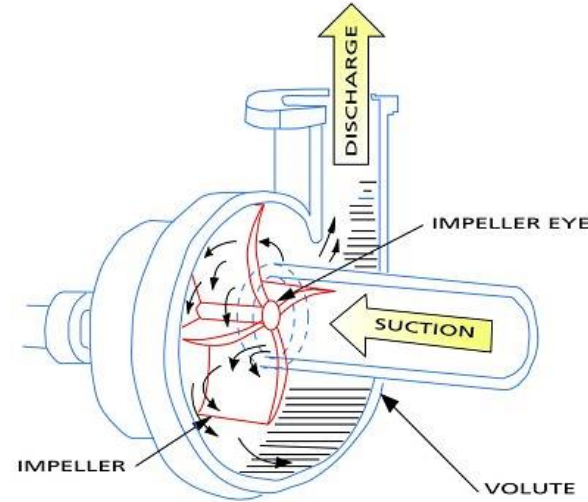
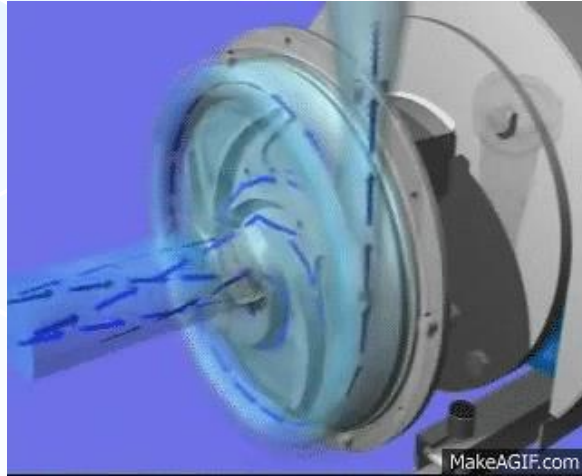






## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ پمپ سانتریفوژ



✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ سانتریفوژ

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌ناپذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

○ توان‌گیر

✓ ساختمان داخلی

○ یک طبقه شامل سه قسمت: هدایت‌کننده، چرخ و جمع‌کننده

✓ کاربرد

○ انتقال مایعات با فشارهای زیاد



## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ فن محوری

✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ محوری

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌ناپذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

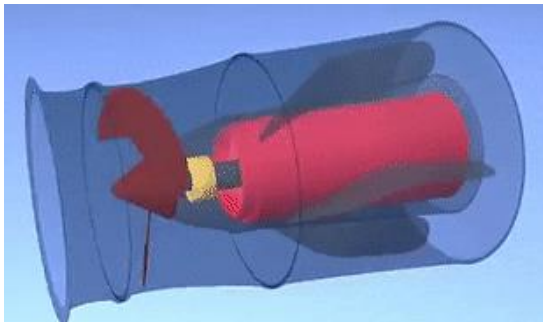
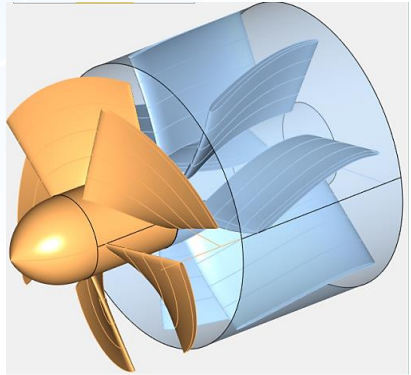
○ توان‌گیر

✓ ساختمان داخلی

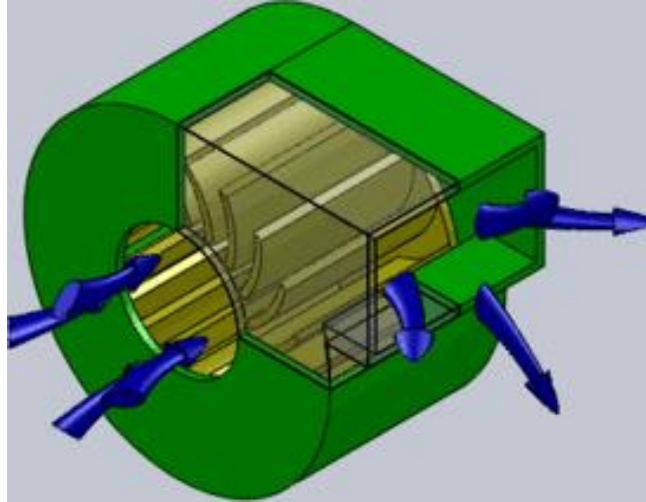
○ یک طبقه شامل سه قسمت: هدایت‌کننده، چرخ و دیفیوزر

✓ کاربرد

○ انتقال آب یا (هوا) با دبی زیاد



## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن



### ❖ فن سانتریفوژ

✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ سانتریفوژ

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌پذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

○ توان‌گیر

✓ ساختمان داخلی

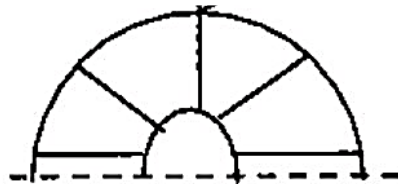
○ یک طبقه شامل دو قسمت: چرخ و جمع‌کننده

✓ کاربرد

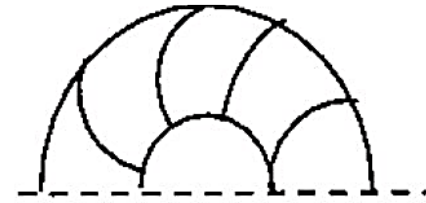
○ انتقال هوا و گاز با فشار نسبتاً زیاد (هدف اصلی فن ایجاد دبی بوده نه افزایش فشار زیاد)



(a) Backward-curved blades



(b) Radial blades



(c) Forward-curved blades





## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ کمپرسور سانتریفوژ

✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ سانتریفوژ

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌پذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

○ توان‌گیر

✓ ساختمان داخلی

○ یک طبقه شامل چهار قسمت: هدایت‌کننده، چرخ،

دیفیوز و جمع‌کننده

✓ کاربرد

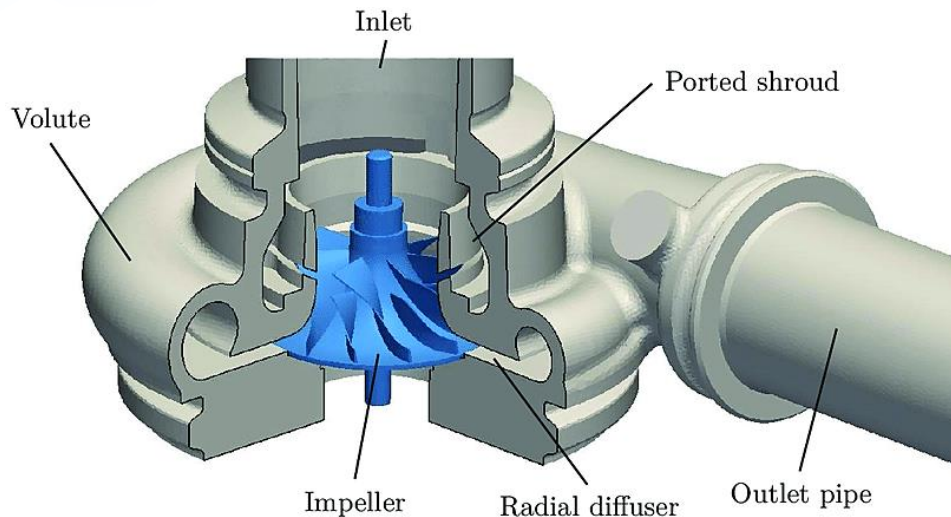
○ تراکم هوا و گاز با فشار زیاد

#### Fan:

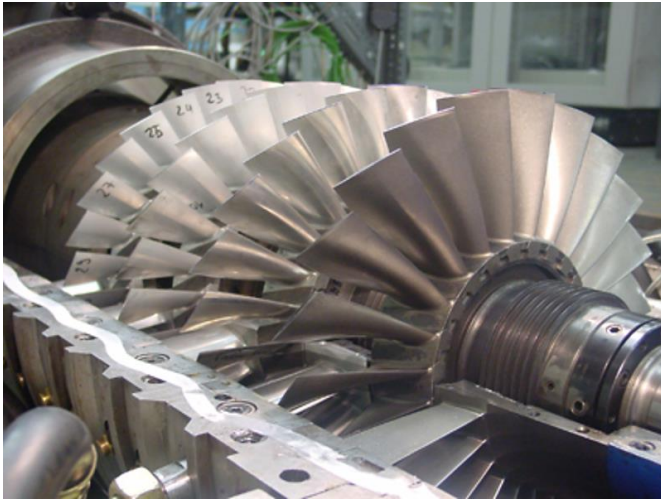
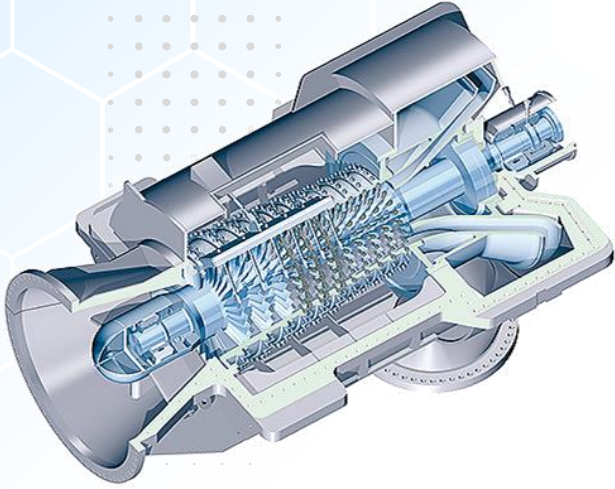
Moves large amount of gas with a low increase in pressure.

#### Compressor:

Is a machine for raising gas to a higher level of pressure.



## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن



### ❖ کمپرسور محوری

✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ محوری

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌پذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

○ توان‌گیر

✓ ساختمان داخلی

○ چند طبقه شامل سه قسمت: هدایت‌کننده، چرخ و دیفیوزر

✓ کاربرد

○ تراکم هوا و یا گاز با دبی زیاد و فشار نسبتاً بالا

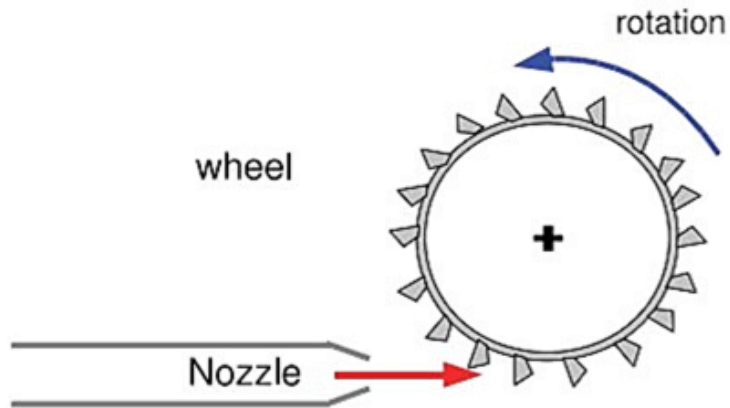




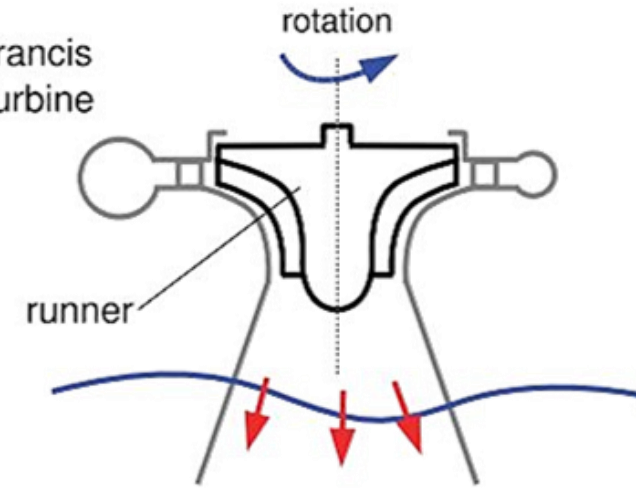
## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ انواع توربین‌های هیدرولیکی (آبی)

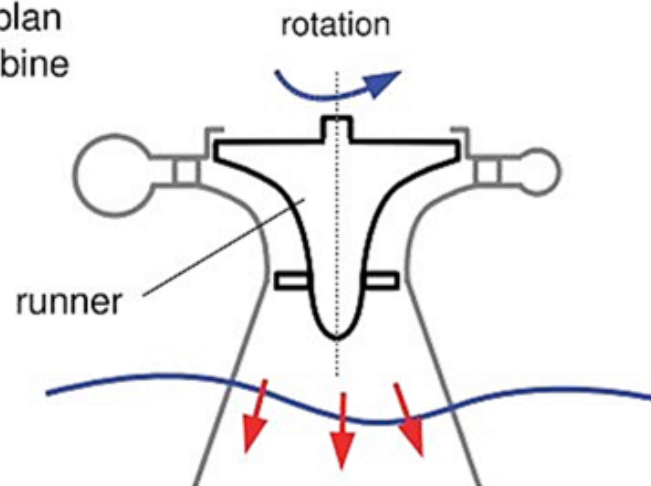
Pelton Wheel



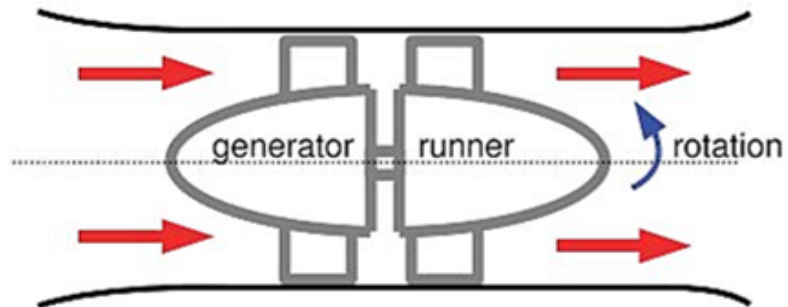
Francis Turbine



Kaplan Turbine

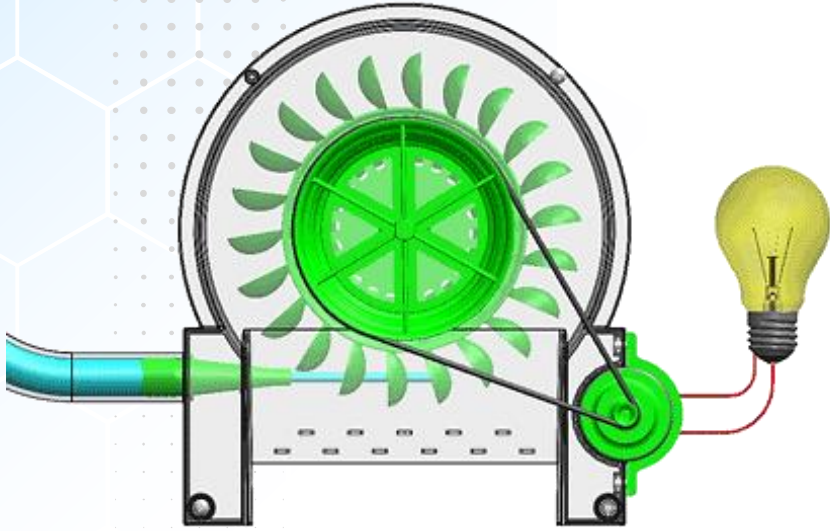


Bulb Turbine





## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن



### ❖ توربین پلتون

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌ناپذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی ناقص (ضربه‌ای)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

○ توان‌ده

✓ ساختمان داخلی

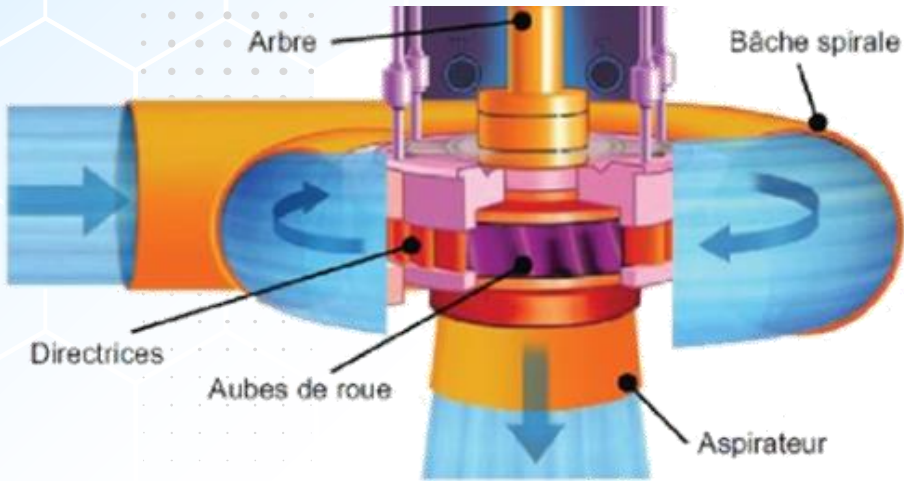
○ یک طبقه شامل دو قسمت: هدایت‌کننده (به صورت انژکتور) و چرخ

✓ کاربرد

○ استفاده در نیروگاه‌های آبی با ارتفاع ریزش‌های زیاد



## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن



### ❖ توربین فرانسسیس

✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ مختلط

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌ناپذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

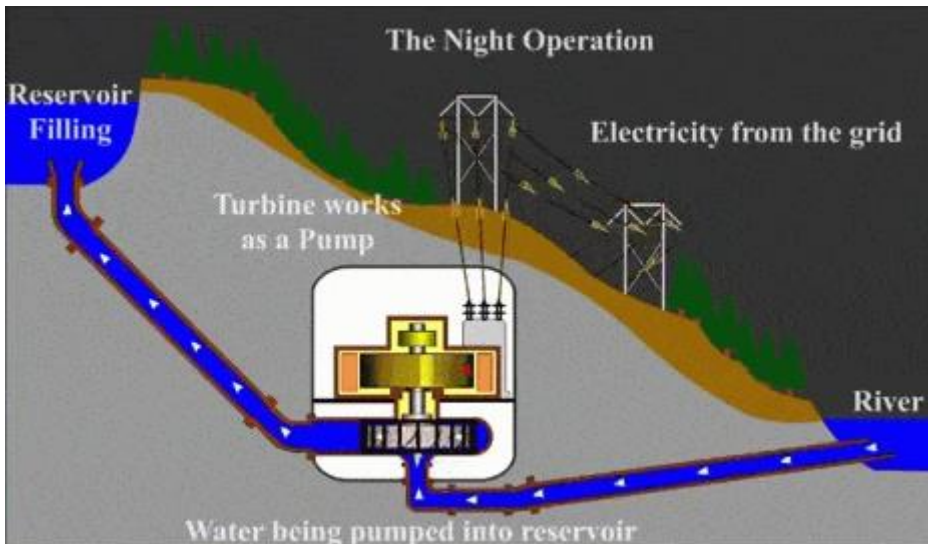
○ توان‌ده

✓ ساختمان داخلی

○ یک طبقه شامل سه قسمت: هدایت‌کننده، چرخ و دیفیوزر

✓ کاربرد

○ استفاده در نیروگاه‌های آبی با ارتفاع ریزش‌های متوسط



## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ توربین کاپلان

✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ محوری

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌ناپذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

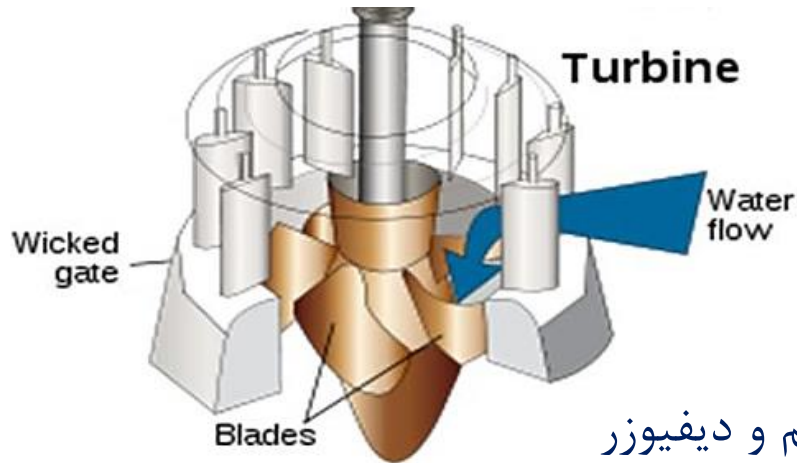
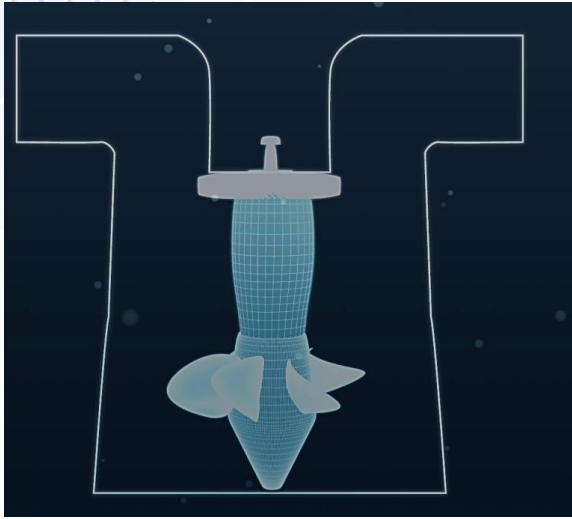
○ توان‌ده

✓ ساختمان داخلی

○ یک طبقه شامل سه قسمت: هدایت‌کننده، چرخ با پره قابل تنظیم و دیفیوزر

✓ کاربرد

○ استفاده در نیروگاه‌های آبی با ارتفاع ریزش‌های کم





## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ توربین گاز و بخار

✓ از دیدگاه مسیر حرکت سیال

○ محوری

✓ از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال

○ تراکم‌پذیر

✓ از دیدگاه تغذیه‌ی چرخ

○ تغذیه‌ی کامل (عکس‌العملی)

✓ از دیدگاه جهت تبادل انرژی

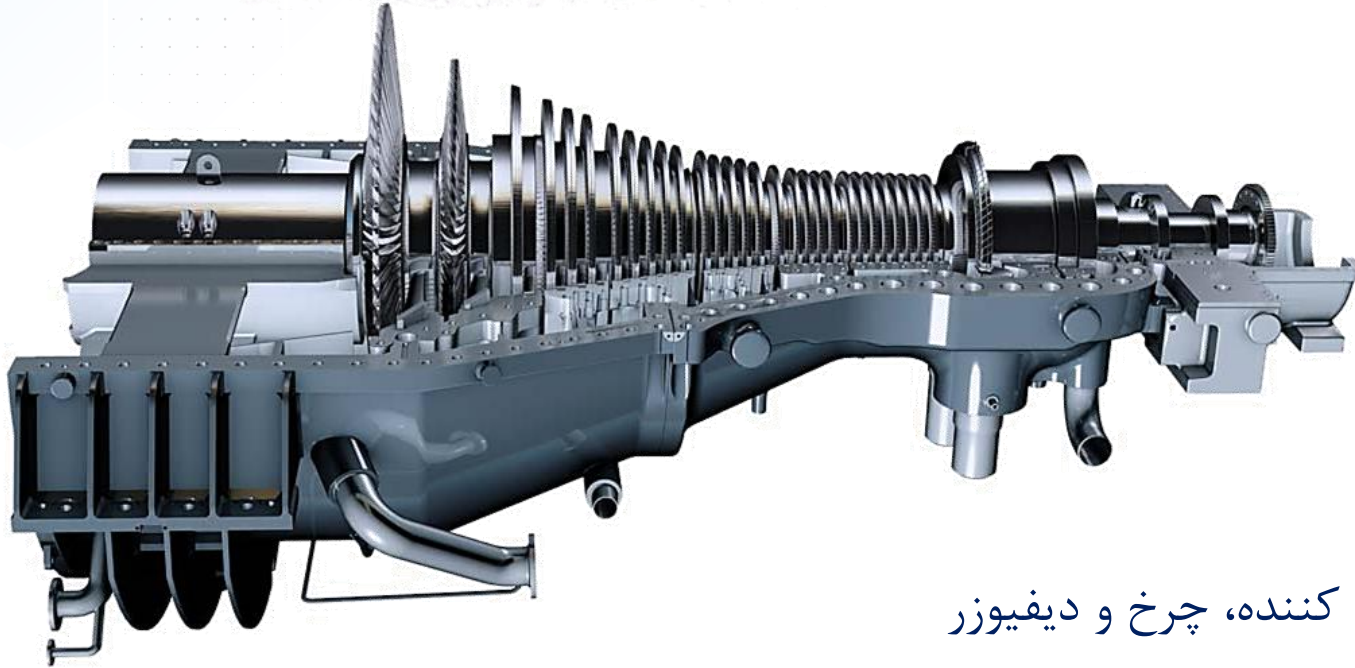
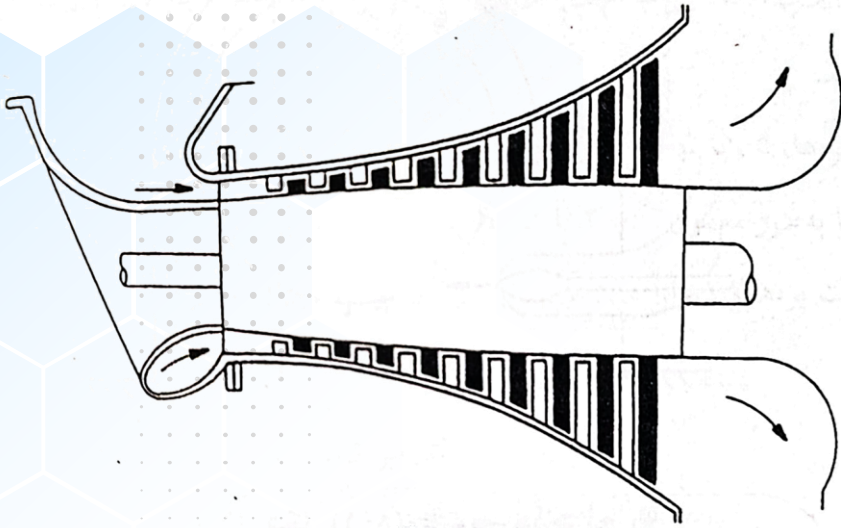
○ توان‌ده

✓ ساختمان داخلی

○ چند طبقه شامل سه قسمت: هدایت‌کننده، چرخ و دیفیوزر

✓ کاربرد

○ نصب در نیروگاه‌های بخار با دبی زیاد و فشار نسبتاً بالا

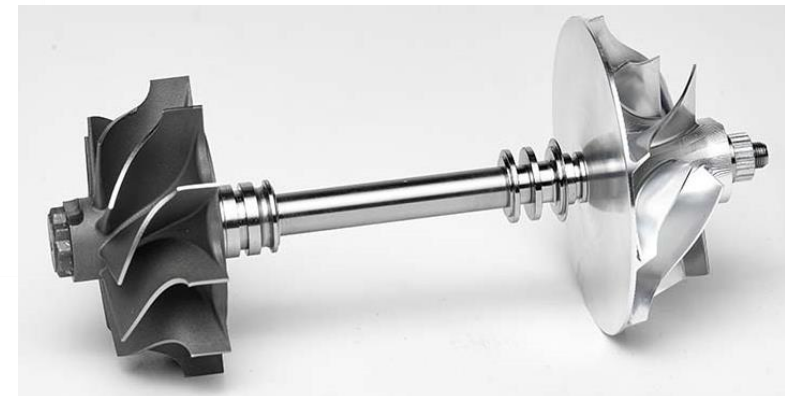
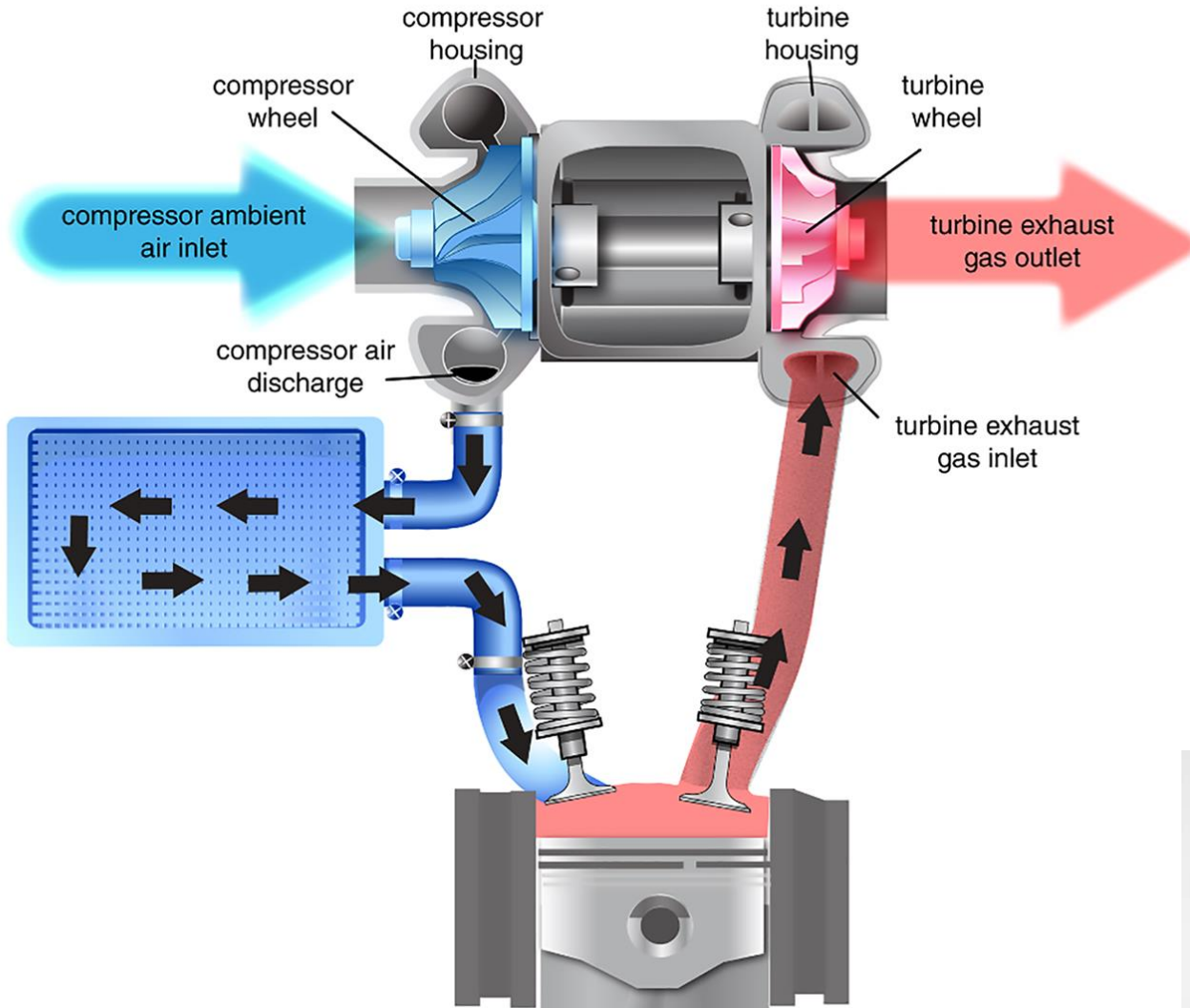






## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

❖ سایر کاربردها  
✓ توربوشارژر



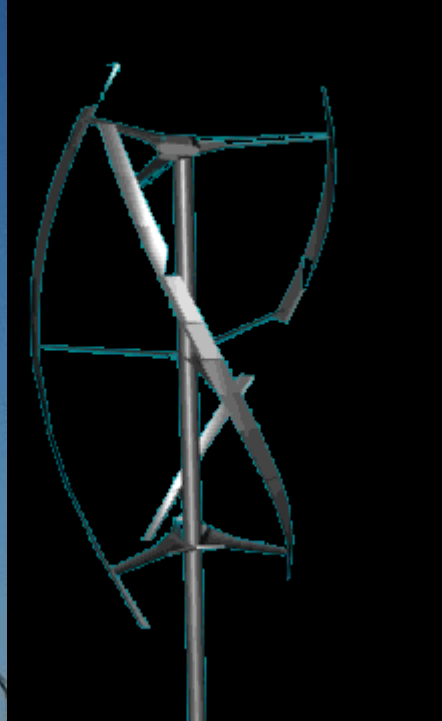
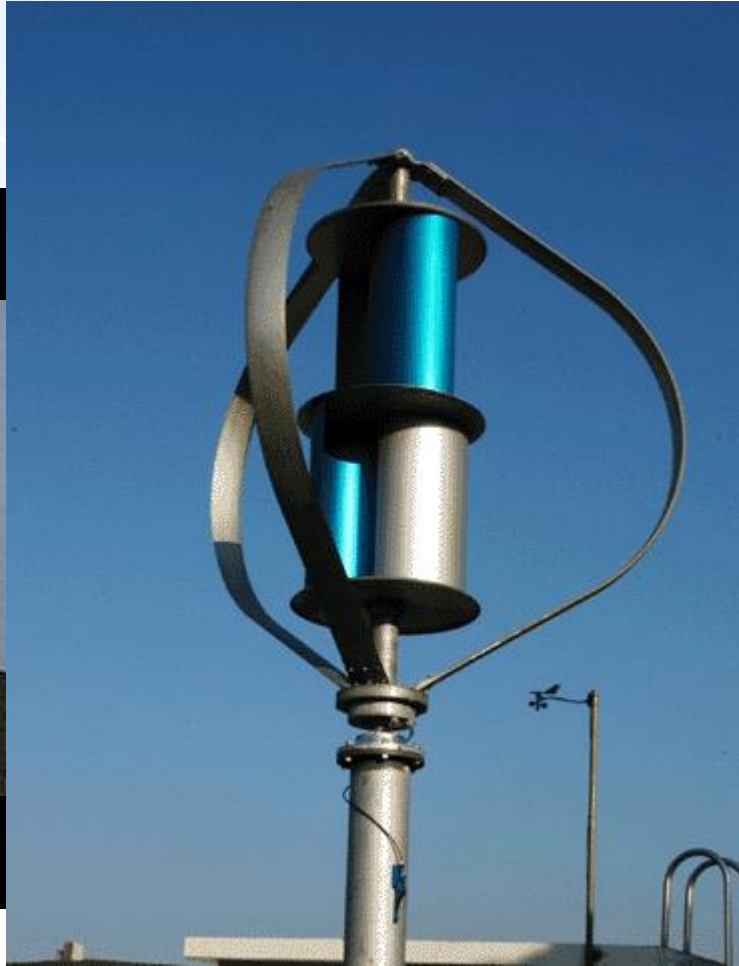


## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

### ❖ سایر کاربردها

#### ✓ توربین بادی

- محور افقی
- محور عمودی
- ساونیوس (درگ)
- داریوس (لیفت)





## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

❖ سایر کاربردها

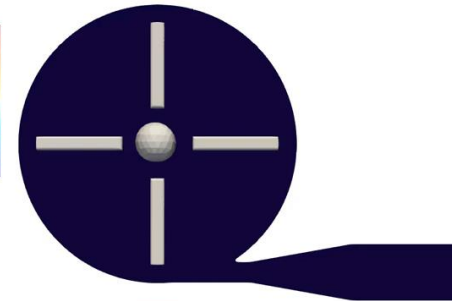
✓ پمپ کمک‌رسان قلب

○ محوری

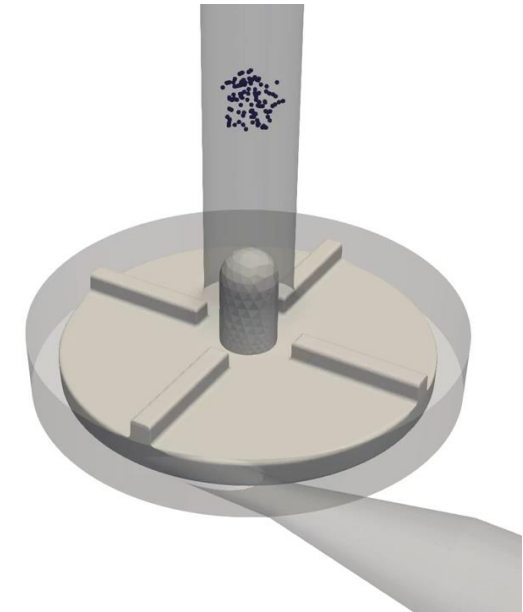
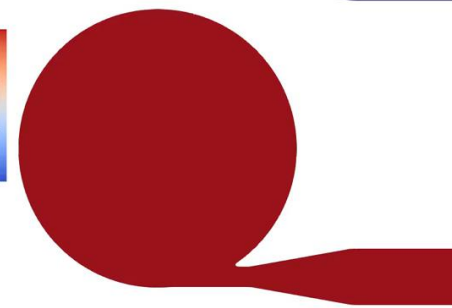
○ شعاعی



$|U| \text{ (m/s)}$   
1.00e+01  
5.00  
0.00e+00



$P \text{ (Pa)}$   
1.00e+01  
-2.00e+4  
-4.00e+4  
-6.00e+04



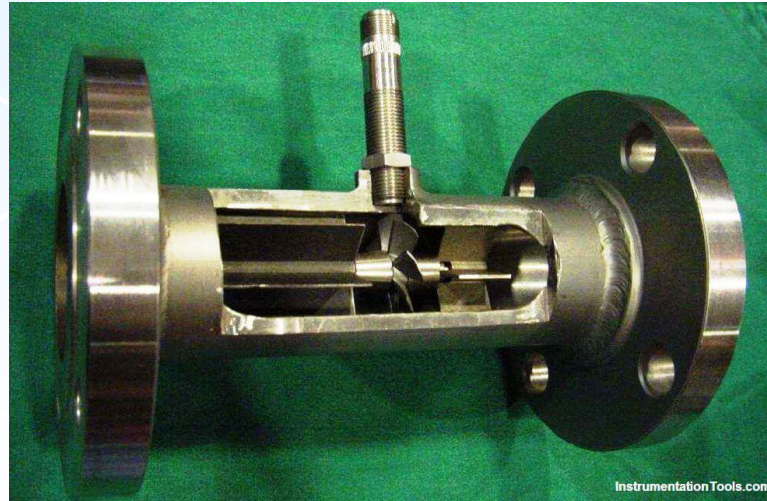


## دسته‌بندی توربوماشین‌ها، مثال‌هایی از انواع مختلف آن

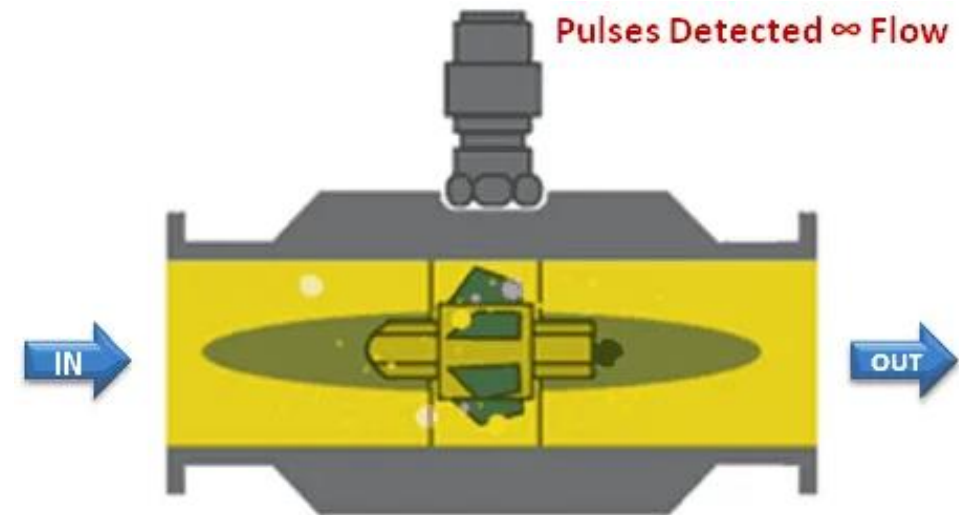
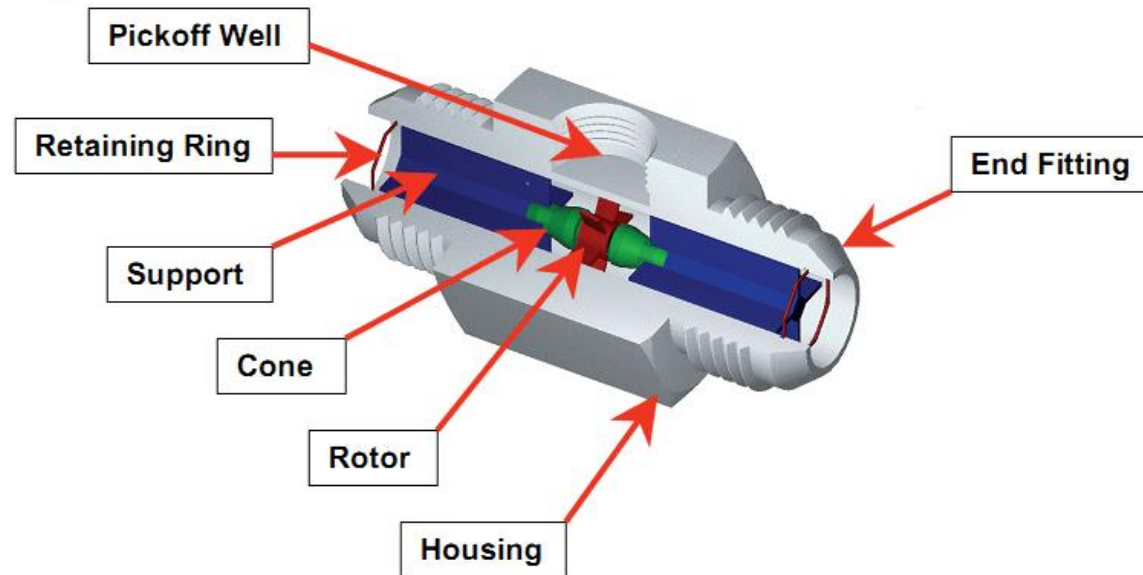
### ❖ سایر کاربردها

✓ تجهیزات اندازه‌گیری و کنترل جریان

○ جریان سنج توربینی



InstrumentationTools.com







## کمیت‌های اصلی و تعاریف

❖ برخی کمیت‌های مهم در توربوماشین‌ها

○ دبی (جرمی و حجمی)

$$Q = CA$$

$$\dot{m} = \rho CA$$

○ دما و فشار: سکون و استاتیک

○ هد

$$H = \frac{(P_o - P_i)}{\rho g} + \frac{(V_o^2 - V_i^2)}{2g} + (Z_o - Z_i)$$

$$h_i = \frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} + Z_i$$

$$h_o = \frac{P_o}{\rho g} + \frac{V_o^2}{2g} + Z_o$$

○ نسبت فشار  $PR = \frac{P_o}{P_i}$

○ توان  $Power = \rho g H Q$

○ بازده

$$\eta_{turbine} = \frac{Power_i}{Power_o}$$

$$\eta_{pump} = \frac{Power_o}{Power_i}$$

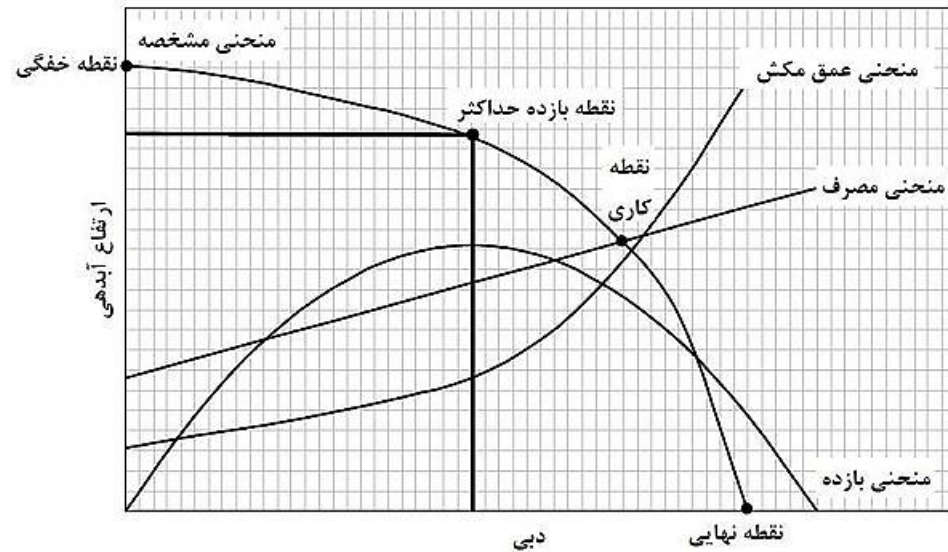
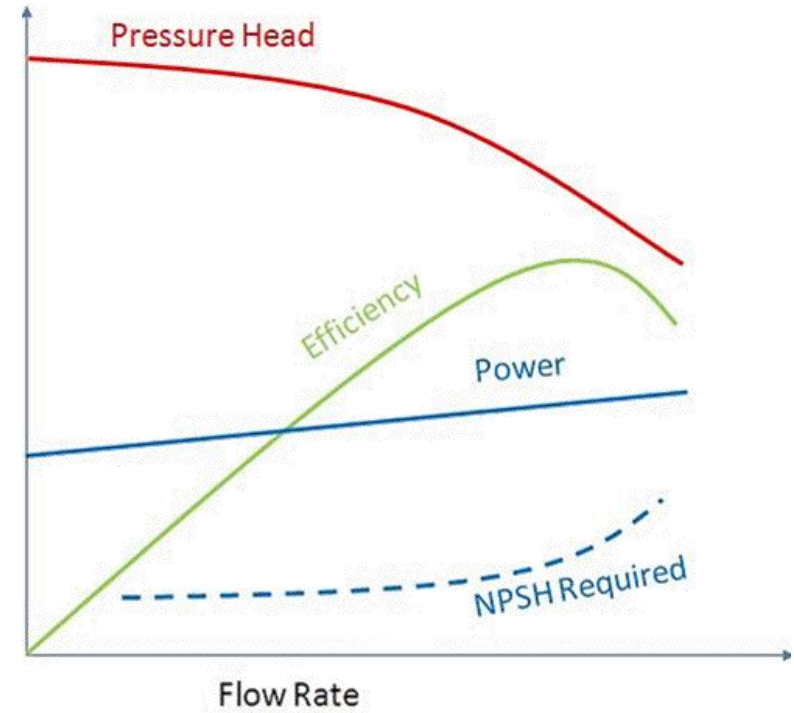
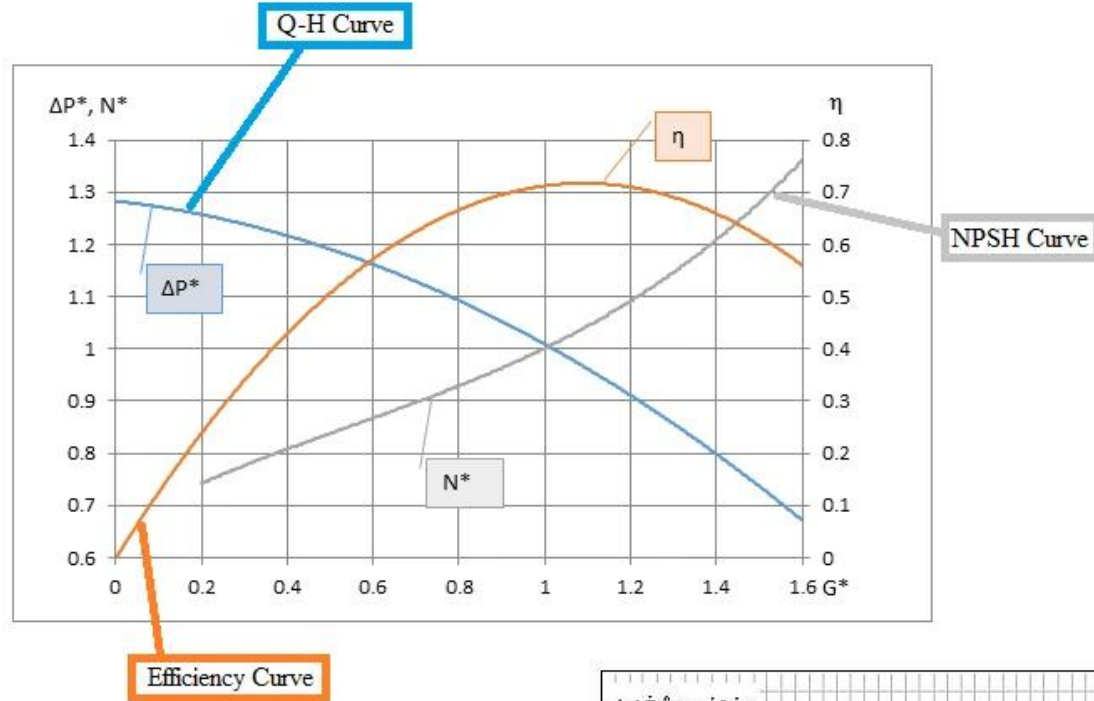
← بازده کل، بازده مکانیکی، بازده هیدرولیکی، بازده آیزنتروپیک، بازده پلی‌تروپیک و ...





## منحنی‌های مشخصه توربوماشین‌ها

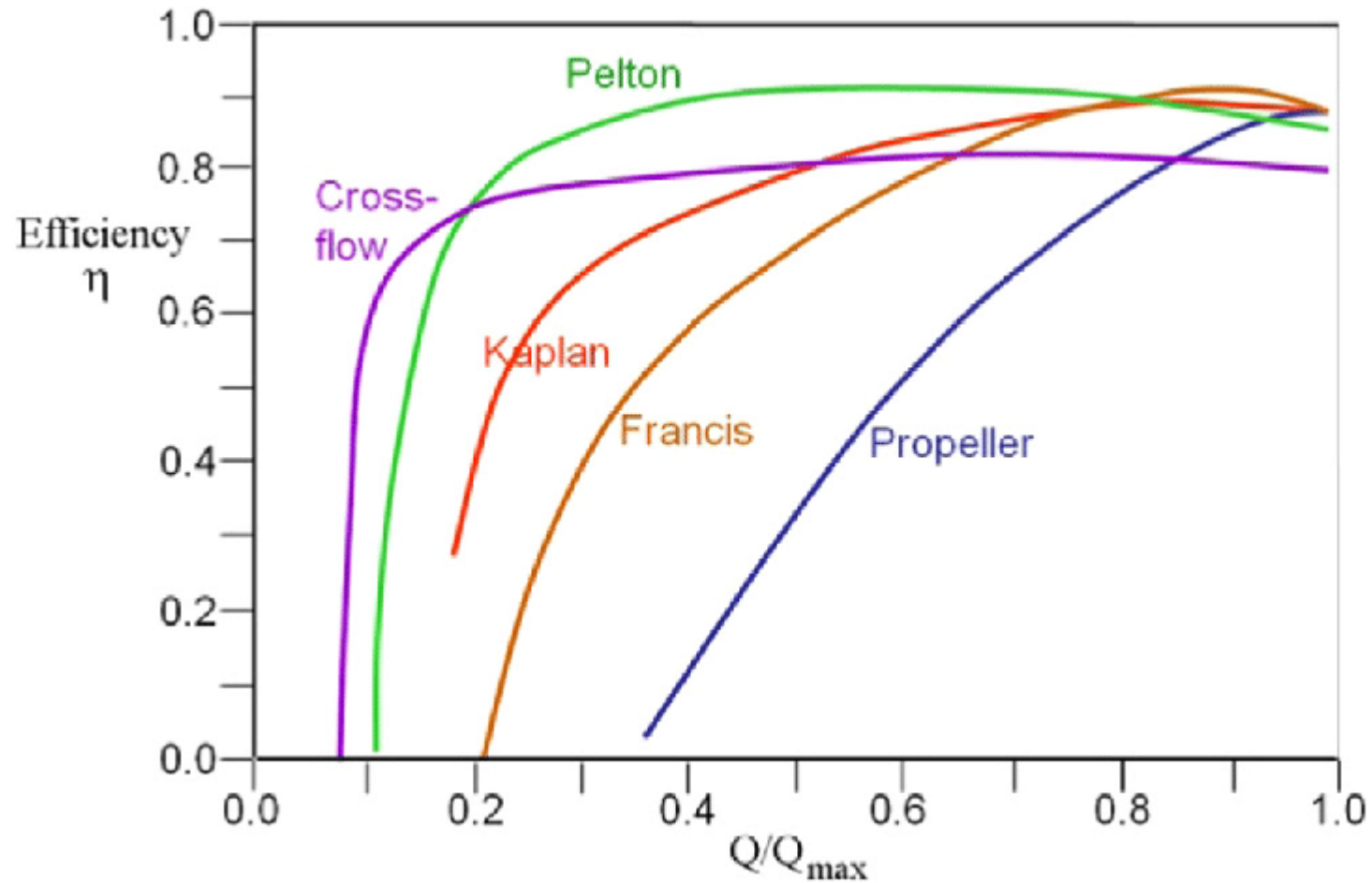
### ❖ منحنی‌های عملکردی پمپ





## منحنی‌های مشخصه توربوماشین‌ها

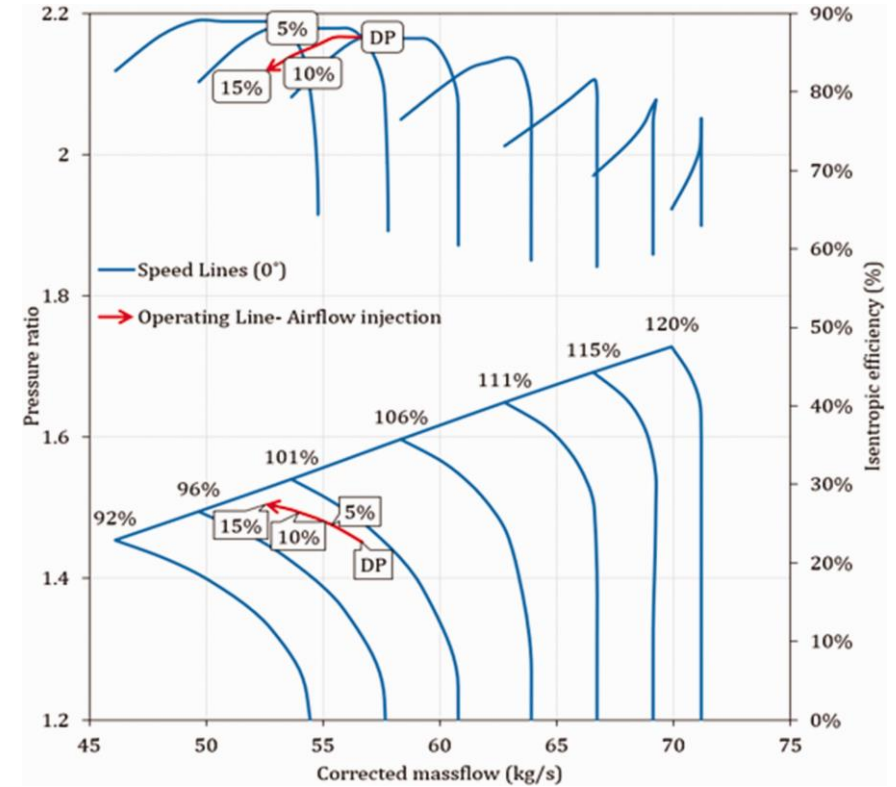
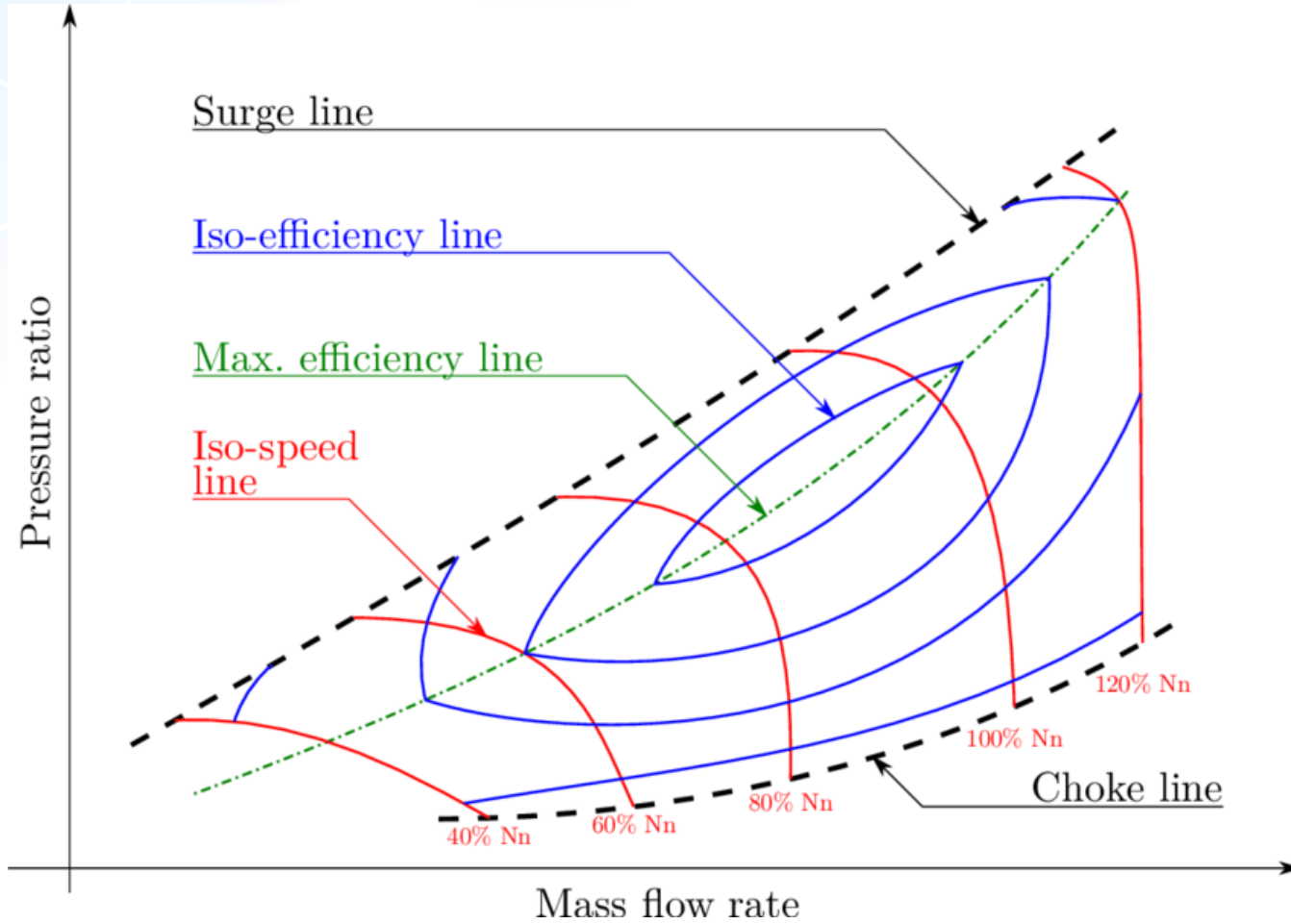
❖ منحنی‌های عملکردی توربین آبی





## منحنی‌های مشخصه توربوماشین‌ها

### ❖ منحنی‌های عملکردی کمپرسور

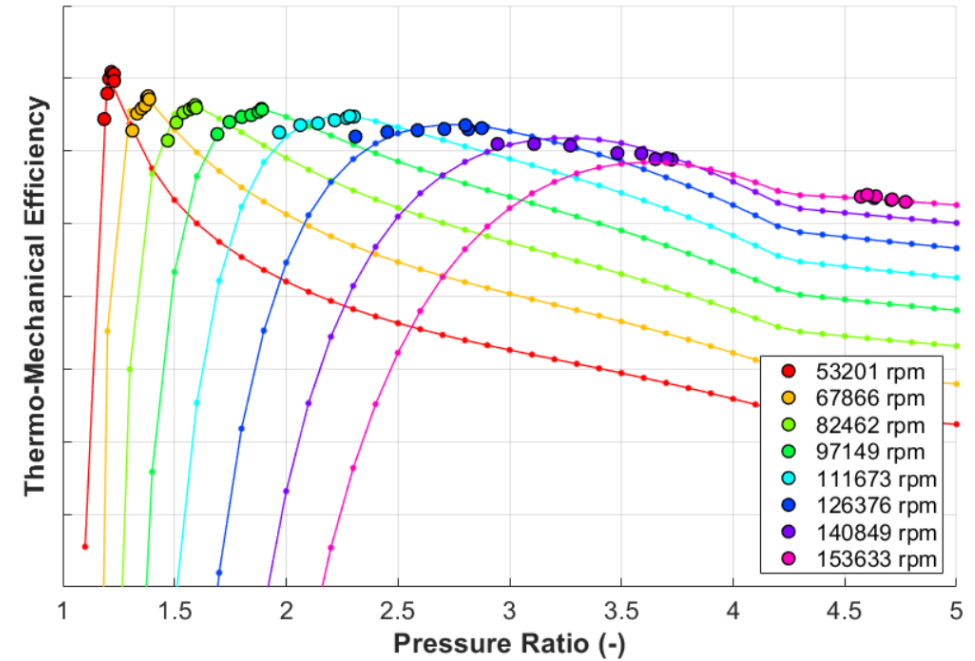
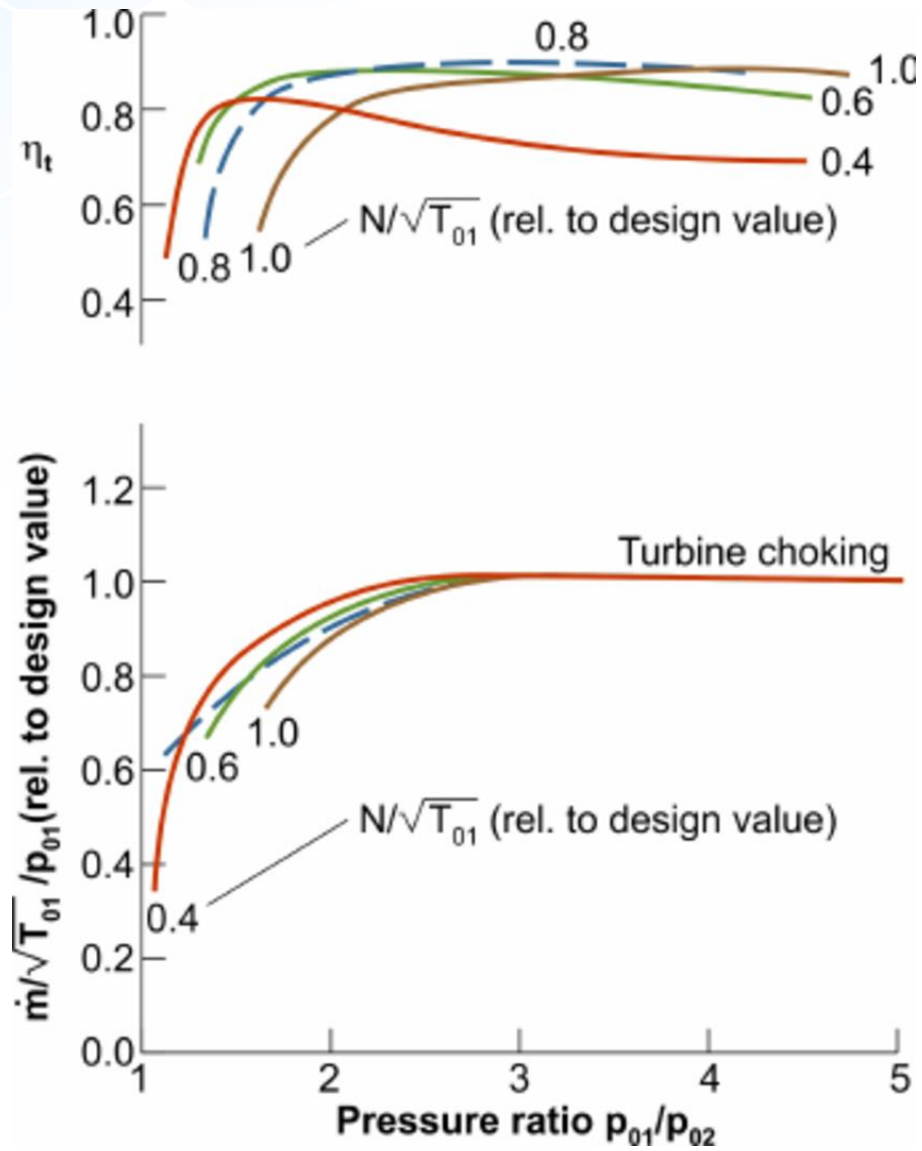






## منحنی‌های مشخصه توربوماشین‌ها

❖ منحنی‌های عملکردی توربین گازی





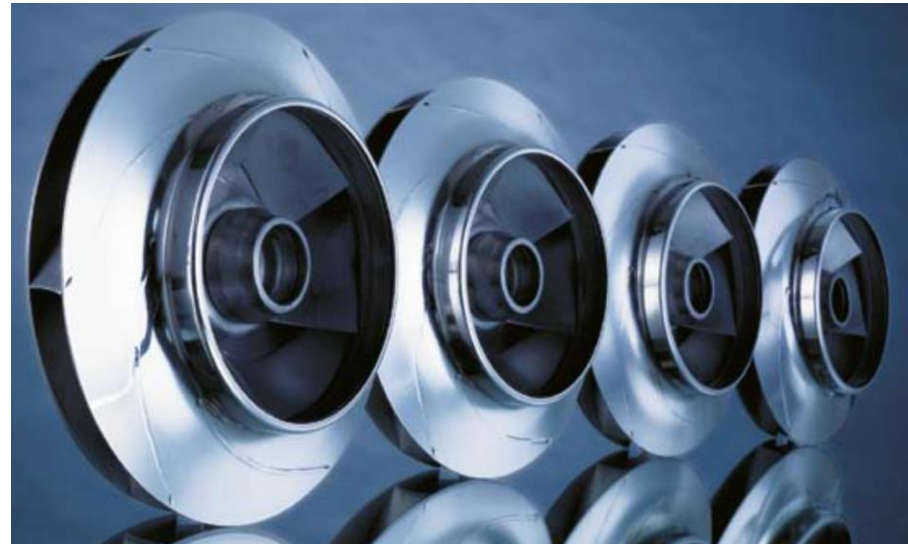
## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

❖ تشابه:

پیش‌بینی عملکرد مدل اصلی از روی مدل تست

❖ انواع تشابه:

۱- تشابه هندسی ۲- تشابه سینماتیکی (جهت سرعت‌ها یکسان) ۳- تشابه دینامیکی (جهت نیروها یکسان)





## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

### ❖ مشخصات موثر در توربوماشین‌های هیدرولیکی

1- مشخصات هندسی }  
length characteristic:  $D, \varepsilon$   
other characteristics:  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \dots$

2- مشخصات سیال }  
 $\rho$   
 $\mu$

3- مشخصات هیدرولیکی }  
 $Q$   
 $H$   
 $NPSH$  ← For cavitation

4- مشخصات مکانیکی }  
 $N$  or  $\omega$   
 $M$  or  $P$  or  $\eta$





## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

❖ قضیه  $\pi$  باکینگهامشش گروه بی بعد  $9-3=6$ کل متغیرها  $D, \varepsilon, \rho, \mu, Q, (gH), N, P, \eta$  ابعاد  $M, L, T$ متغیرهای تکرار  $\rho, N, D$ متغیرهای مستقل  $\mu, Q, \varepsilon$ متغیرهای وابسته  $P, (gH), \eta$ 

$$P = f_1(D, \varepsilon, \rho, \mu, Q, N)$$

$$gH = f_2(D, \varepsilon, \rho, \mu, Q, N)$$

$$\eta = f_3(D, \varepsilon, \rho, \mu, Q, N)$$







❖ گروه‌های بی بعد

Dimensionless group

$$\frac{P}{\rho N^3 D^5} = \bar{P} \quad \text{power coefficient}$$

$$\frac{\rho N D^2}{\mu} = Re \quad \text{Reynolds number}$$

$$\frac{Q}{N D^3} = \phi \quad \text{flow coefficient}$$

$$\frac{gH}{N^2 D^2} = \psi \quad \text{head coefficient}$$

$$\eta \quad \text{efficiency}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} \quad \text{roughness ratio}$$



$$\frac{P}{\rho N^3 D^5} = g_1 \left[ \left( \frac{\mu}{\rho N D^2} \right), \left( \frac{Q}{N D^3} \right), \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) \right]$$

$$\frac{gH}{N^2 D^2} = g_2 \left[ \left( \frac{\mu}{\rho N D^2} \right), \left( \frac{Q}{N D^3} \right), \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) \right]$$

$$\eta = g_3 \left[ \left( \frac{\mu}{\rho N D^2} \right), \left( \frac{Q}{N D^3} \right), \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) \right]$$





## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

❖ با داشتن منحنی‌های مشخصه یک پمپ برای یک سرعت دورانی معلوم، با استفاده از قوانین تشابه می‌توان منحنی‌های مشخصه آن را برای هر سرعت دورانی دلخواه دیگر بدست آورد.

❖ طبق قوانین تشابه داریم:

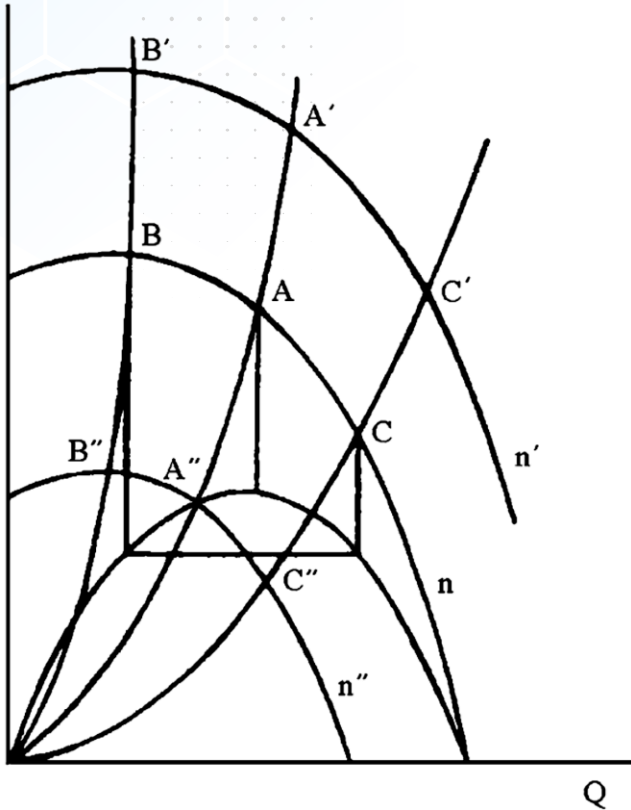
$$H'_A = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 H_A \quad \text{and} \quad Q'_A = \left(\frac{n}{n'}\right) Q_A$$

❖ بطور مشابه می‌توان نقاط  $A'$ ،  $B'$  و  $C'$  را در سرعت دورانی بیشتر و نقاط  $A''$ ،  $B''$  و  $C''$  را در سرعت دورانی کمتر بدست آورد.

❖ منحنی‌های بازده ثابت بصورت سهمی هستند.

❖ برای یک پمپ که در دورهای  $n_1$  و  $n_2$  کار می‌کند، زمانی که تشابه کاری وجود داشته باشد:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right), \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$





## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

## ❖ تعیین تقریبی ارتفاع مانومتریک پمپ‌های سانتریفوژ

- در محدوده پمپ‌های متداول صنعتی، ضریب ارتفاع  $\psi$  در نقطه حداکثر بازده بین حدود  $0.45$  و  $0.55$  تغییر می‌نماید. با توجه به محدوده کم تغییرات، می‌توان قبول کرد که به‌طور متوسط:

$$\frac{g H}{U_2^2} = 0.5 \quad \rightarrow \quad H = \frac{\left( \frac{\pi D_2 n}{60} \right)^2}{2g}$$

$$H = \left( \frac{D_2 n}{8450} \right)^2$$

- در سیستم واحد متریک:

- قطر خارجی چرخ  $D_2$  بر حسب سانتیمتر،  $n$  بر حسب دور در دقیقه و ارتفاع مانومتریک  $H$  بر حسب متر است.



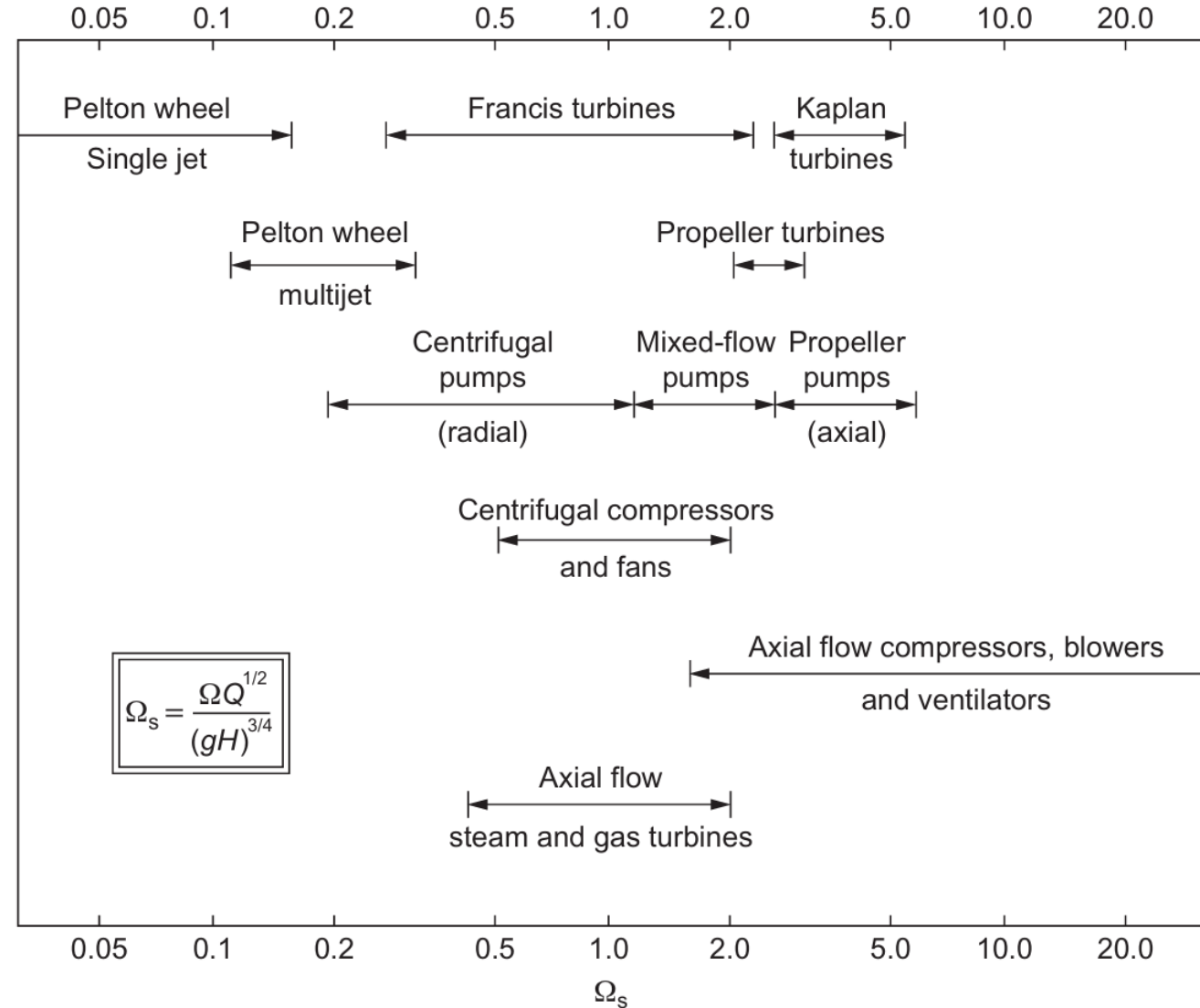


## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

❖ سرعت مخصوص

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(gH)^{3/4}} = \frac{\phi^{1/2}}{\psi^{3/4}} \longrightarrow \text{For Pumps}$$

$$N_{sp} = \frac{NP^{1/2}}{\rho^{1/2}(gH)^{5/4}} \longrightarrow \text{For Turbines}$$





## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

## ❖ سرعت مخصوص

○ ضرایب ارتفاع و دبی بی‌بعد را مجدداً بصورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\psi = \frac{gH}{U_2^2} = \frac{gH}{R_2^2 \omega^2} \quad \text{and} \quad \delta = \frac{Q}{U_2 R_2^2} = \frac{Q}{R_2^3 \omega} \quad \rightarrow \quad R_2 = \left( \frac{gH}{\psi \omega^2} \right)^{1/2} = \left( \frac{Q}{\delta \omega} \right)^{1/3} \quad \rightarrow \quad \delta \left( \frac{g}{\psi} \right)^{3/2} = \frac{\omega^2 Q}{H^{3/2}}$$

$$\omega \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} = Cte$$

○ سمت چپ رابطه برای کلیه پمپ‌های از یک فامیل که در شرایط مشابه کار می‌کنند، برابر است.

$$\omega_s \frac{1^{1/2}}{1^{3/4}} = \omega \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

○ سرعت مخصوص یک پمپ عبارت است از سرعت دورانی پمپی از همان فامیل که ارتفاع

مانومتریک واحد را در دبی واحد تولید کند.

$$\omega_s = \omega \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad n_s = n \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

$$n_s = n(rpm) \frac{\sqrt{Q(m^3/s)}}{H^{3/4}(m)}$$

$$n_s \text{ (انگلیسی)} = rpm \frac{\sqrt{Q \text{ (GPM)}}}{H \text{ (ft)}} \quad n_s \text{ (English units)} = 51.6 n_s \text{ (Metric units)}$$





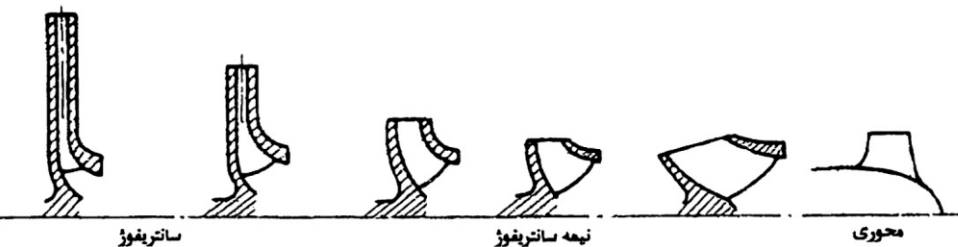
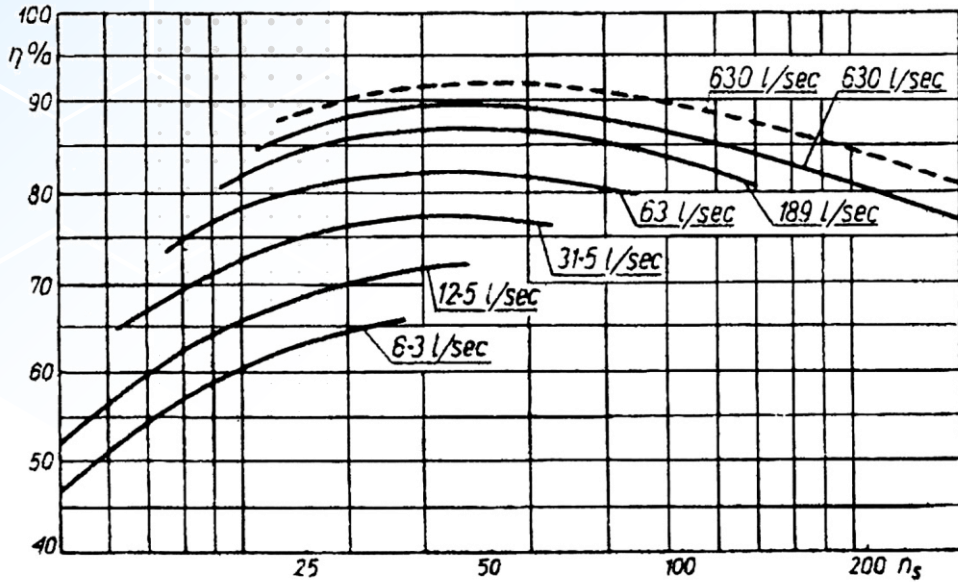
## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم ناپذیر (هیدرولیکی)

❖ با توجه به آن که سرعت مخصوص کلیه پمپ‌های یک فامیل یکسان است (در شرایط راندمان حداکثر). آن را می‌توان به عنوان شاخص طبقه‌بندی پمپ‌ها تلقی کرد. (ضریب شکل).

(اگر مدارک طراحی پمپی در دست باشد، می‌توان به کمک سرعت مخصوص و قوانین تشابه مدارک طراحی کلیه پمپ‌های هم‌تیپ را تعیین نمود).

❖ سرعت مخصوص با دبی تناسب مستقیم و با ارتفاع تناسب معکوس دارد. بنابراین در سرعت دورانی یکسان پمپ‌هایی که ارتفاع زیادی دارند (پمپ‌های سانتریفوژ) دارای سرعت مخصوص پایین می‌باشند.

❖ پمپ‌های که دبی زیاد دارند (پمپ‌های محوری)، دارای سرعت مخصوص بالا می‌باشند.





## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم پذیر

### ❖ روش اول

○ فرضیات

- گاز کامل

- صرف نظر از زبری سطح

○ متغیرهای تکرار  $D, \rho_{01}, N$

$$Q \rightarrow \dot{m}$$

$$H \rightarrow \Delta h_{0s}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta h_{0s} = f_1(D, \rho_{01}, \mu, \gamma, a_{01}, \dot{m}, N) \\ P = f_2(D, \rho_{01}, \mu, \gamma, a_{01}, \dot{m}, N) \\ \eta = f_3(D, \rho_{01}, \mu, \gamma, a_{01}, \dot{m}, N) \end{array} \right.$$





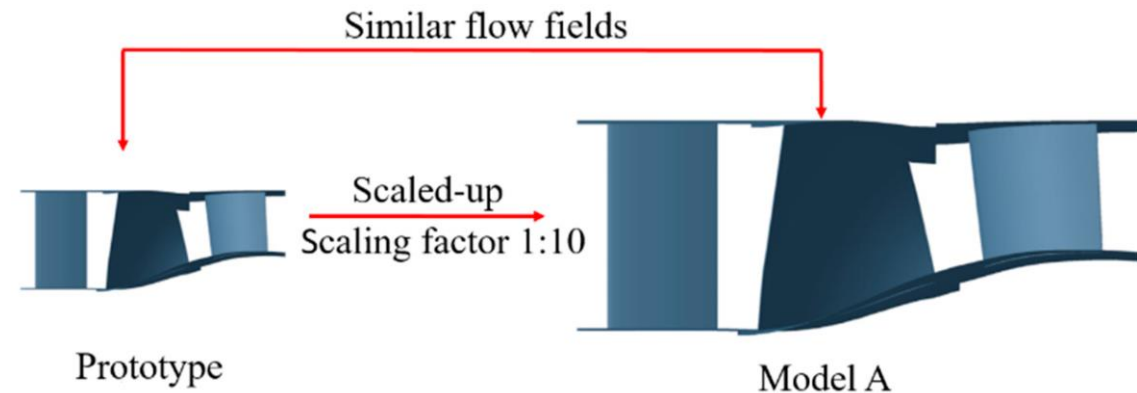
## تحلیل ابعادی در ماشین‌های تراکم پذیر

❖ روش اول

$$\frac{\Delta h_{0s}}{N^2 D^2} = g_1 \left( \frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}, \frac{\rho_{01} N D^2}{\mu}, \frac{N D}{a_{01}}, \gamma \right)$$

$$\frac{P}{\rho_{01} N^3 D^5} = g_2 \left( \frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}, \frac{\rho_{01} N D^2}{\mu}, \frac{N D}{a_{01}}, \gamma \right)$$

$$\eta = g_3 \left( \frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}, \frac{\rho_{01} N D^2}{\mu}, \frac{N D}{a_{01}}, \gamma \right)$$





## تحلیل ابعادی در ماشین های تراکم پذیر

❖ روش دوم

○ فرضیات

- گاز کامل

- صرف نظر از زبری سطح

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

$$P_{02} = f(D, N, \dot{m}, P_{01}, T_{01}, T_{02}, \rho_{01}, \rho_{02}, \mu)$$

$$P_{02} = f'(P_{01}, T_{01}, T_{02}, \dot{m}, N, D, \mu)$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = f''\left(\left(\frac{T_{02}}{T_{01}}\right), \left(\frac{\dot{m}(RT_{01})^{1/2}}{P_{01}D^2}\right), \left(\frac{ND}{(RT_{01})^{1/2}}\right), Re\right)$$



سپاس از توجه شما

---