

توربو ماشین ها

محمدصادق کریمی

دکتری تخصصی مهندسی مکانیک





سطوح و منحنی‌های مشخصه، تعیین تجربی منحنی‌های مشخصه

۱-۴

مشخصه‌های ایده‌آل توربوپمپ‌ها

۲-۴

ضریب عکس‌العمل، زاویه خروجی چرخ، رابطه مثلث سرعت و منحنی مشخصه

۳-۴

تحلیل ابعادی و تشابه، کمیت‌های تشابهی، سرعت مخصوص، طبقه‌بندی پمپ‌ها

۴-۴





سرفصل‌ها

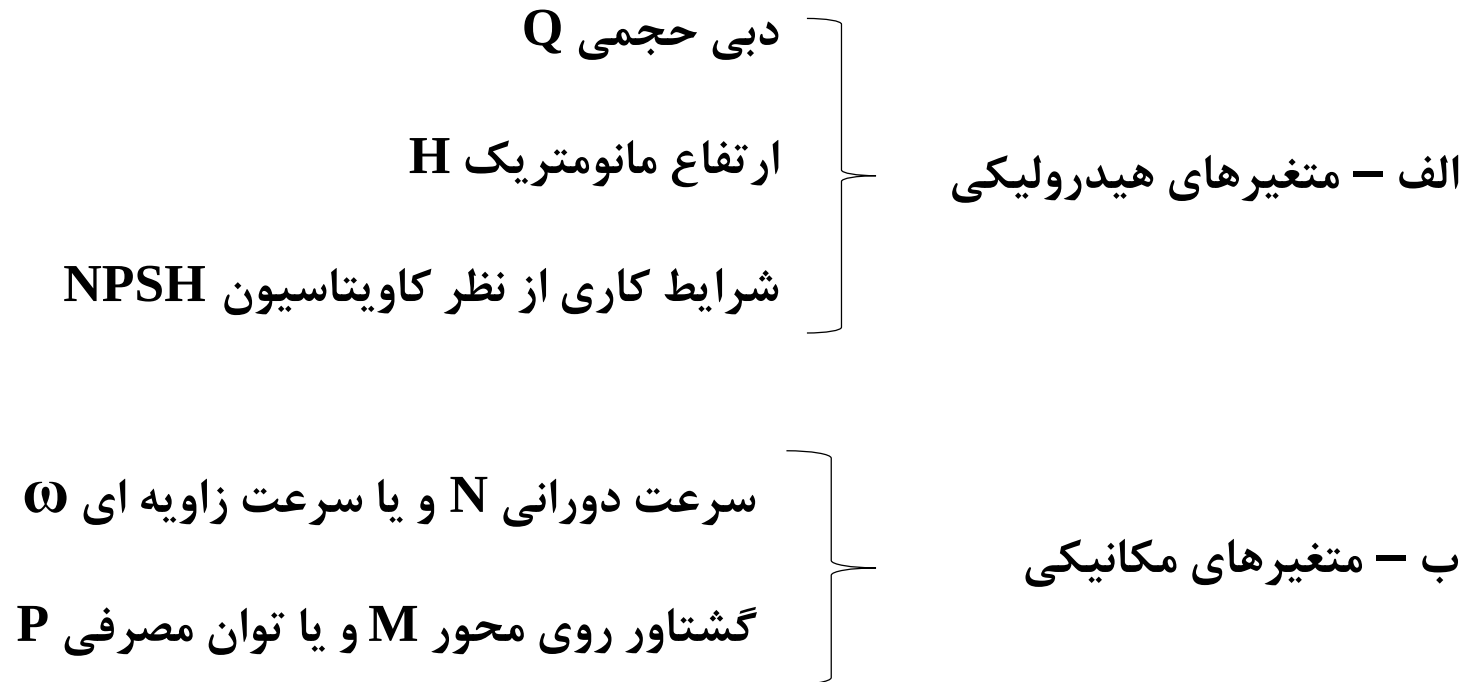
- ❖ تعریف سطوح مشخصه
- ❖ منحنی‌های مشخصه
- ❖ ضریب باز شدگی
- ❖ تعیین تجربی منحنی‌های مشخصه
- ❖ مشخصه‌های ایده‌آل توربوپمپ‌ها
- ❖ زاویه خروجی چرخ و ضریب عکس العمل
- ❖ عوامل موثر در انتخاب زاویه خروجی پره‌ها
- ❖ رابطه بین مثلث سرعت خروجی و مشخصه ایده‌آل





تعريف سطوح مشخصه

❖ متغيرهای مشخص کننده‌ی کار پمپ در رژيم (شرایط عادی کار که پمپ به سرعت دورانی ثابت N رسیده باشد) از دیدگاه مصرف کننده:





تعریف سطوح مشخصه

$$P = M \omega$$

قدرت جذبی پمپ

$$\eta = \frac{\gamma Q H}{P}$$

بازده

از بین تمامی متغیرهای بالا فقط یک متغیر هیدرولیکی (عملاً دبی) و یک متغیر مکانیکی (عمدتاً سرعت زاویه‌ای پمپ) مستقل هستند.

در این حالت تمامی متغیرها تابعی از Q و ω خواهند بود.

$$H = f_1 (Q, \omega)$$

$$P = f_3 (Q, \omega)$$

$$M = f_2 (Q, \omega)$$

$$\eta = f_4 (Q, \omega)$$

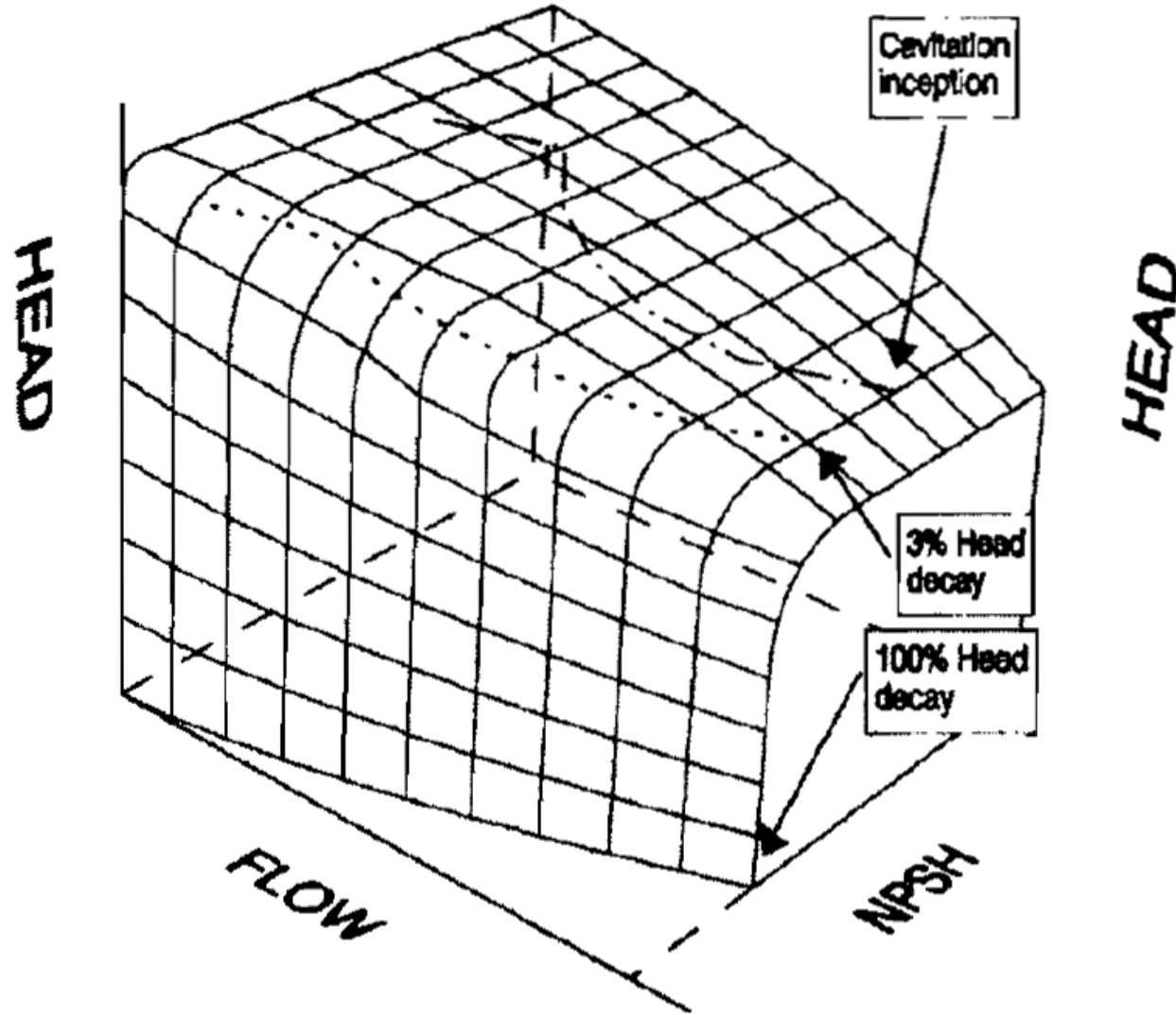
هر یک از روابط بالا یک سطح سه بعدی را در فضا مشخص می‌کند که سطوح مشخصه‌ی پمپ نامیده می‌شود.

با دانستن دو سطح مشخصه می‌توان دو سطح دیگر را به کمک روابط بالا مشخص کرد.



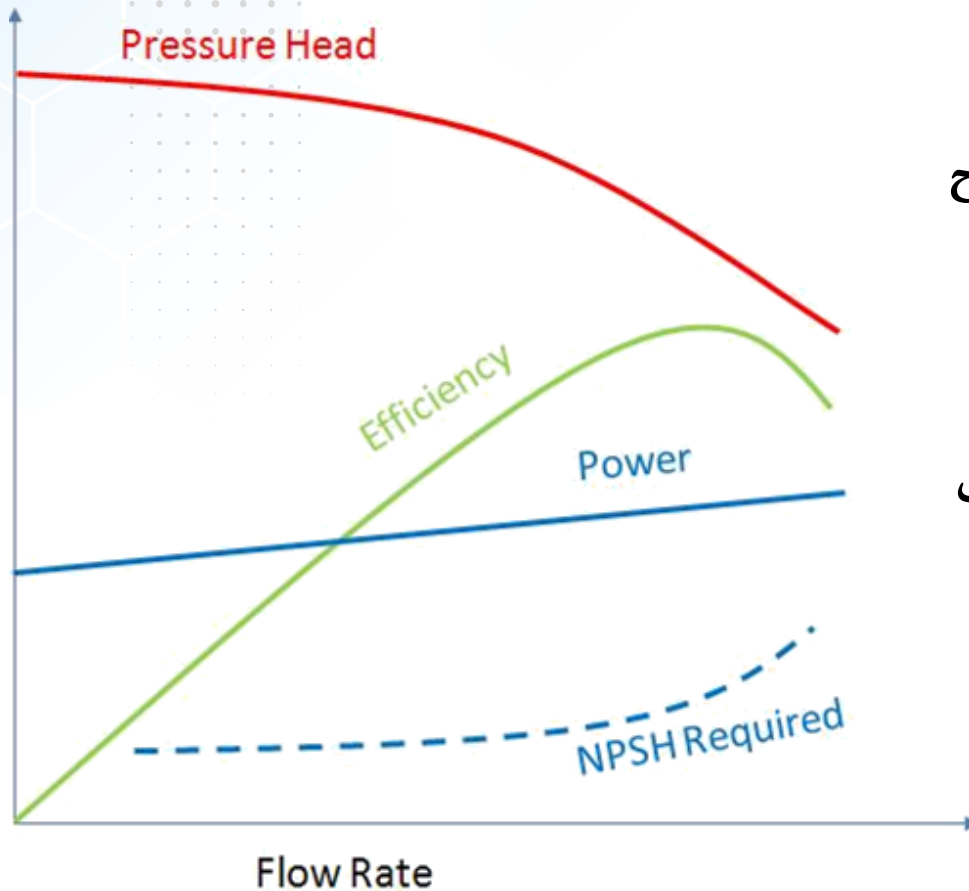


منحنی های مشخصه





منحنی‌های مشخصه



مشکلات نمایش مشخصات پمپ در فضا

استفاده از پمپ‌ها در سرعت‌های ثابت، نمایش فصل مشترک سطوح

مشخصه با سطح $\omega = cte$

$$H = f_1(Q)$$

ارتفاع مانومتریک معمولاً سهمی‌گون با یک ماکزیمم و گاهی کاملاً نزولی

$$M = f_2(Q)$$

$$P = f_3(Q)$$

قدرت جذبی تقریباً خطی و تابع نوع پمپ

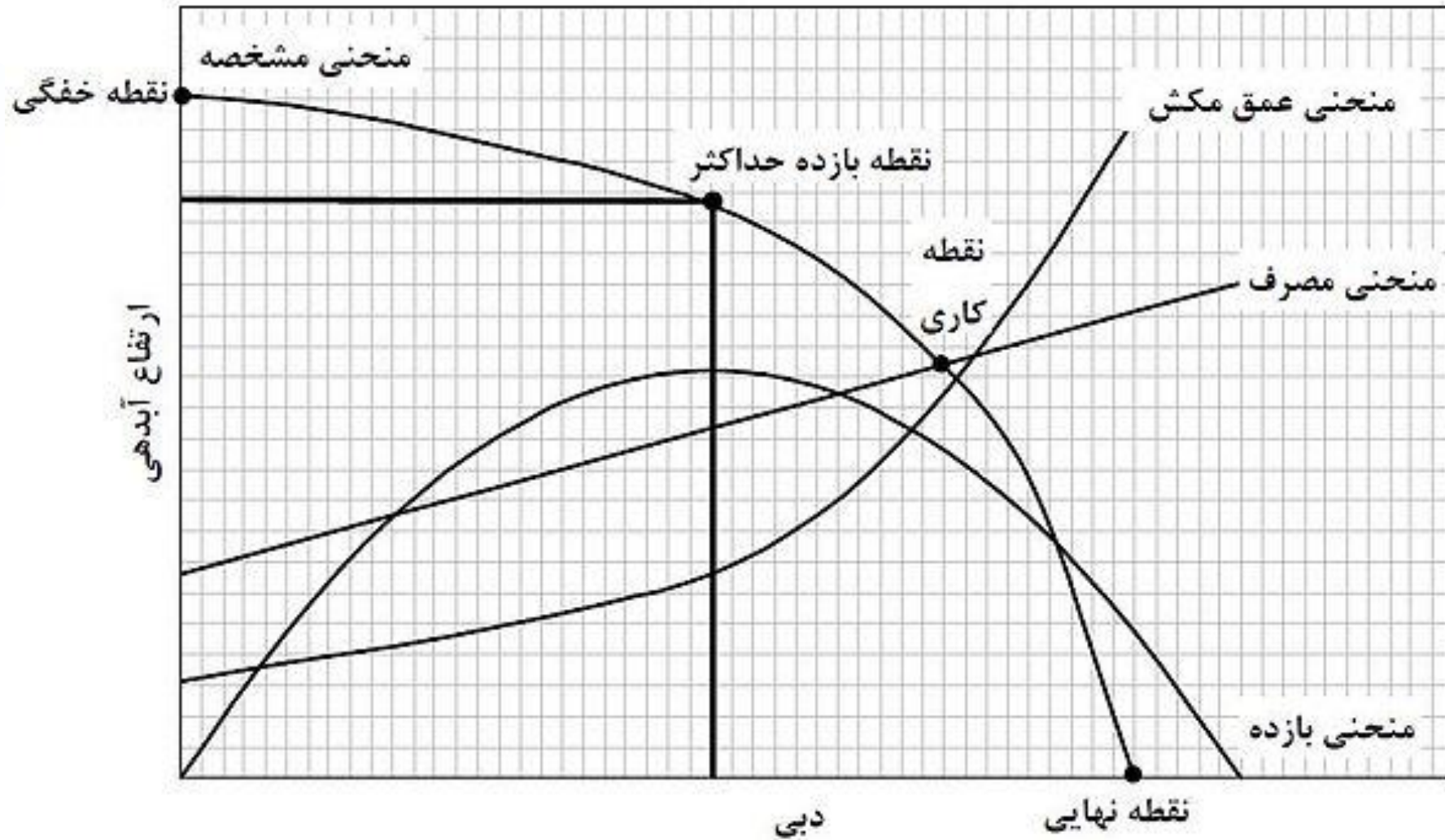
$$\eta = f_4(Q)$$

بازده در مبدا و حداکثر دبی صفر است. در این میان یک مقدار حداکثر دارد.



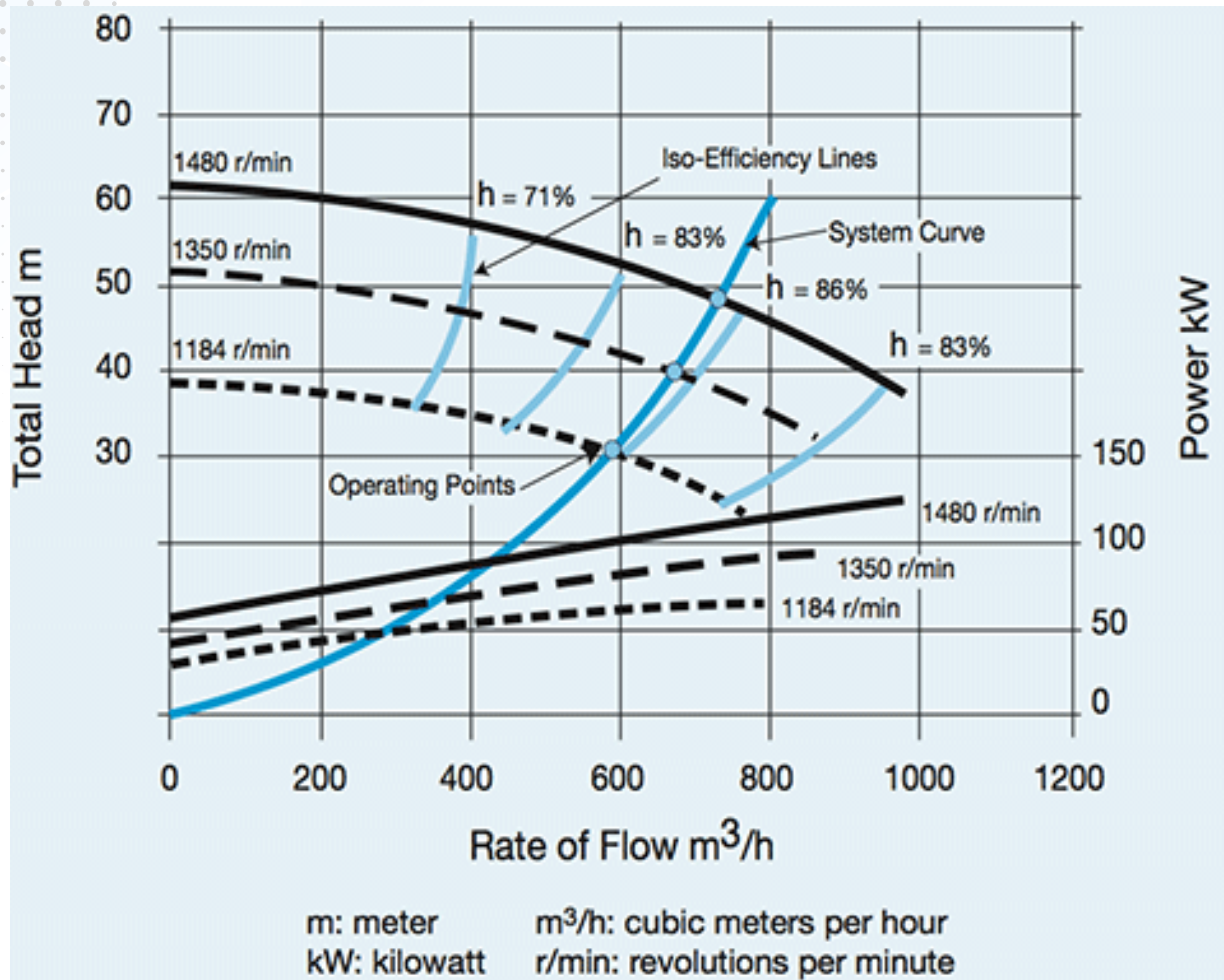


منحنی‌های مشخصه





منحنی های مشخصه

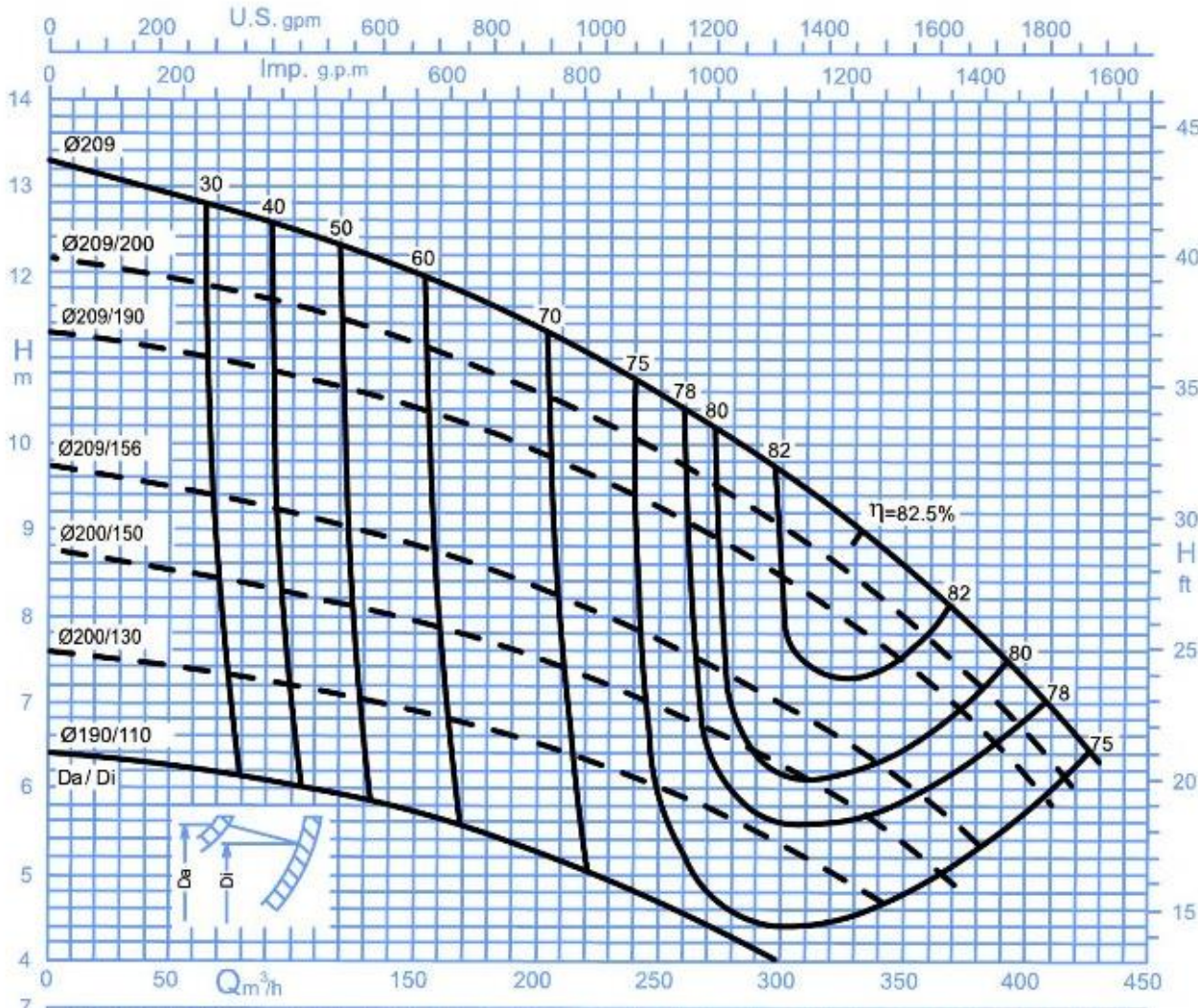


امکان رسم منحنی های مختلف به ازای
سرعت های مختلف و رسم نقاط
ایزو راندمان





منحنی های مشخصه



امکان رسم منحنی های مختلف
به ازای قطرهای مختلف و رسم نقاط
ایزو راندمان





تعیین تجربی منحنی‌های مشخصه

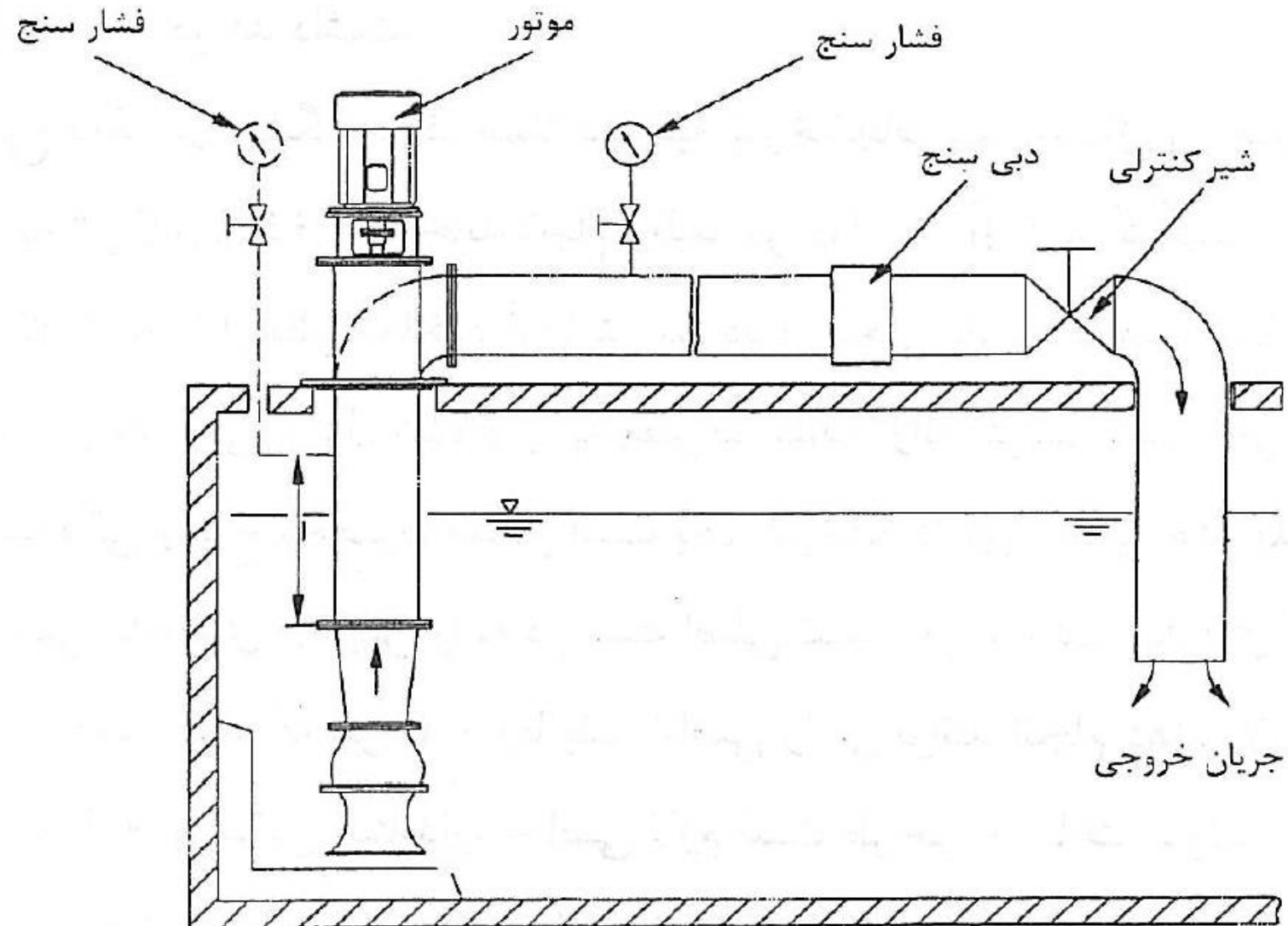
نصب پمپ روی یک مدار آزمایش استاندارد شامل قسمت‌های اصلی زیر:

1. پمپ مورد آزمایش
2. موتور محرک پمپ
3. لوله‌های مکش و رانش
4. وسایل تنظیم به منظور تغییر دبی و سرعت دورانی
5. دستگاه‌های اندازه‌گیری کمیات ω ، Q ، H و M یا P





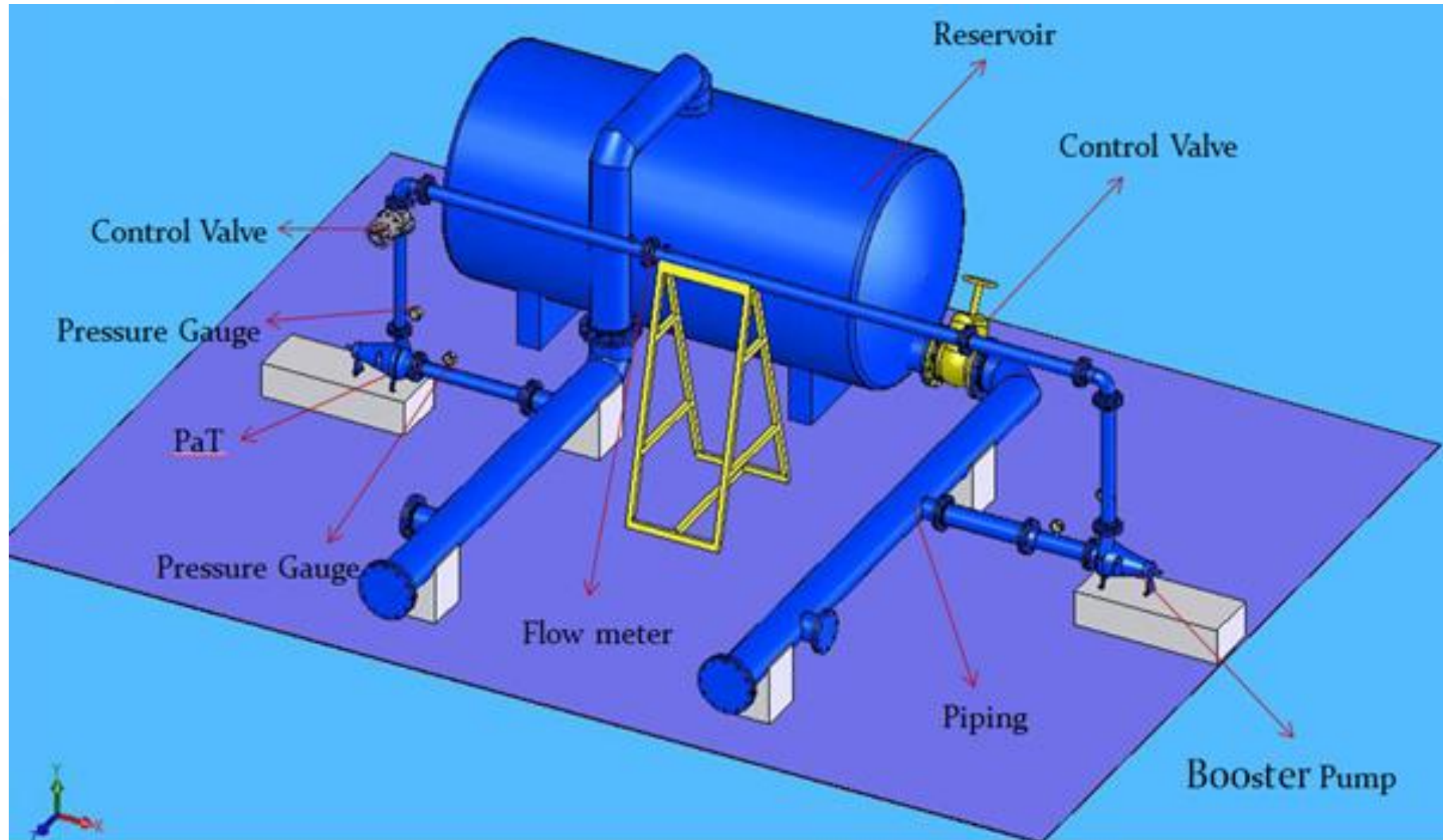
تعریف سطوح مشخصه



تعیین تجربی منحنی‌های مشخصه



تعیین تجربی منحنی‌های مشخصه





تعیین تجربی منحنی‌های مشخصه

- ❖ اندازه‌گیری دبی با کمک وانتوری، اوریفیس یا دبی‌سنج‌های مغناطیسی
- استفاده از اوریفیس یا ونتوری روی خط رانش به جهت اجتناب از کاویتاسیون
- ❖ تعیین ارتفاع مانومتریک طبق رابطه‌ی زیر و با اندازه‌گیری کمیت‌های:

$$H = \frac{P_3 - P_0}{\gamma} + \frac{C_3^2 - C_0^2}{2g} + Z_3 - Z_0$$

1. فشارهای استاتیکی ورودی و خروجی پمپ P_3 و P_0
2. اختلاف ارتفاع هندسی در خط مکش $Z_3 - Z_0$ ؛ معمولاً حذف می‌شود.
3. سرعت متوسط سیال در ورود و خروج از پمپ C_3 و C_0 با توجه به دبی و سطح عبوری؛ اگر قطر دهانه‌ی ورودی و خروجی پمپ برابر باشد این جمله حذف می‌شود.





تعیین تجربی منحنی‌های مشخصه

- ❖ اندازه‌گیری سرعت دورانی n با کمک دورسنج‌های مکانیکی یا الکترونیکی
- ❖ اندازه‌گیری گشتاور محوری به صورت مستقیم به کمک تورک‌متر یا دینامومتر

❖ رسم منحنی‌های مشخصه در سرعت ثابت

1. در یک دور ثابت با تغییر دبی، ارتفاع و قدرت جذبی را اندازه‌گیری کرده و از وصل کردن

نقاط به یکدیگر منحنی $H = f_1(Q)$ و $P = f_2(Q)$ به دست آید.

1. محاسبه‌ی منحنی‌های $\eta = f_3(Q)$ به کمک رابطه‌ی موجود

2. تکرار مراحل بالا برای سرعت‌های دیگر





مشخصه‌های ایده‌آل توربوپمپ‌ها

❖ محاسبه‌ی مشخصه‌های ارتفاع اویلری و قدرت جذبی ایده‌آل توربوپمپ‌های سانتریفیوژ بر حسب مشخصات هندسی

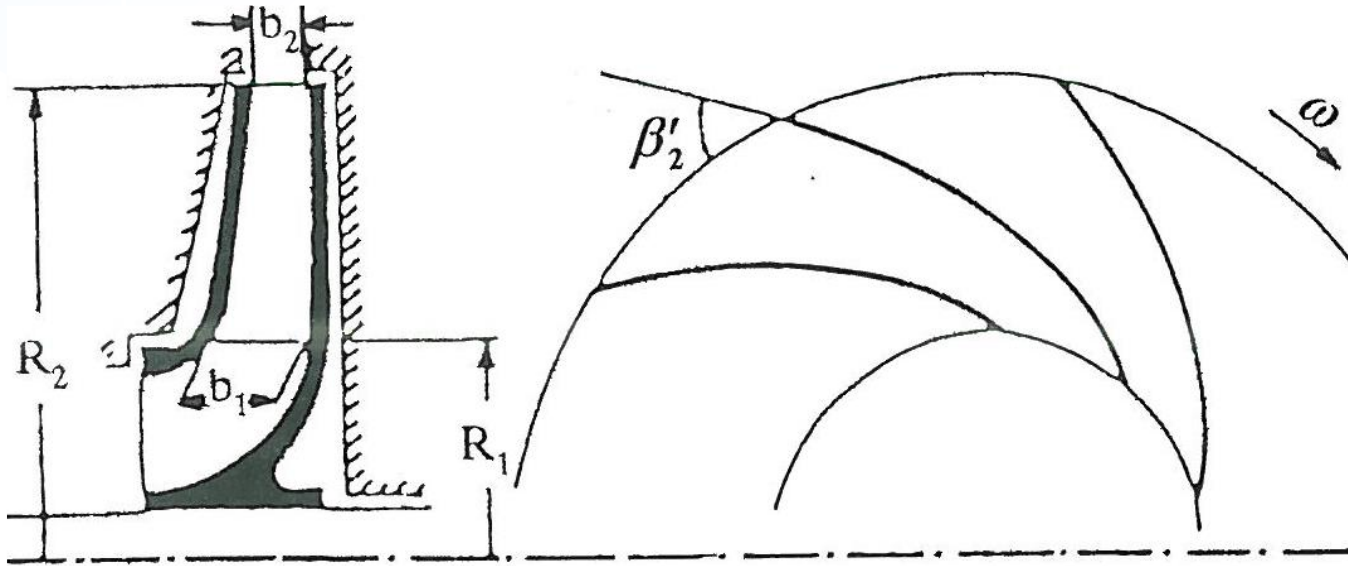
❖ شعاع ورودی و خروجی پره‌ها؛ R_1 و R_2

❖ پهنای ورودی و خروجی پره‌ها؛ b_1 و b_2

❖ ضخامت پره‌ها در ورود و خروج؛ e_1 و e_2

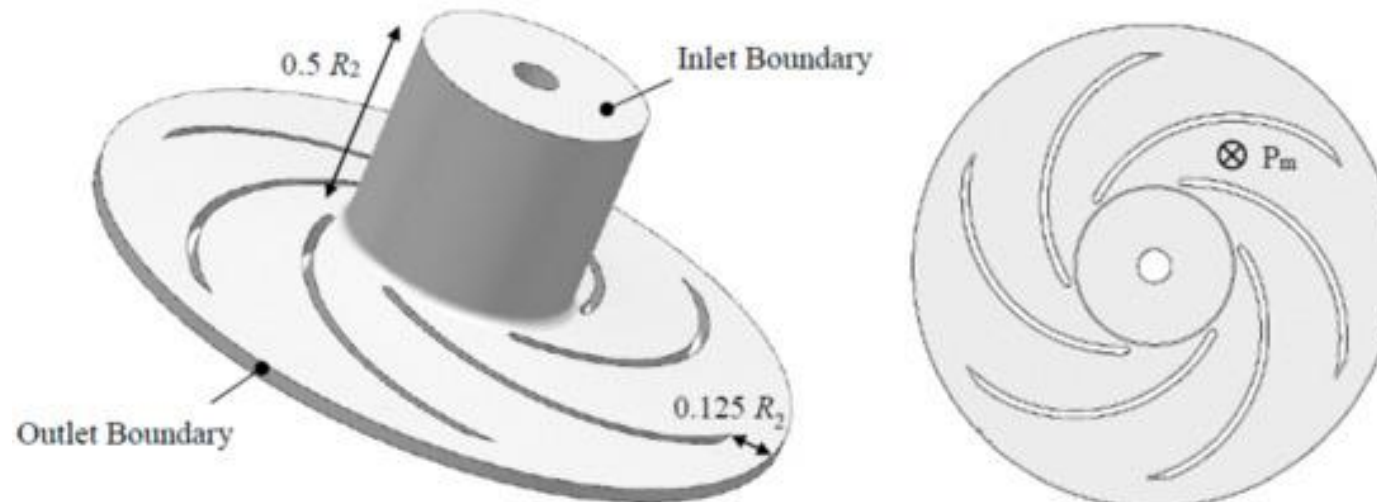
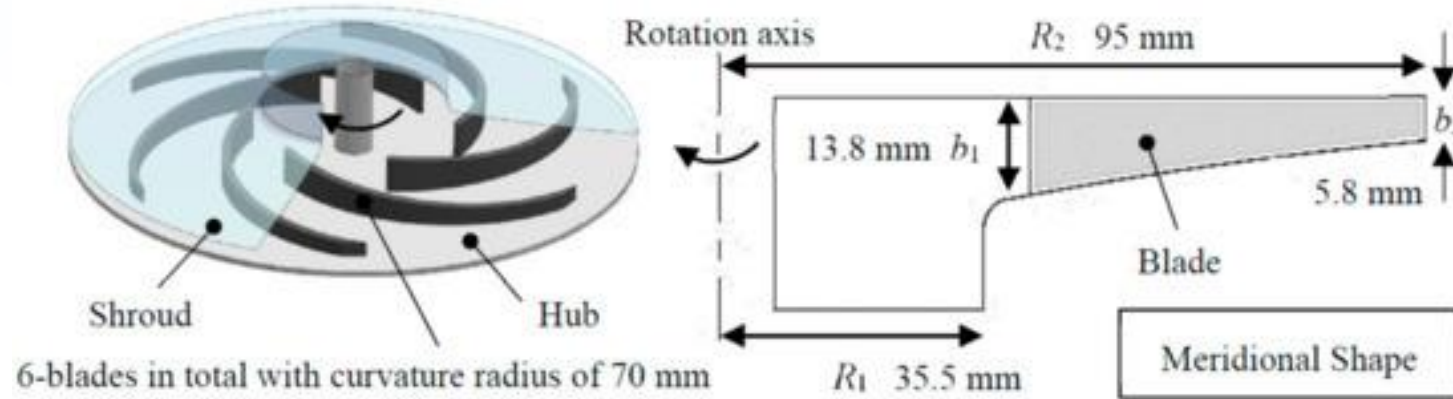
❖ زاویه ورودی و خروجی پره‌ها؛ β'_1 و β'_2

❖ تعداد پره‌ها Z و سرعت دورانی چرخ n





مشخصه‌های ایده‌آل توربوپمپ‌ها



مشخصه‌های ایده آل توربوپمپ‌ها





مشخصه‌های ایده‌آل توربوپمپ‌ها

❖ معادله‌ی اوילر با استفاده از تئوری یک بعدی:

$$H'' = \frac{1}{g} (U_2 C_2 \cos \alpha_2 - U_1 C_1 \cos \alpha_1)$$

❖ با فرض امتداد جریان به صورت شعاعی در ورود به پره‌ها (بدون چرخش؛ $\alpha_1 = 90^\circ$) داریم:

$$H'' = \frac{1}{g} (U_2 C_2 \cos \alpha_2)$$

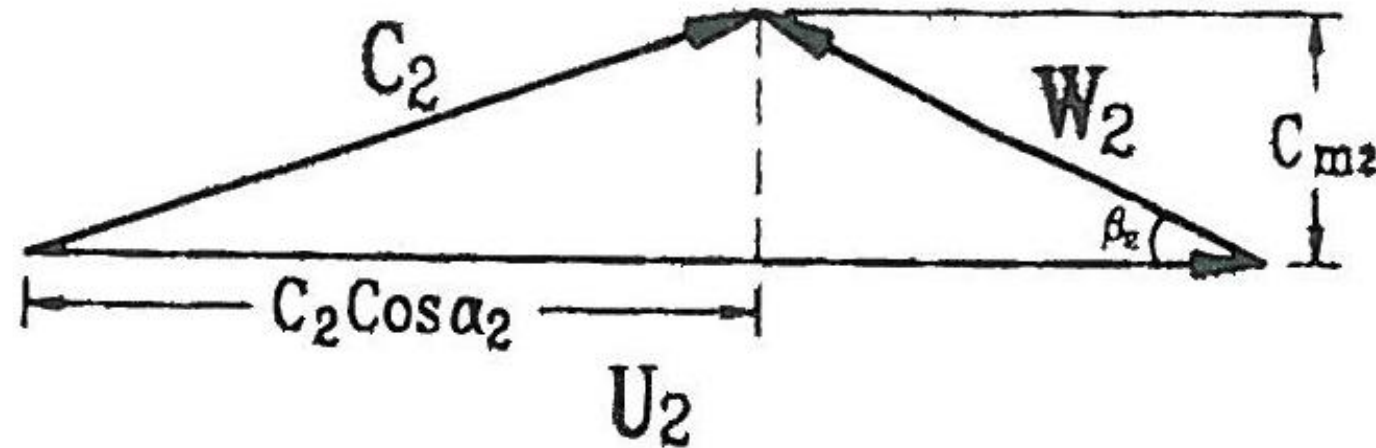




مشخصه های ایده آل توربوپمپ ها

❖ از مثلث سرعت خروجی می توان نوشت:

$$C_2 \cos \alpha_2 = U_2 - C_{m2} \cotg \beta_2$$



❖ بنابراین:

$$H'' = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} C_{m2} \cotg \beta_2$$





مشخصه‌های ایده‌آل توربوپمپ‌ها

❖ معادله‌ی پیوستگی:

$$C_{m2} = \frac{Q''}{A_2}$$



سطح عبوری سیال در خروج از چرخ

$$A_2 = 2 \pi K_2 R_2 b_2$$

❖ پس:

$$H'' = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \frac{Q''}{A_2} \cotg \beta_2$$





مشخصه های ایده آل توربوپمپ ها

❖ اثر کاهش سطح خروجی بواسطه ی ضخامت پره ها بوسیله ضریب انسداد (K_2) مشخص می شود.

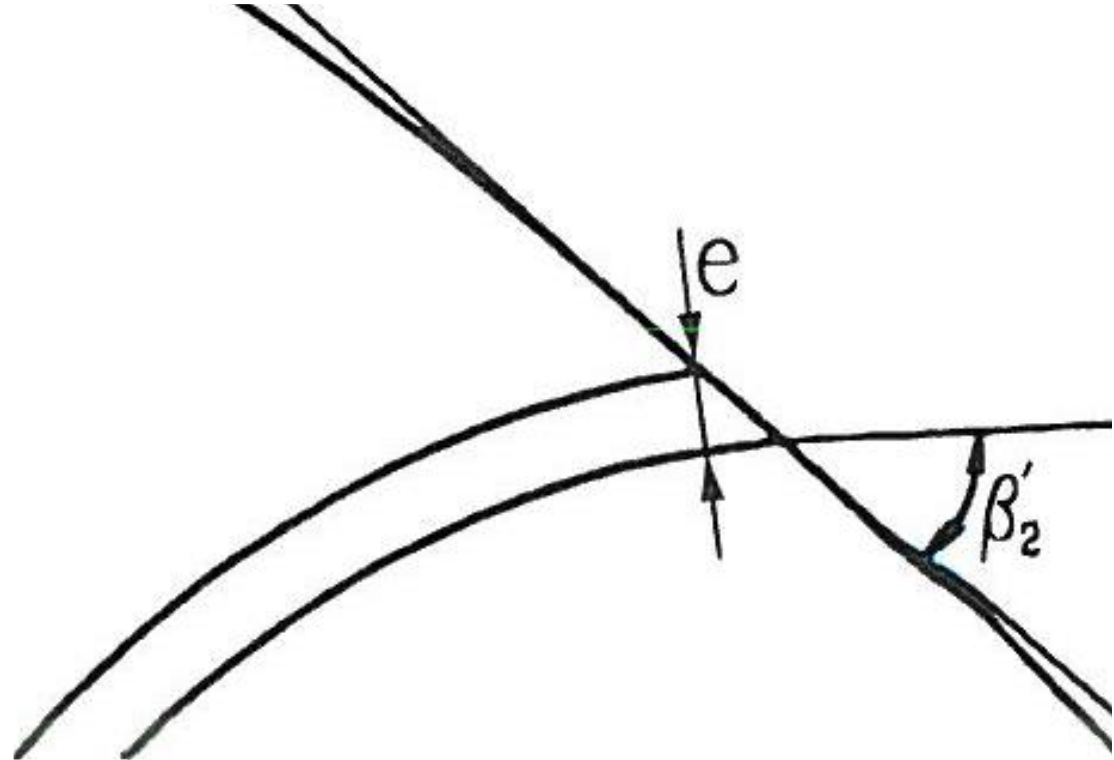
$$2 \pi K_2 R_2 = 2 \pi R_2 - Z \frac{e_2}{\sin \beta'_2}$$

و یا:

$$K_2 = 1 - Z \frac{e_2}{2 \pi R_2 \sin \beta'_2}$$

بنابراین:

$$H'' = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \frac{Q''}{2 \pi K_2 R_2 b_2} \cotg \beta_2$$





مشخصه‌های ایده‌آل توربوپمپ‌ها

❖ β_2 زاویه خروج سیال و β'_2 زاویه خروجی پره است. فعلا فرض می‌کنیم:

$$\beta_2 = \beta'_2$$

❖ با فرض بی‌نهایت پره به ضخامت صفر:

$$H''_{\infty} = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \frac{Q''}{2 \pi K_2 R_2 b_2} \cotg \beta'_2$$

❖ با توجه به:

$$P'' = \gamma Q'' H''$$

مشخصه ایده‌آل قدرت جذبی:

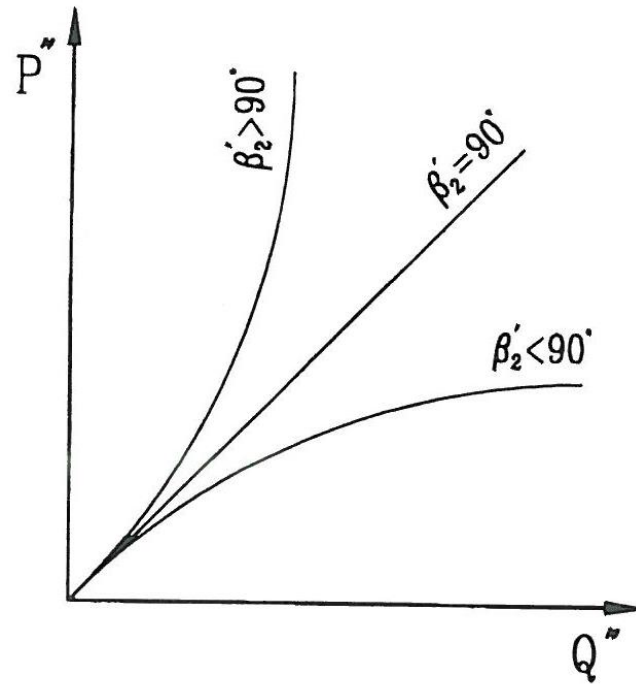
$$P'' = \gamma \left(\frac{U_2^2}{g} Q'' - \frac{U_2}{g} \frac{Q''^2}{2 \pi K_2 R_2 b_2} \cotg \beta'_2 \right)$$



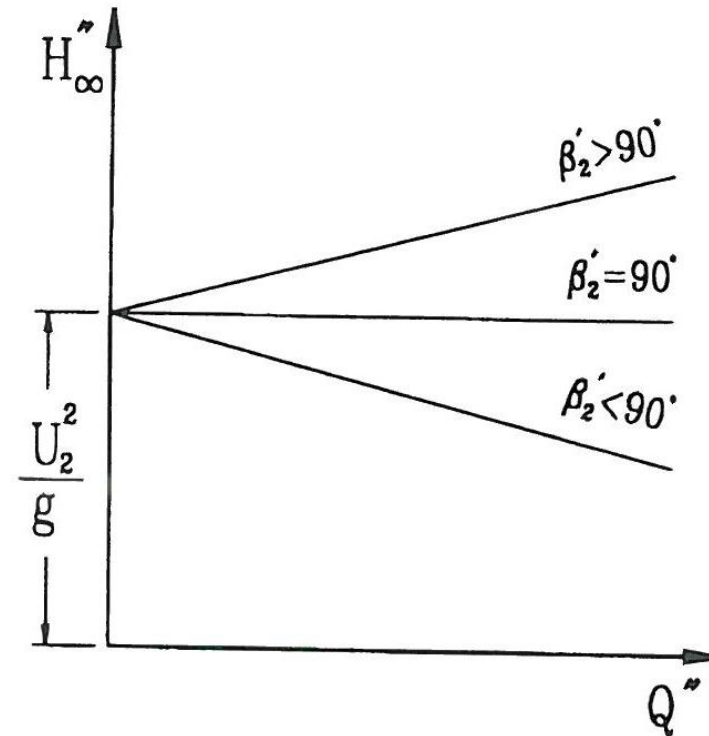


مشخصه های ایده آل توربوپمپ ها

$$P'' = \gamma \left(\frac{U_2^2}{g} Q'' - \frac{U_2}{g} \frac{Q''^2}{2 \pi K_2 R_2 b_2} \cotg \beta'_2 \right)$$

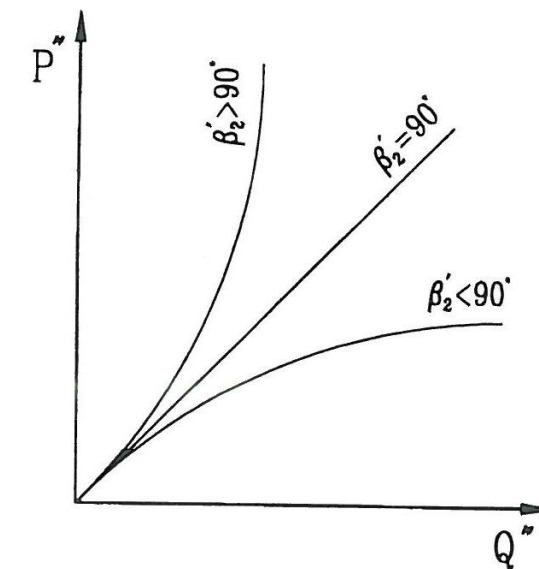
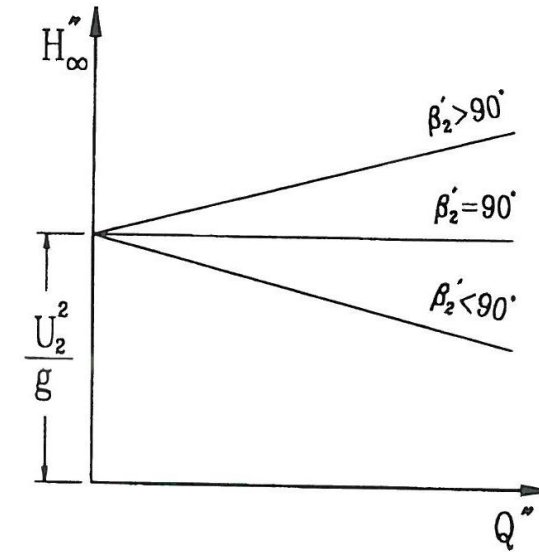
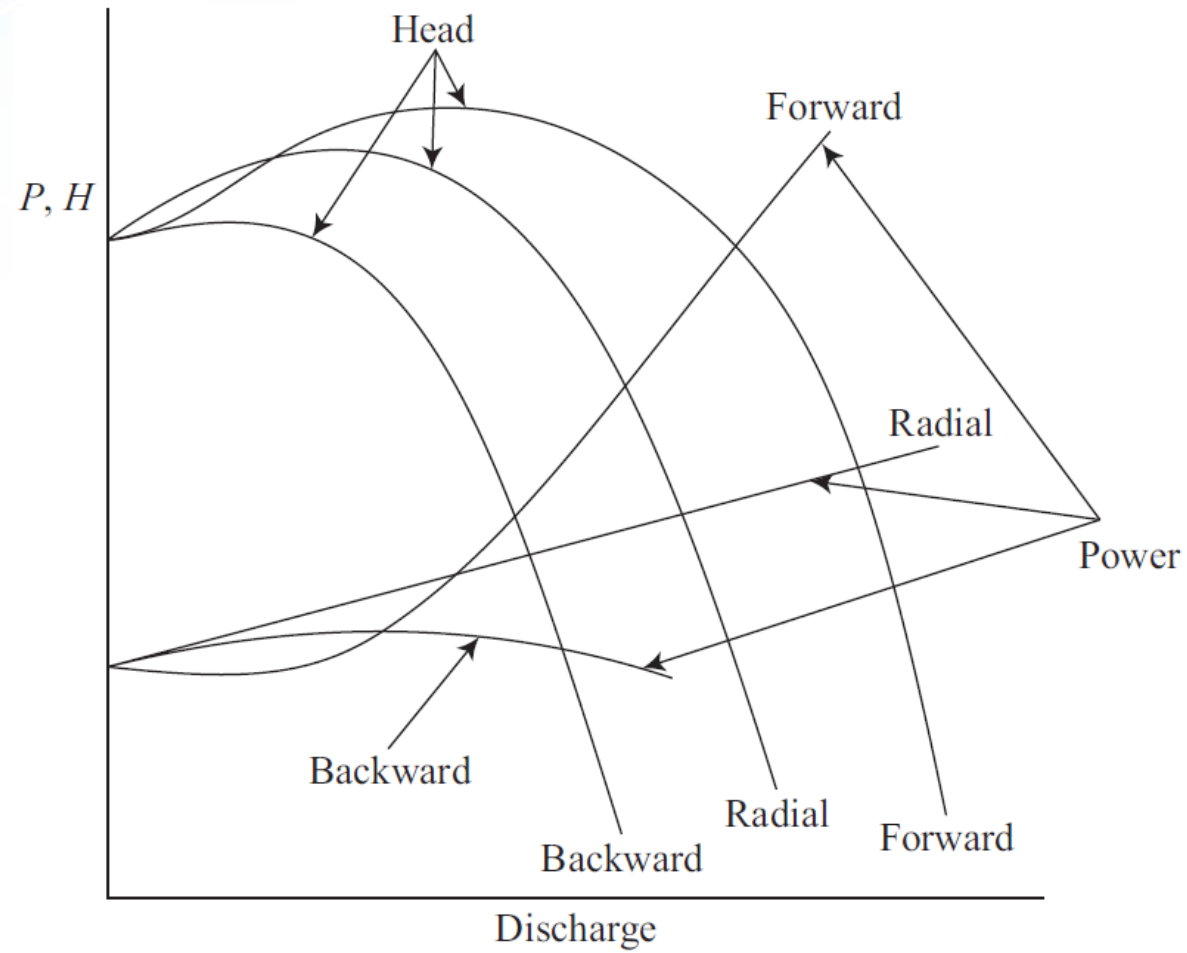


$$H''_\infty = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \frac{Q''}{2 \pi K_2 R_2 b_2} \cotg \beta'_2$$



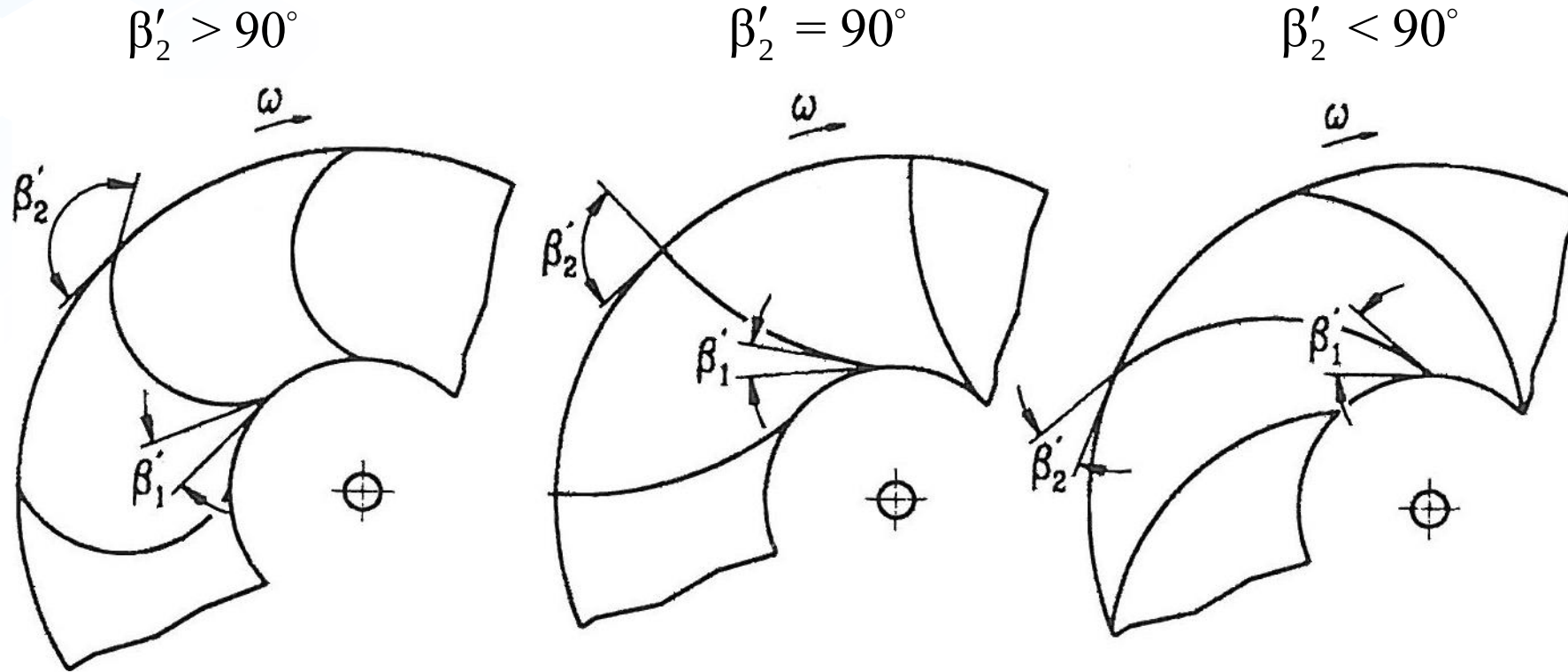


سطوح و منحنی‌های مشخصه





سطوح و منحنی‌های مشخصه



چرخ سانتریفیوژ با پره‌های رو به جلو؛

- (1) ارتفاع مانومتریک بالا
- (2) حداکثر انتقال قدرت در حجم ثابت نسبت به سایر چرخ‌ها

چرخ سانتریفیوژ با پره‌های شعاعی؛

- (1) مناسب سرعت‌های دورانی بالا
- (2) انتقال قدرت بالا در حجم کم
- (3) ارتفاع ثابت در دبی‌های مختلف
- (4) مناسب انتقال جریان دوفازی همراه با جامد

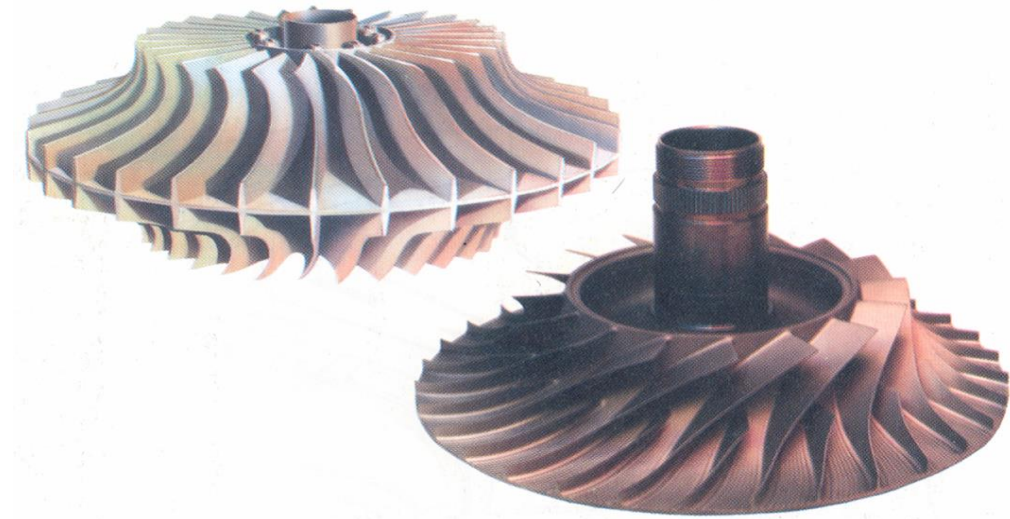
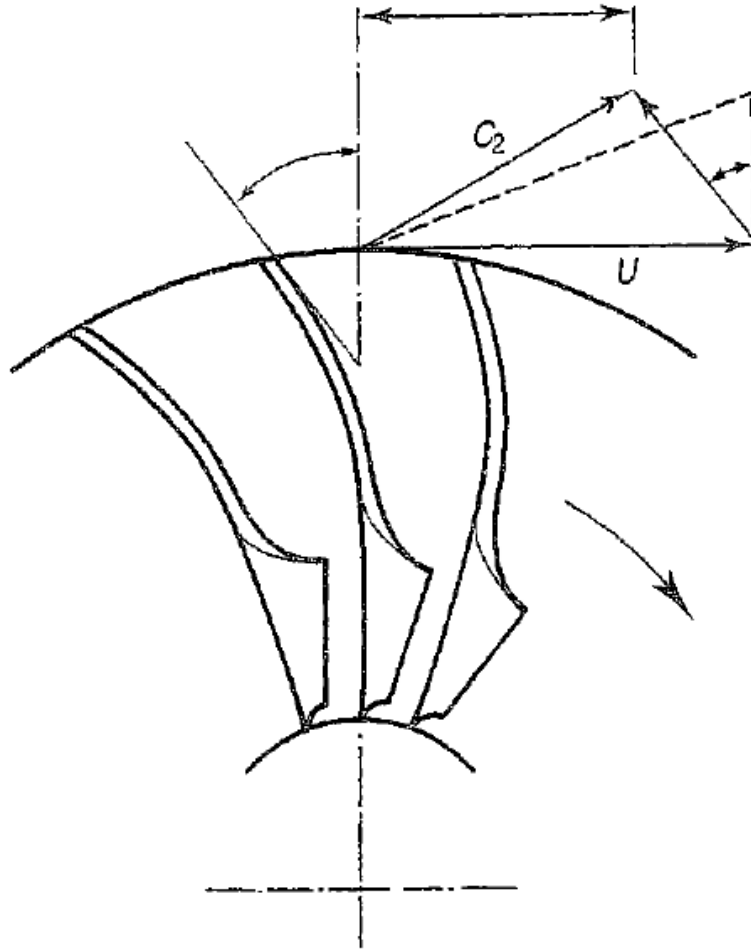
چرخ سانتریفیوژ با پره‌های رو به عقب؛

- (1) ضریب عکس‌العمل بالا
- (2) بازده بالا
- (3) منحنی مشخصه‌ی پایدار از دبی صفر تا ماکزیمم در صورت طراحی مناسب





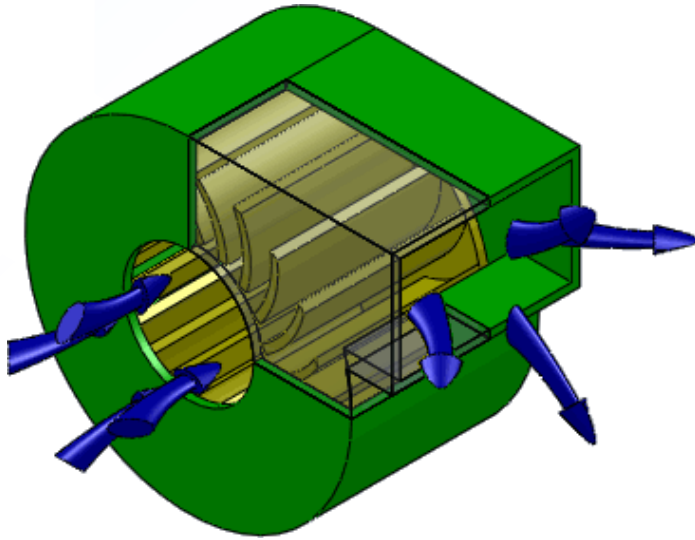
کمپرسور شعاعی





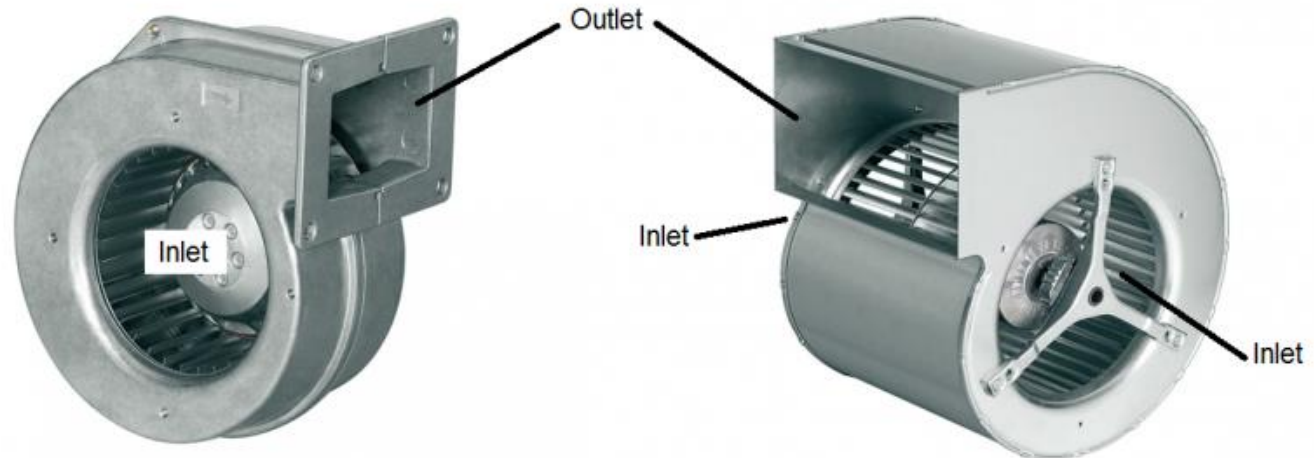
سطوح و منحنی‌های مشخصه

ونتيلاتور



Single Inlet

Double inlet





زاویه خروجی چرخ و ضریب عکس العمل

$$H'' = H''_{\text{pot}} + H''_{\text{dyn}} \quad \text{می دانیم:}$$

$$H'' = \frac{U_2}{g} C_{u2} \quad \leftarrow \text{با فرض ورودی شعاعی سیال } \alpha_1 = 90^\circ$$

$$H''_{\text{dyn}} = \frac{C_2^2 - C_1^2}{2g} = \frac{C_2^2 - C_{m1}^2}{2g} \quad \text{ارتفاع دینامیک:}$$

$$C_{m1} = C_{m2} \quad \leftarrow \text{با فرض برابری سطح ورود و خروج پره ها:}$$

$$H''_{\text{dyn}} = \frac{1}{2g} (C_{u2})^2 \quad \leftarrow \text{بنابراین: } H''_{\text{dyn}} = \frac{C_2^2 - C_{m2}^2}{2g}$$

نتیجه آن که:

(۱) ارتفاع کلی با C_{u2} ارتباط خطی دارد. (۲) ارتفاع دینامیک با مجذور C_{u2} متناسب است.





زاویه خروجی چرخ و ضریب عکس العمل

❖ مثلث های سرعت خروجی برای سرعت محیطی U_2 و سرعت نصف النهاری C_{u2} مساوی اما با زاویه خروجی β'_2 متفاوت:

❖ مقدار حداقل در β'_2 در مثلث ALM که در آن:

$$H'' = \frac{U_2}{g} C_{u2} = 0$$

❖ مقدار حداکثر در β'_2 در مثلث DLM که در آن:

$$\begin{aligned} H''_{\text{pot}} &= H'' - H''_{\text{dyn}} \\ &= \frac{U_2}{g} (2U_2) - \frac{(2U_2)^2}{2g} = 0 \end{aligned}$$

❖ مثلث CLM مربوط به حالت خاصی است که در آن:

$$H''_{\text{dyn}} = \frac{U_2^2}{2g}$$

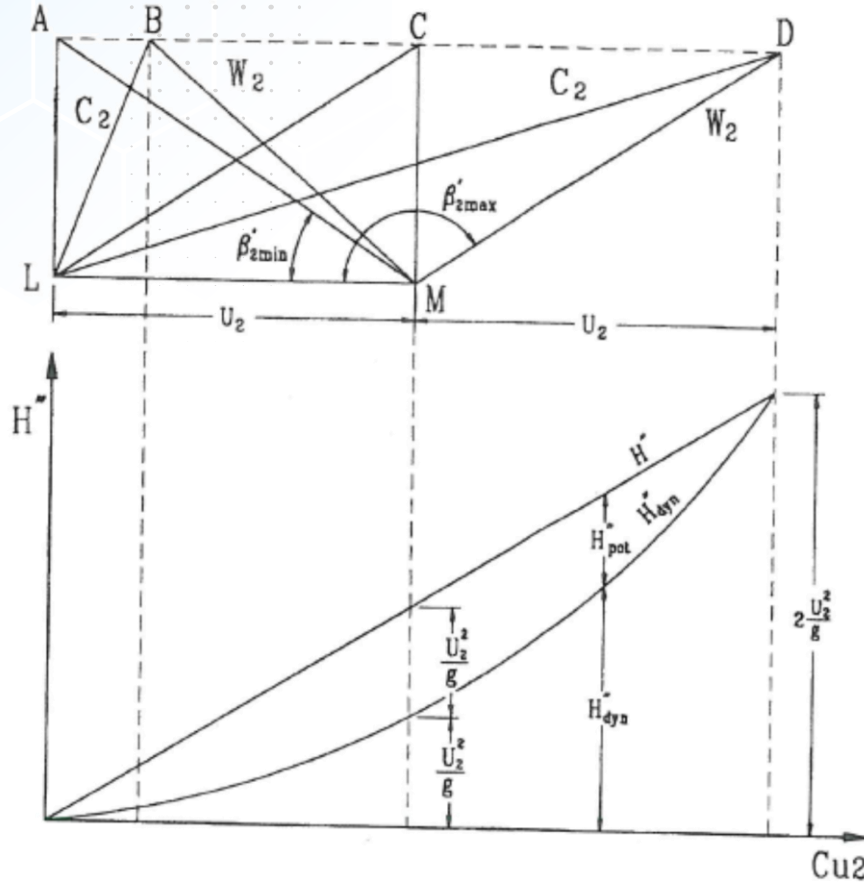
$$H''_{\text{pot}} = \frac{U_2}{g} (U_2) - \frac{U_2^2}{2g} = \frac{U_2^2}{2g}$$

❖ نتیجه آن که با افزایش β'_2 :

(۱) مقدار C_{u2} از یک مقدار حداقل به یک مقدار حداکثر مرتبا افزایش می یابد.

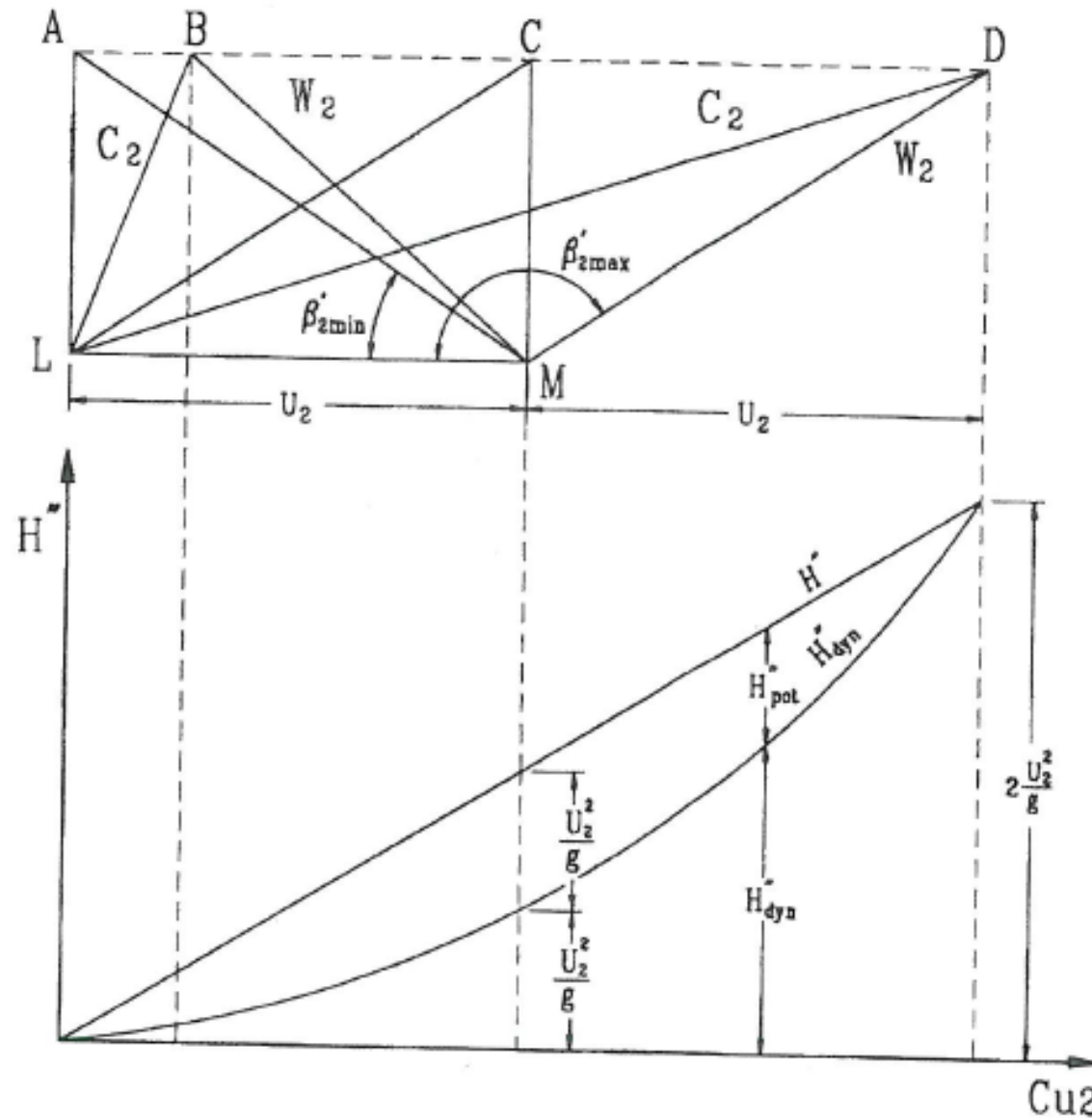
(۲) ارتفاع کل متناسب با C_{u2} و ارتفاع دینامیک متناسب با C_{u2}^2 افزایش می یابد.

(۳) ضریب عکس العمل ($\Lambda = H''_{\text{pot}} / H''$) از ۱ تا ۰ مرتبا کم می شود.





زاویه خروجی چرخ و ضریب عکس العمل



$$H'' = \frac{U_2}{g} C_{u2}$$

$$H''_{\text{dyn}} = \frac{1}{2g} (C_{u2})^2$$





زاویه خروجی چرخ و ضریب عکس العمل

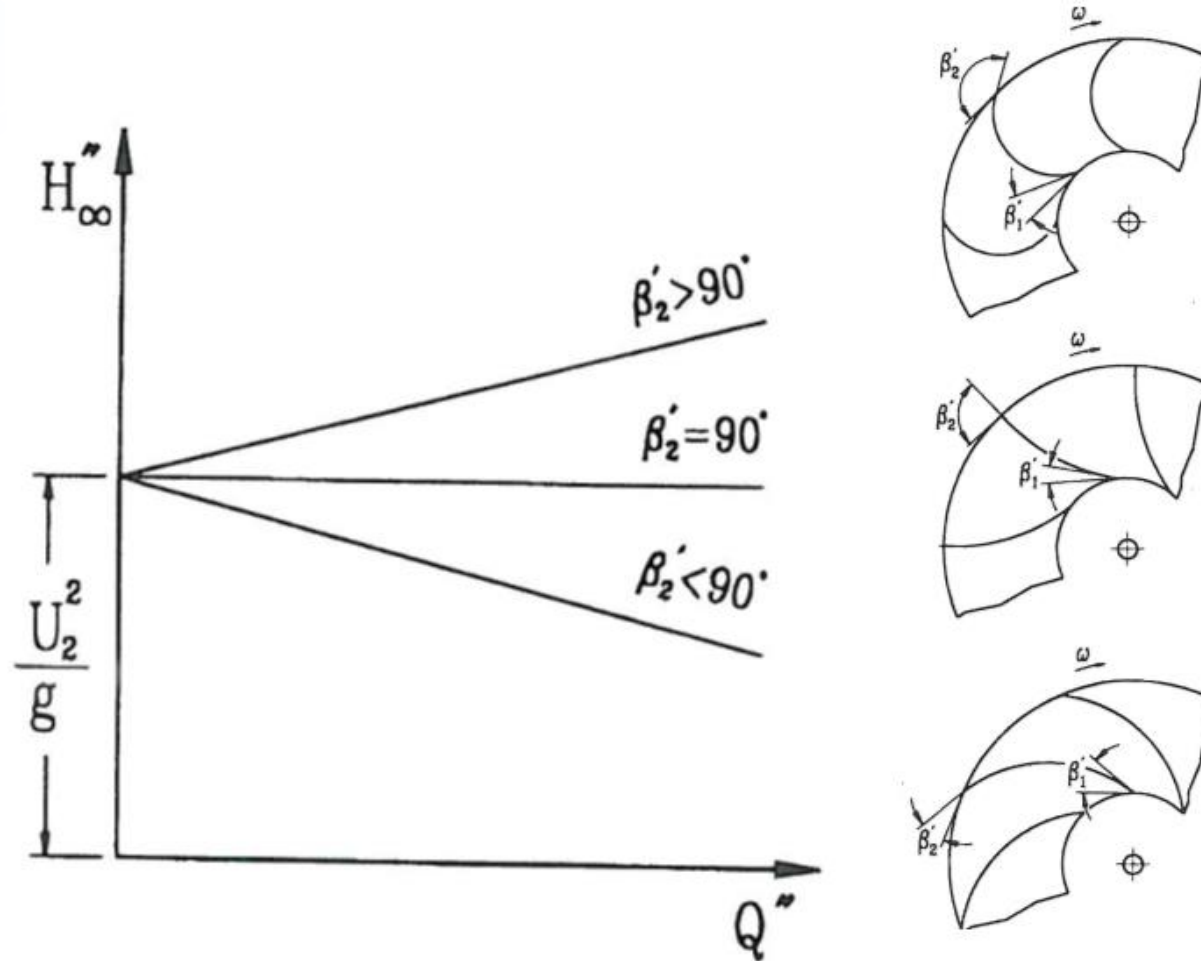
توجه شود نتایج به دست آمده مربوط به حالتی است که سرعت های عمودی در ورود و خروج یکسان باشند. اما جنبه ی کیفی آن به سایر شرایط تعمیم پذیر است.





عوامل موثر در انتخاب زاویه خروجی پره‌ها

❖ الف - شیب مشخصه مانومتریک

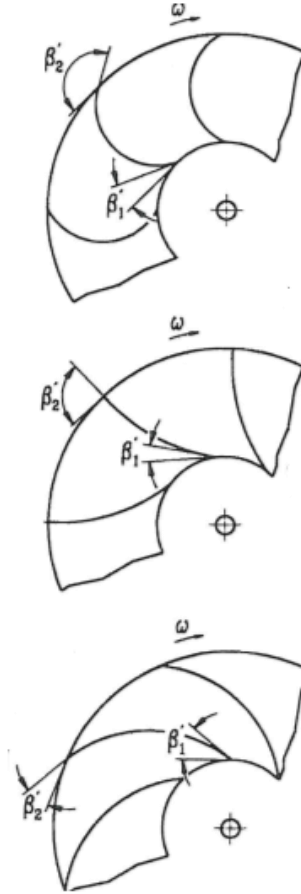
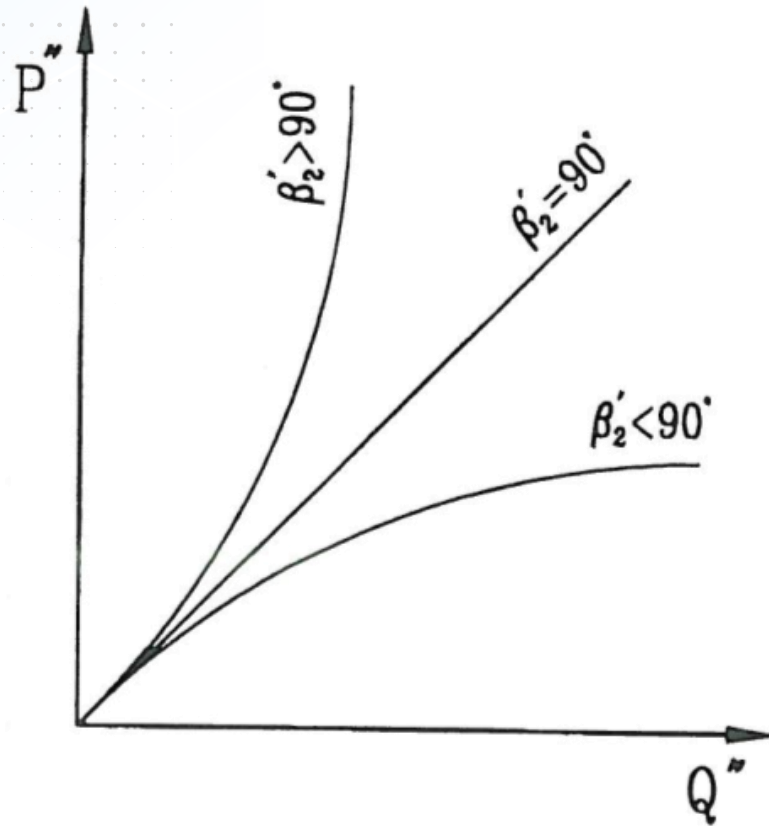




عوامل موثر در انتخاب زاویه خروجی پره‌ها

❖ ب - تغییرات قدرت جذبی با دبی

اهمیت توجه به این مسئله در انتخاب موتور محرک و پیش‌بینی‌های لازم جهت جلوگیری از اضافه بار

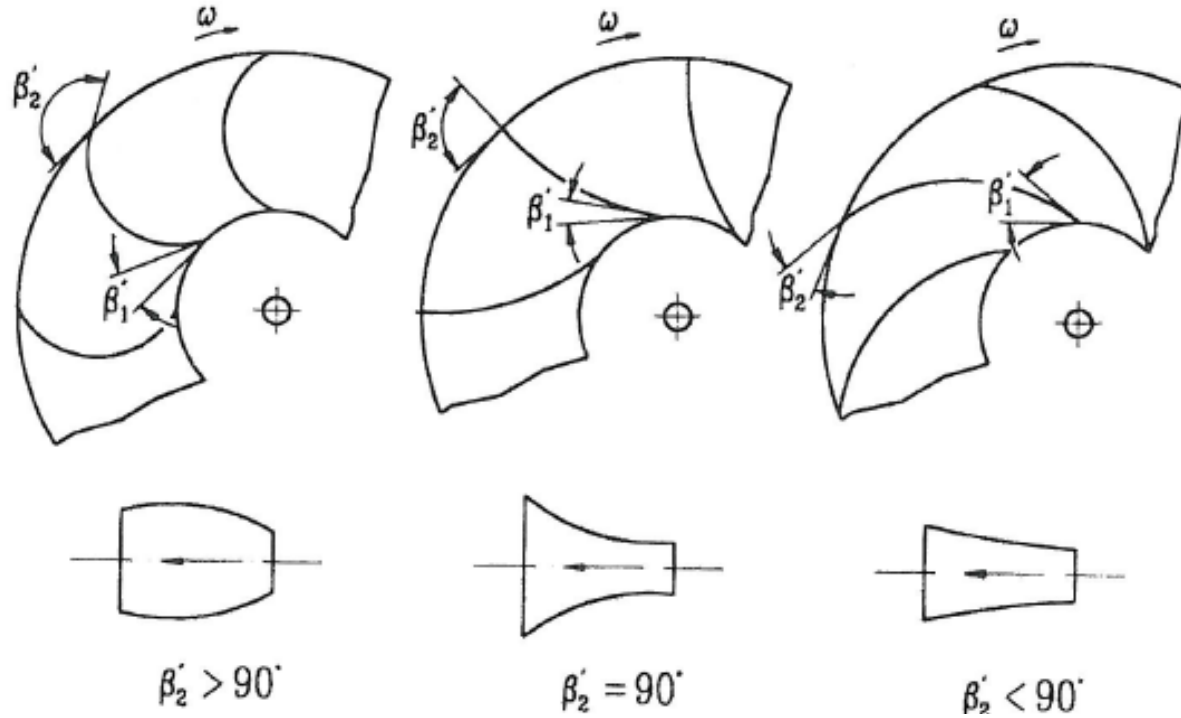




عوامل موثر در انتخاب زاویه خروجی پره‌ها

❖ ج - بازده پمپ

- نحوه ی تغییر سطح مقطع جریان در چرخ‌های با پره‌های رو به عقب، شعاعی و رو به جلو
- در $\beta'_2 < 90^\circ$ سطح کانال به طور تدریجی و ملایم زیاد می‌شود.
- با افزایش β'_2 :
 - (1) سرعت خروجی از چرخ افزایش می‌یابد.
 - (2) ضریب عکس‌العمل چرخ کاهش پیدا می‌کند.
 - (3) مقدار انرژی جنبشی زیادی باید در دیفیوزر و جمع‌کننده به انرژی پتانسیل تبدیل شود که تلفات بسیاری به همراه خواهد داشت.
 - (4) کاهش بازده چرخ



نتیجه: در پمپ‌ها پره‌ها رو به عقب با زاویه $18^\circ < \beta'_2 < 30^\circ$ بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



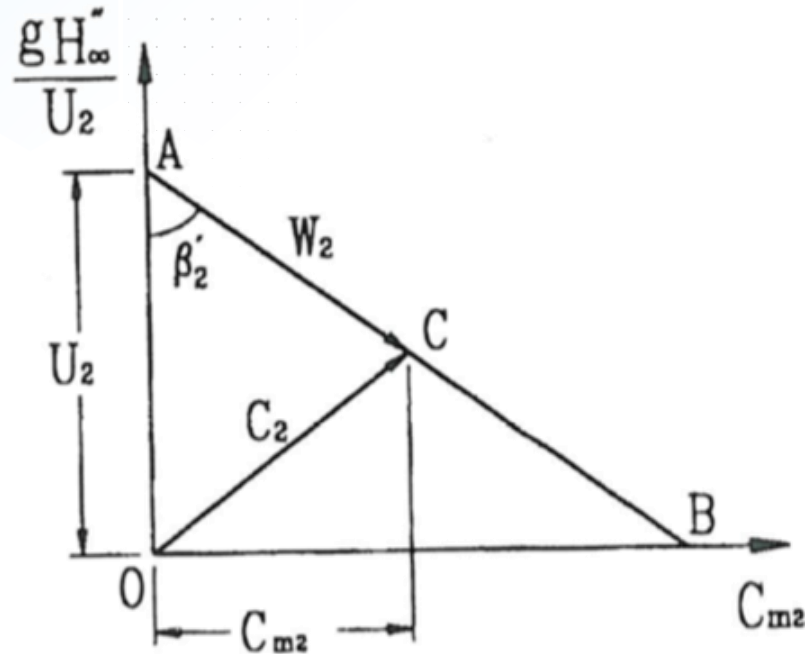


رابطه بین مثلث سرعت خروجی و مشخصه ایده‌آل

$$\frac{gH''_{\infty}}{U_2} = U_2 - \frac{Q''}{2\pi K_2 R_2 b_2} \cotg \beta'_2$$

- از تقسیم مشخصه‌ی ایده‌آل به $\frac{U_2}{g}$ داریم:

$$\frac{gH''_{\infty}}{U_2} = U_2 - C_{m2} \cotg \beta'_2$$



- C_{m2} مختصه‌ی محور افقی و $\frac{gH''_{\infty}}{U_2}$ مختصه‌ی محور قائم است.
- نقطه دلخواه C را انتخاب کرده و مثلث OAC را با قاعده‌ی U_2 ، ارتفاع C_{m2} و یک زاویه‌ی آن به اندازه‌ی β'_2 ، در نظر می‌گیریم.
- ❖ OAC معرف مثلث سرعت خروجی از چرخ است.
- ❖ خط AB معرف مشخصه‌ی ایده‌آل پمپ و همزمان مکان هندسی راس مثلث‌های سرعت خروجی است، هنگامی که دبی از صفر تا ماکزیمم تغییر نماید.





رابطه بین مثلث سرعت خروجی و مشخصه ایده‌آل

❖ با تقسیم رابطه به U_2 داریم:

$$\frac{gH''_{\infty}}{U_2} = U_2 - C_{m2} \cot \beta'_2 \longrightarrow \frac{gH''_{\infty}}{U_2^2} = 1 - \frac{C_{m2}}{U_2} \cot \beta'_2$$

❖ خط AB مکان هندسی راس مثلث‌های سرعت خروجی است که اضلاع آن بر U_2 تقسیم شده است.

❖ خط AB مشخصه‌ی بی‌بعد ایده‌آل مربوط به تمام پمپ‌های با زاویه β'_2 مساوی است.

❖ جهت تعیین خط AB در دستگاه بدون بعد کافیست به اندازه واحد بر روی محور قائم انتخاب کرده و با داشتن زاویه خروجی پره این خط را رسم نماییم.

