

توربو ماشین ها

محمدصادق کریمی

دکتری تخصصی مهندسی مکانیک





مقدمه، توزیع سرعت در صفحه نصف‌النهاری، ضریب ناهماهنگی

۱-۵

توزیع سرعت در صفحه پره‌ها و ضریب لغزش

۲-۵

توزیع واقعی سرعت در دو پره، اصلاح مثلث سرعت‌ها

۳-۵





عناوین فصل

❖ مقدمه

❖ توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

❖ تعریف ضریب ناهماهنگی

❖ محاسبه‌ی ضریب ناهماهنگی

❖ توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

❖ ضریب لغزش

❖ روش‌های محاسبه ضریب لغزش

❖ مقایسه بین روش‌های مختلف

❖ توزیع واقعی سرعت بین دو پره؛ پدیده Jet & Wake

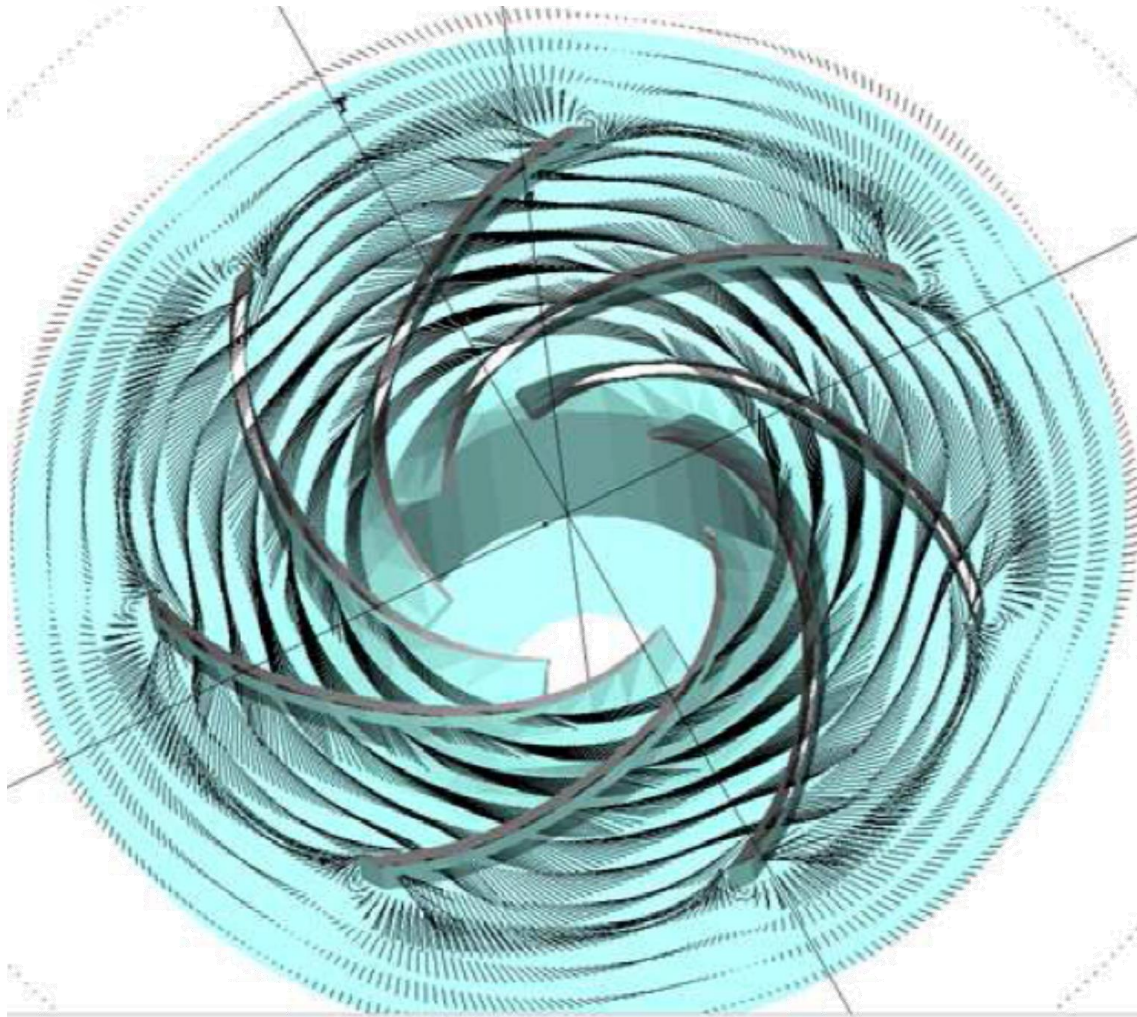
❖ رسم مثلث سرعت‌ها با توجه به انحراف زاویه‌ای





مقدمه

❖ سه بعدی بودن جریان واقعی در توربوماشین‌ها حتی در غیاب لزجت سیال

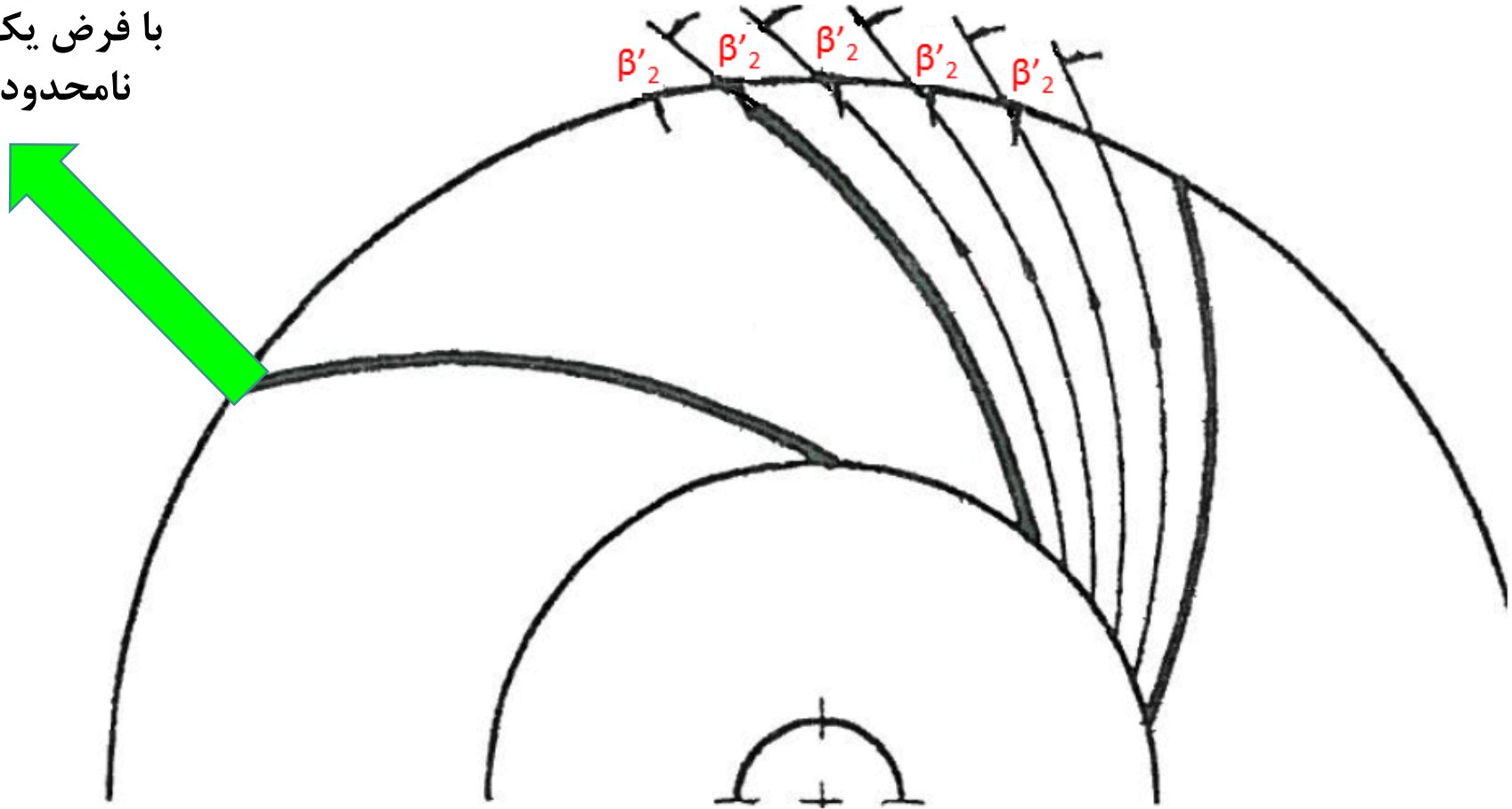




مقدمه

❖ عدم پیروی الگوی جریان از پره‌ها، به صورت مورد انتظار

نیاز به تصحیح روابط بدست آمده
با فرض یک بعدی بودن جریان و
نامحدود بودن تعداد پره‌ها

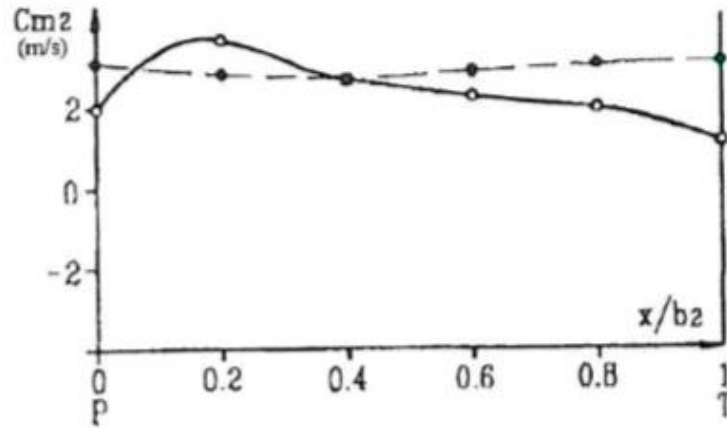




مقدمه

❖ به دلیل استقلال معادله اویلر از الگوی جریان بین مقاطع ورودی و خروجی، توزیع سرعت از نظر میزان تبادل انرژی اهمیت دارد.

$$H'' = \frac{1}{\gamma Q''} \left[\int_{A_2} U_2 C_2 \cos \alpha_2 (\rho_2 C_{m2} dA_2) - \int_{A_1} U_1 C_1 \cos \alpha_1 (\rho_1 C_{m1} dA_1) \right]$$



❖ غیر یکنواختی پروفیل سرعت در مقاطع

❖ با توجه به فرض ورودی شعاعی در پمپ‌های سانتریفیوژ، صرفاً مطالعه‌ی الگوی جریان در مقطع خروجی اهمیت دارد.



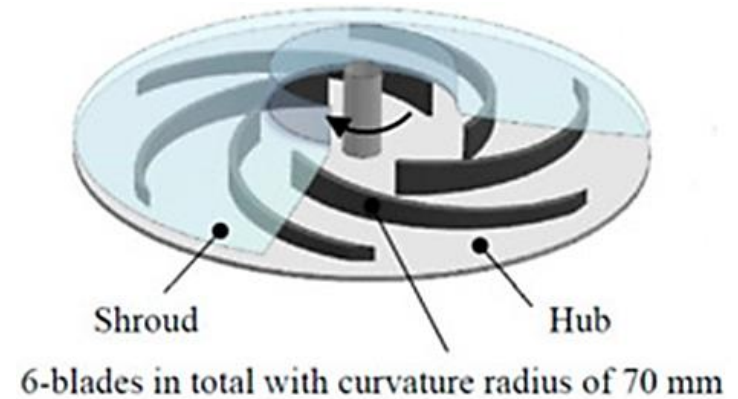
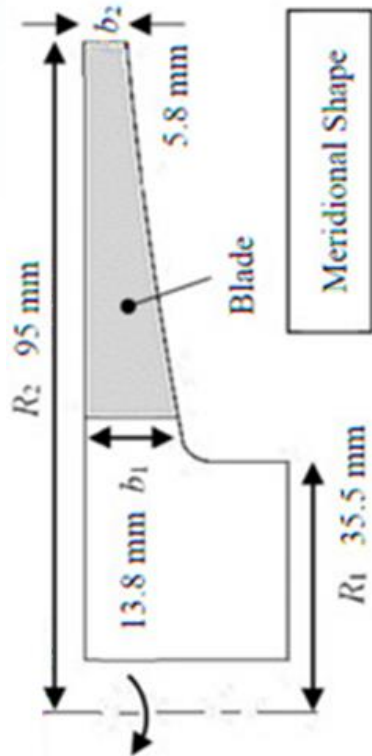
کم‌تر شدن مومنتم زاویه‌ای سیال در خروج نسبت به محاسبات تئوری یک بعدی با فرض بی‌نهایت بودن پره‌ها به دلیل انحراف خطوط جریان از امتداد پره‌ها و غیریکنواختی سرعت در آن مقاطع؛ کم‌تر شدن انرژی دریافتی سیال از چرخ





مقدمه

❖ بررسی جریان در دو صفحه نصف النهاری (MP) و صفحه محیطی پره ها (BP) به طور مجزا به منظور تصحیح روابط حاصل از تئوری یک بعدی



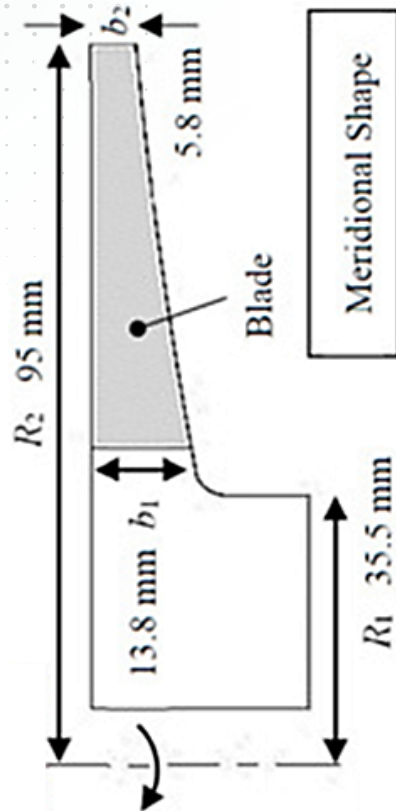
مقدمه

❖ تعریف ضریب ناهماهنگی و ضریب لغزش برای بیان انحراف از تئوری یک بعدی به ترتیب در صفحات MP و BP

❖ فرض جریان یک بعدی در صفحه BP و بررسی اثر دو بعدی آن در صفحه MP به کمک ضریب ناهماهنگی

❖ فرض جریان یک بعدی در صفحه MP و بررسی اثر دو بعدی در صفحه BP به کمک ضریب لغزش

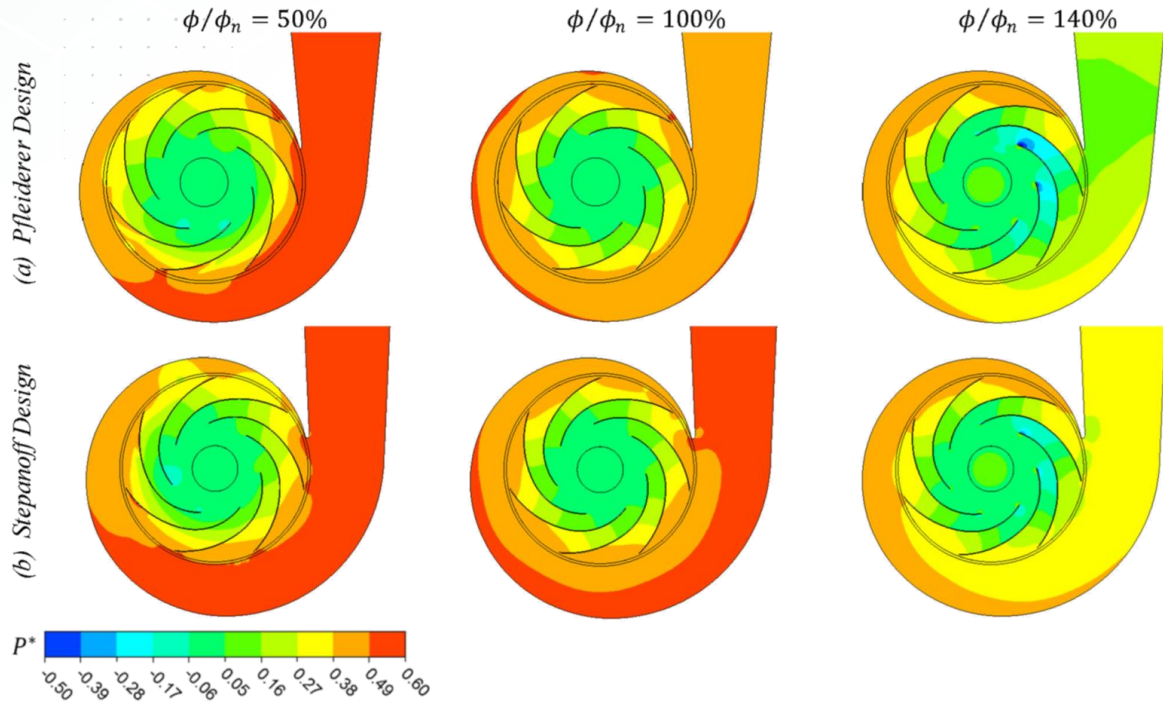
❖ روش تحلیل شبه سه بعدی با بررسی دو جریان دو بعدی (روش شبه سه بعدی)



مقدمه

❖ مطالعه‌ی حرکت سه بعدی سیال فقط در مرحله‌ی تحلیل برای چرخ‌های سانتریفیوژ و اعمال ضرایب تصحیح حاصل از تحلیل به روش یک بعدی در مرحله‌ی طراحی

❖ طراحی پمپ‌های سانتریفیوژ به روش یک بعدی و با استفاده از قوانین تشابه و تجارب موجود و تحلیل به کمک روش‌های دو بعدی و سه بعدی





مقدمه

- ❖ عدم ارتباط ضرایب ناهماهنگی و لغزش به بازده و استفاده‌ی صرف برای تصحیح خطای ناشی از فرضیات نادرست در محاسبه‌ی ارتفاع اولر
- ❖ با توجه به ارتفاع اولر در حکم ارتفاع ایده‌آل تولیدی پمپ در غیاب لزجت سیال، نبایستی تاثیر لزجت بر الگوی جریان را در محاسبه‌ی آن دخالت داد. ← استفاده از تئوری جریان پتانسیل در تعیین ضرایب تصحیح
- ❖ بررسی تجربی درستی ضرایب تصحیح به دلیل حضور اثرات لزجت در جریان واقعی دشوار است.

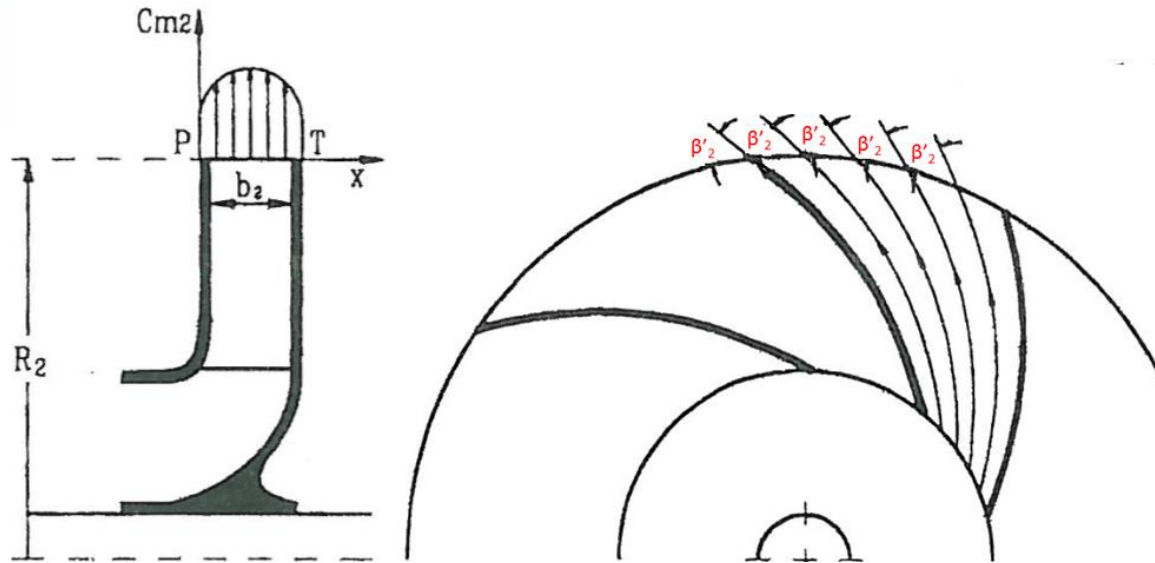


توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

❖ تغییر 90° درجه‌ای امتداد سرعت جریان در صفحه نصف النهاری هنگام ورود به چرخ پمپ سانتریفیوژ

❖ کاهش ارتفاع اولر به دلیل عدم یکنواختی توزیع سرعت نصف النهاری در خروج از چرخ

❖ در نظر گرفتن صرفاً غیریکنواختی سرعت نصف النهاری در این مرحله با فرض یکسان ماندن زاویه نسبی کلیه خطوط جریان در صفحه‌ی پره‌ها به اندازه β'_2





توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

❖ حالت کلی معادله اولر:

$$H'' = \frac{1}{\gamma Q''} \left[\int_{A_2} U_2 C_2 \cos \alpha_2 (\rho_2 C_{m2} dA_2) - \int_{A_1} U_1 C_1 \cos \alpha_1 (\rho_1 C_{m1} dA_1) \right]$$

❖ ورودی شعاعی $\alpha_1 = 90^\circ$:

$$H'' = \frac{1}{\gamma Q''} \int_{A_2} U_2 C_2 \cos \alpha_2 (\rho_2 C_{m2} dA_2)$$



توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

$$H'' = \frac{1}{\gamma Q''} \int_{A_2} U_2 C_2 \cos \alpha_2 (\rho_2 C_{m2} dA_2)$$

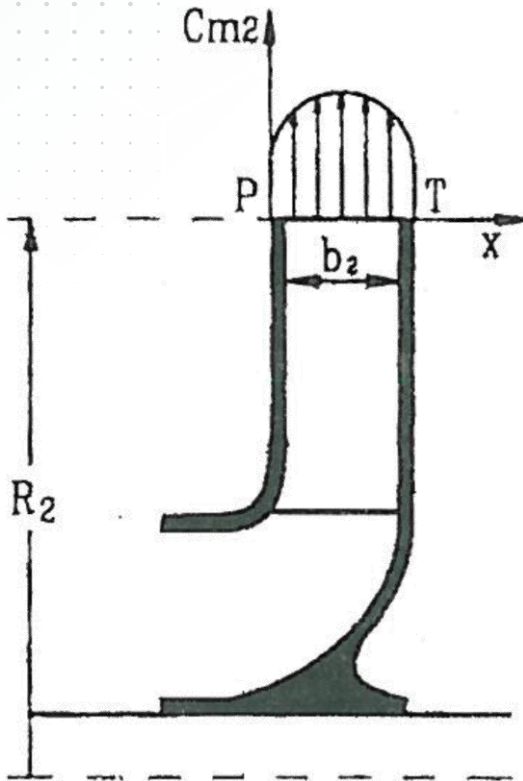
❖ با توجه به فرض توزیع یکنواخت سرعت در محیط چرخ
(از صفر تا 2π) داریم:

$$dA_2 = 2\pi K_2 R_2 dx$$

$$H'' = \frac{1}{\gamma Q''} \int_{A_2} U_2 C_2 \cos \alpha_2 (\rho_2 C_{m2}) 2\pi K_2 R_2 dx$$

❖ برای هر مثلث سرعت خروجی می توان نوشت:

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



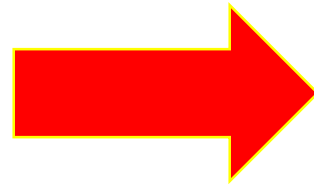


توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

❖ از ترکیب دو معادله‌ی مذکور خواهیم داشت:

$$H'' = \frac{1}{\gamma Q''} \int_{A_2} U_2 C_2 \cos \alpha_2 (\rho_2 C_{m2}) 2\pi K_2 R_2 dx$$

$$C_2 \cos \alpha_2 = U_2 - C_{m2} \cotg \beta'_2$$



$$H''_\infty = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \left[\frac{\int_0^{b_2} C_{m2}^2 dx}{\int_0^{b_2} C_{m2} dx} \right] \cotg \beta'_2$$



توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

تعریف ضریب ناهماهنگی

❖ نابرابری شوارتز برای دو تابع $f(x)$ و $g(x)$ که استقلال خطی دارند:

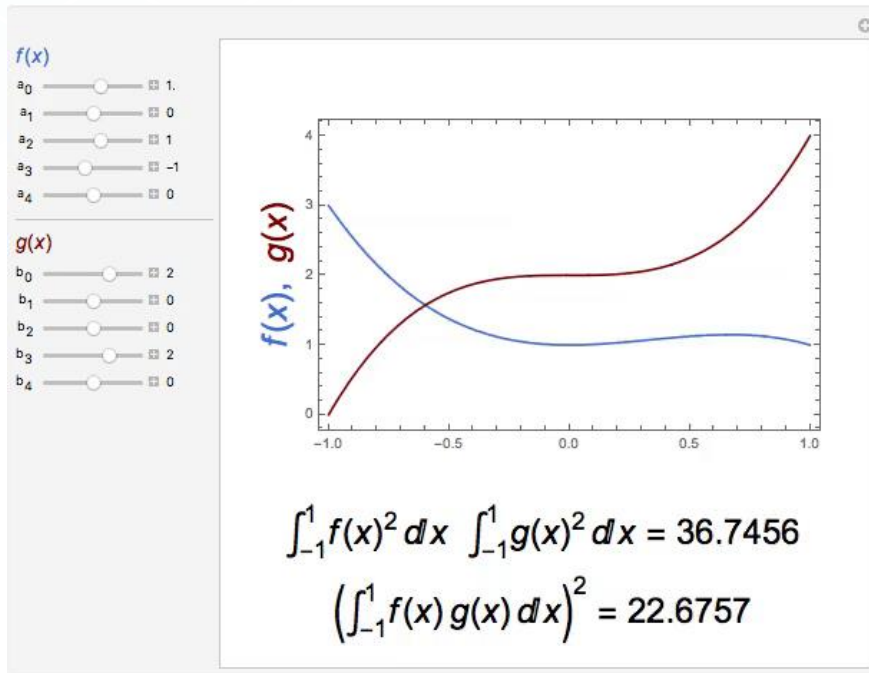
$$\left[\int f g dx \right]^2 \leq \int f^2 dx \cdot \int g^2 dx$$

❖ اگر $f(x) = 1$ و $g(x) = C_{m2}(x)$:

$$\left[\int_0^{b_2} C_{m2} dx \right]^2 \leq b_2 \int_0^{b_2} C_{m2}^2 dx$$

❖ و یا:

$$\frac{\int_0^{b_2} C_{m2}^2 dx}{\int_0^{b_2} C_{m2} dx} \geq \frac{\int_0^{b_2} C_{m2} dx}{b_2}$$





توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

تعریف ضریب ناهماهنگی

سرعت متوسط نصف النهاری:

$$\overline{C_{m2}} = \frac{\int_0^{b_2} C_{m2} dx}{b_2}$$

در نتیجه:

$$\frac{\int_0^{b_2} C_{m2}^2 dx}{\int_0^{b_2} C_{m2} dx} = K \overline{C_{m2}}, K \geq 1$$

$K = 1$ برای زمانی است که سرعت C_{m2} در عرض چرخ ثابت باشد (فرض یک بعدی).





توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

تعریف ضریب ناهماهنگی

$$\left. \begin{aligned} H''_{\infty} &= \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \left[\frac{\int_0^{b_2} C_{m2}^2 dx}{\int_0^{b_2} C_{m2} dx} \right] \cotg \beta'_2 \\ \frac{\int_0^{b_2} C_{m2}^2 dx}{\int_0^{b_2} C_{m2} dx} &= K \overline{C_{m2}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow H''_{\infty} = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} K \overline{C_{m2}} \cotg \beta'_2$$





توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

تعریف ضریب ناهماهنگی

ارتفاع اولر با استفاده از تئوری یک بعدی:

$$H''_{\infty} = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} C_{m2} \cotg \beta'_2$$

❖ با توجه به معادلات بالا و $K \geq 1$ ، عدم توزیع یکنواخت C_{m2} باعث کاهش ارتفاع اولر می گردد.

❖ ضریب ناهماهنگی K جهت تصحیح فرض توزیع یکنواخت C_{m2} به کار می رود.

❖ اثر توزیع غیر یکنواخت در پره های شعاعی ($\cotg \beta'_2 = 0$) صفر است.

❖ اثر توزیع غیر یکنواخت با کاهش زاویه خروجی افزایش پیدا می کند.





توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

تعریف ضریب ناهماهنگی

❖ استفاده از ضریب C_H جهت بیان اثر توزیع غیر یکنواخت C_{m2} در آثار برخی نویسندگان به صورت:

$$C_H = \frac{H_n''}{H_u''}$$

ارتفاع اولر برای توزیع غیر یکنواخت C_{m2}

ارتفاع اولر برای توزیع یکنواخت C_{m2}

❖ در این صورت:

$$C_H = (1 - K) \frac{U_2}{C_{u2}} + K \frac{\int_0^{b_2} C_{m2}^2 dx}{\int_0^{b_2} C_{m2} dx} = K \overline{C_{m2}}$$





توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

تعریف ضریب ناهماهنگی

❖ نیاز به دانستن پروفیل سرعت غیر یکنواخت در خروج از چرخ به جهت تعیین میزان خطای ناشی از کاربرد فرض نادرست توزیع یکنواخت

❖ ضریب C_H با روش ویسلینوس به صورت فرض سینوسی بودن پروفیل C_{m2} :

$$C_H = 1 - \left(\frac{\pi^2}{8} - 1\right)\left(\frac{U_2}{C_{u2}} - 1\right)$$





توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

محاسبه ضریب ناهماهنگی

❖ اگر در چرخ‌های سانتریفیوژ رو به عقب از تقریب $2 \approx \frac{U_2}{C_{u2}}$ استفاده کنیم داریم:

$$C_H = 0.77$$

❖ نشان‌گر خطای بسیار زیاد نسبت به حالت ایده‌آل ← منحنی خروجی یکنواخت‌تر از منحنی سینوسی است.

❖ غیر یکنواختی در توزیع سرعت واقعی، ناشی از اثرات اصطکاک و جدایی لایه مرزی روی دیواره‌های جانبی و سطوح پره‌هاست.

❖ با اتکا به نتایج حاصله از کارهای تحقیقاتی $C_H = 0.96$ به دست آمده است.

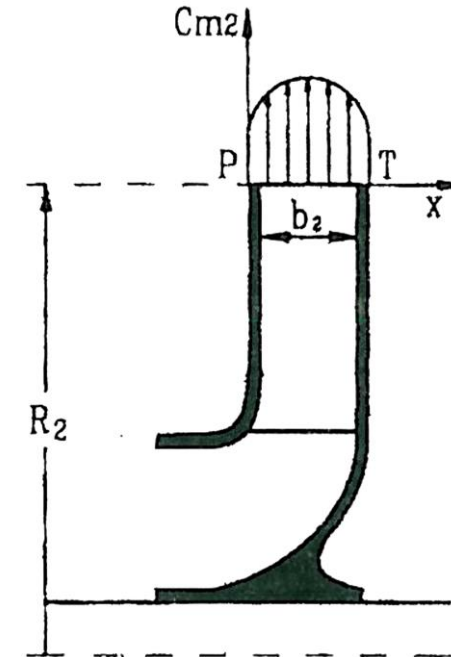
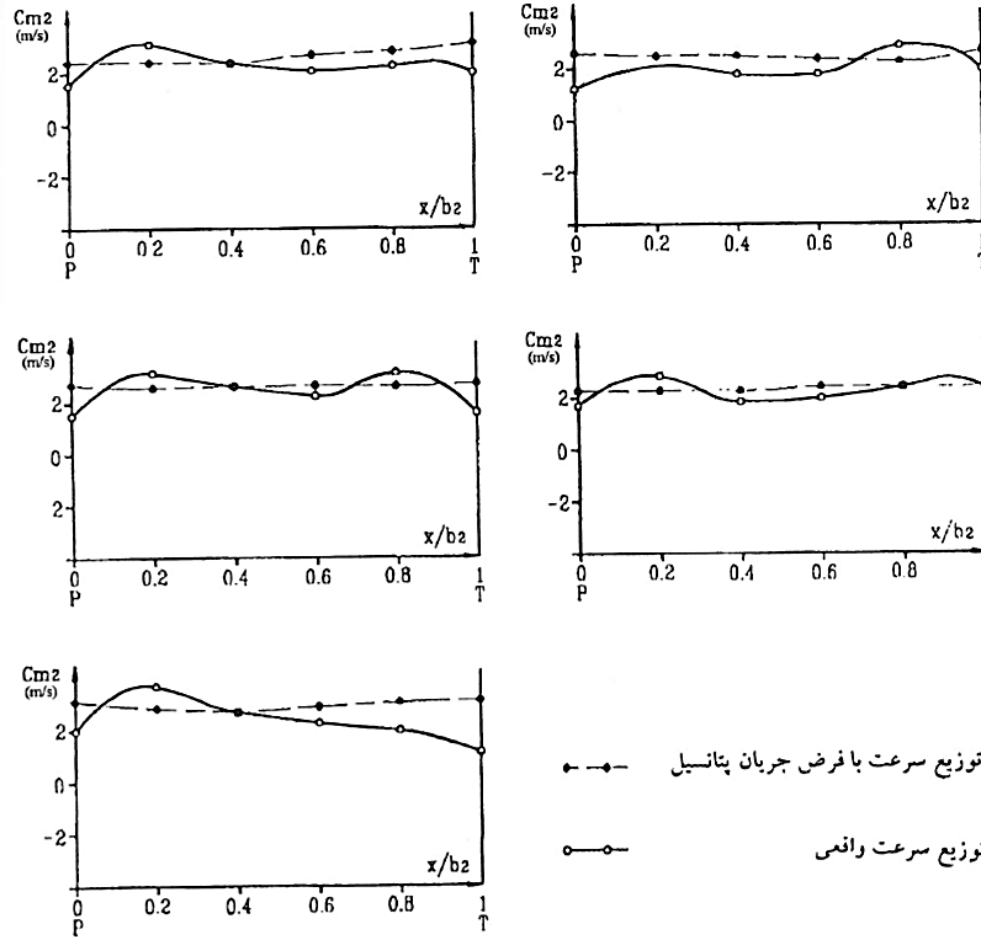
❖ واضح است که با تغییر دبی، پروفیل سرعت نیز تغییر می‌نماید و در دبی‌های خیلی کم اثر این ضریب زیاد است.



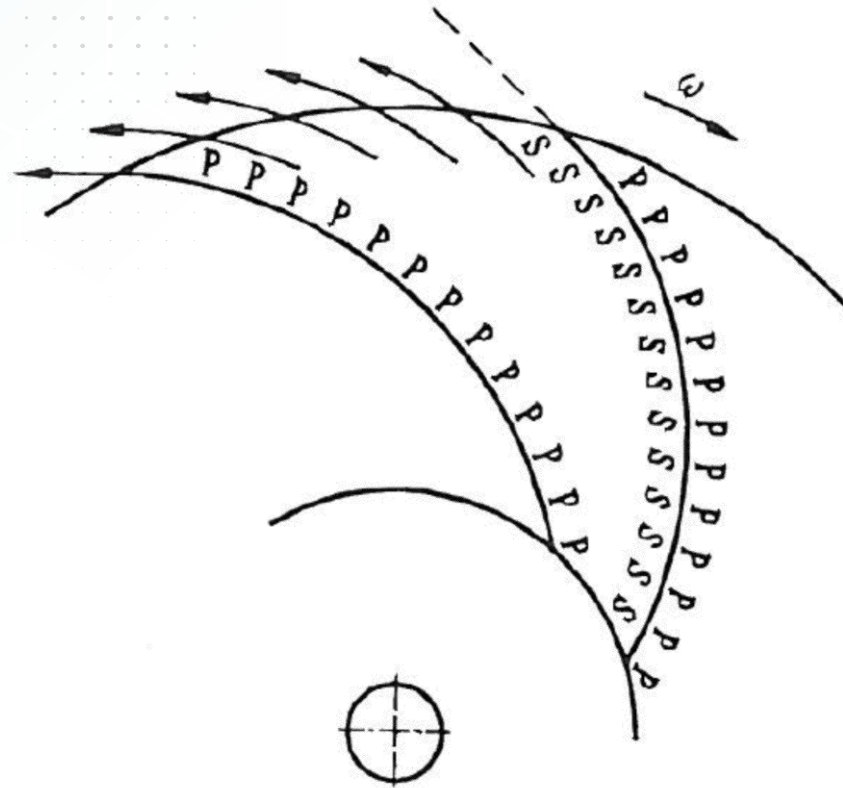
توزیع سرعت در صفحه نصف النهاری

تعریف ضریب ناهماهنگی

❖ نحوه‌ی توزیع سرعت C_{m2} در خروجی پنج چرخ در نقطه طراحی



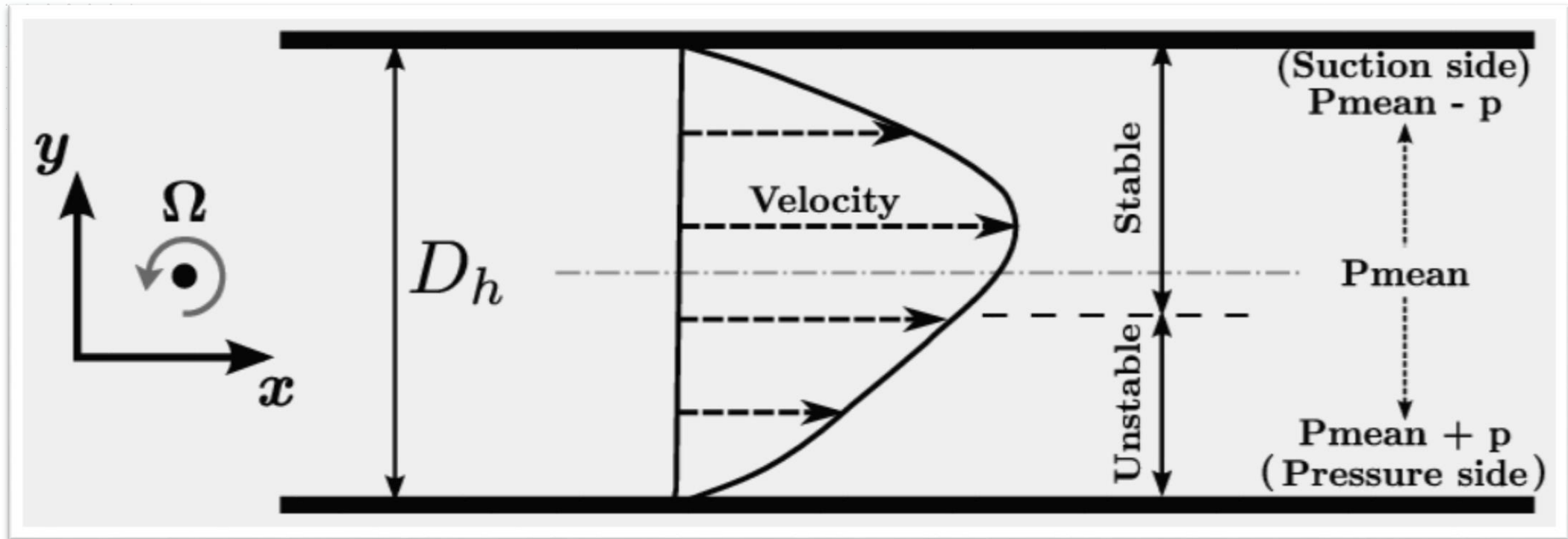
توزیع سرعت در صفحه پره‌ها



- ❖ توزیع سرعت در صفحه‌ی پره‌ها برای چرخ با تعداد پره‌ی محدود حتی با سیال ایده‌آل نمی‌تواند یک‌بعدی باشد.
- ❖ طرفین پره اختلاف فشاری متناسب با گشتاور وجود دارد. هرچه تعداد پره کم‌تر شود این گشتاور بیش‌تر می‌گردد.
- ❖ وجود گرادیان فشار، گرادیان سرعت را نتیجه می‌دهد به طوری که سرعت در نواحی پر فشار کم و در نواحی کم فشار زیاد است.
- ❖ عدم توزیع یکنواخت سرعت سیال در اثر محدود بودن تعداد پره‌ها، باعث کاهش مقدار ارتفاع مانومتریک (H'') نسبت به حالت تعداد بی‌نهایت پره‌ها (H_∞'') می‌شود.

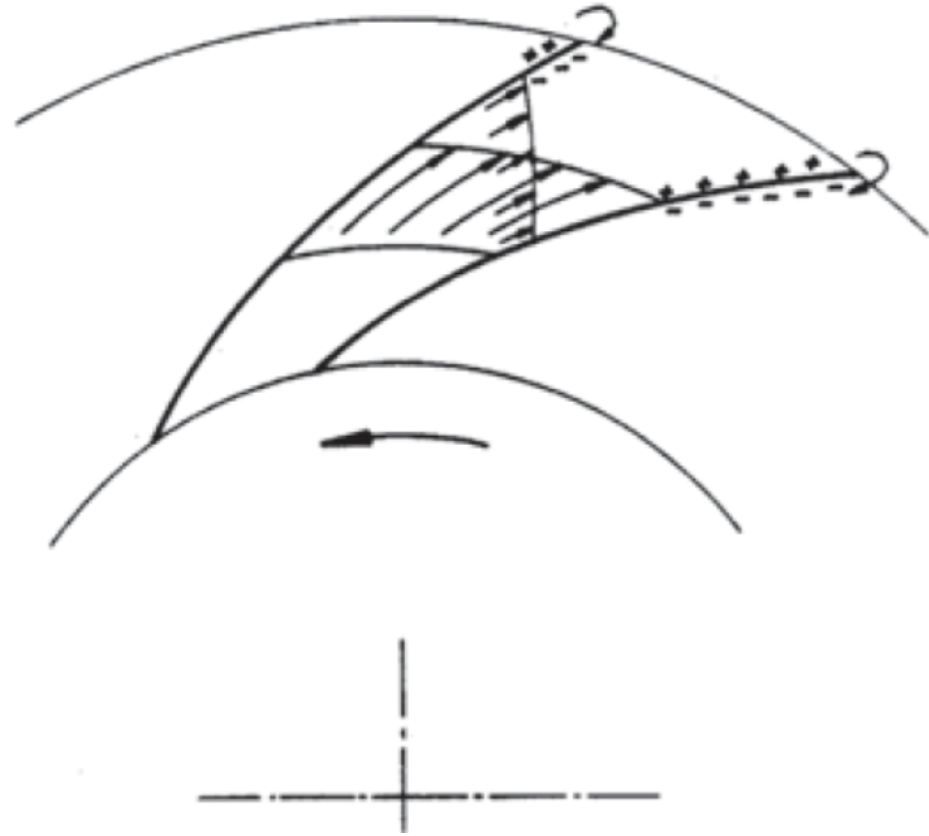
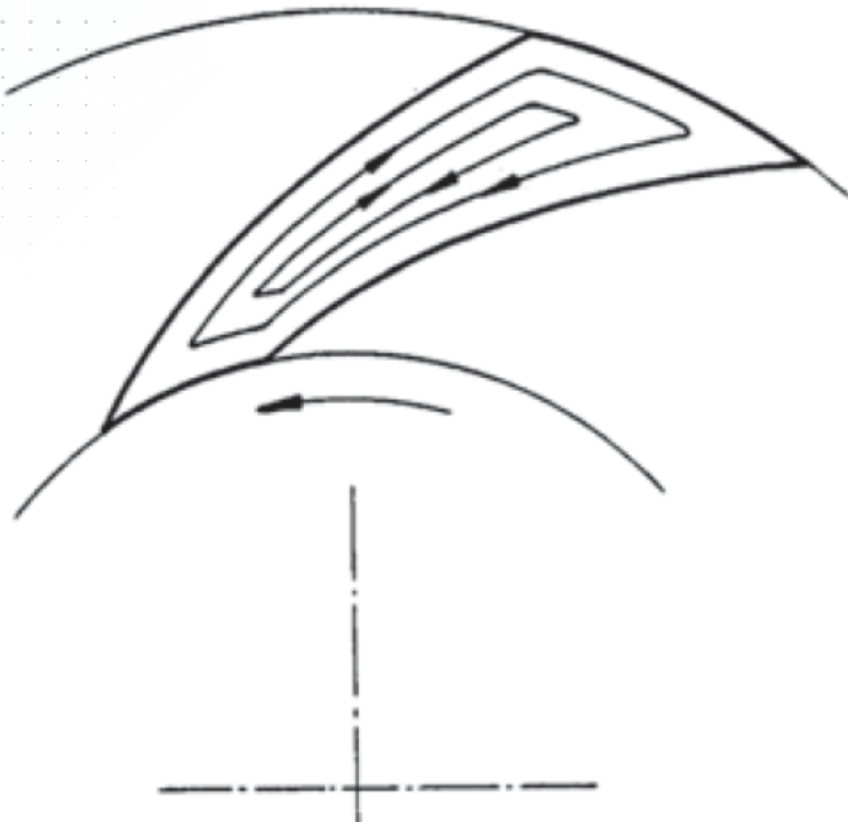


توزیع سرعت در صفحه پره ها



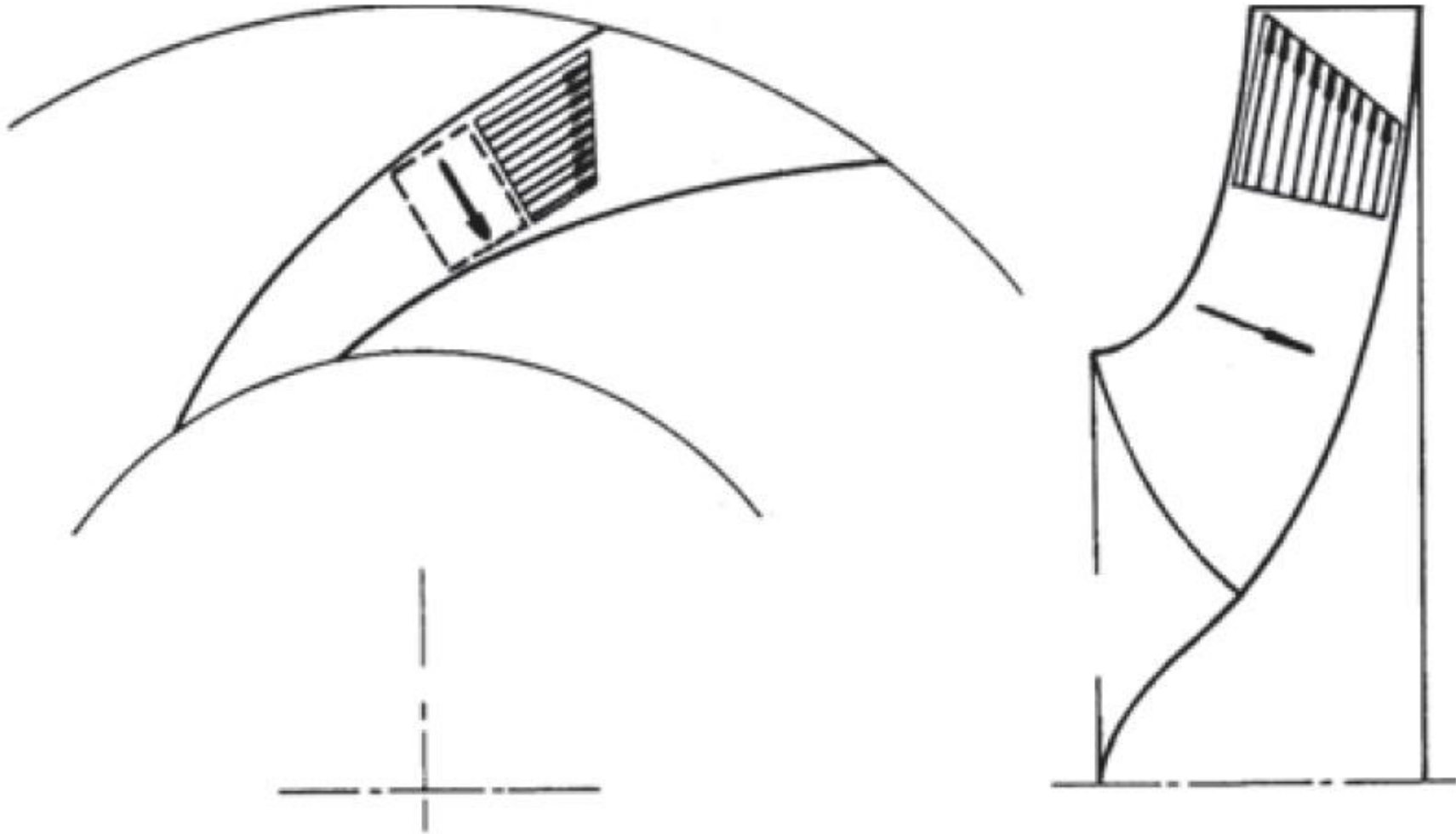


توزیع سرعت در صفحه پره ها





توزیع سرعت در صفحه پره ها



توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

❖ با توجه به معادله زیر:

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

و

$$H'' < H''_{\infty}$$

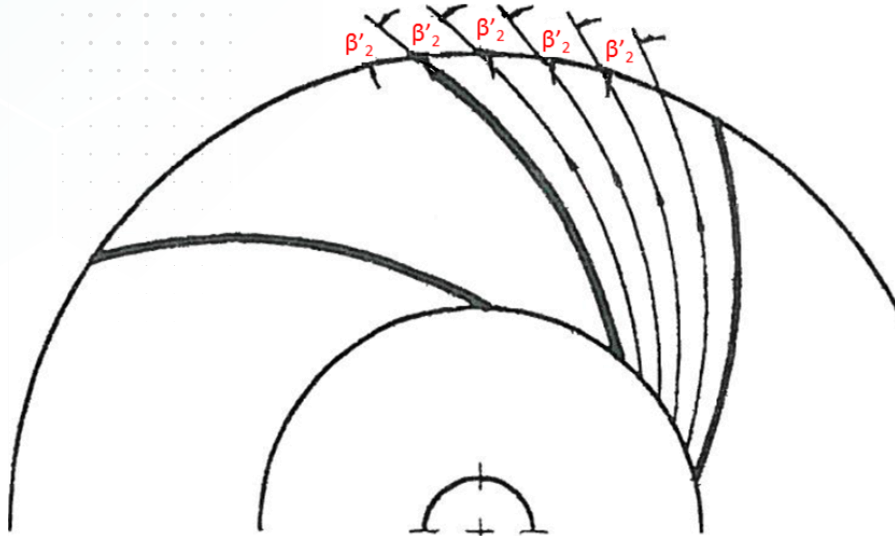
خواهیم داشت

$$\beta_2 < \beta'_2$$

❖ بنابراین به ناچار یک اختلاف زاویه‌ای δ بین زاویه‌ی پره β'_2 و زاویه خروجی نسبی سیال β_2 وجود داشته است.

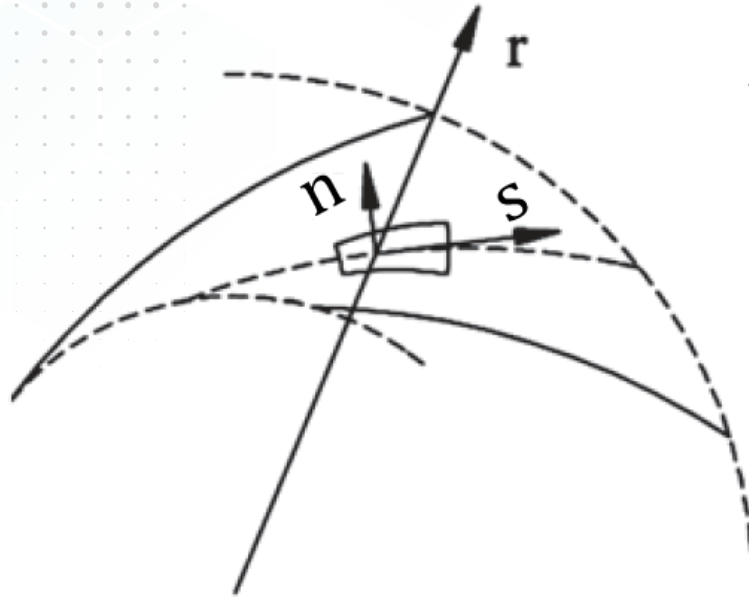
$$\delta = \beta'_2 - \beta_2$$

انحراف زاویه‌ای





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها



❖ شتاب ناشی از نیروی سانتریفیوژ بدلیل دوران چرخ: $\vec{Cf} = r\omega^2 \hat{e}_r$

❖ شتاب کوریولیس بدلیل دوران چرخ: $\vec{Co} = -2\vec{\omega} \times \vec{w} = -2\omega w \hat{e}_n$

❖ شتاب سانتریفیوژ به دلیل انحنای خطوط جریان: $\vec{Cu} = \frac{w^2}{R} \hat{e}_n$

❖ نیروهای فشاری:

$$-\frac{\partial p}{\partial s} ds \, b \, dn \, \hat{e}_s \quad -\frac{\partial p}{\partial n} dn \, b \, ds \, \hat{e}_n$$

❖ مومنتوم در جهت خط جریان: $-\frac{\partial p}{\partial s} ds \, b \, dn + r\omega^2 \hat{e}_r \cdot \hat{e}_s \rho b \, ds \, dn = \rho b \, ds \, dn \, w \frac{\partial w}{\partial s}$

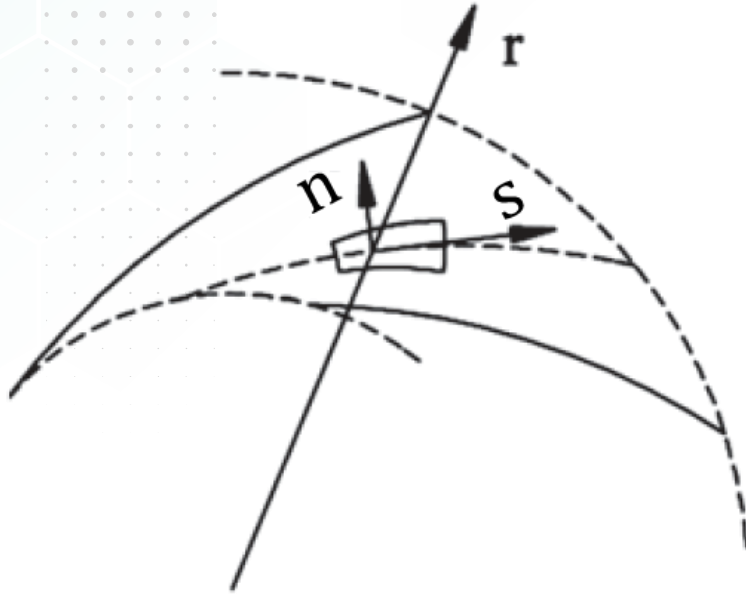
$$\rho w \frac{\partial w}{\partial s} = -\frac{\partial p}{\partial s} + \rho r \omega^2 \frac{\partial r}{\partial s}$$

$$w \frac{\partial w}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \omega^2 r \frac{\partial r}{\partial s}$$





توزیع سرعت در صفحه پره ها



❖ شتاب سانتریفوژ بدلیل دوران چرخ:

$$\vec{Cf} = r\omega^2 \hat{e}_r$$

❖ شتاب کوریولیس بدلیل دوران چرخ:

$$\vec{Co} = -2\vec{\omega} \times \vec{w} = -2\omega w \hat{e}_n$$

❖ شتاب سانتریفوژ به دلیل انحنا خطوط جریان:

$$\vec{Cu} = \frac{w^2}{R} \hat{e}_n$$

❖ نیروهای فشاری:

$$-\frac{\partial p}{\partial s} ds b dn \hat{e}_s \quad -\frac{\partial p}{\partial n} dn b ds \hat{e}_n$$

❖ مومنتوم عمود بر خط جریان:

$$-\frac{\partial p}{\partial n} dn b ds + r\omega^2 \hat{e}_r \cdot \hat{e}_n \rho b ds dn - 2\omega w \rho b ds dn + \frac{w^2}{R} \rho b ds dn = 0$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + r\omega^2 \frac{\partial r}{\partial n} - 2\omega w + \frac{w^2}{R}$$

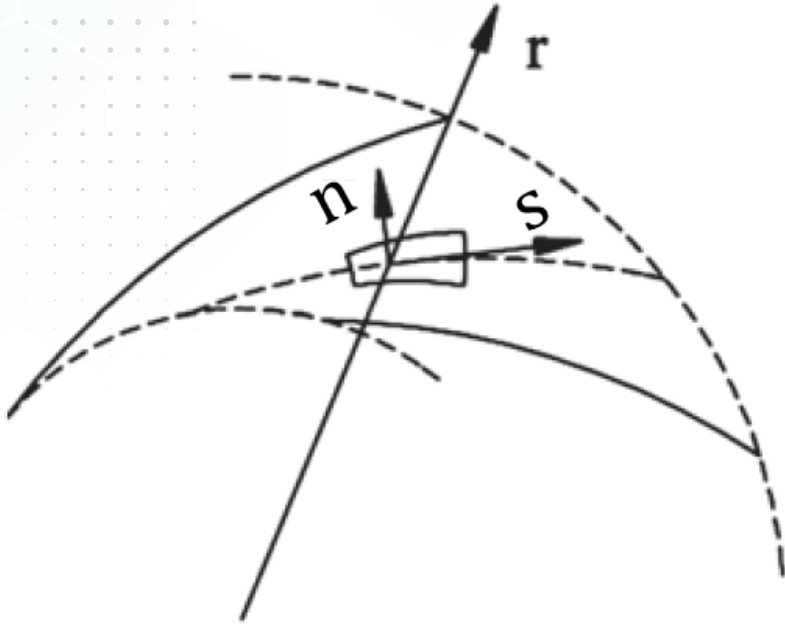
$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \omega^2 r \frac{\partial r}{\partial n} - 2\omega w + \frac{w^2}{R}$$





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

❖ معادلات مومنوم:



$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \omega^2 r \frac{\partial r}{\partial n} - 2\omega w + \frac{w^2}{R}$$

$$w \frac{\partial w}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \omega^2 r \frac{\partial r}{\partial s}$$

$$\frac{w^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \omega^2 \frac{r^2}{2} = \text{constant}$$

$$\frac{w^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \frac{u^2}{2} = \text{constant}$$





توزیع سرعت در صفحه پرها

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \omega^2 r \frac{\partial r}{\partial n} - 2\omega w + \frac{w^2}{R} = 0 \quad \text{معادلات مومنوم:}$$

$$w \frac{\partial w}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \omega^2 r \frac{\partial r}{\partial s}$$

$$\frac{w^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \omega^2 \frac{r^2}{2} = \text{constant}$$

$$\frac{w^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \frac{u^2}{2} = \text{constant}$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{w^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \frac{u^2}{2} \right) = 0$$

$$w \frac{\partial w}{\partial n} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - \omega^2 r \frac{\partial r}{\partial n} = 0$$

$$w \frac{\partial w}{\partial n} - 2\omega w + \frac{w^2}{R} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial n} = 2\omega - \frac{w}{R}$$

تغییرات عرضی سرعت عمدتاً از نیروی کوریولیس سرچشمه می گیرد، اما به دلیل انحنای خطوط جریان کاهش می یابد. ($R > 0$)





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

❖ سیرکولاسیون:

$$\oint \vec{w} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{w}) \cdot \vec{n} dS$$

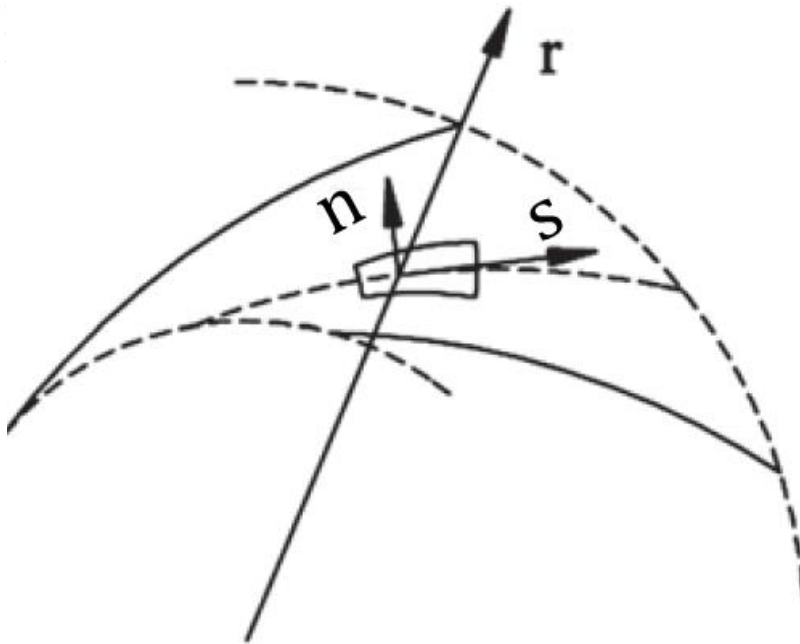
$$\left(w - \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial n} dn\right) \left(R - \frac{1}{2} dn\right) d\theta - \left(w + \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial n} dn\right) \left(R + \frac{1}{2} dn\right) d\theta = \zeta R dn$$

$$-\frac{\partial w}{\partial n} dn R - w dn = \zeta R dn$$

$$\frac{\partial w}{\partial n} + \frac{w}{R} = -\zeta = -2\omega_z$$

$$\frac{\partial w}{\partial n} + \frac{w}{R} = 2\omega$$

$$\omega_z = -\omega$$

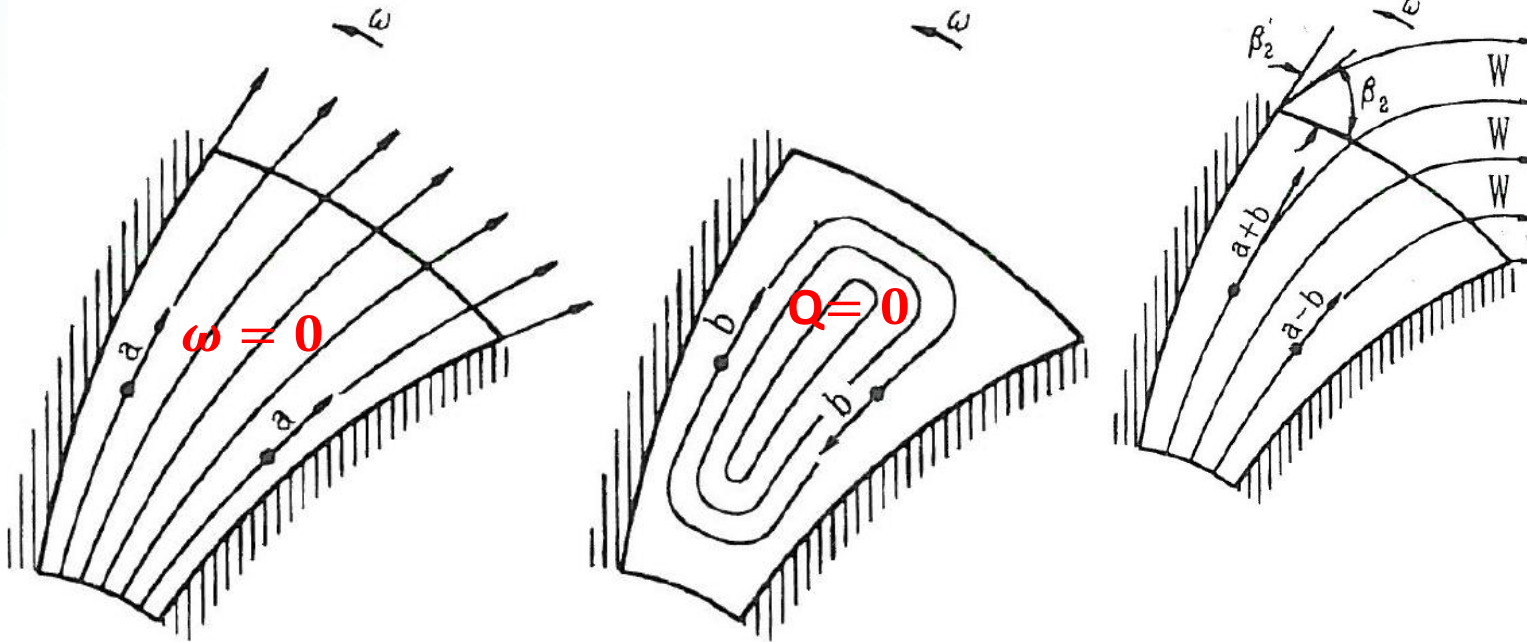




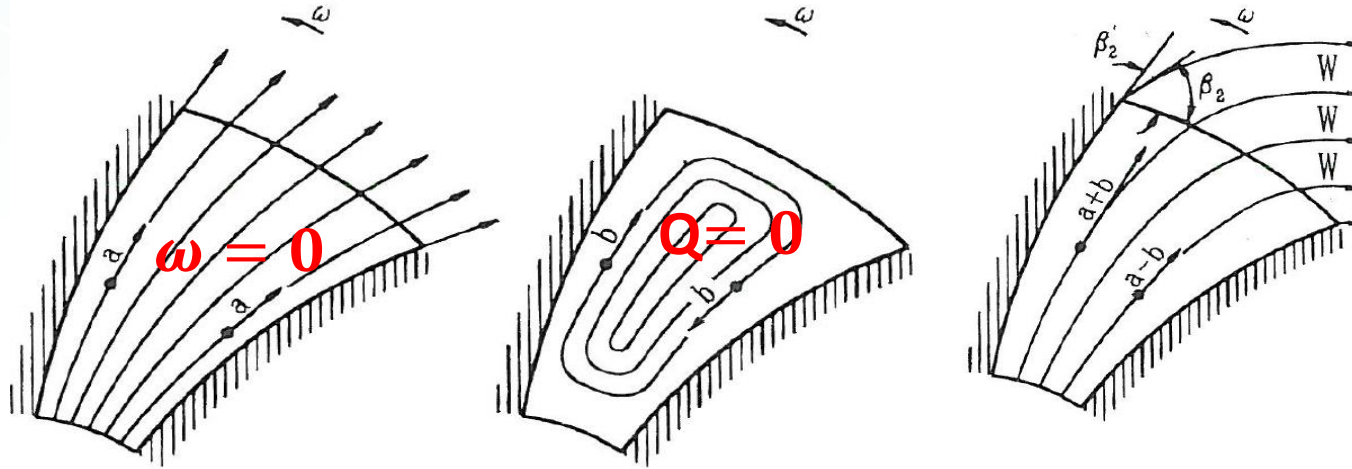
توزیع سرعت در صفحه پره ها

❖ استانیتز با آنالیز دوبعدی حرکت سیال برای پره های نازک نشان داد که خطوط جریان غیر گردابی به موازات پره ها است.

❖ جریان گردابی مستقل از دبی است.



توزیع سرعت در صفحه پره‌ها



$$\beta_2 < \beta_2'$$

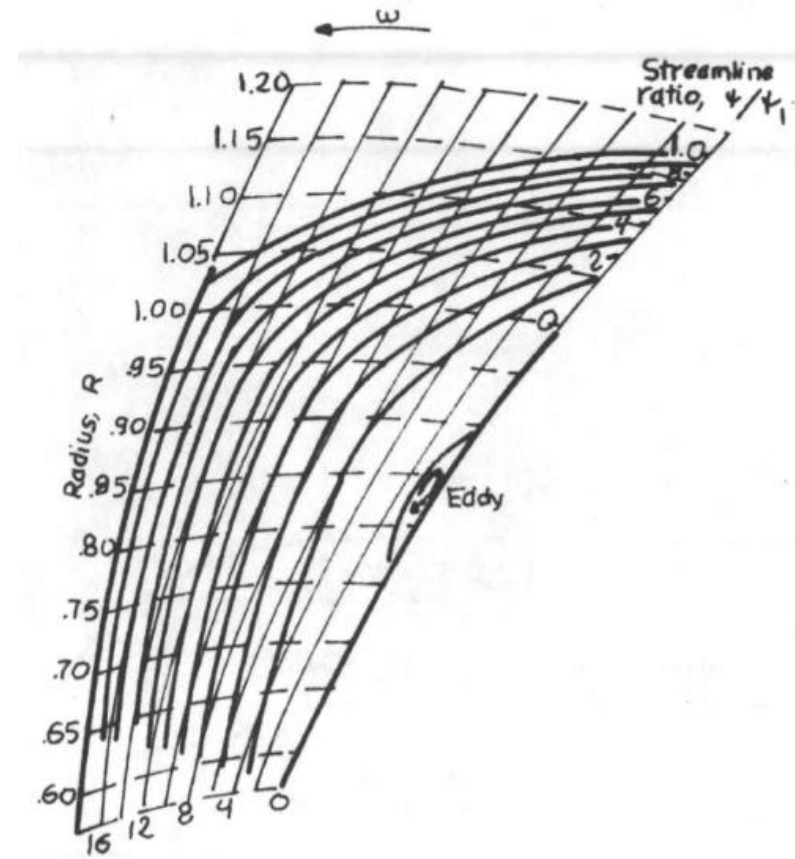
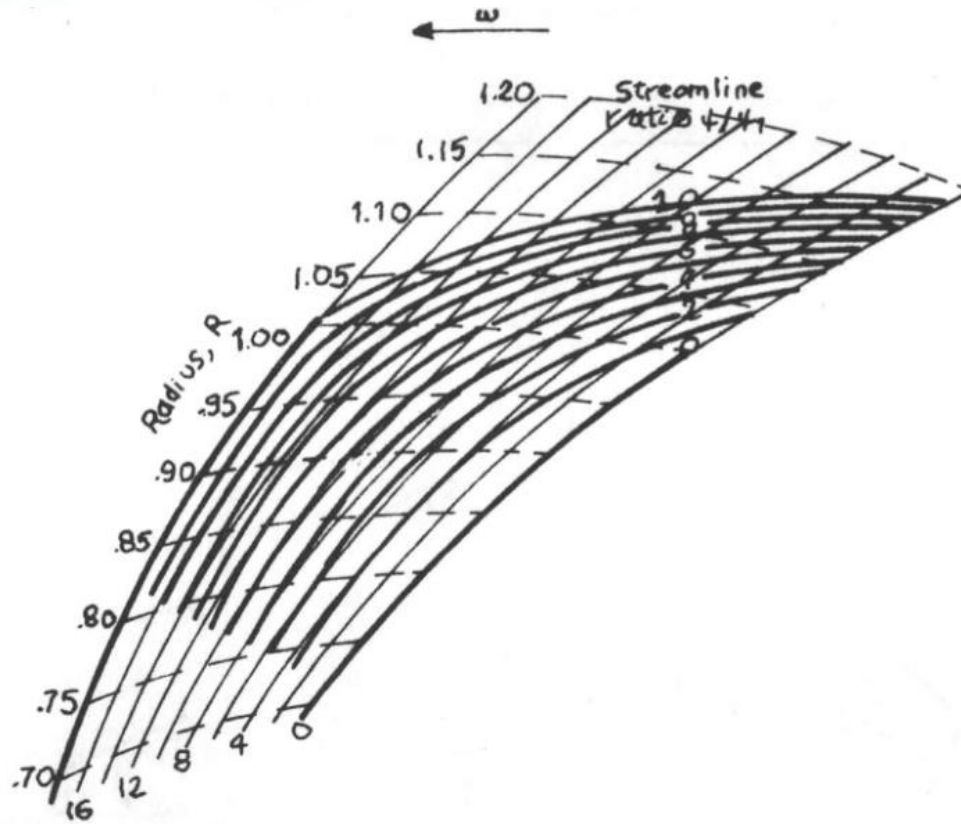
❖ الگوی جریان و سرعت خروجی از جمع برداری دو سرعت گردابی و غیرگردابی به دست می آید.

❖ مشخص است که سرعت در سمت پر، فشار کم و در سمت کم، فشار زیاد است.

❖ خطوط جریان در خروج از چرخ در خلاف جهت دوران آن یعنی در جهت جریان گردابی سیال بین دو پره خم می شوند. بنابراین همواره:



توزیع سرعت در صفحه پره ها





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

برای بررسی رفتار کیفی جریان، با فرض توزیع خطی سرعت W در امتداد n می‌توان نوشت:

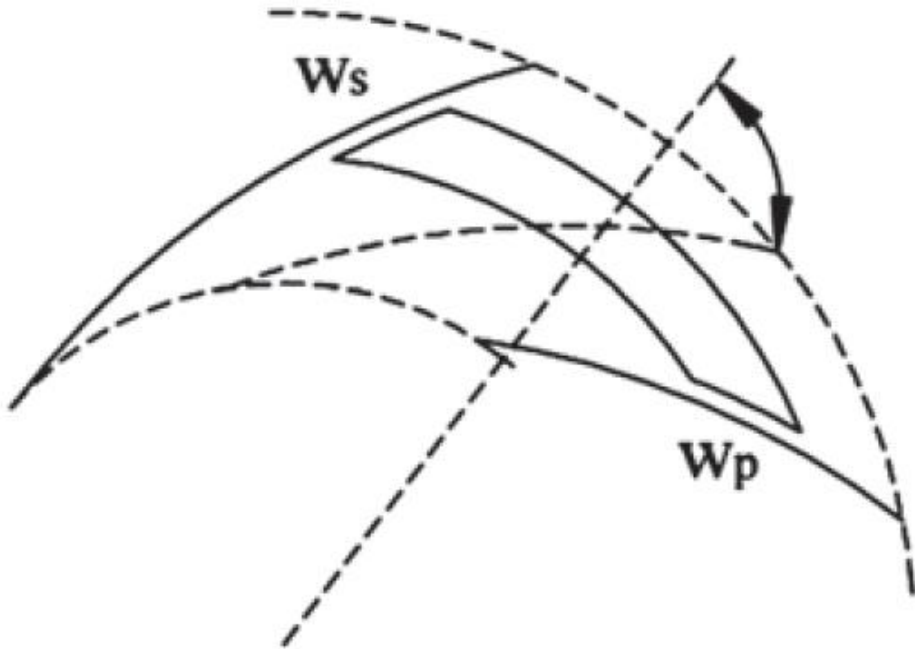
$$\frac{\partial w}{\partial n} + \frac{w}{R} = 2\omega$$

$$w_s - w_p = \Delta w = \left(2\omega - \frac{\bar{w}}{R}\right) \Delta n$$

نتیجه آن که تغییرات W بین دو پره‌ی مجاور ناشی از دو اثر است؛

۱- $\frac{\bar{w}}{R}$ که متناسب با دبی است.

۲- 2ω که به سرعت دورانی مربوط می‌شود.



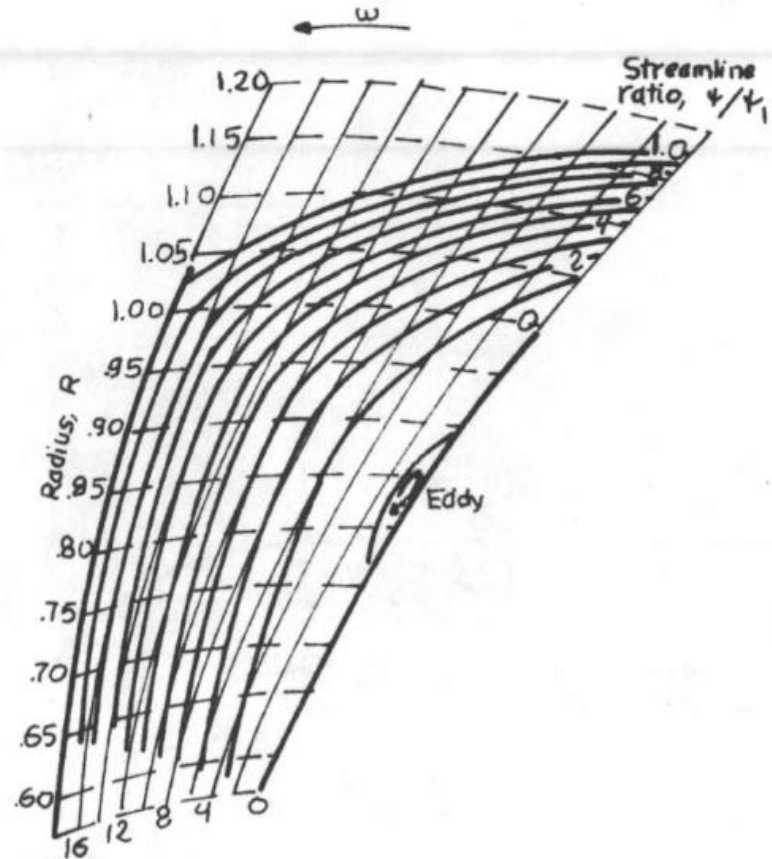


توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

$$W_s - W_p = \Delta W = \left(2\omega - \frac{\bar{W}}{R}\right) \Delta n$$

۱- بررسی حالت حدی دبی‌های کم:

- مقدار متوسط W کوچک است.
- تغییرات سرعت بین دو پره ΔW به طور عمده متأثر از جریان گردابی است.
- هرچه شعاع انحنای پره بیشتر باشد، سهم مولفه‌ی گردابی بیشتر خواهد بود.
- جریان گردابی باعث افزایش W_s و کاهش W_p می‌شود.
- با کاهش دبی یا افزایش ω سرعت W_p ممکن است به صفر برسد و حتی بر روی سطح پر فشار پره جریان معکوس ایجاد شود. در این صورت یک منطقه‌ی مرده بر روی سطح پر فشار پره ایجاد می‌گردد.

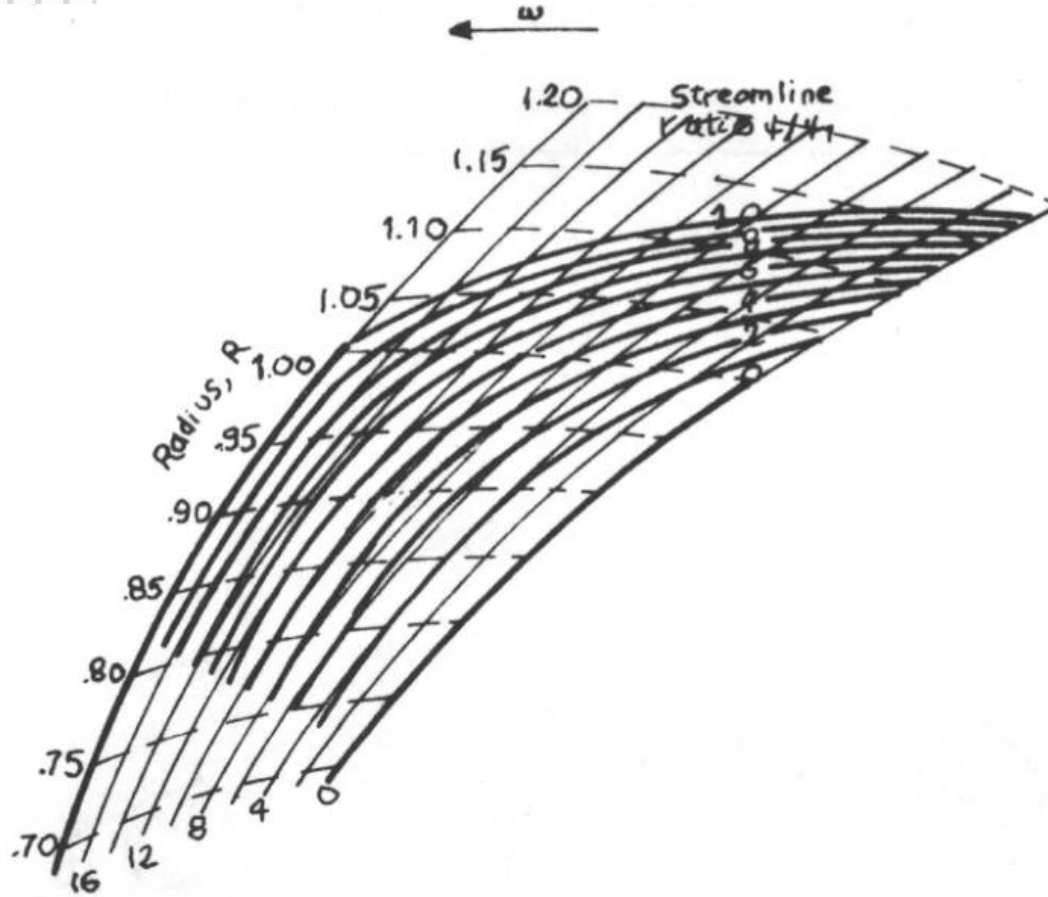




توزیع سرعت در صفحه پره ها

۲- بررسی حالت حدی دبی های زیاد:

- در این حالت $\frac{W}{R}$ در مقایسه با 2ω دارای اهمیت است و منطقی مردهای به وجود نخواهد آمد.





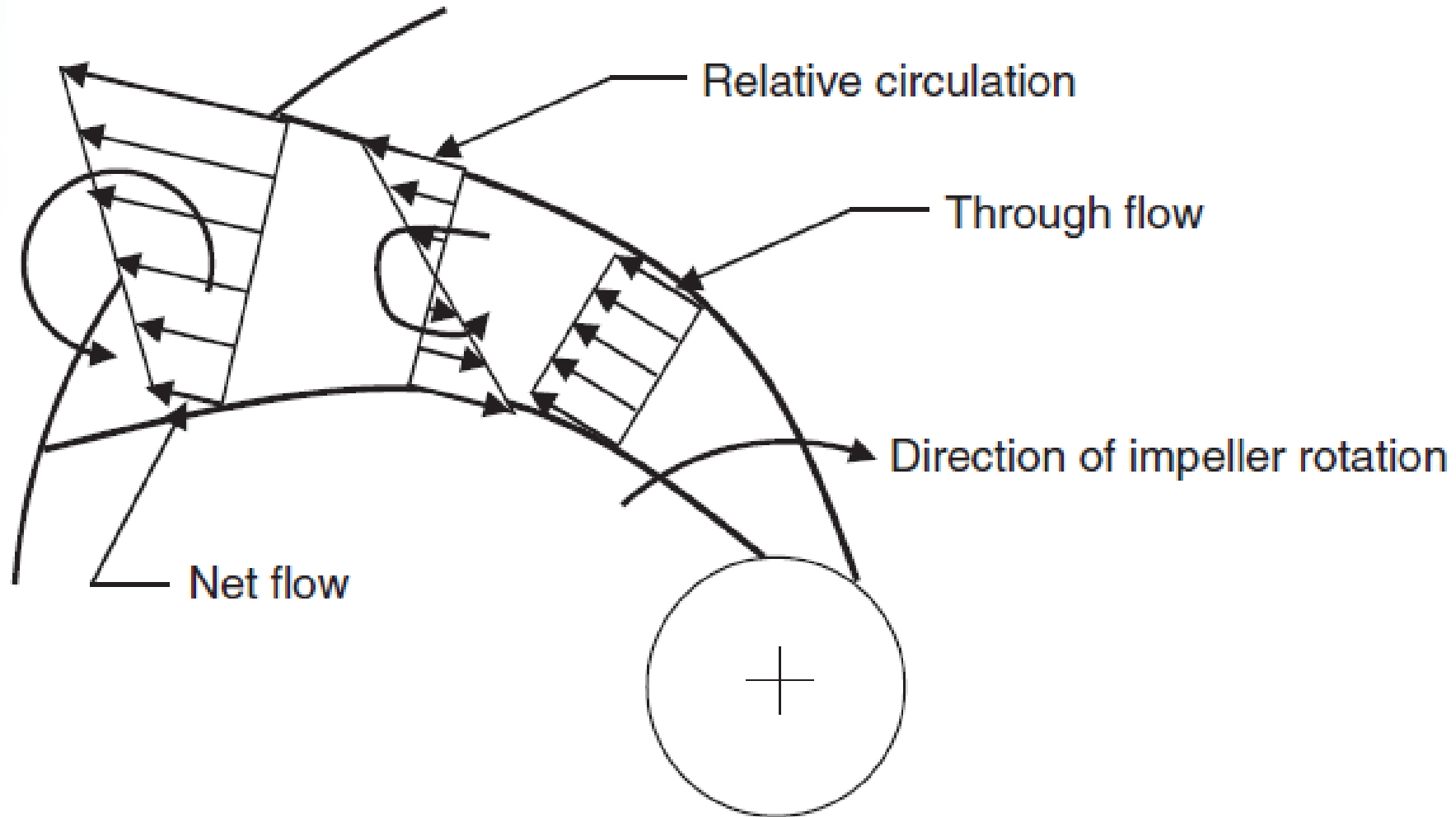
توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

Slip





لغزش



توزیع سرعت در صفحه پره‌ها



توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

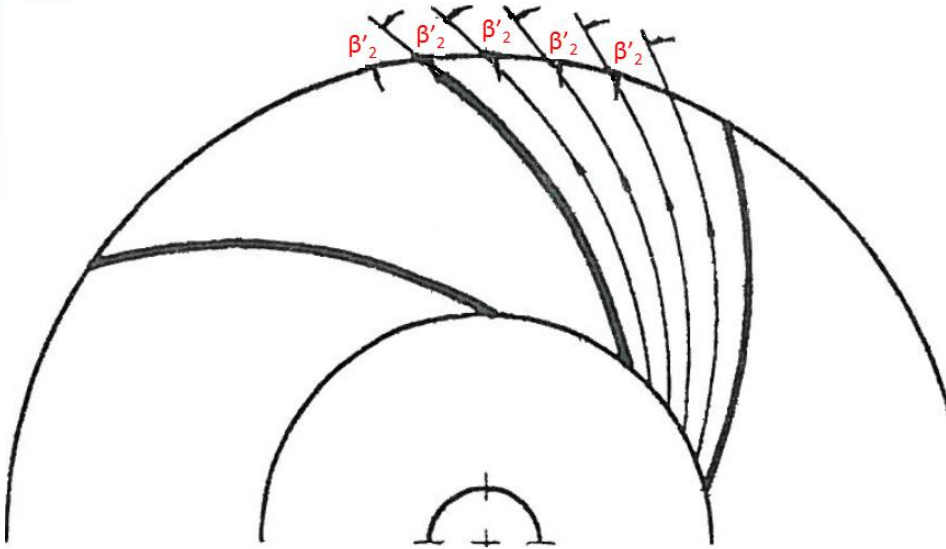
ضریب لغزش

❖ تحلیل تئوری حرکت سیال و اندازه‌گیری‌های مختلف نشان می‌دهد زاویه خروجی سیال β_2 از زاویه هندسی پره β'_2 کم‌تر است.

❖ اختلاف زاویه $\Delta\beta$ سبب تغییر مولفه محیطی سرعت مطلق به اندازه‌ی ΔC_{u2} با مقدار تئوری یک‌بعدی می‌شود.

❖ برای هر خط جریان این اختلاف متفاوت است ولی می‌توان از یک مقدار متوسط C_{u2} استفاده کرد.

❖ مثلث سرعت واقعی بر اساس این مقدار رسم می‌شود.

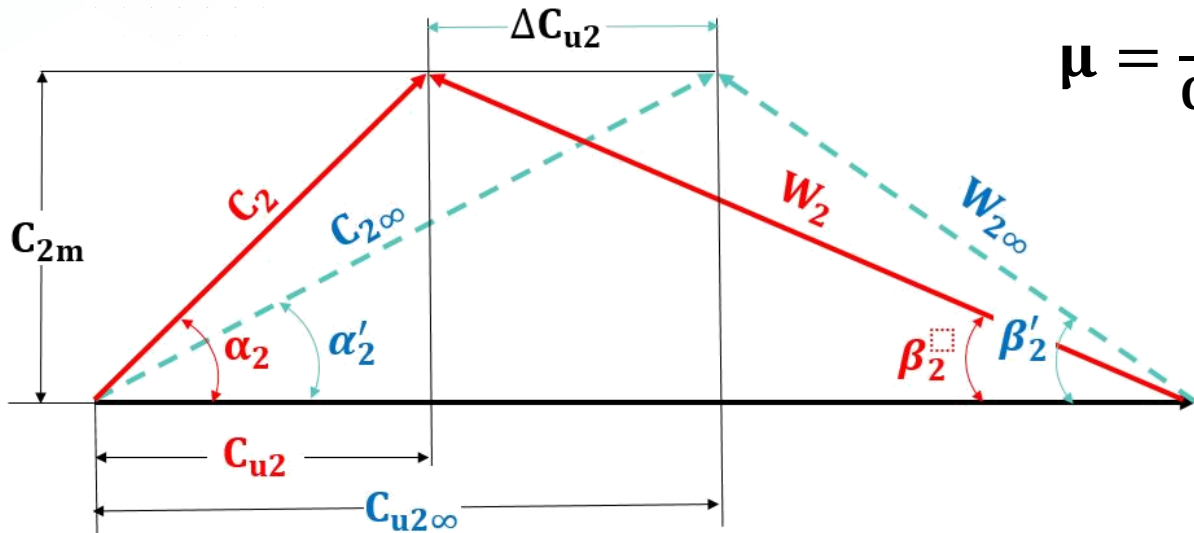


توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

ضریب لغزش

❖ مثلث سرعت ایده‌آل و مثلث سرعت واقعی با قاعده‌ی مشترک U_2 و ارتفاع یکسان C_{m2} رسم شده است. علامت ∞ معرف سرعت‌های جریان یک‌بعدی با فرض بی‌نهایت پره است.

❖ ضریب لغزش $\mu = \frac{C_{u2}}{C_{u2\infty}} = \frac{U_2 C_{u2}/g}{U_2 C_{u2\infty}/g} = \frac{H''}{H''_{\infty}}$ 



❖ در نقطه طرح $0.65 \leq \mu \leq 0.80$

❖ لغزش موجب کاهش هد اولر می‌شود.

❖ استپانوف ضریب لغزش پمپ‌ها را

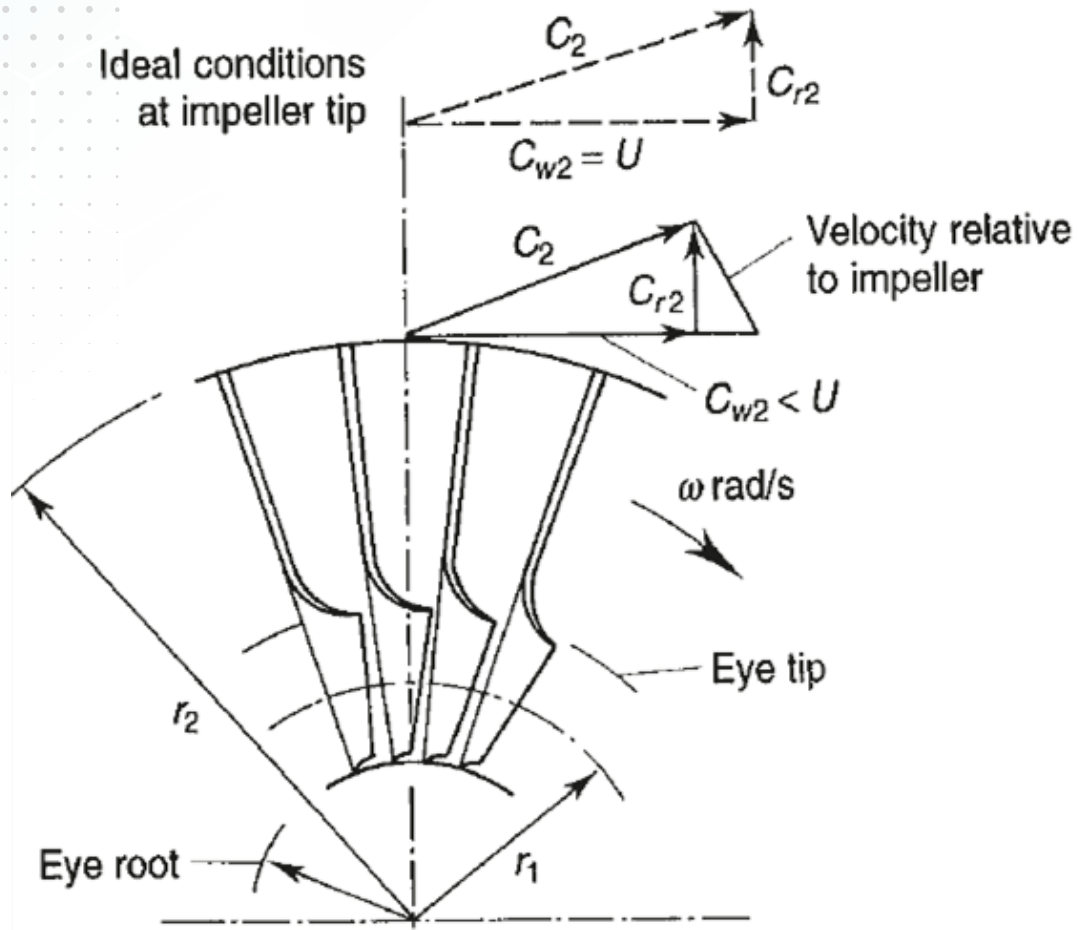
0.73 پیشنهاد کرد..



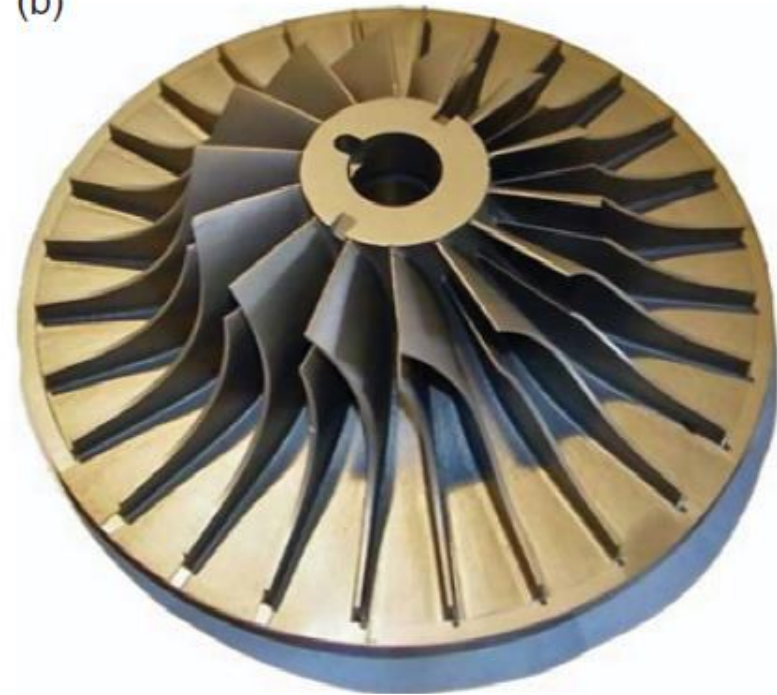
توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

ضریب لغزش

❖ کمپرسورهای شعاعی



(b)





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

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

۱- روش بوزمان:

$$\psi = 1 - \phi \cotg \beta'_2$$

❖ مشخصه‌ی بی بعد بر مبنای تئوری یک بعدی:

$$\psi = B - C \phi \cotg \beta'_2$$

❖ مشخصه‌ی تصحیح شده‌ی بوزمان:

$$\mu = \frac{B - C \phi \cotg \beta'_2}{1 - \phi \cotg \beta'_2}$$

❖ بنابراین ضریب لغزش به صورت زیر تعریف می‌شود:

❖ بوزمان از حل جریان پتانسیل بین پره‌های لگاریتمی با عرض ثابت ضرایب تصحیح C و B را به صورت تابعی از β'_2 و Z، و

$$\frac{R_2}{R_1} \text{ ارائه نمود.}$$





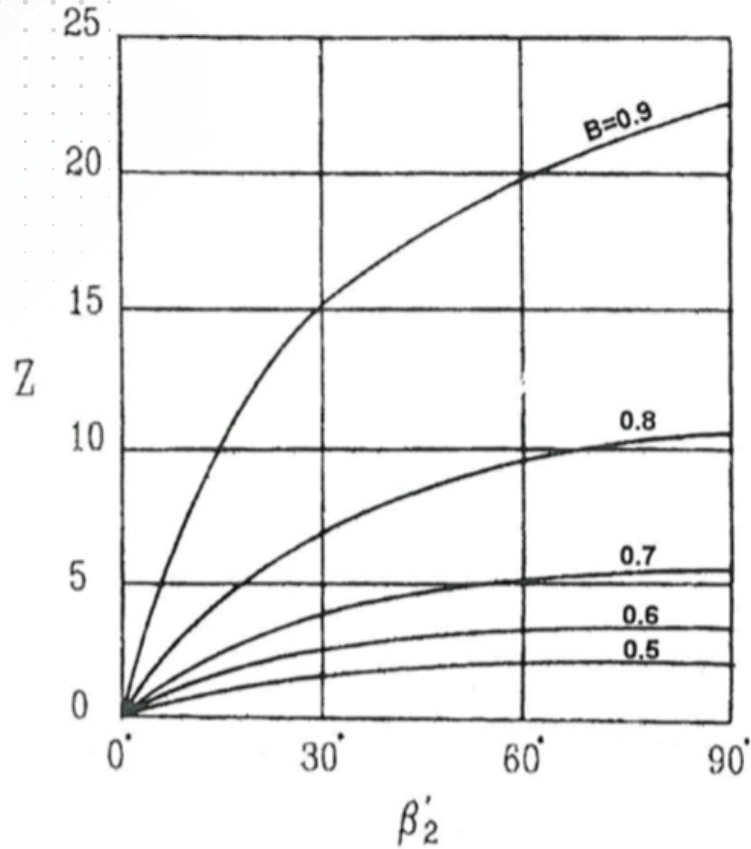
توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

۱- روش بوزمان:

$$\text{if } \frac{R_2}{R_1} \geq \exp \left(2\pi \frac{\sin \beta'_2}{Z} \right) \Rightarrow C = 1$$

$$\mu = 1 - \frac{1 - B}{1 - \varphi \cotg \beta'_2}, \quad B = 1 - \frac{\Delta C_{u2}}{U_2}$$



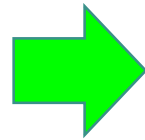


توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

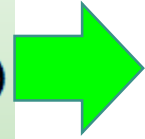
۲- روش ویسنر:

$$\text{if } \frac{R_2}{R_1} < \exp \left(8.16 \frac{\sin \beta'_2}{Z} \right)$$



$$B = \left(1 - \frac{\sqrt{\sin \beta'_2}}{Z^{0.7}} \right) \left[1 - \left(\frac{\frac{R_2}{R_1} - \exp \left(8.16 \frac{\sin \beta'_2}{Z} \right)}{1 - \exp \left(8.16 \frac{\sin \beta'_2}{Z} \right)} \right)^3 \right]$$

$$\text{if } \frac{R_2}{R_1} \geq \exp \left(8.16 \frac{\sin \beta'_2}{Z} \right)$$



$$B = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta'_2}}{Z^{0.7}}$$





توزیع سرعت در صفحه پره ها

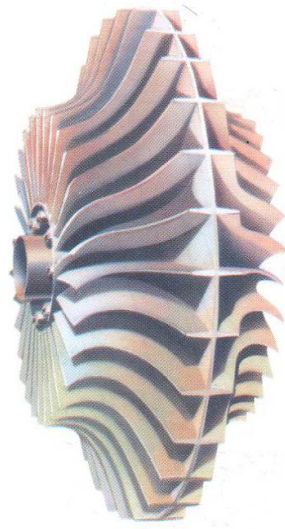
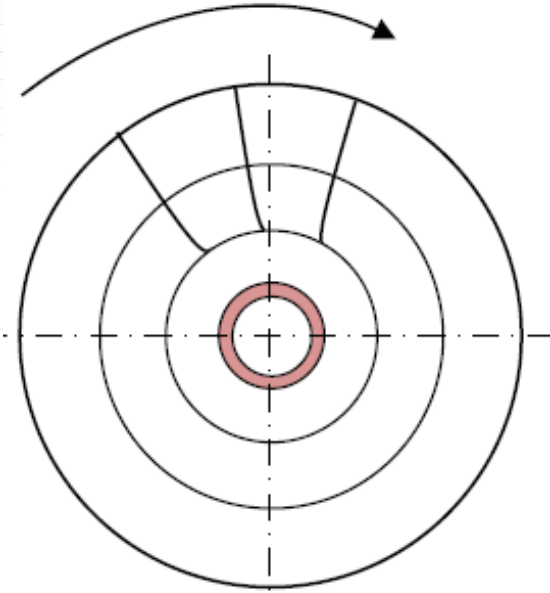
محاسبه ضریب لغزش

۳- روش استانیترز:

❖ جریان سیال ایده آل در بین پره های شعاعی $\beta'_2 = 90^\circ$

$$B = 1 - \frac{0.63\pi}{Z}$$

❖ قابل استفاده برای $45^\circ < \beta'_2 < 90^\circ$



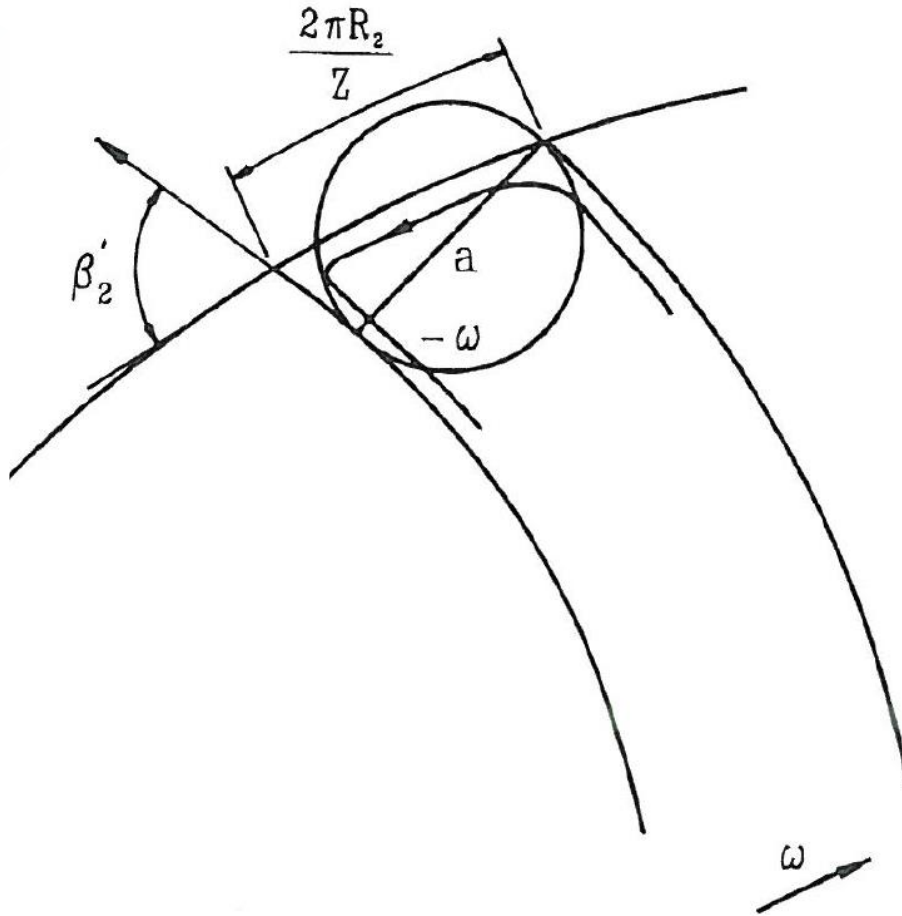


توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

۴- روش استودولا:

- ❖ استودولا جریان سیال بین دو پره را حاصل دو جریان یکنواخت و گردابی دانست.
- ❖ جریان مطلق غیر گردابی است.
- ❖ سرعت نسبی جریان گردابی ω است.



توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

۴- روش استودولا:

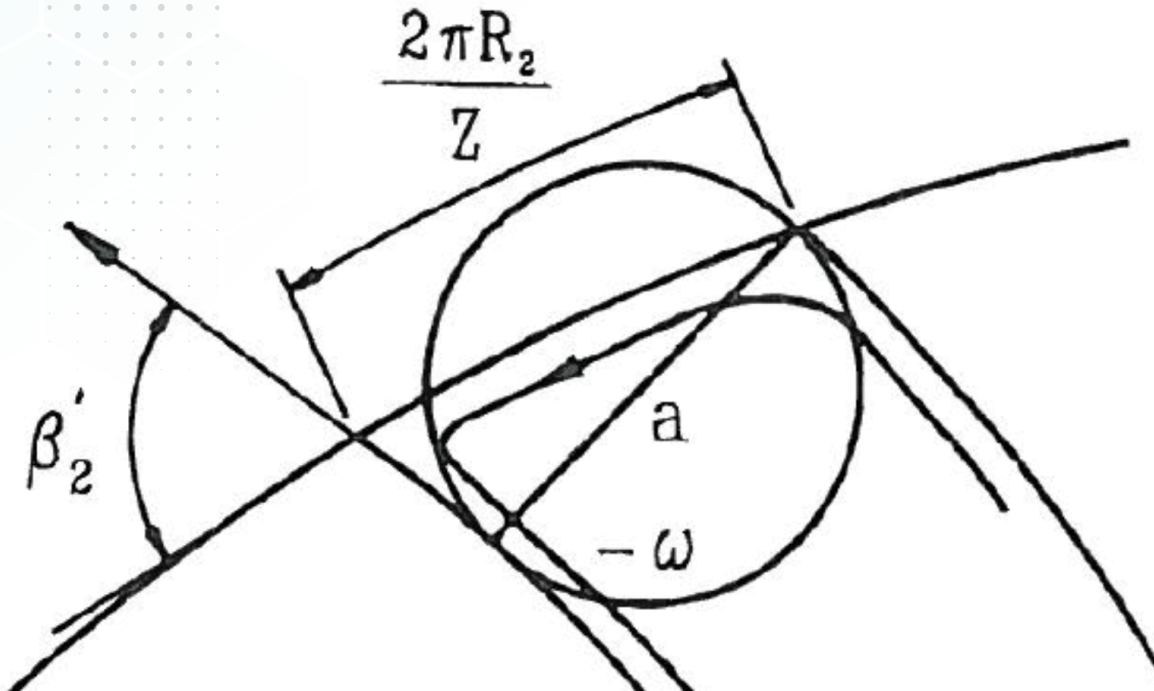
❖ تصویر مماسی مولفه جریان گردابی:

$$\Delta C_{u2} = \omega \frac{a}{2}, \quad a = \frac{2\pi R_2}{Z} \cdot \sin \beta'_2$$

$$\Delta C_{u2} = U_2 \cdot \frac{\pi}{Z} \sin \beta'_2$$

❖ بنابراین ضریب لغزش برابر خواهد بود با:

$$\mu = 1 - \frac{\Delta C_{u2}}{C_{u2\infty}} = 1 - \frac{\frac{\pi}{Z} \sin \beta'_2}{1 - \varphi \cotg \beta'_2}$$





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

۵- روش پفلایدر:

❖ این پژوهش‌گر با مرتبط نمودن گشتاور وارده از چرخ به سیال به اختلاف فشار طرفین پره، ضریب لغزش را محاسبه نمود.

$$\mu = \frac{C_{u2}}{C_{u2\infty}} = \frac{1}{1 + C_p}, \quad C_p = \frac{\psi}{Z} \cdot \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

❖ مقدار بستگی به نوع چرخ دارد.

$$\begin{cases} \psi = (0.55 - 0.68) + 0.6 \sin \beta'_2 \\ \psi = (1.0 - 1.2) (1 + \sin \beta'_2) \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \end{cases}$$

برای پره‌های با یک قوس
دایره و هنگامی که $\frac{R_2}{R_1} \geq 2$

برای پره‌های سه بعدی



توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

۶- روش فویه:

❖ قابل استفاده برای چرخ‌های نیمه سانتریفیوژ

❖ محاسبات بر اساس جریان پتانسیل

❖ پارامترهای موثر: تعداد پره‌ها، زاویه خروجی پره و زاویه اختلاط γ

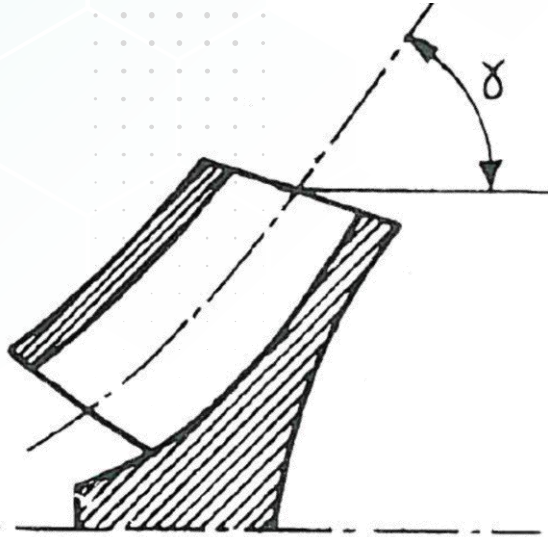
زاویه اختلاط

$$B = \left(1 - \frac{2.4 \sin \gamma}{Z + 3}\right)$$

رابطه‌ی تحلیلی

$$B = 1 - \frac{2.4 \sin \gamma}{Z + 3} \left(1 - \frac{0.833}{Z}\right)$$

رابطه‌ی تصحیح شده به کمک نتایج تجربی





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

محاسبه ضریب لغزش

۶- روش بالچ:

$$\mu = \frac{C_{u2}}{U_2} = \frac{Z}{Z + \frac{0.62}{Z} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3}}$$





توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

مقایسه روش‌ها مختلف

چرخ	β'_2 °	Z	R_1/R_2	B^*_{exp}	Wisner	Stodola	Fujie	Stanitz
I	18	6	0.46	0.82	0.84	0.83	0.77	0.67
II	24	6	0.46	0.767	0.82	0.788	0.77	0.67
III	30	6	0.46	0.74	0.798	0.738	0.77	0.67
IV	24	4	0.46	0.72	0.76	0.68	0.72	0.51
V	24	8	0.46	0.80	0.85	0.84	0.804	0.75

$$B = 1 - \frac{\Delta C_{u2}}{U_2}$$

- ❖ هر روش در حالت خاصی مورد قبول است و هیچ روشی عام نیست.
- ❖ روش استانیتز برای تعداد پره‌های کم و $\beta'_2 < 50^\circ$ با نتایج تجربی اختلاف زیاد، و برای چرخ‌های شعاعی با تعداد پره زیاد یکی از بهترین روش‌هاست.
- ❖ رابطه‌ی استودولا برای تعداد پره‌های کم و زوایای خروجی بین 20° تا 40° مناسب است.
- ❖ رابطه‌ی ویسنر در کلیه مواردی که نسبت شعاع‌ها در محدوده‌ی شرط شده باشد خطای قابل قبول ۵٪ می‌دهد. بنابراین به‌عنوان تقریب اول مناسب است.

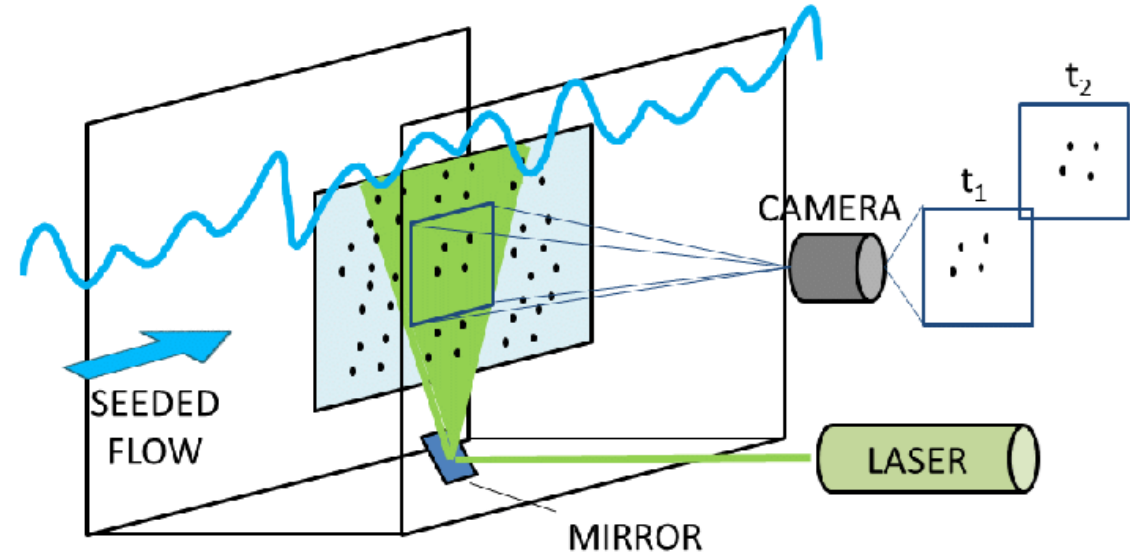
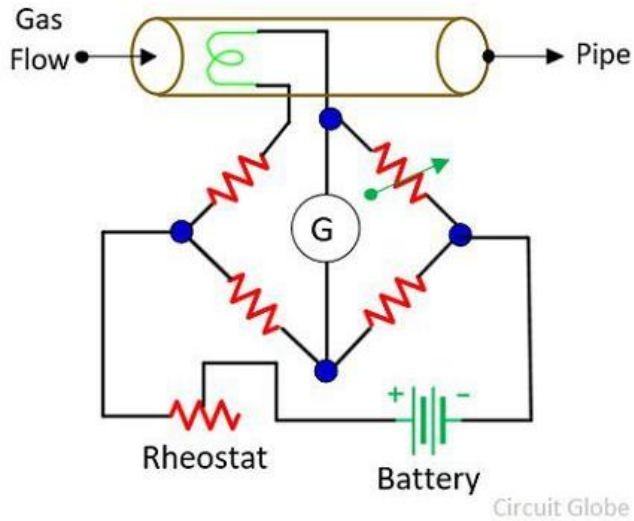
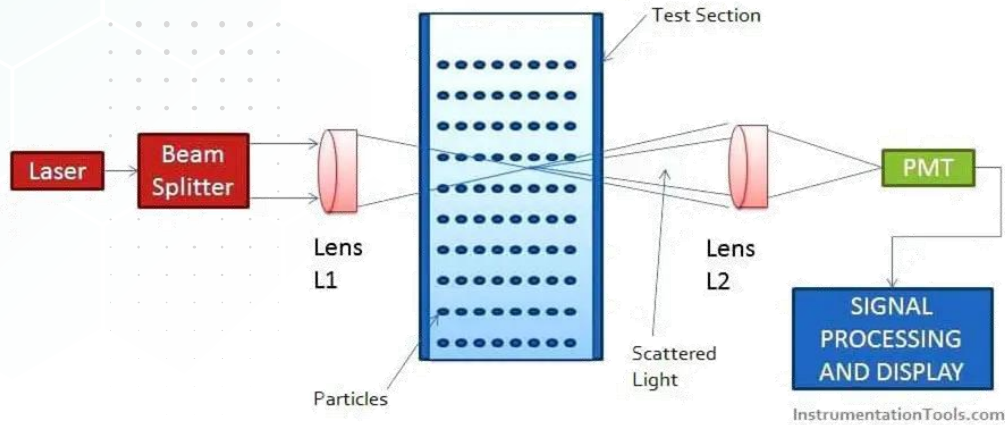




توزیع سرعت در صفحه پرها

توزیع واقعی سرعت؛ پدیده Jet & Wake

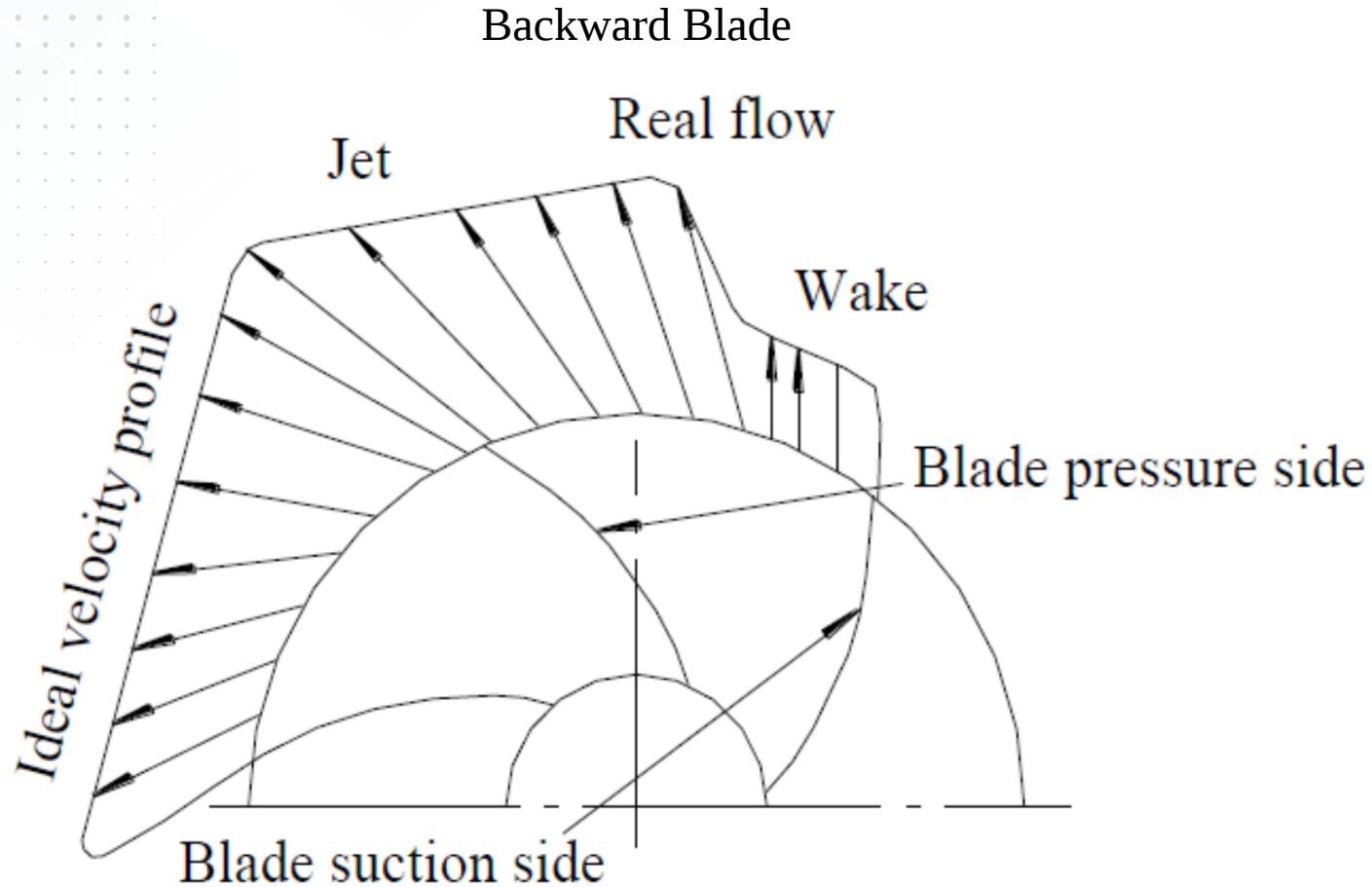
اندازه گیری توزیع واقعی سرعت به کمک سیم داغ، LDA یا PIV





توزیع سرعت در صفحه پره ها

توزیع واقعی سرعت؛ پدیده‌ی Jet & Wake



❖ تضاد کامل پروفیل واقعی سرعت حاصل از اندازه‌گیری به کمک سیم داغ در مقایسه با تئوری

❖ سرعت بیش‌تر در سطح پر فشار پره از سطح کم فشار پره به دلیل جدایی لایه مرزی روی سطح کم فشار پره مخصوصاً در دبی‌های کم

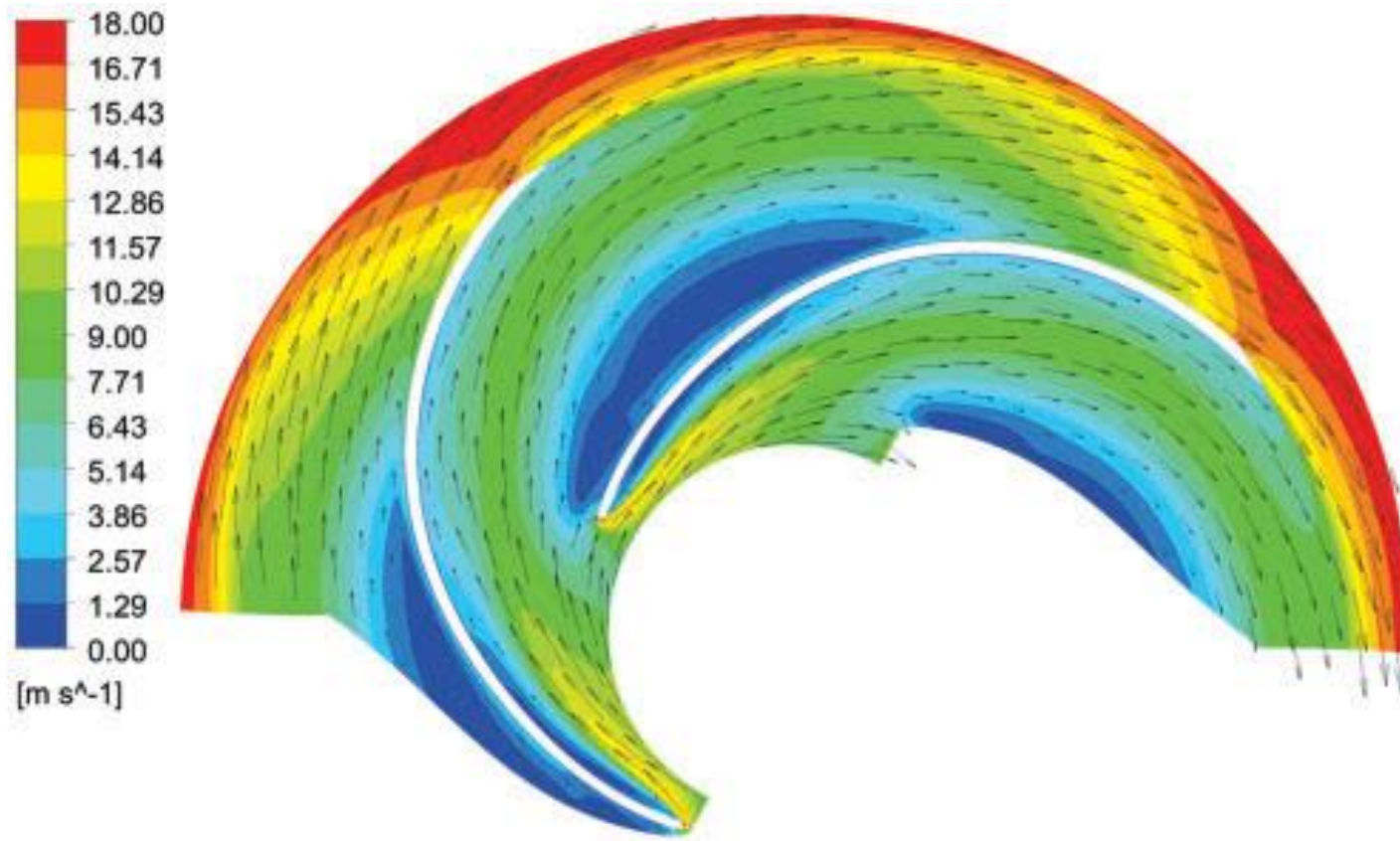
❖ ایجاد دو ناحیه پر سرعت و مرده در جریان بین دو پره





توزیع سرعت در صفحه پره ها

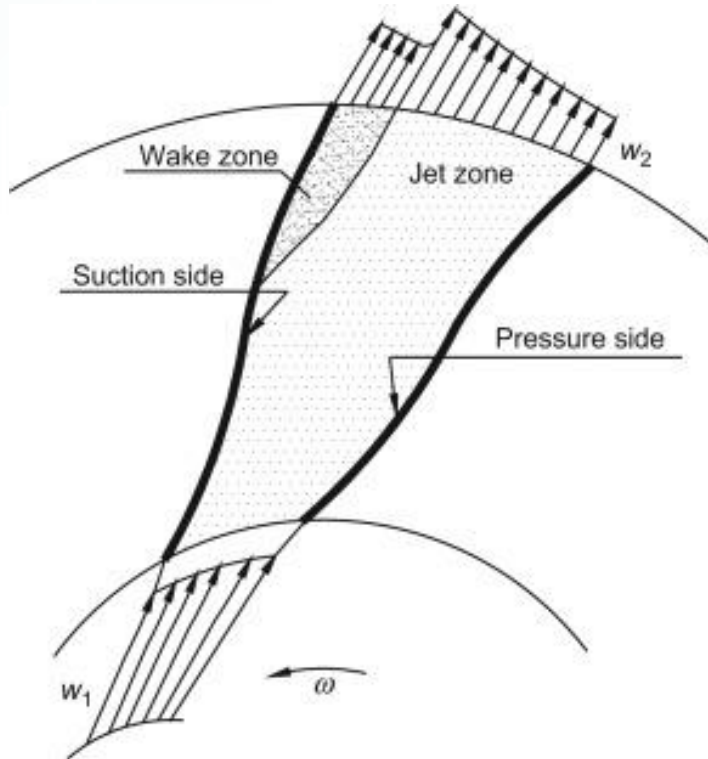
توزیع واقعی سرعت؛ پدیده Jet & Wake



توزیع سرعت در صفحه پره ها

توزیع واقعی سرعت؛ پدیده Jet & Wake

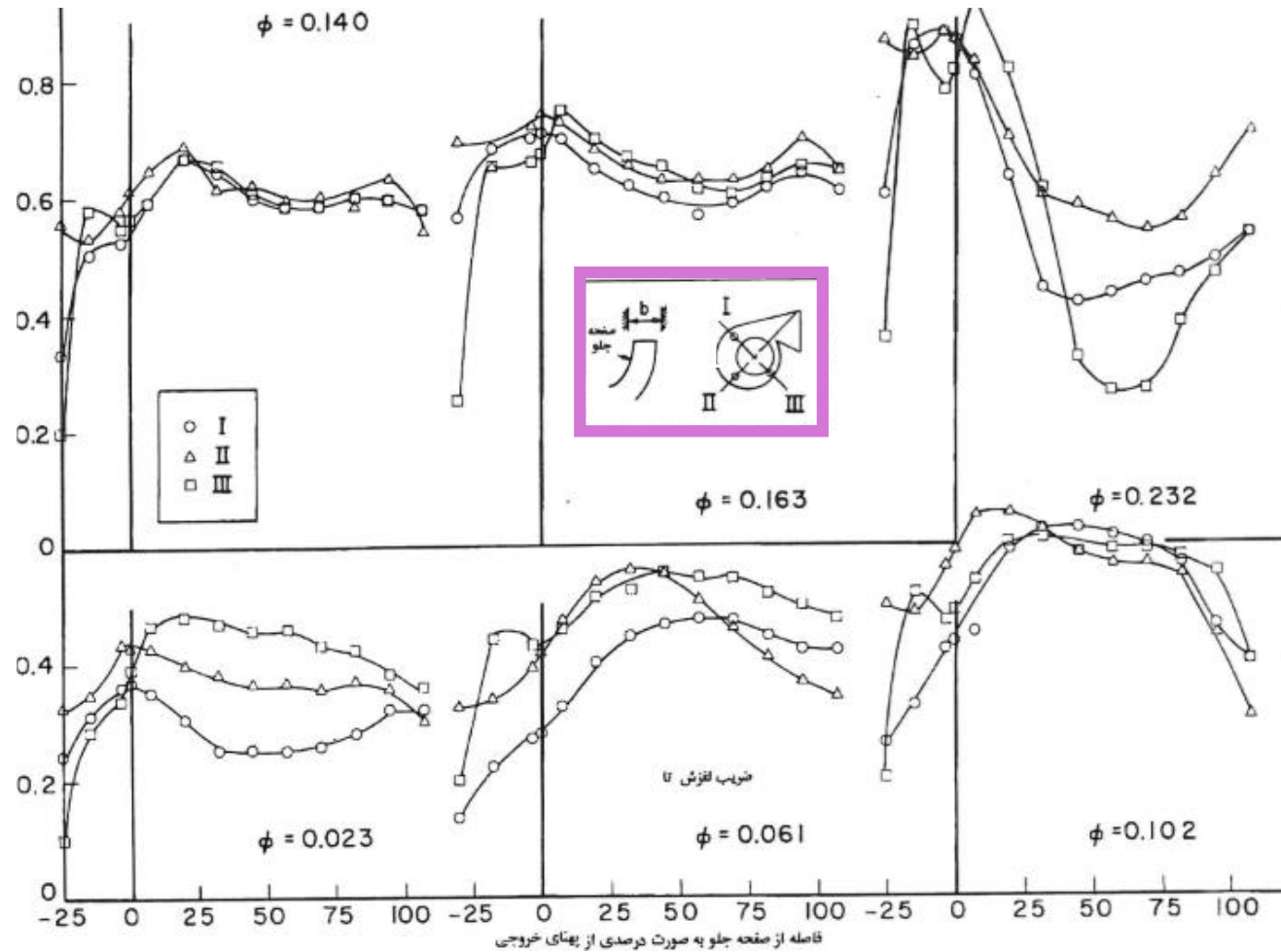
- ❖ در کمپرسورها نقطه‌ی جدایی لایه مرزی نزدیک لبه ورودی پره است و بنابراین قسمت مرده سطح نسبتاً وسیعی را در خارج اشغال می‌نماید.
- ❖ در مورد چرخ‌های رو به عقب جدایی لایه مرزی در نقطه‌ای دورتر از لبه اتفاق می‌افتد و ناحیه مرده سطح کوچکی می‌شود.
- ❖ پدیده جدایی در پمپ‌ها با پره‌های رو به عقب اهمیت چندانی ندارد.
- ❖ ضریب لغزش تابع فرم پروفیل سرعت در خارج از چرخ است و هنگام بروز این پدیده (در دبی‌های کم) باید تصحیح شود.
- ❖ نتیجه آن که ضریب لغزش محاسبه شده فقط در نقطه کارکرد می‌تواند قابل اطمینان باشد.





توزیع سرعت در صفحه پره ها

توزیع واقعی سرعت؛ پدیده Jet & Wake

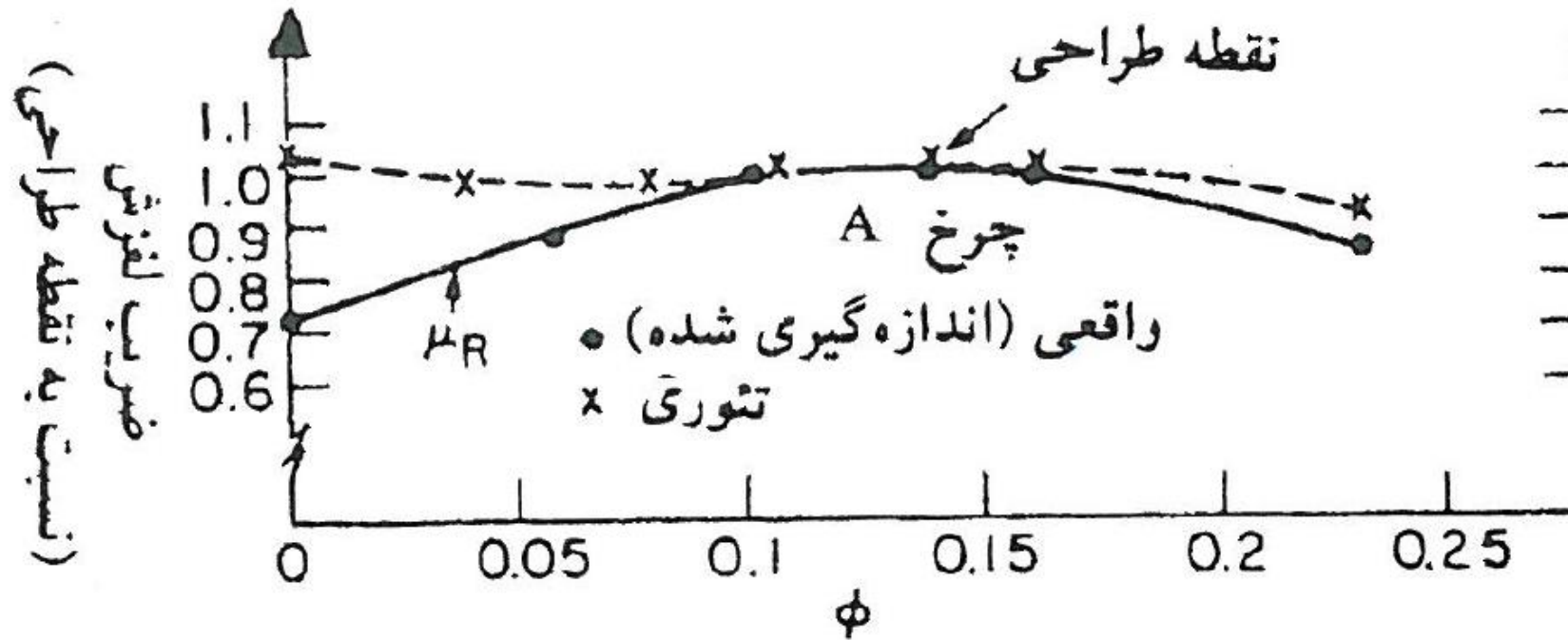




توزیع سرعت در صفحه پره‌ها

توزیع واقعی سرعت؛ پدیده‌ی Jet & Wake

❖ مقدار ضریب لغزش بر حسب دبی در دو حالت تئوری و واقعی انحراف ۳۰٪ بین دو مقدار واقعی و تئوری



سپاس از توجه شما
