

آیا می‌دانستید با عضویت در سایت جزوه بان می‌توانید به صورت رایگان جزوات و نمونه

سوالات دانشگاهی را دانلود کنید؟؟

فقط کافیست روی لینک زیر ضربه بزنید



[ورود به سایت جزوه بان](#)

Jozveban.ir

telegram.me/jozveban

sapp.ir/sopnuu

جزوات و نمونه سوالات پیام نور



@sopnuu
jozveban.ir

درس : توربو ماشین

استاد : دکتر کورش امیر اصلانی تبریز

Text :

توربو ماشینهای جریان هیدرولیک و قابل تراکم

نویسنده : ا. ت. - ساینز

ترجمه : دکتر محمد حسن شجاعی فرد

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تأسیسات و الکتریکی
طراحی - نظارت - اجرا
نظام مهندسی : ۱۷۲۷۶-۰۳-۱۵
پروانه مهندسی : ۰۲۸۱۵-۰۳-۱۵
شماره شهرسازی : ۰۱۲۲۲-۰۳-۱۵

جزوه آموزشی درس توربو ماشین آقای دکتر کورش امیر اصلانی تبریز
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران - دانشکده فنی (۱۳۷۳)

مقدمه

تعریف - توربو ماشین وسیله‌ای است که طی یک جریان پایدار (دائمی) به سیال انرژی بدهد یا از آن انرژی بگیرد. از این رو مثلاً پمپهای رفت و برگشتی پیستونی چون قطع مقطعی جریان دارد - جزء توربو ماشینها محسوب نمی‌شود.

انرژی دهنده : پمپ - کمپرسور - فن

انرژی گیرنده : توربینهای گازی و آبی

انواع توربینها

تراکم پذیر : کمپرسور - فن - توربین گازی

تراکم ناپذیر : پمپ - توربین آبی

(یا)

« از جهت سیال »

محوری (Axial)

(Radial)

(Centrifugal)

شعاعی یا گرین از مرکز

(یا)

« از جهت حرکت سیال »

* توربینها : با افت انرژی سیال به هد یا انتالی پایین تر کار انجام می دهند.

* پمپها و کمپرسورها : با انتقال انرژی به سیال هد یا انتالی آنرا افزایش می دهند.

$$H = Z + \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\rho g}$$

هر

3

* معمولاً شعاعی‌ها جمع و جورتر و از ان تر هستند اما محوری‌ها انژی -
بیشتری از می دهند یا میگیرند.

اصطلاحات اولیه

* فن (Fan) : ماشینی است که با اعمال کار بر روی گاز هد آن
را می افزاید و میزان این افزایش در حدود 1.05
است و اگر از این بیشتر باشد کمپرسور می شود.

* پروانه (Impeller) : عضو دوار پمپها یا کمپرسورهای گریز از مرکز
را گویند.

* رانر (runner) : عضو دوار توربینها و پمپهای شعاعی هیدرولیکی
را گویند.

* روتور (Rotor) : عضو دوار توربینها و کمپرسورهای محوری گازی
است.

دیفیوزر : قسمتی از توربو ماشین است که انرژی جنبشی را به فشار تبدیل می کند.

حلزونی : پوسته پیچیده و کمپرسورهای گرینز از مرکز را گویند که وظیفه آن جمع آوری سیال و گاه کمی افزایش فشار می باشد.



لوله رانش (Draft Tube) : لوله خروجی از توربینهای آبی است که کار دیفیوزر را انجام می دهد.

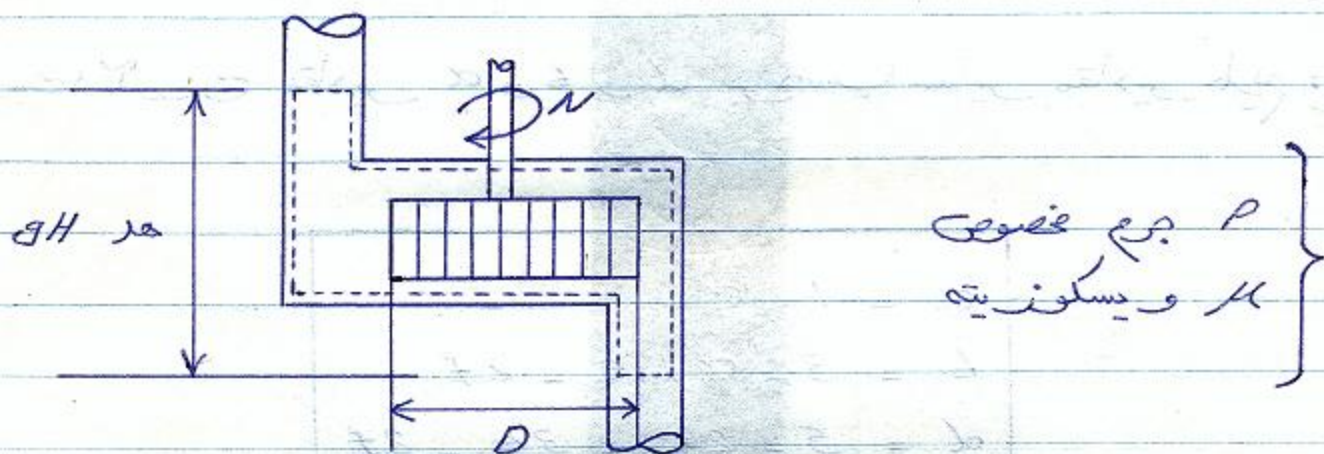
۲ نالین ابعادی :

حرف از ۲ نالین ابعادی ←

۱- بدست آوردن نتایج مربوط به نمونه اصلی از روی آن ماشین که بر روی مدل انجام می شود.

۴ - بدست آوردن بهترین حالت عملکرد و رانندگی.

(در مورد توربو ماشینهای با سیال تراکم ناپذیر) :



$$* P = f(P^a, N^b, \mu^c, D^d, Q^e, gH^f)$$

* بر اساس اصول آنالیز ابعادی شکل تابعی فوق را با اعمال یک ضریب ثابت بصورت معادله در می آوریم ؛ در این رابطه ابعاد پارامترها را نیز بر حسب ابعاد اصلی می نویسیم :

$$P = \text{Const.} (P^a, N^b, \mu^c, D^d, Q^e, gH^f) \quad (\text{توان})$$

$$\frac{ML^2}{T^3} = \text{Const.} \left[\left(\frac{M}{L^3} \right)^a \left(\frac{1}{T} \right)^b \left(\frac{M}{LT} \right)^c (L)^d \left(\frac{L^3}{T} \right)^e \left(\frac{L^2}{T^2} \right)^f \right]$$

* با مساوی قرار دادن توانهای ابعاد اصلی در دو طرف معادلات می توان بصورت مستقل یا وابسته بدست آورد.

$$\begin{cases} \text{توان } M : & 1 = \alpha + c \\ \text{توان } L : & 2 = -3\alpha - c + d + 3e + 2f \\ \text{توان } T : & -3 = -6 - c - e - 2f \end{cases}$$

* با بدست آوردن مقادیر α و b و d بر حسب سایر مقادیر داریم:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - c \\ b &= 3 - c - e - 2f \\ d &= 5 - 2c - 3e - 2f \end{aligned}$$

$$P = \text{Const.} \left[P^{1-c} \cdot N^{3-c-e-2f} \cdot \mu^c \cdot D^{5-2c-3e-2f} \cdot \rho^e \cdot (gH)^f \right]$$

$$P = \text{Const.} \left[P N^3 D^5 \left(\frac{\mu}{P N D^2} \right)^c \left(\frac{\rho}{N D^3} \right)^e \left(\frac{gH}{N^2 D^2} \right)^f \right]$$

$$\frac{P}{PN^3D^5} = \text{Const.} \left[\underbrace{\left(\frac{\mu}{PND^2}\right)^c \left(\frac{Q}{ND^3}\right)^e \left(\frac{gH}{N^2D^2}\right)^f}_{Re \text{ عکس}} \right]$$

* تعریف :

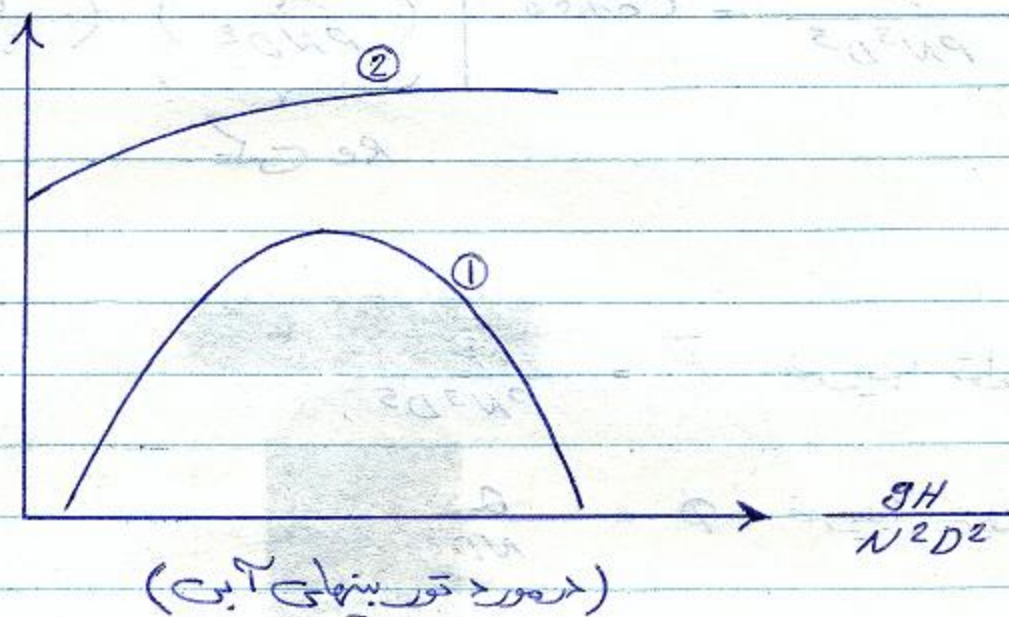
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ضریب توان} \quad \bar{P} = \frac{P}{PN^3D^5} \\ \text{ضریب دبی} \quad \phi = \frac{Q}{ND^3} \\ \text{ضریب هدر} \quad \psi = \frac{gH}{N^2D^2} \end{array} \right.$$

$$\bar{P} = \text{Const.} \left[(Re)^c (\phi)^e (\psi)^f \right]$$

* چون محدوده تغییرات Re کم است از آن صرف نظر می کنیم :

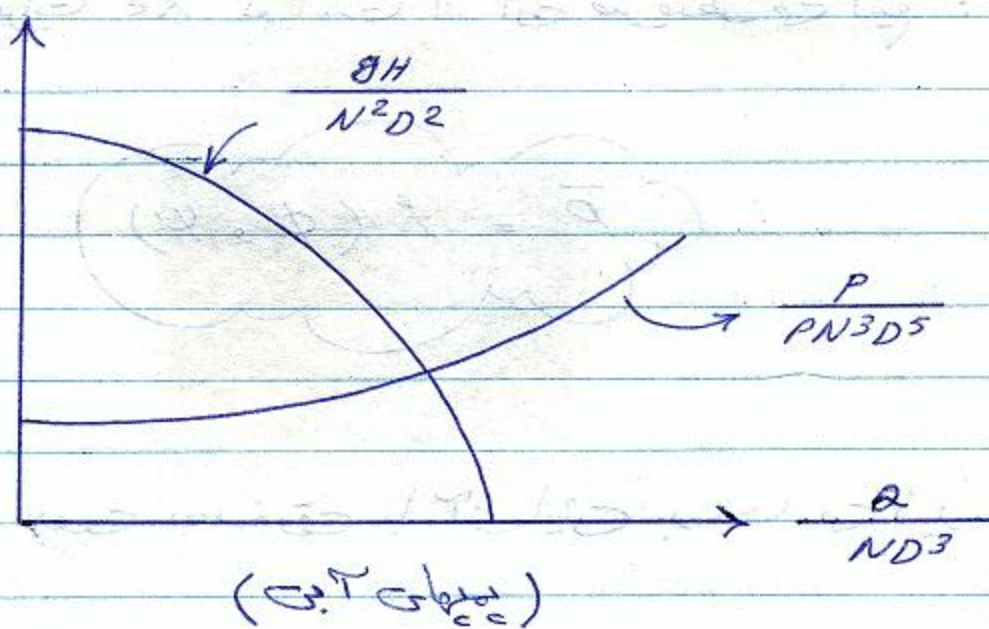
$$\bar{P} = f(\phi, \psi)$$

* رابطه میان اعداد بدون بعد فوق با آزمایش بدست می آید.



① - اگر محدودی $\frac{P}{\rho N^3 D^5}$ باشد.

② - اگر محدودی $\frac{Q}{ND^3}$ باشد.



راندمان هیدرولیکی : در توربینهای آبی :

$$\eta_H = \frac{\text{توان خروجی توربین}}{\text{توانی که سیال داده}} = \frac{P}{\rho g H Q}$$

$$P = \bar{P} (\rho N^3 D^5) \rightarrow \eta_H = \frac{\bar{P} (\rho N^3 D^5)}{\rho g H Q}$$

$$\eta_H = \frac{\bar{P}}{\frac{Q}{ND^3} \cdot \frac{gH}{N^2 D^2}} \rightarrow \eta_H = \left(\frac{\phi \cdot \psi}{\bar{P}} \right)^{-1}$$

$$\eta_H = \frac{\phi \cdot \psi}{\bar{P}}$$

* در مورد اینها :

تشابه بین نمونه اصلی و مدل :

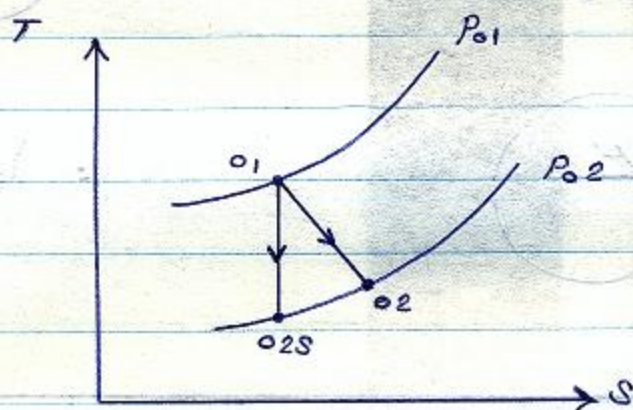
۱- تشابه هندسی : تمام اندازه‌های مدل و نمونه اصلی باید با نسبت ثابتی به هم مربوط باشند.

۲- تشابه سینماتیکی : سرعتها در نقاط متناظر مدل و اصلی باید با نسبت ثابتی به هم مربوط باشند.

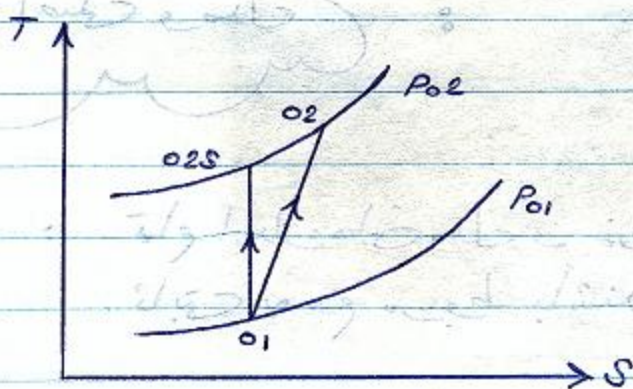
۳- تشابه دینامیکی : نیروها : " " " "

نتیجه : نشان داده می شود که برای برقراری تشابه بین مدل و اصل باید اعداد بدون بعد معرفی شده باهم مساوی باشند.

توربو ماشینهای با سیال تراکم پذیر :



(توربینها)



(کمپرسورها)

* در بررسی آنالیز ابعادی این گونه توابعی که فشار خروجی تابعی از سایر عوامل در نظر گرفته می شود :

$$P_{o2} = f(P_{o1}, T_{o1}, T_{o2}, P_{o1}, P_{o2}, D, N, \dot{m}, \mu)$$

* (در گازهای کامل) : $P = \frac{P}{RT}$

* بنابراین P_{o2} تابعی بصورت زیر می شود :

$$P_{o2} = f(P_{o1}, RT_{o1}, RT_{o2}, \dot{m}, N, D, \mu)$$

بر طبق قواعد آنالیز ابعادی :

$$P_{o2} = \text{Const} \left[(P_{o1})^a (RT_{o1})^b (RT_{o2})^c (\dot{m})^d (N)^e (D)^f (\mu)^g \right]$$

$$\left[\frac{M}{LT^2} \right] = \text{Const} \left[\left(\frac{M}{LT^2} \right)^a \left(\frac{L^2}{T^2} \right)^b \left(\frac{L^2}{T^2} \right)^c \left(\frac{M}{T} \right)^d \left(\frac{1}{T} \right)^e (L)^f \left(\frac{M}{LT} \right)^g \right]$$

$$\begin{array}{l} M \text{ توان} : \\ L \text{ توان} : \\ T \text{ توان} : \end{array} \left\{ \begin{array}{l} 1 = a + d + g \\ -1 = -a + 2b + 2c + f - g \\ -2 = -2a - 2b - 2c - d - e - g \end{array} \right.$$

اور f اور a بر حسب سایر مقادیر محاسبه می کنیم :

$$a = 1 - d - g$$

$$b = d/2 - c - e/2 + g/2$$

$$f = e - 2d - g$$

$$P_{02} = \text{Const} \left[(P_{01})^{1-d-g} (RT_{01})^{d/2-c-e/2+g/2} (RT_{02})^c \right. \\ \left. (\dot{m})^d (N)^e (D)^{e-2d-g} (\mu)^g \right]$$

$$P_{02} = \text{Const} \left[(P_{01}) \left(\frac{RT_{02}}{RT_{01}} \right)^c \left(\frac{(RT_{01})^{1/2} \dot{m}}{(P_{01}) D^2} \right)^d \right. \\ \left. \left(\frac{N \cdot D}{(RT_{01})^{1/2}} \right)^e \left(\frac{(RT_{01})^{1/2} \cdot \mu}{P_{01} \cdot D} \right)^g \right]$$

$$\left. \frac{(RT_{01})^{1/2} \cdot \mu}{P_{01} \cdot D} \times \frac{(RT_{01})^{1/2}}{(RT_{01})^{1/2}} \right\} \frac{\mu}{P_{01} \cdot D} = \frac{1}{Re}$$

$$\frac{RT_{01}}{P_{01}} = \frac{1}{P_{01}}$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = f \left[\left(\frac{RT_{02}}{RT_{01}} \right), \left(\frac{\dot{m} (RT_{01})^{1/2}}{P_{01} \cdot D} \right), \left(\frac{N \cdot D}{(RT_{01})^{1/2}} \right), Re \right]$$

* چون در ناحیه *Turbulent* هستیع اثرات Re قابل صرف نظر است و چون R و D در توربو ماشین ثابت است :

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = f \left[\left(\frac{T_{02}}{T_{01}} \right) \left(\frac{\dot{m} T_{01}^{1/2}}{P_{01}} \right) \left(\frac{N}{T_{01}^{1/2}} \right) \right]$$

راندمان نمونه اصلی و مدل :

* مثلاً برای یک توربین آبی :

$$\eta = \frac{P}{P_{GHQ}}$$

m : مدل

P : نمونه اصلی

$$\eta_m = \frac{\frac{P_m}{P_p}}{\frac{H_p}{H_m} \cdot \frac{Q_p}{Q_m}}$$

$$(\bar{P}_m = \bar{P}_p, \phi_m = \phi_p, \psi_m = \psi_p) \longrightarrow$$

$$\frac{P_m}{N_m^3 D_m^5} = \frac{P_p}{N_p^3 D_p^5} \quad (1) \quad \text{و} \quad \frac{Q_m}{N_m^2 D_m^2} = \frac{Q_p}{N_p^2 D_p^2} \quad (2)$$

$$\frac{H_m}{N_m D_m^3} = \frac{H_p}{N_p D_p^3} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} & \rightarrow \frac{P_m}{P_p} = \frac{N_m^3 D_m^5}{N_p^3 D_p^5} \\
 \textcircled{2} & \rightarrow \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{N_p^2 D_p^2}{N_m^2 N_p^2} \\
 \textcircled{3} & \rightarrow \frac{H_p}{H_m} = \frac{N_p D_p^3}{N_m D_m^3}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} \textcircled{1} & \rightarrow \frac{P_m}{P_p} = \frac{N_m^3 D_m^5}{N_p^3 D_p^5} \\ \textcircled{2} & \rightarrow \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{N_p^2 D_p^2}{N_m^2 N_p^2} \\ \textcircled{3} & \rightarrow \frac{H_p}{H_m} = \frac{N_p D_p^3}{N_m D_m^3} \end{aligned}} \right\} \rightarrow$$

$$\frac{\eta_m}{\eta_p} = \frac{N_m^3 D_m^5 (N_p^2 D_p^2) (N_p D_p^3)}{N_p^3 D_p^5 (N_m^2 D_m^2) (N_m D_m^3)} \rightarrow$$

$$\frac{\eta_m}{\eta_p} = 1$$

* اما در عمل کاملاً راندمان نمونه و اصل باهم برابر نمی باشد.

سرعت مخصوص :

سرعت مخصوص در نقطه‌ای تعریف می‌شود که راندمان η_{max} است (یعنی در نقطه طراحی).

* در مورد پمپ‌ها : ϕ_D و ψ_D

$$\phi_D = \frac{Q}{ND^3}$$

$$\psi_D = \frac{gH}{N^2 D^2}$$

از رابطه ψ و ϕ یافته
و از رابطه ϕ هم می یابیم
و مساوی قرار می دهیم تا
D حذف شود.

$$\frac{Q^{1/3}}{N^{1/3} \phi_D^{1/3}} = \frac{gH^{1/2}}{N \psi_D^{1/2}}$$

$$\frac{\phi_D^{1/3}}{\psi_D^{1/2}} = \frac{N Q^{1/3}}{N^{1/3} (gH)^{1/2}}$$

$$N_S = \frac{N^{2/3} \cdot Q^{1/3}}{(gH)^{1/2}}$$

سرعت مخصوص
بدون بعد

برای انتخاب یک پمپ و اینکه در یک هردو دبی خاص پمپ
محوری انتخاب کنیم یا شعاعی باید N را حساب کرد. پمپهای
محوری هر کم و دبی زیاد دارند پس N آنها بزرگ است و -
پمپهای شعاعی هر بالا و دبی کم دارند پس N آنها کوچک است.
البته پمپهای مختلط هم وجود دارد.

$$\bar{P}_D = \frac{P}{PN^3 D^5}$$

$$\psi_D = \frac{gH}{N^2 D^2}$$

* در مورد توربینهای آبی :

از دو رابط (D) را حذف می‌کنیم :

$$N_s = \frac{N (gH)^{5/2} \rho^{1/2}}{}$$

$$N_s = \frac{N P^{1/2}}{\rho^{1/2} (gH)^{5/4}} = \left(\frac{\bar{P}_D^{1/2}}{\psi_D^{5/4}} \right)$$

* شکل 1-10 کتاب عمودهای N را نشان داده است.

قوانین حاکم :

۱- اصل پیوستگی : $\dot{m} = \rho_1 C_1 A_1 = \rho_2 C_2 A_2$

(C - سرعت عمود بر مقطع جریان)

۲- اصل اول ترمودینامیک :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \left(\frac{C_2^2}{2} - \frac{C_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) \right]$$

۳- اصل بقای مقدار حرکت : $\sum \vec{F}_x = \dot{m} (C_{x2} - C_{x1})$

۴- اصل بقای مقدار حرکت زاویه‌ای : $\sum T = \dot{m} (r_2 C_{\theta 2} - r_1 C_{\theta 1})$

$$\left. \begin{array}{l} \omega = 2\pi N \\ v = r \cdot \omega \end{array} \right\} \rightarrow \sum T\omega = \dot{m} (U_2 C_{\theta 2} - U_1 C_{\theta 1})$$

→ $\dot{W} = \dot{m} (U_2 C_{\theta 2} - U_1 C_{\theta 1})$ توان
 در مورد پمپها همواره $\dot{W} > 0$ است

۵- قانون دوم ترمودینامیک : $ds \geq \frac{\delta Q}{T}$

$$\delta Q = T ds$$

$$\underbrace{du + \delta W}_{\delta Q} = T ds \rightarrow \delta Q = P dv \text{ چون}$$

$$T ds = du + P dv$$

$$U = H - PV$$

$$du = dh - P dv - V dp \rightarrow$$

$$T ds = dh - V dp$$

مسئله - مدل ۱ به ۸ توربین به قطر ۳.۶ m تحت هر ۱۶ m در دور ۶۰۰ RPM کار می کند. تحت این شرایط توربین توان ۲۵۰ KW و دبی آن $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$ است. اگر $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ باشد مطلوب است: سرعت مخصوص، راندمان و گشتاور نمونه اصلی.

$$* N_s = \frac{N P^{1/2}}{\rho^{1/2} (gH)^{5/4}} = \frac{\frac{600}{60} (250 \times 10^3)^{1/2}}{(1000)^{1/2} (9.8 \times 16)^{5/4}}$$

$N_s = 0.28$ (توربین پلتون با چندیت مناسب است)

$$* \eta = \frac{P}{\rho g H Q} = \frac{250 \times 10^3}{(1000)(9.8)(16)(1.75)} = 0.91$$

$$* T = \frac{P}{\omega} = \frac{250 \times 10^3}{2\pi \left(\frac{600}{60} \right)} = 3979 \text{ N-m}$$

مسئله - اگر در مسئله قبل مدل در دور ۱۴۴ RPM دارای هر ۶۰ m باشد توان و دبی مدل ۱ بیاید.

$$N_{sm} = N_{sp} = 0.28 = \frac{144/60 P^{1/2}}{(1000)^{1/2} (9.8 \times 60)^{5/4}}$$

$P_m = 114113 \text{ W} = 114.113 \text{ KW}$

$$\eta_m = \eta_p = 0.91 = \frac{P_m}{\rho g Q_m H_m} = \frac{114113}{(1000)(9.8) Q_m (60)}$$

$$Q_m = 0.213 \text{ m}^3/\text{s}$$

مسئله - مطلوبست هیدروپمپ فروبی مدل اب 4 پمپ شعاعی که دبی 600 lit/s را با هر 30m در دور 240 rpm تحویل می دهد. سرعت مدل 1200 rpm است.

$$\frac{H_m}{N_m^2 \cdot D_m^2} = \frac{H_p}{N_p^2 \cdot D_p^2}$$

$$\frac{H_m}{(1200)^2 (D_p/4)^2} = \frac{30}{(240)^2 D_p^2}$$

$$H_m = 46.9 \text{ m}$$

$$\frac{Q_m}{N_m D_m^3} = \frac{Q_p}{N_p D_p^3}$$

$$Q_m = Q_p = \left[(N_m/N_p) (D_m/D_p)^3 \right] = 600 \left[\left(\frac{1200}{240} \right) \left(\frac{1}{4} \right)^3 \right]$$

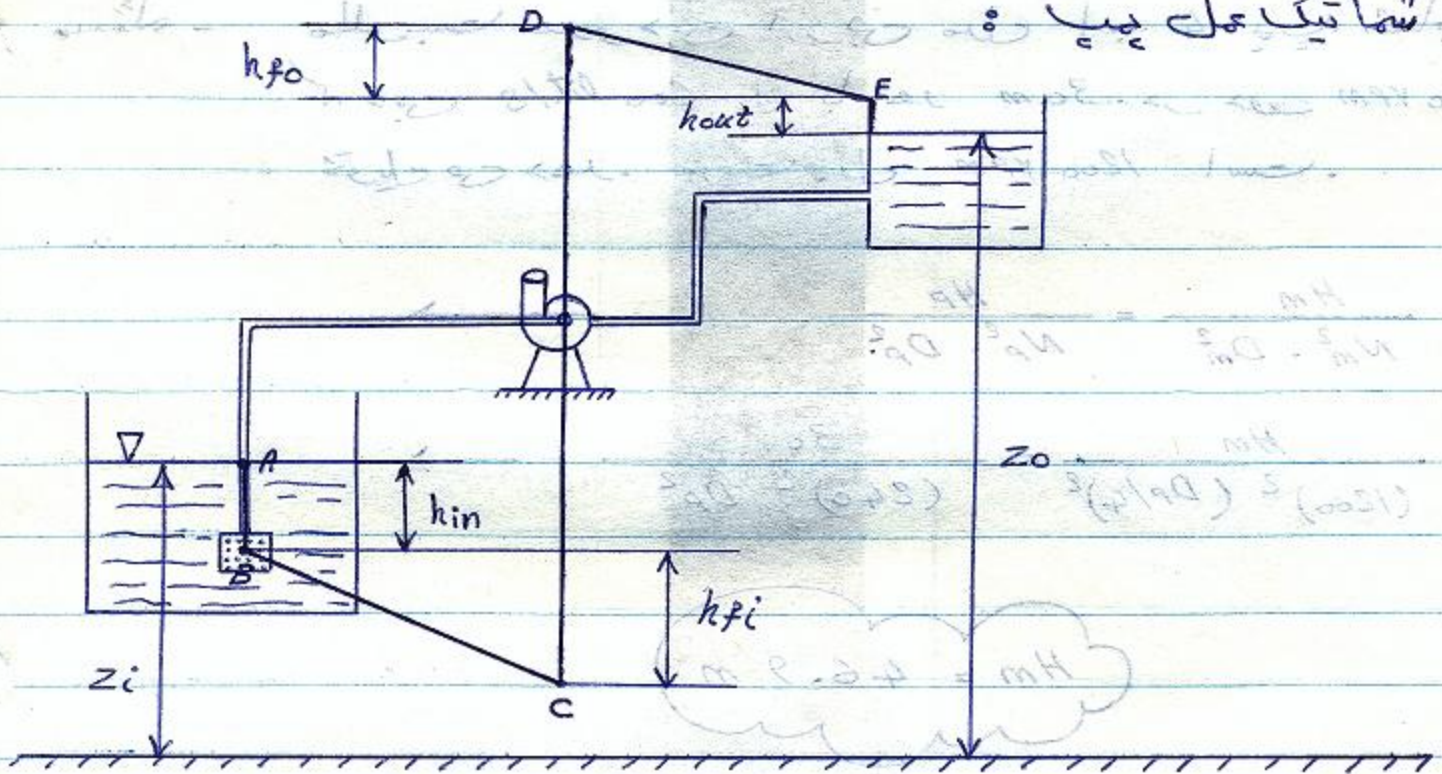
$$Q_m = 46.9 \text{ lit/s}$$

درون پمپ رابرتس می کنیم :

پمپ ها :

- ۱- پمپ های گریزان مرکز
- ۲- پمپ های محوری

شما تیک عمل پمپ :



$$\text{هد ورودی پمپ} = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} + z_i$$

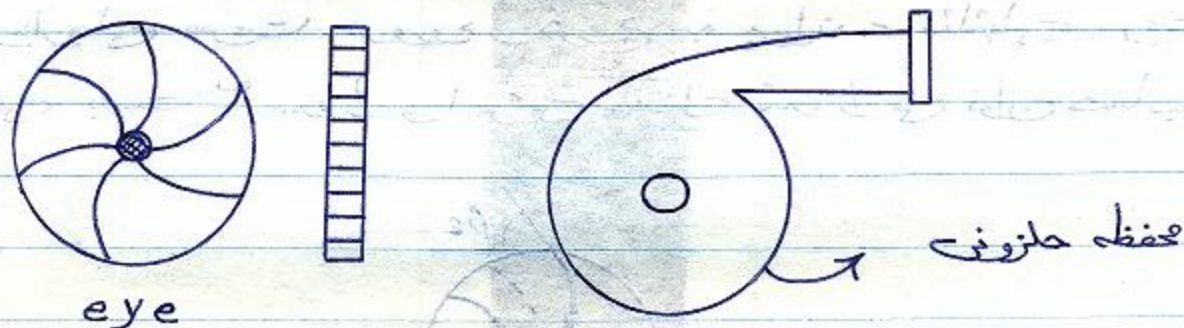
$$\text{هد خروجی پمپ} = \frac{P_o}{\gamma} + \frac{V_o^2}{2g} + z_o$$

$$H = \left(\frac{P_o - P_i}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_o^2 - V_i^2}{2g} \right) + (z_o - z_i)$$

$$\text{هد پمپ} = H_s + \sum h_{\text{losses}}$$

اجزای پمپ سانتریفیوژ :

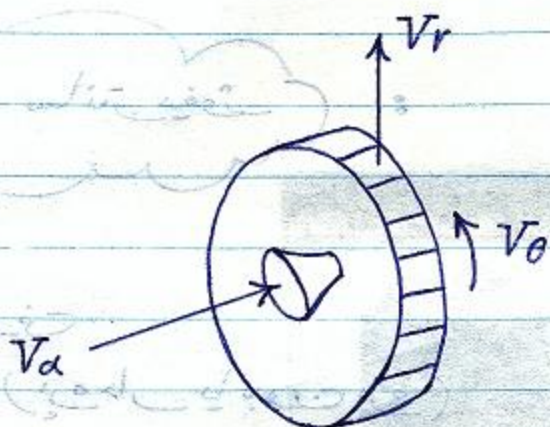
- ۱- پروانه
- ۲- محفظه حلزونی
- ۳- دیفیوزر (پره دار یا بدون پره)



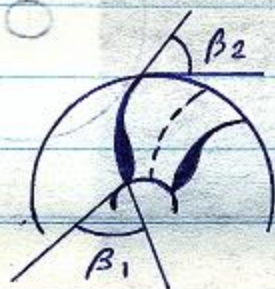
مفروضات :

- ۱- تعداد پره ها بینهایت زیاد است یعنی مؤلفه مماسی سرعت صفر است. (۰)
- ۲- از طرف دیگر ضخامت پره ها ناچیز است و امکان افزایش فشار وجود دارد.
- ۳- از مؤلفه سرعت در جهت عمود پروانه Z (تغییرات مؤلفه سرعت) صرف نظر می کنیم $\frac{\partial V}{\partial Z} = 0$
- ۴- قوانین مورد نظر بین مقطع ورودی به پمپ و مقطع خروجی آن نوشته می شود

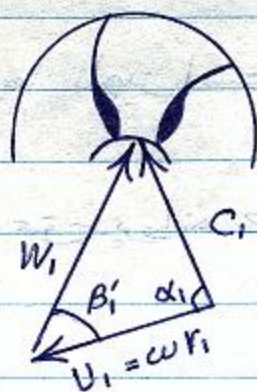
۵- جریان سیال بلافاصله پس از ورود به پمپ به جهت شعاعی تغییر می یابد.



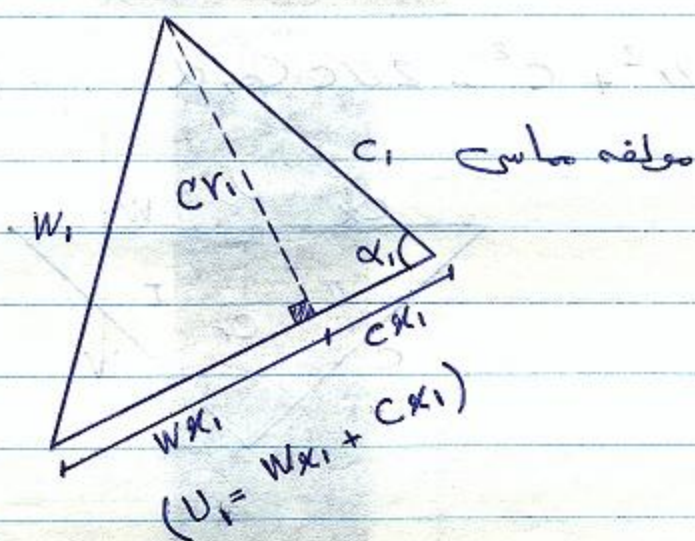
* با رسم بردارهای سرعت ورود و خروج به پروانه، مثلثهای سرعت ورودی و خروجی بدست ۲ مدرک و انرژی منتقل شده را می توان حساب کرد.



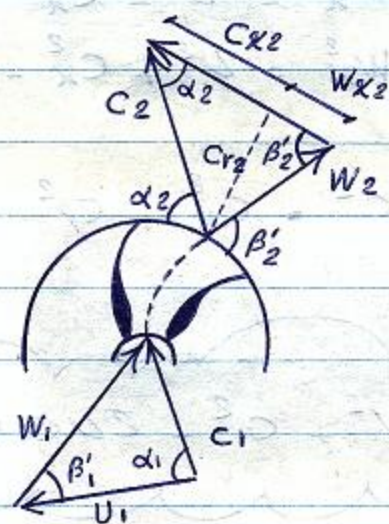
* زاویه میان امتداد پرو و امتداد ماس بر دایره محیطی پرو در آن مقطع را (زاویه پرو) گویند.



- W - سرعت نسبی سیال
- C - سرعت مطلق سیال
- U - سرعت مماس (محیطی) سیال و سرعت خطی پروانه
- C_r - سرعت زاویه‌ای پروانه



(مؤلفه مماسی سرعتها) : $Cr_1 = W r_1$



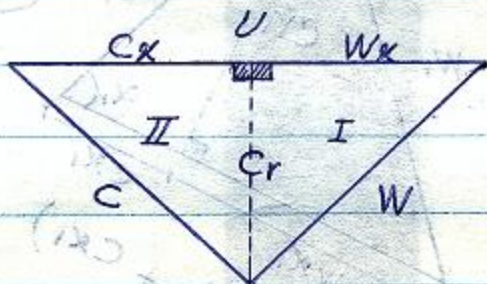
($Cr_2 = W r_2$)

(معمولاً سعی می‌شود) : $\alpha_1 = 90^\circ \rightarrow \begin{cases} Cx_1 = 0 \\ C_1 = Cr_1 \end{cases}$

لا واحد فزیت (رابطه اولی) :

$$* E = \frac{W}{mg} = \frac{U_2 C_{x2} - U_1 C_{x1}}{g} \quad (1)$$

$$* W^2 = U^2 + C^2 - 2UC \cos \alpha \quad : \text{می توان نشان داد}$$



$$(I) \rightarrow \text{مثلث} : W^2 = W_x^2 + C_r^2$$

$$\rightarrow \text{مثلث اصلی} : W_x = U - C_x$$

$$W_x^2 = U^2 + C_x^2 - 2UC_x$$

$$(II) \rightarrow \text{مثلث} : C^2 = C_x^2 + C_r^2$$

$$W^2 = U^2 + C^2 - 2UC \cos \alpha \rightarrow$$

$$\begin{cases} U_2 C_{x2} = \frac{1}{2} (U_2^2 + C_2^2 - W_2^2) \\ U_1 C_{x1} = \frac{1}{2} (U_1^2 + C_1^2 - W_1^2) \end{cases} \quad (2)$$

$$\textcircled{1}, \textcircled{2} \rightarrow E = \underbrace{\left(\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} \right)}_{(I)} + \underbrace{\left(\frac{C_2^2 - C_1^2}{2g} \right)}_{(II)} + \underbrace{\left(\frac{W_1^2 - W_2^2}{2g} \right)}_{(III)}$$

I - انرژی مصرف شده برای تنظیم حرکت سیال

II - تغییرات انرژی جنبشی سیال

III - انرژی مربوط به حد استاتیکی سیال

$$\dot{Q} = V \cdot A$$

(دبی حجمی)

سرعت دبی دهنده : C_r

$A = 2\pi r b$ (از ضخامت پره‌ها صرف نظر شده)

$$\dot{Q} = 2\pi r_1 b_1 C_{r1} = 2\pi r_2 b_2 C_{r2}$$



(عرض پره) b

$$\left(\frac{2W_1 - W_2}{B_1} \right) + \left(\frac{P - Q}{B_1} \right) + \left(\frac{U_1 - U_2}{B_1} \right) = 0$$

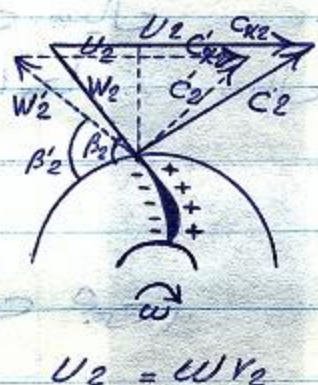
(III)

(IV)

(I)

$\beta_1 = \beta'_1$ (جریان بدون ضربه)

$\beta_2 = \beta'_2$ (جریان بدون لغزش)



پدیده لغزش
 $\beta_2 \neq \beta'_2$

* از رابطه $E = \frac{U_2 C_{x2} - U_1 C_{x1}}{g}$ مشخص است که در صورت لغزش کم شده و مقدار E کاهش می یابد.

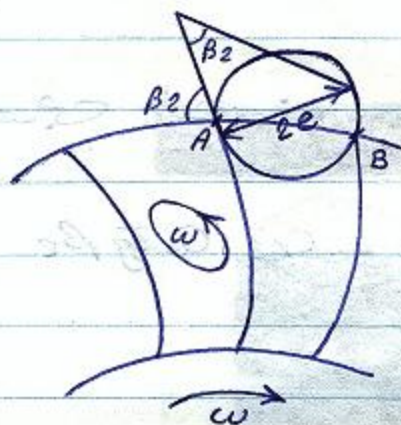
ضریب لغزش Slip Factor

$$\sigma_s = \frac{C'_{x2}}{C_{x2}}$$

$$E = \frac{\sigma_s C_{x2} U_2 - C_{x1} U_1}{g}$$

$$(\sigma_s C_{x2} = C'_{x2}) \uparrow$$

* بر اساس تئوری (استودالا) ؟ می باغرض یک جریان غیرمضی وجود یک «ادی نسبی» در مسیر جریان سیال به خاطر دوران پروانه لازم است.



$$\Delta C_x = C_{x2} - C'_{x2}$$

$$\Delta C_x \text{ مقدار مفروض} = \omega \cdot e$$

$$\text{Arc}(AB) = \frac{2Rv_2}{Z} \quad * \text{ تعداد پره ها} : Z$$

$$* \text{ از طرف دیگر طول کمان تقریباً} : \frac{2e}{\sin \beta_2} = \text{وتر مثلث}$$

* از تساوی تقریب دو مقدار فوق :

$$\frac{2Rv_2}{Z} = \frac{2e}{\sin \beta_2} \rightarrow e = \frac{Rv_2 \sin \beta_2}{Z}$$

$$* \text{ از طرف دیگر داریم} : \omega = \frac{v_2}{r_2}$$

$$\rightarrow \Delta C_x = \omega \cdot e = \left(\frac{v_2}{r_2} \right) \left(\frac{Rv_2 \sin \beta_2}{Z} \right)$$

$$\rightarrow \Delta C_x = Rv_2 \sin \beta_2 / Z \quad (\text{الف})$$

$$\sigma_s = \frac{C'_{x2}}{C_{x2}} = \frac{C_{x2} - \Delta C_x}{C_{x2}}$$

$$\sigma_s = 1 - \frac{\Delta C_x}{C_{x2}} \quad (\text{ب})$$

* از مثلث سرعتی خروجی داریم :

$$C_{x2} = U_2 - W_{x2} = U_2 - C_{r2} \cot \beta_2 \quad (\text{ج})$$

* با قرار دادن (ب) و (ج) در (الف) :

$$\sigma_s = 1 - \frac{R U_2 \sin \beta_2}{z (U_2 - C_{r2} \cot \beta_2)}$$

$$\sigma_s = 1 - \frac{R \sin \beta_2}{z \left(1 - \frac{C_{r2}}{U_2} \cot \beta_2\right)}$$

* در مورد تیغه‌های کاملاً شعاعی ($\beta_2 = 90^\circ$) (در مورد کمپرسور شعاعی)

$$\sigma_s = 1 - \frac{R}{z}$$

رابطه Buseman :

$$\delta_s = \left[A - B \left(\frac{C r_2}{U_2} \right) \cot \beta_2 \right] / \left[1 - \left(\frac{C r_2}{U_2} \right) \cot \beta_2 \right]$$

* A, B تابعی از z و $\frac{r_2}{r_1}$ و β_2 هستند.

$$80^\circ < \beta_2 < 30^\circ$$

رابطه Stanitz :

$$\delta_s = 1 - (0.63 R / \left\{ z \left[1 - \left(\frac{C r_2}{U_2} \right) \cot \beta_2 \right] \right\})$$

$$90^\circ > \beta_2 > 80^\circ$$

تلفات در پمپهای گرینز از مرکز

* انواع تلفات عبارتند از : (PM, PM, PM, PM)

- ۱ - تلفات مکانیکی P_m
- ۲ - تلفات پروانه (جراش در لایه مزی و اصطکاک سیال با پروانه) P_i
- ۳ - تلفات نشتی (به علت اختلاف فشار طرفین پروانه) P_L
- ۴ - تلفات حفظه انرژی (اصطکاک) P_c

$$P_i = \rho g k_i Q_i \quad (\text{تلفات پروانه})$$

↓
تلفات هدر پروانه

$$Q = Q_i - \varphi$$

↓
دبی نشت شده

↓
دبی داخل پروانه

↓
دبی بعد از پروانه

$$P_L = \rho g H_i \varphi \quad (\text{تلفات نشتی})$$

↓
هدر هوجی پروانه

$$P_c = \rho g k_c Q \quad (\text{تلفات حفظه})$$

↓
افت هدر حفظه

$$P = P_m + \rho g (k_i Q_i + H_i \varphi + k_c Q + H Q) \quad (\text{توان پمپ})$$

↓
هدر پمپ

↓
دبی پمپ

اندازه‌های پمپ :

۱ - رانندگی کل : (overall)

$$\eta_o = \frac{\text{توان داده شده به سیال}}{\text{توان داده شده به پمپ}}$$

$$\eta_o = \frac{P_g H Q}{P_s}$$

۲ - رانندگی محفظه :

$$\eta_c = \frac{\text{توان سیال در خروجی از محفظه}}{\text{توان سیال در ورودی به محفظه}}$$

$$\eta_c = \frac{P_g H Q}{P_g H_i Q}$$

$$\eta_c = \frac{H}{H_i}$$

۳ - رانندگی پروانه :

$$\eta_i = \frac{\text{توان سیال در خروجی از پروانه}}{\text{توان سیال در ورودی به پروانه}}$$

$$\eta_i = \frac{\rho g H_i Q_i}{\rho g (H_i + h_i) Q_i}$$

$$\eta_i = \frac{H_i}{H_i + h_i}$$

۴ - راندمان جیب :

$$\eta_v = \frac{\text{دیت سیال در خروج پمپ}}{\text{دیت سیال در پروانه}}$$

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + \varphi}$$

۵ - راندمان مکانیکی :

$$\eta_m = \frac{\text{توان داده شده به سیال در پروانه}}{\text{توان داده شده به پمپ}}$$

$$\eta_m = \frac{\rho g (H_i + h_i) Q_i}{P_s}$$

$$\eta_o = \eta_c \cdot \eta_i \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

۶- راندمان هیدرولیکی :

$$\eta_H = \frac{\text{هد خروجی پمپ}}{\text{هد سیال در داخل پروانه}}$$

$$\eta_H = \frac{H}{H_i + h_i}$$

مانع مشخصه پمپ :

$$E = \frac{C_{x2} U_2 - C_{x1} U_1}{g} = \frac{U_2 C_{x2}}{g} \quad (1)$$

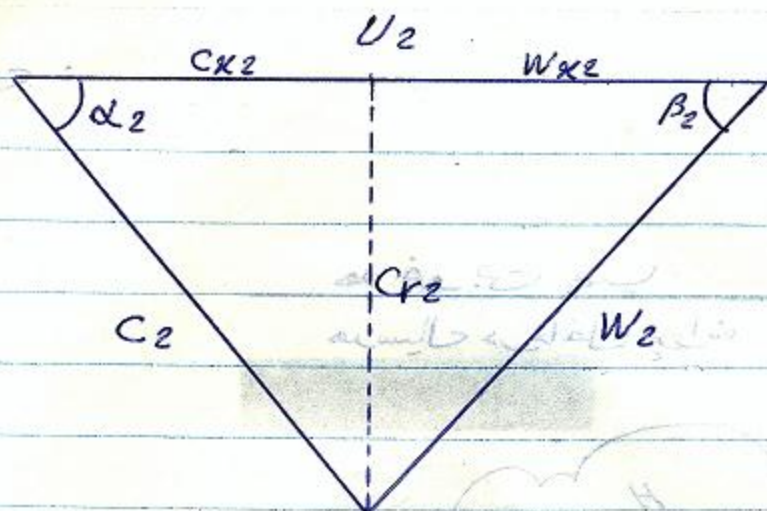
(انرژی معادل هد)

* با در نظر گرفتن لغزش :

$$E_N = \frac{\sigma_s U_2 C_{x2}}{g}$$

$$\sigma_s = \frac{C'_{x2}}{C_{x2}}$$

* اگر حالت ایده آل را فرض کنیم :



$$C_{x2} = U_2 - W_{x2} \quad , \quad \cot \beta_2 = \frac{W_{x2}}{C_{r2}}$$

$$C_{x2} = U_2 - C_{r2} \cot \beta_2$$

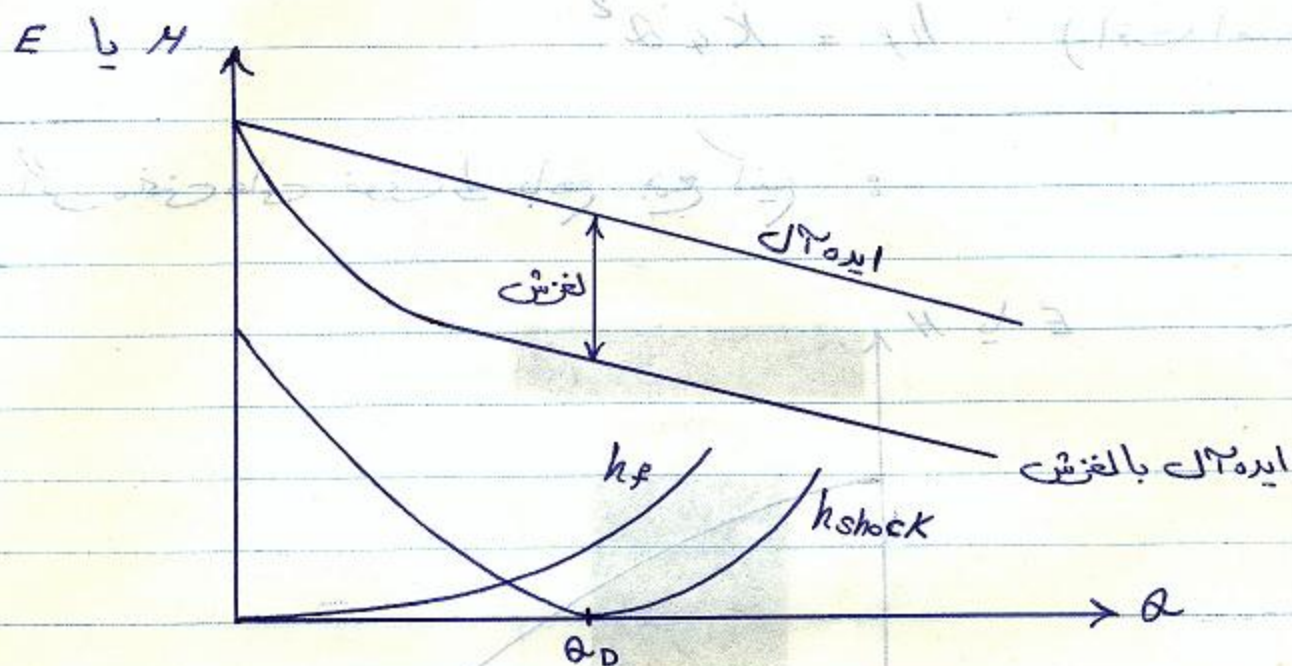
$$Q = A_2 \cdot C_{r2} \rightarrow C_{r2} = \frac{Q}{A_2} \rightarrow$$

$$C_{x2} = U_2 - \left(\frac{Q}{A_2} \right) \cot \beta_2 \quad (V)$$

$$(I), (V) \rightarrow E = U_2 \left(U_2 - \left(\frac{Q}{A_2} \right) \cot \beta_2 \right) / g$$

* در رابطه فوق هم پارامترها به جز Q ثابت است :

$$E = K_1 - K_2 Q$$



* در حالت بالغشت :

$$\begin{cases} E_N = E \zeta_s \\ \zeta_s = 1 - (0.63K / [z (1 - (\frac{C_{f2}}{U_2}) \cos \beta_2)]) \end{cases}$$

* در حالت واقعی افتائی هم داریم :

$$K \frac{V^2}{2g} \rightarrow Q^2 \sim (\text{افت موضعی})$$

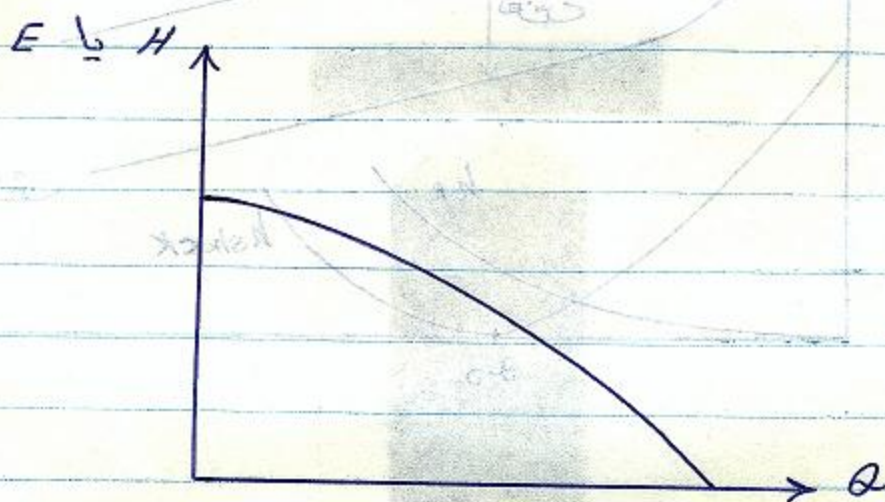
$$h_{shock} = K_3 (Q - Q_D)^2 \quad (\text{افت ضربه})$$

↓
دین نقطه طرای

↓
نشان می دهد که در نقطه طرای افت ضربه صفر است.

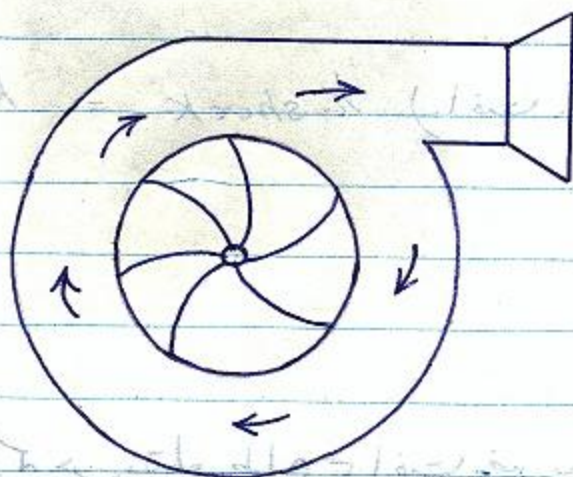
(افت اصطلاحی) $h_f = K_4 Q^2$

* پس اگر منحنی های فوق را با هم جمع کنیم :



جریان در داخل محفظه حلزونی :

- ۱- جمع انرژی سیال
- ۲- افزایش فشار استاتیک سیال



* به ازای سرعت متوسط ثابت در اطراف پروانه برآیند نیروهای شعاعی وارد بر محور پروانه صفر است و در غیر این صورت :

$$P = 495 K H D_2 B_2 \quad (\text{نیروی شعاعی})$$

↓
عرض پروانه

↓
قطر محیط هدپ

↓
ضریب

↓
هدپ

$$K = 0.36 \left[1 - \left(\frac{b}{b_0} \right)^2 \right]$$

دیفیوزر بدون پره :



- b - عرض
- c_r - بستگی به سطح مقطع شعاعی دارد
- c_x - با افزایش شعاع کم می شود

$$\dot{m} = P \underbrace{(2Rr_b)}_A c_r$$

* بین خروج از پروانه (با اندیس 2) و هر مقطع در داخل مسیر دیفیوزر (بدون اندیس) اصل پیوستگی عبارتست از :

$$P r_b c_r = P_2 r_2 b_2 c_{r2} \quad (P_1 \approx P_2)$$

$$r_1 c_{\theta_1} = r_2 c_{\theta_2} \quad \leftarrow \quad \theta_1 \approx \theta_2 \quad \text{معمولاً}$$

* انبساط بقای مقدار حرکت زاویه‌ای در مسیر دیفیوزر :

$$r_2 c_{\theta_2} = r c_{\theta}$$

$$\sum \vec{\pi} = \dot{m} (r_2 c_{\theta_2} - r_1 c_{\theta_1}) = 0 \quad \rightarrow$$

$$c_{\theta} = \frac{r_2 c_{\theta_2}}{r}$$

$$c_{\theta} \approx c$$

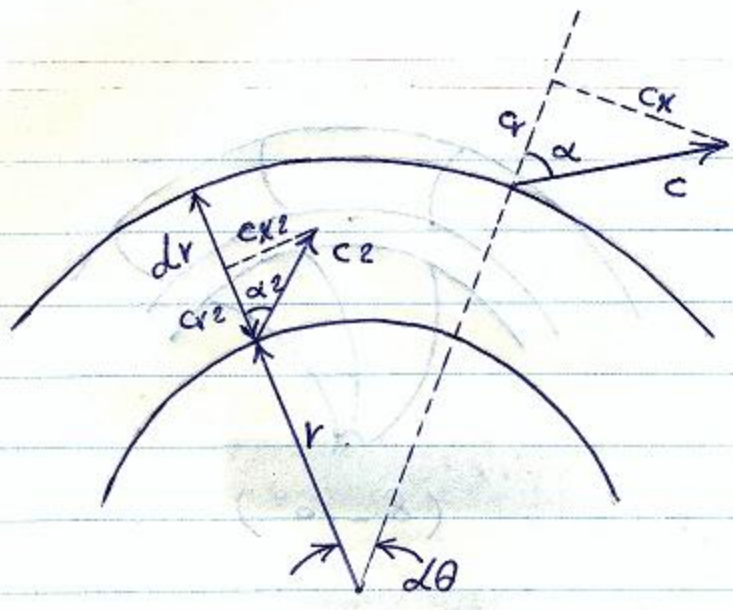
$$\leftarrow \quad c \ll c_{\theta} \quad \text{معمولاً}$$

$$c \approx \frac{r_2 c_{\theta_2}}{r}$$

نتیجه : برای کاهش c (افزایش عدد) باید شعاع مسیر دیفیوزر (r) تا حد امکان بزرگ شود که البته محدودیت ساخت دارد.

* میزان اختلاط سیال در حین عبور از دیفیوزر هواره دارای زاویه ثابتی است (نسبت به شعاع پیک) که زاویه α است :

$$(\alpha = cte)$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \alpha_2 = \frac{c_{x2}}{c_{r2}} \\ \tan \alpha = \frac{c_x}{c_r} \end{array} \right. \rightarrow \alpha_2 = \alpha$$
$$\frac{v_{cr}}{v_{cx}} = \frac{r_2/c_{r2}}{r_2/c_{x2}} \quad : \quad \text{چون}$$

* در شعاع r در داخل دیفرانسیل زاویه $d\theta$:

$$\tan \alpha = \frac{r d\theta}{dr} \rightarrow d\theta = \frac{dr}{r} \tan \alpha = \frac{dr}{r} \tan \alpha_2$$

* با انگرالگیری بین ورودی دیفرانسیل و خروجی از آن :

$$\theta - \theta_2 = \tan \alpha_2 \ln \frac{r}{r_2}$$

↓ ↓ ↓
 180° 78° 2



چند نکته در دیفیوزرهای بایره :

- ۱- هرچه تعداد پره‌ها بیشتر باشد حمل دیفیوزر بهتر صورت می‌گیرد و تلفات اصطکاکی هم بیشتر می‌شود.
- ۲- بهترین سطح جریان بصورت مقطع مربعی است.
- ۳- تعداد پره‌های دیفیوزر و پروانه نباید با ضریب ثابتی بهم مربوط باشند و گرنه پدیده زونا نشی ایجاد شده و پمپ می‌لرزد.

گلویتاسیون :

هرگاه در مورد سیال دارای جریان در نقطه‌ای فشار با اندازه فشار تبخیر سیال در آن دما برسد دامن تبخیر موضعی سیال حبابها را در داخل مایع ایجاد می‌شود. در اثر حرکت سیال به نقاط فشار بالاتر

این جابها با فشار بسیار زیادی ترکیده و بر روی سطح فلز ایجاد خوردگی می کنند که این پدیده را کاویتاسیون گویند.

عدد کاویتاسیون (Cavitation Index) :

عدد سیال بالاتر از هر فشار تبخیر
عدد پمپ

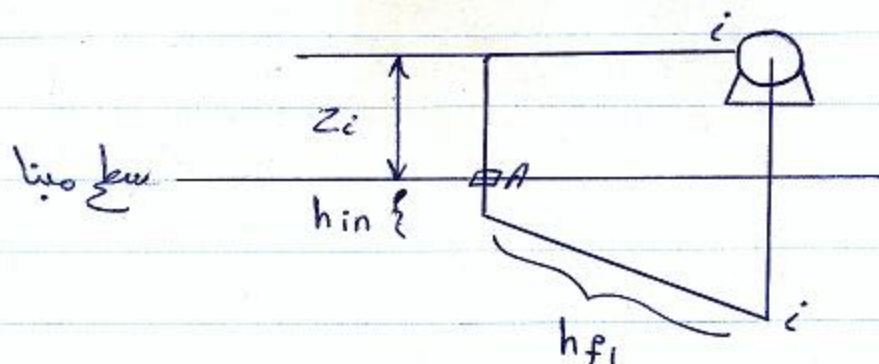
$$K = \frac{\left(\frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} - \frac{P_{vap.}}{\rho g} \right)}{H}$$

ارتفاع
مبنا $Z_i = 0$

* صورت کسر $NPSH$ (عدد مثبت خالص مکش) گویند .

« Net Positive Suction Head »

* بین مقطع ورود به لوله (A) و ورود به پمپ (i) می توان نوشت :



$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} + Z_i + \underbrace{(h_{f_i} + h_{in})}_{H \text{ suction}}$$

* با تعریف H_{suction} (مد لازم پمپ برای رساندن مایع به سطح مکش) :

$$H_{\text{suction}} = Z_i + h_{f_i} + h_{in}$$

$$\rightarrow \frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} = \frac{P_A}{\rho g} - H_{\text{suction}}$$

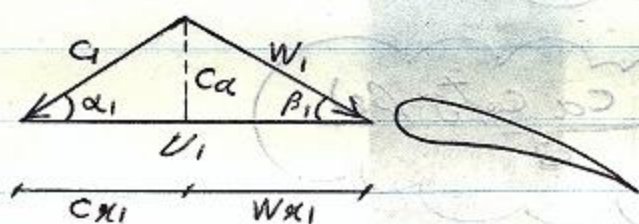
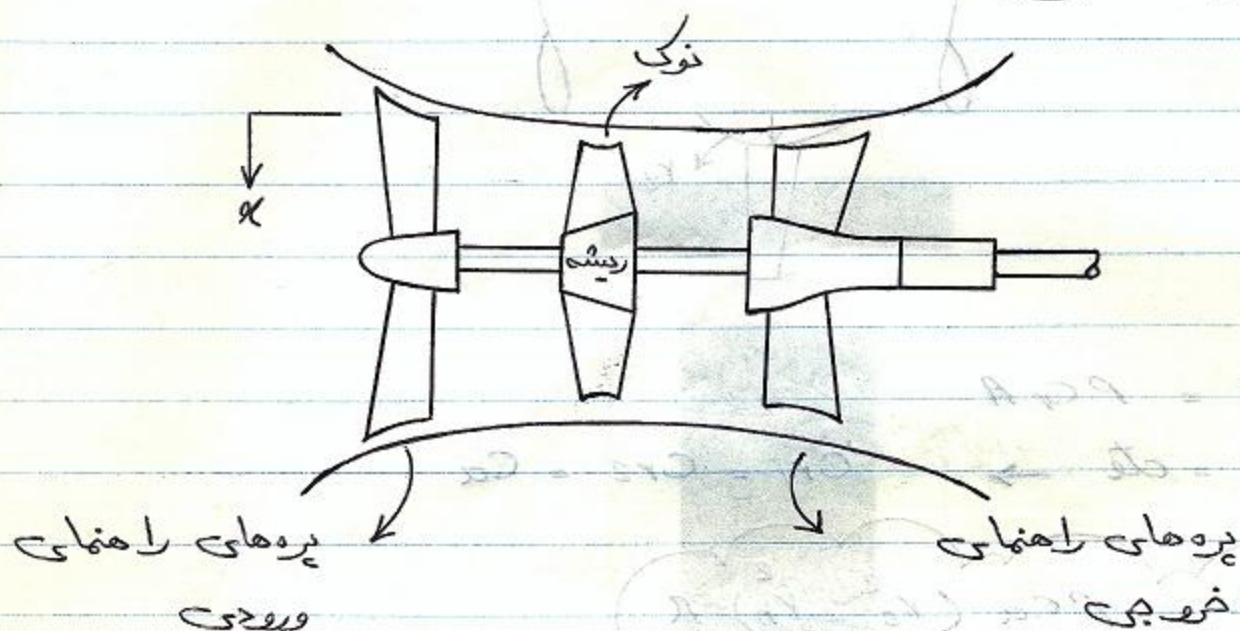
$$S = \frac{\left(\frac{P_A}{\rho g} - H_{\text{suction}} - \frac{P_{\text{vap}}}{\rho g} \right)}{H}$$

* پس اگر عدد کلاویتا سیون از مقدار بحرانی کمتر شد می توان -
 حتی پمپ را زیر سطح مبنا (یعنی زیر زمین) قرار داد. (چون
 فشار بخار آن نمی تواند تغییر داد).

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تأسیسات مکانیکی
 طراحی - نظارت - اجرا
 نظام مهندسی: ۱۵۴۰۰-۱۷۲۷۶
 پروانه مهندسی: ۱۵۴۰۰-۰۲۸۱۵
 شماره شهرسازی: ۱۵۴-۰۱۲۲۲

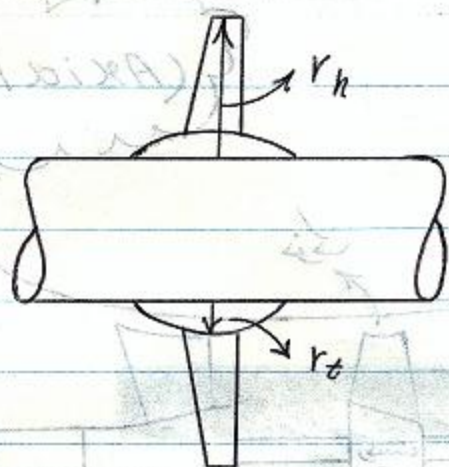
جزوه آموزشی درس توربو ماشین **آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز**
 دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران - دانشکده فنی (۱۳۷۳)

پره‌های محوری (Axial)



* تعداد تیغه‌ها 2 تا 8 عدد است.

* 0.3 تا $0.6 = \frac{\text{قطر ریشه}}{\text{قطر نوک}}$



$$\dot{m} = \rho C_r A$$

$$A = cte \rightarrow C_{r1} = C_{r2} = C_a$$

$$\dot{m} = \rho C_a (r_t^2 - r_h^2) R$$

$$E = \frac{\mu (u - c_a \cot \beta_2)}{g}$$

$$dW = \mu (u - c_a \cot \beta_2) 2\pi r dr$$

* در حالات کار بردی معمولاً از رابط قبل در شعاع متوسط $r_m = \frac{r_t + r_h}{2}$ استفاده می شود.

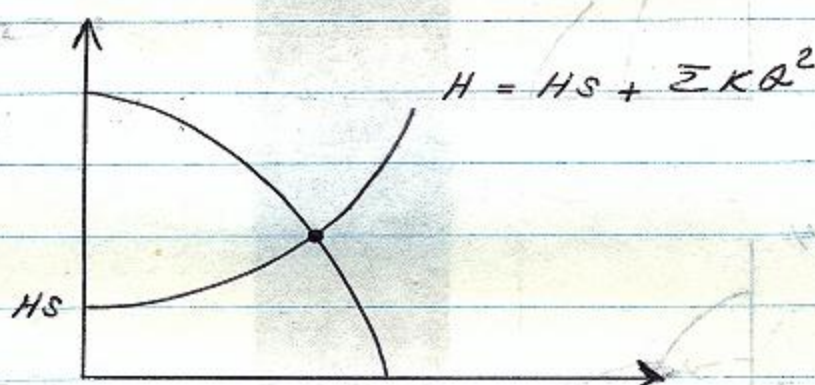
* در پمپهای محوری چون در شروع کار β_2 کوچک است پس $(\cot \beta_2)$ زیاد است. پس در شروع کار پمپهای محوری توان بالایی برای راه اندازی نیاز است (شکل 2-27). برای رفع این نقیصه زاویه پره ها را متغیر می گیرند. یعنی در نقاط مختلف پره نوایا یکسان نیست.

نقطه کار در پمپها :

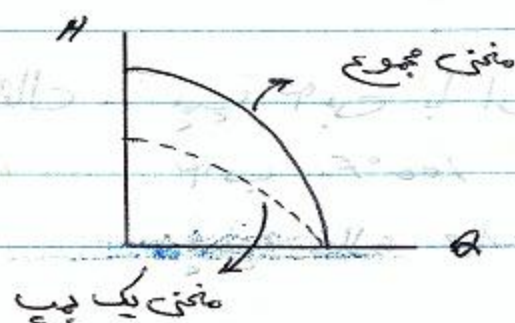
$$H_{\text{pump}} = H_s + H \quad \text{ناشی از افتها}$$

$$\sum h_f = \sum K Q^2$$

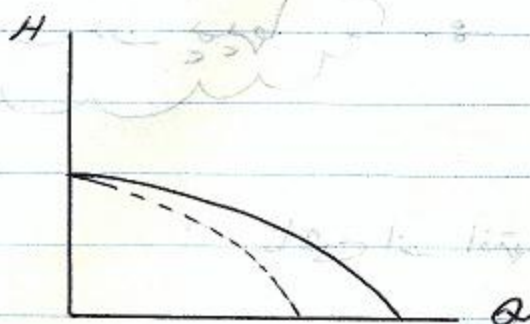
$$f \frac{L}{D} = V^2 / 2g$$



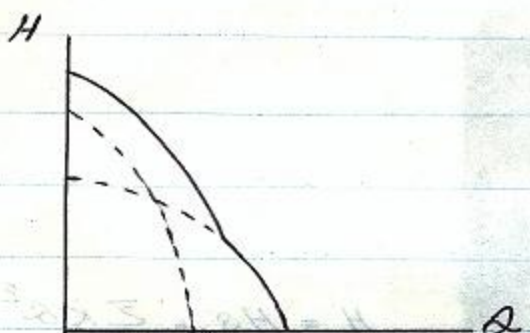
* بهترین حالت این است که نقطه کار به نقطه انزمام Max هر چه نزدیکتر باشد. همیشه شیر را در قسمت خروجی پمپ قرار می دهند تا نقطه کار ثابت باشد. قرار دادن شیر در قسمت انش (خروجی) پمپ باعث می شود که تغییرات شروع قسمت - مکش پمپ به آن اعمال نشود و همچنین $NPSH$ لازم کاهش نیابد.



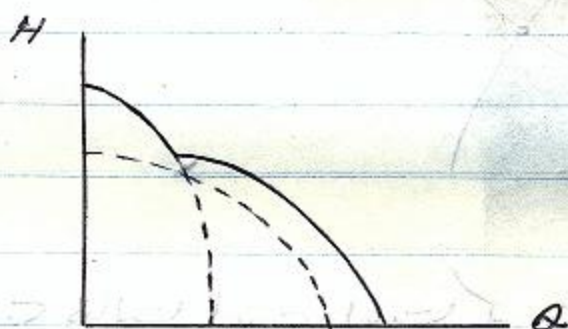
* دو پمپ سری مشابه :



* دو پمپ موازی مشابه :



* دو پمپ مختلف سری :



* دو پمپ مختلف موازی :

پمپهای موازی (دبی) را افزایش می دهند.
پمپهای سری (هد) را افزایش می دهند.

مثال - پمپ ۳ بی با ارتفاع 130 ft ب ۲ را پمپا می کند. دمای -
ب ۲ 100°F و فشار اتمسفر 14.3 psi است. در ورودی
پمپ خلا 17 in Hg و سرعت 12 fps وجود دارد. مقادیر

NPSH و عدد گاویتاسیون را تعیین کنید.

$$h_w = h_{Hg} \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_w}$$

$$NPSH = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} \quad \text{فشار تبخیر در } 100^\circ\text{F}$$

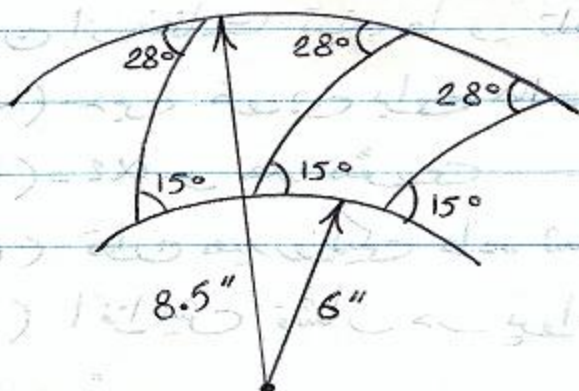
$$\frac{P_i}{\gamma_{H_2O}} = \frac{14.3 (144)}{62} - \frac{17}{12} \times \frac{847.3}{62} = 13.85 \text{ ft}$$

تبدیل به ft

$$NPSH = 13.85 + \frac{(12)^2}{2(32.2)} - \frac{135.16 \text{ ft}^2}{62} = 13.91 \text{ ft H}_2\text{O}$$

$$(K) \text{ عدد گاویتاسیون} = \frac{NPSH}{H} = \frac{13.91}{130} = 0.107$$

مسئله - شکل زیر ابعاد و زوایای پره‌های دیفیوزر یک‌پایه‌گیر از مرکز را نشان می‌دهد. عرض مسیر پره‌ها در جهت عمود بر صفحه 0.8 in است. اگر پروانه تحت شرایط ایده‌آل 2 آب را با دبی 2.8 ft³/s تخلیه کند افزایش فشار در عرض دیفیوزر را تعیین کنید.



(برنولی) $\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{cte}$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \rightarrow \Delta P = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \gamma$$

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 = V_1 2\pi r_1 b_1 = V_2 2\pi r_2 b_2 \rightarrow$$

$$* V_1 = \frac{Q}{2\pi r_1 b_1} = \frac{2.8}{2\pi \left(\frac{6}{12}\right) \left(\frac{0.8}{12}\right) \sin 15^\circ} \rightarrow$$

$$\langle V_1 = 51.65 \text{ FPS} \rangle$$

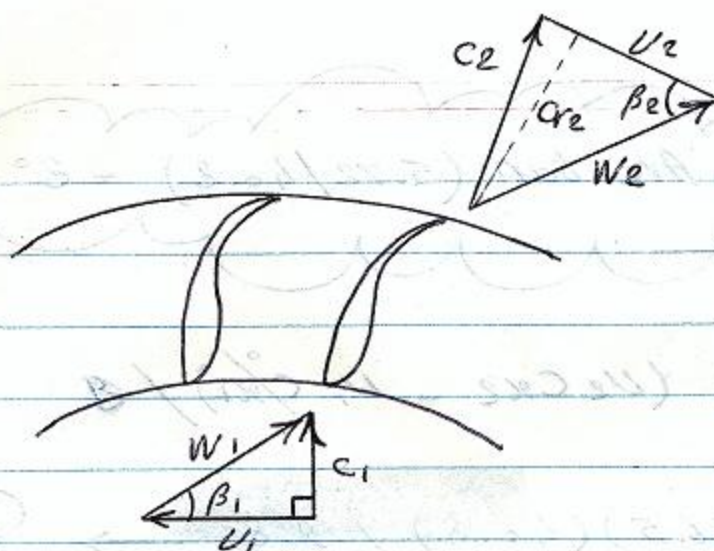
$$* V_2 = \frac{Q}{2\pi r_2 b_2} = \frac{2.8}{2\pi \left(\frac{8.5}{12}\right) \left(\frac{0.8}{12}\right) \sin 28^\circ} \rightarrow$$

$$\langle V_2 = 20.1 \text{ FPS} \rangle$$

$$\Delta P / \gamma = \frac{(51.65)^2 - (20.1)^2}{2(32.2)} \rightarrow \frac{\Delta P}{\gamma} = 35.15 \text{ ft}$$

$$\Delta P = \frac{(62)(35.15)}{144} = 15.2 \text{ PSI}$$

- مسئله - پمپ گریز از مرکز دارای پروانه‌ای به مشخصات $\beta_1 = 20^\circ$ ، $\beta_2 = 10^\circ$ و $r_1 = 10 \text{ cm}$ و $r_2 = 30 \text{ cm}$ است. عرض پروانه در ورودی 5 cm و در خروجی 2 cm است. با صرف نظر کردن از ضخامت تیغه‌ها و تلفات در دور 1800 rpm مطلوب است:
- الف) دبی خروجی برای حالت بدون ضربه به ازای $\alpha_1 = 90^\circ$
 - ب) α_2 و هد تنوری
 - ج) تپان هیدرولیکی داده شده به سیال
 - د) افزایش فشار در پروانه.



$$U_1 = \omega r_1 = 2\pi (1800/60) (0.1) = 18.8 \text{ m/s}$$

$$U_2 = \omega r_2 = 2\pi (1800/60) (0.3) = 56.5 \text{ m/s}$$

از این سرعت : $C_{r1} = C_1 = U_1 \tan \beta_1 = 18.8 \tan 20^\circ$

$$\rightarrow C_{r1} = C_1 = 6.86 \text{ m/s}$$

$$Q = 2\pi (0.1) (0.05) (6.86) = 0.216 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\tan \alpha_2 = C_{r2} / C_{x2}$$



$$C_{r2} = Q / 2\pi r_2 b_2 = 0.216 / 2\pi (0.3) (0.02)$$

$$\ll C_{r2} = 5.72 \text{ m/s} \gg$$

$$U_2 = C_{x2} + W_{x2} \rightarrow W_{x2} = (5.72) \tan 10^\circ = 1.0 \text{ m/s}$$

$$C_{x2} = U_2 - W_{x2} = 55.5 \text{ m/s} \rightarrow$$

$$\alpha_2 = \text{Arc tan} (5.72/40.8) = 8^\circ$$

$$E = H = (U_2 C_{x2} - U_1 C_{x1}) / g \rightarrow$$

$$H = (56.5)(40.8) / 9.8 \rightarrow H = 235.2 \text{ m}$$

$$P \text{ (توان)} = \gamma H Q$$

$$P = (9810) (235.2) (0.216) / 1000 \text{ KW}$$

$$P = 498.4 \text{ KW}$$

$$\frac{C_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{C_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} - H$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} = H + \frac{C_1^2 - C_2^2}{2g}$$

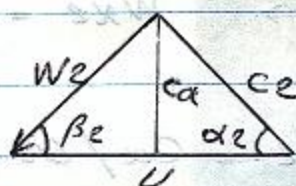
$$C_2 = \sqrt{C_{x2}^2 + C_{r2}^2} = 41.2 \text{ m/s}$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} = 151 \text{ m}$$

$$\Delta P = 1481 \text{ KPa}$$

مسئله - یک پمپ محوری در دور 1200 rpm کاری کند قطر نوک پره ها 1.1 m و قطر ریش پره ها 0.8 m است. زوایای ورودی و خروجی پره ها به ترتیب 30° و 60° و زاویه

به اینها (α_1) است. مؤلفه عمودی سرعت آب در طول Rotor ثابت است. ضمن رجع مثلث سرعت ورودی و خروجی دین همد و توان پمپ را محاسبه کنید. شرایط قطر متوسط را در نظر بگیرید و فرض کنید سیال به طور محاسی وارد شده و محاسی برآید مع خارج می شود.



$$C_a = C_{te} \quad , \quad d_m = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{1.1 + 0.8}{2} = 0.95 \text{ m}$$

$$\rightarrow R_m = d_m / 2 = 0.475 \text{ m}$$

$$U = R_m \cdot \omega = (0.475) 2\pi (1200/60) \rightarrow$$

$$U = 59.7 \text{ m/s}$$

$$\tan \alpha_1 = C_a / C_{u1} \Rightarrow C_{u1} = C_a / \tan \alpha_1 \quad (1)$$

$$\tan \beta_1 = C_a / W_{u1} \rightarrow W_{u1} = C_a \times \tan \beta_1 \quad (2)$$

$$\rightarrow C_a \left(\frac{1}{\tan 60} + \frac{1}{\tan 30} \right) = 59.7 \rightarrow$$

$$(\text{« } C_a = 25.9 \text{ m/s »})$$

$$U = C_{x1} + W_{x1} \rightarrow$$

جواب:

$$U = C_d \left(\frac{1}{\tan \alpha_1} + \frac{1}{\tan \beta_1} \right)$$

$$(1) \rightarrow C_{x1} = 25.9 / \tan 60^\circ = 14.95 \text{ m/s}$$

$$\tan \alpha_2 = C_d / C_{x2} \rightarrow \tan \alpha_2 = C_d / U - W_{x2} \quad (3)$$

$$\tan \beta_2 = C_d / W_{x2} \rightarrow W_{x2} = C_d / \tan \beta_2 \quad (4)$$

$$(3), (4) \rightarrow \tan \alpha_2 = C_d / U - \frac{C_d}{\tan \beta_2} = 25.9 / 59.7 - \frac{25.9}{\tan 60^\circ}$$

$$\alpha_2 = 30^\circ$$

$$C_{x2} = C_d \tan \alpha_2 = 25.9 \tan 30^\circ \rightarrow$$

$$C_{x2} = 44.9 \text{ m/s}$$

$$* Q = C_d \frac{\pi}{4} (d_t^2 - d_h^2) \rightarrow$$

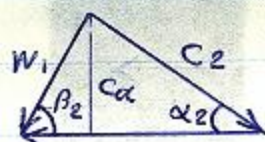
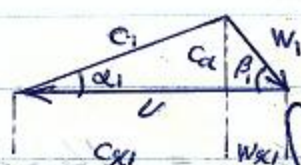
$$25.9 \left[\frac{\pi}{4} (1.1^2 - 0.8^2) \right] = 1.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$* H = U (C_{x2} - C_{x1}) / g = 59.7 (44.9 - 14.95) / 9.81$$

$$H = 181.7 \text{ m}$$

$$* P \text{ (قوة)} = \gamma H Q = (9810)(181.7)(1.6) / 10^6 = 20.67 \text{ MW}$$

مثال - یک پمپ محوری در 1200 rpm قطر نوک پروپا 1.1 m و قطر ریشه پروپا 0.8 m است. زوایای ورودی و خروجی پروپا (β_1) و 30° و 60° و زاویه پروپاها (α_1) 60° است. مؤلفه محوری سرعت آن در طول Rotor ثابت است. ضمن رسم مثلث سرعت ورودی و خروجی و درج و هدر تعادل پمپ را بیابید. شرایط قطر متوسط را در نظر گرفته و فرض کنید سیال بطور همبسی وارد پروپا شده و همبسی بر آن هم خارج می شود (یعنی β_1 و β_2 زوایای سرعت نسبی هم هستند).



$$d_m = \frac{d_t + d_h}{2} = \frac{1.1 + 0.8}{2} = 0.95 \text{ m}$$

$$\rightarrow R_m = d_m / 2 = 0.475 \text{ m}$$

$$U = R_m \cdot \omega = (0.475) \left[2\pi (1200/60) \right] \rightarrow$$

$$U = 59.7 \text{ m/s}$$

$$\tan \alpha_1 = C_d / C_{x1} \Rightarrow C_{x1} = C_d / \tan \alpha_1 \quad (1)$$

$$\tan \beta_1 = C_d / W_{x1} \Rightarrow W_{x1} = C_d / \tan \beta_1 \quad (2)$$

$$U = C_{x1} + W_{x1} \xrightarrow{(1) \text{ \& \; } (2)} C_d (1/\tan \alpha_1 + 1/\tan \beta_1) = U$$

$$\rightarrow C_d = 25.9 \text{ m/s}$$

$$(1) \rightarrow C_{x1} = 25.9 / \tan 60 = 14.95 \text{ m/s}$$

$$\tan \alpha_2 = C_d / C_{x2} \rightarrow C_d = \tan \alpha_2 (U - W_{x2}) \quad (3)$$

$$\tan \beta_2 = C_d / W_{x2} \rightarrow W_{x2} = C_d / \tan \beta_2 \quad (4)$$

$$(3) \text{ \& \; } (4) \rightarrow \tan \alpha_2 = \frac{C_d}{U - C_d / \tan \beta_2} \rightarrow$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{25.9}{59.7 - 25.9 / \tan 60} \rightarrow \alpha_2 = 30^\circ$$

$$(3) \rightarrow C_{x2} = C_d / \tan \alpha_2 \rightarrow C_{x2} = 44.9 \text{ m/s}$$

$$\dot{Q} = C_d R / 4 (d_t^2 - d_h^2) = 25.9 \left[R / 4 (1.1^2 - 0.8^2) \right]$$

$$\dot{Q} = 11.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H = \frac{VCx_2 - VCx_1}{g} = \frac{59.7(44.9 - 14.95)}{9.8} = 181.7m$$

$$P = \gamma H Q = (9810)(181.7)(11.6) / 10^6 = 20.67 MW$$



توربین‌های آبی :

(impulse)

ضربه‌ای

(reaction)

عکس‌العملی

انواع توربین‌های آبی

در (impulse) : در حین عبور سیال از پره‌های گردنده -
(تأشقه‌ها) افت فشار استاتیک نداریم.

در (reaction) : در حین عبور سیال در پیخ گردنده افت فشار
استاتیک داریم.

* ضربه‌ای : توربین پلتون (Pelton Wheel)

توربین فرانسیس

شعاعی :

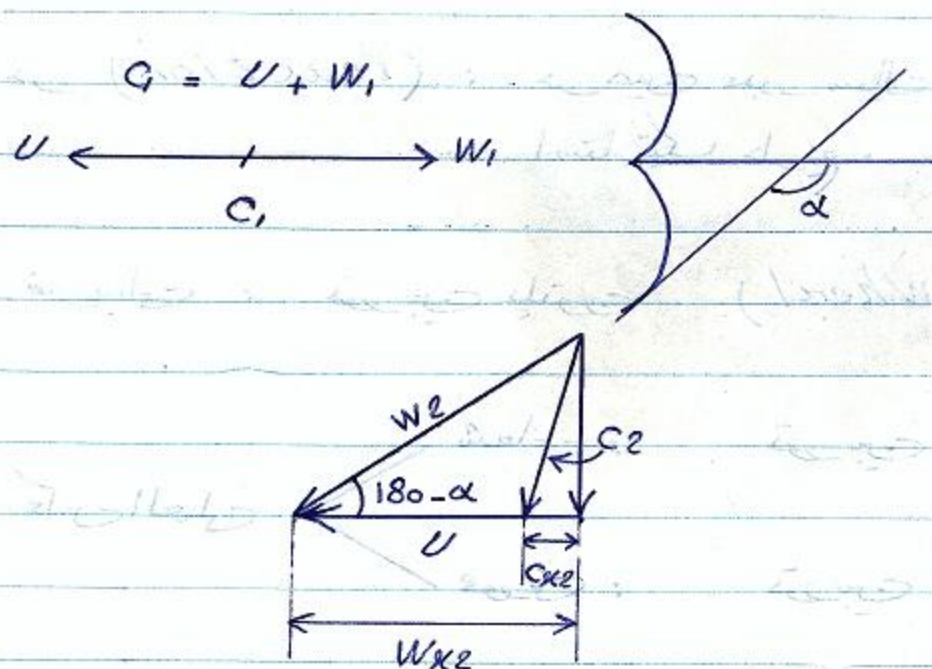
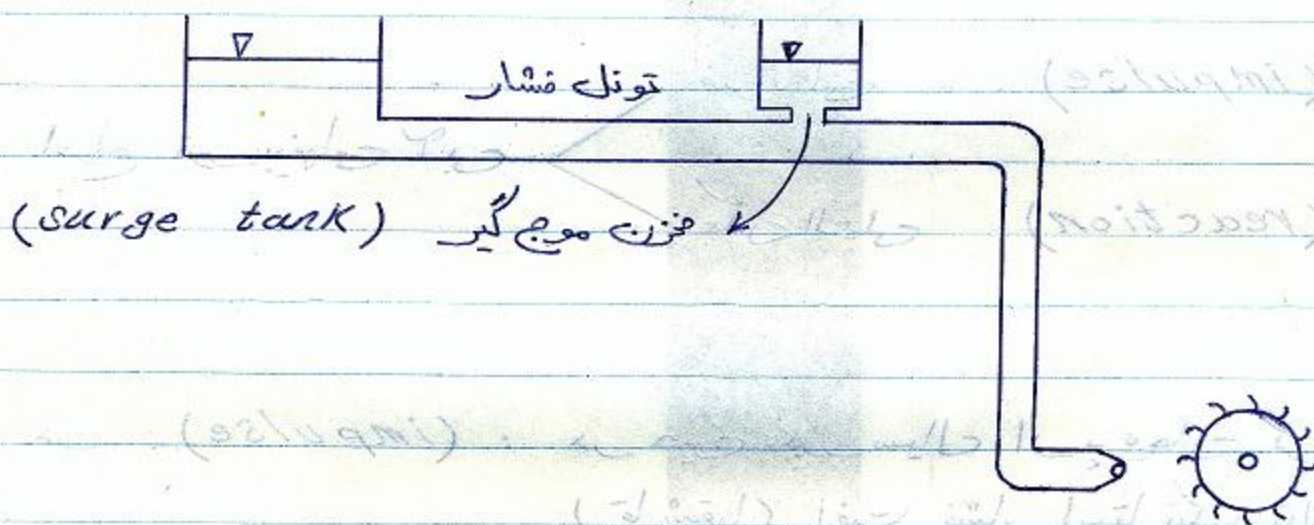
توربین کاپلان

محوری :

* عکس‌العملی

پلتون } تاحد حداکثر 2000 m
 فرانسیس } تاحد حداکثر 1600 m
 کاپلان } تاحد حداکثر 600 m

توربین پلتون :



$$E = \frac{U(Cx_1 - Cx_2)}{g}$$

$$E = U[(U + W_1) + (Wx_2 - U)] / g$$

$$E = U(W_1 + W_2 \cos(180 - \alpha)) / g$$

* با فرض اینکه جریان سرعت نسبی سیال بدون اصطکاک است: $W_1 = W_2$

$$E = UW_1(1 - \cos \alpha) / g$$

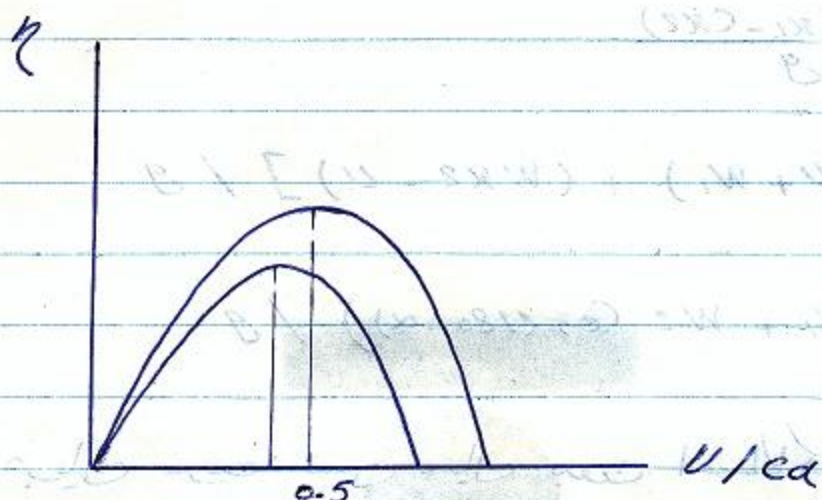
$$E = U(Q - U)(1 - \cos \alpha) / g$$

$$\frac{dE}{dU} = 0 \rightarrow \frac{(Q - 2U)(1 - \cos \alpha)}{g} = 0 \rightarrow$$

* اگر $Q = 2U$ باشد و بعبارتی $U = Q/2$ باشد مقدار E ماکزیم خواهد بود.

$$\rightarrow E_{\max} = \frac{Q^2 (1 - \cos \alpha)}{4g}$$

* ولی در عمل $W_1 \neq W_2$ است لذا $(K = W_2/W_1)$



* با تعریف زاویه انحراف هیدرولیکی توربین :

$$\eta_H = \frac{\text{انرژی منتقله}}{\text{انرژی موجود فوئان}} = \frac{E}{Q^2 / 2g}$$

* اگر $\alpha = 180^\circ$ باشد :

$$E_{\max} = \frac{Q^2}{2g} \rightarrow$$

$$\eta_H = \frac{E_{\max}}{Q^2 / 2g} = 100\%$$

تنظیم توربین پلوتون با تغییر بار

u/c باید ثابت باشد تا زاویه انحراف در بهترین حالت باشد.

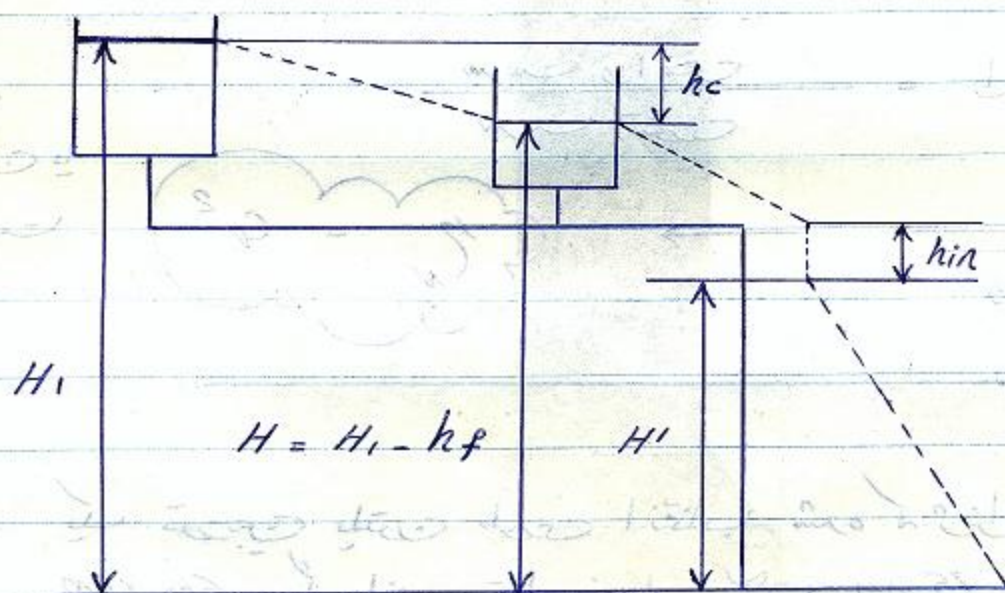
$$P = \gamma H' Q$$

* پس Q باید تغییر کند:

$$Q = Q \cdot A \xrightarrow[باید]{Q = cte}$$

A باید تغییر کند

افت در توربین پلتون:



$$H' = H_1 - (h_f + h_{in}) = Q^2 / 2g$$

انرژی در انتهای مسیر انتقال = اندام سیستم انتقال
" " ابتدای " " انتقال

$$\eta_{trans} = \frac{H}{H_1} = \frac{H_1 - hf}{H_1}$$

راندمان شیبوره = $\frac{\text{انرژی خروجی نازل}}{\text{انرژی ورودی نازل}}$

$$\eta_N = \frac{H'}{H} = \frac{C^2}{2gH}$$

راندمان سرعت نازل = $\frac{\text{سرعت واقعی}}{\text{سرعت تئوری}}$

$$C_v = \frac{C}{\sqrt{2gH}}$$

$$\eta_N = C_v^2$$

C_v - راندمان یا ضریب سرعت

مسئله - یک توربین پلتون طوری انتخاب شده که ژنراتور را در دور -

600 RPM بگرداند. قطر فواران آب 75 mm و سرعت آن

$C = 100 \text{ m/s}$ است. به انالی نالویه پرو 170° نسبت سرعت

پرو به سرعت اولیه فواران برابر 0.47 است $(\frac{C}{C_v})$ با صرف نظر

از تلفات :

الف - قطر چرخ

ب - توان تولیدی

ج - انرژی جنبشی به انرژی هیدرمترب باقیمانده از سیال

$$Q = 100 \text{ m/s} \rightarrow U = 0.47 Q = 47 \text{ m/s}$$

$$U = r \cdot \omega = d/2 (2RN) = R d N \rightarrow$$

$$d = \frac{U}{RN} = \frac{47}{R (600/60)} \rightarrow d = 1.5 \text{ m}$$

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}g} = \frac{U(Q-U)(1-C_d)}{g} \rightarrow$$

$$\dot{W} (\text{قوة}) = \dot{m} U (Q-U)(1-C_d)$$

$$\dot{W} = \rho Q U (Q-U)(1-C_d)$$

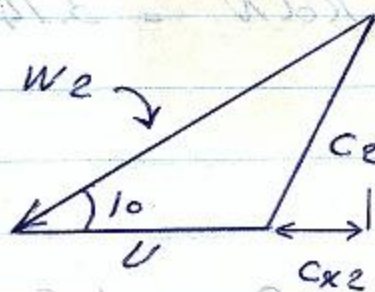
$$\text{لذا: } Q = R/4 d_j^2 Q \rightarrow$$

$$\dot{W} = (1000) \left[R/4 (0.075)^2 (100) \right] (47) (100 - 47) (1 - 0.17)$$

$$\dot{W} = P = 2184 \text{ kW}$$

$$\frac{C_z^2}{2g} = \frac{C_{x2}^2 + C_{y2}^2}{2g}$$

$$C_1 - U = W_1 = W_2$$



$$W_2 = W_1 = 100 - 47 = 53 \text{ m/s}$$

$$W_{x2} = U + C_{x2} \Rightarrow C_{x2} = W_2 \cos(180 - \alpha) - U$$

$$C_{x2} = 53 \cos 10 - 47 = 5.2 \text{ m/s}$$

$$C_{r2} = W_2 \sin(180 - \alpha) = 53 \sin 10^\circ$$

$$C_{r2} = 9.2 \text{ m/s}$$

$$\frac{C_2^2}{2g} = \frac{(5.2)^2 + (9.2)^2}{2(9.81)} = 5.17 \text{ m} \quad \text{تلف شده}$$

توربین - یک توربین پلوتون توان 1500 kW می دهد. شعاع چرخ تا مرکز 2 m است و دور آن 200 rpm است. اگر راندمان توربین 85% باشد با صرف نظر از اصطکاک تا نازل هر کلب مورد نیاز چقدر است؟ سطح مقطع نازل را بیابید.

$U/c_1 = 0.48$
 $\alpha = 16^\circ$

$$U = r\omega \rightarrow U = \pi d N = 3.14 (2) (200/60)$$

$$\rightarrow U = 20.9 \text{ m/s}$$

$$U/c_1 = 0.48 \rightarrow c_1 = 43.6 \text{ m/s}$$

$$\dot{W} = \rho Q U (C_1 - U) (1 - C_D \alpha) (10^3) \text{ kW} \rightarrow$$

$$1500 = (1) (Q) (20.9) (43.6 - 20.9) (1 + 0.93) (10^3) \rightarrow$$

$$Q = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{W} = \rho g Q H \eta_o (10^3) \text{ kW} \rightarrow$$

$$1500 = (1) (9.81) (1.6 \times 10^{-3}) (H) (0.85) (10^3) \rightarrow$$

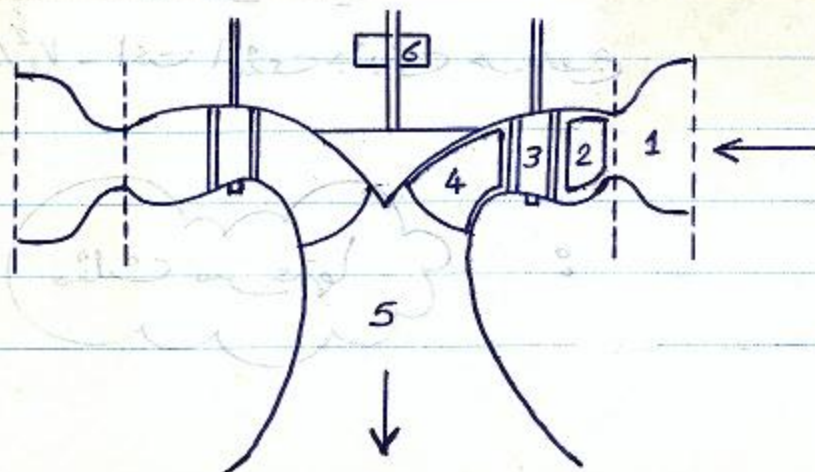
$$H = 112.4 \text{ m}$$

$$Q = C_1 \cdot A \rightarrow 1.6 \times 10^{-3} = 43.6 \times A \rightarrow$$

$$A = 3.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

(فرانسیس)

توربینهای شعاعی



۱- طرزونی (۱۱-۲) (۱۱-۱) (۱۱-۳) - یا قاتمان

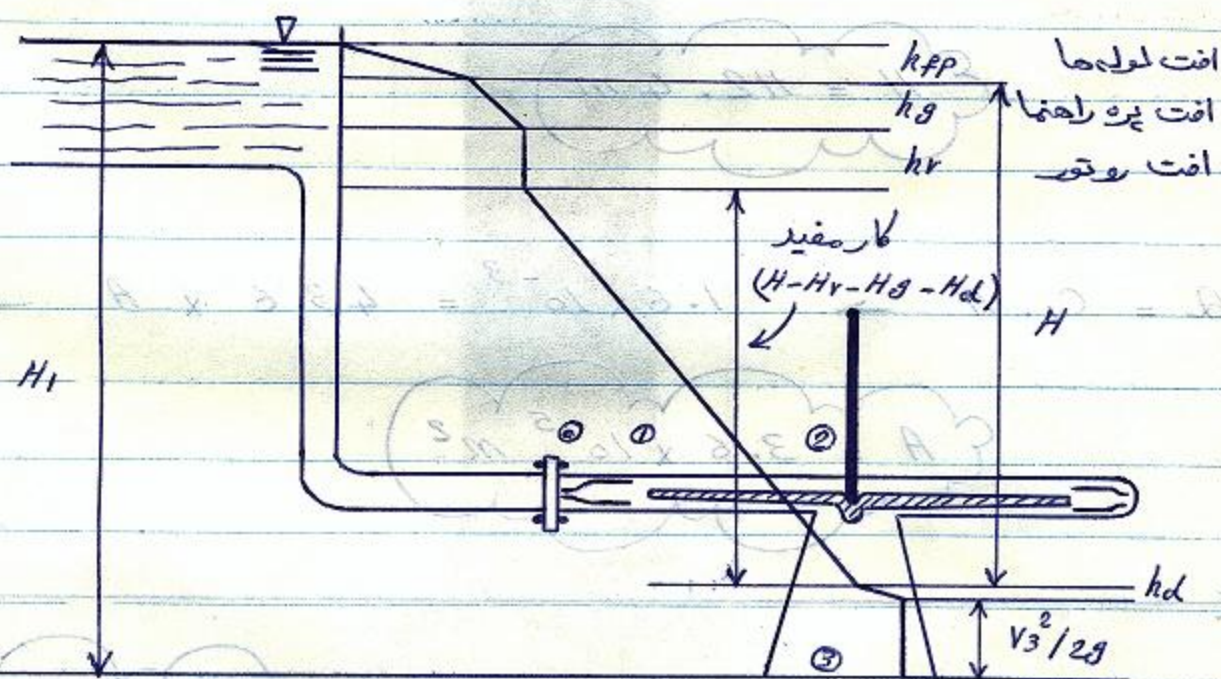
۲- پروهای راهنمای ثابت

۳- پروهای راهنمای قابل تنظیم (۱۱-۴) (۱۱-۵) (۱۱-۶)

۴- روتور

۵- لوله راش (تخلیه)

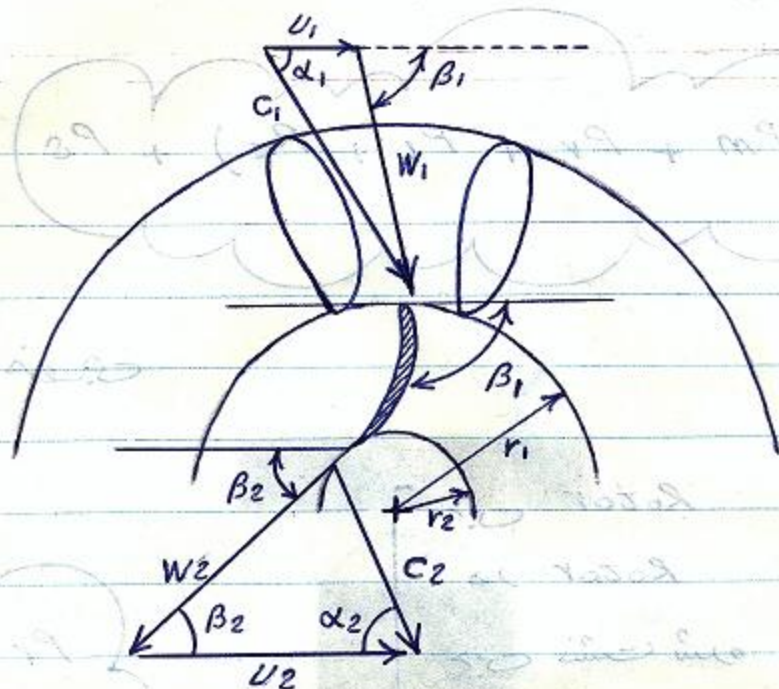
* زاویه واگرائی دیفیوزر (۵) برای این است که فشار سیال خروجی را کم کم به فشار اتمسفر برساند تا از پدیده *cavitation* جلوگیری شود.



h_d - افت لوله تخلیه

$v_3^2/2g$ - افت انرژی جنبشی در خروجی

مثبت سرعتها



$$\begin{cases} Q = 2\pi r b C_r \\ E = \frac{U_1 C_{x1} - U_2 C_{x2}}{g} \end{cases}$$

$$\text{هدکلی توربین} = \left[\left(\frac{P_3}{\sigma} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 \right) - \left(\frac{P_0}{\sigma} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 \right) \right]$$

تلفات

- 1- تلفات مکانیکی P_m
- 2- تلفات Rotor (ناشی از اصطکاک و جثائی و ...) P_r
- 3- تلفات نشست سیال از قسمت ورود پره به خروجی P_L
- 4- تلفات حفظه (ناشی از اصطکاک، جثائی، و انکسائی و ...) P_c

$$P = (P_m + P_r + P_L + P_c) + P_s$$

توان کل داده شده به توربین

P_s - توان شفت خروجی

Q_r - رotor دبی

H_r - رotor سر

q - دبی نشست شده

$$Q = Q_r + q$$

h_r - افت هدر رotor

h_c - افت هدر حفزه

$$P_r = \rho g h_r Q_r$$

$$P_L = \rho g H_r q$$

$$P_c = \rho g Q h_c$$

$$\eta = \frac{\text{توان خروجی شفت}}{\text{توان کل داده شده}} = \frac{P_s}{P_m + P_r + P_L + P_c + P_s}$$

$$\eta = \frac{P_s}{\rho g H Q}$$

$$\eta = \frac{\text{توان جذب شده توسط توربین}}{\text{توان کل داده شده به توربین}} = \frac{P_s + P_m}{P_s + P_m + P_r + P_L + P_c + P_s}$$

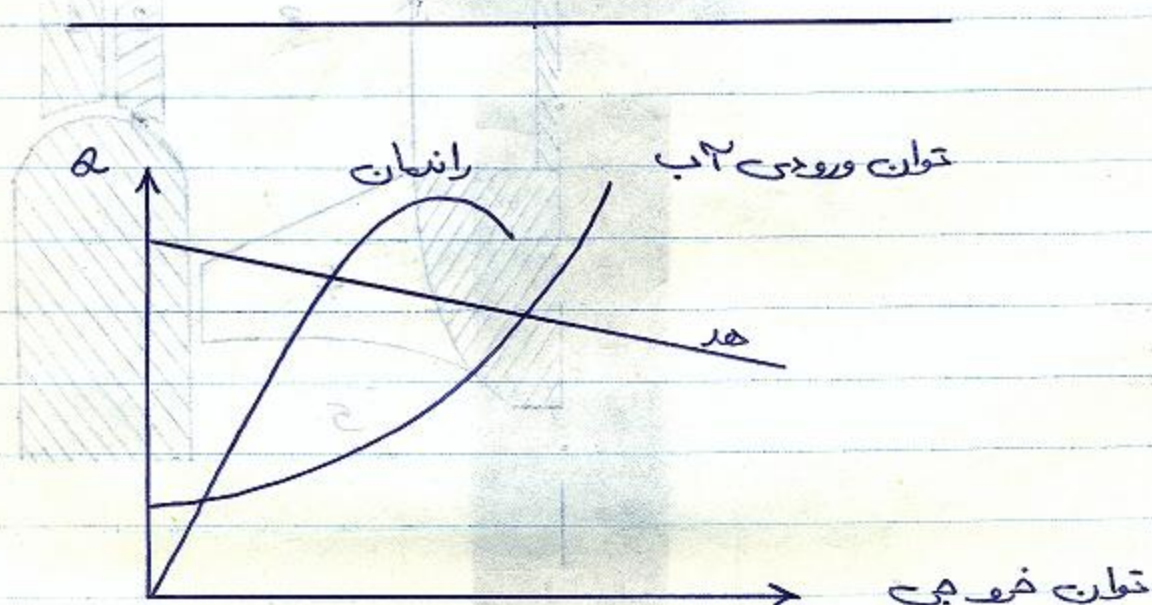
$$\eta_H = \frac{P_s + P_m}{\rho g H Q}$$

$$\eta_H = \frac{(U_1 C_{K1} - U_2 C_{K2}) / g}{H}$$

در حالت ایده آل :

$$\eta_H = \frac{C_{K1} U_1}{gH}$$

Max حالت ایده آل :



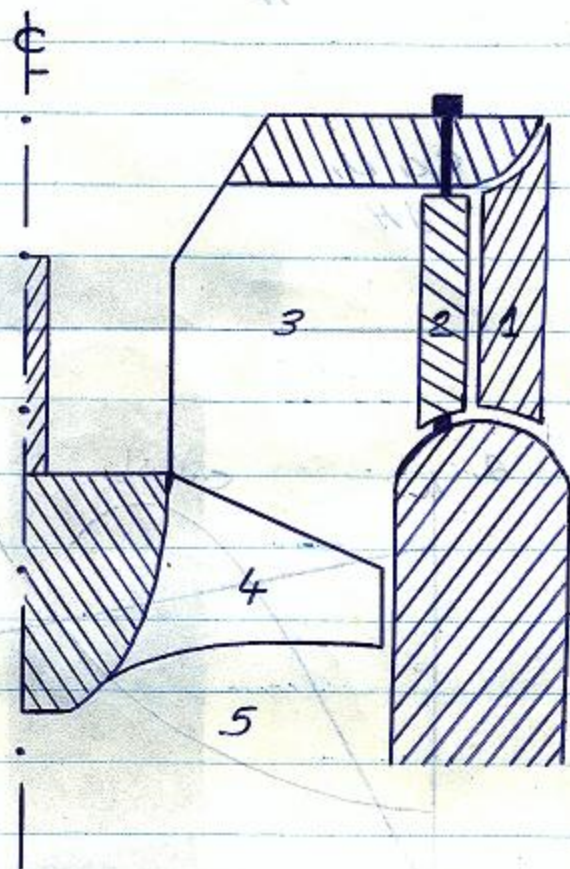
* چون $(P \sim Q)$ و $(Q^2 \sim \text{افتها})$ با افزایش دبی تا حدی رانندگی بالا می رود و سپس بر اثر غلبه افتها رانندگی کاهش می یابد.

(پروانه ای - کاپلان)

توربین های محوری

* کاپلان هم همان پروانه ایست لیکن پره های آن قابل تنظیم است و لذا با دور شدن از نقطه طراحی می توان با تنظیم مناسب -

افتتاحی گیت (Wicket gate) - (Stay ring) ثابت



1 - محفظه حلقوی با پرده‌های راهنمای ثابت (Stay ring)

2 - پرده‌های راهنمای قابل تنظیم (Wicket gate)

3 - مسیر گذر Blade

4 - روتور (blade runner)

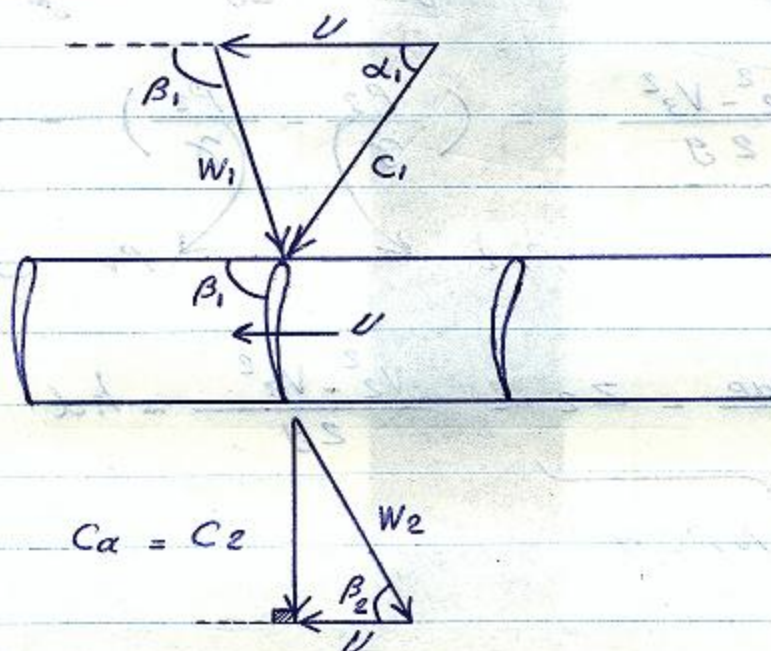
5 - لوله تخلیه (draft tube)

* در این توربینها شعاعهای ورودی و خروجی سیال در هنگام ورود به پروانه ثابت است پس :

$$U_1 = U_2 = U$$

* و چون سطح مقطع ثابت است :

$$C_{r1} = C_{r2} = C_a$$



$$E = U C_{x1} - U C_{x2} / g \quad ; \quad \alpha_2 = 90^\circ$$

$$C_{x1} = U - W_{x1} = U - C_a \cot \beta_1 = U + C_a \cot \beta_1$$

$$E = \frac{U(U + C_a \cot \beta_1)}{g}$$

کاویتاسیون در توربینها *

* چون در توربینها برعکس پمپها کمترین فشار در خروجی است -
لذا پدیده Cavitation چنان اهمیت ندارد.

$$* \quad \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 + h_d$$

$$- h_d + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} = \left(\frac{P_3}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \right) - Z_2$$

فشار تبخیر P_v ← P_{at}

$$\underbrace{\frac{P_{at} - P_{vap}}{\gamma} - Z_2}_{NPSH} = \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} - h_d$$

توربین NPSH

عدد کاویتاسیون thoma :

$$\sigma = \frac{(P_{at} - P_v) / \gamma - Z_2}{H}$$

$$\sigma = \frac{NPSH}{H}$$

* بر مبنای عدد کاویتاسیون بحرانی (σ_c) :

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_{at}}{\gamma} - \gamma_c H - Z_2$$



مل تقریب - $U = 41.7 \text{ m/s}$

$Q = 18.17 \text{ m/s}$

$$P_H = \gamma \cdot H \cdot Q = \frac{P_S}{\eta} = \frac{1500 \times 10^3}{0.85} = 9806 \text{ Hg}$$

$$C_{x2} = W_2 \cos(180 - \alpha) - U$$

$$W_1 = W_2$$

$$H = E = \frac{U(C_1 - U)(1 - C_2 \alpha)}{g} = 375.177 \text{ m}$$

$$\frac{P_S}{\eta} = P_H = \gamma H \dot{Q} \rightarrow \frac{1500 \times 10^3}{0.85} = (9806)(375.77) \dot{Q}$$

$$\rightarrow \dot{Q} = 0.479 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{Q} = Q A \rightarrow A = 0.479 / 87.27 \rightarrow$$

$$A = 5484 \text{ mm}^2$$

(میلت سرعت مع رسم شود) (معم)

مسئله - یک توربین پلتون ژنراتوری را در دور 600 rpm می‌گردانند
قطر فوران آب ورودی 75 mm

مسئله - یک توربین فرانسس می‌باشد مشخصات زیر را دارد:

- $V_1 = 1.6 \text{ ft}$ ، $V_2 = 1 \text{ ft}$ و $\beta_1 = 80^\circ$ ، عرض مسیر
- جریان سیال بین دو طرف توربین 0.8 ft است در دور 300 rpm
- درین توربین $120 \text{ ft}^3/\text{s}$ است. مطلوب است:
- الف - زاویه β_2 پره بطوریکه آب خروجی در جهت شعاعی باشد ($\alpha_2 = 90^\circ$)
- ب - گشتاور اعمال شده توسط آب بر پره‌های روتور
- ج - $\uparrow$ (توان تولید شده) در هر مورد استفاده توسط روتور و توان حاصل از آن
- جریان آب بیرون اصطکاک و ضخامت پره‌ها ناچیز است.

(مثبت سرعتها مانند شکل رسم شده است)

$$U_1 = V_1 \omega = (1.6) 2\pi \frac{300}{60} = 50.3 \text{ FPS}$$

$$U_2 = V_2 \omega = (1) 2\pi \frac{300}{60} = 31.4 \text{ FPS}$$

$$Q = 2\pi r_1 b_1 C_{r1} = 2\pi r_2 b_2 C_{r2}$$

$$C_{r1} = Q / 2Rv_{1b1} = 120 / 2R(1.6)(0.8) \rightarrow$$

$$C_{r1} = 14.92 \text{ FPS}$$

از رابطه پیوستگی: $C_e = C_{re} = \frac{r_1 C_{r1}}{r_2} = \frac{1.6(14.92)}{1}$

$$C_e = 23.9 \text{ FPS}$$

$$\beta_e = \arctan \frac{23.9}{31.4} = 37.2 \text{ الف}$$

$$T = \dot{m} (r_1 C_{x1} - r_2 C_{x2}) \rightarrow$$

$$T = \rho Q r_1 C_{x1}$$

$$\begin{cases} C_{x1} = U_1 + W_{x1} \\ \tan \beta_1 = C_{r1} / W_{x1} \end{cases} \rightarrow C_{x1} = U_1 + \frac{C_{r1}}{\tan \beta_1} = 52.9 \text{ FPS}$$

$$T = (52.9)(1.6)(120)(1.94) \rightarrow$$

$$T = 19700 \text{ ft-lbf} \text{ ب}$$

$$P = T \cdot \omega = \frac{19700 (2R) (300/60)}{550} = 1125 \text{ hp}$$

ب

$\uparrow \text{ hp} \approx \frac{\text{ft-lbf}}{\text{s}}$

$$H = U_1 C x_1 / g = 82.6 \text{ ft} \quad \text{ج}$$

توان حاصل توسط روتور :

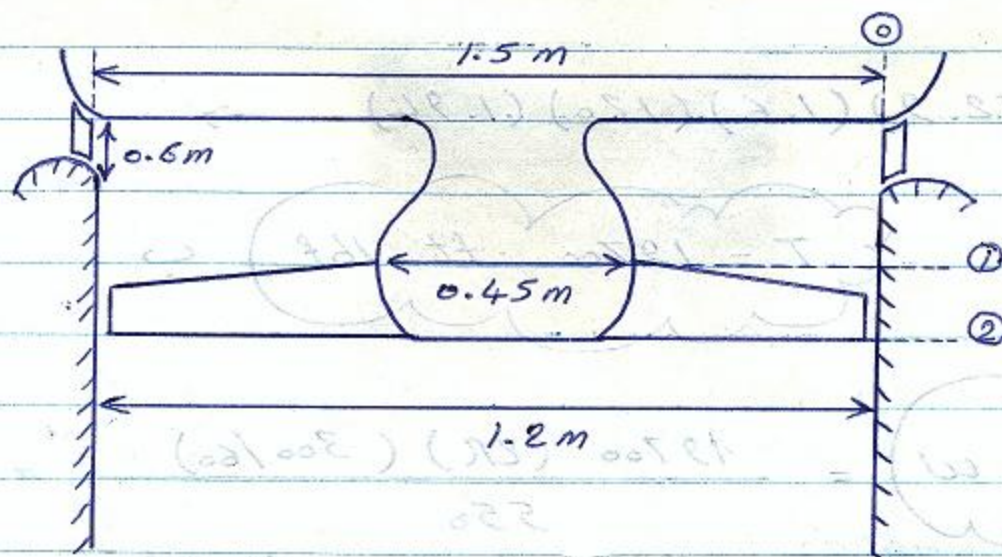
$$P = \eta H Q = (62.4)(82.6)(120) / 550$$

$$P = 1125 \text{ hp} \quad \text{ج}$$

* چون شرایط ایده آل است لذا دو توان باهم برابرند.

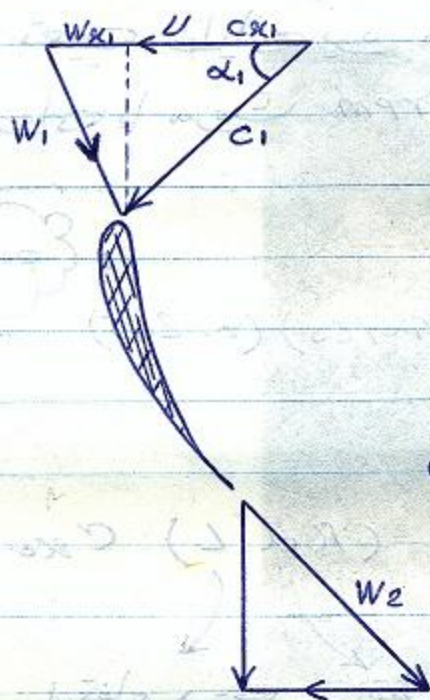
مثال - در یک ورودی توپین لایلان طریق تنظیم شده که در مقطع صفر به سرعت 4.005 m/s و جریان دارای زاویه 45° نسبت به خط شعاعی است. مطلوب است

* هد و مؤلفه سرعت مماس در خروجی.



* نقش پره‌های رانها بگونه‌ای است که مولفه چرخشی سرعت از شرایط جریان گردابی آزاد (Free Vortex) تبعیت می‌کند:

$$r C_{\theta} = C_{\alpha}$$



* در این مسئله استثنائاً شرایط را در مقطع ورودی ② هم براساس جریان گردابی آزاد در نظر می‌گیریم. (چون مسئله هیچ معلومات دیگری به ما نداده است.)

$$* C_{\theta 0} = C_0 \cos \alpha_0 = 4.005 \cos 45^\circ \rightarrow$$

در مقطع ورودی

$$C_{\theta 0} = 2.83 \text{ m/s}$$

$$C_{\theta 1} = \frac{r_0 C_{\theta 0}}{r_1} = \frac{(0.75)(2.83)}{0.225} = 9.44 \text{ m/s}$$

* با فرض اینکه شرایط جریان گردابی آزاد در حین عبور از پروانه هم

برقرار است :

$$C_{x2} = \frac{r_1 C_{x1}}{r_2} = \frac{(0.225)(9.44)}{0.6} = 3.54 \text{ m/s}$$

* با فرض سرعت محوری ثابت در هین مسئله و با استفاده از اطلاعات مسئله مطلوب بست تعیین نمایای پرو در شعاعهای 0.225 m و 0.45 m و 0.6 m برای پروای با سرعت 240 rpm

$$C_{x1} = 9.44 \text{ m/s}$$

$$U_1 = \omega r_1 = (2\pi)(240/60)(0.225)$$

$$U_1 = 5.66 \text{ m/s}$$

در شعاع 0.225 m

$$\dot{Q} = (R d L) C_{x0} \quad \rightarrow$$

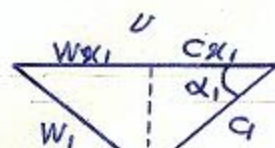
ارتفاع در پیچ $\rightarrow$ قطر توربین در مقطع ⑤

$$\dot{Q} = R(1.5)(0.6)(2.83) \rightarrow \dot{Q} = 8.01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{Q} = R(r_2^2 - r_1^2) C_r \quad \text{مؤلفه محوری سرعت}$$

که ثابت است

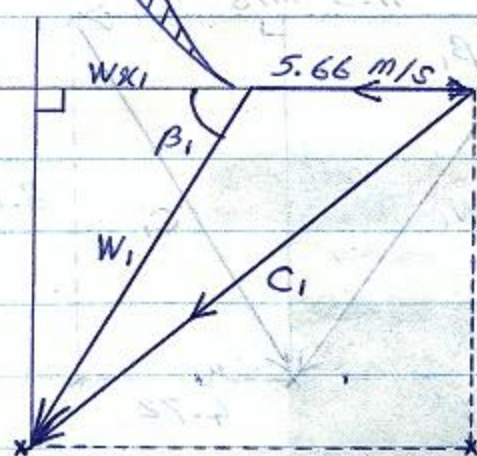
$$\rightarrow C_r = \frac{8.01(1.5)}{R[(0.6)^2 - (0.225)^2]} \rightarrow C_r = 8.24 \text{ m/s}$$



* روش ترسیم پایین جدا از -

شکل پروانه است و مثلث سرعت

درج شده است.



$$C_r = 8.24$$

$$C_{x1} = 9.44$$

$$\tan \beta_1 = \frac{C_r}{C_{x1} - U_1} = \frac{8.24}{9.44 - 5.66} \longrightarrow$$

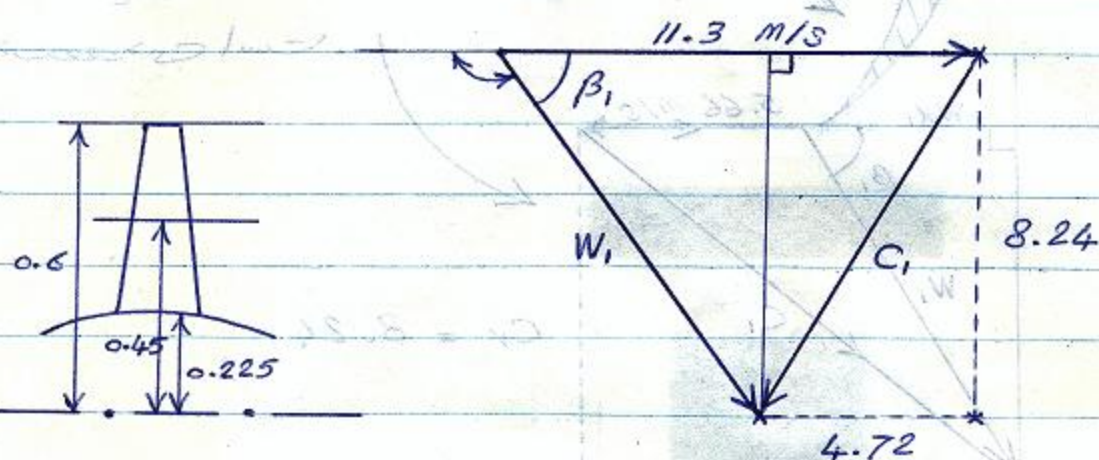
$$\beta_1 = 65.4^\circ$$

$$: \text{در شعاع } 0.45 \text{ m}$$

$$C_{x1} = \frac{C_{x0} \cdot r_0}{r_1} = \frac{2.83 (0.75)}{0.45} = 4.72 \text{ m/s}$$

$$U_1 = (2R) (240/60) (0.45) = 11.3 \text{ m/s}$$

روش ترسیم :



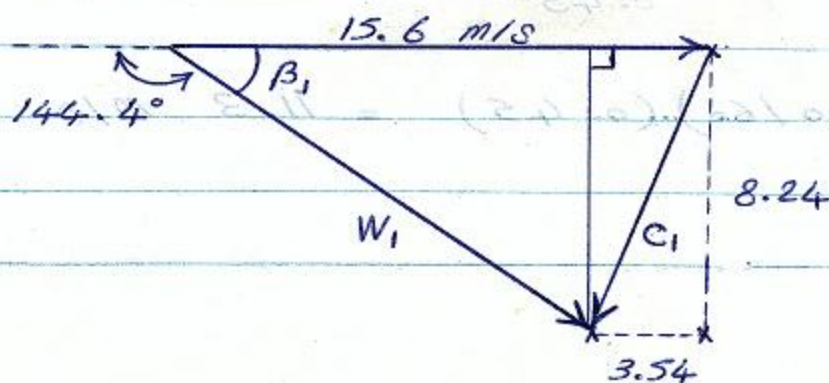
$$\tan \beta_1 = \frac{C_r}{U - C_{x1}} = \frac{8.24}{11.3 - 4.72} \rightarrow$$

$$\beta_1 = 51.5^\circ$$

شعاع 0.6 m

$$C_{x1} = \frac{C_{x0} \cdot r_0}{r_1} = \frac{2.83 (0.75)}{0.6} = 3.54 \text{ m/s}$$

$$U_1 = (2\pi) (240/60) (0.6) = 15.06 \text{ m/s}$$

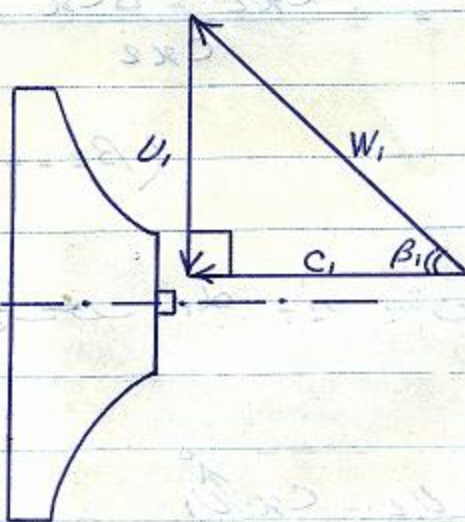


$$\tan \beta_1 = \frac{c_r}{U - Cx_1} = \frac{8.24}{15.06 - 3.54} \rightarrow$$

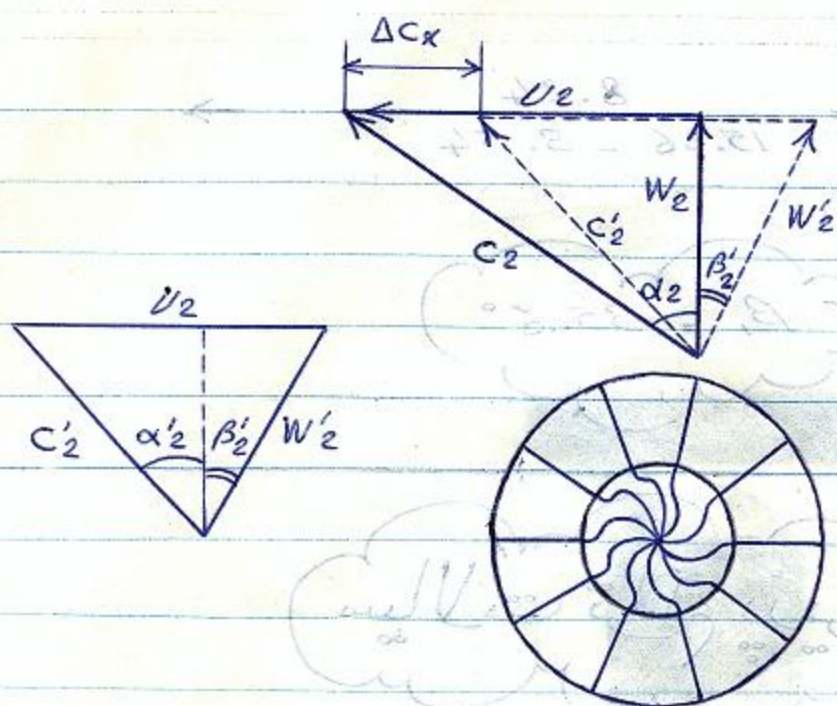
$$\beta_1 = 35.6^\circ$$

سیالات تراکم پذیر

کمپرسورهای گریز از مرکز :



* برعکس پمپها و توربینهای آبمی که زوایای نسبت به جهت مماسی در نظر می گرفتیم در اینجا زوایای نسبت به جهت شعاعی می سنجیم.



نقطه چین ها حالت واقعی و بالغشت است.

* در کمپسورهای گریز از مرکز ضریب لغزش استانیتر بازا $\beta_2 = 0$ بکاری رود :

$$\sigma_s = 1 - (0.63 R/z) \quad z - \text{تعداد پره}$$

$$\sigma_s = \frac{C'_{x2}}{C_{x2}} = \frac{C_{x2} - \Delta C_x}{C_{x2}} = 1 - \frac{\Delta C_x}{C_{x2}}$$

(در حالت ایده آل $\beta_2 = 0$)

(ص 159) در خروجی کمپرسور α_1 باید بشود α_2

$$E = \frac{C_{x2} U_2 - C_{x1} U_1}{g} = \frac{U_2 C_{x2}}{g} \quad \text{ایده آل}$$

$$E = \frac{U_2 C'_{x2}}{g} = \frac{\sigma_s U_2 C_{x2}}{g} \quad \text{واقعی}$$

$$(C_{x2} = V_2) \rightarrow \text{واقعی } F = \frac{\rho S V_2^2}{g}$$

* در عمل به علت تلفات توان لازم برای کمپرسور بیش از توان ایده آل است؛ با احتمال ضریب توان (ψ)

$$\text{واقعی } F = \frac{\psi \rho S V_2^2}{g}$$

* لغزش همیشه داریم
حتی در کمپرسورهای
ایده آل.

در محفظه ورودی: بین ورود به محفظه و خروج از آن:

$$Ad. \quad \underbrace{q_i + h_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i}_{\text{انتالی سکون}} = \underbrace{q_e + h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e}_{\text{انتالی سکون}}$$

$$(k_0 = h + \frac{V^2}{2})$$

$$k_0 + \frac{C_0^2}{2} = k_1 + \frac{C_1^2}{2} \rightarrow k_{00} = k_{01}$$

$$\left. \begin{aligned} k_{00} &= \text{انتالی سکون در مقطع صفر} \\ k_{01} &= \text{انتالی سکون در مقطع یک} \end{aligned} \right\}$$

(ک) $\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \left(h_2 + \frac{C_2^2}{2}\right) - \left(h_1 + \frac{C_1^2}{2}\right) \quad (1) \quad \leftarrow \text{در پروانه}$

* $\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = h_{02} - h_{01} \quad (\text{بدون در نظر گرفتن علامت})$

* یا از رابطه اولر: $\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = U_2 C_{x2} - U_1 C_{x1} \quad (2)$

* از تساوی طرفین روابط (1) و (2) خواهیم داشت:

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + U_1 C_{x1} = h_2 + \frac{C_2^2}{2} + U_2 C_{x2}$$

(می توانیم بجای C_1 و C_2 از مثلث سرعتها مقدار قرار داد.)

$$\rightarrow h_1 + (C_{x1}^2 + C_{r1}^2)/2 - U_1 C_{x1} = h_2 + (C_{x2}^2 + C_{r2}^2)/2 - U_2 C_{x2}$$

* می دانیم:

$$\left. \begin{aligned} C_{r1}^2 &= W^2 - W_{x1}^2 \\ W_{x1} &= U - C_{x1} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$C_{r1}^2 = W^2 - (U - C_{x1})^2 = W^2 - U^2 - C_{x1}^2 + 2UC_{x1}$$

$$\rightarrow h_1 + (C_{x1}^2 + W_1^2 - U_1^2 - C_{x1}^2 + 2U_1 C_{x1})/2 - U_1 C_{x1} = h_2 + (C_{x2}^2 + W_2^2 - U_2^2 - C_{x2}^2 + 2U_2 C_{x2})/2 - U_2 C_{x2}$$

* با ساده کردن رابطه فوق:

$$\underbrace{h_1 + \frac{w_1^2}{2}}_{h_{01 \text{ rel}}} - \frac{U_1^2}{2} = \underbrace{h_2 + \frac{w_2^2}{2}}_{h_{02 \text{ rel}}} - \frac{U_2^2}{2} \quad (1)$$

بین مقاطع
موجود خروج
بروان

$$h_{01 \text{ rel}} - \frac{U_1^2}{2} = h_{02 \text{ rel}} - \frac{U_2^2}{2}$$

$h_{0 \text{ rel}}$ - یعنی انتالی سکونی که بر حسب سرعت جنبی درست آمده.

(از تساوی قانون اول رابطه اول):

$$h_{02} - h_{01} = \frac{\psi \delta s U_2^2}{g} \rightarrow$$

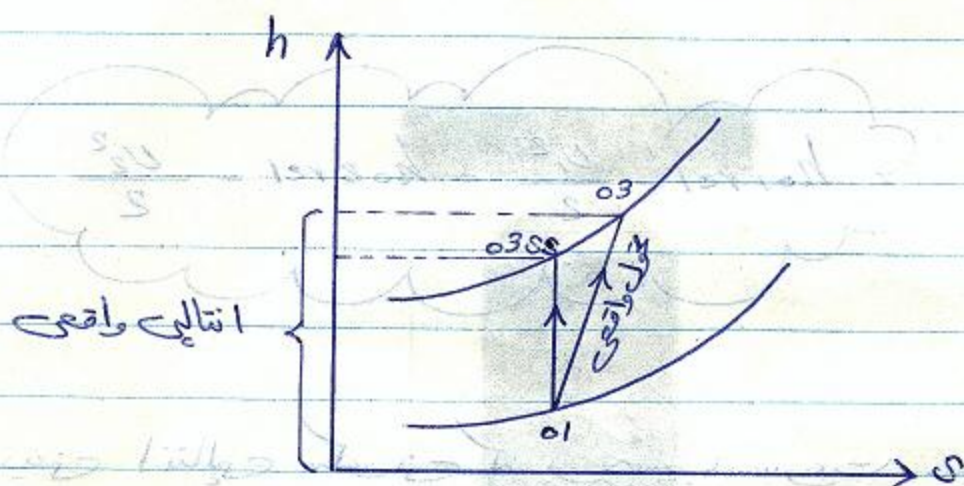
$$T_{02} - T_{01} = \frac{\psi \delta s U_2^2}{g C_p}$$

* با اعمال قانون اول در حفظ حرارت:

$$h_2 + C_2^2/2 = h_3 + C_3^2/2 \rightarrow h_{02} = h_{03} \rightarrow$$

$$T_{02} = T_{03} \quad (2)$$

$$(1), (2) \rightarrow \boxed{T_{03} - T_{01} = \frac{\psi \delta S U_2^2}{C_p g}} \quad (3)$$



$$(1), (2) \rightarrow \eta_c = \frac{h_{03SS} - h_{01}}{h_{03} - h_{01}} = \frac{T_{03SS} - T_{01}}{T_{03} - T_{01}} \quad (\text{انتقال مایع})$$

$$\frac{T_{03SS}}{T_{01}} = 1 + \frac{\eta_c}{T_{01}} (T_{03} - T_{01}) \quad (4)$$

$$(3), (4) \rightarrow \frac{T_{03SS}}{T_{01}} = 1 + \frac{\eta_c}{T_{01}} \frac{\psi \delta S U_2^2}{C_p g}$$

$$\boxed{\frac{P_{03}}{P_{01}} = \left(\frac{T_{03SS}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left[1 + \frac{\eta_c \psi \delta S U_2^2}{T_{01} C_p g} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$$

* حرف مایع است که تا حد امکان سمت راست است و دستکاری کنیم تا مقدار سمت چپ افزایش یابد و افزایش فشار بیشتر شود:

- ۴ - هر چه بالاتر باشد بهتر است.
- ۵ - افزایش ϕ مستلزم افزایش پره ها است اما این کار سطح پروانه ها و تلفات اصطکاکی $\downarrow$ افزایش می دهد :
- 21 - 19 پره $\leftarrow 0.90 = \phi$
- ۶ - حداکثر max آب ۲ m/s 470 است.
- ۷ - بهترین حالت این است که $\psi = 1$ باشد.

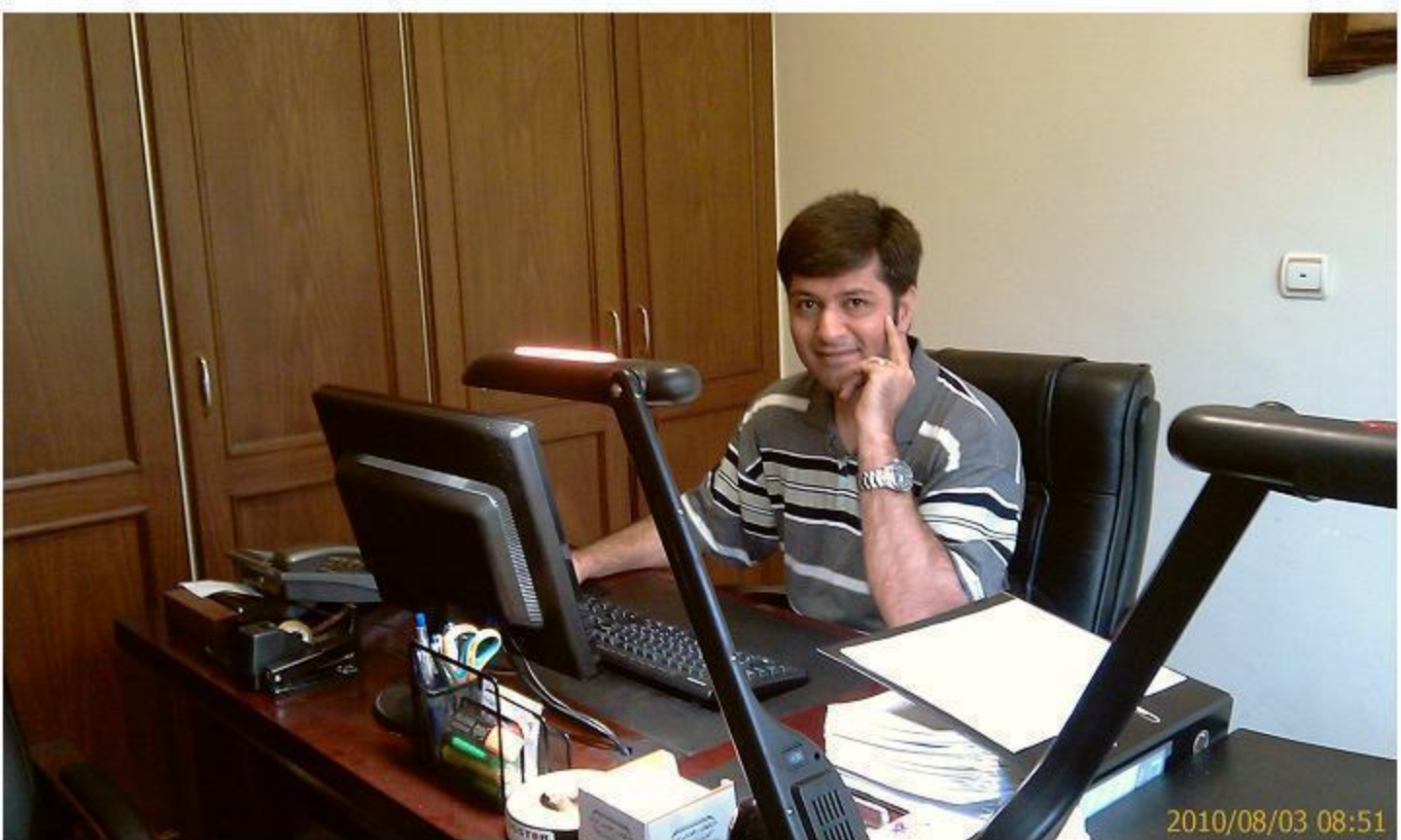


فرشاد نسراپی - مهندس پایه یک تأسیسات مکانیکی
 طراحی - نظارت - اجرا
 نظام مهندسی: ۱۷۲۷۶-۰۳-۱۵
 پروانه مهندسی: ۰۲۸۱۵-۰۳-۱۵
 شماره شهرسازی: ۰۱۲۲۲-۰۳-۱۵

جزوه آموزشی درس توربو ماشین **آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز**
 دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران - دانشکده فنی (۱۳۷۳)

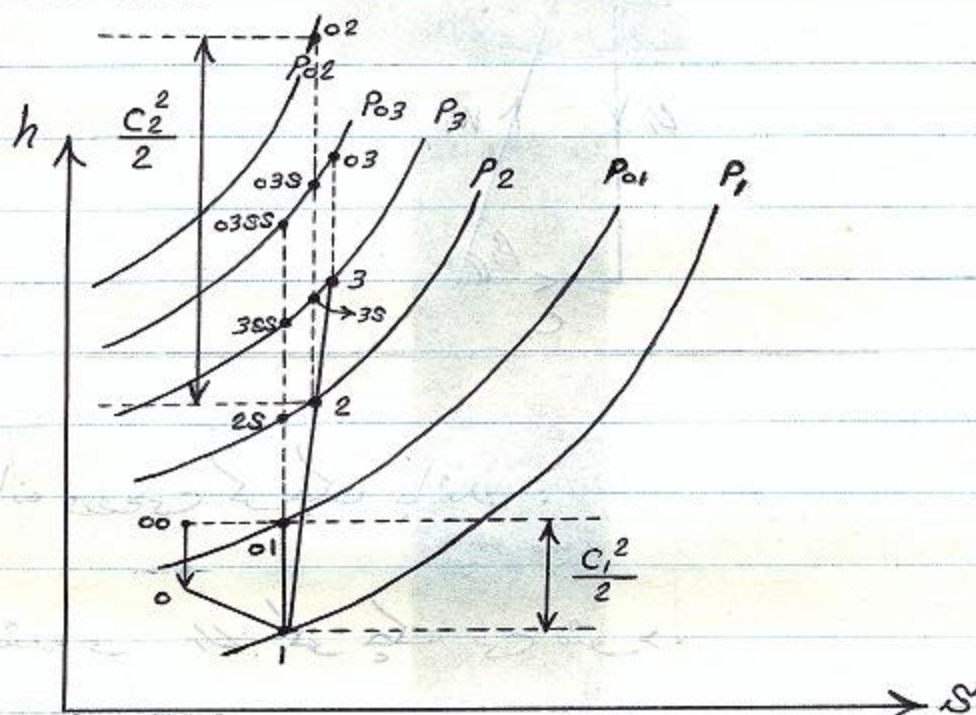


پتروپالامحور پیشتاز در ارائه خدمات مهندسی و متعهد به کیفیت
PPM , Dedicated For The Best Quality



« یاگرام (k-s) کمپرسور گریز از مرکز »

$$\begin{cases} h_{00} = h_{01} \\ h_{02} = h_{03} \end{cases}$$



$$\eta_c = \frac{h_{03SS} - h_{01}}{h_{03} - h_{01}}$$

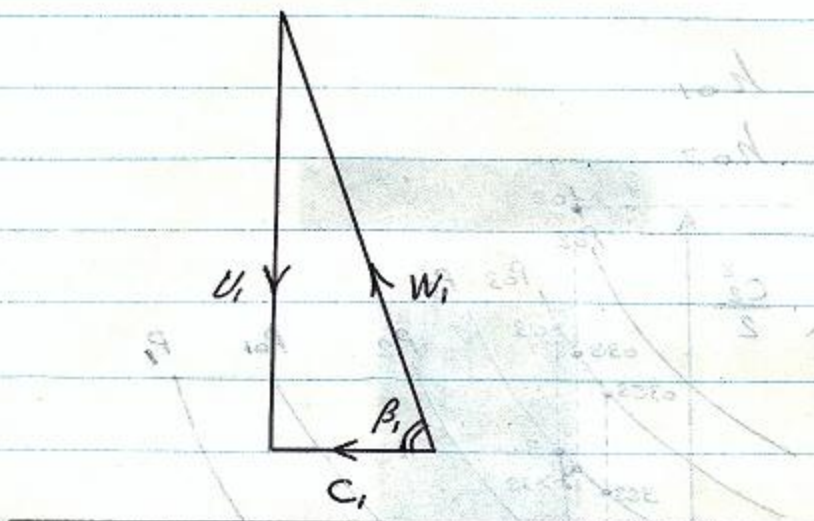
محدودیت سرعت ورودی :

۱- قطر دهانه ورودی (چشم) بزرگ باشد :

Q کوچک می شود چون $(Q = C \cdot A)$

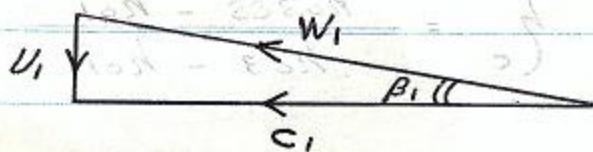
U_1 بزرگ می شود چون

$$U_1 = \pi d_1 N$$



۲- قطر دهانه ورودی کوچک باشد :

U_1 بزرگ شده و U_1 کوچک می شود.



* پس در هر دو حالت سرعت نسبی (W_1) بزرگ می شود و این مطلوب نیست چون پدیده (chocking) یا خفگی رخ می دهد. که ناشی از رسیدن سرعت هوای ورودی به سرعت صوت است.

$$\dot{m} = P_1 C_1 A_1 \quad (A_1 = \pi d_1^2 / 4)$$

r شعاع در پشته پره
 R شعاع در نوک پره

$$\begin{aligned} A_1 &= \pi (R^2 - r^2) \\ A_1 &= \pi R^2 (1 - r^2/R^2) \end{aligned}$$

بافتی $K = 1 - r^2/R^2$

$$A_1 = \pi R^2 K$$

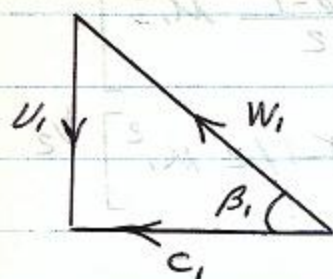
$$\dot{m} = \rho_1 \pi R^2 K C_1$$

* با بررسی شرایط در حالت بحرانی نوک پره که امکان رسیدن به سرعت صوت وجود دارد:

$$* U_1 = R\omega \rightarrow R = U_1/\omega$$

$$* \dot{m} = \rho_1 \pi U_1^2 K C_1 / \omega^2 \rightarrow$$

$$\frac{\dot{m} \omega^2}{\pi K \rho_1} = U_1^2 C_1$$



$$\begin{cases} C_1 = W_1 \cos \beta_1 \\ U_1 = W_1 \sin \beta_1 \end{cases}$$

$$\frac{\dot{m} \omega^2}{\pi K \rho_1} = W_1^3 \cos \beta_1 \sin^2 \beta_1 \quad (1)$$

$$\frac{P_{01}}{P_1} = \left[1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_1^2 \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad \text{معادله ۱}$$

$$\frac{T_{01}}{T_1} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \left(\frac{P_{01}}{T_{01}} \right) \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} =$$

$$\left(\frac{P_{01}}{T_{01}} \right) \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{-\frac{1}{\gamma-1}} \longrightarrow$$

$$P_1 = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{P_{01}}{RT_{01}} \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{-\frac{1}{\gamma-1}} \quad (*)$$

$$\frac{m \omega^2 R T_{01}}{\pi K P_{01}} = W_1^3 \sin^2 \beta_1 \cos \beta_1 \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{-\frac{1}{\gamma-1}}$$

« عدد رانج نسبی » : $M_{rel} = \frac{W_1}{a_1} \longrightarrow$

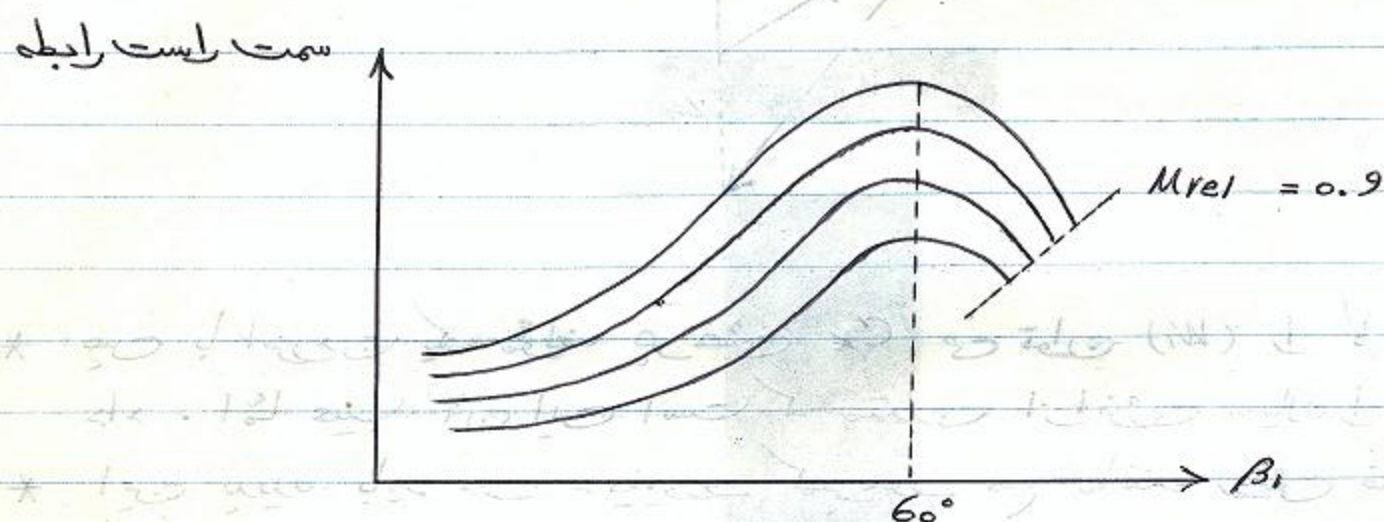
$$\frac{m \omega^2 R T_{01}}{\pi K P_{01}} = M_{rel}^3 a_1^3 \sin^2 \beta_1 \cos \beta_1 \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{-\frac{1}{\gamma-1}}$$

$$a = (\gamma R T)^{1/2} \longrightarrow \left\{ \frac{a_{01}}{a_1} = \left(\frac{T_{01}}{T_1} \right)^{1/2} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{1/2} \right.$$

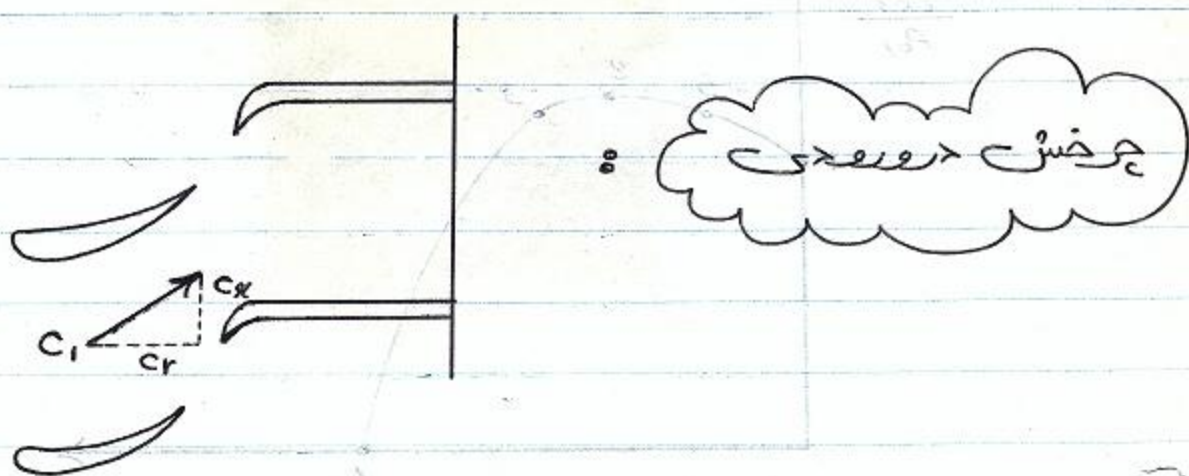
$$C_1 = W_1 \cos \beta_1 \longrightarrow \left\{ M_1 = M_{rel} \cos \beta_1 \right.$$

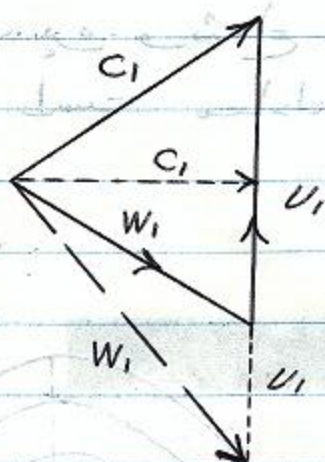
$$\frac{m \omega^2}{\pi K \gamma P_{01} (\gamma R T_{01})^{1/2}} = M_{rel}^3 \sin^2 \beta_1 \cos \beta_1 / \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{rel}^2 \cos^2 \beta_1 \right]^{\frac{1}{\gamma-1} + \frac{3}{2}}$$

* زاویه β_1 مربوط به نوک پره و شعاع (r) است که بدترین حالت می باشد. حال سمت راست معادله فوق را بر حسب (β_1) - رسم می کنیم :



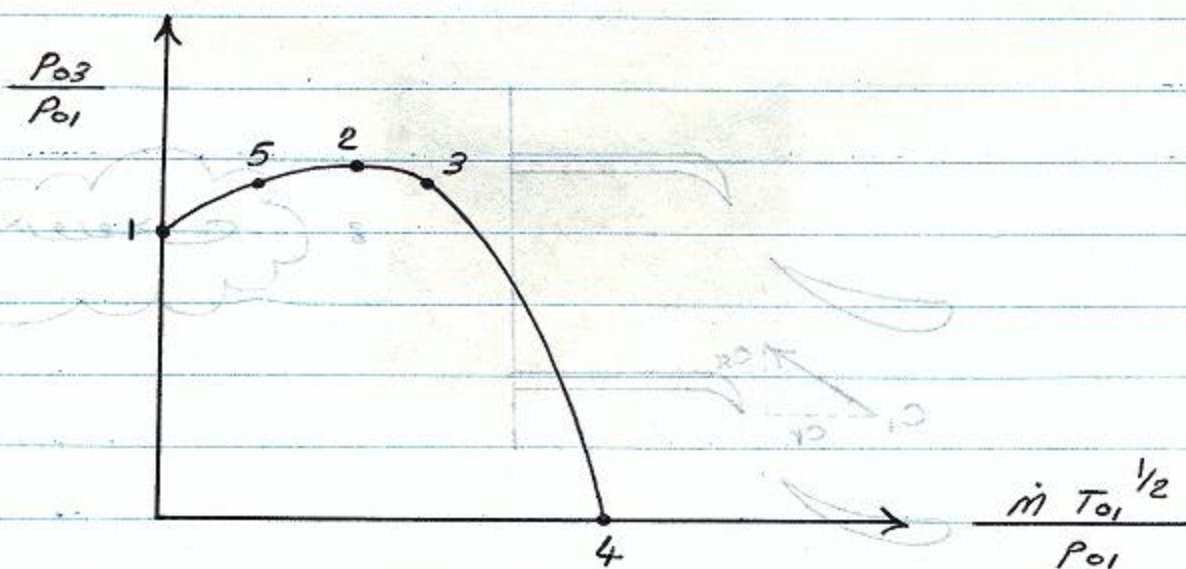
* به ازای $(\beta_1 = 0.8)$ دبی ماکزیمم است. بهتر است عدد ماخ ورودی را (0.8) در نظر بگیریم تا ضریب اطمینان داشته باشیم. اگر به ناچار عدد ماخ از 0.8 بزرگتر شد چاره ای نیست جز نصب پره های راهنما در ورودی کمپرسور و گردش اولیه هوای ورودی :





- * پس با افزودن یک مؤلفه پرخشی C_x می توان (W_1) را کاهش داد. اما عیب آن این است که مقداری از انرژی سیال را می گیرد.
- * این پدیده باید در دیفیوزر کمپرسور هم مانند روش فوق - چک شود.

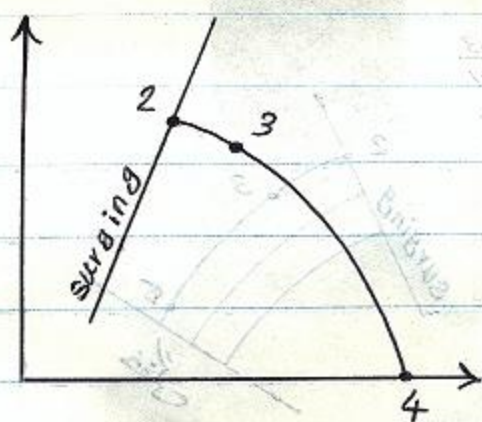
منحنی مشخصه کمپرسور گریز از مرکز :



* این مَفَنی مَسْخَصَه را با نصب یک شیر در خروجی کمپرسور چک می کنند. در نقطه (ا) شیر بسته است و کمپرسور هوای داخل خود را متراکم می کند. امّا عواملی وجود دارد که موجب می شود مَفَنی مزبور در عمل بدست نیاید:

۱- Surging (موج سریع فشار):

در صورتی که دبی کمپرسور از حد معینی کاهش یابد منجر به کاهش نسبت فشار شده که در صورت عدم کاهش فشار، η (باییج دست) منجر به کاهش مجدد دبی می گردد (۵ تا ۱). این پدیده می تواند در صورت ایجاد تغییراتی در فشار منجر به تغییرات شدیدی در دبی و نسبت فشار شود. در این حالت کمپرسور با سرو صدا کار می کند امّا دبی ندارد.



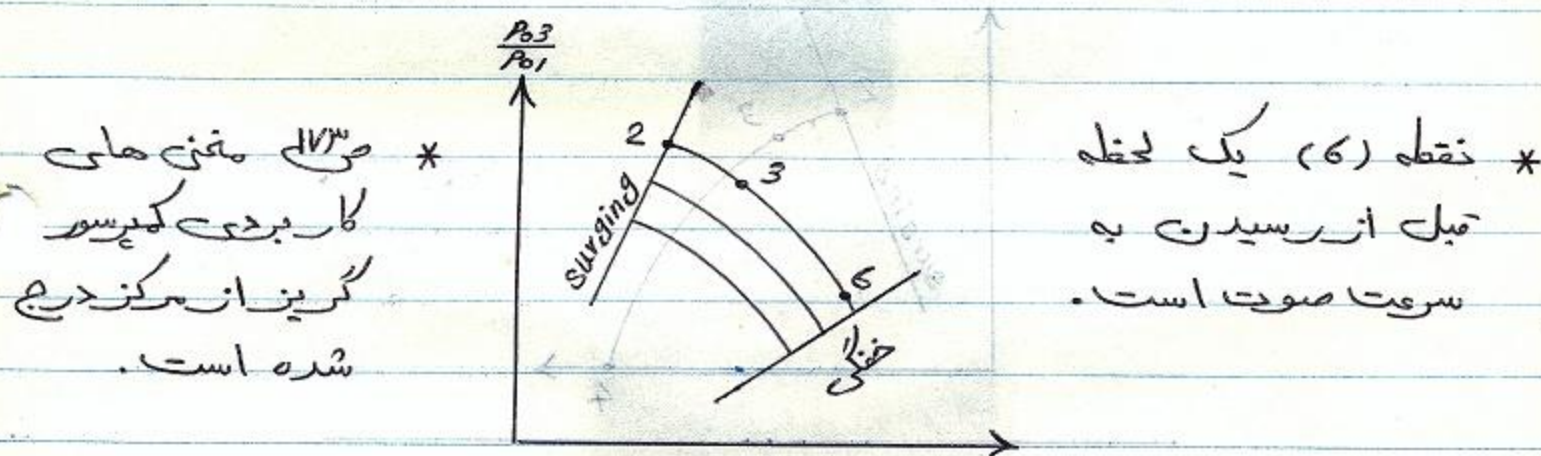
۲- سقوط پر خشی (Rotating Stall):



* ممکن است در ادامه *surging* یا بخاطر گرفتگی موضعی پروانه و زوایای ورودی سیال به یک پروانه با بقیه پروانه‌ها فرق داشته و در نتیجه آن قسمت تحت دبی پایین کار کرده و موجب عدم تعادل (نابالانس) در کار کمپرسور می‌گردد. این پدیده می‌تواند منجر به ارتعاش شدید و در نهایت آسیب رسیدن به کمپرسور گردد. در این حالت سروصدای زیادی تولید می‌شود.

۳- خفگی (choking):

* اگر دبی زیاد شود ممکن است در نقطه‌ای از کمپرسور شرایط سرعت به حد سرعت صوت رسیده و موج ضربه (Shock Wave) تولید شده که منجر به آسیب کمپرسور و کاهش شدید دبی می‌گردد.



مسئله - اطلاعات زیر به عنوان معلومات پایه در طراحی یک کمپرسور گریز از مرکز داده شده.

ضریب توان	$\psi = 1.04$
ضریب لغزش	$= 0.9$

$$N = 290 \text{ rps} \quad (107-107)$$

$$\alpha \text{ کل پروانه} = 0.5 \text{ m}$$

$$\text{قطر نوک چشع} = 0.3 \text{ m}$$

$$\text{قطر ریشه چشع ورودی} = 0.15 \text{ m}$$

$$\text{دبی جرمی هوا} = 9 \text{ kg/s}$$

$$T_{00} = 295^\circ \text{K} \text{ دمای سکون ورودی}$$

$$P_{00} = 1.1 \text{ bar} \text{ فشار سکون ورودی}$$

$$\text{راندمان} = 0.78$$

* مطلوب‌جست : (الف) نسبت فشار کپرسور و توان لازم برای -
گرداندن آن. فرض کنید سرعت ورودی
هوا در جهت محوری است.

(ب) زاویه ورودی پره‌ها در نوک و ریشه چشع
ورودی. فرض کنید که سرعت محوری در
عرض سطح چشع ثابت می‌ماند (c)

(ج) عمق محوری کانالهای هرف در محیط آن (ر)
عرض کانال هرف (ر)

الف) : متلاً دیدیم که : $(T_{03} - T_{01} = 4 \text{ کس } U_e^2 / c_p)$

$$U_e = R d_2 N = R (0.5) (290) \rightarrow U_e = 455.5 \text{ m/s}$$

$$T_{02} - T_{01} = T_{03} - T_{01} = 4 \text{ کس } U_e^2 / c_p \rightarrow$$

$$T_{03} - T_{01} = \frac{1.04 (0.9) (455.5)^2}{1.005} = 193^\circ \text{K}$$

$$\frac{P_{03}}{P_{01}} = \left[1 + \frac{\eta_c (T_{03} - T_{01})}{T_{01}} \right]^{\gamma/\gamma-1} \rightarrow$$

$$\frac{P_{03}}{P_{01}} = \left[1 + \frac{0.78 (193)}{295} \right]^{\frac{1.4}{0.4}} \rightarrow$$

$$\frac{P_{03}}{P_{01}} = 4.23$$

$$\dot{W} = \dot{m} C_p (T_{03} - T_{01}) = 9 (1.005) (193)$$

$$\dot{W} = 174.6 \text{ KW}$$

$$\begin{cases} \dot{m} = \rho_1 C_1 A_1 \\ C_1 = C_{v1} \end{cases}$$

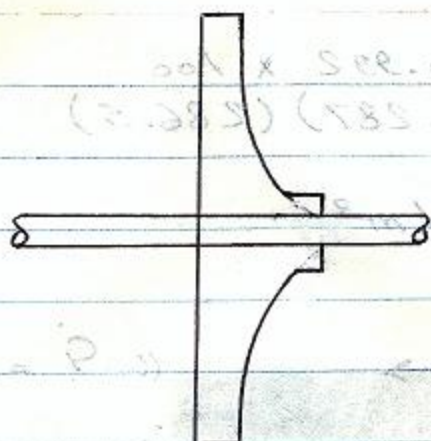
: 

$$\rho_1 \approx \frac{P_{01}}{R T_{01}}$$

۱- بر مبنای شرایط فشار و دمای سکون محسوس می زنیم و سپس سرعت و خطای می کنیم :

$$\rho_1 \approx \frac{1.01 \times 100}{(0.287) (295)}$$

$$\rho_1 = 1.3 \text{ kg/m}^3$$



* تکرار اول: $C_1 = \dot{m} / \rho_1 A_1$

$$A_1 = \pi (r_{1t}^2 - r_{1h}^2) = \pi (0.15^2 - 0.075^2)$$

$$A_1 = 0.053 \text{ m}^2$$

→

$$C_1 = \frac{9}{1.3 (0.053)} \rightarrow (C_1 = 131 \text{ m/s})$$

$$T_1 = T_{01} - \frac{C_1^2}{2 C_p}$$

$$T_1 = 295 - \frac{(131)^2}{2 (1.005)} = 286.5^\circ \text{K}$$

$$P_1 = P_{01} \left(\frac{T_1}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$P_1 = 1.1 \left(\frac{286.5}{295} \right)^{\frac{1.4}{0.4}} \rightarrow$$

$$« P_1 = 0.992 »$$

* رابطه Ad، بازگشت پذیر را می توان بین هر نقطه سکون و نقطه ای دلخواه نوشت (چون تحول سکون ۲ نیز ترمویک است) اما در مورد کل کمپرسور نمی توان این رابطه را بکار برد چون راندمان دارد.

$$P_1 = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{0.992 \times 100}{(0.287)(286.5)} \rightarrow$$

$$P_1 = 1.21 \text{ kg/m}^3$$

$$C_1 = \frac{\dot{m}}{P_1 A_1} \rightarrow \quad \ll C_1 = 140 \text{ m/s} \gg$$

$$C_1 = C_{r1} = 143 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 1.185 \text{ kg/m}^3$$

* پس از آخرین تکرار :

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تأسیسات و مکانیک
 طراحی - نظارت - اجرا
 نظام مهندسی: ۱۵۴۰۰-۱۷۲۷۶
 پروانه مهندسی: ۱۵۴۰۰-۰۲۸۱۵
 شماره شهرسازی: ۱۵۴۰۰-۱۲۲۲

جزوه آموزشی درس توربو ماشین **آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز**
 دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران - دانشکده فنی (۱۳۷۳)

توربینهای گاز و بخار جریان محوری

بخار (حدود 300 سال)

گاز (از اوایل قرن بیستم)

* توربینهای محوری

نیروگاه

موتورهای جت

* توربینهای گاز

ضربه ای (Impulse)

عکس العملی (Reaction)

* انواع توربینهای محوری

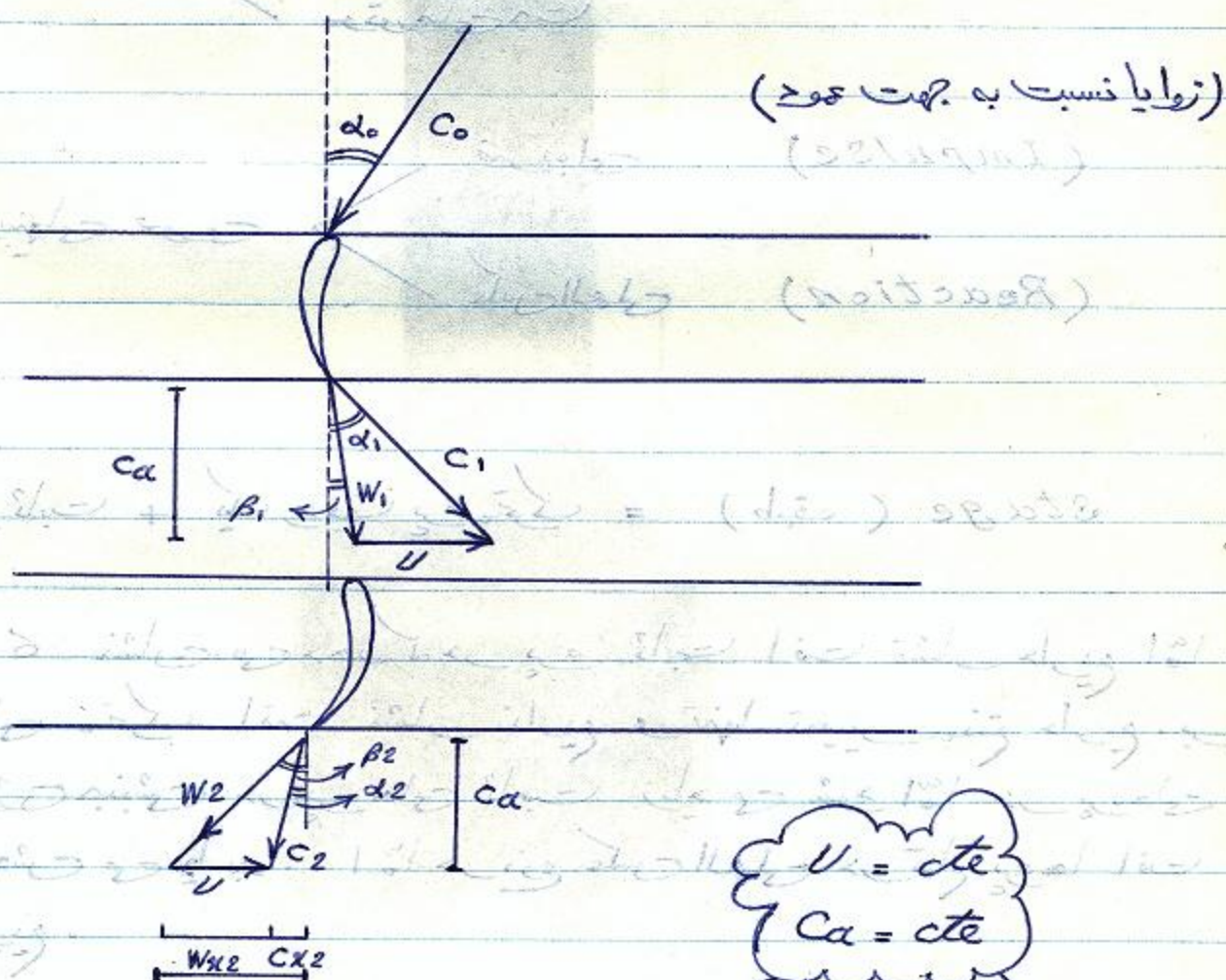
یک ردیف پرو ثابت + یک ردیف پرو متحرک = (طبقه) Stage

* شکل 2-6 نشان می دهد که در پرو ثابت افت فشار داریم اما در پروهای متحرک افت فشار نداریم و تنها تغییر منتهی داریم. بر عکس انرژی جنبشی در پروهای ثابت زیاد می شود اما در پروهای متحرک کاهش می یابد. اما در نوع عکس العملی در تمام پروها افت فشار داریم.

مثبت سرعت در یک طبقه از توربین محوری

فروضات :

- ۱- شرایط در شعاع متوسط بررسی می شود.
- ۲- نسبت ارتفاع تیغه به شعاع متوسط کوچک بوده و جریان را می توان دو بعدی در نظر گرفت.
- ۳- از تغییرات (شعاع) سرعت در جهت شعاع صرف نظر می شود.



$$E = U(C_{x1} - C_{x2}) / g$$

چون Cx_1 و Cx_2 در خلاف جهت هم هستند :

$$E = U (Cx_1 + Cx_2) / g \quad (-) \times (-) = (+)$$

$$\frac{W}{m} = U (Cx_1 + Cx_2)$$

از مثلث سرعت :

$$U = Cx_1 - Wx_1 = Wx_2 - Cx_2$$

$$Cx_1 - Wx_1 = Wx_2 - Cx_2$$

$$\frac{W}{m} = U \tan \alpha (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1)$$

$$\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1 = \tan \beta_2 + \tan \beta_1$$

قانون اول :

$$q + h_i + C_i^2/2 = W + h_e + C_e^2/2$$

در استاتور : $q = W = 0$

$$h_0 + C_0^2/2 = h_1 + C_1^2/2 \rightarrow$$

$$h_{00} = h_{01}$$

$$T_{00} = T_{01}$$

در روتور :

$$W^0 = (h_1 + C_1^2/2) - (h_2 + C_2^2/2)$$

$$W^p = h_{01} - h_{02} = U(W_{x1} + W_{x2}) \rightarrow$$

$$(h_1 + c^2/2) - (h_2 + c_2^2/2) = U(W_{x1} + W_{x2}) = U(c_{x1} + c_{x2})$$

$$\left[\left(h_1 + \frac{c_{x1}^2 + c_y^2}{2} \right) - \left(h_2 + \frac{c_{x2}^2 + c_y^2}{2} \right) \right] = \dots = \frac{U}{m}$$

$$(h_1 + c_{x1}^2/2) - (h_2 + c_{x2}^2/2) = \dots = \dots$$

$$(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} (c_{x1}^2 - c_{x2}^2) = \dots = \dots$$

$$(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} (c_{x1} - c_{x2})(c_{x1} + c_{x2}) - U(c_{x1} + c_{x2}) = 0$$

$$(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} (c_{x1} + c_{x2}) [(c_{x1} - c_{x2}) - 2U] = 0$$

$$(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} (c_{x1} + c_{x2}) [(c_{x1} - U) - (c_{x2} + U)] = 0$$

$$(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} (W_{x1} + W_{x2})(W_{x1} - W_{x2}) = 0$$

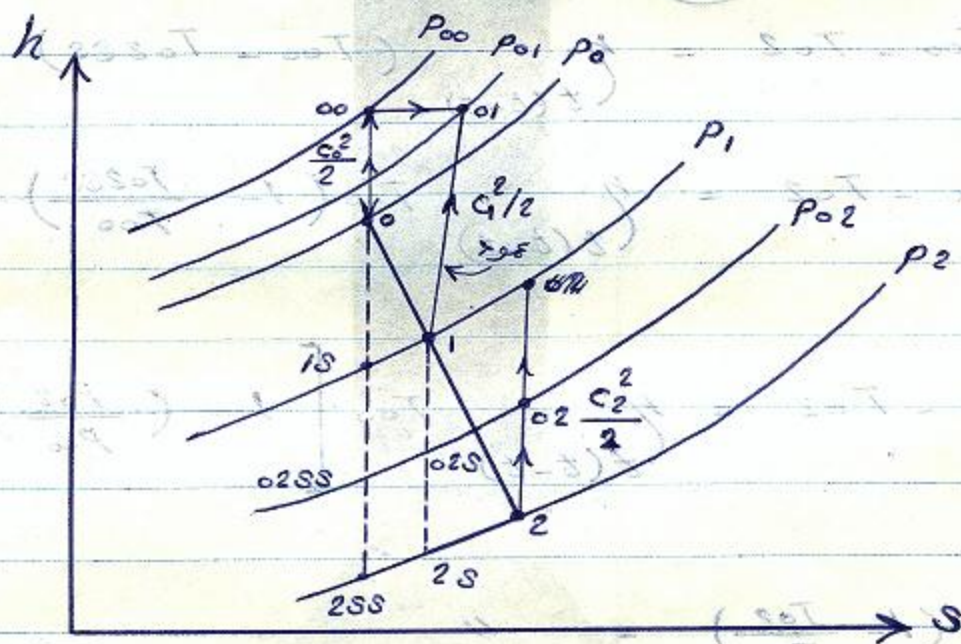
$$(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} (W_{x1}^2 - W_{x2}^2) = 0$$

$$(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} \left[\underbrace{(W_{x1}^2 - c_a^2)}_{W_1^2} - \underbrace{(W_{x2}^2 + c_a^2)}_{W_2^2} \right] = 0$$

$$h_1 + \frac{1}{2} W_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} W_2^2 \rightarrow$$

چون W سرعت
خسب است :

$$k_{01} \text{ rel} = k_{02} \text{ rel}$$



$$\begin{cases} h_{00} - h_{02} = h_0 - h_2 \\ T_{00} - T_{02} = T_0 - T_2 \end{cases}$$

* راندهاں تور ہیں

واندمان کل به کل (محولتر است)

راندمان کل به استاتیک

اندرمان کل به کل توربین :

$$\eta_{t(t-t)} = \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{02SS}} \quad \text{Total} - t$$

$$\eta_{t(t-t)} = \frac{T_{00} - T_{02}}{T_{00} - T_{02SS}} \rightarrow$$

$$T_{00} - T_{02} = \eta_{t(t-t)} (T_{00} - T_{02SS}) \rightarrow$$

$$T_{00} - T_{02} = \eta_{t(t-t)} T_{00} \left(1 - \frac{T_{02SS}}{T_{00}} \right) \rightarrow$$

$$T_{00} - T_{02} = \eta_{t(t-t)} T_{00} \left[1 - \left(\frac{p_{02}}{p_{00}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

$$T_{00} \left(1 - \frac{T_{02}}{T_{00}} \right) = //$$

$$\frac{T_{02}}{T_{00}} = 1 - \eta_{t(t-t)} \left[1 - \left(\frac{p_{02}}{p_{00}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

اندرمان کل به استاتیک توربین :

$$h_{t(t-s)} = \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{2ss}}$$

* یعنی در طبقه آخر تعریف -

که انرژی جنبشی خروجی -

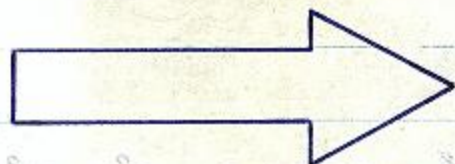
(سرعت خروجی) برای ما

اهمیت ندارد و تنها شرایط استاتیکی مطرح است از این رابطه استفاده می کنیم.

روش محاسبه اندامها :

$$\begin{cases} T ds = dh - v dp \\ \text{برای خطوط فشار ثابت} : dp = 0 \\ T ds = dh \rightarrow \Delta h \approx T \Delta s \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{بر روی خط فشار ثابت } p_1 : (h_1 - h_{1s}) = T_1 (s_1 - s_{1s}) \\ \text{بر روی خط فشار ثابت } p_2 : (h_{2s} - h_{2ss}) = T_2 (s_{2s} - s_{2ss}) \end{cases}$$



$$h_{2s} - h_{2ss} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right) (h_1 - h_{1s})$$

ضرایب افت در ستیور:

«توضیح جانبی»

در استاتیک: $\rho_0 = \rho_1$ و $P_{00} = P_{01}$

* در استاتیک: $\rho_0 = \rho_1$ و $P_{00} = P_{01}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_N = \frac{h_1 - h_{1s}}{0.5 G^2} \\ \gamma_N = \frac{P_{00} - P_{01}}{P_{00} - P_1} \end{array} \right.$$

۱- ضریب افت انتالی

۲- ضریب افت فشار

* در روتور:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_R = \frac{h_2 - h_{2s}}{0.5 W_2^2} \\ \gamma_R = \frac{P_{01 \text{ rel}} - P_{02 \text{ rel}}}{P_{02 \text{ rel}} - P_{2 \text{ rel}}} \end{array} \right.$$

۱- ضریب افت انتالی

۲- ضریب افت فشار

$$\eta_{t(t-t)} = \left\{ 1 + \left[\xi_R W_2^2 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \xi_N G^2 \right] / 2 (h_0 - h_2) \right\}^{-1}$$

$$\eta_{t(t-s)} = \left\{ 1 + \left[\xi_R W_2^2 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \xi_N G^2 + C_0^2 \right] / 2 (h_0 - h_2) \right\}^{-1}$$

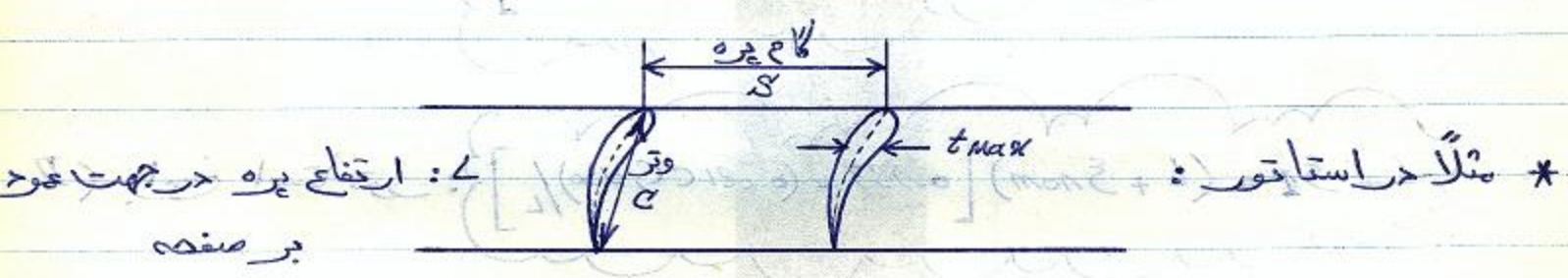
* که در این روابط:

$$\epsilon = 0.04 + 0.06 \left(\frac{\epsilon}{100} \right)^2 \quad (9)$$

$$\epsilon^* = \alpha_0 + \alpha_1 \quad \text{برای استاتور (N)}$$

$$\epsilon = \beta_1 + \beta_2 \quad \text{برای روتور (R)}$$

1- $Re = 10^5$: رابطه فوق برای حالتی است که



ϵ برابر سطح مقطع خروجی استاتور D_H (قطر هیدرولیک) محیط استاتور در خروج

$$D_H = \frac{4S \cos \alpha_1 L}{2[SG \alpha_1 + L]} \rightarrow D_H = \frac{2S \cos \alpha_1 L}{(SG \alpha_1 + L)}$$

$$Re = \frac{\rho_1 G D_H}{\mu_1} \rightarrow Re = \frac{\rho_1 P_1 G_1 S \cos \alpha_1 L}{\mu_1 (SG \alpha_1 + L)}$$

(یعنی Re محاسبه شده از فرمول فوق باید برابر 10^5 باشد)

روش اصلاح سود برگ

$$\begin{cases} 2 - \frac{t_{max}}{C} = 0.2 \\ 3 - \frac{L}{C C_G \alpha_{\infty}} = 3 \quad (\alpha_{\infty} = \frac{\alpha_0 + \alpha_1}{2}) \end{cases}$$

* اگر ضریب $\frac{t_{max}}{C} \neq 0.2$ و $\frac{L}{C C_G \alpha_{\infty}} \neq 3$ باشد مقدار ξ باید اصلاح شود:

(I) برای روتور:
$$L + \xi_1 = (1 + \xi_{nom}) \left[0.975 + \frac{(0.075 C C_G \alpha_{\infty})}{L} \right]$$

(II) برای استاتور:
$$L + \xi_1 = (L + \xi_{nom}) \left[0.933 + \frac{(0.021 C C_G \alpha_{\infty})}{L} \right]$$

در روتور
$$\alpha_{\infty} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

در استاتور
$$\alpha_{\infty} = \frac{\alpha_0 + \alpha_1}{2}$$

ξ_{nom} - از رابطه 9 تحت آن شرایط بدست آمده.
L - را اگر ندادند واحد فرض می کنند.

* اگر $Re \neq 10^5$:

اگر شرط جری برقرار بود
 $\xi_2 = \left(\frac{10^5}{Re} \right)^{0.25} \xi_1$ را همان ξ_{nom} قرار می دهیم.

ضریب بارگیری - ضریب جریان :

$$\psi = \frac{W}{mV^2}$$

ضریب بارگیری

$$\psi = \frac{Ca (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1)}{V}$$

$$\phi = \frac{Ca}{u}$$

ضریب جریان

$$\begin{aligned}\psi &= \phi (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1) \\ \psi &= \phi (\tan \beta_2 + \tan \beta_1)\end{aligned}$$

* در نیروگاهها ضریب بارگیری و ضریب جریان کوچک است تا -
راندمان بالا برود اما در عوض تعداد پروها و سطح توربین افزایش
می یابد. اما در موتورهای توربوجت که نیاز به حجم کم دایره
این دو ضریب از نیروگاه هوائی بزرگتر خواهد بود. (ر شکل -
صفحه ۱۶)

نسبت عکس العمل (بازتاب) :

$$R = \frac{\text{افت انتالپی استاتیک در روتور}}{\text{افت انتالپی استاتیک در طبقه}} = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2}$$

$$R = \frac{h_1 - h_2}{\left(h_0 + \frac{C_0^2}{2}\right) - \left(h_2 + \frac{C_2^2}{2}\right)} = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{02}}$$

$$(C_0 = C_2) \quad , \quad (h_{00} - h_{01}) \quad \longrightarrow$$

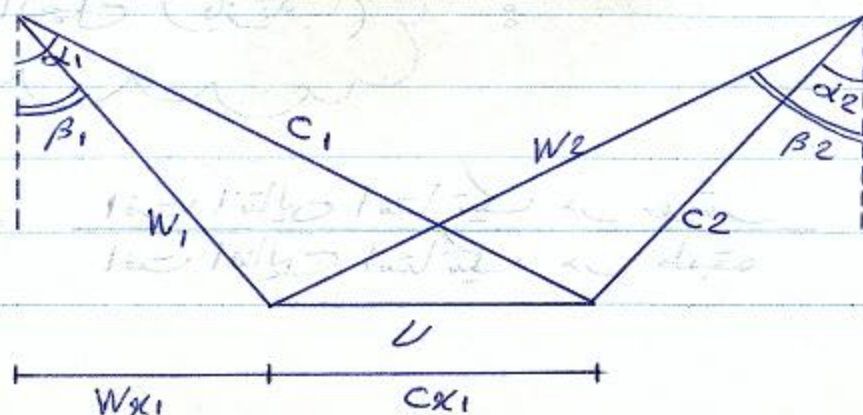
$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{01} - h_{02}}$$

$$(\text{علاقه 1}) : \quad \begin{aligned} h_{01} - h_{02} &= U (C_{x1} + C_{x2}) \\ &= U (W_{x1} + W_{x2}) \end{aligned}$$

$$(\text{علاقه 2}) : \quad \begin{aligned} h_{01 \text{ rel}} &= h_{02 \text{ rel}} \longrightarrow \\ h_1 + W_1^2/2 &= h_2 + W_2^2/2 \longrightarrow \\ h_1 - h_2 &= \frac{1}{2} (W_2^2 - W_1^2) \end{aligned}$$

$$R = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2U (W_{x1} + W_{x2})} = \frac{(W_{x2}^2 + C_{x2}^2) - (W_{x1}^2 + C_{x1}^2)}{2U (W_{x1} + W_{x2})}$$

$$R = \frac{W_{x2} - W_{x1}}{2U}$$



$$* \quad R = \frac{Ca (\tan \beta_2 - \tan \beta_1)}{2U}$$

$$R = \frac{\phi}{2} (\tan \beta_2 - \tan \beta_1) \quad (1)$$

$$\begin{cases} W_{x1} = C_{x1} - U \\ Ca \tan \beta_1 = Ca \tan \alpha_1 - U \\ \tan \beta_1 = \tan \alpha_1 - \frac{U}{Ca} \\ \tan \beta_1 = \tan \alpha_1 - \frac{1}{\phi} \end{cases} \quad (2)$$

(1), (2) $\rightarrow$

$$R = 0.5 + \frac{\phi}{2} (\tan \beta_2 - \tan \alpha_1) \quad (3)$$

$$\begin{cases} W_{x2} = C_{x2} + U \\ Ca \tan \beta_2 = Ca \tan \alpha_2 + U \\ \tan \beta_2 = \tan \alpha_2 + \frac{U}{Ca} \\ \tan \beta_2 = \tan \alpha_2 + \frac{1}{\phi} \end{cases} \quad (4)$$

(3), (4) $\rightarrow$

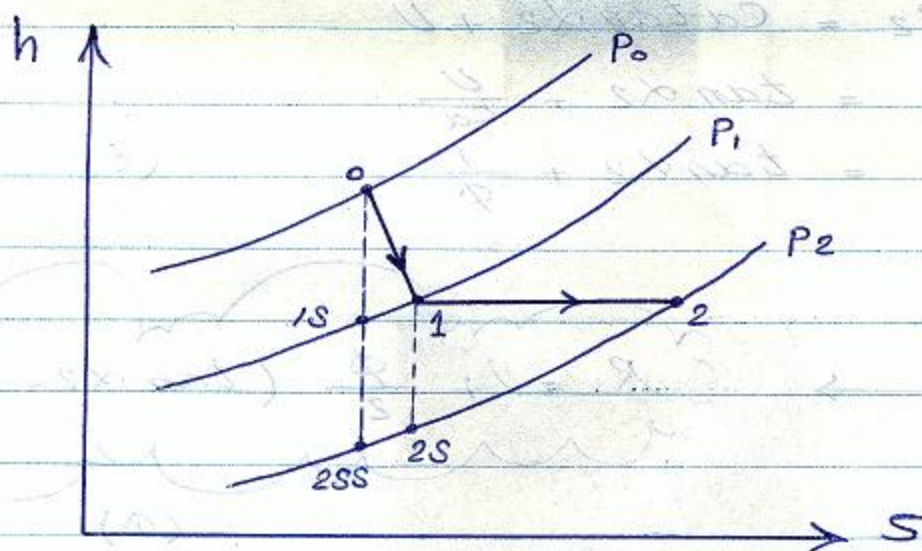
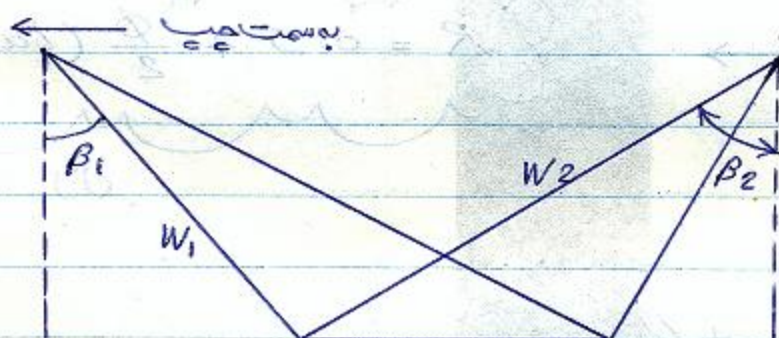
$$R = 1 + \frac{\phi}{2} (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (5)$$

$$0 \leq R \leq 100\%$$

* برش هیزه R :

$$\left\{ \begin{array}{ll} R = 0 \xrightarrow{\text{رابطه (1)}} \beta_2 = \beta_1 \\ R = 50\% \xrightarrow{\text{رابطه (3)}} \beta_2 = \alpha_1 \\ R = 100\% \xrightarrow{\text{رابطه (5)}} \alpha_2 = \alpha_1 \end{array} \right.$$

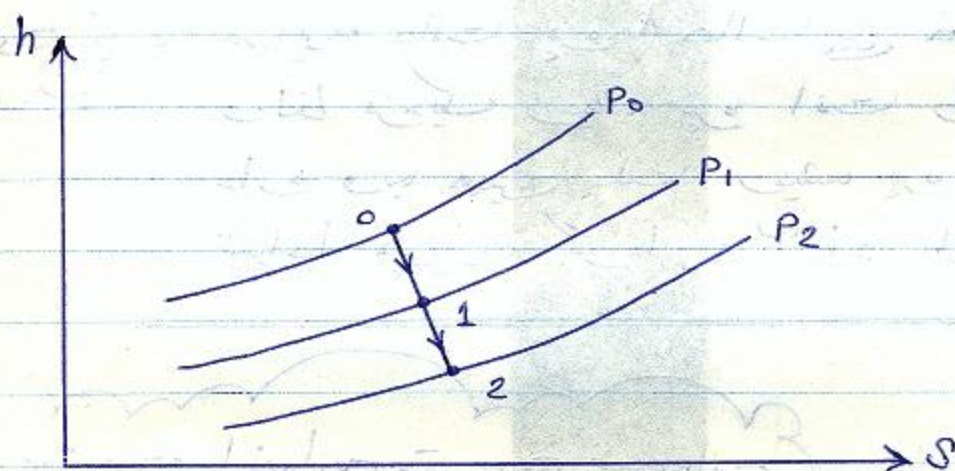
$R = 0$: حالت به نسبت چپ کشیده می شود :



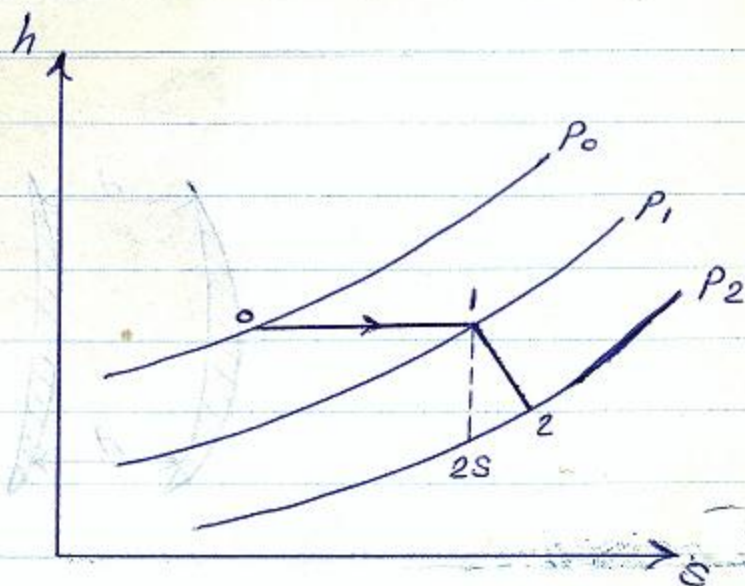
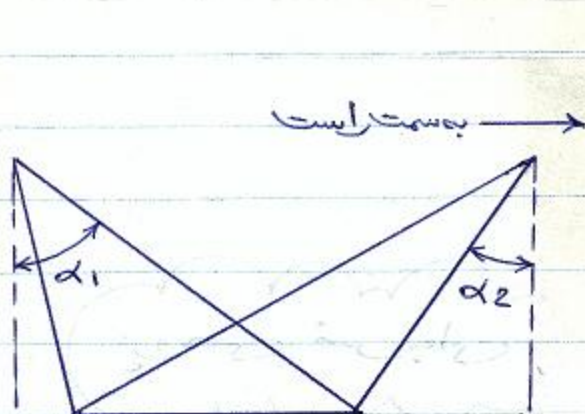
1-0 - افت انتالی در استاتور

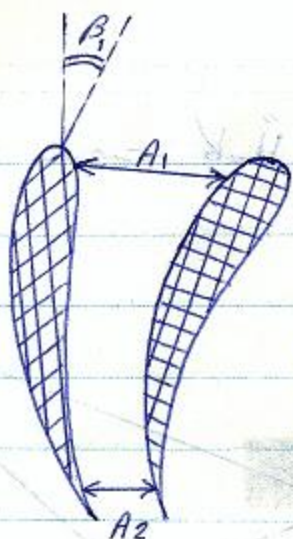
2-1 - افزایش آنتروپی در روتور

$R=50\%$: مثلث سرعت کاملاً متقارن است :



$R=100\%$: مثلث سرعت بیضی است کشیده می شود :





عکس العمل:

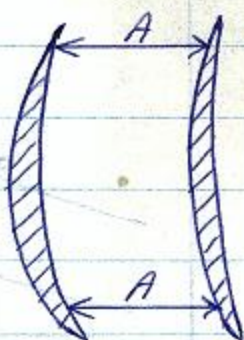
$$A_2 < A_1$$

ضربه‌ای: در این حالت پره‌ها حالت پیچ خورده دارند و لذا نزدیک ریشه پره افت رانندگی وجود دارد و به همین علت ریشه پره را براساس شرایط جریان گردابی آزاد طراحی می‌کنند.

مُسطح به‌ترین رانندگی خوبین ضربه‌ای:

$$\frac{U}{C_1} = \sin \alpha_{1/2}$$

« معمولاً α_1 برای تیغه‌های استاتور 65° تا 78° است »



پره‌های ضربه‌ای

برای این که افت انتالی نباشد باید به وسیله.

مسئله - مطلوبست طراحی یک توربین کوچک که حتی الامکان یک طبقه باشد. مشخصه‌های زیر را برای نقطه طراحی در نظر بگیرید:

دبی جرمی	20 kg/s
راندمان ایزنتروپیک توربین	90%
دمای ورودی	$T_{00} = 1100^\circ \text{K}$
افت دمای	$T_{00} - T_{02} = 145^\circ \text{K}$
نسبت فشار	$\frac{P_{00}}{P_{02}} = 1.873$
فشار ورودی	$P_{00} = 400 \text{ kPa}$
سرعت دورانی توربین	250 rps
سرعت در شعاع متوسط (U)	340 m/s

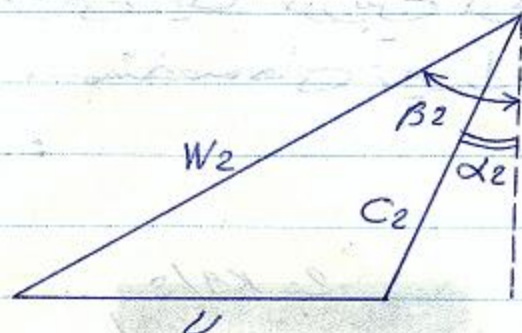
می‌توان ضریب افت شیپوره (α) را 0.05 و ضریب جریان را 0.8 در نظر گرفت. C_α ثابت است و سرعت ورود و خروج به طبقه برابر است ($C_0 = C_2$) و سرعت ورودی محوری است ($\alpha_1 = 0$).

$$\psi = \frac{W}{m U^2} = \frac{h_{00} - h_{02}}{U^2} = \frac{C_p (T_{00} - T_{02})}{U^2}$$

* برای گازهای حاصل از احتراق:

$$\begin{cases} C_p = 1.147 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \\ \gamma = 1.333 \end{cases}$$

$$\psi = \frac{1.147 (145)}{(340)^2} = 1.44 \quad (\text{kJ تبدیل به J شده})$$



محاسبه زوایا :

$$* W_{x2} = C_{x2} + U$$

$$\tan \beta_2 = \tan \alpha_2 + \frac{1}{\phi}$$

$$(\alpha_2 = \alpha_0) \rightarrow \tan \beta_2 = \tan 0 + \frac{1}{0.8}$$

$$\rightarrow \tan \beta_2 = 1.125$$

$$\begin{cases} R = \frac{\phi}{2} (\tan \beta_2 - \tan \beta_1) \\ \psi = \phi (\tan \beta_2 + \tan \beta_1) \end{cases} \xrightarrow{\tan \beta_1 \text{ با حذف}}$$

$$\tan \beta_2 = \frac{1}{2\phi} (\psi + 2R) \rightarrow$$

$$1.125 = \frac{1}{2(0.8)} (1.44 + 2R) \rightarrow$$

$$R = 0.28$$

* چون این مقدار R مناسب نیست (امکان بازتاب منفی وجود دارد) مقاری عرض در خروجی توپین اعمال می‌کنیم :

* α_2 هر چه کمتر باشد بهتر است $\alpha_2 = 10^\circ$ (فرغ)

$$\tan \beta_2 = \tan \alpha_2 + \frac{1}{\phi} = 1.426 \rightarrow$$

$$R = 0.421 \text{ بهتر}$$

$$\beta_2 \approx 55^\circ$$

$$* \psi = \phi (\tan \beta_1 + \tan \beta_2) \rightarrow$$

$$\tan \beta_1 = \frac{\psi}{\phi} - \tan \beta_2$$

$$(یا): R = \frac{\phi}{2} (\tan \beta_2 - \tan \beta_1) \rightarrow$$

$$\tan \beta_1 = \tan \beta_2 - \frac{2R}{\phi}$$

$$\rightarrow \tan \beta_1 = 1.426 - \frac{2(0.421)}{0.8} = 0.374$$

$$\rightarrow \beta_1 = 20.5^\circ$$

$$C_{x1} = W_{x1} + U$$

$$C_a \tan \alpha_1 = C_a \tan \beta_1 + U$$

$$\tan \alpha_1 = \tan \beta_1 - \frac{1}{\phi} = 0.374 + \frac{1}{0.8}$$

$$\tan \alpha_1 = 1.624 \rightarrow$$

$$\alpha_1 = 58.5^\circ$$

$$C_{a1} = U \phi = 340 (0.8)$$

عاسبه ابعاد

$$C_{a1} = 272 \text{ m/s}$$

$$C_1 = \frac{C_{a1}}{\cos \alpha_1} = \frac{272}{\cos (58.5)} = 519 \text{ m/s}$$

$$T_{00} = T_{01} = 1100^\circ \text{K} \rightarrow$$

$$T_1 = T_{01} - \frac{C_1^2}{2c_p} = 1100 - \frac{(272)^2}{2(1147)} \rightarrow$$

$$T_1 = 982.7^\circ \text{K}$$

$$* \xi_N = \frac{h_1 - h_{1s}}{0.5 C_1^2} = \frac{(T_1 - T_{1s}) c_p}{0.5 C_1^2}$$

$$T_{1s} = 0.5 \xi_N C_1^2 / c_p \quad \xi_N = 0.05 \rightarrow$$

$$982.7 - T_{1S} = 0.5 (0.05) (519)^2 / 1147 \rightarrow$$

$$T_{1S} = 976.2^\circ K$$

$$\left(\frac{T_{00}}{T_{1S}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(\frac{P_{00}}{P_1} \right) \rightarrow \left(\frac{1100}{976.2} \right)^4 = \left(\frac{4 \text{ bar}}{P_1} \right)$$

$$\rightarrow P_1 = 2.49 \text{ bar}$$

شرط جریان بحرانی در استاتور :

$$\frac{P_{00}}{P_{cr}} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$= \left(\frac{2.33}{2} \right)^4 = 1.853$$

$$\frac{P_{00}}{P_1} = \frac{4}{2.49} = 1.607$$

نسبت فشار ما به نسبت فشار بحرانی نرسیده (از نظر شرایط سرعت مانع) پس لازم نیست مراحل مسئله را دوباره تکرار کنیم. ($P_1 > P_{cr}$)

$$P_1 = \frac{P}{RT_1} = \frac{249}{0.287 (982.7)} = 0.0883$$

$$A_1 = \frac{\dot{m}}{P_1 C_d} = \frac{20}{0.0883 (272)} = 0.0833 \text{ m}^2$$

سطح مقطع جریان در ①
خروجی استاتور (چون یک طبقه از 2 تا 2 است)

* سطح گلوگاه شیبور تصویر مساحت فوق است :

$$\text{سطح گلوگاه شیبور} = A_1 \cos \alpha_1 = 0.0437 \text{ m}^2$$

$$C_0 = C_2 = \frac{C_a}{\cos \alpha_2} = 276.4 \text{ m/s}$$

$$T_0 = T_{\infty} - \frac{C_0^2}{2C_p} = 1100 - \frac{(276.4)^2}{2(1147)}$$

$$T_0 = 1067^\circ \text{K}$$

$$\frac{P_0}{P_{\infty}} = \left(\frac{T_0}{T_{\infty}} \right)^{\gamma/\gamma-1} \rightarrow \frac{P_0}{4} = \left(\frac{1067}{1100} \right)^4$$

$$P_0 = 3.54 \text{ bar}$$

$$P_0 = \frac{P_{\infty}}{RT_0} = \frac{3.54}{0.287(1067)} \rightarrow P_0 = 1.155$$

$$A_0 = \frac{\dot{m}}{P_0 C_a} \rightarrow A_0 = 0.0626$$

$$T_{02} = T_{\infty} - 14.5 = 955$$

$$T_2 = T_{02} - \frac{C_2^2}{2C_p} = 955 - \frac{276.4^2}{2(1147)} \rightarrow$$

$$T_2 = 922.8^\circ \text{K}$$

$$P_2 = P_{02} \left(\frac{T_2}{T_{02}} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left(\frac{4}{1.873} \right) \left(\frac{922}{955} \right)^4$$

$$P_2 = 1.856 \text{ bar}$$

$$P_2 = \frac{P_2}{R T_2} = 0.702$$

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{P_2 C_d} = 0.1047 \text{ m}^2$$



$$r_m \text{ (شعاع متوسط)} = \frac{U_m}{2 \pi N} = \frac{340}{2 \pi (250)}$$

$$r_m = 0.216 \text{ m}$$

$$A = 2 \pi r_m h = \frac{U_m}{N} h \rightarrow$$

$$\begin{cases} h = \frac{A N}{U_m} = A \left(\frac{250}{340} \right) \\ \frac{r_t}{r_r} = \frac{r_m + h/2}{r_m - h/2} \end{cases}$$

r_t - شعاع نوک پر
 r_r - شعاع ریشه پر



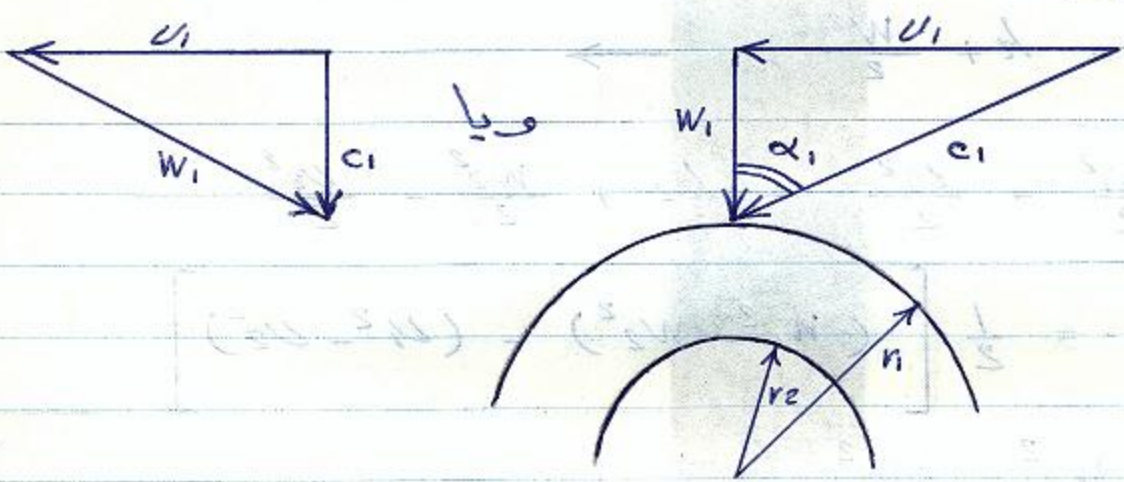
صفت	0	1	2
A	0.0626	0.0833	0.1042
h متر	0.046	0.0612	0.077
$\frac{r_t}{r_r}$	1.24	1.33	1.43

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تأسیسات مکانیکی
 طراحی - نظارت - اجرا
 نظام مهندسی: ۱۵۴۰۰-۱۷۲۷۶
 پروانه مهندسی: ۱۵۴۰۰-۰۲۸۱۵
 شماره شهرسازی: ۱۵۴-۰۱۲۲۲

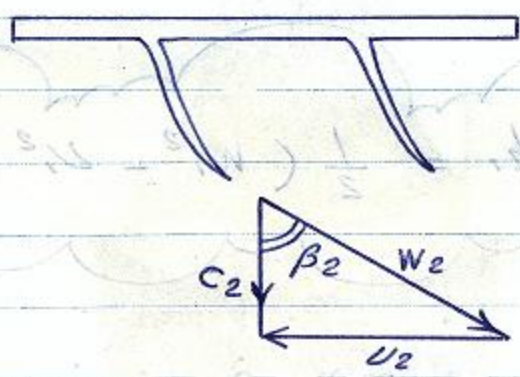
جزوه آموزشی درس توربو ماشین **آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز**
 دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران - دانشکده فنی (۱۳۷۳)

توربین های شعاعی :

* کاربرد آنها در مواقعی است که می خواهند در یک فاصله جمع و جور انرژی را انتقال دهند و قطر آنها معمولاً حدود 0.2m است و بیشتر در توربو شارژرهای موتور هواپیما، پمپ ۲ قشر نشانی و ... به کار می روند. این توربینها دور بسیار بالایی دارند و جریان در آنها 90° تخمین می یابد.



نمای نسبت به جهت شعاعی -
سنجیده می شود.



* در حین عبور از شیبوره ورودی :

$$h_0 + C_0^2/2 = h_1 + C_1^2/2 \rightarrow$$

$$h_1 - h_0 = \frac{1}{2} (c_0^2 - c_1^2) \quad (\text{مقطع 1-0})$$

* مطابق آنچه که در کمپرسورهای گریز از مرکز نشان داده شد در حین عبور سیال از روتور مقدار (I) ثابت است:

$$I = h_{0 \text{ rel}} - \frac{U^2}{2}$$

$$h_{0 \text{ rel}} = h + \frac{W^2}{2} \rightarrow$$

$$h_1 + \frac{W_1^2}{2} - \frac{U_1^2}{2} = h_2 + \frac{W_2^2}{2} - \frac{U_2^2}{2}$$

$$\begin{cases} h_2 - h_1 = \frac{1}{2} [(W_1^2 - W_2^2) - (U_1^2 - U_2^2)] \\ c_2^2 = W_2^2 - U_2^2 \end{cases} \rightarrow$$

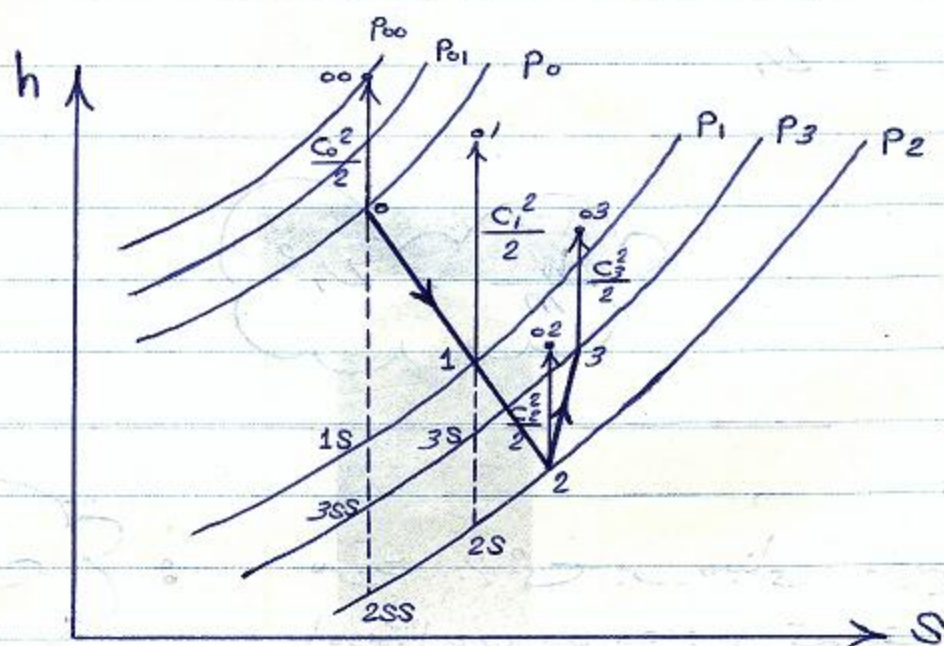
$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (W_1^2 - U_1^2 - c_2^2) \quad (\text{مقطع 1-2})$$

* در حین عبور از دیفیوزر خروجی: $h_{02} = h_{03}$

$$h_2 + c_2^2/2 = h_3 + c_3^2/2$$

$$h_3 - h_2 = \frac{1}{2} (c_2^2 - c_3^2) \quad (\text{مقطع 2-3})$$

* توربین شعاعی می تواند دارای دیفیوزر باشد یا نباشد.



$$\eta_{t(t-t)}^{(با\ دیفیوزر)} = \frac{h_{00} - h_{03}}{h_{00} - h_{03ss}}$$

$$\eta_{t(t-t)}^{(بدون\ دیفیوزر)} = \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{02ss}}$$

* مثلاً در (2s) تنها روتور ایده آل (بازگشت پذیر) است و در (2ss) هم روتور و هم نازل یا استاتور بازگشت پذیر است.

رابطه اولی :

$$\begin{cases} \frac{W}{m} = U_1 C_{X1} - U_2 C_{X2} = U_1 C_{X1} \\ C_{X1} = U_1 \end{cases} \rightarrow$$

$$\frac{W}{m} = U_1^2$$

سرعت جهشی بر مبنای تغییرات انتالی
ایده آل به صورت زیر تعریف می شود :

سرعت جهشی :

	کل به کل	کل به استاتیک
C_s^2 (با دیفیوزر)	$2(h_{00} - h_{03SS})$	$2(h_{00} - h_{3SS})$
C_s^2 (بی دیفیوزر)	$2(h_{00} - h_{02SS})$	$2(h_{00} - h_{2SS})$

$$\frac{W}{m} = h_{00} - h_{03SS} = \frac{C_s^2}{2} = U_1^2 \rightarrow$$

$$\frac{U_1}{C_s} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

بحث راندمان :

$$\eta_{t(t-s)} = \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{2ss}} \quad (\text{بوتن > جیفینز})$$

* پس از انجام عملیات خواص داشت :

$$\eta_{t(t-s)} = \left\{ 1 + \left[\xi_N \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \cos^2 \alpha_1 + \left(\frac{r_{2av}}{r_1} \right)^2 \left(\xi_R \cos^2 \beta_2 + \cot^2 \beta_2 \right) / 2 \right] \right\}^{-1}$$

$$\xi_N = \frac{h_1 - h_{1s}}{0.5 C_1^2}$$

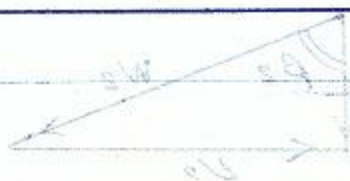
$$\xi_R = \frac{h_2 - h_{2s}}{0.5 W_2^2}$$

$$\text{معمولاً} : r_2 = \frac{r_{2t} + r_{2h}}{2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 - \left(\frac{U_1}{\alpha_1} \right)^2 (\gamma - 1) \left[1 - \cot^2 \alpha_1 + \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \cot^2 \beta_2 \right] / 2$$

$$\frac{T_2}{T_1} \approx 1 \quad \text{معمولاً} :$$

$$\alpha = \sqrt{\gamma R T}$$



$$\frac{1}{\eta_{t(t-t)}} = \left(\frac{1}{\eta_{t(t-s)}} \right) - \left[\left(\frac{r_{2av}}{r_1} \right)^2 \cot^2 \beta_{2av} \right] / 2$$

بدون دیفیوزر

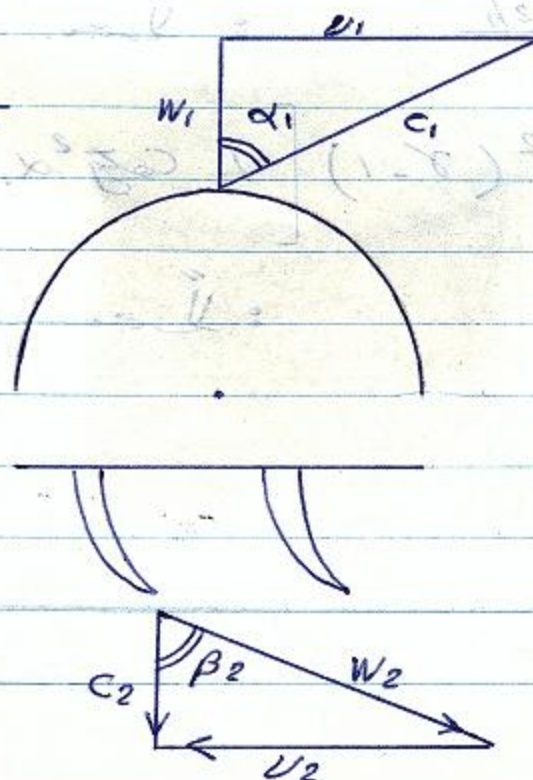


مسئله - یک توربین گاز شعاعی دارای یک سری پروپای ثابت ورودی بصورت شیبوره ، روتور با پروپای شعاعی و دیفیوزر محوری است . با رانندگی کم به کم 90% و طبق شرایط نقطه طراحی خود کار می کند. در ورود به توربین فشار و دمای سکون گاز $(P_{00}$ و T_{00}) - 400 KPa و 1140°K است . جریان خروجی از توربین در خروجی از دیفیوزر دارای فشار 100 KPa و سرعت ناچیز است . مطلوبست تعیین سرعت محیطی ورودی پر روتور (1) و زاویه شیبوره در خروجی آن (α_1) .

$$\gamma = 1.33$$

$$R = 0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_p = 1149$$

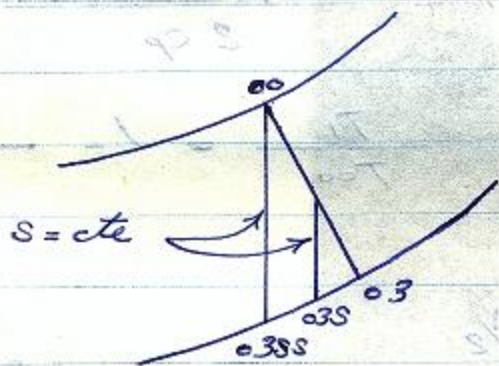


$$\frac{W}{m} = h_{00} - h_{03} = h_{01} - h_{02} = U_1^2$$

$$\eta_{t(t-t)} = \frac{h_{00} - h_{03}}{h_{00} - h_{03SS}} = \frac{h_{01} - h_{02}}{h_{00} - h_{03SS}} = \frac{U_1^2}{C_p(T_{00} - T_{03SS})}$$

$$= \frac{U_1^2}{C_p T_{00} \left[1 - \left(\frac{T_{03SS}}{T_{00}} \right) \right]} = \frac{U_1^2}{C_p T_{00} \left[1 - \left(\frac{P_{03}}{P_{00}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

* روابط انتروپی ثابت آنها بین نقاط واقع بر خطوط $s = \text{cte}$ در نمودار $(h-s)$ می توان نوشت.



$$0.9 = \frac{U_1^2}{1149(1140) \left[1 - \left(\frac{100}{400} \right)^{\frac{0.33}{1.33}} \right]}$$

$$U_1 = 587.4 \text{ m/s}$$

$$M_1 = \frac{C_1}{a_1}$$

* در خروجی از سیپوره :

$$\sin \alpha_1 = \frac{U_1}{C_1} \rightarrow C_1 = U_1 \operatorname{cosec} \alpha_1 \quad \frac{W}{m}$$

$$M_1 = \frac{C_1}{\alpha_1} = \frac{U_1 \operatorname{cosec} \alpha_1}{\alpha_1} \quad (1)$$

$$h_{00} = h_{01} \rightarrow \text{از طرف دیگر:}$$

$$h_{00} = h_1 + \frac{Q^2}{2} \rightarrow C_p T_{00} = C_p T_{01} + \frac{Q^2}{2}$$

$$\rightarrow T_{00} = T_1 + \frac{Q^2}{2 C_p}$$

$$T_{00} = T_1 + \frac{U_1^2 \operatorname{cosec}^2 \alpha_1}{2 C_p}$$

$$\frac{\text{تقسیم طرفین بر } (T_{00})}{\rightarrow} \quad \frac{T_1}{T_{00}} = 1 - \frac{U_1^2 \operatorname{cosec}^2 \alpha_1}{2 C_p T_{00}} \quad (2)$$

$$a_{00} = (\gamma R T_{00})^{1/2} \quad \text{از طرف دیگر:}$$

$$C_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \rightarrow$$

$$a_{00} = (C_p (\gamma - 1) T_{00})^{1/2} \rightarrow$$

$$C_p T_{00} = \frac{a_{00}^2}{\gamma - 1} \quad (3)$$

$$(2) \text{ و } (3) \rightarrow \frac{T_1}{T_{00}} = 1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{U_1^2 \operatorname{cosec}^2 \alpha_1}{a_{00}^2} \quad (4)$$

$$\frac{T_1}{T_{00}} = \left(\frac{a_1}{a_{00}} \right)^2 \quad (5) \quad \text{از آنجاست:}$$

و با اعمال رابطه (۱) :

$$\frac{T_1}{T_{\infty}} = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_{\infty}} \right)^2 = \frac{U_1^2 \operatorname{Cosec}^2 \alpha_1}{(M_1 \alpha_{\infty})^2} \quad (۶)$$

با مساوی قرار دادن طرفین روابط (۴) و (۶) :

$$\sin \alpha_1 = \left(\frac{U_1}{\alpha_{\infty}} \right) \left[\frac{1}{2} (\gamma - 1) + \frac{1}{M_1^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

جزء فرضی مسئله : فرض کنید جریان در خروجی از سیپوره خفه شده است (choking) یعنی -
 $M_1 = 1$ است .

$$\alpha_{\infty} = (\gamma R T_{\infty})^{\frac{1}{2}} = (1.33 \times 287 \times 1140)^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{\infty} = 660.4 \text{ m/s}$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{587.4}{660.4} \left[\frac{1}{2} (1.33 - 1) + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow$$

$$\alpha_1 = 73.9^\circ$$

خدمات فنی قابل ارائه از طرف شرکت مهندسی پتروپالامحور :

- طراحی سیستم های لوله کشی (Piping)
- طراحی سیستم های مکانیکی ثابت (Fixed Equipment)
- طراحی سیستم های مکانیکی دوار (Rotary Equipment)
- طراحی سیستم های تاسیسات مکانیکی و تهویه مطبوع (Plumbing & HVAC)
- طراحی تاسیسات مکانیکی زیربنائی
- طراحی سیویل و سازه در پروژه های عمرانی و صنعتی

