بسمه تعالی

جزوه

توربوماشین

دانشگاه

تهران

استاد

دکتر ریاسی

انواع توربو ماشین
- توان ده : انواع توربین
- توان گیر : پمپ، فن، کمپرسور

انواع توربو ماشین : ۱- تراکم پذیر ۲- تراکم ناپذیر

انواع توربو ماشین : ۱- سانتریفوژ (شعاعی) ۲- محوری ۳- مختلط

توربو ماشین : از دو کلمه توربو و ماشین تشکیل شده است. توربو کلمه ای است با ریشه لاتین به معنای چرخنده

- توربو ماشین ها ماشین هایی هستند که از یک و یا چند چرخ که بر روی محور محکم و با آن دوران می کنند تشکیل شده اند. هر چرخ از تعدادی پره که به صورت متقارن نسبت به محور قرار گرفته اند تشکیل می شوند. سیال حین عبور از بین پره ها با چرخ تبادل انرژی انجام می دهد

چرخ
- پروانه (Impeller) ← پمپ، فن
- روتور (Rotor) ← توربین گاز، کمپرسور
- رانر (Runner) ← توربین آب

انواع تقسیم بندی:

I) از نظر تراکم پذیری

- تراکم ناپذیر
  - انواع پمپ
  - توربین آبی
  - دانتیالاتور با نسبت فشار کم (فن)
- تراکم پذیر
  - توربین گاز
  - توربین بخار
  - کمپرسور

دانتیالاتور
- Fan ← تراکم ناپذیر
- Blower ← تراکم ناپذیر / تراکم پذیر
- Compressor ← تراکم پذیر

II) تبادل انرژی

توان ده ← انرژی سیال به چرخ منتقل می‌شود و چرخ دوران می‌کند ← انواع توربین

Turbine — Gen.

توان گیر ← انرژی مکانیکی از چرخ به سیال منتقل می‌شود ← پمپ، فن، کمپرسور

M — Pump / FAN / Comp.

III) مسیر حرکت سیال در چرخ:

سانتریفوژ (Centrifuged) ← شعاعی ← برای پمپ و فن

محوری (Axial)

نیمه سانتریفوژ و یا مختلط (Mixed)

IV) از نظر تغذیه چرخ:

کامل ← سیال اطراف چرخ را به طور کامل فرا می‌گیرد و سیال از تمام سطح چرخ وارد آن می‌شود

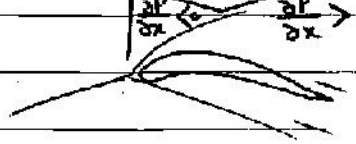
ناقص ← سیال از یک یا چند قسمت وارد سطح ورودی چرخ می‌شود ← توربین پلتون

V) تغییرات فشار استاتیک

Impulse (ضربه‌ای): فشار استاتیک در حین عبور از چرخ ثابت می‌ماند

Reaction (عکس العملی): فشار در حین عبور از چرخ تغییر می‌کند

$\frac{\partial P}{\partial x} < 0$ $\quad \frac{\partial P}{\partial x} > 0$

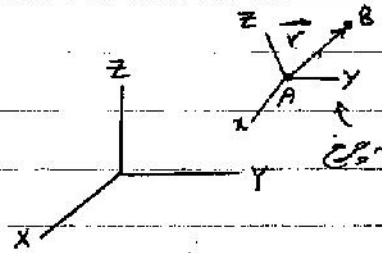


ساختمان توربوماشین:

۱- هدایت کننده ۲- چرخ ۳- دیفیوزر ثابت ۴- جمع کننده

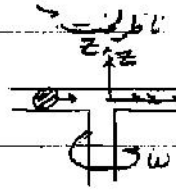
معمولا توربوماشین ها شامل ۴ قسمت فوق هستند که گاهی از آنها صرف نظر می‌شود

مقدمه‌ای بر مکانیک سیالات:



متصل به چرخ $\vec{V}_a = \vec{V}_A + \vec{V}_B|_R + \vec{\omega} \times \vec{r}_{ab}$

$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_B|_R + \vec{\alpha} \times \vec{r}_{ab} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}_{ab} + 2\vec{\omega} \times \vec{V}_{B|R}$



مثال: ناظری که از مرکز صفحه دور می‌شود $\vec{a}_B = 2\vec{\omega} \times \vec{V}_{B|R}$ ⊗

۱- پیوستگی: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} = 0 \Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

۲- قانون دوم نیوتون (N.S.): $\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{V}$ ($F = ma$ ، ma در واحد حجم)

$x\text{-Mom}: \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$

۳- قانون اول ترمودینامیک: $\delta Q - \delta W = dE$ (Q: + ، W: +)

$e = u + gz + \frac{V^2}{2}$

۴- قانون دوم ترمودینامیک: $\frac{ds}{dT} \geq \frac{Q}{T}$

معادلات: پایه (۴ معادله بالا)

حالت: $\rho = f(p, T)$

سازگاری: $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$

قضیه انتقال رینولدز:

sys. → RTT → C.V.

$$N = \begin{cases} N=m \\ N=\vec{P}=m\vec{V} \\ N=\vec{H}=\vec{r}\times m\vec{V} \\ N=E \end{cases} \qquad \eta=\frac{N}{m} \qquad \left(\frac{dN}{dt}\right)_{sys} = \frac{d}{dt}\left(\int_{C.V.}\eta\rho\,d\forall\right) + \int_{C.S.}\eta(\rho\vec{V}\cdot\vec{dA})$$

① $$0 = \frac{d}{dt}\int_{C.V.}\rho\,d\forall + \int_{C.S.}\rho\vec{V}\cdot\vec{dA}$$

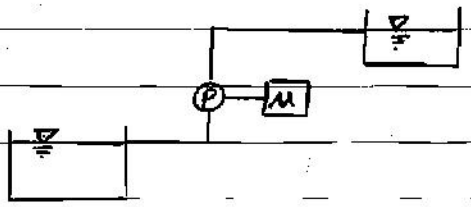
② $$\begin{cases} N=m\vec{V} \\ \eta=\vec{V} \end{cases} \quad \Sigma\vec{F} = \frac{d}{dt}\int_{C.V.}\vec{V}\rho\,d\forall + \int_{C.S.}\vec{V}(\rho\vec{V}\cdot\vec{dA})$$

③ $$\begin{cases} N=\vec{H}=\vec{r}\times m\vec{V} \\ \eta=\vec{r}\times\vec{V} \end{cases} \quad \Sigma\vec{T} = \frac{d}{dt}\int_{C.V.}\vec{r}\times\vec{V}\rho\,d\forall + \int_{C.S.}\vec{r}\times\vec{V}(\rho\vec{V}\cdot\vec{dA})$$

④ $$\begin{cases} N=E \\ \eta=e \end{cases} \quad \dot{Q}-\dot{W} = \frac{d}{dt}\int_{C.V.}e\rho\,d\forall + \int_{C.S.}\left(h+\frac{V^2}{2}+gz\right)(\rho\vec{V}\cdot\vec{dA})$$

پمپ

به ماشینی اطلاق می‌شود که انرژی مکانیکی را از یک منبع خارجی (موتور) گرفته و به سیال منتقل می‌کند.



یک چرخ دارد و مقداری

پمپ
- دینامیکی: انتقال انرژی به سیال به صورت دائمی صورت می‌پذیرد. ← توربوپمپ
- جابجایی مثبت: انتقال انرژی به سیال به صورت متناوب صورت می‌گیرد

توربوپمپ
- ساختمان ساده
- نسبت پایین جرم به قدرت مصرفی
- وزن پایین
- عدم نیاز به تبدیل حرکت رفت و برگشتی به دورانی

سید محمد مهدی سجادی

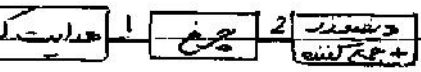
عدد پمپ از کلمه یونانی پمپس گرفته شده است

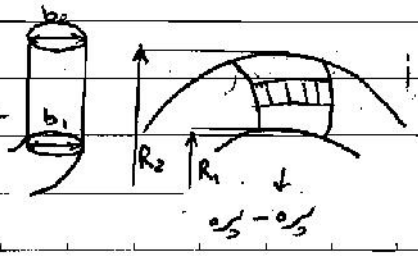
توربو پمپ ← سانتریفوژ ← هد بالا - فشار بالا ... به خاطر نیروی گریز از مرکز
دبی پایین یا متوسط
محوری ← هد یا فشار پایین - دبی زیاد
مختلط

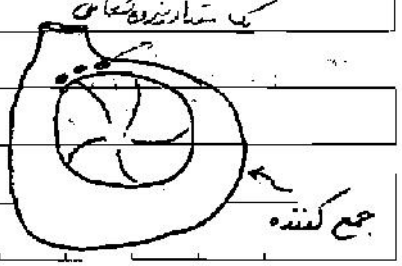
انواع پمپ‌ها
- دینامیکی
  - توربو پمپ
    - سانتریفوژ
    - محوری
    - مختلط
  - پمپ‌های خاص (دیره ندارند)
    - مکش زا
    - تکش گازی
    - تزریق آب
    - الکترومغناطیس
  - پمپ‌های حجمی
    - یک طبقه
    - چند طبقه
- ایجایی
  - رفت و آمدی
    - پیستونی
    - پلانجر
    - دیافراگمی
  - چرخشی
    - با یک چرخ
    - با چند چرخ

اجزای پمپ
- توزیع کننده O
- چرخ R
- دیفیوزر DF
- جمع کننده V

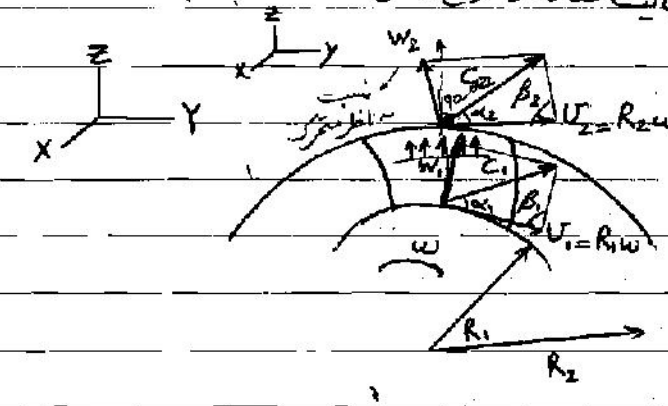
روابط اصلی و تئوری یک بعدی:







فرض ها یک بعدی
- جریان دائم
- پروفیل سرعت یکنواخت
- تعداد پره های بینهایت ← زاویه خروج ماس



$$\vec{C}_B = \vec{C}_A + \vec{C}_{B/A} + \vec{\omega} \times \vec{r}_{AB}$$

$$\angle(\vec{C}_2, \vec{U}_2) = \alpha_2$$

$$\angle(\vec{W}_2, \vec{U}_2) = \beta_2$$

* قاعده مثلث سرعت، سرعت خطی U_2 می باشد. $Q \propto C_m$

$$\begin{cases} C_u = C \cdot \cos\alpha \\ C_m = C \cdot \sin\alpha \end{cases} \qquad \begin{cases} W_u = W \cdot \cos\beta \\ W_m = W \cdot \sin\beta \end{cases}$$

معادله پیوستگی:

$$0 = \int_{C.S.} \rho \vec{C} \cdot d\vec{A} + \frac{d}{dt}\int_{C.V.} \rho \, dV \Rightarrow \dot{m} = \int_A \rho \vec{C} \cdot d\vec{A} = \int \rho C \sin\alpha \, dA$$

$$\Rightarrow \dot{m} = \rho \underbrace{C \sin\alpha}_{C_m} \cdot A = \rho C_m A$$

$$\circledast \quad 0 = \int_{C.S.} \rho \vec{W} \cdot d\vec{A} \Rightarrow \dot{m} = \rho \underbrace{W \sin\beta}_{W_m} A = \rho W_m A \Rightarrow Q = C_m A = W_m A$$

ارتفاع مثلث سرعت

معادله تومنتوم خطی:

$$\Sigma F = \int_{C.S.} \vec{C}(\rho \vec{C} \cdot d\vec{A}) \Rightarrow \Sigma F_x = \int_{A_2} C_{x_2}(\rho_2 C_{m_2} dA_2) - \int C_{x_1}(\underbrace{\rho C_{m_1} dA_1}_{\dot{m}\text{ ورودی}})$$

$\dot{m}$ خروجی

$$\Rightarrow \Sigma F_x = \dot{m}(C_{x_2} - C_{x_1}) \quad \text{(دقت کنید)}$$

معادله گشتاور زاویه ای (اویلر):

$$\Sigma T = \frac{d}{dt}\int_{C.V.} \vec{r} \times \vec{C}(\rho \, dV) + \int_{C.S.} (\vec{r} \times \vec{C})\rho \vec{C} \cdot d\vec{A} \Rightarrow M'' = \int RC\cos\alpha(\rho \vec{C} \cdot d\vec{A})$$

$$\Rightarrow M'' = \int_{A_2} R_2 C_2 \cos\alpha_2 (\rho_2 C_{m_2} dA_2) - \int_{A_1} R_1 C_1 \cos\alpha_1 (\rho_1 C_{m_1} dA_1)$$

M'': گشتاوری که بین چرخ و سیال مبادله می شود.

توان گیری M'' (ممان اصطکاک) ص ۷

M — m — Pump

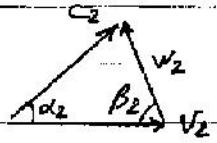
$$P'' = M''w \Rightarrow P'' = \int_{A_2} U_2 C_2 \cos\alpha_2 (\rho C_{m_2} dA_2) - \int_{A_1} U_1 C_1 \cos\alpha_1 (\rho C_{m_1} dA_1)$$

توان ده ← توربین ← Gen

$$\Rightarrow \begin{cases} M'' = \dot{m}'' (R_2 C_2 \cos\alpha_2 - R_1 C_1 \cos\alpha_1) \\ P'' = \dot{m}'' (U_2 C_2 \cos\alpha_2 - U_1 C_1 \cos\alpha_1) \\ E'' = \dfrac{P''}{\dot{m}''} = (U_2 C_2 \cos\alpha_2 - U_1 C_1 \cos\alpha_1) \longrightarrow [gh] = \dfrac{m^2}{s^2} \end{cases}$$

$$H'' = \frac{P''}{g\dot{m}''} = \frac{1}{g}(U_2 C_2 \cos\alpha_2 - U_1 C_1 \cos\alpha_1) = \frac{1}{g}(U_2 C_{u_2} - U_1 C_{u_1})$$

[m] ↓ — هد (دیلری پمپ)



$$H'' = \frac{1}{g}(\underbrace{U_2 C_{u_2}}_{U_2 C_2 \cos\alpha_2} - \underbrace{U_1 C_{u_1}}_{U_1 C_1 \cos\alpha_1})$$

$$W^2 = U^2 + C^2 - 2UC\cos\alpha \Rightarrow UC\cos\alpha = \frac{1}{2}(C^2 + U^2 - W^2)$$

حالا کمتر ← هد بیشتر ← ضریب عکس العمل بیشتر

$$\Rightarrow H'' = \frac{1}{2g}\left[\underbrace{(C_2^2 - C_1^2)}_{\text{تغییرات انرژی جنبشی}} + \underbrace{(U_2^2 - U_1^2)}_{\text{تغییرات انرژی پتانسیل}} + (W_1^2 - W_2^2)\right]$$

← ارتفاع اویلر

$H''_{dyn} = \dfrac{C_2^2 - C_1^2}{2g}$ ← ارتفاع دینامیک ، $\dfrac{(U_2^2 - U_1^2)}{2g} + \dfrac{W_1^2 - W_2^2}{2g} = H''_{pot}$ ← ارتفاع پتانسیل

هر چه بیشتر باشد تلفات بیشتر

$A = \dfrac{H''_{pot}}{H''}$ ضریب عکس العمل : نسبت ارتفاع پتانسیل به ارتفاع اویلر می باشد.

$H'' = \dfrac{1}{2g}\left[(C_2^2 - C_1^2) + (W_1^2 - W_2^2)\right]$ ← $U_1 = U_2$ ← R_1 ↑ ↑ R_2 ← * محوری

قانون اول ترمودینامیک :

$$\dot{Q} + \dot{m}\left(u_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{C_1^2}{2} + gz_1\right) = \dot{m}\left(u_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{C_2^2}{2} + gz_2\right) + \dot{w}$$

$$\Rightarrow E'' = \frac{\dot{w}}{\dot{m}} = \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho}\right) + \left(\frac{C_2^2 - C_1^2}{2}\right) + g(z_2 - z_1) + \left[(u_2 - u_1) - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}\right]$$

$$\Rightarrow H'' = \frac{\dot{w}}{\dot{m}g} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + h_{L_{1-2}}$$

- قانون دوم ترمودینامیک :

$$s_2 - s_1 \geq \int \frac{\delta Q}{T} \Rightarrow s_2 - s_1 \geq 0$$ آدیاباتیک

$$\begin{cases} H'' = \dfrac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + \dfrac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \dfrac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \\ H'' = \dfrac{p_2 - p_1}{\gamma} + \dfrac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + h_{L_{1-2}} \end{cases}$$ ← مساوی قرار دادن

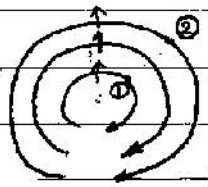
با در نظر گرفتن $\dfrac{p_2 - p_1}{\gamma} = \dfrac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \dfrac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + h_{L_{1-2}}}$$ ← گویند از کدام

← معادله انرژی برای دستگاه متحرک

← در توربین ها و پمپ ها :

$$w_1^2 - u_1^2 = w_2^2 - u_2^2$$



← در گردابه $w_1 = w_2 = 0 \Rightarrow \dfrac{p_1}{\gamma} - \dfrac{u_1^2}{2g} = \dfrac{p_2}{\gamma} - \dfrac{u_2^2}{2g}$

$$\Rightarrow \frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} \Rightarrow p_2 > p_1 \quad (u_2 > u_1 \text{ زیرا})$$

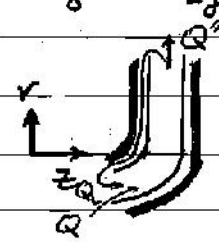
نکته : $A_1 = 2\pi R_1 b_1$ ، $A_2 = 2\pi R_2 b_2$

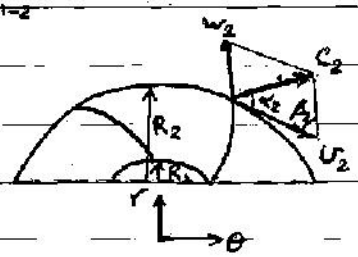
← رابطه هد اویلری و هد پمپ :

هد ورودی $\begin{cases} H'' = \dfrac{1}{g}(u_2 c_2 \cos\alpha_2 - u_1 c_1 \cos\alpha_1) = \dfrac{1}{g}(u_2 c_{u_2} - u_1 c_{u_1}) \\ H'' = \dfrac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + \dfrac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \dfrac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \quad ، \quad E'' = gH'' \end{cases}$ رابطه انرژی با هد (با در نظر گرفتن انتقال حرارت)

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + z_1 + H'' = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{c_2^2}{2g} + z_2 + h_{L_{1-2}} \Big/ \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} + z_1 - \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + z_2 - \frac{u_2^2}{2g} + h_{L_{1-2}}$$

$$\Rightarrow H'' = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + z_2 - z_1 + h_{L_{1-2}}$$





* معادلات انرژی برای قسمت های مختلف:

$$\frac{P_0}{\gamma}+\frac{C_0^2}{2g}+z_0=\frac{P_1}{\gamma}+\frac{C_1^2}{2g}+z_1+h_{L_{0-1}}$$

$$\frac{P_1}{\gamma}+\frac{C_1^2}{2g}+z_1+H''=\frac{P_2}{\gamma}+\frac{C_2^2}{2g}+z_2+h_{L_{1-2}}$$

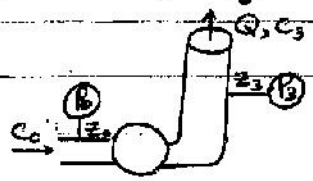
$$\frac{P_2}{\gamma}+\frac{C_2^2}{2g}+z_2=\frac{P_3}{\gamma}+\frac{C_3^2}{2g}+z_3+h_{L_{2-3}}$$

$$\oplus \Rightarrow H''=\frac{P_3-P_0}{\gamma}+\frac{C_3^2-C_0^2}{2g}+z_3-z_0+h_{L_{0-3}}$$

↓

معادله انرژی برای کل پمپ

نحوه اندازه گیری:



در پمپ $\Rightarrow H=\left(\frac{P_3}{\gamma}+\frac{C_3^2}{2g}+z_3\right)-\left(\frac{P_0}{\gamma}+\frac{C_0^2}{2g}+z_0\right)$

$H''=H+h_{L_{0-3}} \Rightarrow H''>H \Rightarrow \eta_H=\frac{H}{H''}$

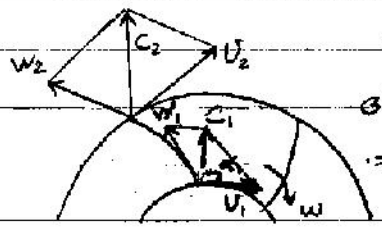
تلفات هیدرولیکی

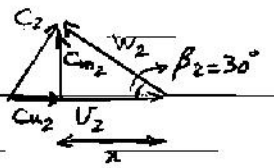
مثال: $d_2=30\,Cm$ ، $N=900\,rpm$ ، $Q=4000\,\frac{l}{min}$ ، $\beta_2=30^\circ$

$b_2=5\,Cm$ ، $\alpha_1=90^\circ \Rightarrow H''=?$

* معمولاً در طراحی $\alpha_1=90^\circ$ انتخاب می‌شود تا $U_1C_1\cos\alpha_1=0$ شود و در نتیجه هد پمپ افزایش یابد. برای انتخاب α_1های منفرجه باید از پره‌های خاصی استفاده شود که صرفه اقتصادی ندارد.

اگر $\alpha_1>90^\circ$ باشد گردابه داریم





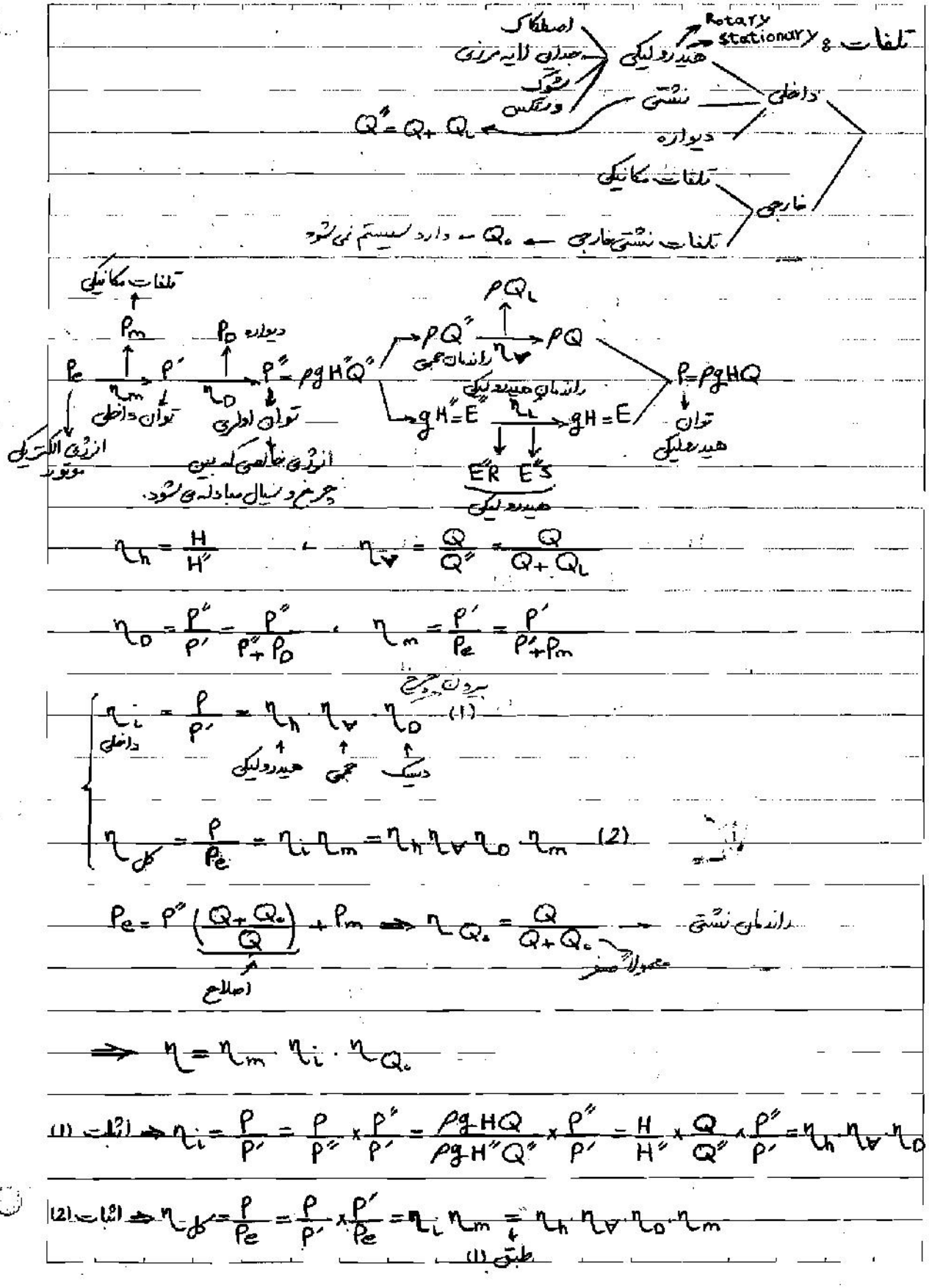
$$U_2=R_2\omega_2=0.15\times\frac{900\times2\pi}{60}=14.137\,m/s$$

$$Q=(2\pi R_2 b_2)C_{m_2} \Rightarrow C_{m_2}=\frac{Q}{2\pi R_2 b_2}$$

$$\Rightarrow C_{m_2}=\frac{\frac{4}{60}}{2\pi\times0.15\times0.05}=1.4\,m/s$$

$$tg\,30^\circ=\frac{C_{m_2}}{x} \Rightarrow x=\frac{C_{m_2}}{tg\,30^\circ}=\frac{1.4}{tg\,30^\circ}=2.44\,m/s \Rightarrow C_{u_2}=14.137-2.44=11.68\,m/s$$

$$\Rightarrow H''=\frac{1}{g}(U_2C_2\cos\alpha_2-U_1C_1\cos\alpha_1)=\frac{1}{g}\times14.137\times11.68=16.83\,m$$



$$\eta_h = \frac{H}{H''} \quad , \quad \eta_v = \frac{Q}{Q''} = \frac{Q}{Q+Q_L}$$

$$\eta_D = \frac{P''}{P'} = \frac{P''}{P''+P_D} \quad , \quad \eta_m = \frac{P'}{P_e} = \frac{P'}{P'+P_m}$$

$$\eta_i = \frac{P}{P'} = \eta_h \eta_v \eta_D \quad (1)$$

(بدون در نظر گرفتن تلفات مکانیکی)

η_i داخلی — η_h هیدرولیکی — η_v حجمی — η_D دیسک

$$\eta_{کل} = \frac{P}{P_e} = \eta_i \eta_m = \eta_h \eta_v \eta_D \eta_m \quad (2)$$

$$P_e = P'' \underbrace{\left(\frac{Q+Q_0}{Q}\right)}_{\text{اصلاح}} + P_m \Rightarrow \eta_{Q_0} = \frac{Q}{Q+Q_0}$$ — راندمان نشتی — معمولاً صفر

$$\Rightarrow \eta = \eta_m \eta_i \cdot \eta_{Q_0}$$

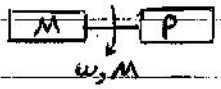
اثبات (1) $\Rightarrow \eta_i = \frac{P}{P'} = \frac{P}{P''} \times \frac{P''}{P'} = \frac{\rho g H Q}{\rho g H'' Q''} \times \frac{P''}{P'} = \frac{H}{H''} \times \frac{Q}{Q''} \times \frac{P''}{P'} = \eta_h \eta_v \eta_D$

اثبات (2) $\Rightarrow \eta_{کل} = \frac{P}{P_e} = \frac{P}{P'} \times \frac{P'}{P_e} = \eta_i \eta_m = \eta_h \eta_v \eta_D \eta_m$ (طبق (1))

منحنی های مشخصه و تشابه:

متغیرهای هیدرولیکی: Q و H

متغیرهای مکانیکی: ω و M گشتاور

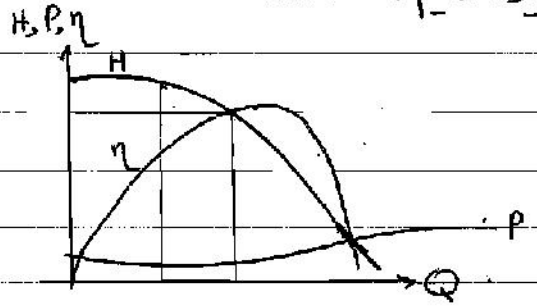


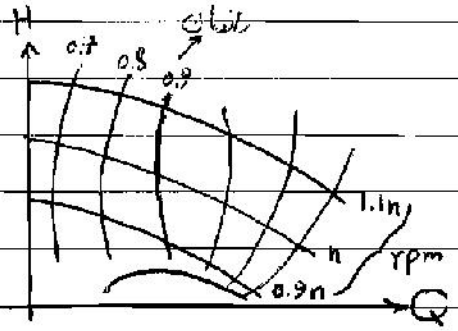
$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P_e = (M\omega)}$$

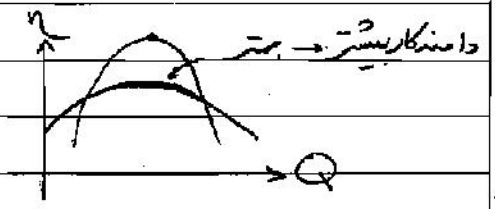
سطوح مشخصه

$$H = f(Q,\omega) \quad M = f(Q,\omega) \quad P = f(Q,\omega) \quad \eta = f(Q,\omega)$$

← برای یک پمپ سانتریفوژ داریم:

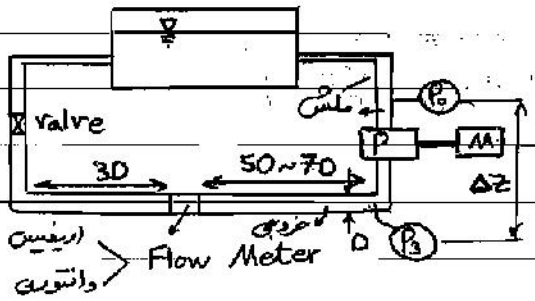


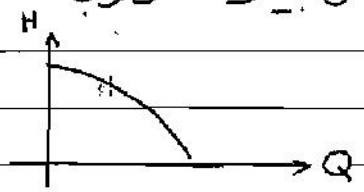




مدار تست پمپ:

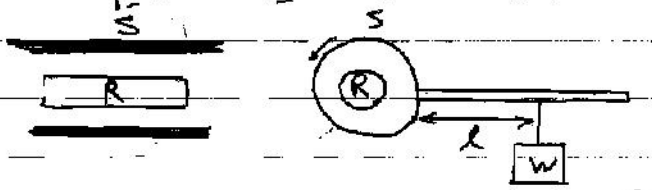
* قطر مکش بیشتر از قطر خروجی است.





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

* برای محاسبه گشتاور ، استاتور را ثابت قرار دادن یا تاقان هایی معلق می‌کنیم.



$M = lW$

$P = P_e = M\omega$

$P_e \xrightarrow{P_m} P_i \xrightarrow{P_D} P$

حال برای محاسبه راندمان داریم :

$$\eta = \frac{\rho g \check{H} \check{Q}}{M\omega}$$

* در نمودار های مشخصه :

Pump : $100^{mm} - 200^{mm}$

قطر لوله رانش ← قطر نامی پروانه (D_2)

تشابه : ← پیش بینی عملکرد مدل اصلی از روی مدل تست

← تعیین انواع مناسب یک ماشین براساس راندمان بیشتر برای هد، سرعت ودبی معین

انواع تشابه : ① تشابه هندسی ② تشابه دینامیکی ③ تشابه دینامیکی

تشابه دینامیکی ← جهت بردارها یکسان ← جهت بردارها یکسان

تشابه دینامیکی

* برای طراحی یک دستگاه باید پس از انتخاب سرعت که در H، N، Q سنجش، بیشترین بازده را داشته باشد.

تعداد جرم ↑ — تعداد ND

$$gH = f_1(Q, N, D, \rho, \mu, \ell_1, \ell_2, \dots)$$

راندمان ← $\eta = f_2(Q, N, D, \rho, \mu, \ell_1, \ell_2, \dots)$

توان الکتریکی ← $P_e = f_3(Q, N, D, \rho, \mu, \ell_1, \ell_2, \dots)$

پتانسیل ↑

$$\Psi = \frac{gH}{(ND)^2} = f_4\left(\frac{Q}{ND^3}, \frac{\rho N D^2}{\mu}, \frac{\ell_1}{D}, \dots\right)$$

$$\eta = f_5\left(\frac{Q}{ND^3}, \frac{\rho N D^2}{\mu}, \frac{\ell_1}{D}, \dots\right)$$

$$\hat{P} = \frac{P_e}{\rho N^3 D^5} = f_6\left(\frac{Q}{ND^3}, \frac{\rho N D^2}{\mu}, \frac{\ell_1}{D}, \dots\right)$$

بنابراین:

$\Psi = \frac{gH}{N^2D^2}$ ← گروه بی بعد هد

$\phi = \frac{Q}{ND^3}$ ← گروه بی بعد دبی

$\hat{P} = \frac{P_e}{\rho N^3 D^5}$ ← گروه بی بعد توان

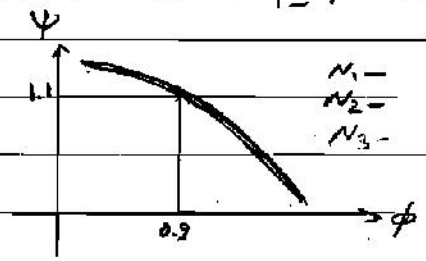
* در اکثر موارد ρ و g ثابت هستند و همچنین از روی نتایج آزمایشگاهی تأثیر عدد رینولدز بر Ψ، η، $\hat{P}$ ناچیز می باشد.

η، Ψ، $\hat{P} = f\left(\frac{Q}{ND^3}\right) = f(\phi)$ ← برای تمام توربوماشین‌ها

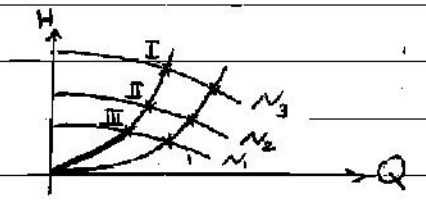
برای پمپ ← $\eta = \frac{\rho g H Q}{P_e} \Rightarrow \hat{P} = \phi\Psi/\eta$ ← M — P_e — P *

برای توربین ← $\eta = \frac{P_e}{\rho g H Q} \Rightarrow \hat{P} = \eta\phi\Psi$ ← T — P_e — Ge

* اگر نمودارها را بر اساس گروه‌های بی بعد رسم کنیم، به دلیل متشابه بودن، نمودارها منطبق خواهند شد.



$N_3 > N_2 > N_1$



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

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

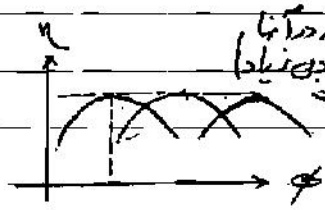
* نقاط I و II و III متشابهند

$\phi_I = \phi_{II} = \phi_{III}$

$\Psi_I = \Psi_{II} = \Psi_{III}$

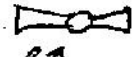
$\begin{cases} H \propto N^2 \\ Q \propto N \end{cases}$ ← (با کمی دقت به همین دلیل خوبی ترسیم می دهد.)

هندسه متغیر:



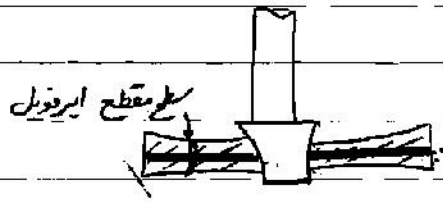
← این اتفاق بیشتر برای توربین‌های محوری می‌افتد

تغییر β ← تغییر زاویه چرخ ←



← بنابراین می‌توان در دبی‌های مختلف ناسان ماکزیمم گرفت.

$$\left.\begin{array}{l}\Psi = f_1(\phi,\beta) \\ \beta = f_3(\eta,\phi) = f_6(\phi,\Psi)\end{array}\right\} \quad , \quad \eta = f_2(\phi,\beta) \Rightarrow \eta = f_5(\phi,\Psi)$$



سرعت مخصوص: برای شرایط خاص مسأله، چه نوع توربا شینی نیاز است.

$$\left.\begin{array}{l}H \\ Q \\ N\end{array}\right\} \Rightarrow \text{Pump} = ? \qquad \left.\begin{array}{l}P \\ H \\ N \rightarrow \text{معمولاً ثابت}\end{array}\right\} \Rightarrow \text{Turbine} = ?$$

$$\phi_1 = \frac{Q}{ND^3} \quad , \quad \Psi_1 = \frac{gH}{N^2D^2} \quad , \quad \hat{P} = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \qquad m^3/s,\ m^3/hr$$

Ψ, ϕ حذف D بین ← $N_s = \dfrac{\phi_1^{\frac{1}{2}}}{\Psi_1^{\frac{3}{4}}} = \dfrac{N\sqrt{Q}}{(gH)^{\frac{3}{4}}}$ ← پمپ: $N_s = \dfrac{N\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$ (rpm) ↑ ، ↓ بعددار

$\Psi, \hat{P}$ حذف D بین ← $N_s = \dfrac{\hat{P}^{\frac{1}{2}}}{\Psi_1^{\frac{5}{4}}} = \dfrac{N\sqrt{P}}{\rho^{\frac{1}{2}}(gH)^{\frac{5}{4}}}$ ← توربین: $N_s = \dfrac{N\sqrt{P}}{H^{1.25}}$ (kW) ↑ ، ↓ بعددار

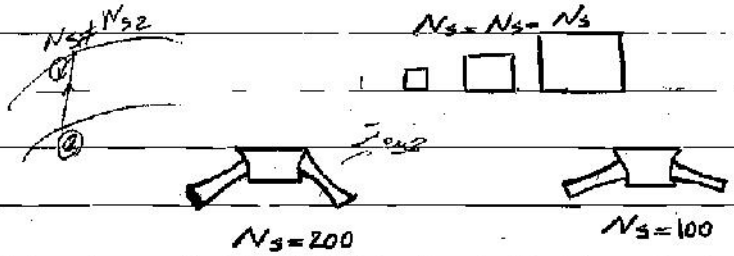
* سرعت مخصوص فقط در نقطه راندمان بیشینه تعریف می‌شود.

نکته ۱:

N_s ← محوری ← سانتریفوژ

نکته ۲: در توربوماشین‌ها معمولاً N ثابت است.

* در توربوماشین های متشابه، N_sها برابر است. (فقط در شرایط راندمان بیشینه)



*فقط در شرایط راندمان بیشینه می‌توان N_sها را مساوی قرار داد.

نقش قسمت های مختلف پمپ بر روی عملکرد:

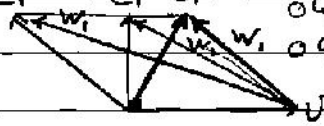
هدایت کننده:

$$H = \eta_H H'' = \frac{\eta_H}{g}(U_2 C_2 \cos\alpha_2 - U_1 C_1 \cos\alpha_1) = \frac{\eta_H U_2}{g}\left(C_2 \cos\alpha_2 - \frac{R_1}{R_2} C_1 \cos\alpha_1\right)$$

اگر $\alpha_1 < 90 \rightarrow C_1 U_1 \cos\alpha_1 > 0 \rightarrow$ بهترین حالت

اگر $\alpha_1 = 90 \rightarrow C_1 U_1 \cos\alpha_1 = 0$

اگر $\alpha_1 > 90 \rightarrow C_1 U_1 \cos\alpha_1 < 0 \rightarrow$ بهترین حالت



برای اینکه $\alpha_1 < 90°$ باشد، باید هدایت کننده مجهز به پره‌هایی باشد که به سرعت مطلق ورودی مؤلفه‌ای در خلاف جهت چرخش پره بدهد. چون هزینه افزایش پیدا می‌کند از آن صرفنظر و $\alpha_1 = 90°$ در نظر گرفته می‌شود.

$$H' = \frac{1}{g}(U_2 \cdot Cu_2)$$

چرخ: (صرفنظر از z) هد خالص

$$H'' = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2g} + h_{L\,1-2}$$

سطح مقطع ورودی و خروجی یکسان (فقط وظیفه هدایت کننده، یکسان، discharge یکسان)

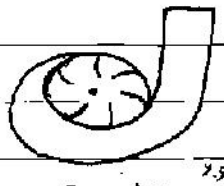
ضریب عکس العمل $A = \frac{P_2 - P_1}{\rho g H} \Rightarrow A = \frac{P_2 - P_1}{P_3 - P_0}$, $\left(\begin{matrix} C_0 = C_3 \\ z_0 = z_3 \end{matrix}\right)$

$\xrightarrow{P_0 = P_e}$ $A = \frac{P_2 - P_0}{P_3 - P_0}$

افت فشار در هدایت کننده کم می‌باشد.

0	1	2	3
	هدایت کننده	چرخ	دیفیوزر

- دیفیوزر = مجرای کنده



$$\frac{c_2^2}{2g} = \frac{c_3^2}{2g} + \frac{P_3 - P_2}{\rho g} + h_{L\,2-3}$$

$c_3 = cte$ (معمولاً بالای ۹۵٪)

$$\eta_{VD} = \frac{\frac{P_3 - P_2}{\gamma} + \frac{c_3^2}{2g}}{\frac{c_2^2}{2g}} = 1 - \frac{h_{L\,2-3}}{c_2^2/2g}$$

← راندمان دیفیوزر

* با افزایش سطح مقطع، فشار استاتیک را ثابت نگه می‌دارند.

مثال: برای یک توربین آبی | $Q = 187.5\ m^3/s$ | $H = 140\ m$ (مخالف دو طرف توربین) | $D = 4.5\ m$ | $N = 187.5\ rpm$ | $\eta = 0.95$ (راندمان واقعی)

و برای مدل | $H = 20\ m$ | $D = 35\ cm$ | مطلوب است توان، سرعت

مدل تست

دورانی مدل و دبی مدل؟

$$\Psi = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad \Psi_p = \Psi_m \rightarrow \frac{9.81 \times 140}{(187.5)^2 (4.5)^2} = \frac{9.81 \times 20}{N_m^2 \times 0.35^2} \rightarrow N_m = 911.1\ rpm$$

$$\Phi = \frac{Q}{ND^3} \quad \Phi_p = \Phi_m \rightarrow \frac{187.5}{187.5\,(4.5)^3} = \frac{Q_p}{911.1\,(0.35)^3} \rightarrow Q_p = 0.428\ m^3/s$$

$$\Rightarrow Q_p = 1543\ m^3/hr$$

تشابه کامل نیست چون نمی‌توان ویسکوزیته را ثابت در نظر گرفت.

$$\hat{P} = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \rightarrow \hat{P}_p = \hat{P}_m \rightarrow \frac{0.95\,(9810 \times 140 \times 187.5)}{\rho \times 187.5^3 \times 4.5^5} = \frac{P_m}{\rho \times 911.1^3 \times 0.35^5}$$

$$\Rightarrow P_m = 13.2\ MW$$

کلمه ۲ انواع تشابه

① تشابه هندسی ← مقیاس طول با هم متناسب

② تشابه سینماتیک ← پیش‌فرض: تشابه هندسی داشته باشد ← مقیاس زمان با هم متناسب $V = \frac{L}{t}$

③ تشابه دینامیکی ← شرط لازم و نه کافی برای تشابه دینامیکی، داشتن تشابه هندسی و سینماتیک است.

* ممکن است مدل تست و مدل واقعی تشابه هندسی و سینماتیک داشته باشند ولی تشابه دینامیکی نداشته باشند.

* هنگامی که تشابه دینامیکی برقرار است، یعنی اینکه تمام گروه‌های بدون بعد برابرند و همچنین تشابه هندسی و تشابه سینماتیکی نیز برقرارند.

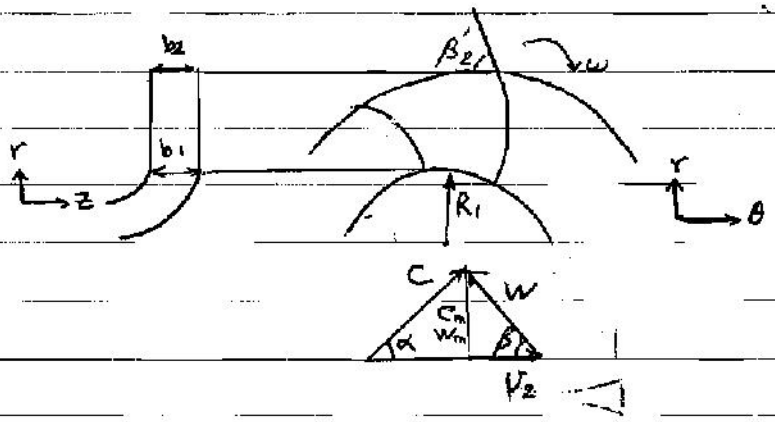
*تشابه کامل:

تشابه کامل
- تشابه هندسی
- تشابه سینماتیکی
- تشابه دینامیکی

تشابه هندسی: همه گروه های بی بعد به هر یک گروه باهم برابر باشند، همه گروه های بی بعد باهم برابرند.

*تشابه ناقص ← یکی از گروه‌های بی بعد را نمی‌توان برابر قرار داد.

مشخصات ایده آل پمپ:



فرض ها:

- تعداد پره ها بینهایت ← زاویه خروجی β با زاویه چرخ برابر است.
- یک بعدی

$$H'' = \frac{1}{g}(U_2 C_2 \cos\alpha_2 - U_1 C_1 \cos\alpha_1) \xrightarrow{\alpha_1 = 90^\circ} H'' = \frac{1}{g} U_2 C_2 \cos\alpha_2$$

از طرفی: $C_2 \cos\alpha_2 = C_{u_2} = U_2 - C_{m_2} \operatorname{Cotg}\beta'_2$

$$\Rightarrow H'' = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} C_{m_2} \operatorname{Cotg}\beta'_2 \quad (*)$$

همچنین: $C_{m_2} = \frac{Q''}{A_2}$ ، $A_2 = 2\pi R_2 \times b_2 \times K_2$ ← ضخامت جسم از سطح مقطع می کاهد

ضریب انسداد

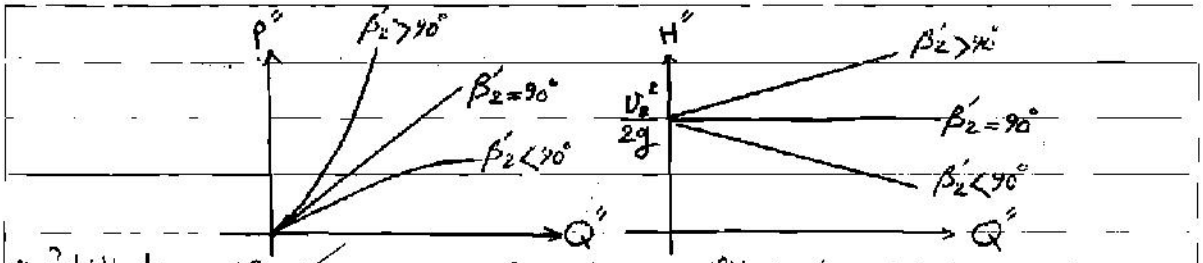
$2\pi R_2 K_2 = 2\pi R_2 - Z \frac{e_2}{\sin\beta'_2}$ ← ضخامت پره ، تعداد پره

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

$$(*) \Rightarrow H'' = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \frac{Q''}{2\pi R_2 b_2 K_2} \operatorname{Cotg}\beta'_2$$

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

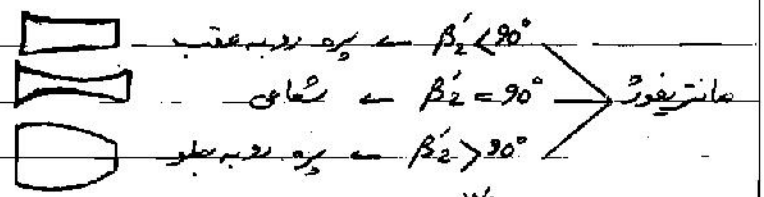
$$P''_{\infty} = \gamma Q'' H''_{\infty} = \gamma\left(\frac{U_2^2}{g}Q'' - \frac{U_2}{g}\frac{Q''^2}{2\pi R_2 b_2 K_2}\operatorname{Cotg}\beta'_2\right)$$

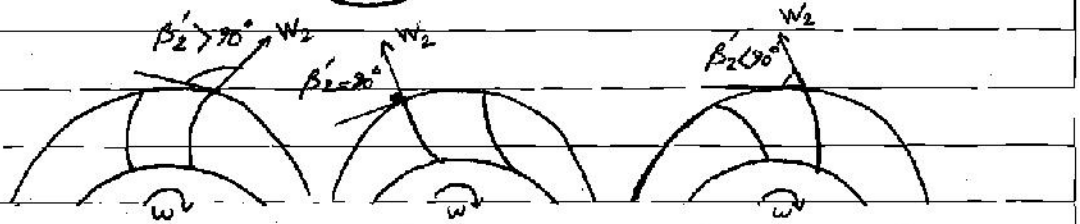


برای چرخ های سانتریفوژ: در ابعاد ثابت رو به جلو هد بیشتری می دهد. در بازدهی دو پره جلو با افزایش دبی بار روی موتور زیاد می شود

($\beta'_2<90$ backward ، $\beta'_2=90$ radial ، $\beta'_2>90$ forward)

↓ پره رو به عقب B ، ↓ شعاعی R ، ↓ رو به جلو F





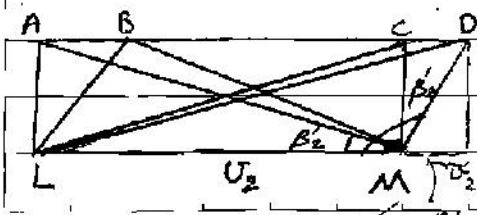
ب معمولا B
کثیر سور B-R
فن B-R-F

بیشترین نشار تبدیل می کند، راندمان بالاتر

* Backward : ضریب عکس العمل بالاتر ـ بازده بیشتر ـ منحنی هد دبی پایدار
* Radial : سرعت دورانی بالا ـ انتقال ذرات گاز بایامد ـ ذرات گیر نمی افتند
* Forward : هد دبی ثابت ارتفاع بیشتری تولید می کنند ـ سایز کوچکتر ← هواسان

نادیه خروجی و ضریب عکس العمل:

۴ پره با سرعت دورانی و دبی یکسان را در نظر می گیریم



$C_{m_2} = cte$

$U_2 = cte$

شکل بد کشیدم

Backward ← ALM ← $\beta_2' < 90^\circ$ ← $Cu_2 = 0$

Radial ← CLM ← $\beta_2' = 90^\circ$ ← $Cu_2 = U_2$

Forward ← DLM ← $\beta_2' > 90^\circ$ ← $Cu_2 = 2U_2$

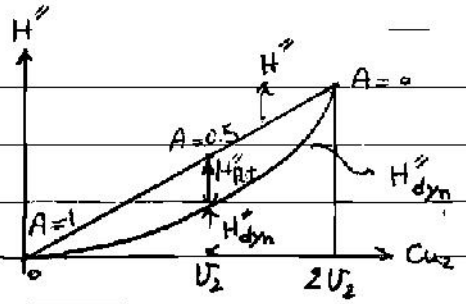
$$H'' = H''_{Pot} + H''_{dyn} = \frac{1}{g} U_2 Cu_2$$

دینامیکی ← پتانسیل

$$H''_{dyn} = \frac{C_2^2 - C_1^2}{2g} = \frac{C_2^2 - Cm_1^2}{2g} \xrightarrow{A_1 = A_2} H''_{dyn} = \frac{C_2^2 - Cm^2}{2g} = \frac{Cu_2^2}{2g}$$

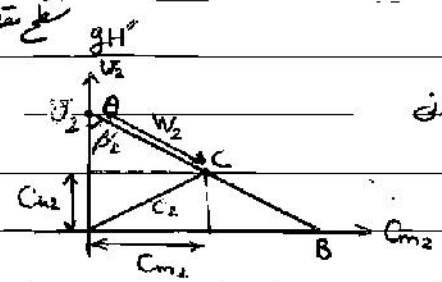
$$\Rightarrow H''_{Pot} = H'' - H''_{dyn} = \frac{Cu_2}{g}\left(U_2 - \frac{Cu_2}{2}\right) \Rightarrow A = \frac{H''_{Pot}}{H''} = 1 - \frac{Cu_2}{2U_2}$$

△	H''	H''_{dyn}	H''_{Pot}	A	
ALM	0	0	0	1	
LCM	$\frac{U_2^2}{g}$	$\frac{1}{2g}U_2^2$	$\frac{1}{2g}U_2^2$	0.5	$\beta_2' \uparrow \Rightarrow A \downarrow, \eta \downarrow$
DLM	$\frac{2U_2^2}{g}$	$\frac{2U_2^2}{g}$	0	0	



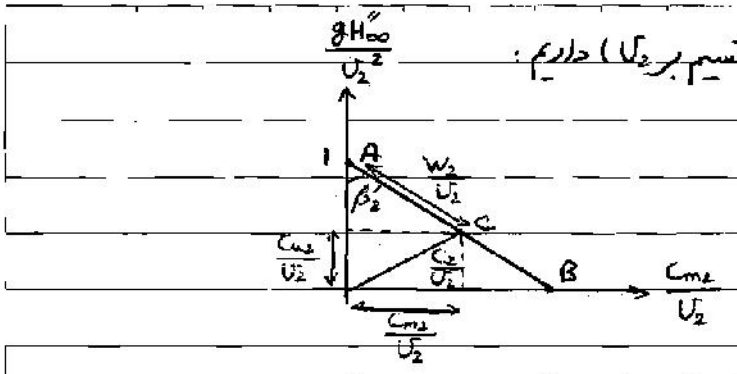
$$\frac{gH''_{\infty}}{U_2} = U_2 - \frac{Q''}{2\pi k_2 R_2 b_2} Cotg\beta_2' = U_2 - Cm_2 Cotg\beta_2'$$

سطح مقطع

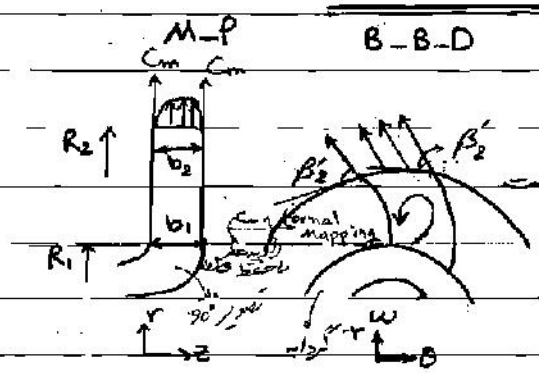


AB : مکان هندسی مثلث سرعت‌هایی که زاویه‌ی خروجی آن β_2' بوده و با سرعت دورانی U_2 حرکت می‌کنند.

با نرمالایز کردن نمودار صفحه قبل (تقسیم بر U_2) داریم:



* برای پمپ های صنعتی معمولاً از $18° < \beta'_2 < 30°$ استفاده می‌شود



تصحیح فرضیات تئوری یک بعدی:

برای جریان یک بعدی فرض کردیم:

① تعداد پره ها بینهایت ② پروفیل سرعت یکنواخت

③ جریان یک بعدی

$\rightarrow \beta_2 < \beta'_2 \quad \delta = \beta'_2 - \beta$

* تقریب اولیه جریان پتانسیل (بدون لزجت) برای طراحی استفاده می‌شود ← هنوز لزجت را در نظر نگرفتیم

Quasi 3D-Metral: جریان ابتدا در صفحه B-B یک بعدی فرض شده و تأثیر دو بعدی بودن در صفحه MP بررسی می‌شود یا عکس.

تعداد پره‌ها

$$H''_{\infty\text{-Non Uniform}} = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} \textcircled{K} \overline{C_{m_2}} \operatorname{Cotg}\beta'_2 \qquad \beta_2 = \beta'_2 \text{ ابتدا}$$

$$\rightarrow \boxed{K > 1}$$

$$\Downarrow$$

$$H''_{\infty\text{-nU}} < H''_{\infty\text{-U}}$$

$$H''_{\infty\text{-Uniform}} = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} C_{m_2} \operatorname{Cotg}\beta'_2 \quad \text{(یک بعدی)}$$

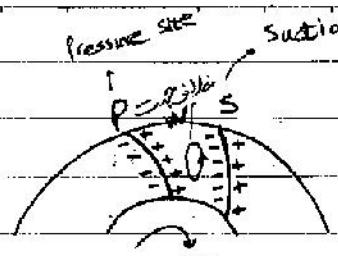
در بعضی مراجع دیگر داریم:

$$C_H = \frac{H''_{\infty\text{-nU}}}{H''_{\infty U}} \rightarrow (1-K)\frac{U_2}{C_{m_2}} + K \rightarrow C_H < 1$$

$$C_H = (1-K)\frac{U_2}{C_{m_2}} + K \leftarrow \text{آزاد}$$

$\frac{U_2}{C_{m_2}} \simeq 2$ ← Backward پمپ‌های

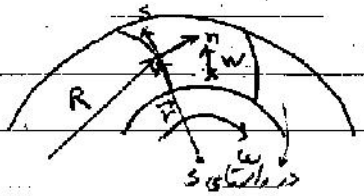
ضریب لغزش



* این اختلاف فشار باعث به وجود آمدن گردابه می‌شود.
گشتاور وارد بر چرخ از طریق پره‌ها به سیال منتقل می‌شود.
طرفین هر پره اختلاف فشاری متناسب با گشتاور ایجاد می‌شود.
با کاهش پره‌ها، بار هر پره افزایش یافته و اختلاف فشار طرفین آن

$$\begin{cases} H'' = \dfrac{U_2^2}{g} - \dfrac{U_2}{g}\cdot\dfrac{Q''}{2\pi R_2 b_2 K_2}\operatorname{Cotg}\beta_2 \\ H''_\infty = \dfrac{U_2^2}{g} - \dfrac{U_2}{g}\cdot\dfrac{Q''}{2\pi R_2 b_2 K_2}\operatorname{Cotg}\beta'_2 \end{cases} \quad ,\ \beta_2 < \beta'_2 \Rightarrow H'' < H''_\infty$$

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



دستگاه معادله بر روی منحرک

$$\begin{cases} s: & \dfrac{\partial}{\partial s}\left(\dfrac{P}{\rho} - \dfrac{U^2}{2}\right) + W\dfrac{\partial W}{\partial s} = 0 \\ n: & \dfrac{\partial}{\partial n}\left(\dfrac{P}{\rho} - \dfrac{U^2}{2}\right) - \dfrac{W^2}{R} + 2W\omega = 0 \quad (2) \end{cases}$$

معادله برنولی انتگرال

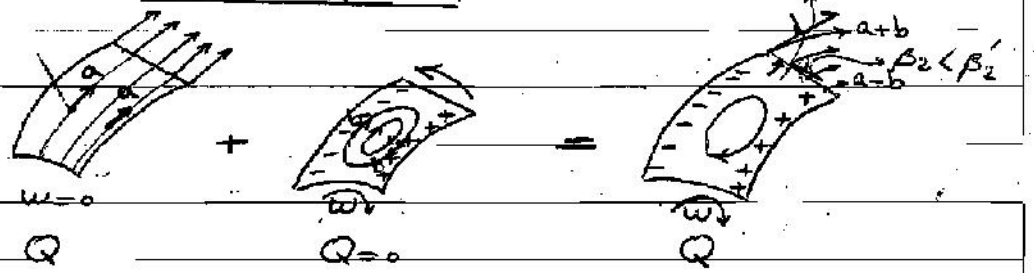
$$\frac{P}{\rho} + \frac{\omega^2}{2} - \frac{U^2}{2} = \text{cte}$$

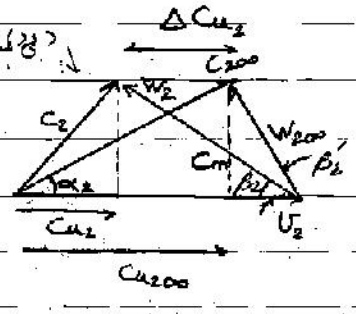
دستگاه معادله بر روی منحرک

برنولی

$$\frac{P}{\rho} - \frac{U^2}{2} = -\frac{W^2}{2} \xrightarrow{(2)} \frac{W}{R}\frac{\partial W}{\partial n} = -2W\omega \Rightarrow \omega = \frac{1}{2}\left(\frac{W}{R} + \frac{\partial W}{\partial n}\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial W}{\partial n} = -\frac{W}{R} + 2\omega}$$





$$H'' = \frac{1}{g}(U_2 Cu_2 - U_1 Cu_1)$$

$$\mu = \frac{Cu_2}{Cu_{2\infty}} = \frac{U_2 Cu_2/g}{U_2 Cu_{2\infty}/g} = \frac{H''}{H''_\infty}$$

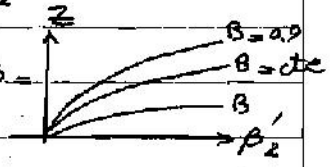
اگر $\alpha_1 = 90^\circ$

$$\Rightarrow \boxed{H'' = \mu H''_\infty \quad , \quad 0.65 < \mu < 0.8 \quad (\mu < 1)}$$

* استانوف پیشنهاد کند که $\mu = 0.83$ در نظر گرفته شود. $H'' = H''_\infty \mu Cu$
* ضرایب C_u و μ بدون در نظر گرفتن اثرات یکدیگر می‌باشند.

روش بوزلن: برای محاسبه μ:

$$\mu = \frac{B - c\phi \cot g \beta'_2}{1 - \phi \cot g \beta'_2} \quad , \quad \phi = \frac{Cm_2}{U_2}$$



اگر: $\frac{R_2}{R_1} \geq \exp\left(2\pi \frac{\sin \beta'_2}{Z}\right) \Rightarrow C = 1$ ، $B =$ (تعداد پره)

با این ساده سازی خواهیم داشت:

$$\mu = 1 - \frac{1 - B}{1 - \phi \cot g \beta'_2} \quad , \quad B = 1 - \frac{\Delta Cu_2}{U_2}$$

روش استودولا: برای محاسبه μ:

$$\Delta Cu_2 = \frac{wa}{2}$$

$$a = \frac{2\pi R_2}{Z} \sin \beta'_2$$

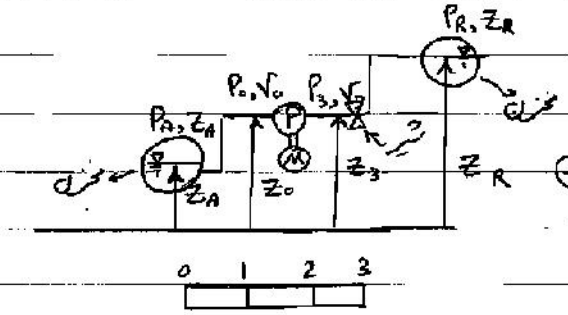
$$\Delta Cu_2 = U_2 \frac{\pi}{Z} \sin \beta'_2 \xrightarrow{(*)} \mu = 1 - \frac{\Delta Cu_2}{Cu_{2\infty}} = 1 - \frac{\pi}{Z} \sin \beta'_2 / (1 - \phi \cot g \beta'_2)$$

$\phi = \frac{Cm_{2(\infty)}}{U_2}$!

(*) $\mu = \frac{Cu_2}{Cu_{2\infty}} = \frac{Cu_{2\infty} - \Delta Cu_2}{Cu_{2\infty}} = 1 - \frac{\Delta Cu_2}{Cu_{2\infty}}$

استاد نداشته بود

پمپ و مدار:



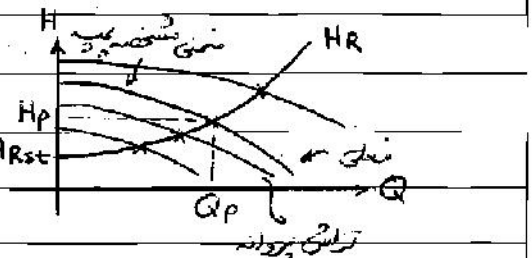
$$\frac{P_A}{\gamma}+\frac{V_A^2}{2g}+Z_A=\frac{P_0}{\gamma}+\frac{V_0^2}{2g}+Z_0+h_{L_{A-0}}$$

$$\frac{P_3}{\gamma}+\frac{V_3^2}{2g}+Z_3=\frac{P_R}{\gamma}+\frac{V_R^2}{2g}+Z_R+h_{L_{3-R}}$$

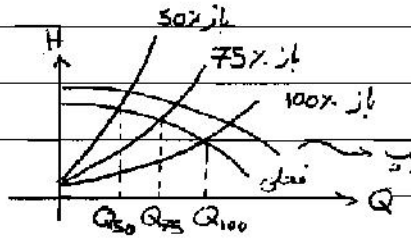
$$\Rightarrow \underbrace{\frac{P_3-P_0}{\gamma}+\frac{V_3^2-V_0^2}{2g}+Z_3-Z_0}_{H_p=H_{pump}}=\underbrace{\frac{P_R-P_A}{\gamma}+\frac{V_R^2-V_A^2}{2g}+Z_R-Z_A+\sum h_{L_{A-R}}}_{H_R}$$

H_R: مقاومت مسیر

$$H_R=\begin{cases}H_{R_{st}}=\dfrac{P_R-P_A}{\gamma}+Z_R-Z_A\\ H_{R_{dyn}}=\dfrac{V_R^2-V_A^2}{2g}+\underbrace{\sum h_{L_{A-R}}}_{KQ^2}\end{cases}$$

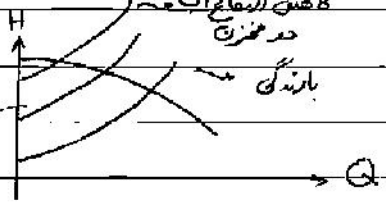


بعد از قرار دادن شیر:



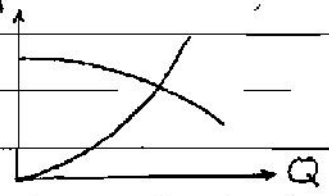
برای ثبات مانند دبی، می‌توان با باز و بسته کردن یا سرعت دورانی را بیشتر کرد.

* اگر هد استاتیک تغییر کند:



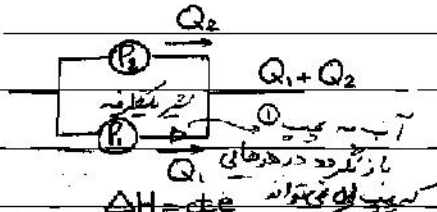
شیب تغییر می‌کند.

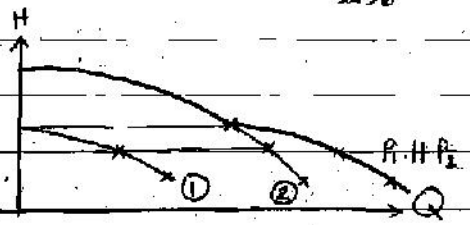
* برای یک پمپ سیرکولاسیون (شوفاژخانه) هد استاتیک برابر صفر است.



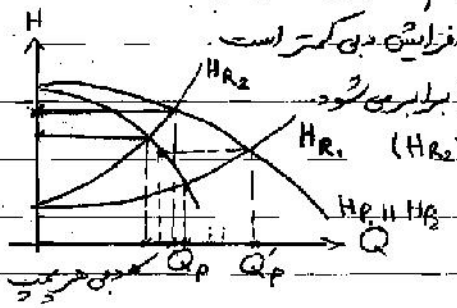
به هم بستن موازی پمپ ها

* کاویتاسیون کمتر می شود
* دبی بیشتر می شود



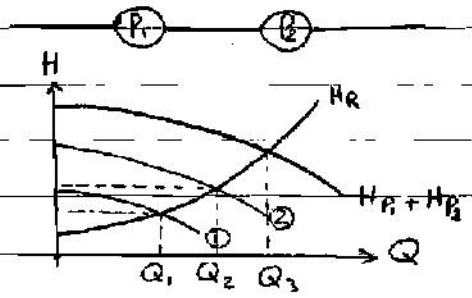


* در اکثر موارد پمپ های یکسان باهم موازی بسته می شوند
* هرچه مقاومت مسیر بیشتر باشد افزایش دبی کمتر است
* بعد از موازی کردن، دبی کمتر از ۲ برابر می شود

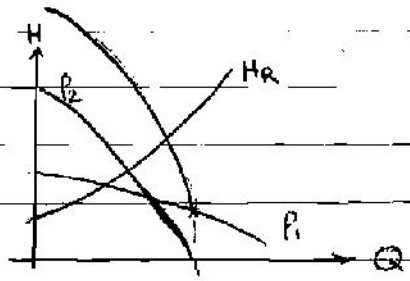


به هم بستن سری پمپ ها:

* هد بیشتر می شود



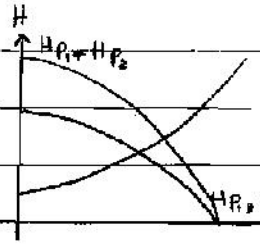
حالت زیر را در نظر می گیریم



پمپ ۲ مانع مقاومت رفتار می کند

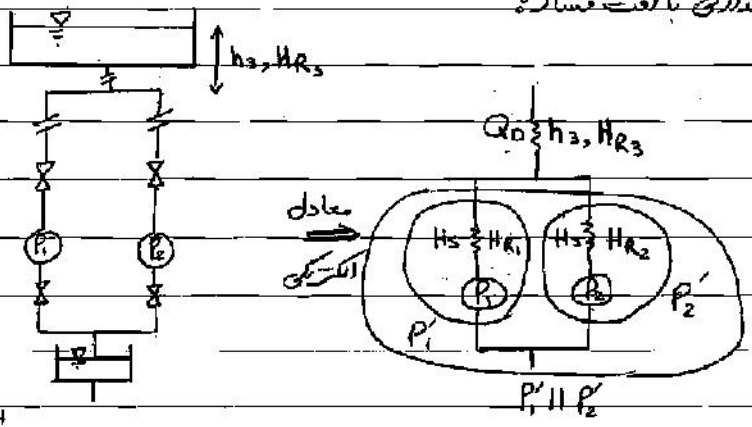
* در این حالت هنگامی که $Q=0$ است، Q هر دو پمپ برابر صفر است

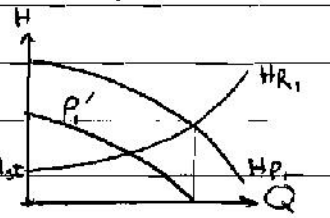
* اگر پمپ‌های استفاده شده یکسان باشند:



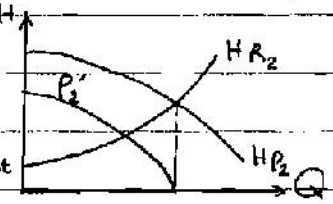
در حالت‌های قبل اصطکاک لوله حاکم بود

دو پمپ موازی در مدارهای با افت فشار:

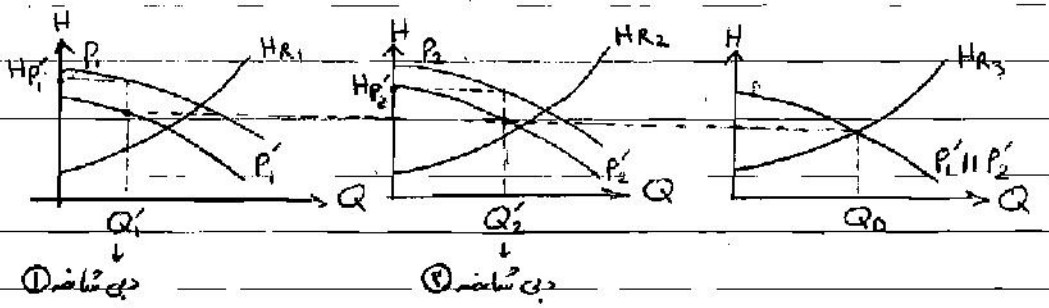




$$P_1' = H_{P_1} - H_{R_1}$$



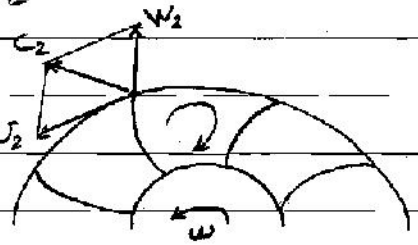
$$P_2' = H_{P_2} - H_{R_2}$$



مثال: پمپ رو به عقب * $Q=0.028\ \frac{m^3}{s}$ * $\mu=0.77$ * $N=450\ rpm$ * $b_2=20\ mm$ * $d_2=250\ mm$ * $\beta_2'=30^\circ$ *
اگر پره‌ها شعاعی گیرند

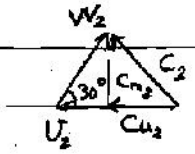
$Z=?$ ، $H=?$

* چون α_1 داده نشده، پس $\alpha_1=90^\circ$



$$U_2=r_2\omega=\frac{0.250}{2}\times\frac{2\pi\times1450}{60}=18.98\ m/s$$

$$C_{m_{2\infty}}=\frac{Q}{A_2}=\frac{Q}{2\pi r_2 b_2}=\frac{0.028}{\pi\times0.25\times0.02}=1.78\ m/s$$

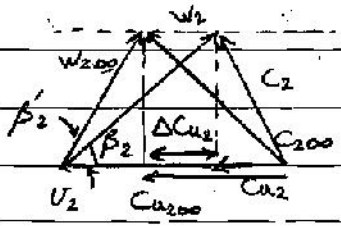


$$C_{u_{2\infty}}=U_2-\frac{C_{m_{2\infty}}}{tg\,30^\circ}=18.98-\frac{1.78}{\frac{\sqrt{3}}{3}}=15.9\ m/s$$

$$H''_\infty=\frac{1}{g}(U_2C_{u_2}-U_1C_{u_1})=30.75\ m \quad \overset{\alpha_1=90^\circ}{\text{چون}} \quad \mu=\frac{H''}{H''_\infty} \rightarrow H''=0.77\times30.75$$

$$\Rightarrow H''=23.68\ m \qquad \mu=\frac{C_{u_2}}{C_{u_{2\infty}}} \text{ رجوع کن}$$

$$\mu=1-\frac{\Delta C_{u_2}}{C_{u_{2,\infty}}}=1-\frac{\frac{\pi}{Z}\sin\beta_2'}{1-\varphi\,\mathrm{Cotg}\,\beta_2'} \quad \xrightarrow{\varphi=\frac{C_{m_2}}{U_2}} \quad Z=8.15\simeq8$$

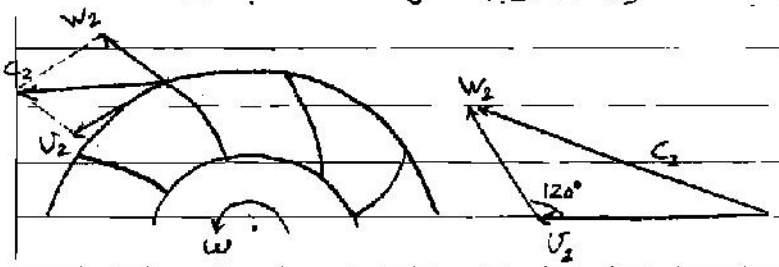


$$\mu=\frac{C_{u_2}}{C_{u_{2\infty}}}\Rightarrow0.77=\frac{C_{u_2}}{15.9}\rightarrow C_{u_2}=12.24\ m/s$$

$$tg\,\beta_2=\frac{C_{m_2}}{U_2-C_{u_2}}=0.264\Rightarrow\beta_2=14.8^\circ<\beta_2'\ \checkmark$$

مثال: پمپ رو به جلو * $N_s=0.75$ (بدون بعد) ، $b_2=0.1d_2$ ، آب را تا ارتفاع 35^m بالا می‌برد
$h_{Local}=\frac{3V^2}{2g}$ ، $l=40^m$ ، $f=0.005$ ، $\beta_2=120^\circ$ ، $d_s=d_D=150\ mm$ ، $0.04\ \frac{m^3}{s}$ دبی
طول لوله ضریب اصطکاک suction Discharge

$d_2=?$ ، 0.06 سطح مقطع پره‌ها با ضخامت پره‌های خروجی اشغال شده ، $\eta_H=0.76$



$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.04}{\frac{\pi}{4} \times 0.15^2} = 2.26 \ m/s$$

$$H = 35 + \frac{3V^2}{2g} + f\frac{l}{d}\frac{V^2}{2g} = 35 + \frac{3 \times 2.26^2}{2 \times 9.81} + 0.005 \times \frac{40}{0.15} \times \frac{2.26^2}{2 \times 9.81} = 37.16 m$$

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} \rightarrow 0.75 = \frac{N\sqrt{0.04}}{(9.81 \times 37.16)^{3/4}} \rightarrow N = 1877.115 \ rpm$$

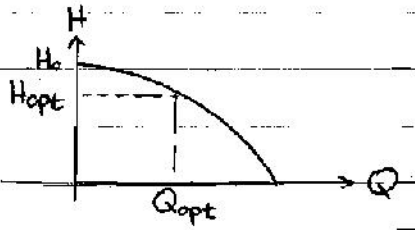
$$U_2 = r_2 \omega = \frac{d_2}{2} \times \frac{2\pi N}{60} = \frac{\pi N d_2}{60} = 98.3 d_2$$

$$C_{m_2} = \frac{Q}{A_2} = \frac{Q}{0.94 \times b_2 d_2} = \frac{0.04}{0.094 \pi d_2^2} = \frac{0.135}{d_2^2}$$

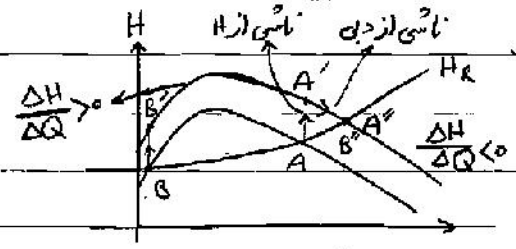
$$\eta_H = \frac{H}{H''} \rightarrow 0.76 = \frac{37.16}{H''} \rightarrow H'' = 48.89 m$$

از طرفی: $H'' = \frac{1}{g}(U_2 C_{u_2} - 0) = \frac{1}{g}(98.3 d_2)\left(98.3 d_2 + \frac{0.135}{tg60^\circ \cdot d_2^2}\right) = 48.89 \rightarrow d_2 = 0.214 m$

شیب منحنی H-Q:



$\frac{H_o - H_{opt}}{H_{opt}}$ =
- 0.25 ~ 0.1 → سانتریفوژ
- 0.8 ~ 0.25 → نیمه سانتریفوژ
- > 0.8 → محوری



$H \propto N^2$ ، $Q \propto N$

$\Downarrow$

$P \propto N^3$

پایداری: با یک تغییر کوچک، نقطه کار جابجا می‌شود

$\frac{\Delta H}{\Delta Q} < 0$ → پایدار

$\frac{\Delta H}{\Delta Q} > 0$ → ناپایدار

تراش پروانه:

* تشابه وجود ندارد

فرمول تجربی:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^n \quad , \quad 2 < n < 3$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^n$$

* اگر بخواهیم از پمپ آب، برای پمپ مواد دیگر استفاده کنیم، ابتدا پمپ آب را حل می‌کنیم سپس با استفاده از یک نمودار این مقادیر را تصحیح می‌کنیم

نکته: لزجت دینامیکی: $\mu : \left[\frac{Ns}{m^2}, Pa.s, \frac{Kg}{m.s}\right]$

$1\ poise = dyne.s/Cm^2 = g/Cm.s = \frac{1}{10} Pa.s \quad (1\ dyne = 10\mu N,\ 1N = 1\ Kg\frac{m}{s^2})$

سانتی پواز

$1\ P = 100\ cP \rightarrow$ برای آب: $\mu = 1\ cP$ در $T = 20.2^{\circ}C$

* لزجت سینماتیک:

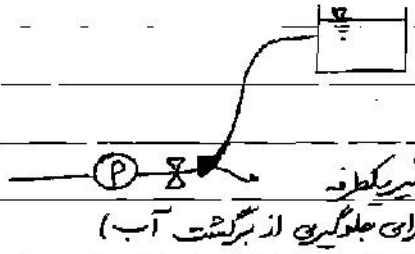
$\nu = \frac{\mu}{\rho} : \left[\frac{m^2}{s}\right]$

$Stoke = \frac{dyne \times s}{Cm^2} / g/Cm^3 = \frac{Cm^2}{s}$

$1\ stoke = 10^{-4} m^2/s \rightarrow 1\ cSt = 10^{-6} m^2/s$ (سانتی استوک) $\rightarrow$ آب: $\nu = 1\ cSt$ در $T = 20^{\circ}C$

* دبی: $1\ Gpm = 3.785 \frac{L}{min}$

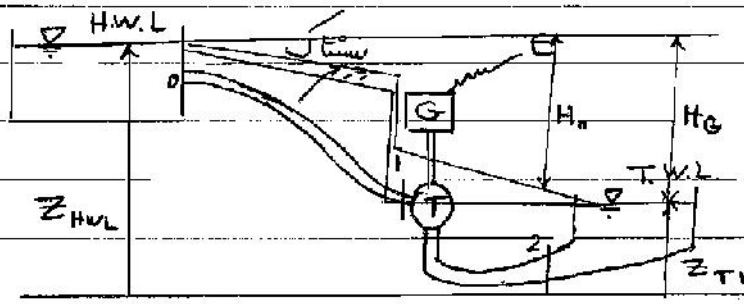
نکته: برای روشن کردن پمپ، ابتدا شیر را می‌بندیم و سپس موتور را روشن می‌کنیم برای خاموش کردن نیز به همین صورت می‌باشد. (برای جلوگیری از فشار آمدن به موتور)



سید محمد جعفر سجادی

165 برای اینکه بتوانیم این جلوه را بخوریم . ریلیتون برای چه هلوزیاد

توربین های آبی:



$\frac{P}{\gamma}+\frac{V^2}{2g}+Z$ انرژی (EGL)

(HGL) $\frac{P}{\gamma}+Z$ دیدروکلی

محاوره صوری با گره

انرژی مخصوص : میزان انرژی جنبشی و پتانسیلی است که یک کیلوگرم آب حین عبور از توربین از مخزن بالادست تا پایین دست تولید می کند. $\left(\frac{N.m}{kg}, \frac{J}{kg}, \frac{m^2}{s^2}\right)$

هد ناخالص (Gross head):

$$H_G = Z_{HWL} - Z_{TWL} = H_{gross}$$

انرژی مخصوص ناخالص: $E_G = g H_G$

قدرت ناخالص: $P_G = \rho g H_G Q$

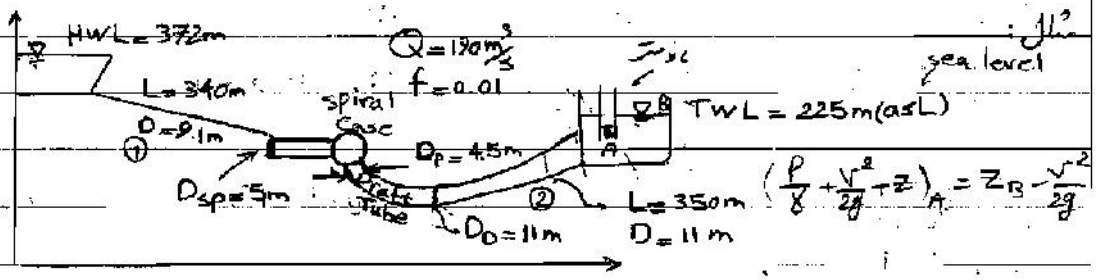
هد خالص: $\left(\frac{P_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}+Z_1\right)-\left(\frac{P_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}+Z_2\right) = H_n = H_G - \sum h_L$

انرژی مخصوص خالص: $E_n = g H_n$

$R = \rho g H Q$

$H = \frac{P}{\rho g Q} \Rightarrow E = \frac{P}{\rho Q} = gH = \left[\frac{J}{kg}\right]$

مثال:



$\left(\frac{P}{\gamma}+\frac{V^2}{2g}+Z\right)_A = Z_B - \frac{V^2}{2g}$

$H_n = ?$ ، $H_{gr} = ?$ ، $EGL = ?$ ، $HGL = ?$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{190}{\frac{\pi}{4}\times 9.1^2} = 2.92\ m/s \xrightarrow{T=20^\circ C} Re_1 = \frac{V_1 D_1}{\nu} = \frac{2.92\times 9.1}{10^{-6}} = 2.657\times 10^7$$

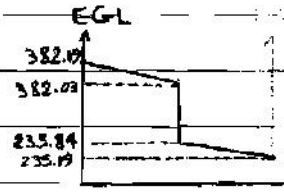
$$\Rightarrow h_{L_1} = f_1 \frac{l_1}{D_1}\cdot\frac{V_1^2}{2g} = 0.01\times\frac{340}{9.1}\times\frac{2.92^2}{2\times 9.81} = 0.1624\ m$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{190}{\frac{\pi}{4}\times 11^2} = 1.999\ m/s \xrightarrow{T=20^\circ C} Re_2 = \frac{V_2 D_2}{\nu} = \frac{1.999\times 11}{10^{-6}} = 2.2\times 10^7$$

$$\Rightarrow h_{L_2} = f_2 \frac{l_2}{D_2}\cdot\frac{V_2^2}{2g} = 0.1\times\frac{350}{11}\times\frac{1.999^2}{2\times 9.81} = 0.648\ m$$

$H_G = Z_{HWL} - Z_{TWL} = 372 - 225 = 147\,m$

$H_n = H_G - \sum h_L = H_G - h_{L_1} - h_{L_2} = 147 - 0.1624 - 0.648 = 146.19\,m$



* $EGL_{HWL} = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z = \frac{100\times10^3}{1000\times9.81} + 372 = 382.19\,m$

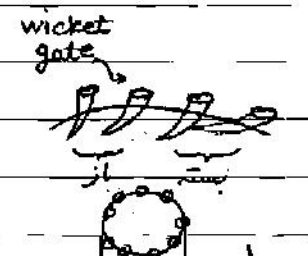
* $EGL_{TWL} = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z = \frac{100\times10^3}{1000\times9.81} + 225 = 235.19\,m$

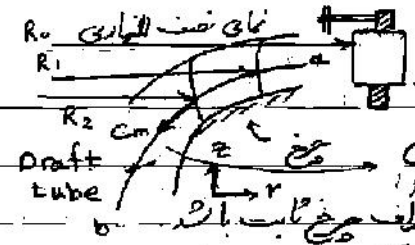
ثبت سرعت:

توربین فرانسیس (Francis):

I) Spiral Case II) stay vanes III) wicket gate (پره متحرک)

Draft tube (V (پره)Runner (IV



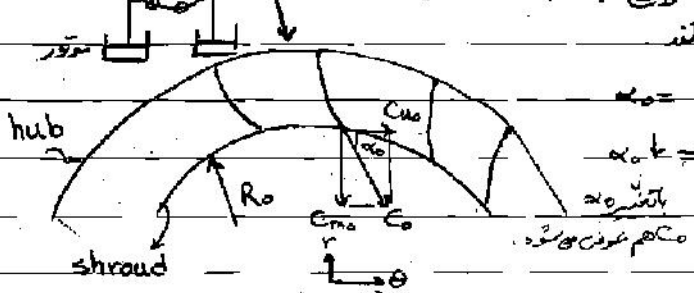


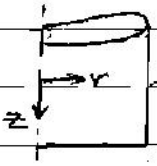
I) هندسه ثابت: سرعت و فشار اطراف پره ثابت باشد

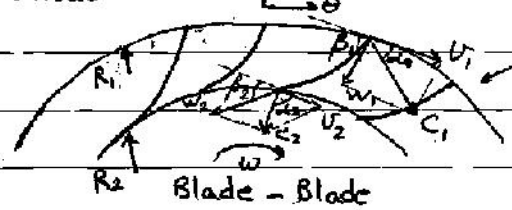
III) پره متحرک: مولفه C_{u_0} را تولید می‌کند

$\alpha_0 = 20° \sim 30°$

$\alpha_0 \downarrow \Rightarrow Q \downarrow$

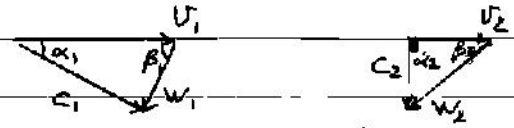






$W_2 > W_1$ ، $U_2 < U_1$

$\alpha_2 \simeq 90°$



$R_2 < R_1 < R_0$

$\alpha_2 = 90^\circ \Rightarrow Cu_2 = 0$ $\qquad W_2 > W_1$

$$Q \quad , \quad C_{m_0} = \frac{Q}{2\pi R_0 b_0} \longrightarrow tg\alpha_0 = \frac{C_{m_0}}{C_{u_0}}$$

معادله مومنتم

$$R_1 . Cu_1 = R_0 . Cu_0 \Rightarrow Cu_1 = \frac{R_0}{R_1} Cu_0$$

کاری انجام نمی‌شود

$$Q = (2\pi R_1 b_1) Cm_1 = (2\pi R_0 b_0) Cm_0$$

در حالت Blade-Blade

$$C(r,\theta,z) \rightarrow \begin{cases} C_r \\ C_\theta = Cu_0 \\ C_z \end{cases} \longrightarrow Cm = \sqrt{C_z^2 + C_r^2}$$

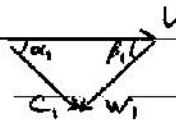
با نوشتن معادله مومنتم خواهیم داشت:

$$\begin{cases} M'' = \dot{m}'' (R_1 C_1 \cos\alpha_1 - R_2 C_2 \cos\alpha_2) \\ P'' = M''\omega = \dot{m}'' (U_1 C_1 \cos\alpha_1 - U_2 C_2 \cos\alpha_2) \\ E'' = g H'' = U_1 C_1 \cos\alpha_1 - U_2 C_2 \cos\alpha_2 = U_1 Cu_1 - U_2 Cu_2 \\ H'' = \frac{1}{g}(U_1 Cu_1 - U_2 Cu_2) \end{cases}$$

حد اولر

توربین محوری $U_1 = U_2$

با نوشتن معادله کسینوس‌ها داریم:



$$H'' = \frac{C_1^2 - C_2^2}{2g} + \frac{U_1^2 - U_2^2}{2g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g}$$

توربین Voitha

$$H_n - h_f = H'' \Rightarrow H_n = H'' + h_f$$

$H_n = H'' - h_f$ در پمپ

* معادله انرژی برای توربین به صورت زیر است:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta W}{\delta t} = \int_{C.S.} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)(\rho \vec{C} \cdot \vec{dA})$$

از جریان یک بعدی نظر می‌گیریم.

$$\Rightarrow \frac{\delta Q}{\delta m} + \left(h_1 + \frac{C_1^2}{2} + gz_1\right) = \left(h_2 + \frac{C_2^2}{2} + gz_2\right) + \frac{\delta W}{\delta m}$$

$$\Rightarrow \frac{\delta W}{\delta m} = \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho}\right) + \left(\frac{C_1^2 - C_2^2}{2}\right) + g(z_1 - z_2) + \underbrace{\left[(u_1 - u_2) + \frac{\delta Q}{\delta m}\right]}_{-h_L}$$

$h_L = u_1 - u_2 + \frac{\delta Q}{\delta m}$ $\Longleftrightarrow$ $u_1 < u_2 \Rightarrow T_2 > T_1$

$\frac{\delta Q}{\delta m} = 0$ آدیاباتیک

نکته: توربین گاز $\leftarrow T_2 < T_1$ ، توربین آب $\leftarrow T_2 > T_1$

$$* \quad \frac{P_1}{\rho} + \frac{C_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{C_2^2}{2} + gz_2 + \frac{\frac{\delta W}{\delta m}}{gH''} + H_L$$

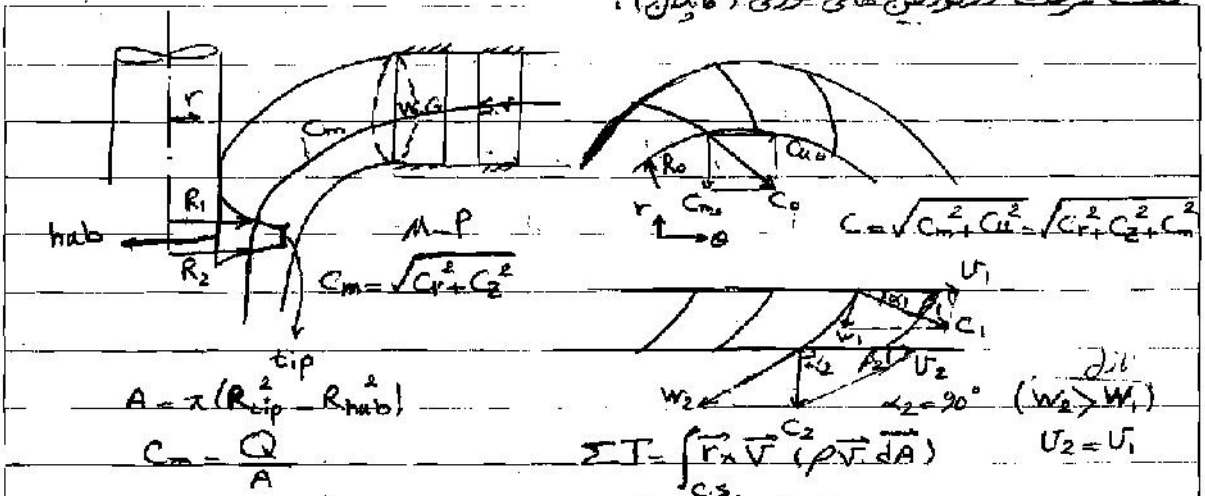
پس H'' را از دو حالت به دست آمده باهم مقایسه می‌کنیم: H_n

$$\begin{cases} H'' = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{C_1^2 - C_2^2}{2g} + z_1 - z_2 - h_{Lf} \Rightarrow H'' = H_n - h_{Lf} \\ H'' = \frac{C_1^2 - C_2^2}{2g} + \frac{U_1^2 - U_2^2}{2g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{P_1}{\gamma} + \frac{W_1^2}{2g} - \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{W_2^2}{2g} - \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + h_{Lf}}$$

* قانون دوم ترمودینامیک: $\Delta s \geq 0$

نکته سرعت در توربین‌های محوری (کاپلان):



$A = \pi(R_{tip}^2 - R_{hub}^2)$

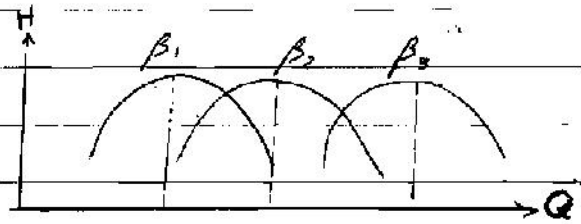
$C_m = \frac{Q}{A}$

$\Sigma T = \int_{C.S.}^{C_2} \vec{r} \times \vec{V} (\rho \vec{V} \cdot d\vec{A})$

$\Rightarrow R_0 C_{u_0} = R_1 C_{u_1}$

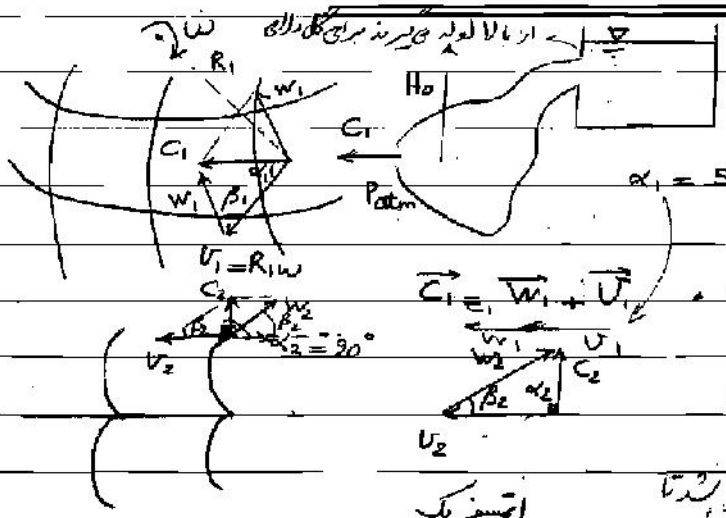
* می‌توان زاویه α را تغییر داد و راندمان‌های جدید به دست آورد.

$$H'' = \frac{1}{g}(U_1 C_{u_1} - U_2 C_{u_2})$$



با تغییر زاویه پره اگر در راندمان ماکزیمم نباشیم تلفات بسیاری رخ می‌دهد.

* تنها توربوماشین‌هایی که در آنها زاویه پره‌ها می‌تواند تغییر کند، توربین‌های محوری و پمپ‌های محوری هستند.



توربین پلتون (ضربه‌ای):

$\alpha_1 = 5^\circ \sim 10^\circ \quad (\alpha_1 \to 0^\circ)$

$\vec{C_1} = \vec{W_1} + \vec{U_1}$ ، $C_1 = f\sqrt{2gH_0}$ ، $f \simeq 0.98$

$H = \frac{1}{g}(U_1 C_{u_1} - U_2 C_{u_2})$

به رابطه‌ای بین C و U برقرار باشد تا راندمان ماکزیمم باشد (هست)

معادله انرژی: $\frac{P_1}{\gamma} + \frac{W_1^2}{2g} - \frac{U_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{W_2^2}{2g} - \frac{U_2^2}{2g} + h_f \Rightarrow \begin{cases} W_1 = W_2 \\ U_1 = U_2 \end{cases}$

اتمسفریک ، $R_1 \simeq R_2$ ، $h_f \simeq 0$

* برای داشتن راندمان بیشینه باید $\alpha_2 = 90^\circ$ باشد.

* با داشتن $\alpha_2 < 90^\circ$ هد بیشتری خواهیم داشت، اما راندمان کم خواهد شد.

$Q = Q'' + Q_L$

$P = \rho g H_n Q \rightarrow \rho Q \rightarrow \rho Q'' \rightarrow P'' = \rho g H'' Q''$ توان اولری

$\rho Q \rightarrow Q_L$

$g H_n \rightarrow g H''$ تلفات هیدرولیکی در قسمت‌های ثابت

$P'' \rightarrow P_D$ تلفات دیواره $\rightarrow P'$ توان داخلی $\rightarrow P_m$ مکانیکی $\rightarrow P_e$ محور توربین

$$\eta_v = \frac{Q'}{Q} \quad , \quad \eta_h = \frac{H''}{H_n} \quad , \quad \eta_o = \frac{P'}{P''} \quad , \quad \eta_m = \frac{P_e}{P'}$$

$$\eta_i = \eta_h \cdot \eta_o \cdot \eta_v \quad , \quad \eta_t = \eta_i \cdot \eta_m$$

گروه های بی بعد: ترکیب $\frac{Q}{ND^3}$ ، $\frac{gH}{N^2D^2}$

* سرعت دورانی توربین با قطر واحد و هد واحد (بعددار) $N_{11} = \frac{ND}{\sqrt{H_n}}$ (سرعت واحد) ، $N_{ed} = \frac{\omega D}{\sqrt{gH_n}}$ (بی بعد)

* دبی توربین با قطر واحد و هد واحد (بعددار) $Q_{11} = \frac{Q}{D^2\sqrt{H_n}}$ ($\frac{m^3}{s}$ ، m ، دبی واحد) ، $Q_{ed} = \frac{Q}{D^2\sqrt{gH_n}}$ (بی بعد)

* توان توربین با قطر و هد واحد (بعددار) $P_{11} = \frac{P_e}{D^2 H_n^{3/2}}$ ($P_e \to KW$ ، توان واحد) ، $P_{ed} = \frac{P_e}{\rho D^2 (gH_n)^{3/2}}$ (بی بعد)

* گشتاور توربین با قطر و هد واحد (بعددار) $T_{11} = \frac{T}{D^3 H_n}$ ($T \to Nm$ ، گشتاور واحد) ، $T_{ed} = \frac{T}{\rho D^3 gH_n}$ (بی بعد)

برای تشابه داریم:

$$N_{11})_m = N_{11})_p$$

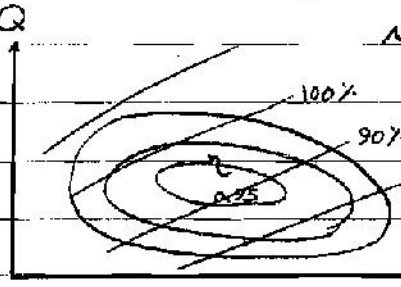
$$Q_{11})_m = Q_{11})_p$$

* سرعت مخصوص: $N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H_n^{1.25}}$ ($N \to rpm$ ، $P \to KW$ ، $H_n \to m$) (بعددار) ، $\Omega_s = \frac{\omega \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{(gH_n)^{3/4}}$ (بی بعد)

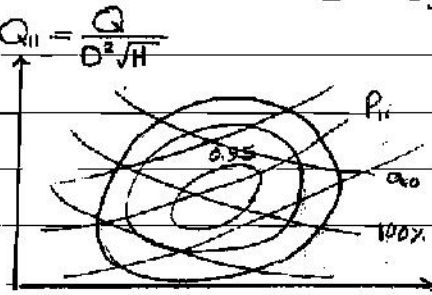
$$\Omega_s = \frac{N_s}{165.87\sqrt{\eta}}$$

منحنی های مشخصه توربین: (Hill Chart)

* پارامترها: N, H, Q, a_0, η, P



* دبی دوبلی برای توربین همیشه ثابت است.



قابل استفاده برای تمام خانواده

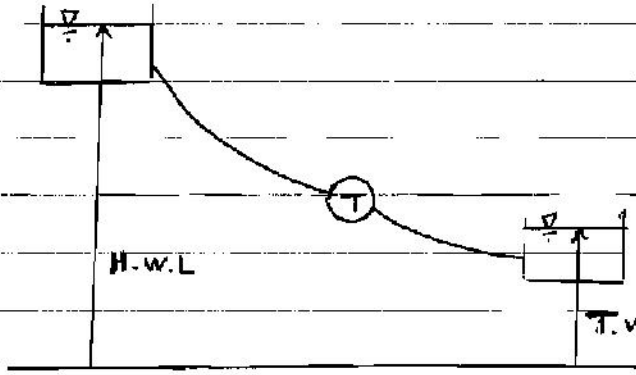
R.P. ⇒ Rated point

* دانشگاه EPFL: $\Psi = \frac{2gH}{\omega^2 R^2}$ ، $\phi = \frac{Q}{\pi \omega R^3}$

انتخاب توربین مناسب:

بزرگ $\eta = 0.94 \sim 0.96$

کوچک $\eta = 0.89 \sim 0.9$



H معلوم → بعدی $N_s = f(H_n) = 3470\, H_n^{-0.625}$ (رابطه تجربی) $\Rightarrow N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H_n^{1.25}}$ ($\rho g H Q \eta$) $\Rightarrow N =$ ✓

$\Rightarrow N\,(rpm) = \frac{120\, f\,(50\,Hz)}{N_p} \Rightarrow N_p = 31 \sim 32$ ✓

N_p: تعداد قطب ژنراتور — مضرب از 2 یا 4 و تقریباً 6

مثال: $H = 93\,m$ ، $Q = 150\,m^3/s$ ، $P = 130\,MW$

$N_s = ?$ ، $N = ?$ ، $N_p = ?$

$$N_s = 3470\,H^{-0.625} = 204 \Rightarrow N_s = 204 = \frac{N\sqrt{P}}{H^{1.25}} = \frac{N\sqrt{130000}}{93^{1.25}} \Rightarrow N = 163\,rpm$$

$$\Rightarrow N_p = \frac{120f}{N} = \frac{120 \times 50}{163} = 36.68 \xrightarrow{\text{تقریب}} N_p = 40$$

تصحیح روابط $\Rightarrow N = 150\,rpm \Rightarrow N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{1.25}} = 187.26$

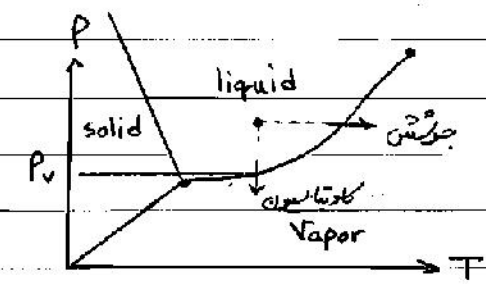
* با استفاده از نمودارها می‌توان شعاع‌ها را بدست آورد: (P, H, N داده شده‌اند)

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{\rho^{\frac{1}{2}}(gH_n)^{1.25}} \Rightarrow \begin{cases} U_1 = K_{u_1}\sqrt{2gH_n} \\ U_1 = R_1\omega \end{cases} \Rightarrow R_1 \checkmark \qquad \begin{cases} U_2 = K_{u_2}\sqrt{2gH_n} \\ U_2 = R_2\omega \end{cases} \Rightarrow R_2 \checkmark$$

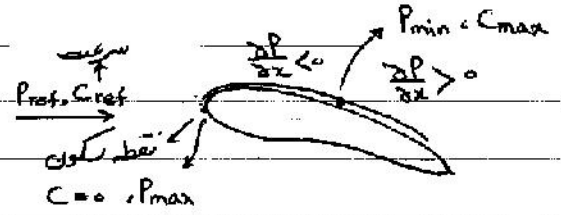
$\Downarrow D_1 = 2R_1$

$\frac{b}{D_1} = \checkmark \Rightarrow b = \checkmark$

کاویتاسیون :



شرط کاویتاسیون : $P(M) \leq P_v$



شرط انجام کاویتاسیون : $P_M \leq P_v(T) \Rightarrow C_p(M) < \sigma \Rightarrow$

$$C_p(M) = \frac{P_M - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho C_{ref}^2}$$

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_v(T)}{\frac{1}{2}\rho C_{ref}^2}$$ ← ضریب کاویتاسیون

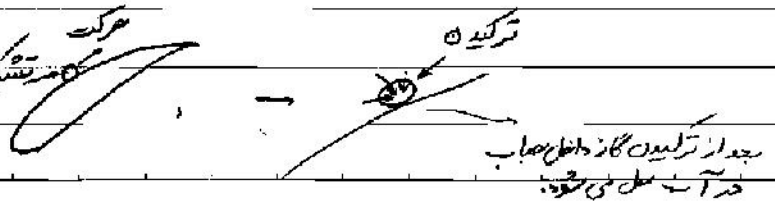
* پدیده کاویتاسیون زمانی اتفاق می‌افتد که فشار موضعی از فشار بخار سیال مایع در حال حرکت کمتر شود؛ در چنین حالتی حباب‌هایی که نشان‌دهنده ذرات تبخیر شده می‌باشند در مایع پدیدار می‌شوند.

* حباب‌ها ممکن است به قطر حدود 0.25 اینچ برسد و با سرعتی حدود $765 \frac{ft}{s}$ از بین رفته و عمر هر حباب حدود 0.003 ثانیه می‌باشد.

* فشار وارده بر بدنه جسم حدود $50000 \frac{lb}{in^2}$ می‌باشد.

* ایجاد چنین فشاری به صورت متناوب تولید خستگی کرده در فلز و در نتیجه فرسایش آن می‌شود.

* کاویتاسیون همراه با صدا، ارتعاش و افت راندمان می‌باشد.



سرعت انتشار امواج آب $a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\times10^9}{10^3}} = 1400\ m/s$

نسبت به سطح آب

p صفر

Water

جابجایی کردن توربین که موجب می‌شود. (قبل و بعد توربین همه به یک اندازه می‌ادند)

* پارامترهای مهم در کاویتاسیون:

شرایط هیدرولیکی: شکل هیدرولیکی ـ شرایط جریان ـ زبری

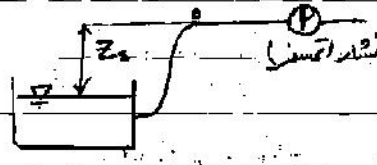
شرایط سیال: ویسکوزیته ـ

: کیفیت گاز

* هر چه حباب تشکیل شده بزرگتر باشد، فشار داخل آن کمتر است و بالعکس

کاویتاسیون در پمپ‌ها:

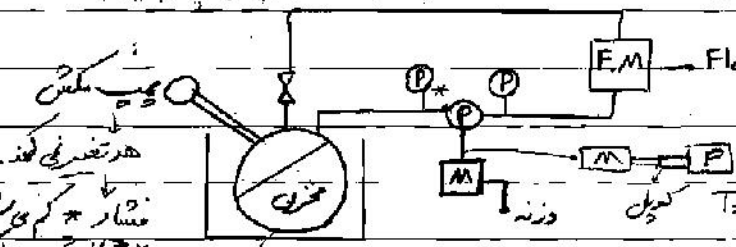
ـ ارتفاع مثبت خالص مکش: (NPSH) فشار کل در دهانه مکش پمپ نسبت به فشار اشباع در همان درجه حرارت



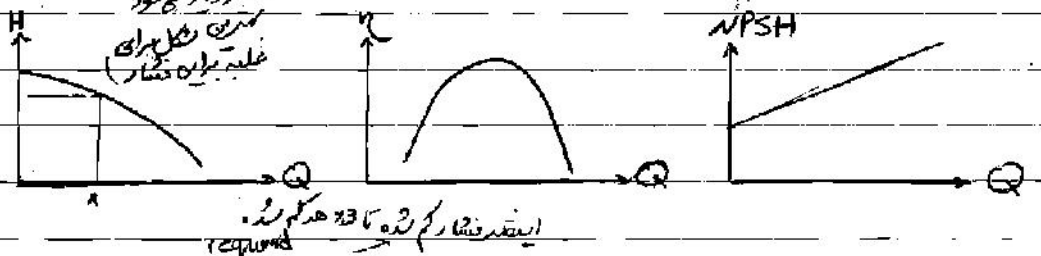
فشار مطلق (نسبی + فشار اتمسفر)

$$NPSH_{(m)} = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

فشار تبخیر در درجه حرارت کار



(مدار بسته) مدار تست کاویتاسیون مخزن کروی (فشار زیاد می‌شود)



$$NPSH_{(req)}^{1} = \frac{P_{0\,min}}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$ → کارخانه سازنده

$$NPSH_{(available)} = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

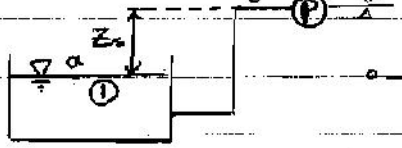
برای اینکه کاویتاسیون رخ ندهد، باید داشته باشیم:

$$NPSH_{(available)} \geq NPSH_{(req)} + 0.5\,m$$

حاشیه امنیت

محاسبه ارتفاع مکش بیشینه :

تشکیل حباب در ورودی پمپ ← معمولاً خودش در قسمت پرفشار پره



$$\circ \to 1 : \frac{P_a}{\gamma} = Z_{s\max} + \underbrace{\frac{P_v}{\gamma} + \frac{V_o^2}{2g}}_{NPSH_{(req)} + \frac{P_v}{\gamma}} + H_L$$

(اصطکاک دریچه مکش نصب شود (در صورتی که باشد) قطر مکش بزرگتر از قطر رانش)

$$\Rightarrow \boxed{Z_{s\max} = \frac{P_a}{\gamma} - \left(\frac{P_v}{\gamma} + NPSH_{(req)} + H_L\right)}$$

تلفات طولی

$$Z_{s\max} \downarrow \leftarrow H_L \uparrow \ *$$

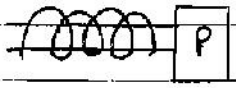
* برای راه‌اندازی پمپ‌ها در دهانه مکش یک شیر یکطرفه قرار می‌دهیم و لوله را از آب پر می‌کنیم (زیرا در ابتدا لوله از هوا پر است) ← (برای حالتی که پمپ بالای سطح آب است)

روش‌های کم کردن $NPSH_{req}$:

① پمپ با سرعت دوران کم انتخاب کنیم.

② پمپ با دو دهانه مکش را به کار ببریم. (زیرا سرعت کمتر می‌شود)

③ استفاده از چرخ با دهانه مخصوص (قبل از ورود به پمپ، فشار افزایش می‌یابد)



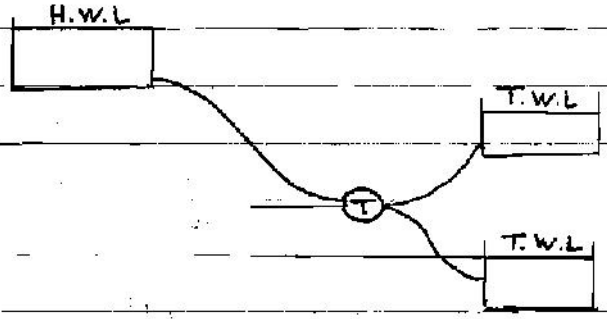
روش‌های افزایش $NPSH_{avail}$:

① تحت فشار قرار دادن منبع مکش (مانند نصب پمپ زیر سطح آب)

② سرعت سیال در دهانه را کاهش پیدا کند. (افزایش قطر دهانه مکش)

③ کاهش تلفات در لوله مکش

کاویتاسیون در توربین ها



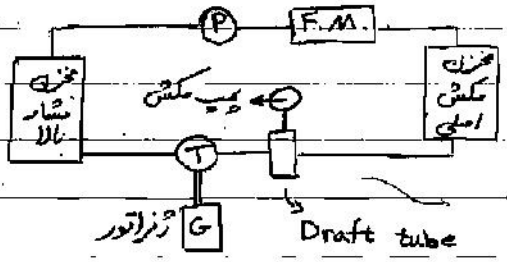
غرقاب ←

فشار اتمسفر

$\sigma_{Plant} = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_{n(max)}}$ ← $H_s = Z_{turbine} - Z_{TWL}$ ← عدد تومای تاسیسات کاویتاسیون (ضریب کاویتاسیون توربین)

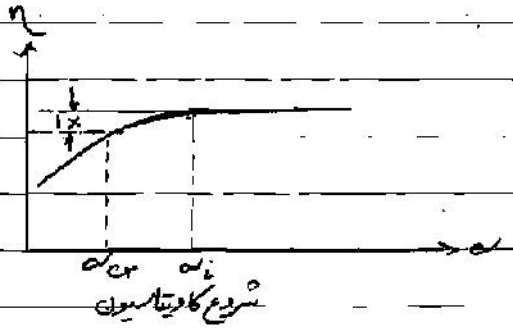
* در حالت غرقاب ← $H_s < 0$

← عدد تومای بحرانی (σ_{cr})



مثل اینکه TWL کم شود

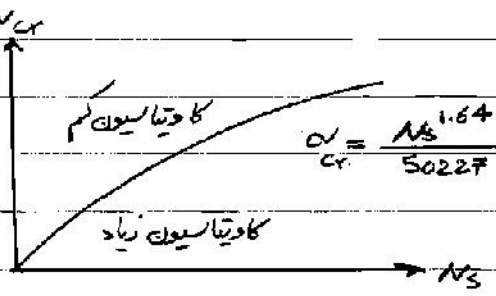
(مدار بسته تست توربین)



(Safety Margine) $S.M = H_n(\sigma_p - \sigma_{cr})$ → $S.M = 4 \sim 5$ m

↓ درک مطلوبیت Max

* نمودار تجربی برای σ_{cr}



مثال:

$HWL = 989.7\,m$

$TWL = 964.23\,m$ ، $TWL_{min} = 962.7\,m$

$Q = 30.44\,\frac{m^3}{s}$ ، $H_L = 0.15\,m$ ، $T = 21.1^\circ C$ ، $\eta = 0.9$

$H_{n,max} = HWL - TWL_{min} - H_L = 26.85\,m$

$H_n = HWL - TWL - H_L = 25.32\,m$

$P = \rho g H_n Q \eta = 6.8\,MW$

$N_s = 3470\, H_n^{-0.625} = 460.43 \xrightarrow{N_s = \frac{N\sqrt{P(kW)}}{H_n^{1.25}}} N = 317\,rpm \xrightarrow{N_p = \frac{120f}{N}} N_p = 19$

$\longrightarrow$ 4 ضریب $\Longrightarrow N_p = 20$ تصحیح $N = 300\,rpm \rightarrow N_s = 435.55$

$\sigma = \frac{N_s^{1.64}}{50227} = 0.42$

$\sigma_{cr} = \sigma_p = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_{n,max}}$ (9.5, 0.239) $\Rightarrow H_s = 2.016 = Z_{tur} - Z_{TWL}$

$\Rightarrow Z_{tur} = \underbrace{962.7}_{TWL_{min}} - 2.016 = 960.68\,m$

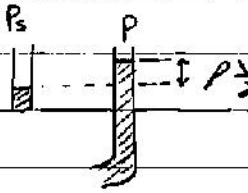
در حالت بحرانی

فن: (Fans)

دامنه کار فن‌ها از خنک کردن یک قطعه الکترونیکی که ۱ مترمکعب هوا را در یک ساعت جابجا می‌کند و چندوات قدرت لازم دارد شروع می‌شود تا فن تهویه معمدن که هوایی یک مترمکعب را در یک دقیقه جابجا می‌کند و صدها کیلووات توان لازم دارد.

* برای انتقال و افزایش فشار گازها:
  - Fans ← افزایش فشار کم ← تراکم ناپذیر
  - Blowers ← افزایش فشار متوسط
  - Compressor ← زیاد ← تراکم پذیر

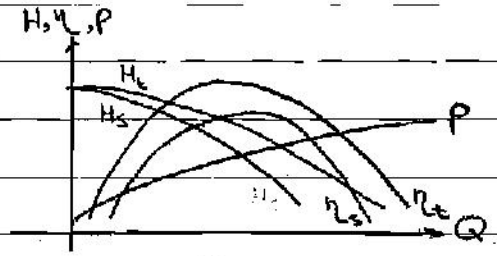
فن:
- سانتریفوژ: Radial, Forward, Backward
- محوری: ساده
  - لوله ای ← بدون پره هدایت کننده
  - پره ای ← پره ها هدایت کننده قبل و بعد از چرخ

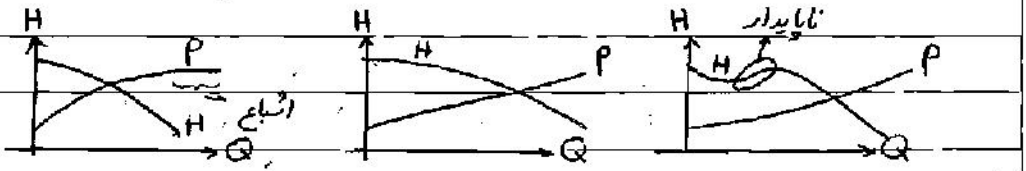


* پره ها می‌توانند جهت استعمال انرژی جریانی سیال را افزایش دهند.

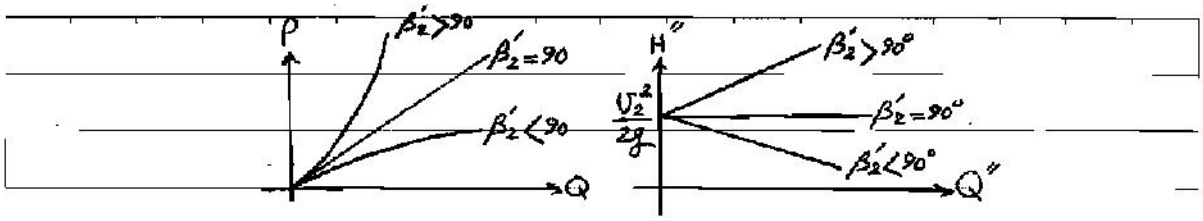
راندمان فن نسبت می‌شوند $\rightarrow H_t = P_s + \rho\frac{V^2}{2}$

کولر سه فن سانتریفوژ Forward





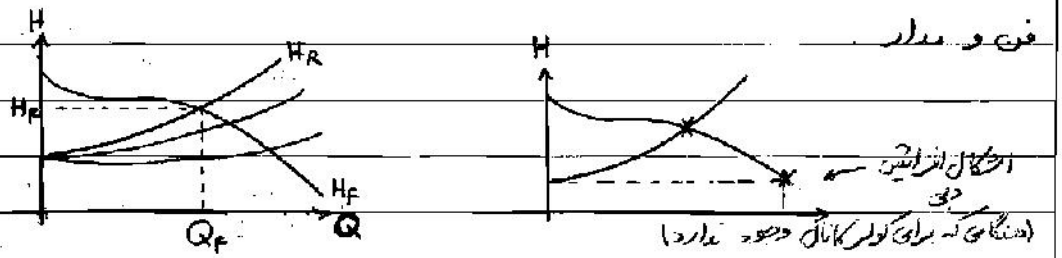
Backward (B)	Radial (R)	Forward (F)
- دبی افزایش پیدا نمی‌کنند	- دبی افزایش پیدا می‌کنند	
- راندمان بهتر	- فضای کمتری اشغال می‌کنند	
- نویز کمتر	- احتمال رسوب گرفتن کمتر است. (R)	
- پایدار ($\beta_2 \uparrow \rightarrow \eta \downarrow$)	- احتمال ناپایدار کردن فن وجود دارد (F)	



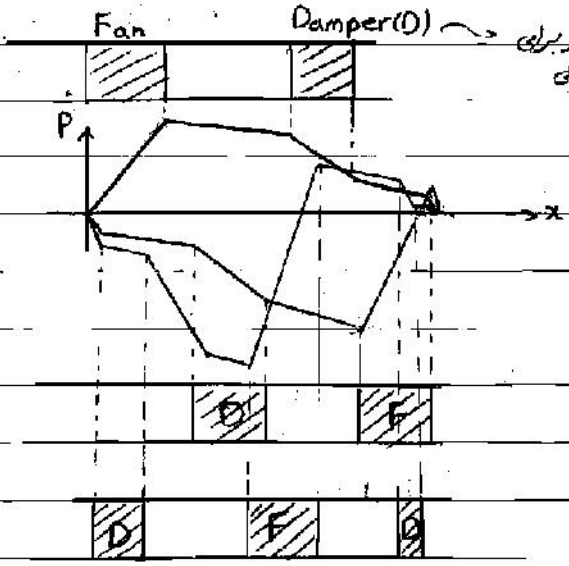
* بهتر است پره به صورت ایرفویل ساخته شود ← راندمان بالا / نویز کمتر

	F (دو طرفه)	R (شعاعی)	A (محوری)	B (رو به عقب)
اندازه	1	3	2	4
قدرت	4	3	1	2
صدا	4	3	1	2
	↓ 9	↓ 9	↓ 4	↓ 8

فن و مدار

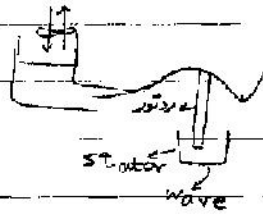


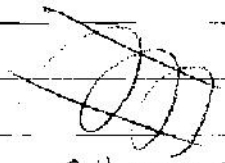
محل نصب فن:

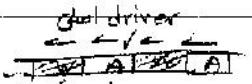


انرژی های تجدید پذیر:

- Solar
- wind
- water
  - Hydro power plants
  - Marine, tidal, Current, Wave
- Biomass
- Hydrogen & fuel cells
- Geothermal







$H \neq f(N)$

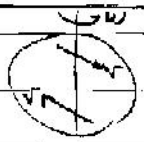
$H = f(\text{تعداد کویل})$

انرژی و توربین بادی:

ایرانیان صدها سال قبل از میلاد مسیح از آسیاب ها و پمپ های بادی استفاده می کردند.
سیستان یا بادهای یک در آن باد آسیاب ها را گرداند و آب را از چاه کشید.
در قرون وسطی آسیاب های بادی در فرانسه، ایتالیا و اسپانیا و پرتغال متداول شد.

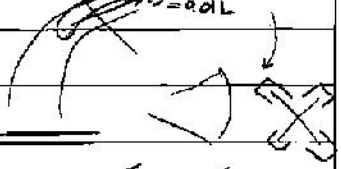
منشأ باد:

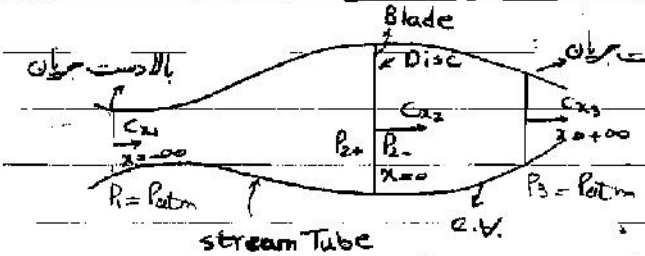
① تابش نور خورشید ② حرکت وضعی زمین ③ دندان نبین ④ جریان اقیانوسی



تقسیم بندی توربین های بادی:

VAWT ⑤ HAWT ④ Lift ② Drag ①





توربین دیسک محرک:

* فرضیات:

- جریان دائم و یکنواخت در بالادست
- " " " " در دیسک
- جریان چرخشی تولید نمی شود (بعد از دیسک)
- تراکم ناپذیر
- جریان دائم و یکنواخت در پایین دست

$$\dot{m} = \rho C_{x_2} A_2$$

با در نظر گرفتن کل Stream Tube به صورت یک حجم کنترل خواهیم داشت

$X = \dot{m}(C_{x_1} - C_{x_3})$ نیروی محوری ⟹ توان $P = X C_{x_2} = \dot{m}(C_{x_1} - C_{x_3}) C_{x_2}$

اتلافات کل در حجم کنترل نیز به صورت زیر است:

اتلاف رخ داده $P_w = \dot{m}\left(\frac{C_{x_1}^2 - C_{x_3}^2}{2}\right)$

$$\Rightarrow P = P_w \Rightarrow \boxed{C_{x_2} = \frac{1}{2}(C_{x_1} + C_{x_3})} \Rightarrow \text{Betz تئوری}$$

روش دوم:

$$① (P_{2+} - P_{2-}) A_2 = \dot{m}(C_{x_1} - C_{x_3}) = (\rho A_2 C_{x_2})(C_{x_1} - C_{x_3}) \Rightarrow \Delta P = \rho C_{x_2}(C_{x_1} - C_{x_3})$$

(P_{2+}: قبل، P_{2-}: بعد از دیسک)

$$\left.\begin{array}{l} ② \; P_1 + \frac{1}{2}\rho C_{x_1}^2 = P_{2+} + \frac{1}{2}\rho C_{x_2}^2 \\ ③ \; \underbrace{P_3}_{=P_1} + \frac{1}{2}\rho C_{x_3}^2 = P_{2-} + \frac{1}{2}\rho C_{x_2}^2 \end{array}\right\} \ominus \Rightarrow \frac{1}{2}\rho(C_{x_1}^2 - C_{x_3}^2) = P_{2+} - P_{2-} = \Delta P$$

$$\Rightarrow C_{x_2} = \frac{1}{2}(C_{x_1} + C_{x_3})$$

ضریب فشار جریان محوری: $(\bar{a})$

$$\left.\begin{array}{l} P = \rho A_2 C_{x_2}^2 (C_{x_1} - C_{x_3}) \\ C_{x_3} = 2C_{x_2} - C_{x_1} \end{array}\right\} \Rightarrow C_{x_1} - C_{x_3} = C_{x_1} - 2C_{x_2} + C_{x_1} = 2(C_{x_1} - C_{x_2})$$

اگر C_p را نداشتیم

$$\Rightarrow P = 2\rho A_2 C_{x_2}^2 (C_{x_1} - C_{x_2})$$

تعریف: $\bar{a} = \frac{C_{x_1} - C_{x_2}}{C_{x_1}} \Rightarrow C_{x_2} = C_{x_1}(1 - \bar{a})$

$$\Rightarrow \left.\begin{array}{l} P = 2\bar{a}\rho A_2 C_{x_1}^3 (1-\bar{a})^2 \\ X = 2\bar{a}\rho A_2 C_{x_1}^2 (1-\bar{a}) \end{array}\right.$$

در تئوری دیسک بات آست

توان انرژی جنبشی موجود در بالادست

ضریب توان

$$P_o = \underbrace{\frac{1}{2} C_{x_1}^2 (\rho A_2 C_{x_1})}_{\dot{m}} = \frac{1}{2}\rho A_2 C_{x_1}^3 \Rightarrow \boxed{C_p = \frac{P}{P_o} = 4\bar{a}(1-\bar{a})^2}$$

(P_o: توان انرژی جنبشی موجود در بالادست)

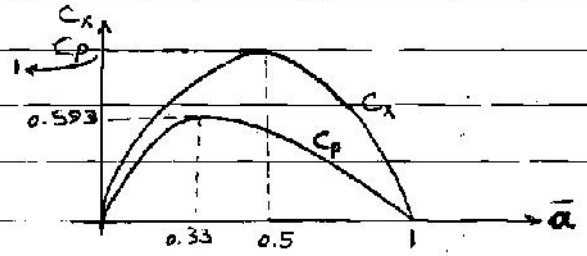
$$\frac{dC_p}{d\bar{a}} = 4(1-\bar{a})(1-3\bar{a}) = 0 \begin{cases} \bar{a} = 1 \rightarrow \text{Min} \rightarrow C_p)_{min} = 0 \\ \bar{a} = \frac{1}{3} \rightarrow \text{Max} \rightarrow C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \end{cases}$$

ضریب عملکرد: $\zeta = \frac{C_p}{C_{p_{max}}} = \frac{27}{16} C_p$ (مشابه راننده)

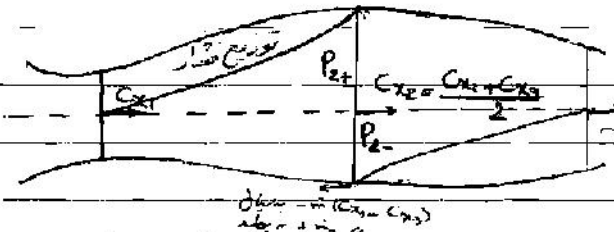
ضریب نیروی محوری

$$C_x = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho C_{x_1}^2 A_2} = 4\bar{a}(1-\bar{a})$$

$$\frac{dC_x}{d\bar{a}} = 0 \rightarrow \bar{a} = 0.5 \rightarrow C_{x_{max}} = 1$$



مطالعه جلسه قبل:



اثبات لزید چرا توزیع فشار اینطوری است.

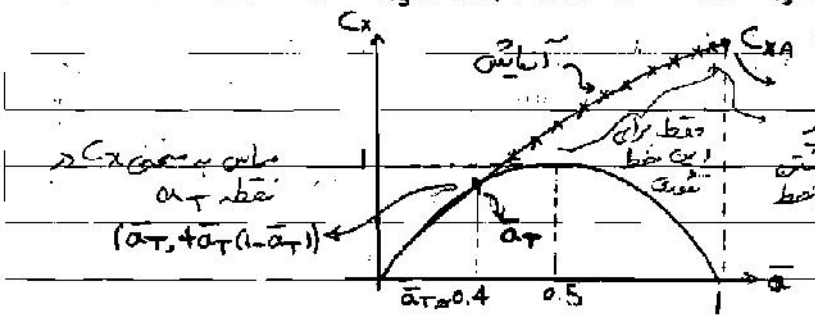
$$C_{x_2} = C_{x_1}(1-\bar{a})$$

$$C_p = \frac{P}{P_0} = 4\bar{a}(1-\bar{a})^2 \quad , \text{Max @ } \bar{a} = \frac{1}{3}$$

$$C_x = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho C_{x_1}^2 A_2} = 4\bar{a}(1-\bar{a}) \quad , \text{Max @ } \bar{a} = \frac{1}{2}$$ نیروی محوری ماکزیمم

تصحیح مقادیر بالای $\bar{a}$:

$$C_{x_3} = C_{x_1}(1-2\bar{a}) \xrightarrow{@\bar{a}=\frac{1}{2}} C_{x_3} = 0 \quad X$$



بهترین حالت: $C_x = C_{xA} - 4(C_{xA}^{0.5} - 1)(1-\bar{a})$ ، $\bar{a}_T = 1 - \frac{1}{2} C_{xA}^{0.5}$ تیغ

اندرسون پیشنهاد می‌کند: $C_{xA} = 1.816 \Rightarrow C_x = 0.4256 + 1.3904\bar{a}$

$\hookrightarrow \bar{a}_T = 0.326$

توان خروجی: $P = \frac{1}{2}\rho A_2 C_p C_{x_1}^3 \; (= C_p \cdot P_0)$

$P' = \frac{1}{2}\rho A_2 C_p C_{x_1}^3 (\eta_g \eta_d)$

Generator — Driver

$C_{p_{max}} = 0.593 \Rightarrow$ در واقعیت: $C_p \in (0.3, 0.35)$ توربین

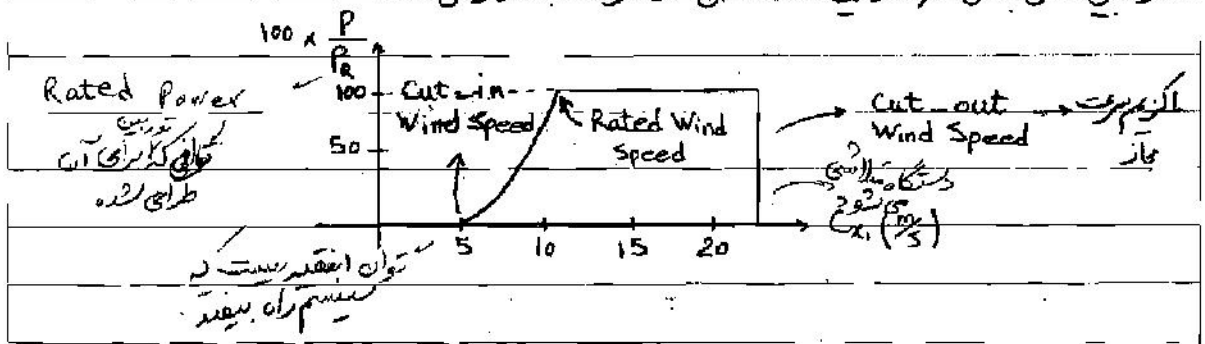
مثال: $P = 20\,KW$ ، $C_{x_1} = 7.5\,m/s$ ، $\rho = 1.2\,kg/m^3$ ، $C_p = 0.35$ ، $\eta_g = 0.75$ ، $\eta_d = 0.85 \Rightarrow$ قطر توربین (d)؟

$P' = \frac{1}{2}\rho A_2 C_p C_{x_1}^3 (\eta_g \cdot \eta_d) \Rightarrow 20\times10^3 = \frac{1}{2}\times 1.2 \times A_2 \times 0.35 \times 7.5^3 \times 0.75 \times 0.85$

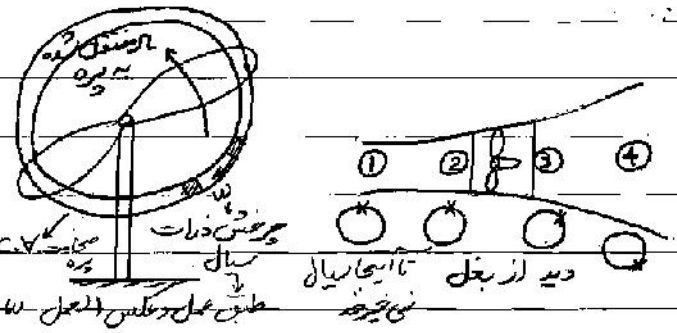
$\Rightarrow A_2 = 354.11\,m^2 \Rightarrow \frac{\pi}{4} d^2 = 354.11 \Rightarrow d = 21.23\,m$

---

* توربین های بادی تنها در یک محدوده ای از سرعت باد کار می‌کنند.



روش لوله جریان محقق جریان:



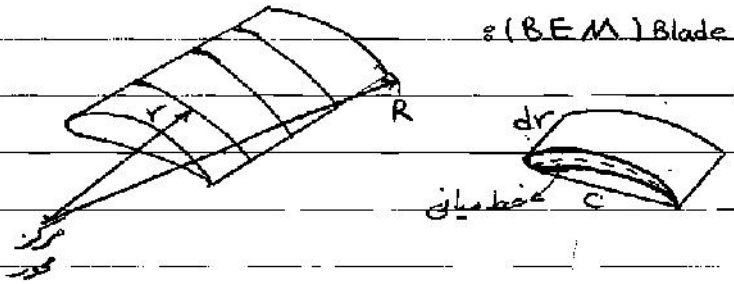
با نوشتن معادله مومنتم زاویه ای داریم:

$$dT = \frac{d(L)}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} \rightarrow dT = \frac{dm}{dt} r^2\omega = \dot{m} r^2\omega$$

$$\rightarrow dT = \rho(2\pi r dr) C_{x_2} r^2\omega = \rho C_{x_2} \omega r^2 2\pi r dr$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a' = \frac{\omega}{2\Omega} : \text{ضریب القایی جریان ماسی} \\ dT = 4a'(1-\bar{a})\rho C_{x_1} \Omega r^3 x\, dr \end{cases}$$

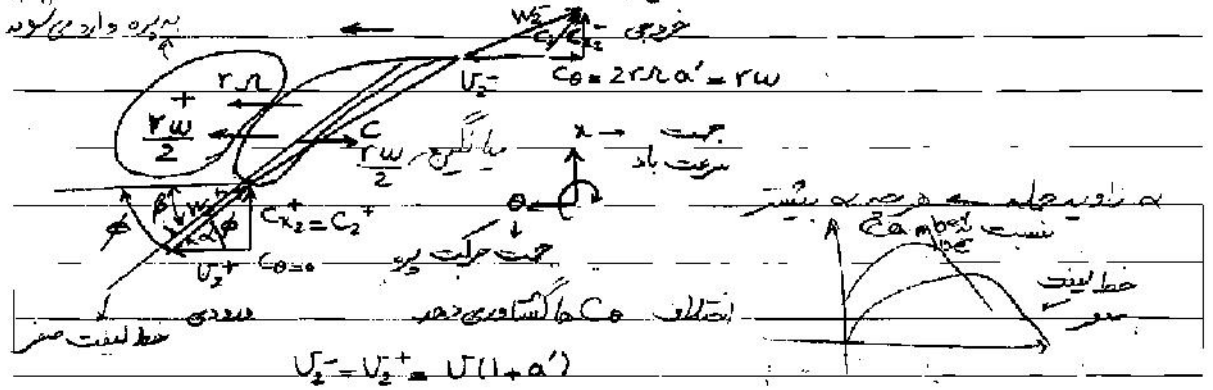
(BEM) Blade Element Method:



فرض ها:

① هیچ اثر متقابل بین الان های مختلف وجود ندارد.

② نیروی وارد بر الان ها صرفاً، با توجه به ضریب لیفت و درگ محاسبه می شوند.



$$dT = (d\dot{m})\underbrace{2a'\Omega r}_{\omega} r^2 = \rho(2\pi r dr C_{x_2}) 2a'\Omega r^2$$

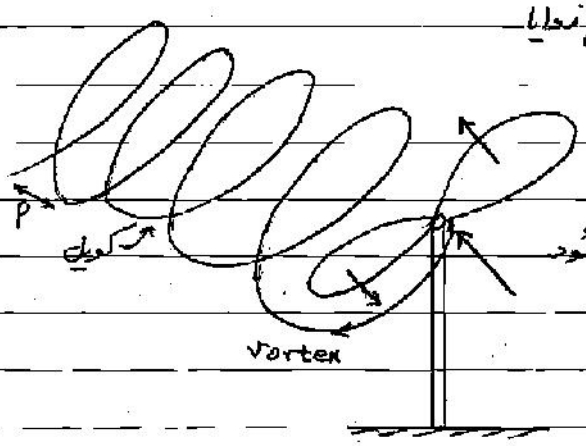
$$\Rightarrow dT = 4\pi\rho C_{x_1}(1-\bar{a})a'r^3 dr\Omega$$

$$P = \int_{r_{hub}}^{R_{tip}} dT = 4\pi\rho\Omega^2 C_{x_1}\int (1-\bar{a})a'r^3 dr$$

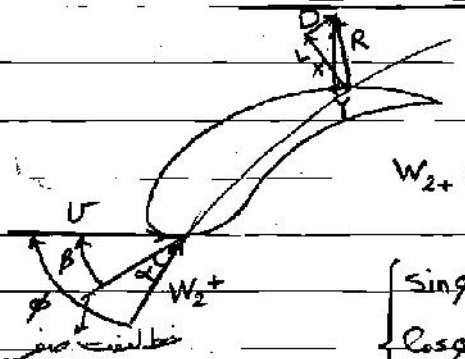
r تابع: $a, a' = f(r)$

$$V_2 = U(1+a') = r\Omega(1+a') = r\Omega + \underbrace{r\Omega a'}_{\frac{r\omega}{2}}$$

صفر برای تعمیم نداریم



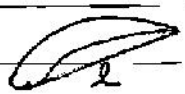
* با کاهش سرعت جریان در نقاط دورتر فاصله کویل ها (گام کویل ها) از هم کمتر می‌شود



* لغزش دورگ، عمود و مماس W_2 در نظر گرفته می‌شوند. (قرار دادی)

$$W_{2+} = \left\{C_{x_1}^2(1-\bar{a})^2 + (r\Omega)^2(1+a')^2\right\}^{0.5}$$

$$\begin{cases} \sin\phi = \dfrac{C_{x_2}}{W_2^+} = \dfrac{C_{x_1}(1-\bar{a})}{W_2^+} \\ \cos\phi = \dfrac{r\Omega(1+a')}{W_2^+} \\ tg\,\phi = \dfrac{C_{x_1}}{r\Omega}\left(\dfrac{1-\bar{a}}{1+a'}\right) \end{cases}$$

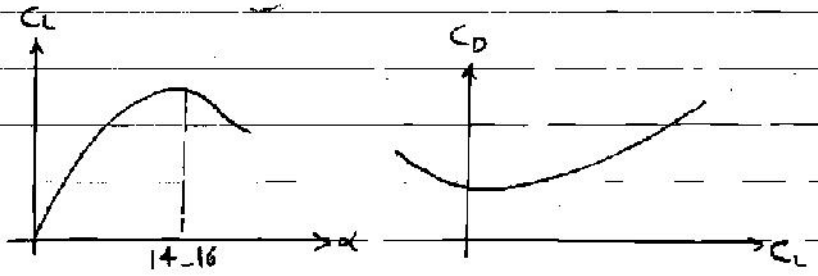


$$Y = L\sin\phi - D\cos\phi \Rightarrow C_L(\alpha) = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho W^2 l}$$ ← طول Chord

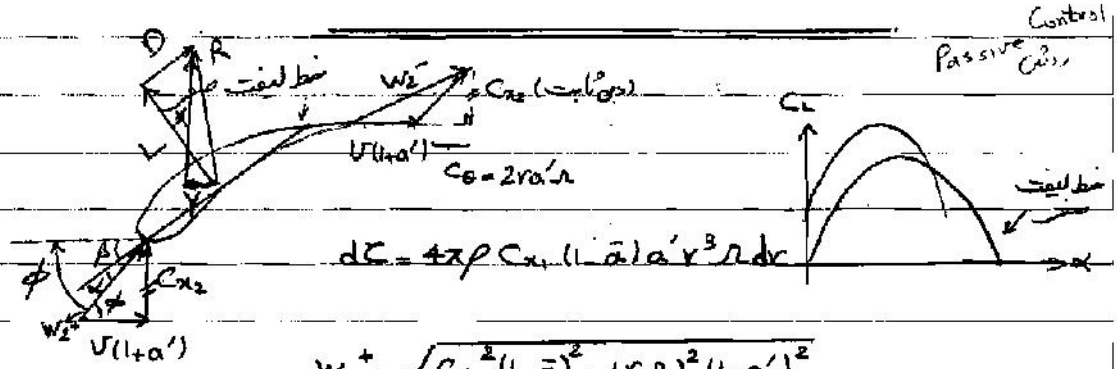
نیروی برآ

$$X = L\cos\phi + D\sin\phi \Rightarrow C_D(\alpha) = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho W^2 l}$$

نیروی پسا



$D \cong 0.01\, L$



$$dT = 4\pi\rho C_{x_1}(1-\bar{a})a'r^3 \Omega\, dr$$

$$W_2^+ = \sqrt{C_{x_1}^2(1-\bar{a})^2 + (r\Omega)^2(1+a')^2}$$

$$\sin\phi = \frac{C_{x_2}}{W_2^+} \quad , \quad \cos\phi = \frac{r\Omega(1+a')}{W_2^+}$$

$$\tan\phi = \frac{C_{x_1}(1-\bar{a})}{r\Omega(1+a')}$$

$$Y = L\sin\phi - D\cos\phi \longrightarrow C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho W^2 l}$$

$$X = L\cos\phi + D\sin\phi \longrightarrow C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho W^2 l}$$

ترکیب تئوری دیسک و BEM:

$$\begin{cases} dX = (L\cos\phi + D\sin\phi)\,dr \longrightarrow \text{نیروی دافعه یا تراست} \\ dT = r(L\sin\phi - D\cos\phi)\,dr \longrightarrow \text{گشتاور تولیدی} \end{cases}$$

تئوری BEM:

$$\begin{cases} dL = \frac{1}{2}\rho W^2 r(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi)Z l\,dr \longrightarrow \text{تعداد پره} \\ dP = \Omega\, dT = \frac{1}{2}\rho W^2 \Omega r(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi)Z l\,dr \\ dX = \frac{1}{2}\rho W^2(C_L\cos\phi + C_D\sin\phi)Z l\,dr \end{cases} \longrightarrow \text{توان}$$

تئوری دیسک:

$$\begin{cases} dX = dm(C_{x_1} - C_{x_3}) = dm\, C_{x_2}\left(\frac{2a}{1-a}\right) \\ dT = (2\pi r dr)\rho C_{x_2}(2rC_\theta) \quad , \quad C_\theta = r\Omega a' \end{cases}$$

قبلاً تعریف کردیم: $C_\theta = 2r\Omega a'$

با تساوی دو رابطه خواهیم داشت:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{Z l (C_L \cos\phi + C_D \sin\phi)}{8\pi r \sin^2\phi} \quad (dX = dX)$$

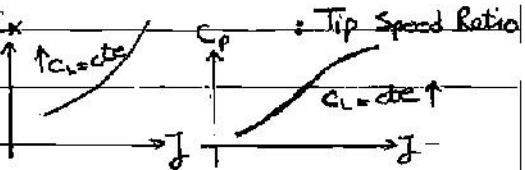
$$\frac{C_{x_2} C_D}{W^2} = \frac{Z l (C_L \sin\phi - C_D \cos\phi)}{8\pi r} \Rightarrow \frac{a'}{1+a'} = \frac{Z l (C_L \sin\phi - C_D \cos\phi)}{8\pi r \sin\phi \cos\phi}$$

با ساده سازی داریم:

$\lambda = \frac{Z l C_L}{8\pi r}$: ضریب باریکه ، $\varepsilon = \frac{C_D}{C_L}$

$$\left.\begin{aligned} \frac{a}{1-a} &= \lambda(\cos\phi + \varepsilon \sin\phi)/\sin^2\phi \\ \frac{a'}{1+a'} &= \lambda(\sin\phi - \varepsilon\cos\phi)/\sin\phi\cos\phi \end{aligned}\right\} \varepsilon = 0 \Rightarrow \text{حدس اولیه}$$

$$\begin{cases} J = \dfrac{\Omega R}{C_{x_1}} \\ \operatorname{tg}\phi = \dfrac{R}{rJ}\left(\dfrac{1-a}{1+a'}\right) \end{cases}$$

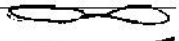


: Turbine Solidity

$$\sigma = \frac{\text{سطح پره}}{\text{سطح دیسک}} = \frac{Z A_B}{\pi R^2}$$

$$A_B = \int l(r)\,dr = \frac{1}{2} R\, l_{av}$$

$$\sigma = \frac{Z l_{av}}{2\pi R}$$



مثال: قطر روتور $D_R = 30\,m$ ، $J = 5$ ، $l = 1\,m$ ، $C_D \cong 0$ ، $\frac{r}{R} = 0.9$ ، $\beta = 2°$ ، 10.5 طول وتر (Chord) ، $Z = 3$

$a = ?$ ، $a' = ?$

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{R}{rJ}\left(\frac{1-a}{1+a'}\right) \xrightarrow[a=a'=0]{\text{شروع}} \operatorname{tg}\phi = 0.2105 \Rightarrow \phi = 11.89° \Rightarrow \alpha = \phi - \beta = 9.89°$$

برای ایرفویل های نازک با طول Chord کوچک:

$C_L = 0.1\alpha° = 2\pi \sin\alpha = 0.981$ (زاویه حمله کوچک)

$$\lambda = \frac{Z l C_L}{8\pi r} \Rightarrow \lambda = 0.008743$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\lambda(\cos\phi + \varepsilon\sin\phi)}{\sin^2\phi} \Rightarrow a = 0.1677$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\lambda(\sin\phi - \varepsilon\cos\phi)}{\sin\phi\cos\phi} \Rightarrow a' = 0.00902$$

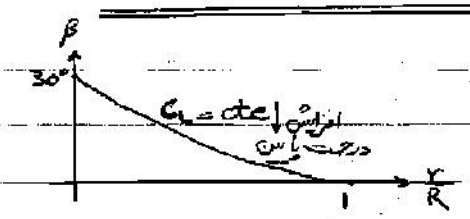
با قرار دادن دوباره در رابطه $tg\phi = \frac{R}{rJ} \times \frac{1-a}{1+a'}$ ، ϕ جدید را حساب می‌کنیم:
پس از همگرا شدن:

$$a = 0.1925 \quad , \quad a' = 0.00685$$

نکته: برای ایرفویل با ضخامت و خط میانی کوچک، داریم:

$$C_L = 2\pi \sin\alpha \underset{\alpha \ll 1}{=} 2\pi\alpha(rad) = 0.1\alpha(degree)$$

زاویه پیچ، Twist (β):



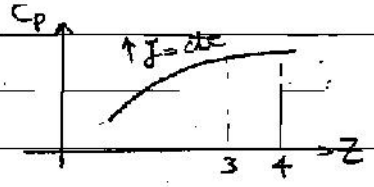
عوامل مؤثر بر شکل پره:

Taper ← مخروطی

Twist

J

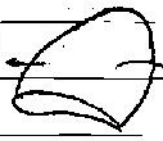
Solidity



* اگر طول پره کوچک ← تعداد پره ← 4o
* " " زیاد " " ← (1,2,3,4)

شکل نوک پره:

برای کاهش شدت گردابه‌ها، از sword استفاده می‌کنیم



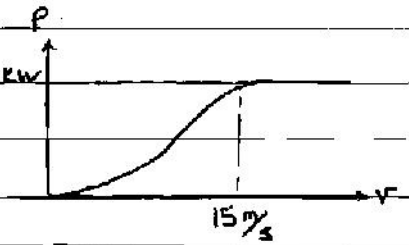
نوع کمتر، راندمان کمتر

کنترل:
- سرعت باد ← Blade Pitch Control
- جهت باد ← فیدبک و گرد ← تغییر زاویه حمله
- Stall & Passive
- Aileron ← فیدبک و گرد ← Plain

* بیشتر توربین‌های استفاده شده در ایران ← شرکت صبا نیرو ← 47-660 KW
- $D_R = 47m$
- $N = 28.5 \pm 10\%$ rpm
- $L_B = 22.9m$
- $m = 1150kg$
- Pitch Control
- ژنراتور ← 660 KW ← کمتر از 23.5 برای شعاع hub
- گریکن نورالدینی
- $V_{wind-Min} = 4 m/s$
- $V_{wind-N\ Wind-Rated} = 15 m/s$ سرعت نامی
- $V_{wind-max} = 25 m/s$

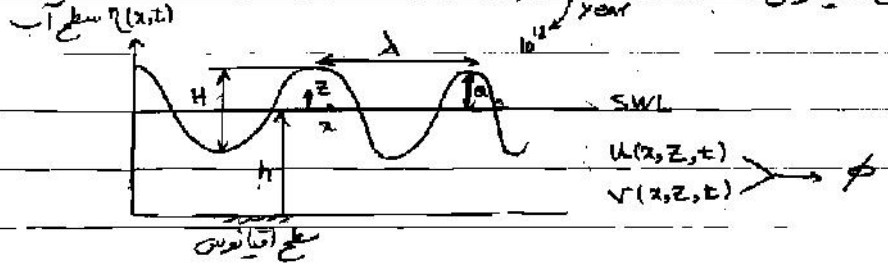
@ $\frac{r}{R} = 1 \rightarrow \beta = 0$ ، $\alpha = 7-8°$

@ $\frac{r}{R} = 0 \rightarrow \beta = 15.17°$



انرژی اقیانوسی:
- موج ← Wave power
- جریان جزر و مدی ← Current-tidal
- (OTEC) Ocean Thermal Energy Conversion
- گرادیان غلظت نمک ← Salinity Gradient Energy

موج:
- حدود 70٪ سطح زمین را اقیانوس‌ها تشکیل می‌دهند که بزرگترین منبع جذب انرژی در دنیاست.
- پتانسیل تئوری انرژی اقیانوس‌ها حدود $100,000 \frac{Twh}{year}$ (10^{12})



با حل تقریبی داریم:

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2}\sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

- متوسط زمانی انرژی جنبشی بر واحد سطح:

$$E_K = \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2}\rho V^2 dz$$

حل تقریبی ← $E_K = \frac{1}{4}\rho g a^2$ ← انرژی موج

چگالی آب

دامنه موج ← $a = \frac{H}{2}$

* موج با وزش جریان باد روی سطح اقیانوس ایجاد می‌شود.

- انرژی جزر و مد (tidal):

* تغییر مقعریت زمین و ماه ایجاد می‌شود.