جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

مجتمع آموزش عالی گناباد

فصل دوم: توربوماشین ها

مکانیک سیالات ۲

دکتر وحید محمودی

گروه مهندسی شیمی

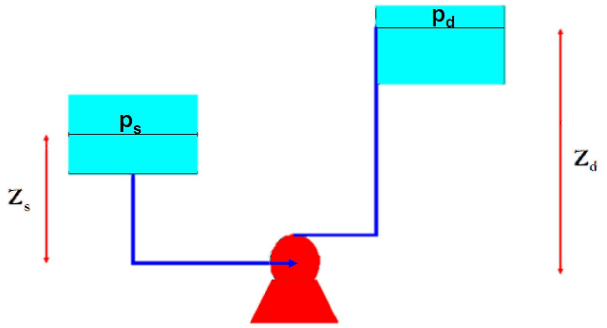
پمپ ها
(Pumps)

مقدمه

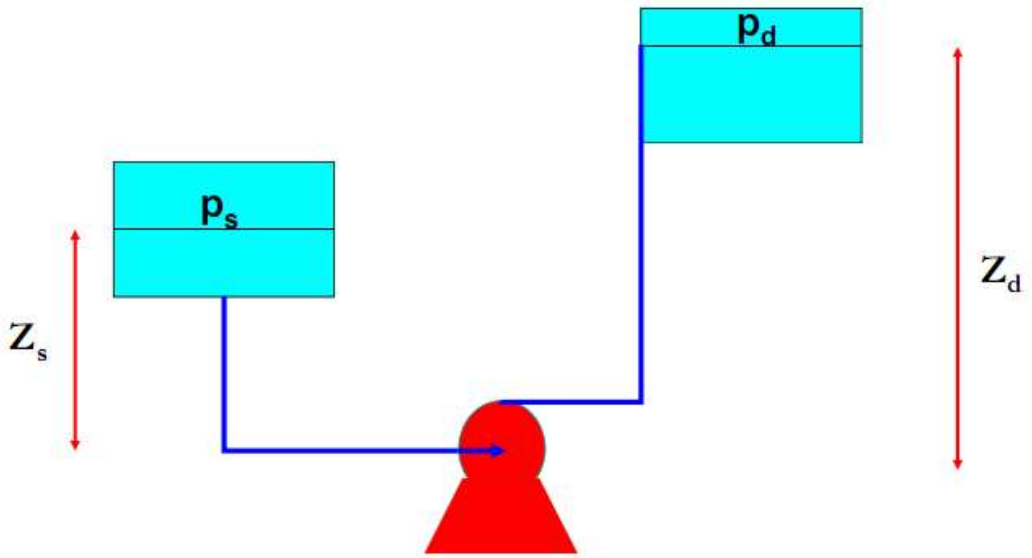
- برای انتقال دادن مایعات باید بر افت فشارهای مسیر غلبه کرد و برای این کار از پمپ استفاده می شود. همچنین اگر بخواهیم مایع را به سطحی بالاتر منتقل کنیم استفاده از پمپ ضروری است.
- هد (بلندا) یک پمپ به کمک رابطه زیر تعیین می گردد (یادآوری از سیالات ۱):

$$h_p + \frac{P_S}{\gamma} + \frac{V_S^2}{2g} + Z_S = \frac{P_d}{\gamma} + \frac{V_d^2}{2g} + Z_d + h_f$$

$$\Rightarrow \frac{P_d - P_S}{\gamma} + \frac{V_d^2 - V_S^2}{2g} + Z_d - Z_S = h_p - h_f$$



پمپ کردن مایعات



$$\frac{P_d - P_S}{\gamma} + \frac{V_d^2 - V_S^2}{2g} + Z_d - Z_S = h_p - h_f$$

پمپ کردن مایعات

- هد مکش

$$h_s = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g}^{0} + Z_s - h_{fs}$$

- هد تخلیه

$$h_d = \frac{P_d}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g}^{0} + Z_d + h_{fd}$$

- هد کل پمپ

$$h_p = h_d - h_s$$

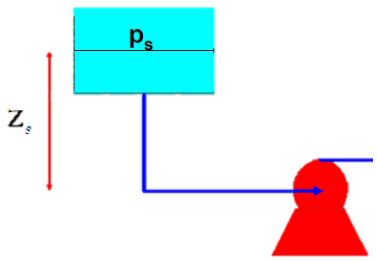
$$= \left(\frac{P_d - P_s}{\rho g}\right) + \left(\frac{V_d^2 - V_s^2}{2g}\right) + \left(Z_d - Z_s\right) + \left(h_{fd} + h_{fs}\right)$$

هد خالص مکش مثبت (NPSH)

- تعریف:

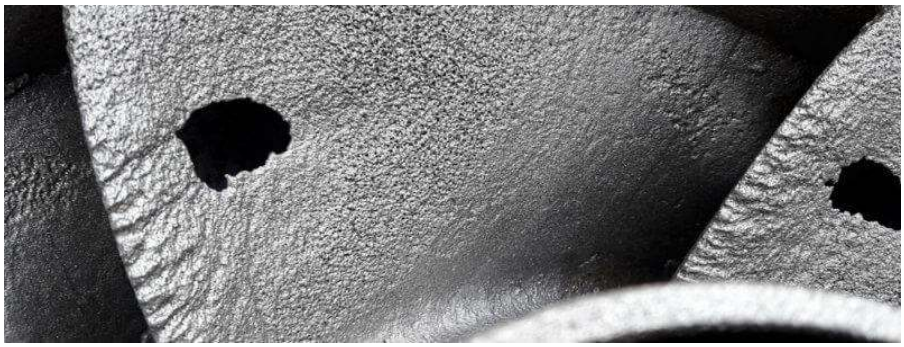
$$NPSH = \frac{P_s - P_v}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s - h_{fs}$$

$$= h_s - \frac{P_v}{\rho g}$$



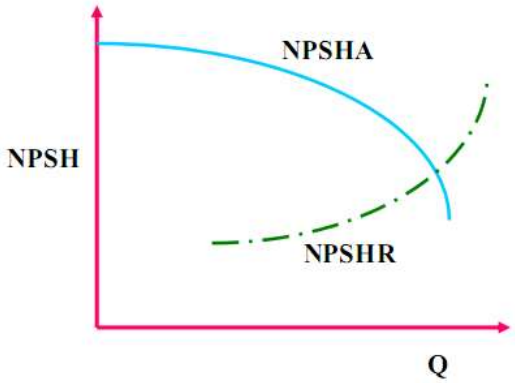
- P_v همان فشار بخار مایع در شرایط عملیاتی است.
- NPSH باید همیشه مثبت باشد. به این معنا که فشار مایع باید در مکش پمپ بیشتر از فشار بخار مایع باشد تا مایع در ورودی پمپ تبخیر نشده و باعث به وجود آمدن حباب و پدیده ای به نام cavitation یا کاویتاسیون در پمپ نگردد.
- از آن جا که با افزایش شدت جریان، h_{fs} زیاد می شود، NPSH با افزایش شدت جریان کاهش خواهد یافت.

هد خالص مکش مثبت (NPSH)



هد خالص مکش مثبت (NPSH)

- در صورتی که مایع در حال جوش باشد ($P_s=P_v$)، در نتیجه $NPSH=Z_s-h_{fs}$ خواهد بود. در این حالت، مخزن مکش باید حتماً بالاتر از پمپ باشد، زیرا Z_s نمی تواند منفی یا صفر شود. در صورتی که $P_s>P_v$ باشد، ممکن است بتوان ارتفاع مخزن مکش راپایین تر از پمپ در نظر گرفت.
- NPSH باید حداقل ۲ یا ۳ متر باشد. برای پمپ های بزرگ، این مقدار می تواند تا ۱۵ متر هم برسد.



- NPSHA یا NPSH موجود، مقداری است که توسط مهندس طراح تعیین می شود.
- NPSHR یا NPSH موردنیاز توسط سازنده پمپ داده می شود و تلفات انرژی درون پمپ (که غالبا هنگام ورود مایع به پمپ اتفاق می افتد) را لحاظ می کند.

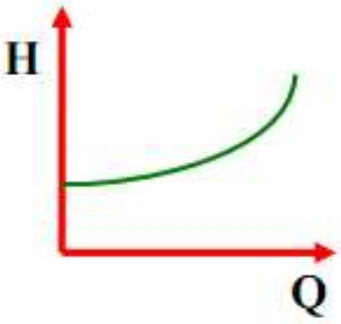
منحنی هد موردنیاز سیستم

$$\frac{P_d - P_s}{\rho g} + \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} + Z_d - Z_s = h - (h_{fs} + h_{fd})$$

$$h_{sys} = \frac{P_d - P_s}{\rho g} + \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} + Z_d - Z_s + h_{fs} + h_{fd}$$

$$h_{f\,i} = \sum K_i \frac{V_i^2}{2g}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4}{\pi D^2} Q$$

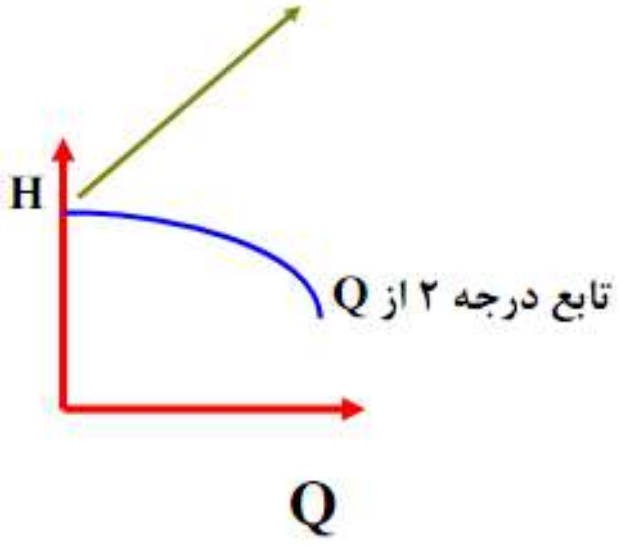


$$\Rightarrow h_{sys} = \frac{(P_d - P_s)}{\rho g} + (Z_d - Z_s) + \frac{1}{2g}\left[-\frac{16}{\pi^2 D_s^4} + \frac{16}{\pi^2 D_d^4} + \sum \frac{16 K_i}{\pi^2 D_i^4}\right] Q^2$$

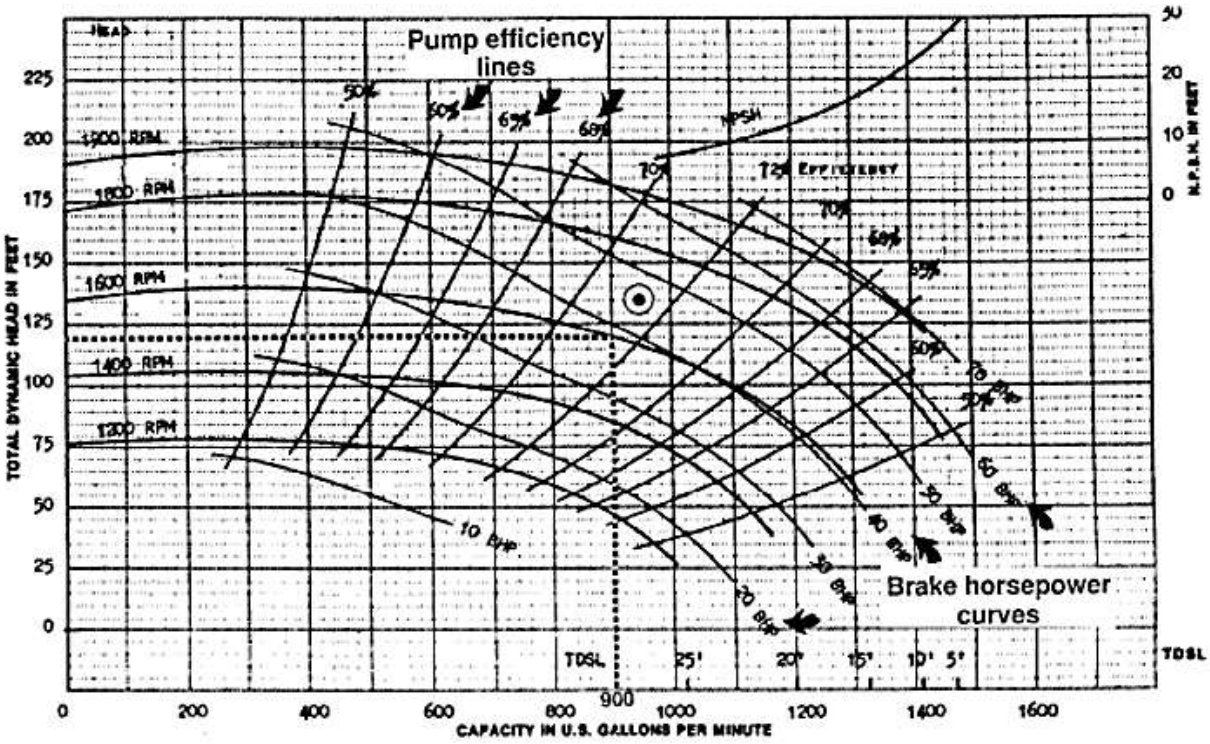
منحنی هد پمپ

$$Q = 0 \Rightarrow H = H_{\max}$$

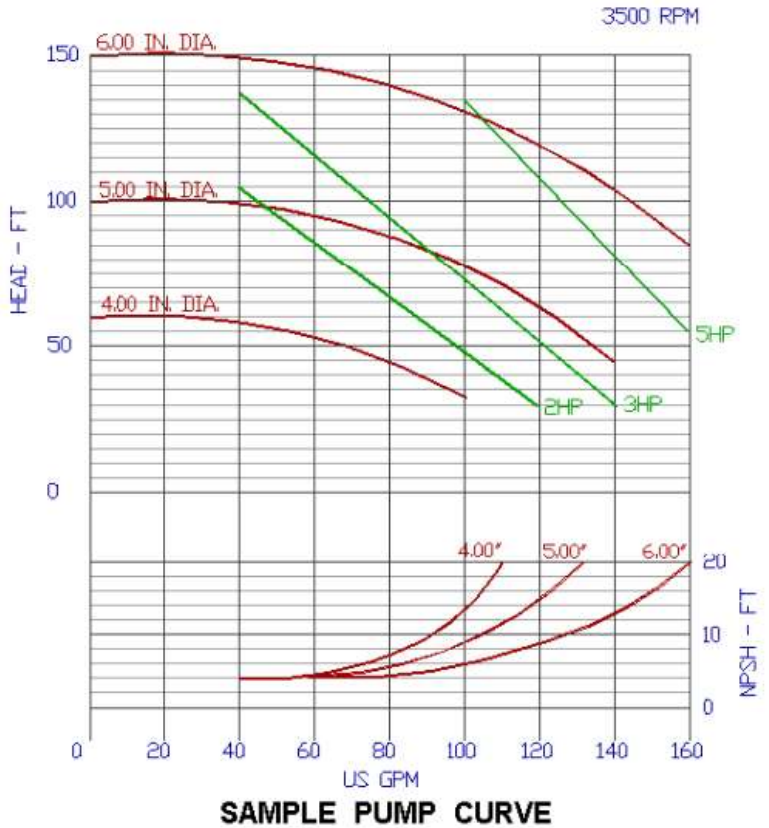
shut off pressure



منحنی هد پمپ

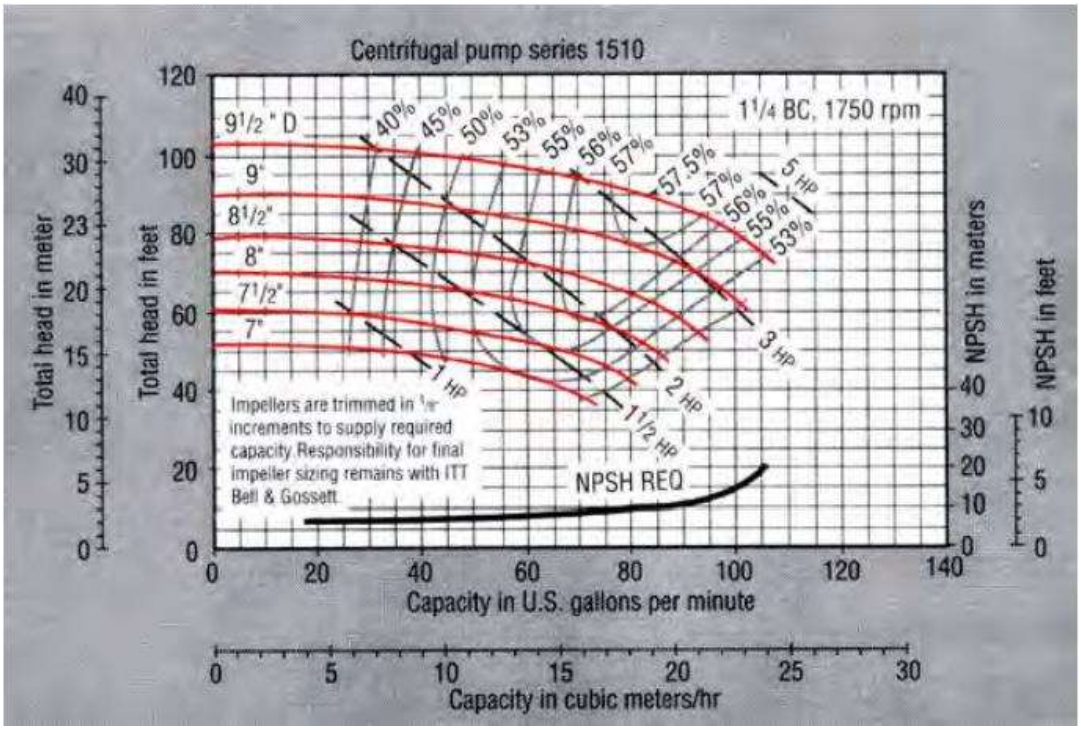


منحنی هد پمپ

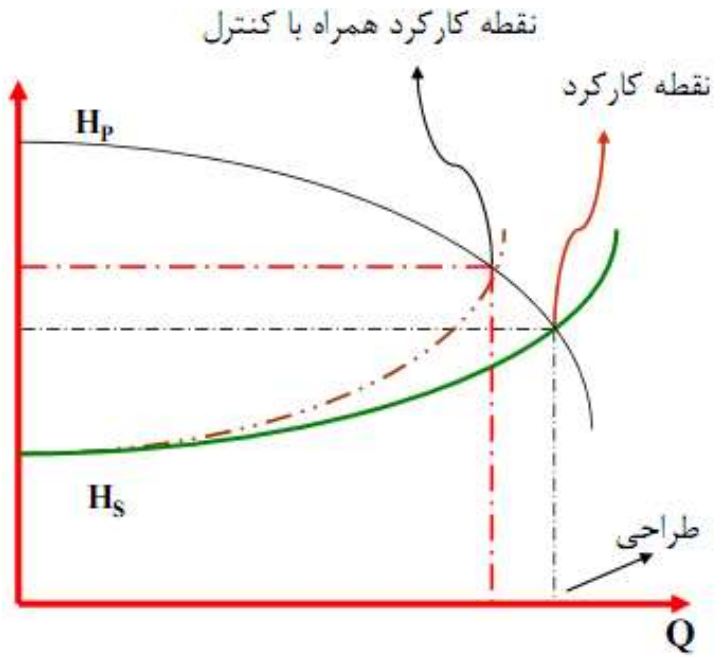


SAMPLE PUMP CURVE

منحنی هد پمپ



نقطه عملکرد پمپ

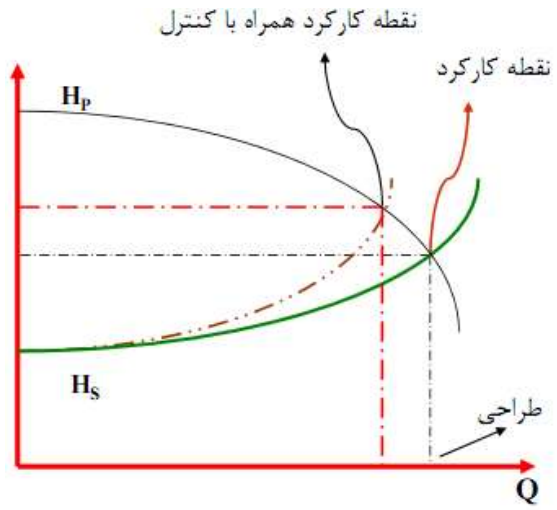


$$H_P - H_S = 0$$

$$or \quad H_P = H_S$$

نقطه عملکرد پمپ

- طراحی پمپ باید بر مبنای ۱۰٪ اضافه ظرفیت باشد. بنابراین در صورتی که لازم باشد دبی اصلی از پمپ گرفته شود، باید یک شیر کنترل در جریان خروجی در نظر بگیریم. در این صورت، منحنی سیستم منحنی قهوه ای رنگ خواهد بود.



- معمولاً shut off pressure حدود ۲۰٪ بیشتر از فشار معمولی عملکرد پمپ است.

بازده پمپ

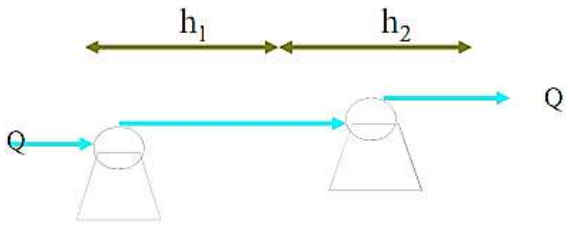
$$P = \Delta P.Q = \rho g H_P.Q \longrightarrow \text{توری}$$

$$P_P = \frac{P}{\eta_P} = \frac{\rho g H_P Q}{\eta_P} \longrightarrow \text{راندمان پمپ حدود 70\% است.}$$

$$P_M = \frac{P_P}{\eta_M} = \frac{\rho g H_P Q}{\eta_P \eta_M} \longrightarrow \text{راندمان موتور برقی}$$

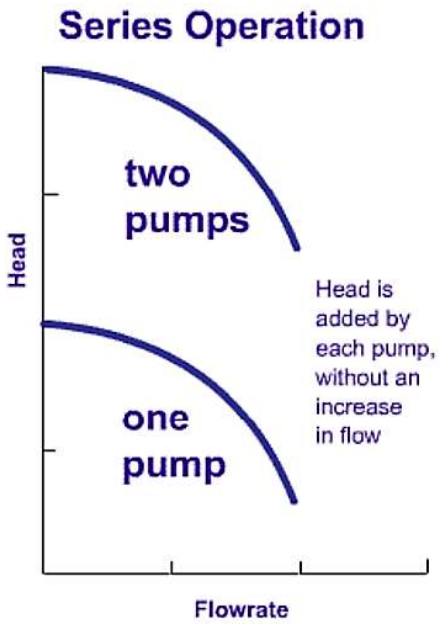
اتصال پمپ ها

- اتصال سری



$$Q = Q_1 = Q_2$$

$$h = h_1 + h_2$$



اتصال پمپ ها

- اتصال سری

الف: روش جبری: h جدید برابر است با مجموع معادله های منحنی های دو پمپ. این منحنی جدید را با منحنی عملکرد سیستم قطع می کنیم تا نقطه عملکرد به دست آید.

$$h_1 = f_1(Q)$$

$$h_2 = f_2(Q)$$

$$h = f_1(Q) + f_2(Q)$$

در صورتی که دو پمپ یکسان باشند:

$$h = 2h = 2f(Q)$$

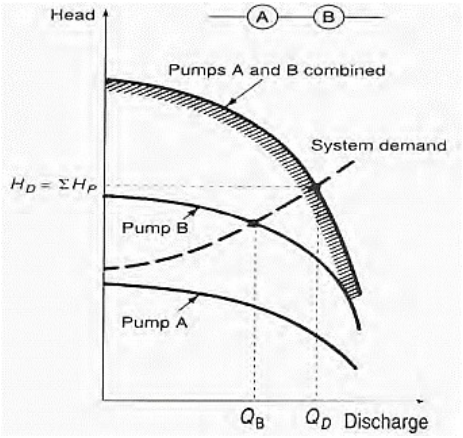
اتصال پمپ ها

- اتصال سری

ب: روش ترسیمی:

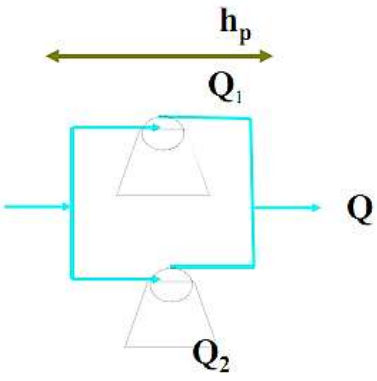
- ابتدا یک مقدار برای Q حدس می زنیم.
- از روی شکل مقادیر h_1 و h_2 را در مقدار Q به دست می آوریم.
- اگر $h_1+h_2=h_s$ باشد، این نقطه کارکرد سیستم است.

در غیر این صورت باید حدس Q را تغییر دهیم.



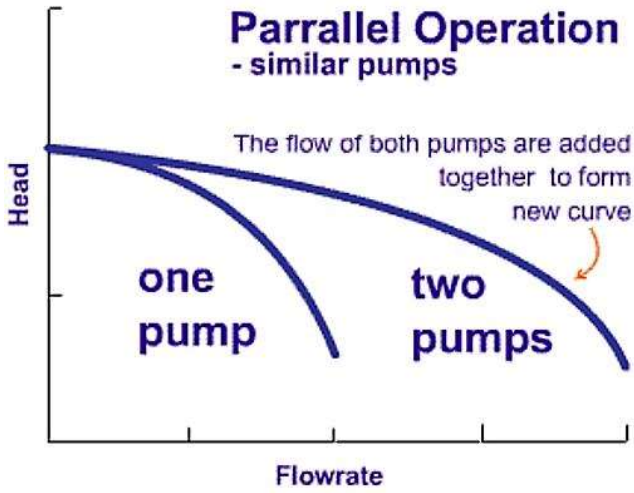
اتصال پمپ ها

- اتصال موازی



$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$h = h_1 = h_2$$



اتصال پمپ ها

- اتصال موازی

الف: روش جبری: Q_1 و Q_2 را از معادله منحنی مشخصه پمپ ها محاسبه می کنیم (h در هر دو یکسان است). سپس $Q=Q_1+Q_2$ را به دست می آوریم. این منحنی مشخصه جدید می باشد. این منحنی را با منحنی سیستم قطع می دهیم تا نقطه عملکرد مشخص شود.

$$h_1 = f_1(Q) \rightarrow Q_1 = g_1(h)$$

$$h_2 = f_2(Q) \rightarrow Q_2 = g_2(h)$$

$$Q = g_1(h) + g_2(h)$$

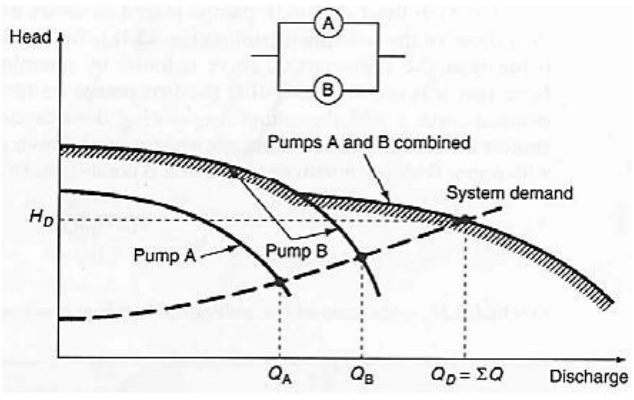
اتصال پمپ ها

- اتصال موازی

ب: روش ترسیمی:

- **در یک h معین، Q_1، Q_2 و Q_s را تعیین می کنیم.**
- **اگر $Qs=Q_1+Q_2$ باشد، این نقطه نقطه عملکرد سیستم است.**

در غیر این صورت باید حدس h را تغییر دهیم.



آنالیز ابعادی پمپ های گریز از مرکز

- کمیت های موثر در عملکرد پمپ ها عبارتند از:

$$f(P, W, D, Q, \Delta P, \rho, \mu)$$

کمیت	علامت	بعد
قدرت	$\mathbb{P}$	$\mathbb{ML}^2/\mathbb{T}^3$
سرعت زاویه ای	$\mathbb{W}$	$\mathbb{T}^{-1}$
قطر پروانه	$\mathbb{D}$	$\mathbb{L}$
شدت جریان حجمی	$\mathbb{Q}$	$\mathbb{L}^3/\mathbb{T}$
تغییر فشار	$\Delta\mathbb{P}$	$\mathbb{M}/\mathbb{LT}^2$
ویسکوزیته سیال	ρ	$\mathbb{M}/\mathbb{L}^3$
چگالی سیال	μ	$\mathbb{M}/\mathbb{LT}$

آنالیز ابعادی پمپ های گریز از مرکز

- به کمک آنالیز ابعادی می توان کمیت های بدون بعد زیر را در پمپ ها تعریف کرد:

	بدون بعد	با بعد
ضریب قدرت	$C_p = \frac{P}{\rho\omega^3 D^5}$	$\frac{P}{N^3 D^5}$
ضریب فشار	$C_{\Delta p} = \frac{\Delta p}{\rho\omega^2 D^2}\left(C_H = \frac{gH}{\omega^2 D^2}\right)$	$\frac{H}{N^2 D^2}$
ضریب شدت جریان	$C_Q = \frac{Q}{\omega D^3}$	$\frac{Q}{ND^3}$
عدد رینولدز	$\mathrm{Re} = \frac{\omega D^2 \rho}{\mu}$	$\Delta P = \rho g H \Rightarrow C_H = \frac{\rho g H}{\rho W^2 D^2} = \frac{gH}{W^2 D^2}$

آنالیز ابعادی پمپ های گریز از مرکز

- ضریب دیگری که از ترکیب اعداد بدون بعد دیگر به دست می آید:

$$\frac{C_Q C_H}{C_P} = \frac{\rho g Q H}{P} = \eta_P$$

- یعنی بازده (راندمان) پمپ نیز یکی از پارامترهای مشابه است.

سرعت ویژه

- با استفاده از این کمیت می توان یک دسته از پمپ های هم شکل را مشخص نمود. سرعت ویژه مربوط به کارکرد پمپ در بیشترین بازده (راندمان) است و با داشتن H, Q, ω مشخص می گردد.

- برای تعیین سرعت ویژه (Ω_p) ابتدا باید D را بین C_Q و C_H حذف کنیم:

$$\frac{C_Q}{C_H^{3/2}} = \frac{\frac{Q}{\omega D^3}}{\frac{(gH)^{3/2}}{\omega^2 D^2}} = \frac{\omega^2 Q}{(gH)^{3/2}}$$

سرعت ویژه

- برای آن که کمیت به دست آمده متناسب با سرعت باشد، از عبارت به دست آمده ریشه دوم می گیریم:

$$\Omega_P = \frac{\omega Q^{1/2}}{(gH)^{3/4}} \xrightarrow{\text{با بعد}} \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}}$$

- با استفاده از مقدار Ω_P می توان نوع پمپ را مشخص کرد:

$\Omega_p < 1$	radial flow	جریان شعاعی
$1 < \Omega_p < 4$	mixed flow	جریان مخلوط
$\Omega_p > 4$	axial flow	جریان محوری

تشابه در پمپ ها

- روابط مربوط به تشابه در پمپ ها که مشخصات هندسی یکسان دارند به شکل زیر است:

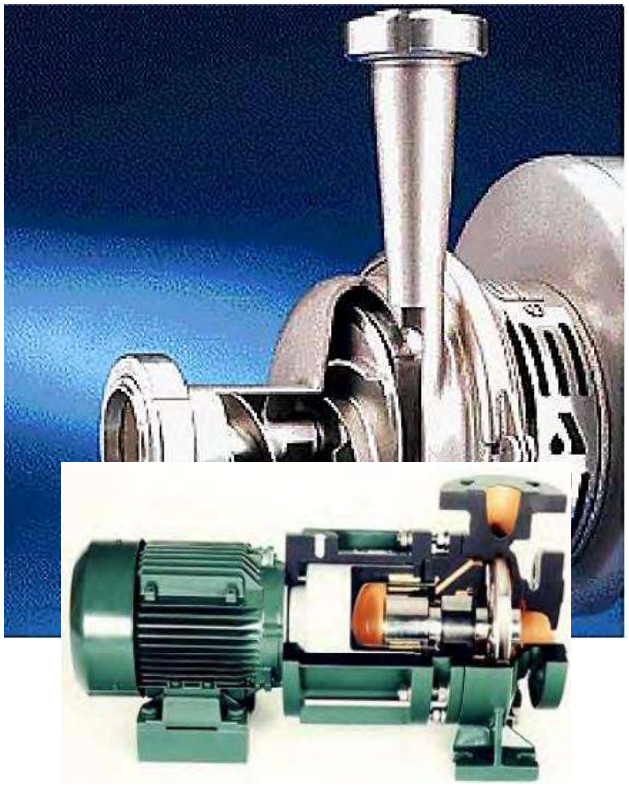
$$(C_P)_1 = (C_P)_2 \quad or \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \xrightarrow{\text{با بعد}} \frac{\rho_2}{\rho_1}\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5$$

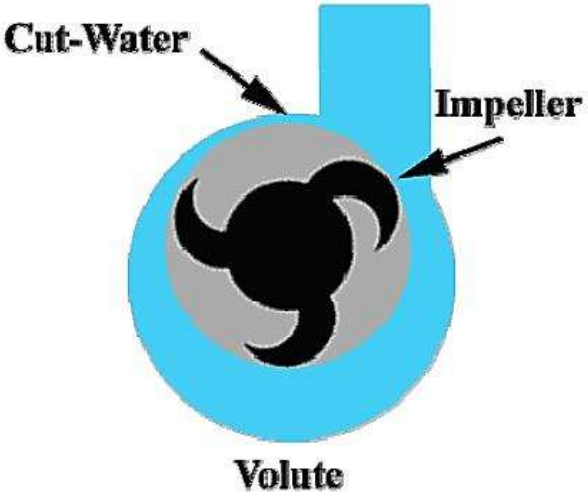
$$(C_H)_1 = (C_H)_2 \quad or \quad \frac{H_2}{H_1} = \frac{g_1}{g_2}\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \qquad \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

$$(C_Q)_1 = (C_Q)_2 \quad or \quad \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \qquad \left(\frac{N_2}{N_1}\right)\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

انواع پمپ ها

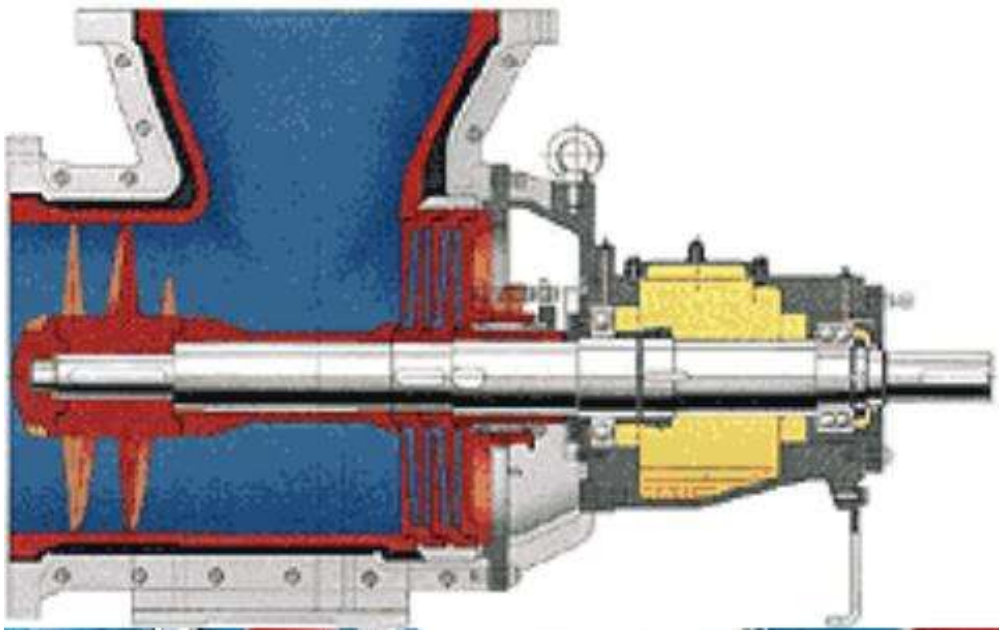
- پمپ های گریز از مرکز





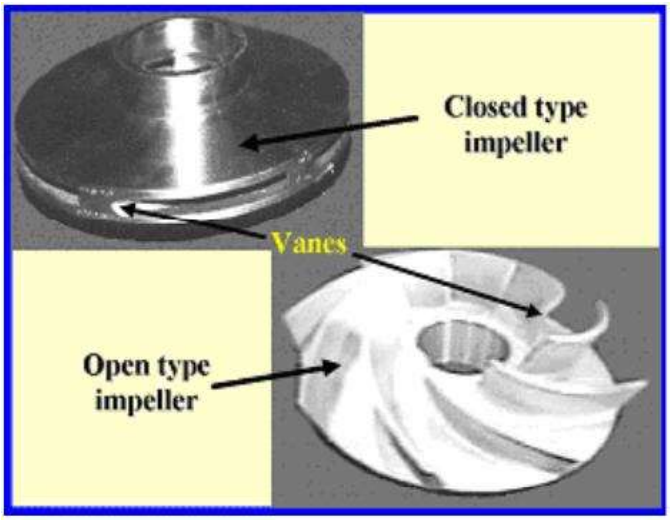
انواع پمپ ها

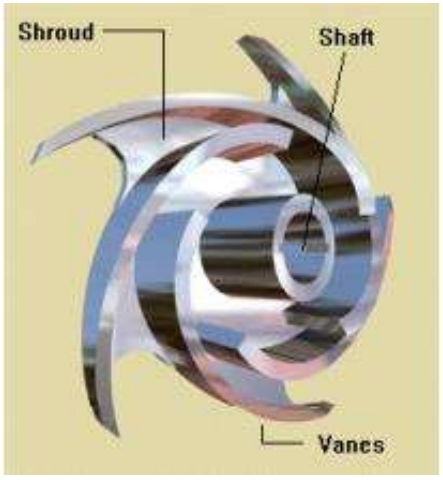
- جریان محوری



انواع پمپ ها

- پره ها



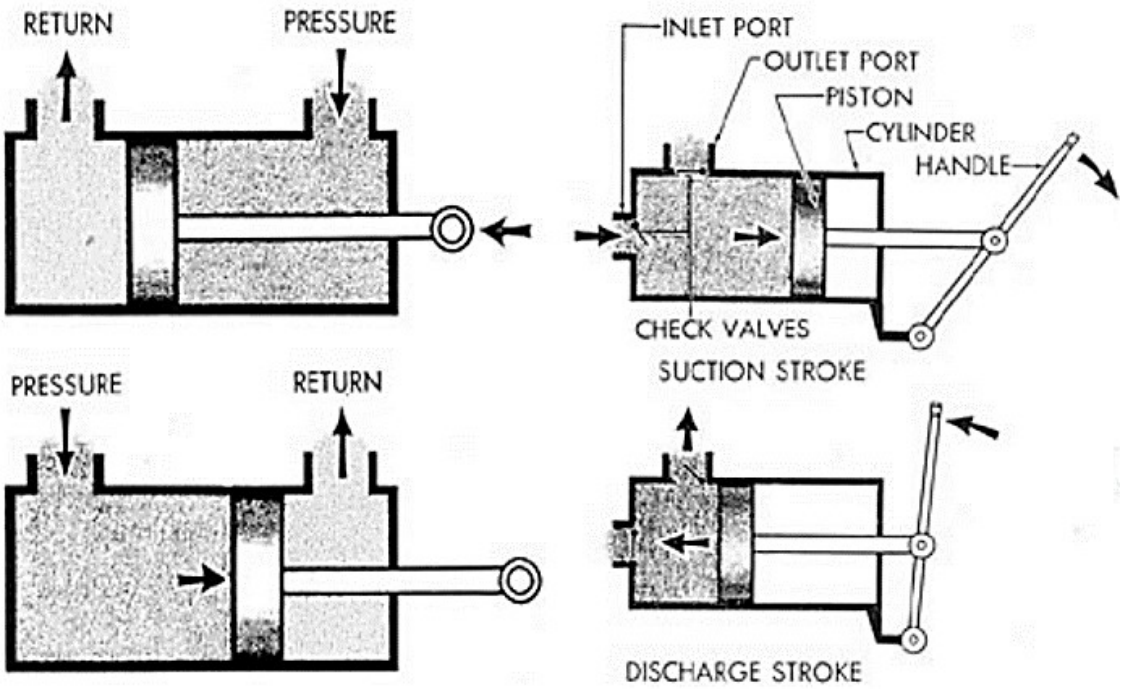


انواع پمپ ها

- پره ها

انواع پمپ ها

- جابجایی مثبت



مثال

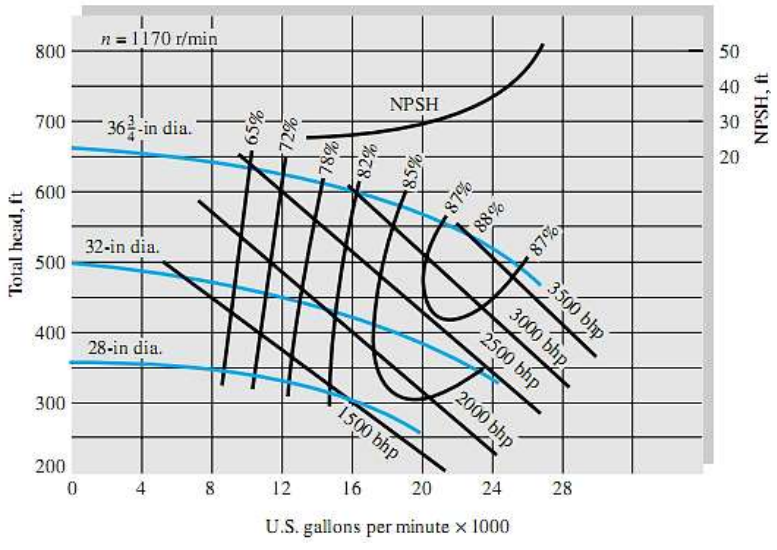
می خواهیم آب را با دبی ۹۰/۸۵ m^3/min از مخزنی که فشار مطلق در سطح آن ۱۰۱/۳۵ kPa است تلمبه کنیم. برای این کار، از پمپی با قطر ۸۱/۲۸ cm و سرعت گردش ۱۱۷۰ r/min استفاده کنیم. منحنی عملکرد پمپ هم از طرف شرکت سازنده به شکل زیر داده شده است. اگر افت هد از مخزن تا ورودی پمپ ۱/۸ m باشد، ورودی پمپ را باید در کجا مستقر کرد تا از حفره زایی جلوگیری شود؟ خواص آب را در دو حالت زیر در نظر بگیرید:

(الف) P_v=۱/۷۱ kPa ،۱۵ °C

.SG=۰/۹۹۹

(ب) P_v=۸۴/۶ kPa ،۹۵ °C

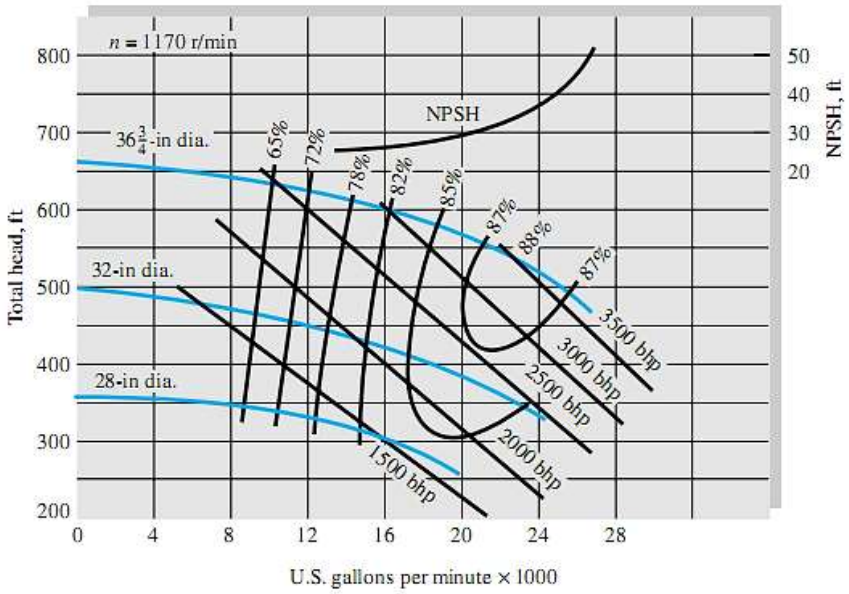
.SG=۰/۹۶۲



حل

الف: با استفاده از نمودار، باید میزان NPSH را تعیین کنیم.

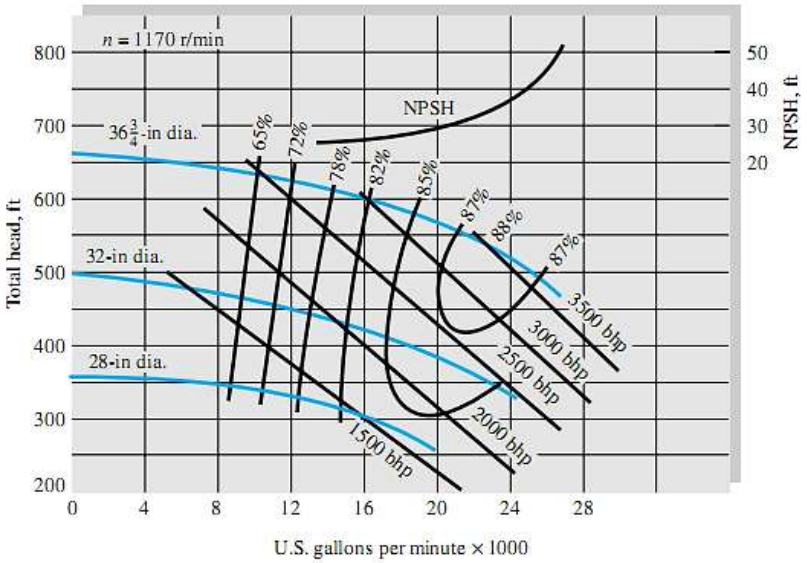
$$Q = 90.85 \frac{m^3}{\min}$$



حل

مثال

منحنی عملکرد پمپی با قطر .in ۳۲ در دور r/min ۱۱۷۰ داده شده است. از این پمپ برای انتقال آب با دمای °C ۱۵ از طریق لوله ای با طول (L) ft ۱۵۰۰ و قطر داخلی (D) .in ۱۶ از یک مخزن روباز به مخزن روباز دیگر که ft ۱۲۰ بالاتر قرار دارد استفاده می شود. رابطه افت هد اصطکاکی به شکل زیر داده شده است که در آن، f=۰/۰۳ می باشد. مطلوبست تعیین نقطه عملکرد، بازده پمپ و توان پمپ.



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

حل

برای یافتن نقطه عملکرد، باید منحنی سیستم را هم رسم کنیم تا مشخص شود منحنی پمپ و سیستم در چه نقطه ای یکدیگر را قطع می کنند. برای سیستم می دانیم:

$$h_{sys} = \frac{P_d - P_s}{\rho g} + \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} + Z_d - Z_s + h_{fs} + h_{fd}$$

در نتیجه

حل