فصل ۴
اصول محاسبات در پمپ ها

- تعاریف اولیه
  توان مصرفی
  توان تولیدی
  بازده پمپ

- اتصال(به هم بستن) پمپ ها

- منحنی مشخصه
  منحنی مشخصه پمپ
  منحنی مشخصه سیستم
  انواع منحنی مشخصه پمپ
  منحنی های مشخصه دیگر در پمپ های گریز از مرکز

- محاسبات در پمپ های رفت و برگشتی
  بازده در پمپ های رفت و برگشتی
  فاکتور پمپ
  دبی پمپ

فصل ۴ اصول محاسبات در پمپ ها

تعاریف اولیه:

- **توان مصرفی:**

معمولا از دو منبع الکتریکی و مکانیکی جهت تامین نیرو محرکه پمپ استفاده می شود.

موتور الکتریکی و توربین به ترتیب، منابع الکتریکی و مکانیکی جهت تامین انرژی دورانی و مکانیکی در پمپ ها هستند.

- **۱-توان الکتریکی مصرفی:**
  - **عبارتست از میزان انرژی الکتریکی مصرف شده توسط محرک الکتریکی در واحد زمان جهت تامین نیرو محرکه پمپ.**
  - **توان الکتریکی مصرفی که به آن توان ورودی**

نیز گفته می شود به صورت روبرو تعریف می شود:

$$P_i = IV$$

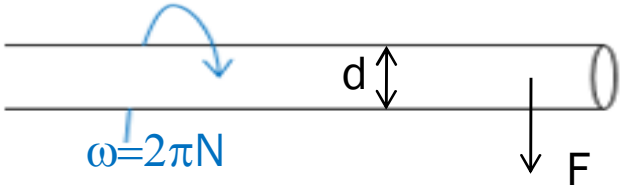
P_i ← توان ورودی بر حسب وات($W \equiv J/s$)

I ← شدت جریان بر حسب آمپر(A)

V ← اختلاف پتانسیل بر حسب ولت(V)

- **از واحدهای مهم دیگر توان، اسب بخار(hp) است که داریم:** $1\ hp = 746\ W$

- ۲-توان مکانیکی مصرفی:
  - عبارتست از میزان انرژی مکانیکی مصرف شده توسط محرک مکانیکی در واحد زمان جهت تامین نیرو محرکه پمپ.
  - توان مکانیکی مصرفی که به آن توان ورودی



نیز گفته می شود به صورت زیر تعریف می شود:

P_i ← توان ورودی بر حسب وات($W \equiv J/s$)

F ← نیروی لازم جهت دوران محور(N)

d ← قطر محور(m)

ω ← بسامد زاویه ای (1/s)

$$P_i = Fd\omega$$

- بسامد زاویه ای نیز به صورت روبرو تعریف می شود

$$\omega = 2\pi N$$

که در آن π، عدد پی(π ≈۳/۱۴) و N تعداد دور محور در ثانیه است.

- **مثال:**

جهت تامین نیرو محرکه در یک پمپ گریز از مرکز با قطر محور 4cm از یک توربین استفاده شده است.
محور با تعداد دور بر دقیقه 5000 RPM به دوران درآمده است.
در صورتی که نیروی وارد شده به محور برابر با 100N باشد، میزان توان مصرفی در پمپ را محاسبه کنید.

حل

ابتدا بسامد زاویه ای را محاسبه می کنیم:

$$\omega = 2\pi N = 2 \times 3.14 \times \frac{5000}{1\ \text{min}} \times \frac{1\ \text{min}}{60\ s} = 523.33\ s^{-1}$$

در نهایت توان مصرفی را محاسبه می کنیم

$$P_i = Fd\omega = 100 \times .04 \times 523.33 = 2093.33\text{W} \rightarrow P_i = 2.09KW$$

- **توان تولیدی:**
  - **عبارتست از میزان انرژی ای که پمپ در واحد زمان به مایع منتقل می کند.**
  - **توان تولیدی که، توان خروجی و توان هیدرولیک نیز نامیده می شود، به صورت زیر تعریف می شود:**

$$\boxed{P_o = P_h = \Delta P \times Q}$$

فصل ۴ اصول محاسبات در پمپ ها

- در رابطه روبرو:

$$P_o = P_h = \Delta P \times Q$$

P_o ← توان خروجی بر حسب وات(W) که توان هیدرولیک(P_h) نیز نامیده می شود.

ΔP ← اختلاف فشار مایع در دو سر پمپ بر حسب پاسکال(Pa)

Q ← دبی مایع بر حسب متر مکعب بر ثانیه(m^3/s)

- مثال:

رابطه اخیر را به صورت رابطه ای جدید بیان کنید که در آن، اختلاف فشار بر حسب psi ، دبی بر حسب گالن بر دقیقه و توان نیز بر حسب اسب بخار(hp) باشد؟

تبدیل واحدها ی مهم : $1hp=746\ W$ ،$1atm=14.7psi=1.01325bar$, $1bar=10^5\ Pa$

حل:

جهت تبدیل واحد برای یک رابطه باید مراحل زیر را انجام داد:

۱)بدست آوردن رابطه از واحد های مقصد به واحد های مرجع

۲)قرار دادن واحد های مقصد در رابطه

۳)تبدیل واحد از واحد های مقصد به واحد های مرجع و بدست آوردن ضریب رابطه

رابطه از واحد های مقصد به واحد های مرجع به صورت زیر است:

$$P_h(hp) = 746\,P_h(W)$$

$$\Delta P(psi) = \Delta P(psi) \times \frac{1atm}{14.7psi} \times \frac{1.01325bar}{1atm} \times \frac{10^5\,pa}{1bar} = 6892.86\Delta P(pa)$$

$$Q(\text{gal/min}) = Q\frac{gal}{\min} \times \frac{3.785lit}{1gal} \times \frac{10^{-3}m^3}{1lit} \times \frac{1\min}{60s} = 6.308\times10^{-5}Q(m^3/s)$$

حال، رابطه با واحد های مقصد را می نویسیم:

$$P_h(hp) = \Delta P(psi) \times Q(gal/\min)$$

در نهایت، تبدیل واحدها را اعمال کرده و ضریب را بدست می آوریم:

$$P_h(hp) = \Delta P(psi) \times Q(gal/\min) \rightarrow 746P_h = 6892.8\Delta P \times 6.308\times10^{-5}Q$$

که در آن:

P_o ← توان هیدرولیک بر حسب اسب بخار(hp)

ΔP ← اختلاف فشار مایع در دو سر پمپ بر حسب پوند بر اینچ مربع(psi)

Q ← دبی مایع بر گالن بر دقیقه(gal/min=GPM)

$$P_h = \frac{\Delta P \times Q}{1714}$$

- **مثال:**

یک پمپ گریز از مرکز، جهت پمپاژ نفتی با دبی ۶۰ گالن بر دقیقه به کار رفته است.در صورتی که اختلاف فشار دو سر پمپ، 230 psi باشد،توان مصرفی پمپ را بر حسب اسب بخار محاسبه کنید؟

حل:

مطابق رابطه قبل داریم:

$$P_h = \frac{\Delta P \times Q}{1714} = \frac{230 \times 60}{1714} = 8.05hp$$

- **بازده پمپ:**
  - **به صورت نسبت توان مفید(توان هیدرولیک)، به توان مصرفی تعریف می شود.**
  - **بازده، از نظر ریاضی به صورت زیر تعریف می شود:**

$$\eta = \frac{P_h}{P_i} = \frac{\Delta PQ}{IV}$$ ⟵ در صورتی که محرک از نوع الکتریکی باشد

$$\eta = \frac{P_h}{P_i} = \frac{\Delta PQ}{2\pi N}$$ ⟵ در صورتی که محرک از نوع مکانیکی باشد

  - **بازده پمپ، همواره عددی بین صفر و یک است($0<\eta<1$).**
  - **بازده درصدی پمپ($\eta\%$)، از ضرب بازده در عدد ۱۰۰ بدست می آید:**

$$\eta\% = \eta \times 100$$

فصل ۴ اصول محاسبات در پمپ ها

- تمرین:

برای تامین نیرو محرکه یک پمپ با ظرفیت 2.2×10^{-3} متر مکعب بر ثانیه ،جریان الکتریکی با شدت جریان ۳۰ آمپر،و اختلاف پتانسیل ۲۲۰ ولت به یک موتور الکتریکی اعمال شده است.

اگر اختلاف فشار دو سر پمپ، 10^{6}پاسکال باشد، بازده پمپ چقدر است؟

الف)۰/۲۵ ب)۰/۳۳ ج)۰/۵ د)۰/۶۶

- تمرین:

پمپی با قطر محور 5cm و توان تولیدی 6.28KW ،دارای بازده ۴۰ درصد است.

در صورتی که نیروی اعمال شده به محور در این پمپ برابر با 500N باشد، تعداد دور در ثانیه پمپ چقدر است؟ (π =۳/۱۴)

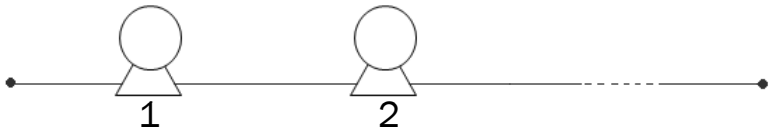
الف)۱۰۰ ب)۲۰۰ ج)۲۵۰ د)۵۰۰

اتصال(به هم بستن) پمپ ها

پمپ ها را می توان به دو صورت متوالی(سری،خطی) و موازی به هم بست.

- اتصال سری پمپ ها
  - در این حالت روابط زیر برقرار است:

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n = \Delta P_t$$
$$Q_1 = Q_2 = \dots Q_n = Q_t$$



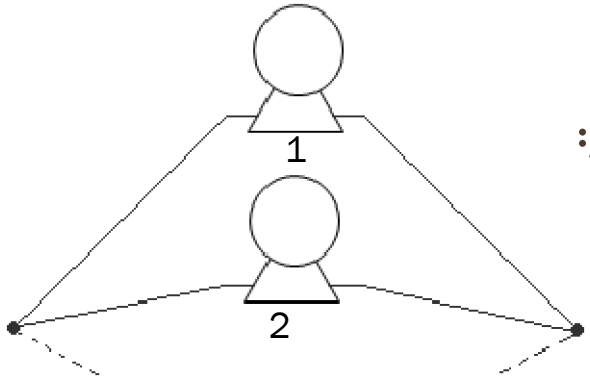
که در آن:

Q_t : دبی کل سیستم

ΔP_t : اختلاف فشار کل سیستم

- اتصال موازی پمپ ها
  - برای اتصال موازی نیز:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \dots = \Delta P_n = \Delta P_t$$
$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q_t$$



منحنی مشخصه پمپ(pump characteristic curve)

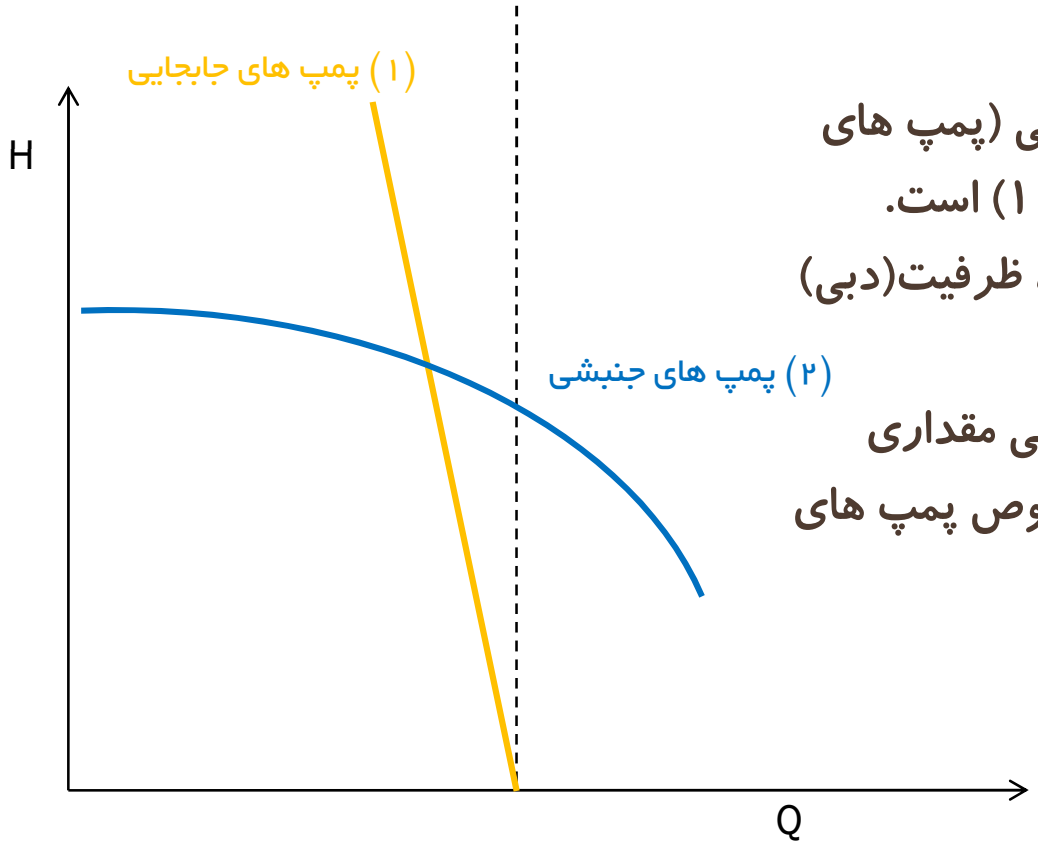
- برای هر نوع پمپی، می توان منحنی ای رسم کردکه در آن تغییرات انرژی، فشار و یا هد فشاری بر حسب دبی را نشان می دهد.

به این منحنی ، منحنی مشخصه پمپ می گویند.

- با توجه به شکل روبرو:
  - منحنی مشخصه در پمپ های جابجایی (پمپ های رفت و برگشتی یا دوار) به صورت نمودار (۱) است.

بر این اساس برای پمپ های نوع جابجایی، ظرفیت(دبی) پمپ مقداری نسبتا ثابت است.

  - بنابراین در مواردی که لازم است، دبی مقداری ثابت باشد، پمپ های نوع جابجایی، به خصوص پمپ های دیافراگمی انتخاب مناسبی هستند.



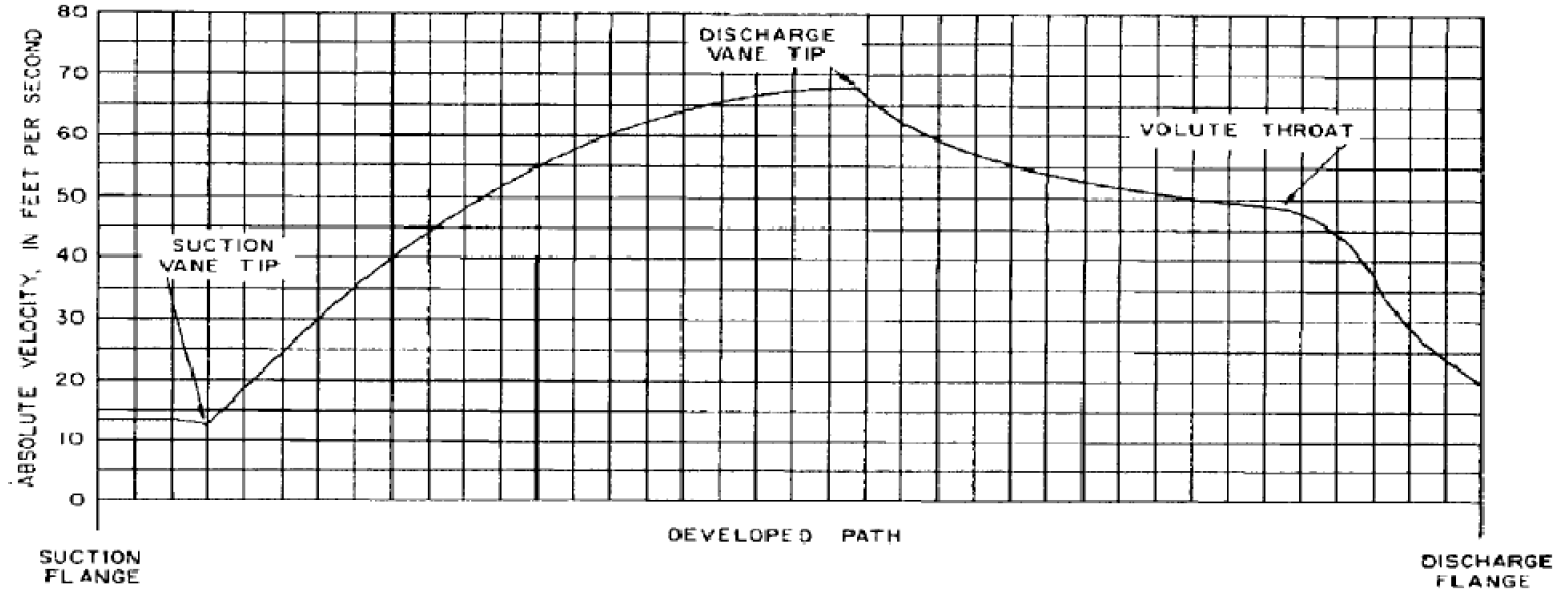
فصل ۴ اصول محاسبات در پمپ ها

- منحنی مشخصه در پمپ های دینامیک، مانند پمپ های گریز از مرکز به صورت نمودار (۲) است.بنابراین، در پمپ های گریز از مرکز می توان بر اساس تغییر مقدار انرژی اضافه شده به مایع، دبی آن را به خوبی کنترل کرد.

➢ جهت کنترل میزان انرژی اضافه شده به مایع در پمپ های گریز از مرکز، می توان از اجزای زیر استفاده کرد:

- شیپوره(volute) که قسمتی حلزونی شکل در پوسته پمپ است.در آن به دلیل افزایش تدریجی سطح مقطع، انرژی جنبشی به انرژی فشاری مایع تبدیل شده و فشار آن را افزایش می دهد.
- افشاننده(diffuser) نیز همانطور که در فصل قبل بررسی شد، مجموعه ای از تیغه های ثابت است که درون پمپ در اطراف پروانه نصب می شود.این تیغه ها طوری طراحی شده اند که هرچه از مرکز دوران دورتر می شویم از هم بازتر می شوند و چون مقطع جریان بتدیج بازتر می شود، سرعت افت کرده و فشار افزایش می یابد.

➢ شکل زیر، تغییرات سرعت مایع از دهانه مکش تا انتهای خروجی در پمپ گریز از مرکز را نشان می دهد.



تغییرات سرعت مطلق مایع در پوسته پمپ

- در شکل قبل، قسمت اول نمودار(از suction vane tip تا discharge vane tip) تغییرات سرعت در تیغه پروانه، و ادامه نمودار، تغییرات سرعت در پوسته پمپ، تا گردنه شیپوره(volute throat) و تا خروج از پمپ را نشان می دهد.
- همانطور که در شکل قبل دیده می شود، حداکثر سرعت در خروجی تیغه پروانه(discharge vane tip) است.

➢ در حالت کلی، بازده پمپ های گریز از مرکز از پمپ های نوع جابجایی کمتر است، ولی به دلایل زیر پمپ های گریز از مرکز بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند:

- قیمت پایین تری دارند.
- مایع خروجی از پمپ های رفت و برگشتی دارای ضربان(pulse) است، در صورتی که مایع خروجی از پمپ های گریز از مرکز، جریان یکنواختی دارد.

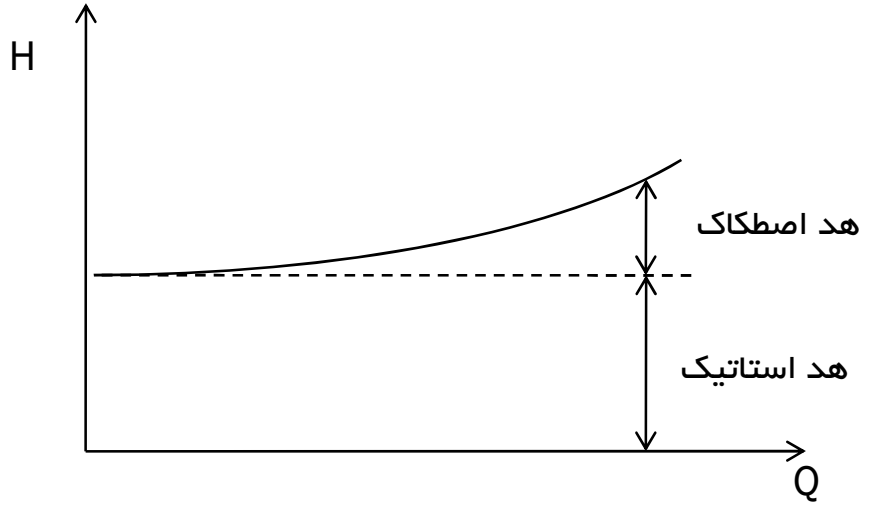
منحنی مشخصه سیستم(system characteristic curve)

- همانطور که در فصل ۱ بیان شد، هد کلی سیستم به صورت زیر است:

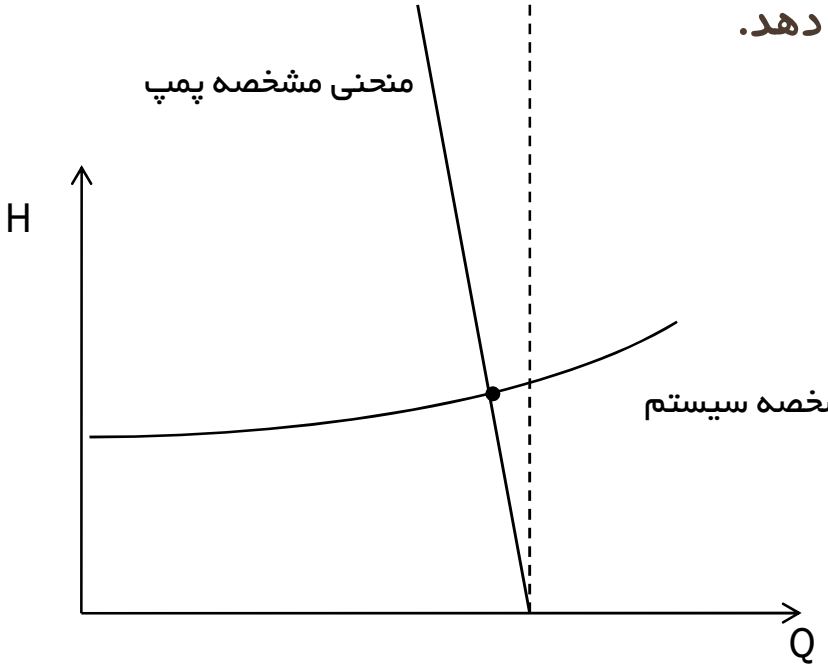
$$H = H_s + H_d + H_p + H_f$$

که در این میان، هد پتانسیل در پمپ تغییری نمی کند و تنها هد های استاتیک و دینامیک به ترتیب با تغییر فشار و سرعت می توانند تغییر کنند. تغییرات هد اصطکاک نیز معمولا نادیده گرفته می شود.

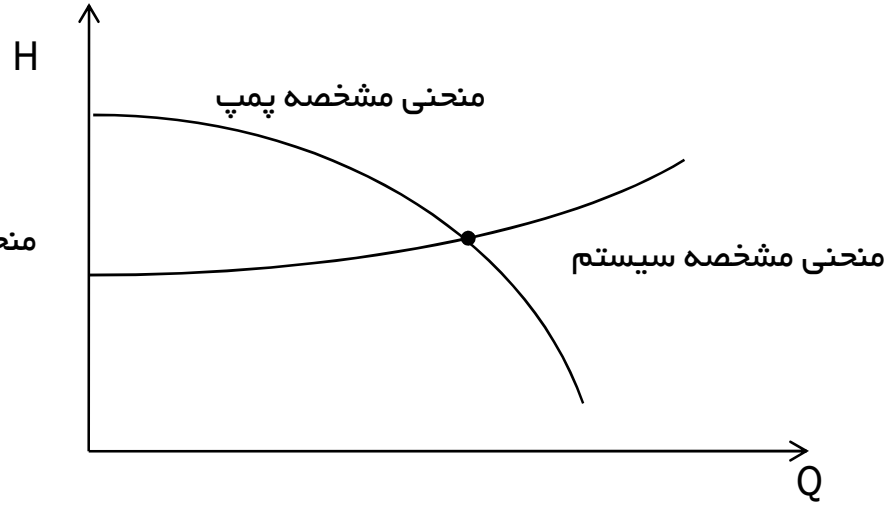
- منحنی مشخصه سیستم تغییرات هد کلی سیستم را بر حسب دبی نشان می دهد.
- در شکل زیر،تغییرات هد کلی با دبی نشان داده شده است:



- **نقطه کار**(operation point, duty point): **عبارتست از محل تلاقی منحنی مشخصه پمپ و منحنی مشخصه سیستم.**
- **شکل زیر نقطه کار را در دونوع مختلف پمپ نشان می دهد.**



نقطه کار در پمپ های جابجایی



نقطه کار در پمپ های جنبشی

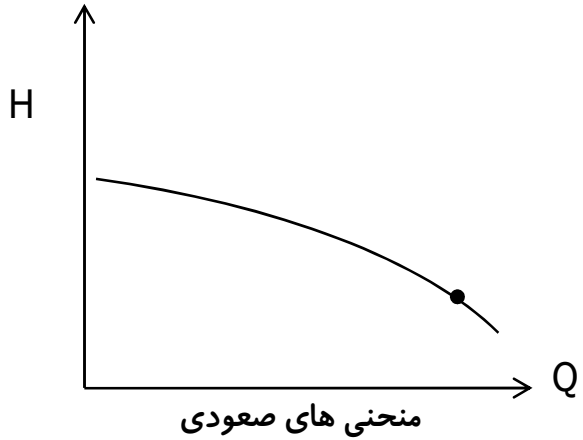
انواع منحنی مشخصه

- دسته بندی منحنی مشخصه در پمپ های گریز از مرکز

در پمپ های گریز از مرکز منحنی مشخصه را می توان به پنج دسته زیر تقسیم بندی کرد:

- منحنی های صعودی(Rising)

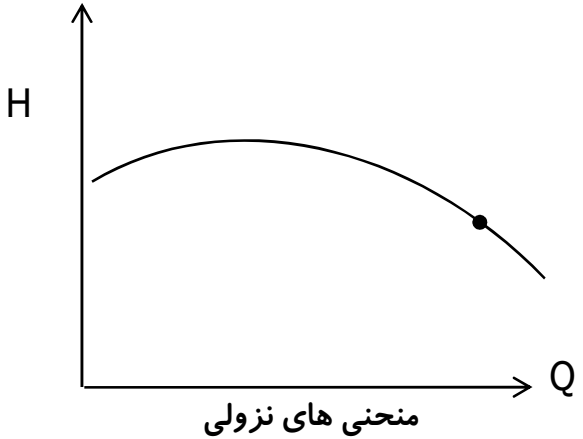
در پمپ های با منحنی صعودی با افزایش هد سیستم،
دبی پمپ به طور پیوسته کاهش می یابد.



منحنی های صعودی

- منحنی های نزولی(Drooping)

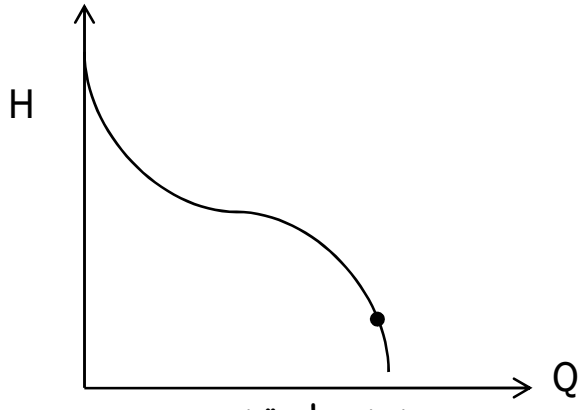
در پمپ های با منحنی مشخصه نزولی، هد قابل دسترس
در نقطه Q=0 حدکاثر هد نیست.
این منحنی ها را Looping نیز می نامند.



منحنی های نزولی

- منحنی های تیز(Steep)

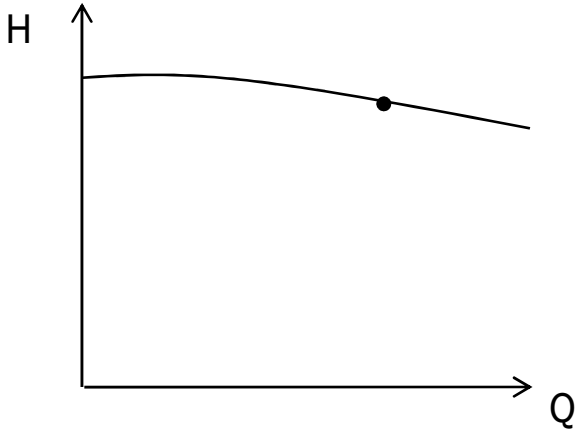
منحنی های تیز نیز صعودی هستند، با این تفاوت که تغییرات هد بین نقطه کار و شرایطی که شیر خروجی کاملا بسته باشد(Q=0) بسیار زیاد است.



منحنی های تیز

- منحنی های تخت(Flat)

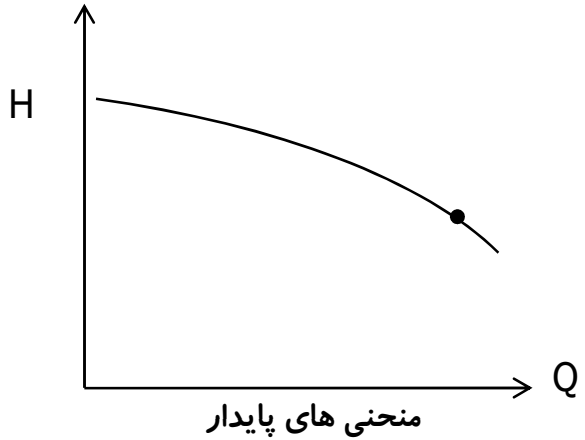
در این منحنی ها، تغییرات ارتفاع در یک دامنه وسیعی از دبی ناچیز است.



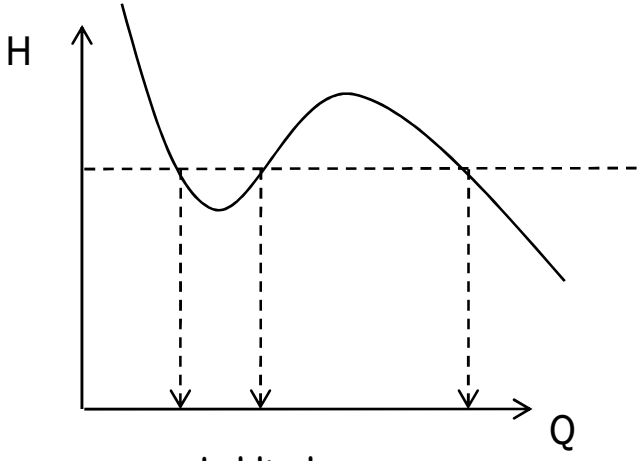
منحنی های تخت

- منحنی های پایدار (Stable)

در منحنی های پایدار در هر هد، همواره می توان یک دبی مشخص کرد.

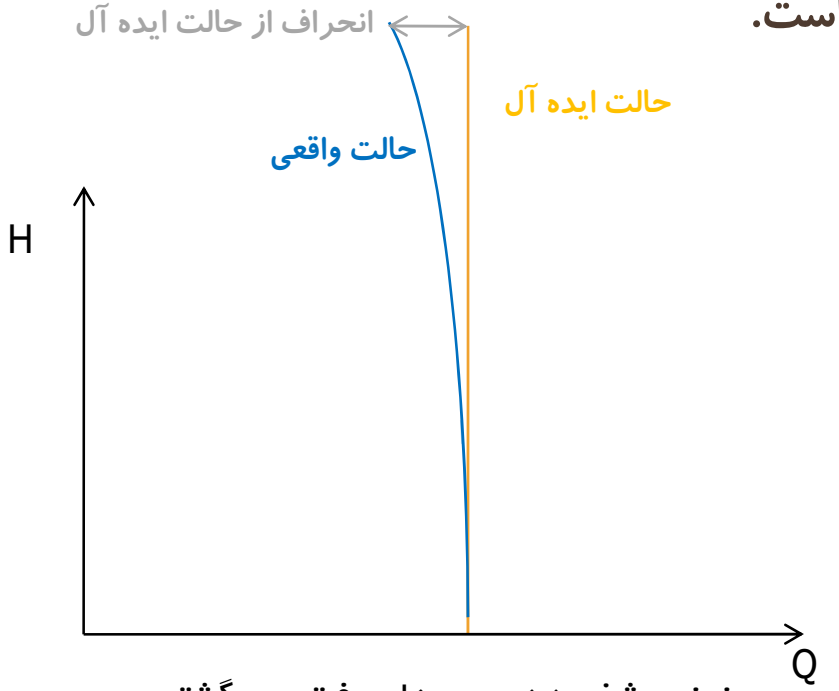


منحنی های پایدار



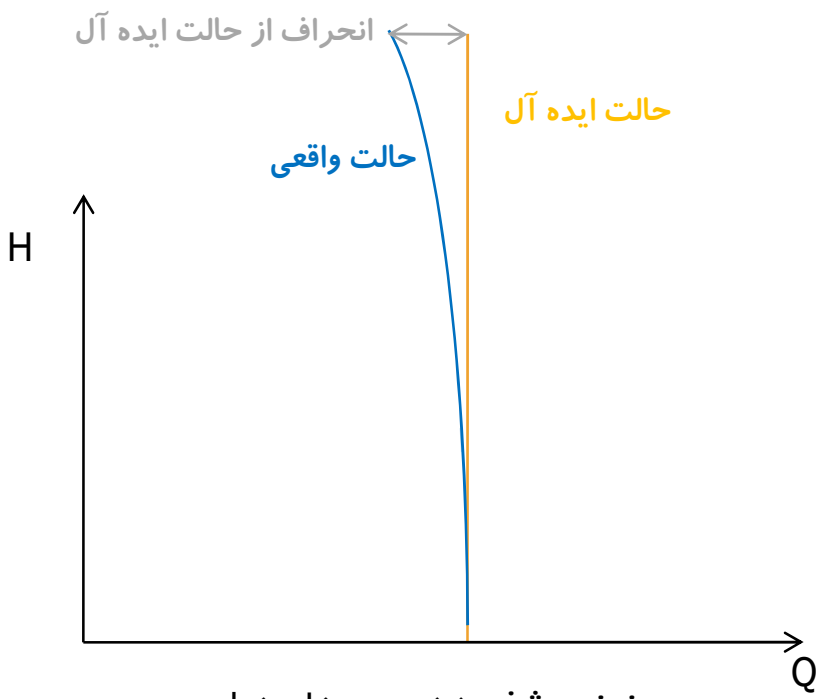
منحنی های ناپایدار

- منحنی مشخصه در پمپ های رفت و بر گشتی
- در شکل زیر منحنی مشخصه در یک پمپ رفت و برگشتی نشان داده شده است.



منحنی مشخصه در پمپ های رفت و بر گشتی

- منحنی مشخصه در پمپ های دوار
  - پمپ های دوار نیز دارای منحنی مشخصه ای مشابه پمپ های رفت و برگشتی هستند.
  - از نظر تئوری، منحنی مشخصه در پمپ های دوار باید به صورت خطی عمودی باشد، اما به دلیل افزایش نشتی داخلی با فشار این منحنی به صورت خطی با شیب منفی است.



منحنی مشخصه در پمپ های دوار

منحنی های مشخصه دیگر در پمپ های گریز از مرکز

در حالت کلی، به جز منحنی هد خروجی پمپ در مقابل دبی(H-Q diagram) منحنی های مهم زیر نیز در پمپ های گریز از مرکز وجود دارند:

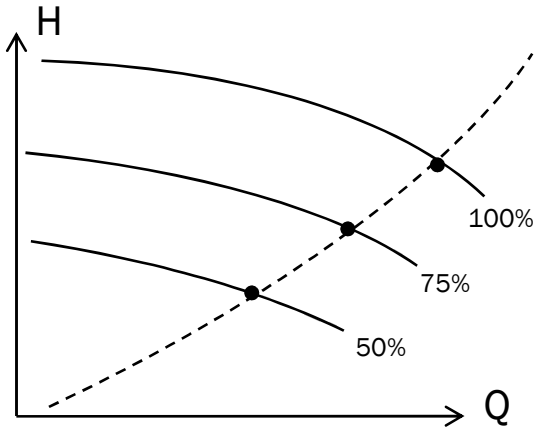
- منحنی توان مصرفی در مقابل دبی(P-Q Diagram)
- منحنی بازده در مقابل دبی(η-Q Diagram)

در شکل های زیر:

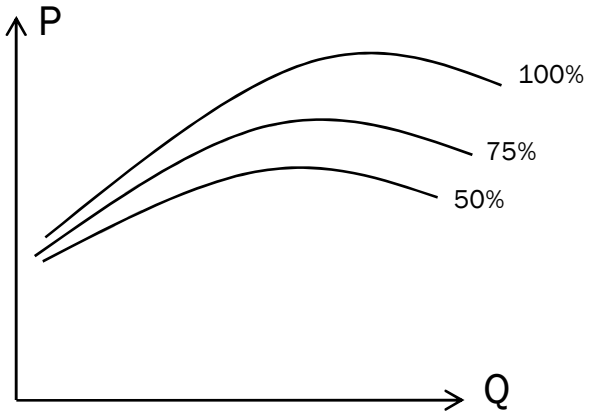
درصد مورد نظر ← میزان سرعت دوران را نشان می دهد.

--- ← منحنی مشخصه سیستم را نشان می دهد.

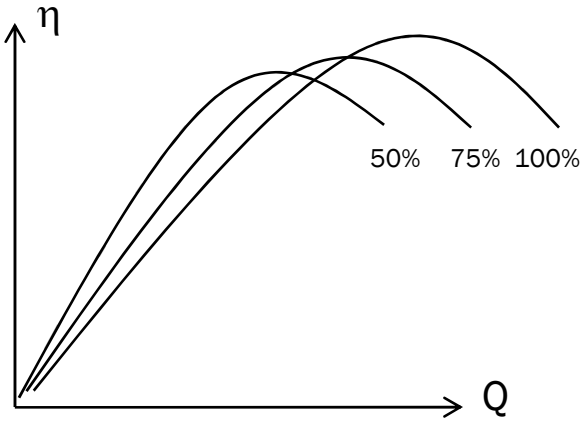
●← نقطه کار را مشخص می کند.



منحنی هد خروجی پمپ در مقابل دبی

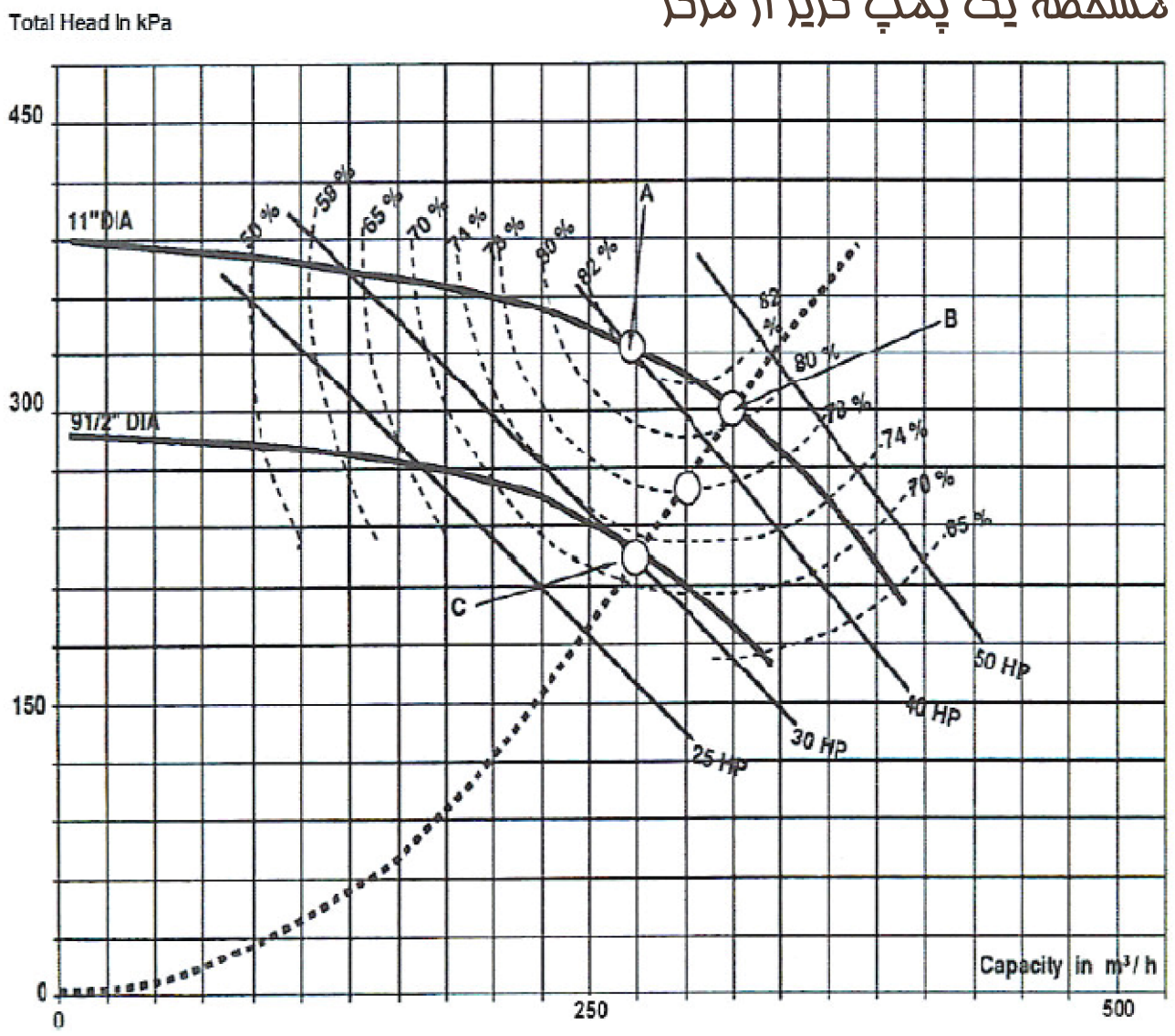


منحنی توان مصرفی در مقابل دبی

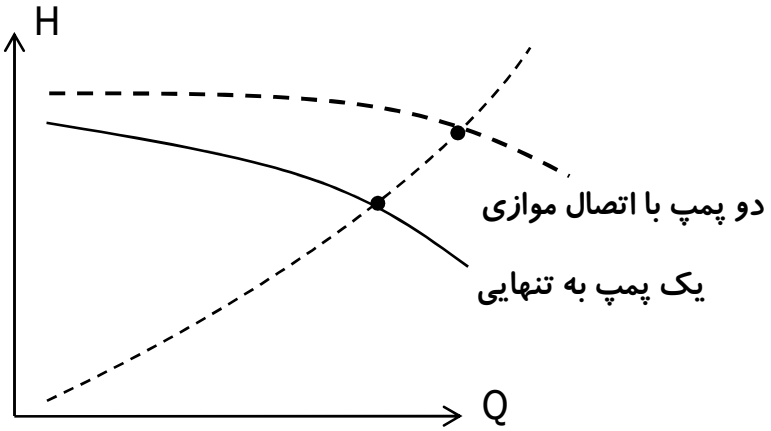


منحنی بازده در مقابل دبی

نمونه ای از منحنی مشخصه یک پمپ گریز از مرکز

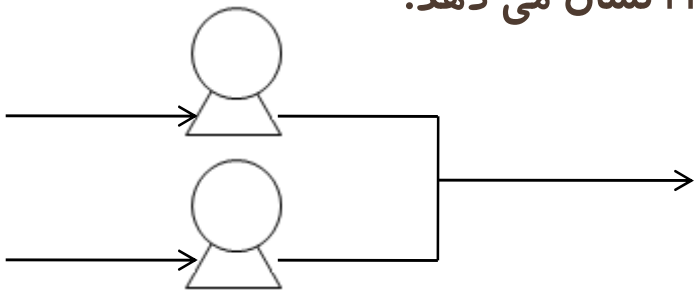


- با توجه به نمودارهای قبل می توان گفت:
  - در منحنی های "هد خروجی پمپ در مقابل دبی" و " منحنی توان مصرفی در مقابل دبی" ، با افزایش سرعت دوران:
    - هد خروجی و توان مصرفی افزایش می یابد.
    - دبی در نقطه کار افزایش می یابد.
  - در منحنی های "بازده در مقابل دبی":
    - تا جایی بازده افزایش می یابد و بعد از آن روند کاهشی دارد.
    - با افزایش سرعت دوران ، دبی در نقطه کار افزایش می یابد.

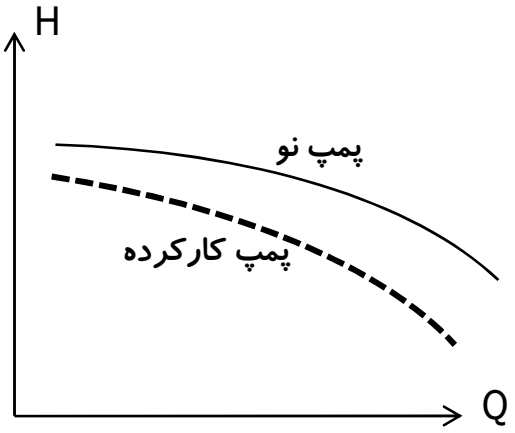


منحنی هد خروجی پمپ در مقابل دبی

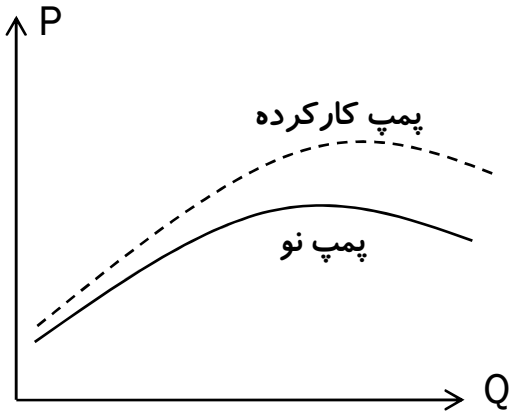
- شکل زیر، تاثیر اتصال موازی پمپ ها را بر نمودار H-Q نشان می دهد:



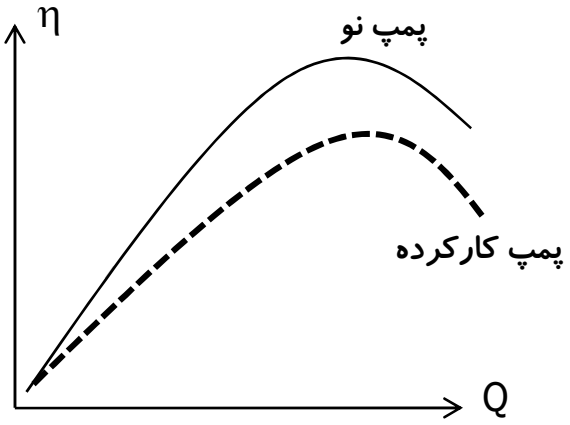
- تاثیر طول عمر پمپ بر منحنی های مشخصه پمپ به صورت زیر است:



منحنی هد خروجی پمپ در مقابل دبی



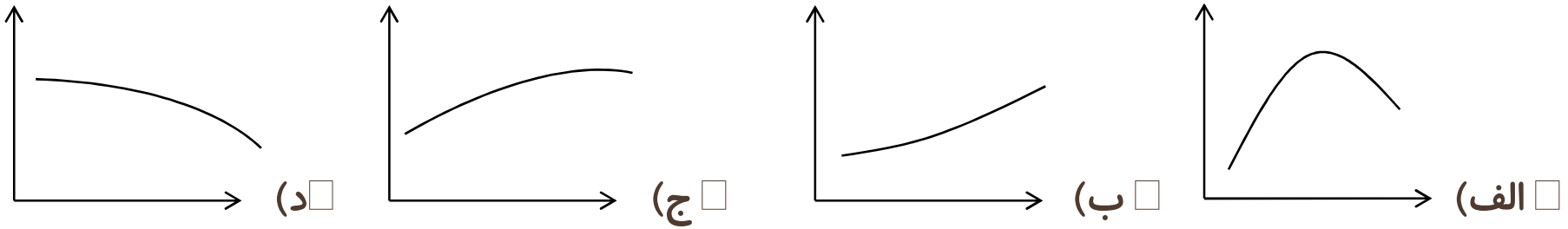
منحنی توان مصرفی در مقابل دبی



منحنی بازده در مقابل دبی

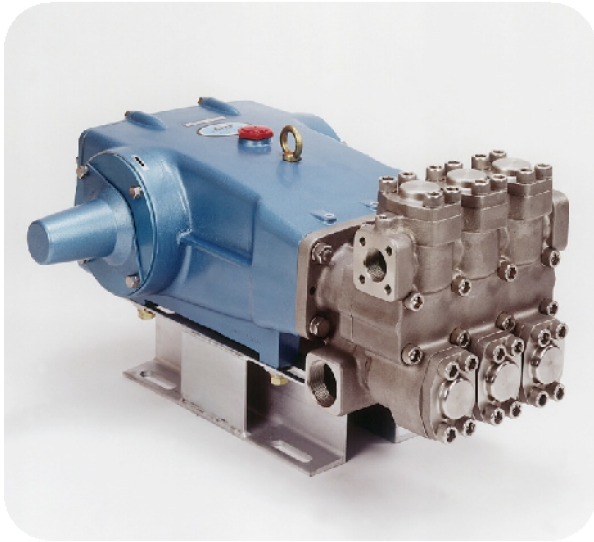
- تمرین:

منحنی هد خروجی پمپ در مقابل دبی (H-Q diagram) در پمپ گریز از مرکز به کدام صورت است؟

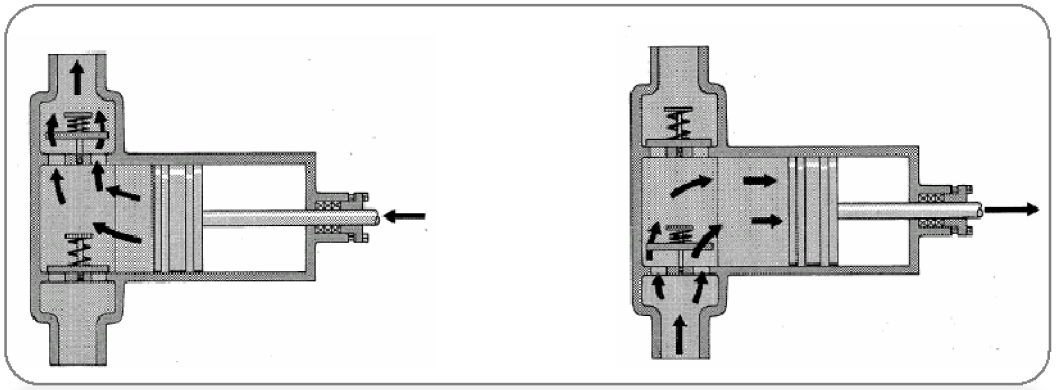


محاسبات در پمپ های رفت و برگشتی

- همانطور که در فصل های قبل بیان شد، پمپ های رفت و برگشتی پیستونی را می توان به دو دسته زیر تقسیم بندی کرد:
  - پمپ تک عملگره(single acting)
    - در این نوع پمپ، در هر رفت و برگشت، مایع تنها یکبار جابجا می شود.
    - این نوع پمپ ها، معمولا به صورت سه زمانه(triplex) ساخته می شوند.
    - در پمپ های سه زمانه، سه سیلندر به کار می رود.



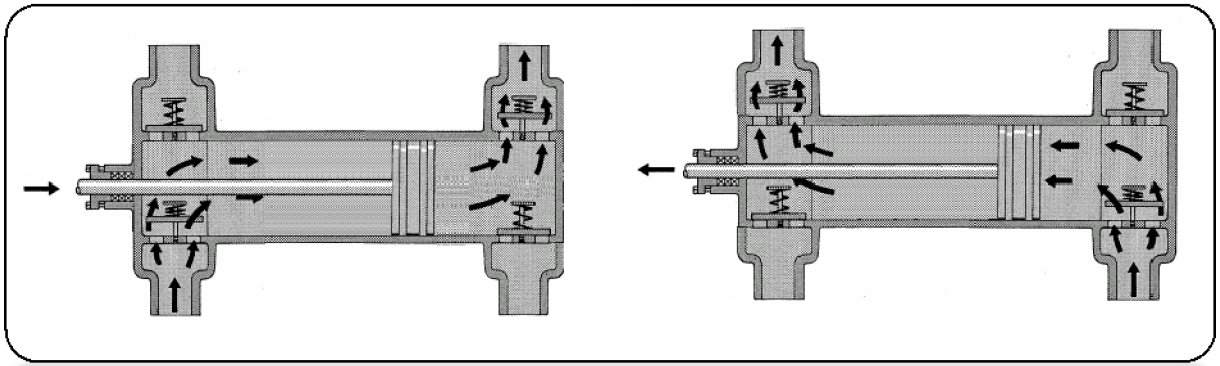
نمونه ای از پمپ رفت و برگشتی سه زمانه



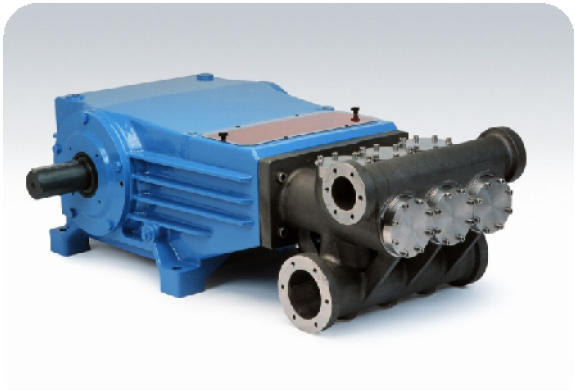
سیکل عملکرد در پمپ پیستونی تک عملگره

فصل ۴ اصول محاسبات در پمپ ها

- پمپ دو عملگره(double acting)
  - در این نوع پمپ، در هر رفت و برگشت، مایع دو بار(یکبار در رفت و یکبار در برگشت) جابجا می شود.
  - این نوع پمپ ها، معمولا به صورت دو زمانه(duplex) ساخته می شوند.
  - در پمپ های دو زمانه، دو سیلندر به کار می رود.
  - در صنعت بیشتر از پمپ های سه عملگره استفاده می شود و این نوع پمپ ها کمتر مورد استفاده قرار می گیرند.



سیکل عملکرد در پمپ پیستونی دو عملگره



نمونه ای از پمپ رفت و برگشتی دو زمانه

فصل ۴ اصول محاسبات در پمپ ها

- همانطور که قبلا بیان شد، پمپ های سه زمانه در صنعت بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند.

دلایل عمده استفاده از پمپ های سه زمانه عبارتند از:

- این پمپ ها از پمپ های دوزمانه سبک ترند.
- طراحی آنها فشرده تر بوده و جای کمتری را اشغال می کنند.
- فشار ضربان(pulsation pressure) در این نوع پمپ ها کمتر است.
- هزینه راه اندازی و نگهداری آن ها کمتر است.

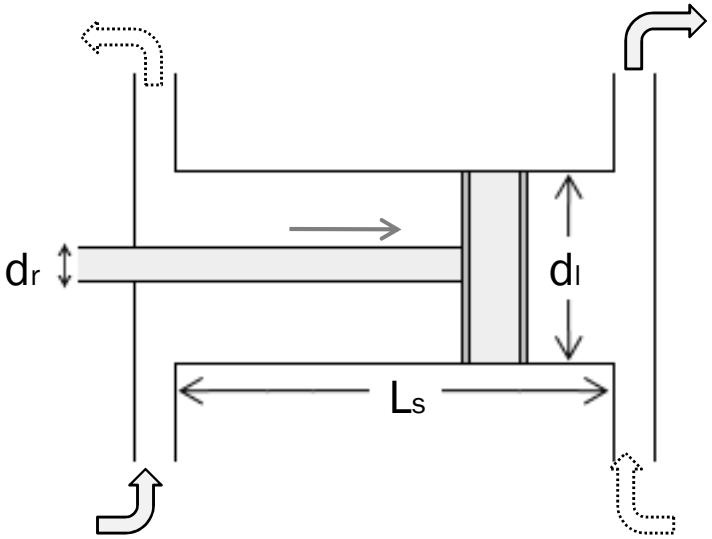
- بازده در پمپ های رفت و برگشتی:

- بازده مکانیکی(E_m) : عبارتست از بازده محرک و نشتی در قسمت محور.مقدار بازده مکانیکی در پمپ های رفت و برگشتی حدود ٪۹۰ است.
- بازده حجمی(E_V) : عبارتست از بازده ای که میزان قابلیت جابجایی حجمی مایع توسط پمپ را مشخص می کند.معمولا در پمپ های رفت و برگشتی مقدار این بازده حدود ٪۱۰۰ است.
- بازده پمپ(E) : عبارتست از حاصلضرب بازده مکانیکی در بازده حجمی

$$E = E_m \times E_V$$

- فاکتور پمپ(F_P) : عبارتست از میزان حجم سیال جابجا شده در یک رفت و برگشت در پمپ.

- جهت محاسبه فاکتور پمپ در پمپ های دو زمانه به صورت زیر عمل می کنیم:



- با توجه به شکل روبرو، میزان سیال جابجا شده در حرکت رفت عبارتست از:

$$\frac{\pi}{4} d_l^2 L_s$$

- میزان سیال جابجا شده در حرکت برگشت نیز مساوی است با:

$$\frac{\pi}{4}(d_l^2 - d_r^2) L_s$$

- از آنجایی که در پمپ دو زمانه دو سیلندر به کار می رود، میزان سیال جابجا شده برابر با مجموع دو مقدار فوق ضرب در دو، ضرب در بازده حجمی است، یعنی:

$$F_P = \frac{\pi}{2}(2d_l^2 - d_r^2) L_s E_V$$

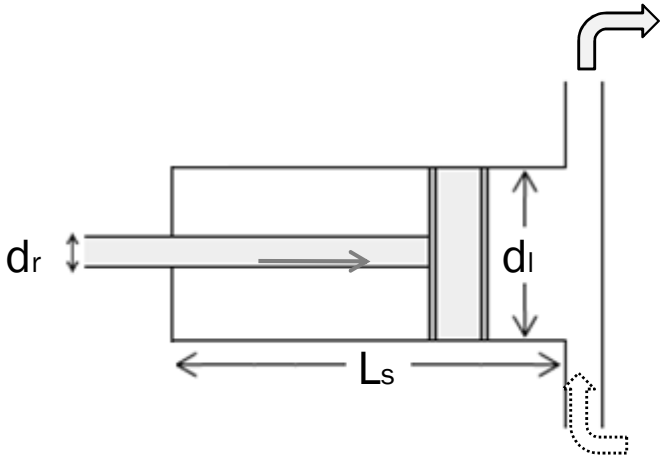
dl:قطر خطی پیستون(liner) dr:قطر میله(rod)

Ls:طول استروک(stroke)

- استروک، که ضربه نیز نامیده می شود، طولی است که در هر حرکت پیستون طی می شود. همچنین به تعداد حرکات رفت و برگشتی پمپ نیز استروک گفته می شود.

➢ جهت محاسبه فاکتور پمپ در پمپ های سه زمانه نیز داریم:

- با توجه به شکل روبرو، میزان سیال جابجا شده در حرکت رفت عبارتست از:



$$\frac{\pi}{4} d_l^2 L_s$$

- در حرکت برگشت نیز سیالی جابجا نمی شود.

- از آنجایی که در پمپ سه زمانه سه سیلندر به کار می رود، میزان سیال جابجا شده برابر با سیال جابجا شده در حرکت رفت ضرب در سه، ضرب در بازده حجمی است، یعنی:

$$F_P = 3\frac{\pi}{4} d_l^2 L_s E_V$$

dl:قطر خطی پیستون(liner) dr:قطر میله(rod)

Ls:طول استروک(stroke)

- تعداد دور در واحد زمان(N) : این پارامتر در پمپ های رفت و برگشتی به صورت تعداد حرکات رفت و برگشتی در واحد زمان تعریف می شود و واحد آن (1/s) است.

- دبی پمپ(Q) : عبارتست از میزان حجم سیال جابجا شده در واحد زمان در یک رفت و برگشت در پمپ.از نظر ریاضی، دبی پمپ به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q = F_P N$$

- بنابراین روابط دبی در پمپ های رفت و برگشتی به صورت زیر است:
  - دبی در پمپ سه زمانه

$$Q = 3\frac{\pi}{4} d_l^2 L_s E_V N$$

  - دبی در پمپ دو زمانه

$$Q = \frac{\pi}{2}(2d_l^2 - d_r^2) L_s E_V N$$

❖ **مثال**

برای یک پمپ دو زمانه با مشخصات زیر، فاکتور پمپ را بر حسب بشکه بر استروک(bbl/stroke) محاسبه کنید.

d_l=6.5 in d_r=2.5 in L_s=18 in E_V=90%

حل:

$$F_P = \frac{\pi}{2}(2d_l^2 - d_r^2)L_s E_V = \frac{\pi}{2}(2\times 6.5^2 - 2.5^2)\times 18\times 0.9 in^3/stroke$$

$$\rightarrow F_P = 1991.2 in^3/stroke = 1991.2 \frac{\cancel{in^3}}{\text{stroke}} \times (\frac{1\cancel{ft}}{12\cancel{in}})^3 \times \frac{1bbl}{5.615\cancel{ft^3}} = 0.2052 bbl/stroke$$