دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی نساجی

درس: مکانیک سیالات

استاد: دکتر علی زادهوش

اردیبهشت ۱۴۰۰

فصل دهم: پمپ ها

به استثنای مواردی که نیروی جاذبه می تواند برای جابه جایی فراورده های مایع مورد استفاده قرار گیرد، در سایر موارد برای غلبه بر نیروهای مقاوم در برابر انتقال، از انرژی مکانیکی استفاده می شود. انرژی مکانیکی به کمک پمپ ها تامین می گردد. در صنعت، انواع مختلف پمپ ها مورد استفاده قرار می گیرد. پمپ ها به دو دسته جابه جایی مثبت و سانتریفوژی تقسیم می گردند.

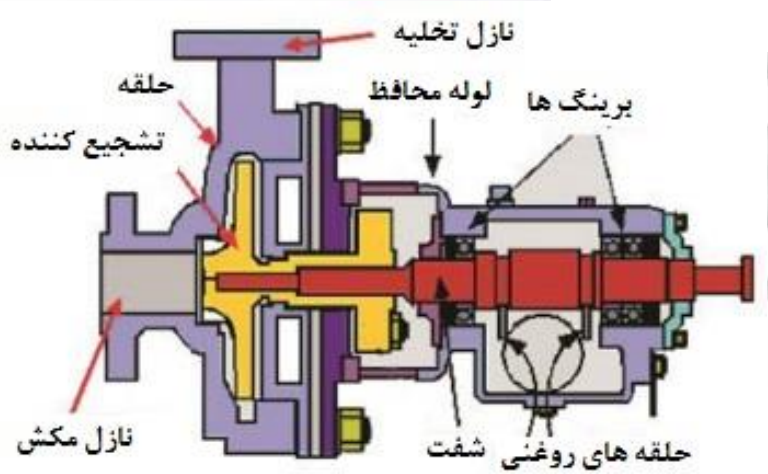
✓ پمپ های سانتریفوژی:

اساس کار یک پمپ سانتریفوژی، استفاده از نیروی گریز از مرکز برای افزایش فشار مایع می باشد. پمپ شامل پره ای است که در داخل یک پوسته قرار گرفته و به کمک یک موتور به حرکت در می آید. سیال به مرکز چرخش پره وارد شده و با نیروی گریز از مرکز به سمت محیط پره حرکت می کند. در این نقطه، حداکثر فشار بر مایع وارد شده و مایع از بخش خروجی به داخل لوله رانده می شود. هنگامی که سرعت جریان زیاد و فشار لازم برای سیال متوسط باشد، یعنی در سیالاتی که ویسکوزیته کمی دارند (مایعاتی که مشابه آب و شیر هستند)، پمپ های سانتریفوژی بیشترین بازده را خواهند داشت.

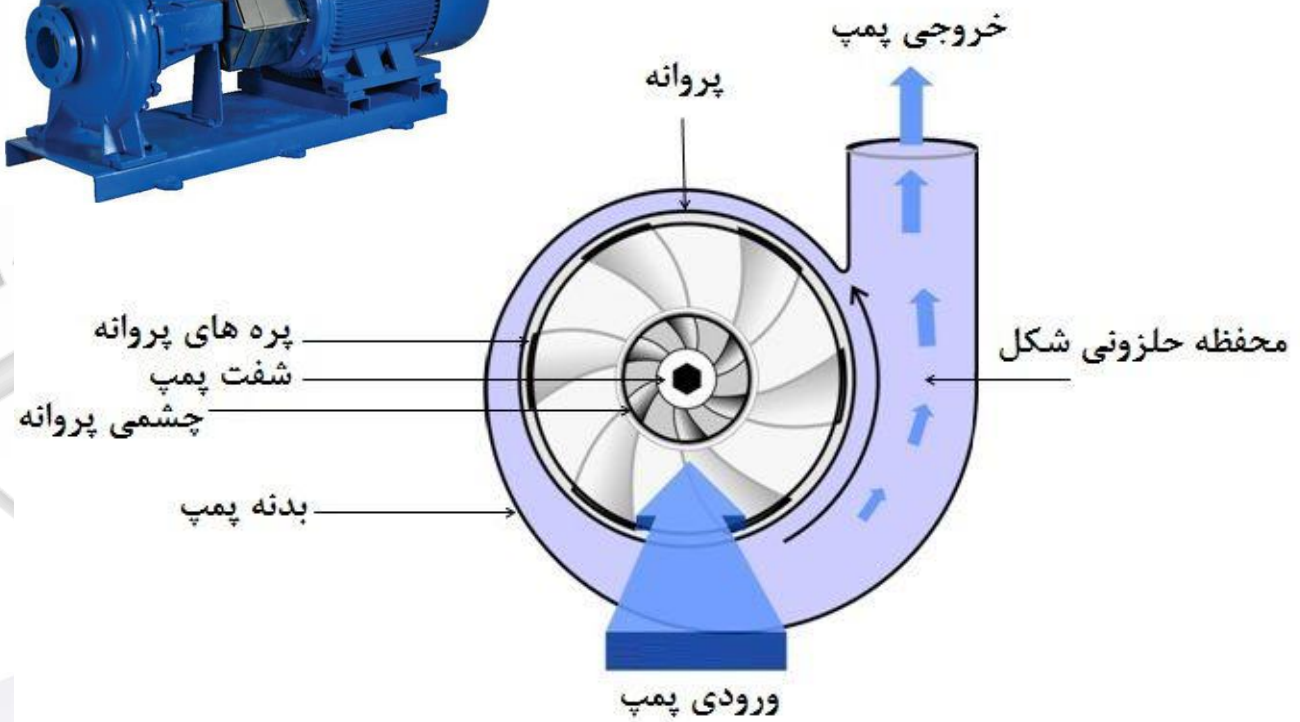
جریان خروجی از پمپ های سانتریفوژی حالت یکنواخت دارد. این پمپ ها برای مایعات حاوی مواد ساینده و ناخالصی و نیز مایعاتی که تمیز و شفاف باشند، مناسب است. همچنین از این پمپ ها برای انتقال دادن مایعاتی که محتوی ذرات جامد باشند، استفاده می شود. انتقال مایعات دارای ویسکوزیته بالا (مایعاتی که ویسکوزیته ای مانند عسل دارند) به کمک پمپ های سانتریفوژی مشکل است، زیرا این نیروها از

دست یابی سیال به سرعت های مورد نظر ممانعت می کنند.

سرعت جریان خروجی از پمپ های سانتریفوژی به کمک شیر نصب شده روی لوله متصل به خروجی پمپ، کنترل می شود. این روش کنترل جریان، ارزان قیمت بوده و حتی می توان با بستن کامل شیر، جریان را قطع نمود. این عمل از آنجا که آسیبی به پمپ ها نمی رساند عموما در عملیات فرآیند تولید مورد استفاده قرار می گیرد. با این حال، بستن کامل جریان خروجی پمپ سانتریفوژی برای مدت طولانی توصیه نمی شود، زیرا امکان صدمه به پمپ وجود دارد.



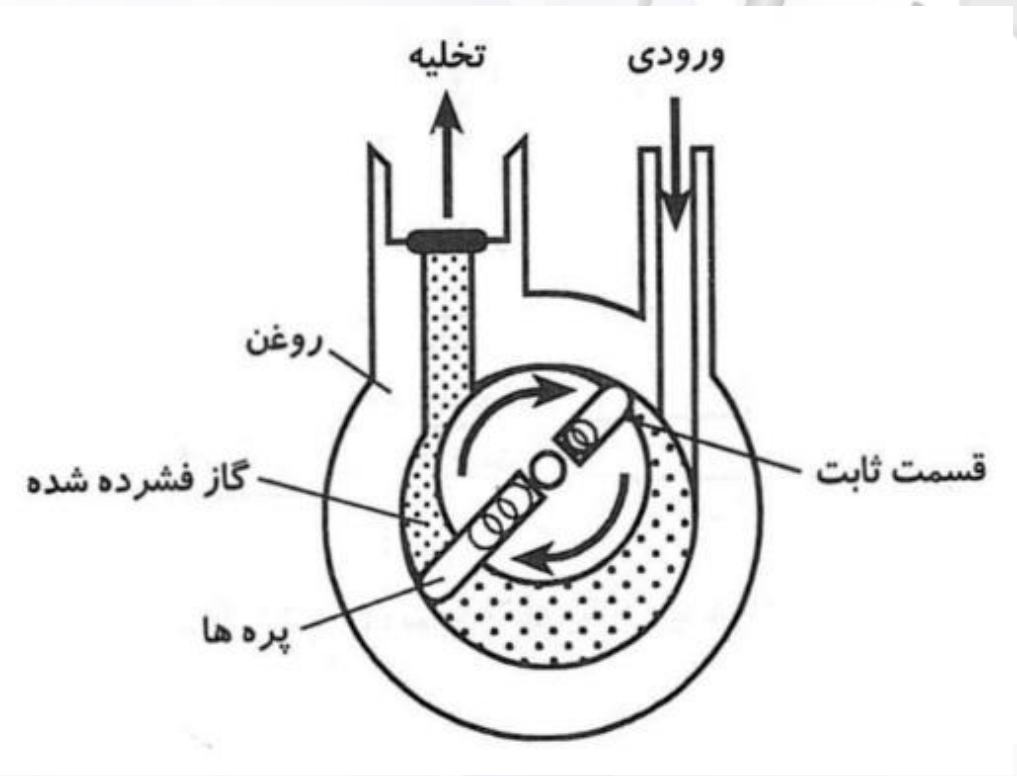
ساختار اساسی در یک پمپ سانتریفیوژی



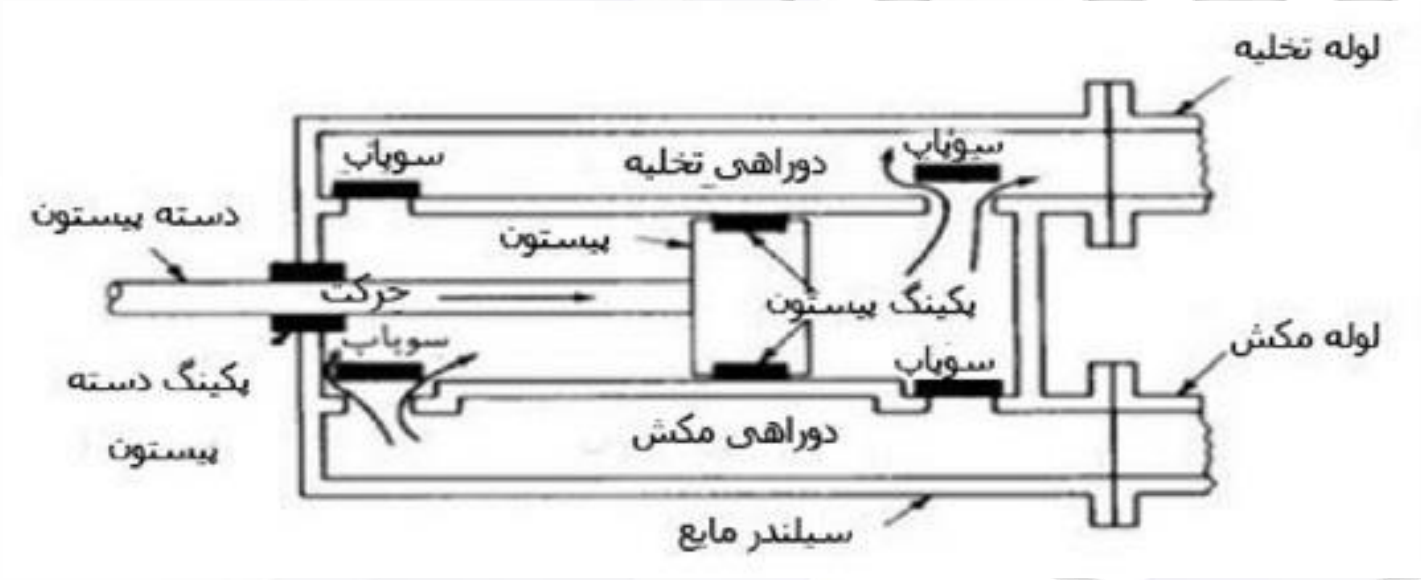
✓ پمپ های جابه جایی مثبت:

پمپ های جابه جایی مثبت با اعمال نیروی مستقیم روی مایع محبوس شده، فشار لازم برای حرکت مایع را ایجاد می کنند. جابه جایی محصول، دارای ارتباط مستقیمی با سرعت بخش های متحرک داخل پمپ است. بنابراین می توان سرعت جریان را با توجه به سرعت رانش پمپ کنترل نمود. مکانیزم عمل پمپ های جابه جایی مثبت، امکان انتقال مایعات دارای ویسکوزیته بالا را فراهم می آورد.

پمپ دورانی (روتاری) نوعی پمپ جابه جایی مثبت است. اگر چه چندین نوع پمپ دورانی وجود دارد، ولی روش کار همه آنها محبوس کردن بخشی از مایع بین قسمت دوار پمپ و بدنه آن می باشد. پمپ، حجم ثابتی از مایع را از قسمت ورودی به بخش خروجی انتقال می دهد. با عوض کردن جهت چرخش موتور، پمپ دورانی توانایی معکوس کردن جهت جریان را دارد. همچنین پمپ های دورانی دارای جریان خروجی ثابتی می باشند.



نوع دوم پمپ جابه جایی مثبت، پمپ رفت و برگشتی است. همان طور که از نام این پمپ بر می آید، عمل پمپ کردن با اعمال نیروی پیستون به مایع داخل سیلندر صورت می گیرد. مایع در هنگام حرکت پیستون به سمت جلو، از دریچه خروجی به بیرون منتقل می شود. پمپ های رفت و برگشتی معمولا شامل چندین سیلندر و پیستون هستند که به منظور ایجاد فشار خروجی یکنواخت، در دوره های زمانی متفاوت کار می کنند. بیشترین کاربرد این پمپ برای مایعات دارای ویسکوزیته پایین می باشد که به سرعت جریان کم و فشار زیاد نیاز دارند. پمپ های رفت و برگشتی دارای جریان خروجی نوسانی هستند.



✓ارتفاع (هد):

در طراحی پمپ ها، عبارت متداول مورد استفاده برای بیان انرژی سیال، هد (Head) یا ارتفاع می باشد. همان طور که در فصل اول اشاره شد، ارتفاع بر حسب متر سیال بیان می شود. اگر تمام عبارات مربوط به انرژی های مختلف را که به قسمت مکش پمپ متصل است به ارتفاع تبدیل کنیم، مجموع مقادیر **ارتفاع مکش** نامیده می شود. به صورت مشابه، اگر در قسمت تخلیه، تمام عبارات انرژی را به صورت ارتفاع تبدیل کرده و با هم جمع نمائیم، **ارتفاع تخلیه (دهش)** به دست می آید.

✓مشخصات کارایی پمپ:

در طراحی سیستم های انتقال مایعات که دارای پمپ هستند، دسترسی به دو عبارت:

۱) اطلاعات محاسبه ای پیرامون پمپ مورد استفاده

۲) انرژی مورد نیاز مربوط به جریان مایع از اجزای مختلف سیستم انتقال مانند لوله ها، مخازن و تجهیزات فرآوری و اتصالات

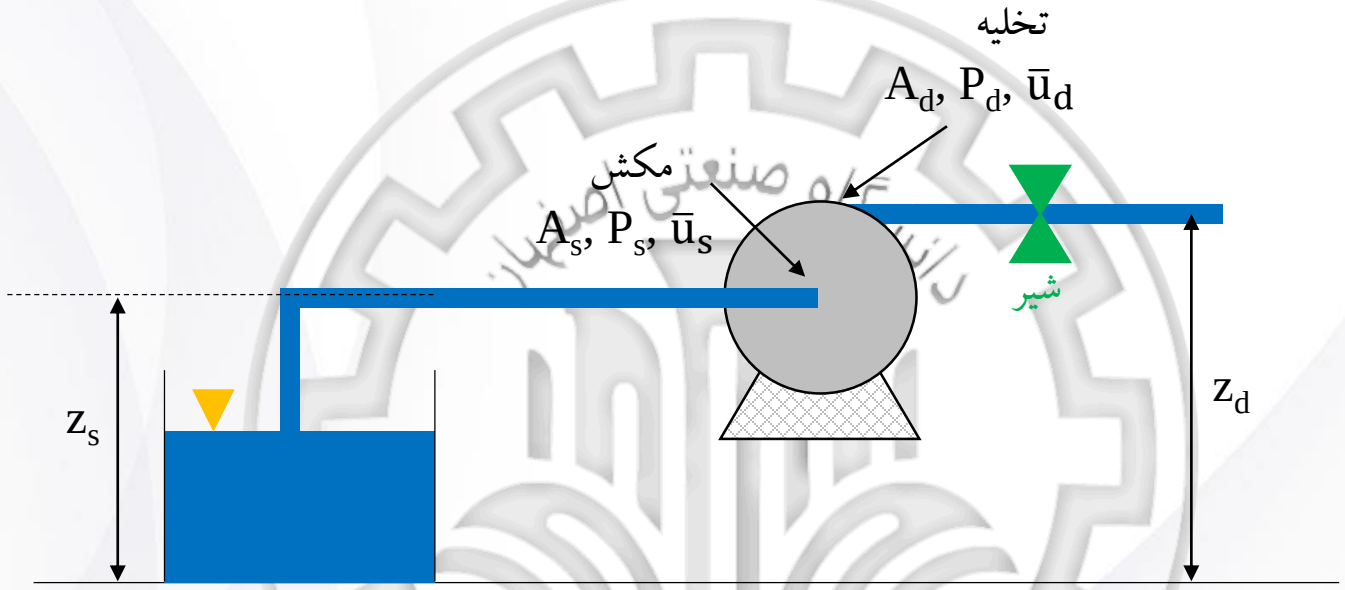
ضروری است.

اطلاعات مربوط به یک پمپ باید جهت تعیین انرژی که پمپ در یک سرعت معین به جریان مایع اضافه خواهد کرد، کافی باشد. به عبارت دیگر، تحت شرایط عملیاتی معین به تعیین کارایی پمپ نیاز داریم. این اطلاعات به صورت منحنی ویژگی های پمپ، توسط سازندگان پمپ تهیه شده و به همراه آن ارایه می گردد تا یک مهندس بتواند، قضاوت صحیحی در مورد تناسب پمپ برای شرایط سیستم انتقال داشته باشد.

روش های استاندارد برای بررسی کارایی پمپ ها توسط انجمن هیدرولیک ارائه شده است. آزمایش یک پمپ با راه اندازی آن در سرعت

ثابت صورت می پذیرد.

مطابق شکل، ارتفاع قسمت مکش (z_s) و ارتفاع قسمت تخلیه (z_d) از یک سطح مبنا اندازه گیری و ثبت می شود.



ابتدا، شیر را به صورت کاملا باز قرار داده و فشار را در قسمت های مکش و تخلیه، همچنین سرعت جریان حجمی و گشتاور ایجاد شده جهت حرکت محور پمپ را اندازه گیری می نمایند. سپس شیر تخلیه، آرام آرام بسته شده و اندازه گیری ها تکرار می گردند. این عمل را تا زمانی که شیر نزدیک به بسته شدن باشد، انجام می دهند. شیر هرگز به صورت کامل بسته نخواهد شد، زیرا ممکن است پمپ صدمه ببیند.

تست کارایی پمپ، شامل اندازه گیری سرعت جریان حجمی (Q)، مساحت قسمت های تخلیه و مکش (A_d , A_s)، ارتفاع در قسمت های مکش و تخلیه و فشارهای مکش (P_s) و تخلیه (P_d) می باشد. این داده ها در محاسبات مورد استفاده قرار می گیرند.

سرعت در منطقه مکش به این صورت محاسبه می شود:

$$\bar{u}_s = \frac{Q}{A_s} \quad , \quad \bar{u}_d = \frac{Q}{A_d}$$

ارتفاع مکش (h_s) و ارتفاع تخلیه (h_d) به صورت زیر به دست می آید:

$$h_s = \frac{\bar{u}_s^2}{2\alpha g} + z_s + \frac{P_s}{\rho g} \quad , \quad h_d = \frac{\bar{u}_d^2}{2\alpha g} + z_d + \frac{P_d}{\rho g}$$

* لازم به ذکر است، ضریب تصحیح α برای جریان آرام برابر 0.5 و برای جریان آشفته معادل 1 می باشد.

مقادیر ارتفاع مکش و تخلیه در محاسبات **ارتفاع پمپ** به صورت زیر مورد استفاده قرار می گیرد:

$$h_{\text{پمپ}} = h_d - h_s$$

در معادله فوق، افت های مربوط به اصطکاک در لوله ها مورد بررسی واقع نشده است، زیرا هدف در مرحله اول محاسبه کارایی پمپ می باشد، نه کارایی سیستم.

توان خروجی پمپ، **توان سیال** (Φ_{f1}) نامیده می شود که حاصلضرب شدت جریان وزنی سیال و ارتفاع پمپ است.

$$\Phi_{f1} = \dot{m} g h_{\text{پمپ}} \quad \text{or} \quad \Phi_{f1} = \rho g Q h_{\text{پمپ}}$$

توان لازم برای به حرکت درآوردن پمپ تحت عنوان **توان شکست** (Φ_{bk}) نامیده می شود که از حاصلضرب گشتاور ایجاد شده برای

محور پمپ (Ω) و سرعت زاویه ای محور (ω) بدست می آید.

$$\Phi_{bk} = \omega.\Omega$$

بازده پمپ را از این مقادیر توان به دست می آورند. نسبت توان گرفته شده توسط سیال و توان فراهم شده توسط محور پمپ را بازده گویند:

$$\eta = \frac{\Phi_{f1}}{\Phi_{bk}}$$

مقادیر محاسبه شده برای ارتفاع پمپ، بازده و توان شکست برای تهیه نمودار مشخصه پمپ که در بخش بعدی شرح داده خواهند شد، به کار می رود.

مثال: داده های زیر از بررسی یک پمپ سانتریفوژی جهت انتقال آب به دست آمده است. فشار مکش 5 bar، فشار تخلیه 8 bar و سرعت جریان حجمی 15000 l/h می باشد. ارتفاع پمپ در سرعت جریان داده شده و توان لازم برای پمپ را محاسبه کنید.

حل:

$P_s = 5\ bar = 5 \times 10^5\ Pa = 5 \times 10^5\ kg/m.s^2$

$P_d = 8\ bar = 8 \times 10^5\ Pa = 8 \times 10^5\ kg/m.s^2$

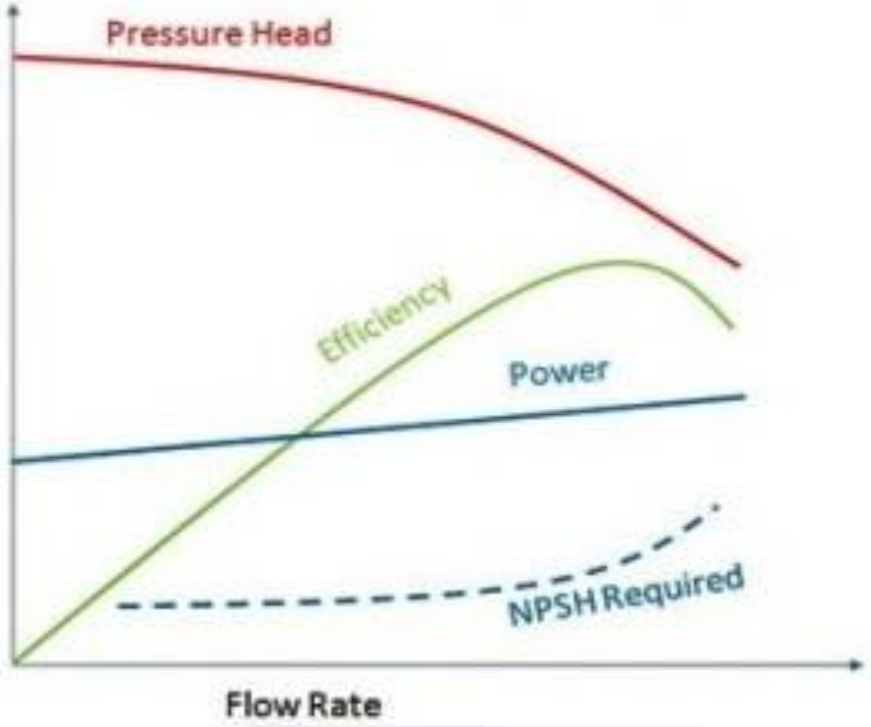
$Q = 15000\ l/s = 0.0042\quad m^3/s$

$$h_{pump} = \frac{(P_d - P_s)}{\rho g} = \frac{(8-5)\times 10^5}{1000 \times 9.81} = 30.6 \ \ m$$

$$\Phi_{f1} = \rho g Q h_{\text{پمپ}} = 1000 \times 9.81 \times 0.0042 \times 30.6 = 1261 \ W = 1.261 \ kW$$

✓ نمودار مشخصه پمپ:

مطابق شکل، در این نمودار مقادیر محاسبه شده ارتفاع پمپ، بازده و توان شکست بر حسب سرعت جریان حجمی (که ظرفیت نامیده می شود)، نمودار مشخصه پمپ را تشکیل می دهند. عموما، نمودار مشخصه پمپ ها را بر حسب آب به دست می آورند. بنابراین، اگر یک پمپ بخواهد برای مایع دیگری مورد استفاده قرار گیرد، منحنی ها باید برای ویژگی های مایع مورد نظر تنظیم شوند.



مطابق شکل، یک پمپ سانتریفوژی می تواند سرعت جریان را از صفر تا بیشترین مقدار، بسته به ارتفاع و شرایط مکش ایجاد نماید. این منحنی ها به قطر پره و اندازه پوسته پمپ بستگی دارند. ارتباط بین ارتفاع و سرعت جریان حجمی می تواند افزایشی، کاهشی، صاف یا شیب دار باشد.

در شکل اسلاید قبل، یک منحنی ارتفاع افزایشی نشان داده شده است، زیرا با کاهش سرعت جریان، ارتفاع آن افزایش پیدا کرده است. شکل منحنی به نوع پره و مشخصات طراحی آن بستگی دارد. در ظرفیت صفر که شیر تخلیه کاملا بسته است، بازده برابر صفر بوده و توان اعمال شده توسط پمپ به گرما تبدیل می گردد.

از منحنی مشخصه پمپ می توان نتایج متعددی به دست آورد. با کاهش ارتفاع کلی، سرعت جریان حجمی افزایش می یابد. هنگامی که سطح یک سیال در مخزن و در سمت مکش کاهش یابد، ارتفاع کلی پمپ افزایش و دبی حجمی سیال کاهش می یابد.

در سرعت جریان حجمی کم و یا زیاد سیال، بازده پمپ کاهش می یابد. توان شکست با افزایش سرعت جریان، افزایش یافته ولی در بیشترین سرعت جریان، کاهش پیدا خواهد کرد.

اوج منحنی بازده، بیانگر سرعت جریان حجمی است که در آن پمپ، دارای بیشترین بازده می باشد. سرعت جریان در اوج منحنی بازده، معادل سرعت جریان مورد نظر است. نقاطی که روی منحنی ارتفاع و توان، مربوط به بیشترین بازده هستند، بهترین نقاط بازده یا BEP (Best Efficiency Point) نامیده می شوند. با افزایش سرعت جریان حجمی، توان مورد نیاز برای کارکردن پمپ افزایش می یابد. اگر از یک پره با قطری متفاوت استفاده شود، منحنی ارتفاع جابه جا خواهد گردید. با افزایش قطر، منحنی بالاتر خواهد آمد. بنابراین می توان با استفاده از یک پره بزرگتر، مایع را به ارتفاع های بالاتری پمپ نمود.

✓ارتفاع مکش مثبت خالص (NPSH):

ارتفاع مکش مثبت خالص که معادل (Net Positive Suction Head) می باشد، عامل مهم دیگری است که باید در طراحی پمپ به

دقت مد نظر قرار گیرد تا از تبخیر مایع در حال انتقال جلوگیری شود.

در یک فضای بسته، فشار معینی بر سطح مایع، لازم است تا از خروج بخار از آن جلوگیری نماید. این فشار، فشار بخار مایع می باشد. در یک سیستم پمپ، نباید فشار روی سیال از فشار بخار آن در دمای انتقال، کمتر باشد. در صورت وقوع این پدیده در ورودی پمپ حالتی تحت عنوان کاویتاسیون (Cavitation) رخ می دهد. با ورود مایع به چشم پمپ، فشار در این نقطه کمتر از کل سیستم انتقال خواهد بود. اگر فشار در این نقطه از فشار بخار مایع کمتر شود، مایع شروع به تبخیر می کند.

هر صورت از تشکیل بخار سبب کاهش بازده پمپ می گردد. علاوه بر این، با جابه جا شدن بخار در طول پره پمپ، فشار افزایش پیدا کرده و بخارات سریعا به مایع تبدیل می شوند. کاویتاسیون را می توان با سروصدای حباب های هوا در سطح پره تشخیص داد. در صورتی که کاویتاسیون به صورت متناوب رخ داده و فشارهای منطقه ای بالا ایجاد نماید، هر جسم شکننده ای نظیر سطح پره ممکن است از بین برود. برای جلوگیری از کاویتاسیون، فشار در منطقه مکش نباید از فشار بخار کمتر شود. سازندگان پمپ، ارتفاع مکش مثبت خالص مورد نیاز ($NPSH_R$، Requiered Net Positive Suction Head) را برای پمپ مشخص می نمایند که معادل ارتفاع مکش منهای فشار بخار بر حسب ارتفاع است و به صورت زیر تعریف می شود:

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

کل ارتفاع در منطقه مکش یک پمپ برابر با:

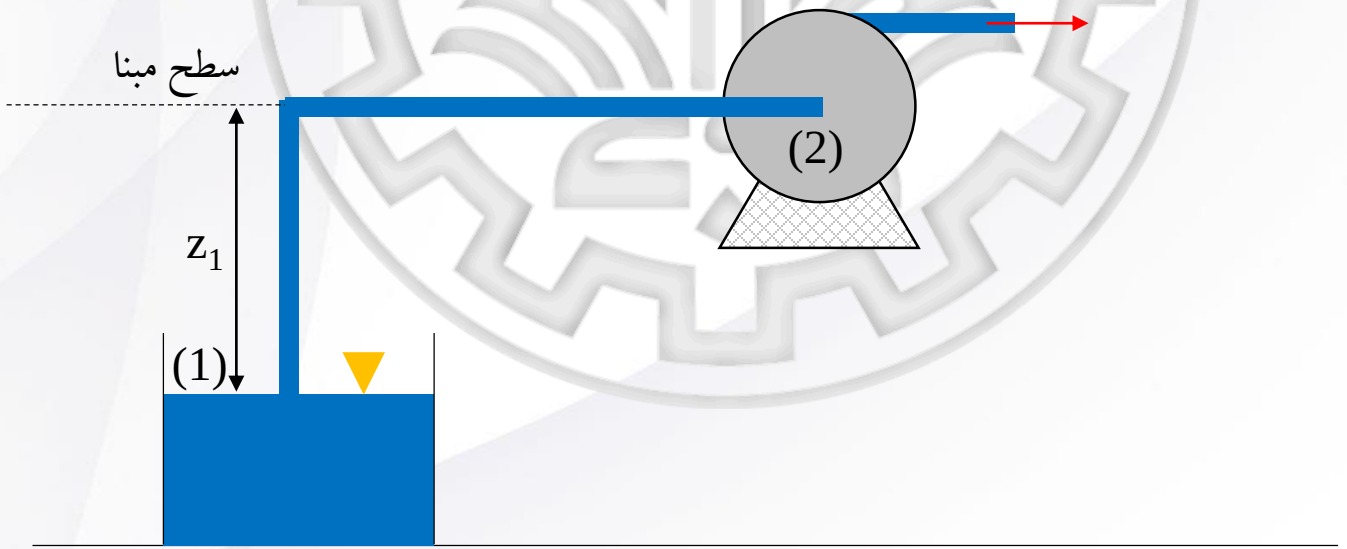
$$h_s = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{\bar{u}_s^2}{2g}$$

$$\Rightarrow NPSH_R = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{\bar{u}_s^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g}$$

که P_v فشار بخار مایع در حال پمپ شدن است.

$NPSH_R$ باید به اندازه ای بزرگ باشد تا از وقوع پدیده کاویتاسیون جلوگیری به عمل آید. برای تعیین مقدار $NPSH_R$، سازندگان پمپ به صورت تجربی مقدار آن را تعیین نموده و به صورت نموداری مشابه شکل اسلاید ۱۰ نشان می دهند. استفاده کننده پمپ باید مطمئن گردد که ارتفاع مکش مثبت خالص در دسترس $NPSH_A$ (Available Net Positive Suction Head) برای کاربرد مورد نظر از $NPSH_R$ اعلام شده توسط سازنده بیشتر است.

در هنگام استفاده از پمپ برای کاربری مشخص، ابتدا باید مقدار $NPSH_A$ بر اساس محاسبه تعیین شود، که بستگی به سیستم جریان دارد. مطابق شکل، در حالتی که سیستم جریان بین دو نقطه (۱) و (۲) باشد، می توان نوشت:



$$\frac{P_{atm}}{\rho g} - z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\bar{u}_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

که h_{1-2}، بیانگر افت های اصلی و فرعی بین دو نقطه (۱) و (۲) می باشد. ارتفاع در دسترس در قسمت مکش پمپ (ورودی به پره پمپ) برابر است با:

$$\frac{P_{atm}}{\rho g} - z_1 - h_{1-2} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\bar{u}_2^2}{2g}$$

$NPSH_A$ معادل ارتفاع مکش منهای فشار بخار سیال بوده و یا:

$$NPSH_A = \frac{P_{atm}}{\rho g} - z_1 - h_{1-2} - \frac{P_v}{\rho g}$$

برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون یک مهندس باید مطمئن گردد که $NPSH_A$ برابر یا بیشتر از $NPSH_R$ است. در معادله اخیر، در صورتی که ارتفاع پمپ در بالای سطح مایع موجود در مخزن افزایش یابد، یا اتصالات بیشتری در سمت مکش، نصب گردد سبب افزایش ارتفاع اصطکاکی h_{1-2} و کاهش $NPSH_A$ می شود.

مثال: یک پمپ سانتریفوژی 4 m بالاتر از سطح آب یک مخزن قرار می گیرد. پمپ با دبی حجمی $0.02\ m^3/s$ کار می کند. مقدار $NPSH_R$ در این سرعت جریان باید 3 m باشد. از تمام افت ها به جز مبدل حرارتی که بین لوله ورودی و محل مکش پمپ قرار دارد و دارای ضریب افت $C = 15$ است، می توان صرف نظر نمود. قطر لوله 10 cm و فشار بخار آب 4.246 kPa می باشد. آیا این پمپ برای

شرایط عنوان شده مناسب است؟

حل:

$$\bar{u} = \frac{0.02}{\pi \times 0.05^2} = 2.55 \ \ m/s$$

$$h_f = C \cdot \frac{\bar{u}^2}{2g} = 15 \times \frac{2.55^2}{2 \times 9.81} = 4.97 \ \ m$$

$$NPSH_A = \frac{P_{atm}}{\rho g} - z_1 - h_{1\text{-}2} - \frac{P_v}{\rho g} = \frac{101.3 \times 1000}{1000 \times 9.81} - 4 - 4.97 - \frac{4.246 \times 1000}{1000 \times 9.81} = 0.92 \ \ m$$

$NPSH_A$ کمتر از $NPSH_R$ است. بنابراین پدیده کاویتاسیون رخ خواهد داد. پس پمپ مذکور برای این سیستم مناسب نیست.