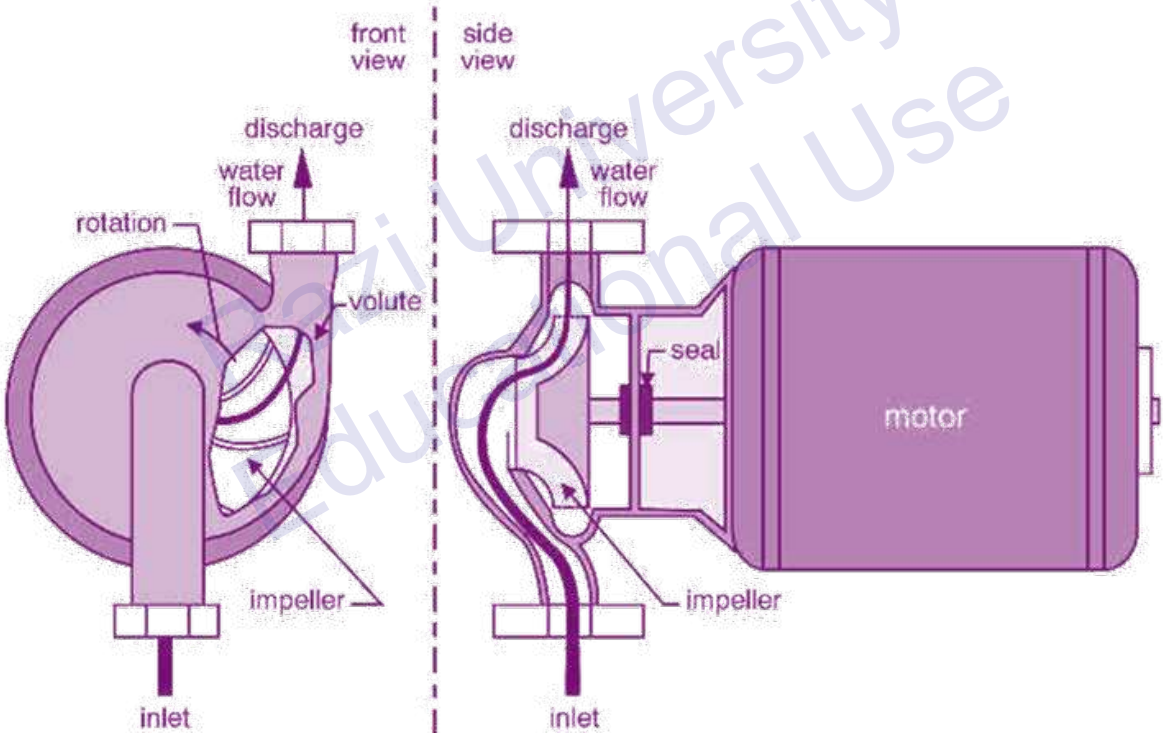
Razi University
Educational Use

مکانیک سیالات۲

پمپ کردن مایعات

میثم سعیدی-استادیار گروه مهندسی مکانیک

پمپ‌ها وسایلی هستند که انرژی و یا head مورد نیاز برای از بین بردن اصطکاک داخلی لوله و یا بالا بردن مایعات را فراهم می‌کنند. قسمت ورودی پمپ را قسمت مکش (Suction) و قسمت خروجی را قسمت تخلیه (Discharge) می‌نامند.



Razi University
Educational Use

کمیت‌های مؤثر در انتخاب پمپ‌ها عبارتند از:

۱ـ head، ۲ـ ظرفیت، ۳ـ نوع مایع، ۴ـ لوله‌ها، ۵ـ هزینه و مسائل اقتصادی پمپ

همانطوری که می‌دانید و با توجه به توضیحات ارائه شده در تصحیح معادله برنولی داریم:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_f - h$$

Razi University
Educational Use

۱ـ ترم Z را Static head در موقع کار پمپ می‌نامند و عبارت است از ارتفاع ستون مایعی که بر روی قسمت Suction و یا discharg پمپ اثر می‌گذارد.

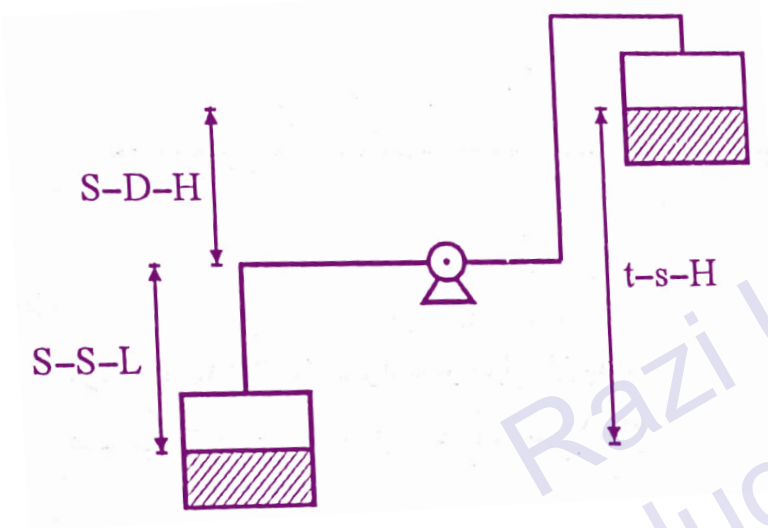
۱ـ۱ـ Static - Suction - Head (S - S - H): به فاصله عمودی سطح مایع در قسمت مکش تا مرکز پمپ وقتی که پمپ در زیر مایع قرار دارد گفته می‌شود.

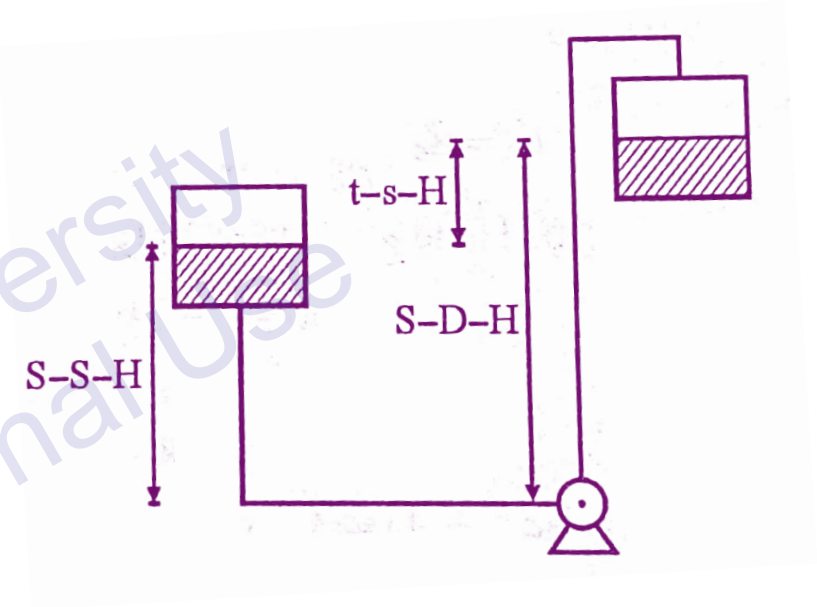
۱ـ۲ـ Static - Suction - Lift (S - S - L): به فاصله عمودی سطح مایع در قسمت مکش تا مرکز پمپ وقتی که پمپ در بالای سطح مایع قرار دارد گفته می‌شود.

۱ـ۳ـ Static - Discharge - head (S - D - H): به فاصله عمودی سطح آزاد مایع در قسمت تخلیه تا مرکز پمپ گفته می‌شود.

۱ـ۴ـ Total - Static Head (T - S - H) : به فاصله عمودی سطح آزاد مایع در بخش Suction و سطح آزاد مایع در بخش discharge گفته می‌شود.

Razi University Educational Use





Razi University
Educational Use

۲ـ ترم $\frac{P}{\rho g}$ را Pressure head و یا انرژی فشاری می‌نامند.

۳ـ ترم $\frac{u^2}{2g}$ را Velocity head و یا انرژی جنبشی می‌نامند. (سرعت و حرکت سیال در داخل لوله، انرژی‌زا می‌باشد، این انرژی را انرژی سینتیک می‌گویند. در حالی که Velocity Head عبارت است از فاصله‌ای که سیال بایستی بیافتد تا به سرعت داده شده‌ای برسد.)

۴ـ ترم h_f را هد frictional و یا انرژی اصطکاک می‌نامند و آن عبارت است از head معادل مورد نیاز برای غلبه بر کلیه نیروهای اصطکاک داخل لوله‌ها، شیرها و اتصالات چه در بخش Suction و چه در بخش discharge پمپ.

۵ـ Total Suction head: برابر با مجموع Suction head و هر گونه فشار در قسمت Suction منهای تلفات اصطکاک در این بخش (h_{fs}) است، یعنی:

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

در صورتی که سیستم فقط یک تانک باشد از سرعت مایع درون آن می‌توان صرفنظر نمود و داریم:

$$h_s = Z_s + \frac{P_s}{\rho g} - h_{fs}$$

Razi University Educational Use

ع ـ Total - discharge head : برابر است با مجموع Discharge - Head ها و هر گونه فشار در قسمت discharge بعلاوهٔ تلفات اصطکاک در این بخش، یعنی:

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

و در صورتی که سیستم فقط یک تانک در نظر گرفته شود از سرعت مایع درون آن می‌توان صرفنظر کرد و داریم:

$$h_d = Z_d + \frac{P_d}{\rho g} + h_{fd}$$

با توجه به توضیحات فوق h کل توان داده شده به مایع از طرف پمپ می‌باشد که به شکل هد بیان شده است.

اگر برای ورودی (i) و خروجی (e) پمپ معادله برنولی را بنویسیم، داریم:

$$\frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} + Z_i = \frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} + Z_e - h_P \quad , \quad V_i = V_e \quad , \quad Z_1 = Z_e \quad \Rightarrow \quad h_P = \frac{P_e - P_i}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\gamma}$$

Razi University Educational Use

NPSH

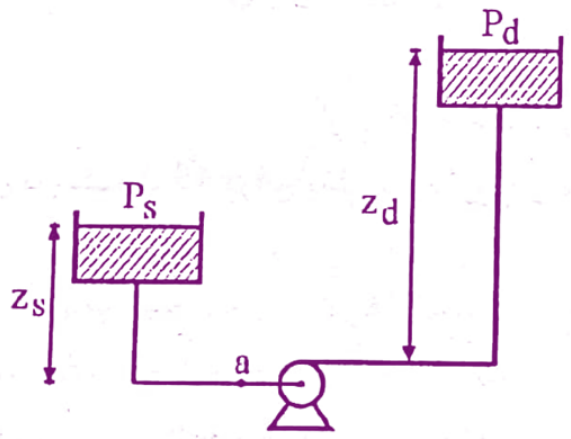
(Net Positive Suction Head) NPSH

در بررسی انرژی، مقدار فشارهای S یا D که خیلی پایین و یا خیلی بالاتر از فشار اتمسفر یک می‌باشند حائز اهمیت نیستند. معمولاً پایین‌ترین محدودهٔ فشار Suction بوسیلهٔ فشار بخار (Vapor - Pressure) مایع که مربوط به درجه حرارت مایع در ارتباط با قسمت Suction می‌باشد معین می‌گردد.

اگر فشار مایع به فشار بخار خود برسد مقداری از این مایع به بخار تبدیل می‌گردد که موجب بوجود آمدن پدیدهٔ Cavitation می‌شود (قبلاً توضیحاتی در مورد کاویتاسیون ارائه شده است). کاهش فشار معمولاً به واسطه تلفات اصطکاکی رخ داده و اگر تلفات خیلی زیاد باشد، فشار مایع را تا حد فشار بخار آن و یا حتی کمتر کاهش داده و منجر به کاویتاسیون می‌شود.

وقتی که در ناحیه Suction پمپ این پدیده اتفاق بیافتد مایع به اندازهٔ کافی بدرون پمپ داخل نمی‌شود. در نتیجه راندمان آن را پایین می‌آورد و ضمناً باعث پدیدار شدن ارتعاشاتی (Vibration) در پمپ می‌گردد. برای غلبه بر عمل پدیدهٔ (Cavitation) باید head در قسمت Suction به اندازه کافی از فشار بخار مایع بیشتر باشد، دسترسی به این مقدار head ، که بالاتر از فشار بخار مایع است را Net-Positive - Suction-Head و یا (N-P-S-H) می‌نامند.

Razi University Educational Use



شکل (۶ـ۳)

$$NPSH = Z_s + \frac{P_s}{\rho g} - h_{fs} - \frac{P_{Va}}{\rho g}$$

مراحل زیر اثبات رابطه فوق را نشان می‌دهد:

$$NPSH = \frac{u_a^2}{2g} + \frac{P_a - P_{Va}}{\rho g}$$

رابطه انرژی بین دو نقطه a و s عبارت است از:

$$\frac{P_s}{\rho g} + Z_s = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{u_a^2}{2g} + h_{fs} \rightarrow Z_s + \frac{P_s}{\rho g} + \frac{P_v}{\rho g} - h_{fs} = \frac{u_a^2}{2g} + \frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g}$$

$$\Rightarrow \quad NPSH = Z_s + \frac{P_s}{\rho g} - h_{fs} - \frac{P_v}{\rho g}$$

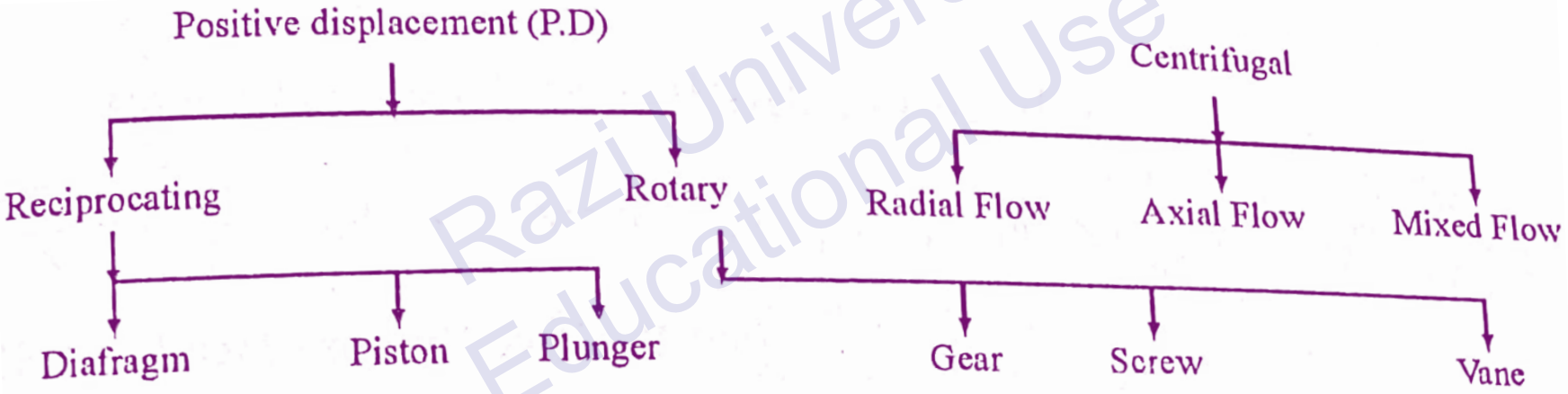
همانطوری که در رابطه فوق مشاهده می‌کنید هرچه فشار بخار (P_V) افزایش یابد NPSH کاهش می‌یابد. در حالت کلی در یک سیستم NPSH همیشه باید مقدار مثبتی داشته باشد تا عمل Cavitation اتفاق نیافتد.

در طراحی پمپ‌ها یک مهندس بگونه‌ای باید عمل نماید که این کمیت مقدار مثبتی داشته باشد و سازندهٔ پمپ هم اطمینان بدهد که پمپ در شرایط داده شده کار می‌کند.

Razi University Educational Use

انواع پمپ‌ها

به طور کلی پمپ‌ها به دو نوع Centrifugal (گریز از مرکز) و Positive displacement (جابجایی مثبت) تقسیم بندی می‌شوند، که تقسیم‌بندی آنها را مشاهده می‌کنید:



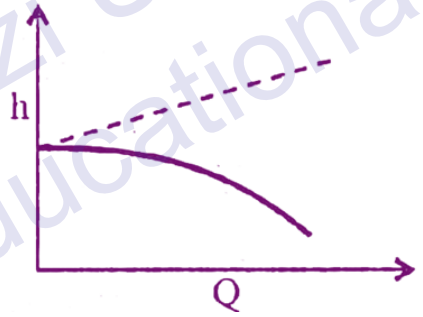
Razi University
Educational Use

در پمپ سانتریفوژ مایع نزدیک به مرکز پره‌ها (Impeller) که با سرعت زیاد در حالت چرخش هستند وارد پمپ شده و سپس به طور شعاعی (Radially) به سمت انتهایی پره‌ها در داخل Casing حرکت می‌کند در این حالت Velocity head تدریجاً به Pressure head تبدیل می‌شود.

Razi University
Educational Use

راندمان این تبدیل بستگی به چگونگی طراحی پره‌ها و Casing و مختصات فیزیکی مایع دارد. عمل یک پمپ سانتریفوژ برای یک دور بخصوص و ویسکوزیته یک مایع به خصوص، بوسیله منحنی‌های head کل بر حسب Q، Power بر حسب Q، NSPH بر حسب Q مشخص می‌شود. این منحنی‌ها را منحنی‌های مشخصه پمپ می‌نامند. این منحنی‌ها شکل‌های مختلفی دارند که بستگی به شکل هندسی پره و Casing خواهند داشت.

اصولاً سازندگان، این گونه منحنی‌ها را برای پروسهٔ آب فراهم می‌کنند. مهمترین منحنی، منحنی head کل بر حسب Q برای پمپ سانتریفوژ می‌باشد.



Razi University
Educational Use

چنانچه ملاحظه می‌شود ماکزیمم head زمانی است که $Q = 0$ باشد و با افزایش Q، head کل شروع به کاهش می‌کند و در صورت افزایش ویسکوزیته این مقدار کاهش بیشتری خواهد داشت.

در پدیدهٔ Cavitation مقداری از مایع داخل خط Suction تبخیر شده به طوری که حباب‌های بوجود آمده به قسمتی که دارای فشار بالاست حرکت می‌کند و در نتیجه موجب سر و صدا وارتعاشاتی در داخل پمپ می‌گردند.

NPSHreq: (NPSH مورد نیاز) تابعی از چگونگی طراحی پمپ است و برای انواع پمپ‌های طراحی شده در مدل‌های مختلف متغیر است. در ضمن تابعی از سرعت و ظرفیت پمپ نیز می‌باشد. بنابراین در حالی که NPSH موجود (NPSHav) در سیستم به آسانی قابل محاسبه است (برای شرایط داده شده)، NPSHreq (مورد نیاز) برای یک پمپ بخصوص، توسط سازندهٔ آن ارائه می‌شود. سازنده می‌تواند منحنی NPSHreq برای یک پمپ بخصوص را در کاتالوگ آن ارائه دهد.

به طور کلی NPSHreq انرژی اصطکاک حاصل درون پمپ می‌باشد که در اثر ورود سیال به آن بوجود می‌آید. بنابراین انرژی سیال قبل از ورود به پمپ که همان NPSHav (موجود) است، بایستی بر این مقدار

Razi University
Educational Use

تلفات انرژی درون پمپ غلبه کند تا از پدیده کاویتاسیون جلوگیری نماید و به زبان دیگر این مقدار بایستی همیشه از مقدار NPSHreq بزرگتر و یا مساوی باشد، یعنی:

$$NPSHavailable \geq NPSHrequired$$

مقدار NPSH مورد نیاز بوسیلهٔ یک پمپ سانتریفوژ تقریباً با مربع Q افزایش می‌یابد.

پمپ‌های سانتریفوژ به دو صورت تنظیم دبی (throttle) و یا غیر تنظیم دبی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نمونه throttle دبی بوسیلهٔ یک و یا چند شیر تعبیه شده در قسمت Discharge پمپ کنترل می‌گردد و هدف از این کار جلوگیری از افزایش تلفات اصطکاکی و بالا بردن h (کاهش کاویتاسیون) می‌باشد.

Razi University
Educational Use

موازی و سری بستن پمپ‌ها:

در هنگام استفاده از پمپ‌ها گاهی اتفاق می‌افتد که نیاز به بستن پمپ‌ها به صورت موازی و یا سری می‌باشد. هرگاه هدف داشتن head مشخص و دبی بیشتر باشد، پمپ‌ها را به صورت موازی و در حالتی که منظور داشتن دبی مشخص و ثابت و افزایش head باشد پمپ‌ها به صورت سری بسته می‌شوند.

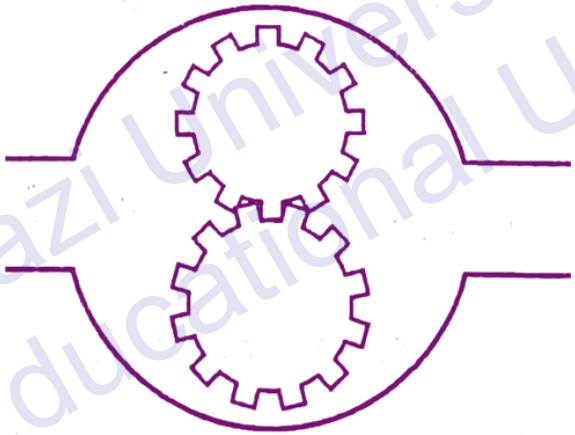
پمپ‌های Positive displacement (پیستونی) یا جابجایی مثبت

این پمپ‌ها بر خلاف پمپ‌های سانتریفوژ که سیال تحت نیروی گریز از مرکز در آن پرت می‌گردد، سیال را به دام انداخته و تحت فشار در داخل یک محفظه (Casing) بسته می‌گذارد. این نوع پمپ‌ها برعکس پمپ‌های سانتریفوژ که دارای Q زیاد و h کم هستند، دارای Q کم و h زیاد می‌باشند.

پمپ‌های دورانی مایع را تحت فشار توسط دنده‌های دورانی که در داخل محفظه Casing قرار داده منتقل می‌کنند. معمولاً شدت پمپ کردن با تغییرات سرعت Rotor تغییر می‌کند و اصولاً برای پمپ کردن مایعات با ویسکوزیته بالا از این نوع پمپ، استفاده می‌شود.

Razi University Educational Use

پمپ‌های رفت و برگشتی (Reciprocating)، مایع را تحت فشار بوسیلهٔ تغییر حجم داخلی پمپ انتقال می‌دهند. شدت پمپ کردن با تغییرات فرکانس تغییر می‌کند. شیر در دو طرف پمپ مورد نیاز می‌باشد. برای گل‌های روان Slurry و آب تغذیه Boiler از این پمپ‌ها استفاده می‌شود. از مهمترین و معمول‌ترین پمپ‌های دورانی، پمپ دنده‌ای است. در این نوع پمپ، داخل Casing، دو چرخ دنده که هم سایز هستند قرار داده شده، و چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، چرخ دنده‌ها مایع را بدام انداخته و آن را تحت فشار به داخل discharge روانه می‌نمایند.



Razi University
Educational Use

فاکتورهای مؤثر در انتخاب پمپ:

۱ـ به طور کلی مایعات با ویسکوزیته بالا بوسیلهٔ پمپ‌های P.D پمپ می‌شوند.

پمپ‌های سانتریفوژ به خاطر این که با تغییرات ویسکوزیته حساسیت زیادی را نشان می‌دهند، نمی‌توانند در پمپ کردن مایعات ویسکوزیته چندان مؤثر باشند.

۲ـ ویسکوزیته بالا باعث افزایش تلفات (h_f) و نتیجتاً کاهش NPSHav موجود می‌شود و چون NPSHav موجود بایستی از NPSHreq بیشتر باشد لذا محدودیتی بر روی انتخاب پمپ بوجود می‌آید.

۳ـ مایعات با فشار بخار بالا باعث کاهش NPSHav موجود می‌شود. اگر این مایعات در درجه حرارت بالا پمپ شوند، باعث می‌شوند که دنده‌های پمپ دنده‌ای در یک Clearance بسته متوقف شوند.

۴ـ اگر مایعی که می‌خواهد پمپ شود Pseudo - Plastic ($n < ۱$) باشد به علت کاهش ویسکوزیته ظاهری μ_a با افزایش shear - rate و یا افزایش شدت پمپ کردن، از پمپ‌های سانتریفوژ با دور بالا استفاده می‌شود. در حالی که برای مایعات dilatant ($n > ۱$) به علت افزایش μ_a با افزایش Shear - rate و یا افزایش شدت پمپ کردن، بهتر است از پمپ‌های P.D (جابجایی مثبت) با دور پایین استفاده شود.

Razi University Educational Use

محاسن و معایب پمپ‌های سانتریفوژ:

۱ـ دارای discharge یکنواخت است.

۲ـ خرج تعمیرات کمتری نسبت به سایر پمپ‌ها دارد

۳ـ ساختمان آن بسیار ساده است و می‌تواند از مواد مختلفی ساخته شود.

۴ـ اگر خط discharge بسته شود پمپ در صورتی که برای مدت خیلی زیاد کار نکرده باشد خسارتی بوجود نمی‌آورد.

۵ـ در مقایسه با دیگر پمپ‌ها خیلی کوچکتر هستند.

۶ـ برای مایعاتی که دارای ذرات معلق می‌باشند، این پمپ‌ها قابل استفاده می‌باشند.

۷ـ برای مایعات خیلی ویسکوز قابل استفاده نیستند.

۸ـ فقط تحت شرایط محدودی با راندمان بالا کار می‌کنند.

۹ـ این نوع پمپ‌ها Self - Prime نیستند.

Razi University
Educational Use

محاسن و معایب پمپ‌های Positive displacement

۱ـ وقتی که مایعات با ویسکوزیته بالا را پمپ می‌کند دارای راندمان بالائی هستند.

۲ـ برای یک محدودهٔ وسیعی از Q دارای head خیلی بالائی می‌باشند.

۳ـ پمپ‌های دوار Self prime هستند.

۴ـ Q در آن‌ها کلاً ثابت نیست و مقدار آن نمی‌تواند زیاد باشد.

۵ـ اگر خط dicharge بسته شود پمپ صدمه می‌بیند.

Razi University
Educational Use

محاسبه توان پمپ

توان مورد نیاز پمپی که در حالت ایده‌آل کار می‌کند و مایع را از فشار P_i به فشار Pe می‌رساند طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_{ower} = Q\Delta P = \frac{\dot{m}\,\Delta P}{\rho} = \gamma Q h$$

که در رابطه فوق پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

Q : دبی حجمی مایع

ΔP : افزایش فشار ایجاد شده

$\dot{m}$: دبی جرمی مایع

γ : وزن مخصوص مایع

h :هد داده شده به مایع که برابر $\frac{\Delta P}{\gamma}$ می‌باشد.

ولی در عمل می‌بینیم که مقدار توان مورد نیاز بیشتر از حالت فوق است که این امر ناشی از تلفات اصطکاکی در بخش‌های مختلف می‌باشد. برای غلبه بر این تلفات بایستی توان بیشتری مصرف کنیم تا افزایش فشار موردنظر ایجاد شود. اگر توان مصرفی واقعی را با P_{Real} و حالت ایده‌آل را با P_{Ideal} نشان دهیم، بازده پمپ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \text{بازده} = \text{Efficiency} = \frac{P_{Ideal}}{P_{Real}}$$

Razi University
Educational Use

با توجه به تشابه هندسی در پمپ‌های سانتریفوژ اگر دور پمپ با N نشان داده شود، مشاهده می‌شود که هد پمپ (H) متناسب با N^2، دبی پمپ (Q) متناسب با N و در نتیجه توان مصرفی پمپ (γQH) با N^3 متناسب است و می‌توان نوشت:

$$H \sim N^2 \quad , \quad Q \sim N \quad , \quad Power \sim N^3$$

به عنوان مثال اگر دور پمپ دو برابر شود، هد پمپ چهار برابر، دبی پمپ دو برابر و توان مصرفی هشت برابر خواهد شد. اگر اصل تشابه هندسی را بخواهیم برای پمپ‌ها تعمیم دهیم به روابط زیر نیز می‌رسیم. در روابط زیر D قطر پروانه می‌باشد.

$$\frac{Q}{ND^3} = \text{ثابت} \quad \text{و} \quad \frac{H}{N^2D^2} = \text{ثابت}$$

لازم به ذکر است که کارتوربین نیز از رابطه مشابه پمپ محاسبه می‌شود و مقدار آن برابر است با:

$W_s = \gamma Qh_T$ = کار توربین در حالت ایده‌آل (هم انتروپی)

که h_T هدتوربین می‌باشد. بازده توربین نیز به رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_T = \text{بازده توربین} = \frac{\text{کار تولیدی در حالت واقعی}}{\text{کار تولیدی در حالت ایده‌آل}} = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_s}$$

$$\Rightarrow \dot{W} = \text{کارتولیدی واقعی} = \eta_T \gamma Qh_T$$

Razi University Educational Use