فـهـرست مـنـدرجـات

پیش گفتار
بخش اول : مقدمه ای برپمپاژ و انواع پمپ ها
بخش دوم: تئوری عملکردپمپهای گریز ازمرکز
بخش سوم: دسته بندی پمپهای گریزازمرکز
بخش چهارم: پروانه‌ها (Impellers)
بخش پنجم: سرعت مخصوص و کاربری‌های آن
بخش ششتم: تأثیر خواص فیزیکی مایع مورد پمپاژ برعملکرد پمپهای گریزازمرکز
بخش هفتم: کاویتاسیون *Cavitation*

پیش گفتار:

همانطوری که قلب به‌عنوان حیاتی‌ترین پمپ وظیفه انتقال خون به اجزاءِ مختلف بدن جانداران رابعهده دارد، انتقال مایعات درواحدهای صنعتی بعهده پمپ‌هامی‌باشد. در اکثر کتابها و مقالاتی که در زمینه پمپهاتألیف شده اند از پمپ به‌عنوان یکی از اسب‌های بارکش (Workhorses) ویا به‌عنوان قلب (Heart) واحدهای صنعتی نامبرده می‌شود. مقدمه فوق خودگویای اهمیت بالای پمپها درکارخانجات، زندگی اجتماعی و حیات بشر می‌باشد.

پمپ به ماشین‌هائی اطلاق می‌شود که از آن برای جابجائی سیالات‌تراکم ناپذیر (Incompressible Fluids) نظیر مایعات‌استفاده می‌شود. برای این منظور در پمپها، انرژی جنبشی که از منابع دیگری نظیر الکتروموتورها، ماشین‌های احتراق داخلی، توربین‌ها و... تأمین گردیده‌است، به انرژی پتانسیل (فشار) تبدیل می‌شود.

بنابراین در بیانی کاملتر، می‌توان پمپ را ماشینی دانست که موجب افزایش انرژی پتانسیل (فشار) مایعات گردیده تا مایع بتواند بر از دست رفت‌های انرژی در سیستم نظیر اصطکاک فائق آمده، به نقاط مرتفعتر و یا مخازنی با فشار بیشتر منتقل گردیده و یا کار مکانیکی انجام دهد.

امروزه بعد از الکتروموتورها، پمپها پرمصرف‌ترین ماشین در صنایع بوده و لذا انتخاب صحیح آن نقش بسزائی در عملکرد واحدهای صنعتی و کشاورزی دارد. به عنوان مثال در بعضی از پالایشگاها و صنایع پتروشیمی، بیش از ۵۰۰۰ پمپ از انواع مختلف، وظیفه جابجائی و انتقال صدها نوع ماده شیمیائی را از انواع مواد اولیه، مواد میانه ای و محصولات نهائی به عهده دارند.

بدیهی‌است انتخاب صحیح، نصب مناسب و نگهداری مطلوب می‌تواند در افزایش سود دهی و کاهش هزینه‌های واحدهای مربوطه سهم بسزائی داشته باشد. به عنوان مثال در بعضی از واحدهای فرآیند شیمیائی (Chemical Process Industries) ۲۰ ٪ قیمت اولیه، ۸۰٪ توان مصرفی و ٤٠ ٪ هزینه‌های تعمیراتی به پمپها مربوط می‌شود. هزینه‌های سالیانه نگهداری و تعمیرات پمپها در صنایع شیمیائی که در آن پمپ به‌عنوان یک ماشین اصلی مورداستفاده قرار می‌گیرد، حدود ۵۰ ٪ قیمت خرید آن می‌باشد.

طبق گزارش مجله مهندسی شیمی(Chemical Engineering) یکی از دلایل اصلی این امر فقدان قابلیت تعویض در میان پمپهای گریز از مرکزاست . پائین بودن کار آئی (Performance)پمپ خریداری شده نه تنها موجب افزایش مشکلات تعمیر ونگهداری آن می‌گردد بلکه می‌تواند باعث بالارفتن مصرف انرژی، افزایش مصرف قطعات و سایر مشکلات فنی شود. تعمیرات پمپ خود یک تخصص و حرفه با ارزش بوده و تا زمانی که بشر ناچار باشد مایعات را در صنایع جابجا نماید، نقش وجودی خود را حفظ خواهد کرد.

برهمین مبنا در این مجموعه سعی گردیده‌است با ارائه اطلاعات و تجربیات مورد نیاز به افرادی که با این ماشین در تماس شغلی و حرفه ای قرار دارند اهمیت موضوع روشن‌تر گردیده و از سوی دیگر با انتخاب پمپ مناسب و بهره‌برداری صحیح و منطقی از آن، چه در هزینه‌های اولیه وچه در هزینه‌های جاری (مصرف انرژی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه توقف خط تولید) حداکثر صرفه جویی به عمل آید.

مشکل اصلی که در اکثر صنایع به‌چشم می‌خورد، ساده نگری به این ماشین پرارزش وحیاتی می‌باشد. در غالب اوقات پمپها بر مبنای یک سری فرضیات و محاسبات غیر معقول انتخاب و خریداری می‌شوند و از آنجائی که کمتر عوارض آن مورد بررسی و پیگیری علمی‌و اقتصادی قرارمی‌گیرد، هزینه‌های غیر منطقی آن خود را در لابلای سایر هزینه‌های خط تولید پنهان می‌ساخته و این در حالی‌است که اگر اجزاءِ ابن فرآیند (انتخاب، نصب، بهره‌برداری، کنترل، تعمیر و نگهداری)به‌طور اصولی مورد توجه قرار می‌گرفت، دقیقاً مشخص می‌شودکه تا چه حد می‌توان در هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و هزینه‌های ناشی از توقف غیر عادی خط تولید صرفه جوئی بعمل آورد.

خوشبختانه نحوه کار ونگهداری پمپها در صنایع گوناگون اختلاف اندکی با یکدیگر دارند و همین امر کمک می‌کند تا بتوان یک مجموعه اطلاعاتی قابل قبول در زمینه پمپها را دریک کتاب، گردآوری نمود.

درتدوین این مجموعه نیز با همین دیدگاه موضوعات ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته‌است. به‌عنوان مثال بیشتر مشکلات پمپها به انتخاب نا مناسب آنها مربوط می‌شود و بدیهی‌است اگر انتخاب پمپ به‌طور صحیح صورت نگرفته باشد اقدامات اصلاحی بعدی نمی‌توانند درحل مشکلات به‌وجود آمده در زمان نصب و راه اندازی و یا هنگام بهره‌برداری چندان مؤثر واقع گردند.

امیداست با مطالعه این مقدمه و توجه به نکات اصلی آن که محور تدوین این مجموعه را تشکیل می‌دهد مؤلف توانسته باشد نقش مهم وحیاتی این ماشین به‌ظاهر ساده که در اصل یکی از مهمترین ماشین آلات مورد استفاده در واحدهای صنعتی می‌باشد را برای کارشناسان و تکنسین‌های فنی و بهره‌برداری واحدها صنعتی روشن نموده باشد.

با تشکر

احمدکاویانی

مرداد ۱۳۸٤

بخش اول:
مقدمه ای برپمپاژ و انواع پمپ‌ها

۱-۱: هدف از به‌کارگیری پمپها

پمپ به ماشینی اطلاق می‌شود که از آن برای جابجائی سیالات تراکم ناپذیر (Incompressible Fluids) نظیر مایعات‌استفاده می‌شود و پمپاژ (Pumping) عبارت‌است از افزایش انرژی پتانسیل (فشار) مایعات جهت انتقال آن از نقطه ای به نقطه دیگر، فزایش فشار مایعات در فرآیند پمپاژ، می‌تواند به‌دلایل زیر باشد:

الف: غلبه بر اصطکاک موجود در سیستم (شبکه‌های آب رسانی شهری).

ب: غلبه بر مقاومت (فشار) موجود در مقابل جریان مایع (پمپ تغذیه دیگ بخار).

ج: ذخیره سازی مایعات در سطح انرژی پتانسیل (ارتفاع یا فشار) بالاتر (منابع هوائی آب).

د: انجام کار مکانیکی (سیستم‌های هیدرولیک).

۱-۲: دسته بندی پمپها

پمپها برحسب مکانیسم عملکرد آن به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف: پمپ‌های جابجائی مثبت Positive Displacement Pumps

در پمپهای جابجائی مثبت، مقدار معینی از مایع در لای دو قطعه گیر انداخته شده و سپس با جابجائی قطعه (یا قطعات) متحرک پمپ، مایع مورد پمپاژ تحت فشار خروجی از پمپ به خارج رانده می‌شود. در این پمپها، لقی(Clearance) بین قطعات متحرک (Pumping Elements) و پوسته (Casing) بسیار ناچیز بوده و لذا جابجائی مایع در جهت رو به‌جلو صو رت می‌پذیرد.پمپهای جابجائی مثبت خودبه دودسته تقسیم می‌شوند:

الف: تناوبی Reciprocating

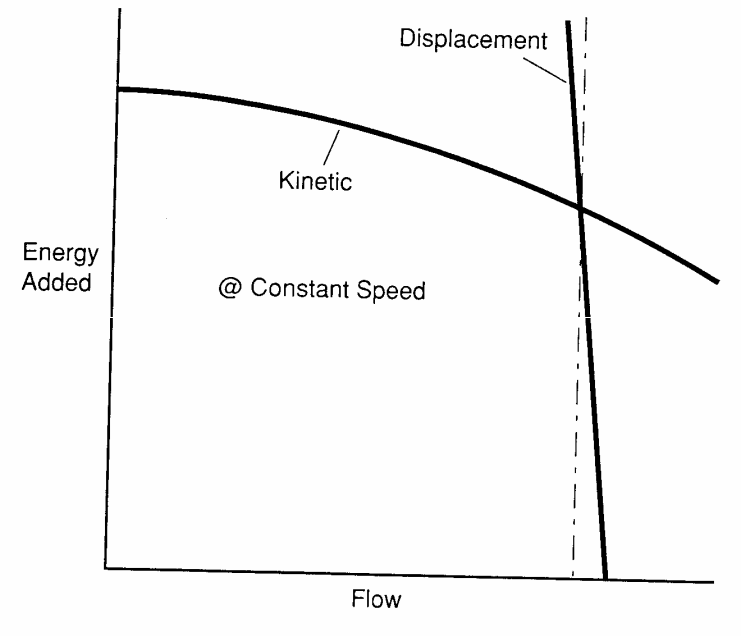
ب: دورانی Rotary

به‌کارگیری پمپهای جابجائی مثبت جنبه عمومی‌نداشته و فقط در شرایط ویژه ای مورداستفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال در مواقعی که فشار خروجی بالا مورد نظر بوده ویا اینکه مایع مورد جابجائی دارای ویسکوزیته زیاد باشد، ترجیح داده می‌شود که ازپمپهای دورانی استفاده شود. ازسوی دیگر به‌علت حساسیت شدید دبی جریان در پمپهای گریزازمرکزبه ارتفاع کلی موجوددر سیستم، در مواردی که ثبات نسبی دبی در سیستم مورد نظر باشد، به‌علت تغییرات اندک دبی جریان در پمپهای جابجائی مثبت و عدم وابستگی نسبی آن به فشار سیستم، ترجیحاً باید از پمپهای جابجائی مثبت‌استفاده شود.

ب: پمپهای گریز از مرکز Centrifugal Pumps

به‌علت ویژگی‌های مطلوب پمپهای گریزازمرکز، امروزه بیش از ۶۰ ٪پمپهای مورداستفاده در دنیا از نوع گریز از مرکزمی‌باشند. پمپهای گریز ازمرکز جزءِ ماشین‌های جنبشی (Kinetic)بوده، چرا که در اثر حرکت دورانی پروانه (Impeller) انرژی جنبشی (سرعت) مایع

به‌طورعمده و انرژی پتانسیل (فشار) آن به‌طور جزئی افزایش یافته، آنگاه بخش اعظمی‌از انرژی جنبشی اعمال شده در یک مجرای گشاد شونده به‌نام حلزونی (Volute) به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود. از آنجائی که انرژی داده شده به مایع به سرعت آن بستگی دارد، لذا افزایش انرژی پتانسیل مایع، با دبی آن تغییر می‌کند. بر همین اساس، عملکرد پمپها با منحنی مشخصه آن Pump (Characteristic Curve) که معرف تغییرات دبی در مقابل مقاومت موجوددر سیستم فشار یا ارتفاع(Head) می‌باشد، نشان داده می‌شود (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱): منحنی مشخصه انواع پمپها

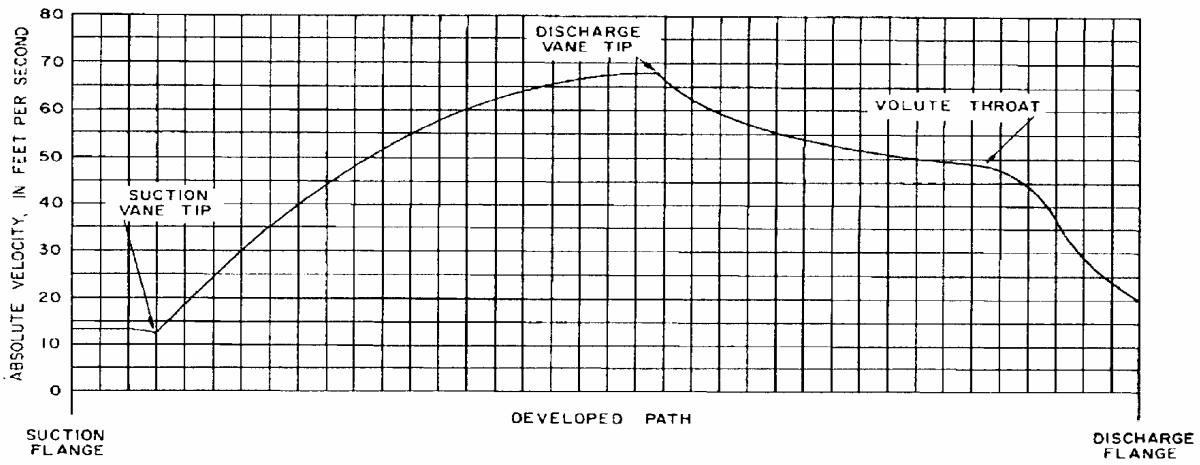
همانطوری که از شکل فوق پیداست، دبی پمپهای گریز ازمرکز در مقابل تغییرات مقاومت موجود در سیستم بشدت تغییر نموده و بر همین اساس می‌توان ظرفیت آن را با تغییر مقاومت در سیستم کنترل کرد. حال آنکه دبی (ظرفیت) پمپهای جابجائی مثبت تقریباً ثابت بوده و هر چند که ظرفیت آن را نمی‌توان با تغییر مقاومت در سیستم تغییرداد، ولی در عوض ویژگی فوق اجازه می‌دهد تا در مواردی که لازم باشد، سیستم پمپاژ با ظرفیت تقریباً ثابت کارکرده و با تغییر شرایط موجود در سیستم، دبی پمپ تغییر چندانی نکند، پمپهای جابجائی مثبت (به‌ویژه پمپهای دیافراگمی) انتخاب مناسبی می‌باشند.

پمپهای گریز از مرکز را می‌توان ازنظر مکانیکی ماشینی ساده و ازنظر هیدرولیکی ماشین پیچیده ای دانست که از قسمتهائی نظیر پروانه (Impeller) که در داخل پوسته یا پیچک (Volute یا Casing) می‌چرخد، سیستم آب بند کننده(Sealing System)، یاطاقانها(Bearings) و شافت(Shaft) تشکیل شده‌است.

گشتاور داده شده به شافت از طریق تیغه‌های (Vanes) پروانه به مایع مورد پمپاژمنتقل شده و باعث افزایش سرعت مایع می‌گردد. ولی از آنجائی که هدف از به‌کارگیری پمپها، افزایش فشار

مایعات‌است ونه سرعت آن، بنابراین لازم‌است که حتی الامکان، انرژی جنبشی (سرعت) به انـرژی پتانسیل (فشار) تبدیل شود. این امر در یک مجرای گشاد شونده به‌نام حلزونی (Volute) صورت می‌پذیرد. در شـکل (۲-۱) تغییـرات سـرعت مطلـق مـایع درمـسیرجریان ازدرون پوسـته پمـپ (از دهانه مکش تا دهانه خروجی) نشان داده شده‌است.

مایع مورد پمپاژ با سرعت کم و تحت تأثیر فشارمکش (عموماً فشار جـو) وارد پروانـه شـده و بـا چرخش پروانه، شتاب، سرعت وتا حدودی فشار آن افزایش می‌یابد، به‌نحوی که در قـسمت لبـه تیغه‌ها (Vanes Tip) سرعت آن به حد اکثر خود رسیده و بعد از خروج از پروانـه، وارد پوسـته شده و به‌تدریج سرعت آن کاهش و فشار آن افـزایش مـی‌یابـد. هرچنـد کـه رانـدمان پمپهـای گریزازمرکز از پمپهای جابجائی مثبت کمترمی‌باشد ولی پائین بودن قیمت اولیه آن عیب فوق را می‌پوشاند. در بعضی از پمپهای جابجائی مثبت (به‌ویـژه پمپهـای تنـاوبی) مـایع خروجـی از پمـپ دارای ضربان (Pulse)است، ولی مایع خروجی از پمپهای گریـز ازمرکـز دارای جریـان پیوسـته و یکنواخت بوده وفاقد ضربان می‌باشد.



شکل (۲-۱): تغییرات سرعت مطلق مایع در پوسته پمپ

در طی ۸۰ سال گذشته دامنه بهره‌برداری از پمپهای گریزازمرکز چه از نظر فشار و چه از لحـاظ دبی قابل دسترس، گسترش وسیعی پیـدا نمـوده‌اسـت. بزرگتـرین پمـپ گریزازمرکـز بـا دبـی ٤١٧٦٠٠ متر مکعب در ساعت با ارتفاع ۳۸۷ متر و توان مصرفی ٤١٠ مگاوات در Bath County آمریکا در حال بهره‌برداری می‌باشد. در یک ایستگاه فضایی واقع در سیاتل آمریکـا از یـک پمـپ گریزازمرکز با دبـی ٣٤٠٠ مترمکعـب در سـاعت بـا ارتفـاع ۵۶۷۰۰ متـر جهـت تـأمین سـوخت مورداستفاده قرار می‌گیرد. این پمپ با سرعت دورانی ۳۷۰۰۰ دور در دقیقـه و تـوان مـصرفی ۵۲ مگاوات در حال بهره‌برداری‌است. هرچند که دامنه بـه‌کـارگیری پمپهـای گریـز از مرکـز در زمینه ظرفیت بـسیار وسـیع مـی‌باشـد ولـی نامحـدود نیـست.دریـک جمـع بنـدی کلـی پمپهـای

گریزازمرکز برای دبی زیاد وارتفاع کم تازیاد وپمپهای جابجائی مثبت برای دبی کم وارتفاع (فشار) زیاد مناسب می‌باشند .

۳-۱ دبی (ظرفیت) Capacity or Flow Rate

بنا بر تعریف مقدار حجمی‌از مایع که در واحد زمان توسط پمپها جابجا می‌شود را دبی یا ظرفیت پمپ می‌نامند. دبی پمپ که عموماً با Q نشان داده می‌شود، دارای واحدهای مختلفی بوده که عمده ترین آنها عبارت‌است از متر مکعب در ساعت (m^3/hr)، متر مکعب در ثانیه (m^3/s)، لیتر در ثانیه (l/s) و گالن دردقیقه (GPM). در جدول (۱-۱) تبدیل واحدهای ظرفیت به یکدیگر ارائه شده‌است.

در جدول(۲-۱) دسته بندی انواع پمپ‌ها و در شکل (۳-۱) محدوده به‌کارگیری آنها نشان داده شده‌است.

	متر مکعب در ساعت	لیتر در ثانیه	گالن در دقیقه
مترمکعب درساعت	۱	۰/۲۷۷۸	٤/٤۰۳۳
لیتر درثانیه	۳۱۶	۱	۰/۰۶۳۱
گالن در دقیقه	۰/۲۲۷۱	۱۵/۸۲	۱

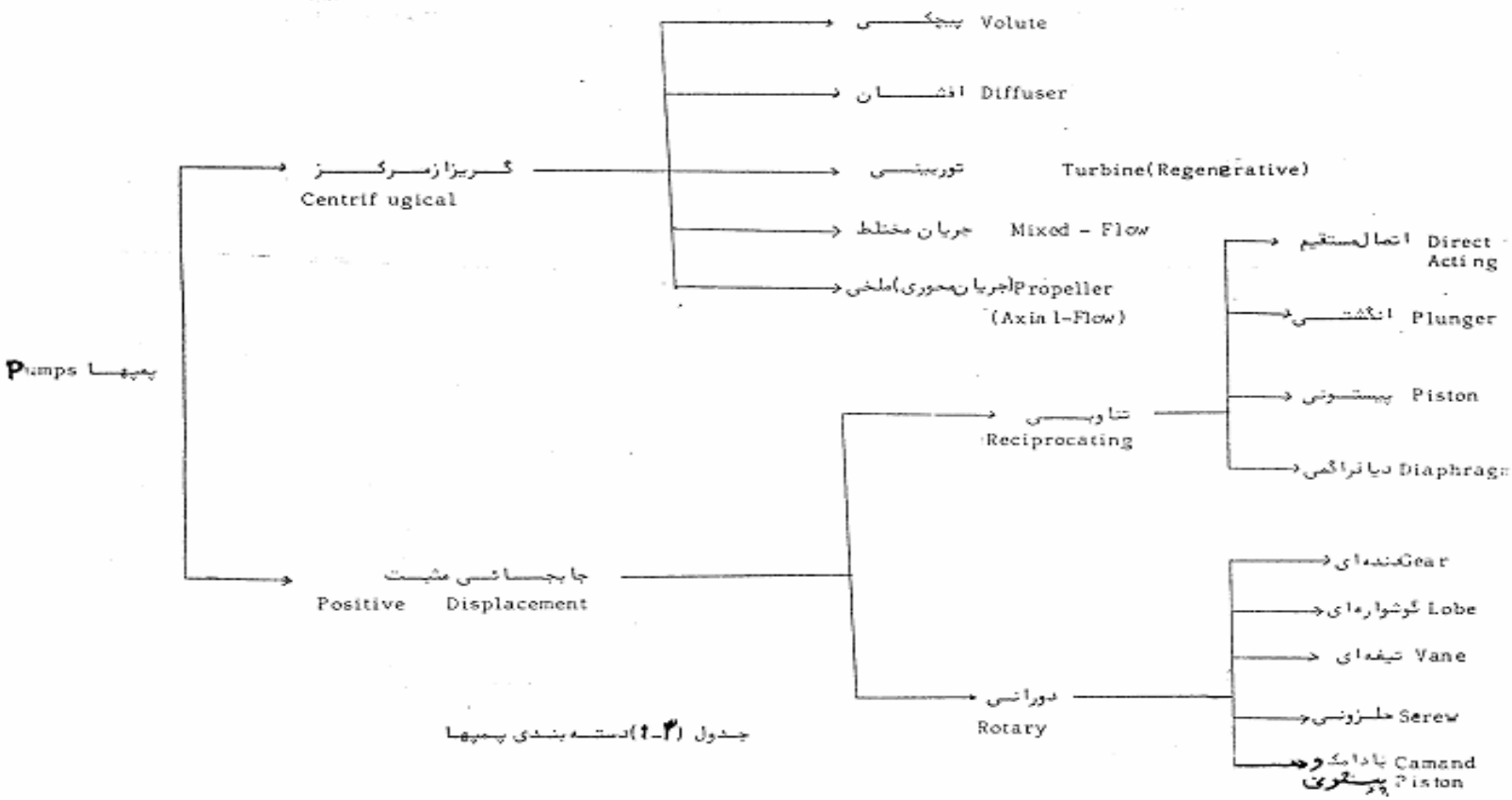
جدول (۱-۱): تبدیل واحدهای مختلف ظرفیت پمپها

۴-۱: ارتفاع (Head)

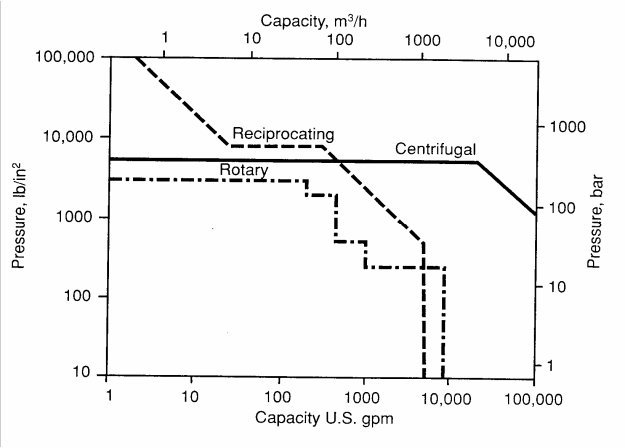
سازندگان پمپهای گریز ازمرکز همواره علاقمندند که منحنی مشخصه پمپها را طوری تهیه و در اختیار خریداران قرار دهند که به خواص فیزیکی مایع مورد پمپاژ (به‌ویژه وزن مخصوص) بستگی نداشته باشد. برای این منظور بجای‌استفاده از فشار، از اصطلاحی به نام ارتفاع (Head)استفاده می‌شود.

در پمپهای گریز ازمرکز، در صورت ثابت بودن قطر و سرعت دورانی پروانه، مقدار انرژی که به واحدوزن مایع داده می‌شود، مقداری ثابت بوده و مستقل از وزن مخصوص آن می‌باشد. به همین خاطر، در بیان عملکرد پمپهای گریز ازمرکز، منحنی مشخصه آن به‌صورت منحنیH-Q (دبی - ارتفاع) ارائه می‌گردد. فرض می‌شود که ستونی از آب سرد (با وزن مخصوص واحد) ساخته شود. برای اعمال یک بار فشار، ستون فوق باید حدود ۱۰/۲ متر ارتفاع داشته باشد. بدیهی‌است که اگر وزن مخصوص مایع از آب بیشتر باشد، ارتفاع فوق کاهش می‌یابد(و برعکس). برای تبدیل فشار به ارتفاع برای مایعی با وزن مخصوص SG می توان از رابطه(۱-۱) استفاده کرد.

$$\text{H (متر)} = \frac{10.2P \text{ (بار)}}{SG} \qquad (۱-۱)$$



جدول (۳-۱) دسته بندی پمپها



شکل (۳-۱): محدوده به‌کارگیری انواع پمپها.

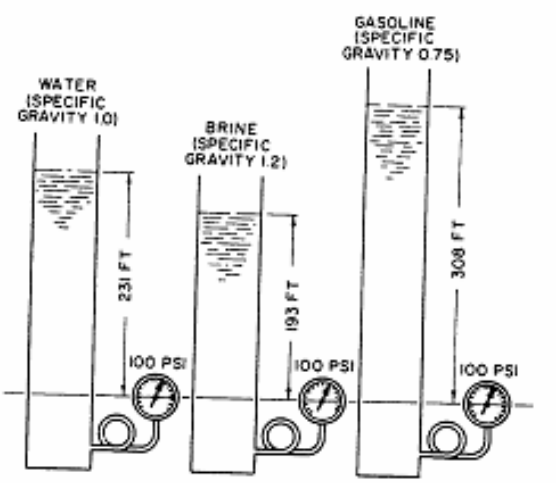
لازم به ذکراست که منحنی مشخصه پمپهای گریزازمرکز (منحنی H-Q) عموماً برای آب تهیه می‌شود. هرچند که منحنی فوق به وزن مخصوص مایع مربوط نمی‌باشد ولی با توجه به تأثیر ویسکوزیته برروی عملکرد دینامیکی پمپهای گریزازمرکز منحنی مشخصه ارائه شده برا ی مایعاتی با ویسکوزیته بیشتر از ویسکوزیته آب صادق نبوده و فقط در نقطه Q=0 (Shut Off Point)که سیستم حالت‌استاتیکی دارد ارتفاع قابل دسترس برای مایعات مختلف یکسان می‌باشد، ولی در سایر مقادیر دبی، به‌لحاظ عملکرد دینامیکی پمپ، منحنی مشخصه آن با منحنی مشخصه پمپ در حالت انتقال آب مغایرت داشته ودر این صورت کارآئی پمپ کاهش یافته که به‌طور مفصل در بخش‌های بعدی مورد اشاره قرار خواهد گرفت.

با توجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت:

۱- منحنی مشخصه H-Q هر پمپ گریز از مرکز با قطر و سرعت دورانی ثابت، برای تمامی‌مایعات مستقل از وزن مخصوص آن می‌باشد.

۲-در صورت مغایرت ویسکوزیته مایع مورد پمپاژ با ویسکوزیته آب، منحنی مشخصه پمپ دارای شکل نزولی خواهد بود (در $Q \neq 0$، به ازاءِ دبی ثابت، پمپ برای مایعات با ویسکوزیته بیشتر، ارتفاع کمتری را اعمال می‌کند).

فرض می‌شود که پمپی باید فشاری برابر با ۶/۹ بار(۱۰۰psi) را در قسمت دهش اعمال نماید. اگر سیال مورد پمپاژ آب باشد، ارتفاع خروجی پمپ معادل ۷۰/٤ متر (۲۶۱ فوت) بوده، در صورتی که برای ایجاد فشار فوق توسط آب نمک با وزن مخصوص ۱/۲، ارتفاع ستون به ۵۸/۸ متر (۱۹۳ فوت) کاهش می‌یابد. در عوض همین فشار با ستونی به ارتفاع ۹۶ متر (۳۰۸ فوت) توسط نفت سفید (با وزن مخصوص ۰/۷۵) ایجاد می‌شود. در شکل (٤-۱) تأثیر وزن مخصوص مایع برروی ارتفاع جهت دست یابی به فشار معین برای آب، آب نمک و نفت سفید نشان داده شده‌است.



شکل (٤-١): تأثیر وزن مخصوص برروی ارتفاع‌استاتیکی جهت دست یابی به فشار معین.

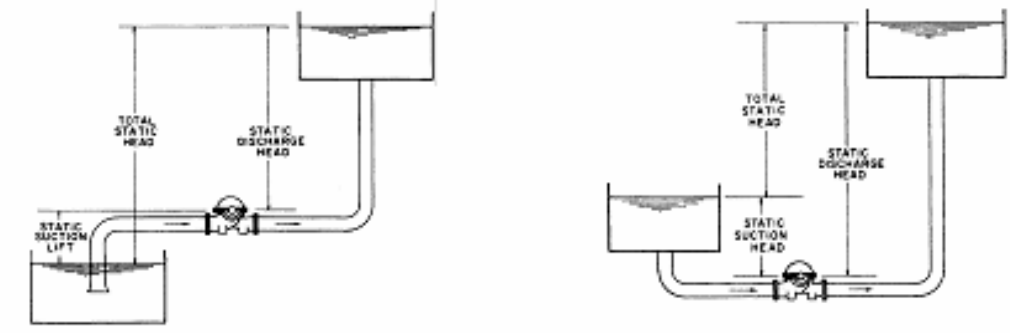
۵-۱:ارتفاع سیستمSystem Head

ارتفاع کلی هر سیستم شامل اجزاءِ زیر می‌باشد:

۱- ارتفاع‌استاتیکی ۲- ارتفاع ناشی از اختلاف فشار بین منبع مکش و دهش ۳- ارتفاع اصطکاکی ٤- از دست رفت ارتفاع ناشی از ورود و خروج مایع به درون لوله ۵- ارتفاع سرعتی

۱-۵-۱:ارتفاع‌استاتیکی Static Head

ارتفاع‌استاتیکی، همان اختلاف ارتفاع سطح مایع دردومنبع مکش ودهش سیستم پمپاژ می‌باشد (شکل ۵-۱).



شکل (۵-۱): ارتفاع‌استاتیکی

ارتفاع‌استاتیکی خود از دو بخش تشکیل می‌گردد، ارتفاع‌استاتیکی دهش و ارتفاع‌استاتیکی مکش. در چنین حالتی، دهانه مکش پمپ به‌عنوان خط مرجع (Reference Line) در نظر گرفته می‌شود. اگرسطح مایع در منبع مکش پائین تر از پمپ قرار داشته باشد، اصطلاحاً Lift نامیده و اگر بالاتر از پمپ قرار گرفته باشد، اصطلاحاً آن را Head می‌نامند. ارتفاع‌استاتیکی برابراست با:

$$H_{st} = H_{sd} \pm H_{ss} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

H_{st} = ارتفاع‌استاتیکی کل

H_{sd} = ارتفاع‌استاتیکی دهش

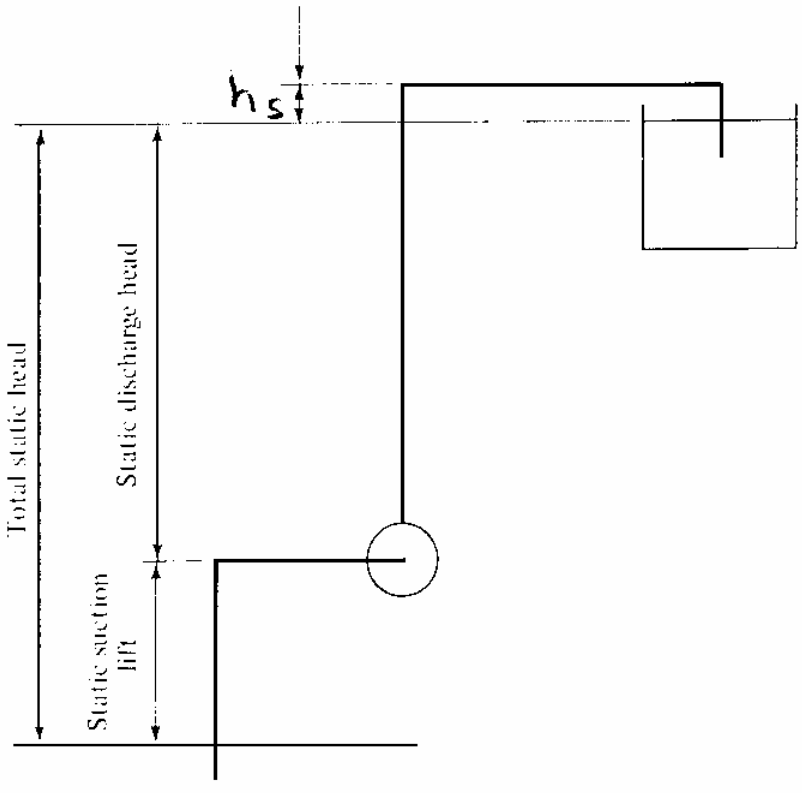
ارتفاع‌استاتیکی مکش = H_{ss}

در حالت Lift علامت بین دو بخش مثبت و در حالت Head منفی در نظر گرفته می‌شود.

گاهی اوقات سیستم انتقال مایع به‌صورت شکل (۶-۱) می‌باشد. در مورد نحوه تأثیر گذاری h_s برروی ارتفاع‌استاتیکی سیستم دو نظریه مختلف وجود دارد. برخی اعتقاد دارند که برای انتقال مایع به منبع، ارتفاع h_s نیز باید منظور گردد ولی از آنجائی که ارتفاع فوق در اثر پدیده سیفون (Siphon) قابل بازیابی می‌باشد ارتفاع فوق نباید در محاسبه‌استاتیکی کل منظور گردد.

اما بنظر می‌رسد که تصمیم گیری نهائی در این زمینه به شرایط سیستم انتقال مایع بستگی خواهد داشت. اگر ارتفاع‌استاتیکی سیستم و تأثیر آن برروی عملکرد پمپ حالت تعیین کننده ای داشته باشد، با توجه به اینکه به هرحال در زمان راه اندازی، پمپ باید قادر باشدکه مایع را به منبع برساند، h_s باید در محاسبه ارتفاع‌استاتیکی منظور شود. هرچند که این امر باعث می‌شود تا بعد از راه اندازی پمپ، ارتفاع‌استاتیکی واقعی سیستم در اثر بازیابی انرژی در اثر پدیده سیفون کاهش یافته و همین امر موجب افزایش دبی در سیستم انتقال مایع می‌گردد.

در سایر موارد که پمپ قابلیت لازم را در زمان راه اندازی جهت تأمین ارتفاع h_s دارا می‌باشد، بهتراست که مقدار آن را در محاسبه ارتفاع‌استاتیکی منظور نکرده و بدیهی‌است که دبی پمپ در هنگام شروع بهره‌برداری از مقدار مورد انتظار کمتر بوده ولی در مدت کوتاهی به‌لحاظ بازیابی انرژی داده شده به مایع، به حالت عادی بر می‌گردد.



شکل (٦-١): پدیده سیفون در انتقال مایعات

۲-۵-۱:ارتفاع ناشی از اختلاف فشار بین منبع مکش و دهش

اگر فشار در منبع مکش پمپ P_s و در منبع دهش پمپ P_d باشد، ارتفاع ناشی از اختلاف فشار در دو منبع مکش ودهش (H_p) بر اساس رابطه (۳-۱) برابراست با:

$$H_p = \frac{10.2(P_d \pm P_s)}{SG} \qquad (۱-۳)$$

از آنجائی که ارتفاع‌استاتیکی و ارتفاع ناشی از اختلاف فشار بین دو منبع مکش و دهش هردو مستقل از دبی جریان می‌باشند، لذا می‌توان جمع آن دو را ارتفاع‌استاتیکی کل منظور کرد. در این صورت ارتفاع‌استاتیکی کل برابراست با:

$$H_{st} = (H_{sd} \pm H_{ss}) + \frac{10.2(P_d \pm P_s)}{SG} \qquad (۱-٤)$$

۳-۵-۱:ارتفاع اصطکاکی Friction Head

ارتفاع اصطکاکی، مقدار انرژی لازم برای غلبه بر اصطکاک موجود در لوله و اتصالات (شیر، زانوئی، سه راهی و...) می‌باشد که با علامت H_d نشان داده می‌شود. مقدار H_d به عوامل متعددی نظیر دبی، قطر لوله، جنس لوله، طول لوله، تعداد اتصالات، نوع اتصالات،ویسکوزیته مایع، وزن مخصوص مایع و... بستگی دارد. رابطه H_d با دبی سیستم به‌صورت زیرمی‌باشد:

$$H_d = KQ^n \qquad (۱-۵)$$

که در آن K مقداری ثابت بوده و به عوامل ذکر شده در بالا (بجزدبی) بستگی دارد. Nتابعی ازرژیم جریان مایع در سیستم بوده که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

جریان آشفته n=۱/۸۵-۲ جریان آرام=n

۴-۵-۱:از دست رفت ناشی از ورود و خروج مایع

بجز در موارد خاص، اغلب پمپها، مایع مورد پمپاژ را از یک منبع ذخیره دریافت می‌کنند. در محل ورود مایع به‌درون لوله مکش، همواره مقداری از دست رفت انرژی وجود داشته که آن را از دست رفت ناشی از ورود مایع به لوله (Entrance Loss) می‌نامند و مقدار آن به طراحی دهانه ورودی مایع به‌درون لوله بستگی داشته و با اصلاح آن (نظیر شکل زنگوله ای) می‌توان آن را کاهش داد.

به همین ترتیب در قسمت خروجی مایع از لوله دهش، مقداری از انرژی مایع به هدر رفته که آن را از دست رفت خروجی (Exit Loss) می‌نامند. در قسمت خروجی، مایع دارای سرعتی مانندV بوده وارتفاع معادل با آن $(\frac{V^2}{2g})$ به هدر خواهد رفت. در بعضی از مراجع ترجیح می‌دهند که از دست رفت‌های ورودی وخروجی را جزءِ از دست رفت ناشی ازاصطکاک منظورنمایند. البته بهتراست که جهت تعیین نقش آنها در از دست رفت انرژی در سیستم هریک

را به‌طور جداگانه محاسبه و در ارتفاع کل سیستم منظور نمود. در بعضی از طرحها سعی می‌شود که بااستفاده از تبدیل مخروطی طولانی، سرعت را به‌مقدار زیادی کاهش داده و از این طریق بخش اعظمی‌از انرژی را قبل از به هدر رفتن باز یابی کرد.

۵-۵-۱:ارتفاع سرعتی Velocity Head

ارتفاع سرعتی، بیانگر انرژی جنبشی مایع مورد پمپاژ بوده که برحسب ژول بر کیلوگرم (یا متر) بیان می‌شود. اگر مایعی با سرعت V به‌سمت بالاپرتاب شود، تا ارتفاعی مانند H_V بالا خواهد رفت، رابطه H_V با V به‌صورت زیر می‌باشد:

$$H_V = \frac{V^2}{2g} \qquad (۱-۶)$$

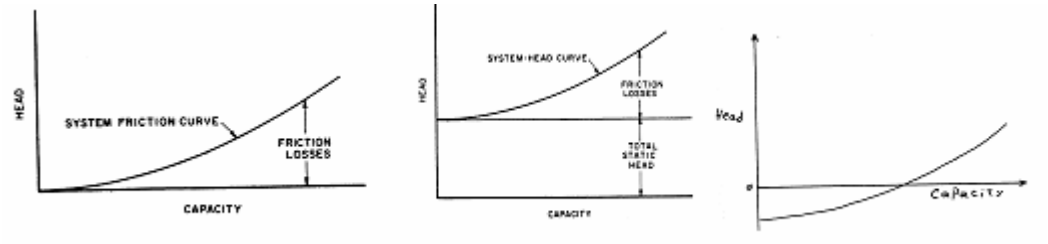
ارتفاع مایع در هر نقطه از لوله برابراست با ارتفاع سرعتی بعلاوه ارتفاع فشاری. لازم به ذکراست که فشار سنجها فقط فشار اضافی مایع را نشان داده، در صورتی که انرژی واقعی مایع جمع انرژی‌های پتانسیل (فشار) و جنبشی (سرعت) آن می‌باشد.در پمپهای با ارتفاع زیاد، ارتفاع سرعتی ناچیز بوده ولی در پمپهای با ارتفاع کم نمی‌توان از ارتفاع سرعتی صرف نظر کرد.

۶-۱:منحنی مشخصه سیستم System Characteristic Curve

منحنی مشخصه سیستم، تغییرات ارتفاع کلی سیستم را بر حسب دبی جریان مایع نشان می‌دهد. ارتفاع کلی در سیستم برابراست با جمع جبری ارتفاع‌استاتیکی کل و ارتفاع دینامیکی (رابطه ۷-۱)

$$H_t = H_d \pm H_{st} \qquad (۱-۷)$$

اگر ارتفاع‌استاتیکی در طی بهره‌برداری در اثر تغییرات سطح مایع یا فشار در قسمت‌های مکش ودهش پمپ تغییر کند، مقدار H_{st} را باید در دو دامنه حداقل و حداکثر آن در نظر گرفته و منحنی مشخصه سیستم را برای دو مقدار فوق رسم نمود تا دامنه دبی سیستم در دو حالت فوق مشخص گردد. منحنی مشخصه سیستم بر حسب H_{st} می‌تواند به شکل‌های زیر باشد (شکل۷-۱).



$a: H_{st} = 0$ $b: H_{st} \rangle 0$ $c: H_{st} \langle 0$

شکل (۶-۱): منحنی مشخصه سیستم در انواع سیستم‌های انتقال مایعات.

محل تلاقی منحنی مشخصه سیستم با منحنی مشخصه پمپ را نقطه کار **(Operating or Duty Point)** می‌نامند (شکل۸-۱). اکثر مشکلات سیستم‌های پمپاژ به قسمت مکش پمپ مربوط می‌باشد، به همین خاطر در انتخاب و نصب پمپ باید دقت شود تا شرایط

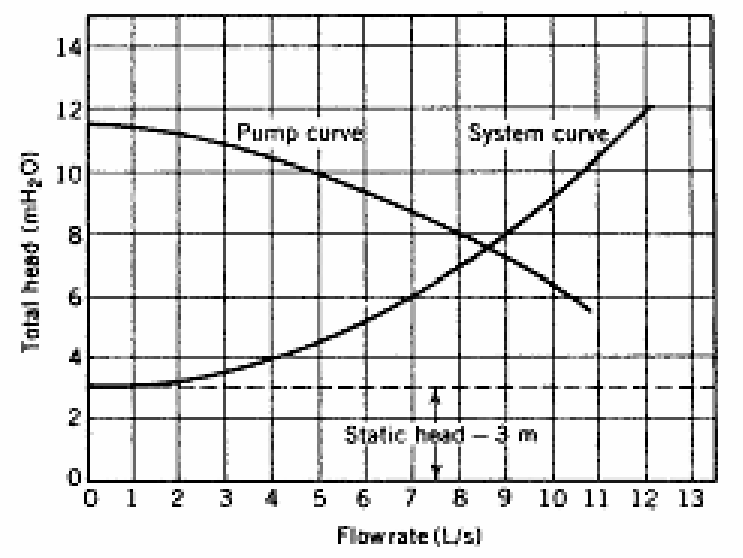
قسمت مکش پمپ به‌نحوی باشد که هیچگاه فشارمایع در این قسمت از فشار بخار آن در دمای انتقال کمتر نشود، چرا که در غیر این صورت پمپ دچار پدیده کاویتاسیون خواهد شد که به‌طورکامل دربخش هشتم موردبررسی وتجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۱-۷: منحنی مشخصه پمپها Pumps Characteristic Curve

منحنی مشخصه پمپها معرف ویژگیهای پمپ از نظر تغییرات فشار (ارتفاع)، توان مصرفی، راندمان و NPSHR بر حسب دبی جریان می‌باشد. مجموعه اطلاعات فوق باید از سوی شرکتهای سازنده پمپ در اختیار خریداران قرار داده شود. برای پمپهای دورانی و گریزازمرکز، منحنی دبی - ارتفاع (فشار) و برای پمپهای تناوبی منحنی دبی- زمان از اهمیت خاصی برخوردار بوده که دراین بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند و اطلاعات مربوط به توان، راندمان و NPSHR در قسمتهای بعدی ارائه خواهد شد.

۱-۸: منحنی مشخصه پمپهای گریزازمرکز

برخلاف پمپهای جابجائی مثبت، پمپهای گریز از مرکز اگر با سرعت ثابتی کار کنند، نمی‌توانند دبی ثابتی را در سیستم بر قرار کنند و مقدار آن می‌تواند ازصفرتا مقدار معینی که به اندازه، طراحی و شرایط پمپ بستگی دارد، تغییر کند. ارتفاع کلی قابل دسترس، توان مصرفی وراندمان نیز بادبی پمپ تغییر می‌کند.



شکل (۸-۱): نقطه کار در سیستم‌های پمپاژ.

البته غالباً منحنی‌های فوق برای پروانه‌های با قطر مختلف ودر مواردی برای سرعتهای مختلف پمپ از سوی شرکت سازنده پمپ تهیه می‌شود. در شکل (۹-۱) نمونه ای از منحنی مشخصه یک پمپ گریزازمرکز نشان داده شده‌است. بعضی از شرکتها جهت سهولت در انتخاب یک پمپ، منحنی مشخصه دسته ای از پمپهای هم خانواده را در یک مجموعه گردآوری ودراختیار مشتریان قرار می‌دهند. مجموعه فوق می‌تواند در انتخاب پمپ مناسب در کمترین مدت ممکن

مورداستفاده قرار گیرد. بعداز انتخاب پمپ مورد نظر، اطلاعات تکمیلی را می‌توان از منحنی مشخصه پمپ‌استخراج کرد.

در شکل‌های (۱۰-۱) و (۱۱-۱) نمونه‌هایی از دامنه کاربرد پمپهای Etanorm ساخت شرکت KSB آلمان که محصولات مشابه آن توسط شرکت پمپیران ساخته می‌شود برای سرعت‌های ۱۴۵۰و ۲۹۰۰ دوردردقیقه ارائه گردیده‌است. لازم به ذکراست که اغلب این منحنی‌ها برای دبی صفر تا دبی مجاز تهیه می‌شوند .

این امر به خریداران پمپ کمک می‌کند تا از به‌کارگیری پمپ در دبی زیاد که می‌تواند باعث وارد شدن بار اضافی بر الکتروموتور گردد، خودداری کنند.

۹-۱: دسته بندی منحنی مشخصه پمپهای گریزازمرکز:

منحنی مشخصه پمپهای گریزازمرکز (منحنی دبی - ارتفاع) را می‌توان به‌صورت زیر دسته بندی کرد:

الف: منحنی‌های صعودی (Rising).

درپمپهای بامنحنی صعودی باافزایش ارتفاع سیستم،دبی پمپ به‌طورپیوسته کاهش می‌یابد (شکل ۱۲a-۱).

ب: منحنی‌های نزولی (Drooping)

در پمپهای با منحنی مشخصه نزولی، ارتفاع قابل دسترس در نقطه Q=0 حداکثر ارتفاع نبوده و گاهی اوقات آن را منحنی Looping می‌نامند (شکلb ۱۲-۱).

ج: منحنی‌های تیز (Steep).

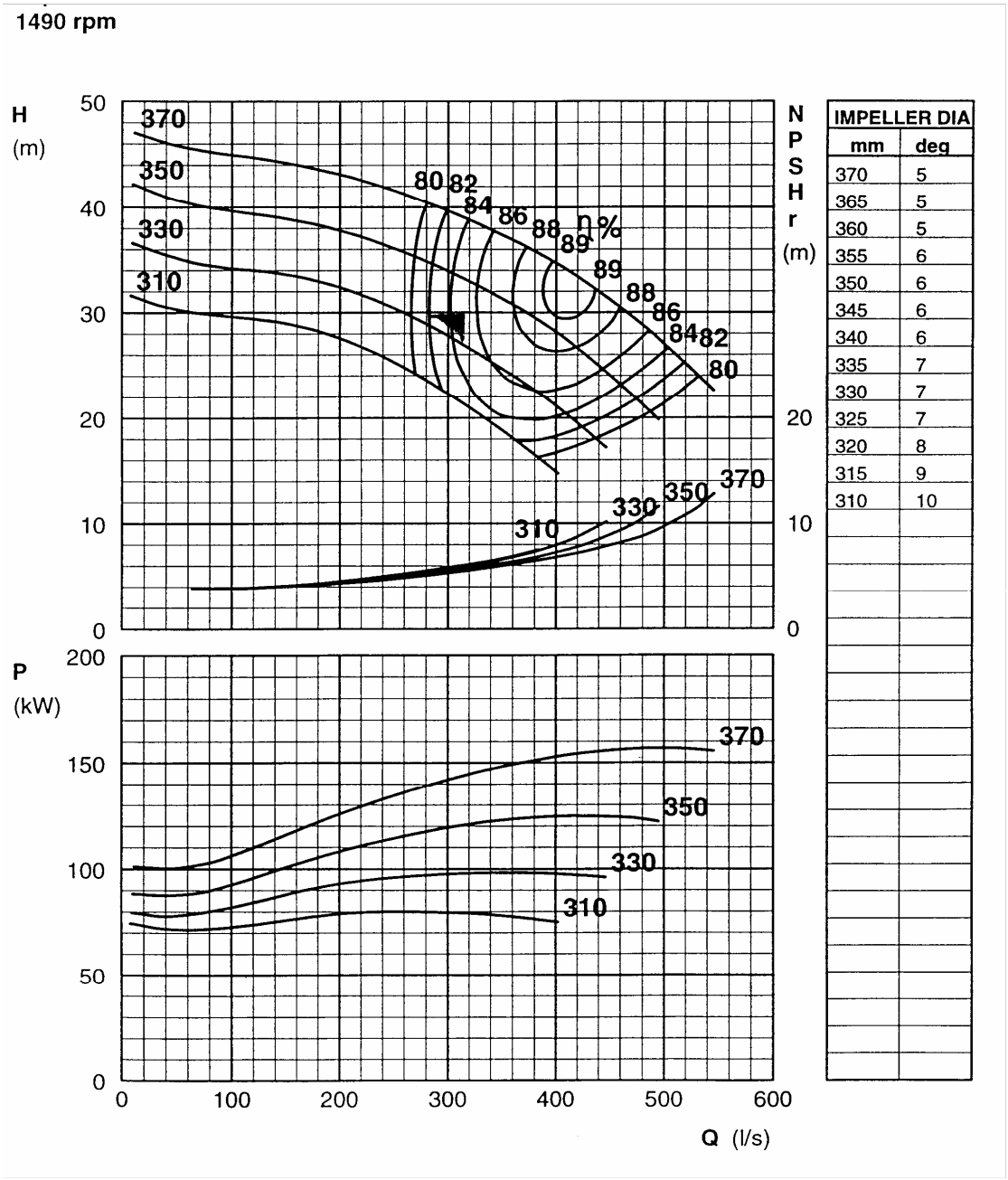
منحنی‌های تیز نوعی منحنی صعودی بوده که تغییرات ارتفاع بین نقطه کار و شرایطی که شیر خروجی کاملاً بسته باشد(Q=0)بسیار زیاداست. البته این امر می‌تواند فقط در یک دامنه خاصی از منحنی مشخصه پمپ مثلاً بین دبی برابر ۱۰۰ درصد تا ۵۰ درصد دبی طراحی وجود داشته باشد (شکلc۱۲-۱).

د: منحنی‌های تخت(Flat).

در این پمپها تغییرات ارتفاع در یک دامنه وسیعی از دبی بسیار ناچیز می‌باشد. این نوع منحنی‌ها می‌توانند نزولی و یا صعودی باشند. در تمامی‌منحنی‌های نزولی همواره در قسمتی از آن، ارتفاع قابل دسترس تقریباً ثابت بوده و به همین خاطر آن را تخت می‌نامند. (شکلd۱۲-۱)

هـ: منحنی‌های پایدار (Stable)

در پمپهای با منحنی مشخصه پایدار همواره به ازاءِ ارتفاع معین، می‌توان یک ظرفیت برای پمپ قائل شد.

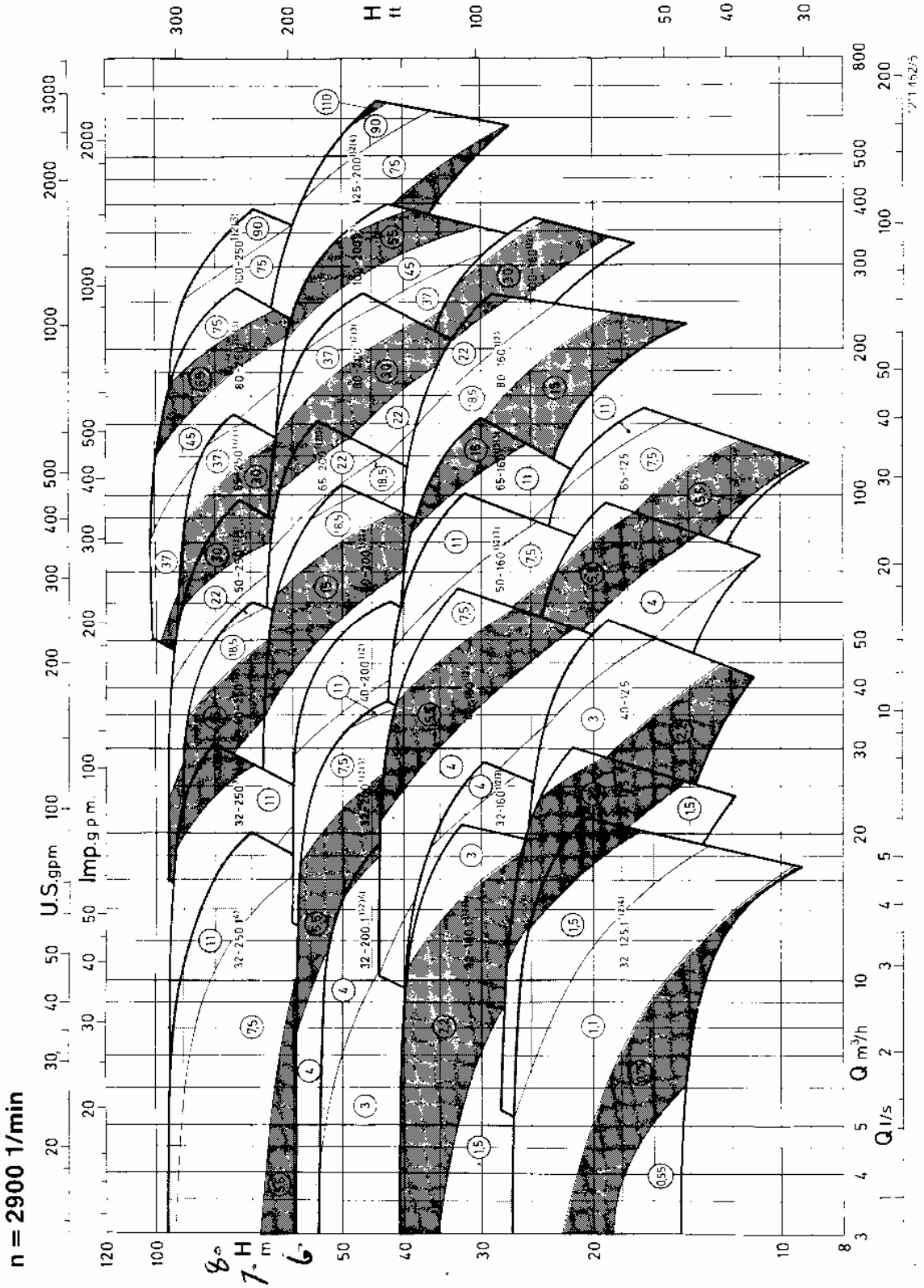


شکل (۹-۱): منحنی مشخصه یک پمپ گریزازمرکز با پروانه دو مکش (Double Suction)

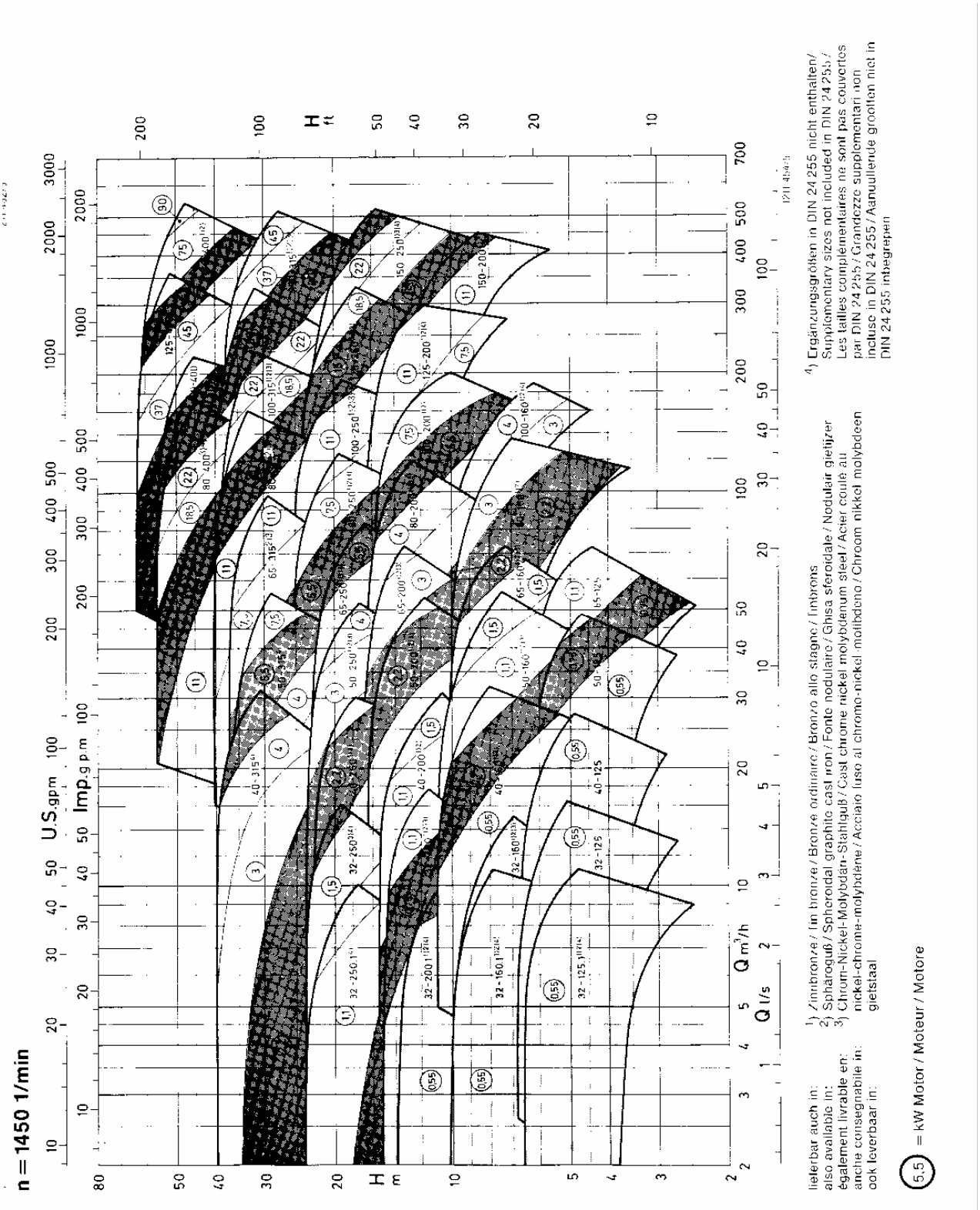
به‌عبارت دیگر اگر خطی با ارتفاع ثابت (موازی محور طولها) رسم شود، منحنی مشخصه پمپ را فقط در یک نقطه قطع می‌کند. اساساًاین منحنی‌ها از نوع صعودی می‌باشند (شکلهای ۱۲a-۱و۱۲c-۱).

و: منحنی‌های ناپایدار (Unstable)

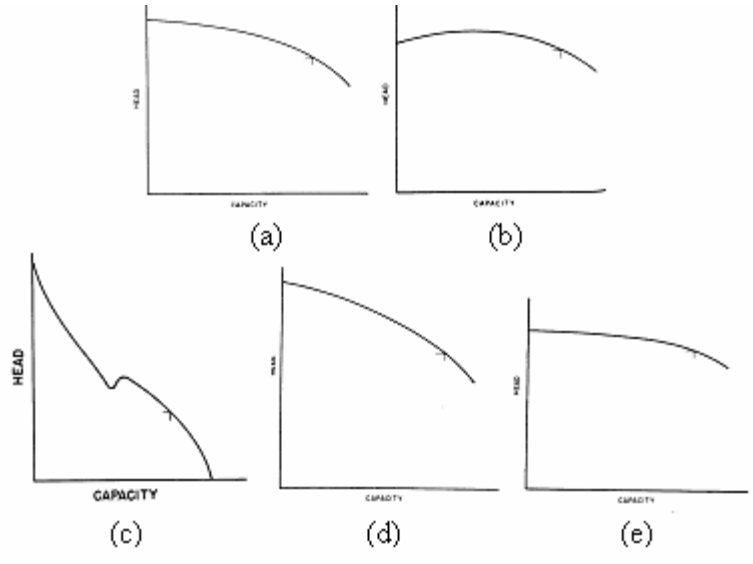
در بعضی از پمپها ممکن‌است به ازاءِ ارتفاع معین، پمپ در بیش از یک دبی کار کند، یابه‌عبارت دیگر اگرخطی به موازات محور طولها رسم شود، منحنی مشخصه پمپ رادر بیش از یک نقطه قطع می‌نماید (شکلهای ۱۲b-۱ و ۱۲e-۱). البته ناپایدار بودن منحنی فقط در یک دامنه معینی از ارتفاع صادق بوده، لذا باید دقت شود که از این پمپها فقط در منطقه پایداراستفاده شود.



شکل (۱۰-۱): نمودار کلی پمپهای مدل Etanorm در سرعت ۲۹۰۰ دوردردقیقه



شکل (۱۱-۱): نمودار کلی پمپهای مدل Etanorm در سرعت ۱۴۵۰ دوردردقیقه



شکل (۱۲-۱): انواع منحنی‌های مشخصه پمپهای گریزازمرکز

۱۰-۱: دسته بندی منحنی‌های توان مصرفی

اگر منحنی توان مصرفی به‌صورتی باشد که در دبی‌های کم شکل صعودی داشته و بعد از رسیدن به نقطه با حد اکثر راندمان (BEP) مجدداً شکل نزولی را بخود بگیرد (شکل ۱۳-۱) اصطلاحاً آن را غیر بار اضافی (No Noverloading) می‌نامند. در حالی که اگر منحنی توان مصرفی با افزایش دبی به‌طور پیوسته شکل صعودی داشته باشد، منحنی با وضعیت بار اضافی (overloading) نامیده می‌شود (شکل ۱٤-۱).

تغییرات توان مصرفی با دبی به سرعت مخصوص پمپ بستگی دارد.(در مورد سرعت مخصوص به بخش پنجم مراجعه شود)در انتخاب پمپ، نوع غیر بار اضافی به‌علت آنکه در هر شرایطی، توان مصرفی آن از یک حداکثر معینی تجاوز نمی‌کند ارجحیت داشته و لذا مشکلی در زمینه توان مصرفی و بار وارده برای الکتروموتور انتخاب شده وجود ندارد.

۱۱-۱: توان مصرفی:

برای محاسبه توان مصرفی در پمپ می‌توان جدا از منحنی P-Q ارائه شده از سوی شرکت سازنده پمپ، از رابطه (۸-۱)استفاده کرد. (۸-۱)

$$P = \frac{SG.Q.H_t}{368\eta}$$

که در آن:

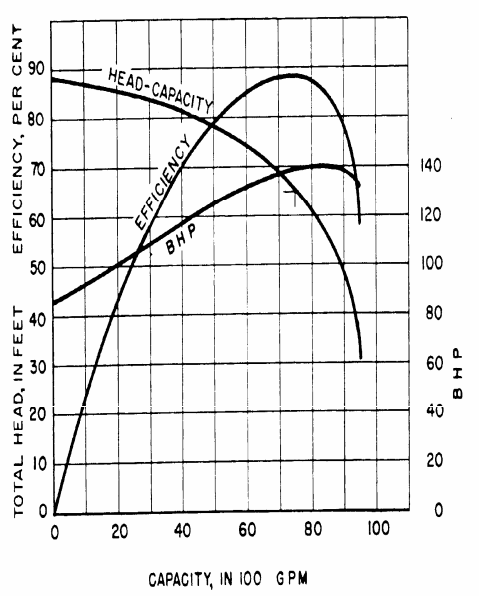
P = توان مصرفی کیلو وات

Q= دبی متر مکعب درساعت

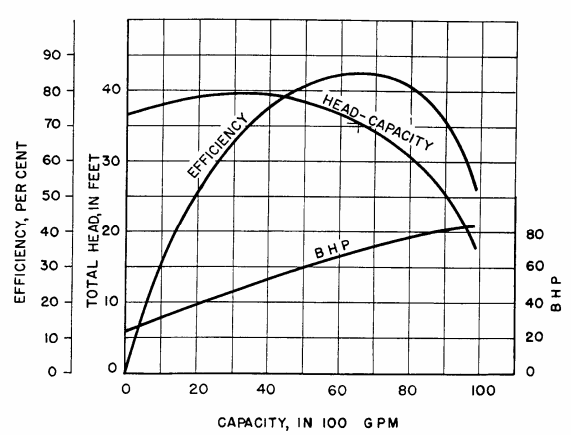
H_t = ارتفاع کل متر

η = راندمان اعشاری

SG= وزن مخصوص



شکل (۱۳-۱): منحنی مشخصه پمپ گریزازمرکز با توان کم در Q=0



شکل (۱٤-۱): منحنی مشخصه پمپ گریزازمرکز باتوان زیاد در Q=0

لازم به ذکراست که توان به‌دست آمده از رابطه فوق، تـوان ترمـزی (Brake Power) بـوده و برای انتخاب الکتروموتور لازم‌است که اولاً قدرت الکتروموتور برمبنای حداکثر توان مـصرفی در دامنه دبی مجاز تعیین گردیده، ضمناً ضرایب اطمینان زیر برای انتخاب نهائی آن منظور شود.

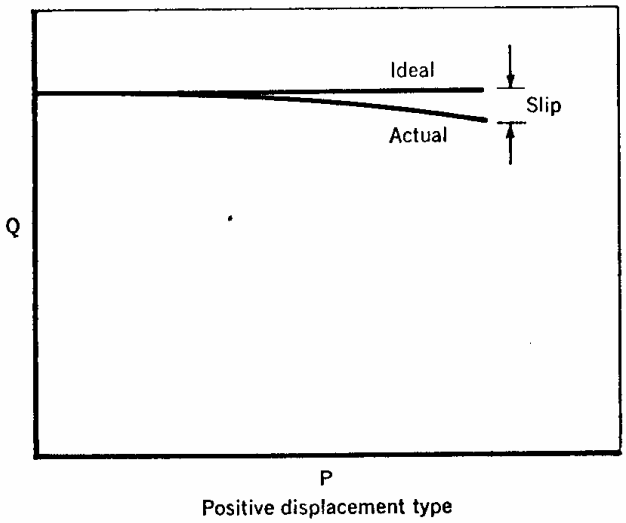
٪۲۰	کیلو وات	۰-۷/۵
٪۱۵	کیلو وات	۷/۵-٤۰
٪۱۰	کیلو وات	> ٤۰

۱۲-۱: منحنی مشخصه پمپ‌های جابجائی مثبت

به‌لحاظ ویژگیهای ساختاری، این پمپها آب بند دینامیکی بوده به‌نحـوی کـه قـسمت دهـش آن از قسمت مکش تقریباً جدا شده‌است، به همین خاطر از نظر تئوریک دبی آنها با حجـم جـارو شـده (Swept Volume) قطعات پمپاژ کننده تقریباً یکسان می‌باشد.دبی این پمپها بـه سـرعت دورانـی وحجم هرواحدپمپاژکننده (مثلاً حجم هر سیلندر در هر کورس) بستگی دارد و بـه همـین خـاطر آنها را می‌توان پمپهای با ظرفیت تقریباً ثابت (Fixed Volume) دانست که دبـی آن بـه ابعـاد و سرعت پمپ بستگی داشته و مستقل از فشار دهش می‌باشد. ولی در عمل به‌علـت وجـود نـشتی داخلی، ظرفیت واقعی آن از ظرفیت تئوریک کمتر خواهد بود. در شکل (۱۵-۱)، منحنی مشخصه پمپهای جابجائی مثبت از نظر تئوریک و واقعی و نشتی داخلی در آن نشان داده شده‌است.

اختلاف ظرفیت تئوریک و واقعی پمپهای جابجـائی مثبـت را نـشتی(Leakage) ویـا لغـزش(Slip) می‌نامند.

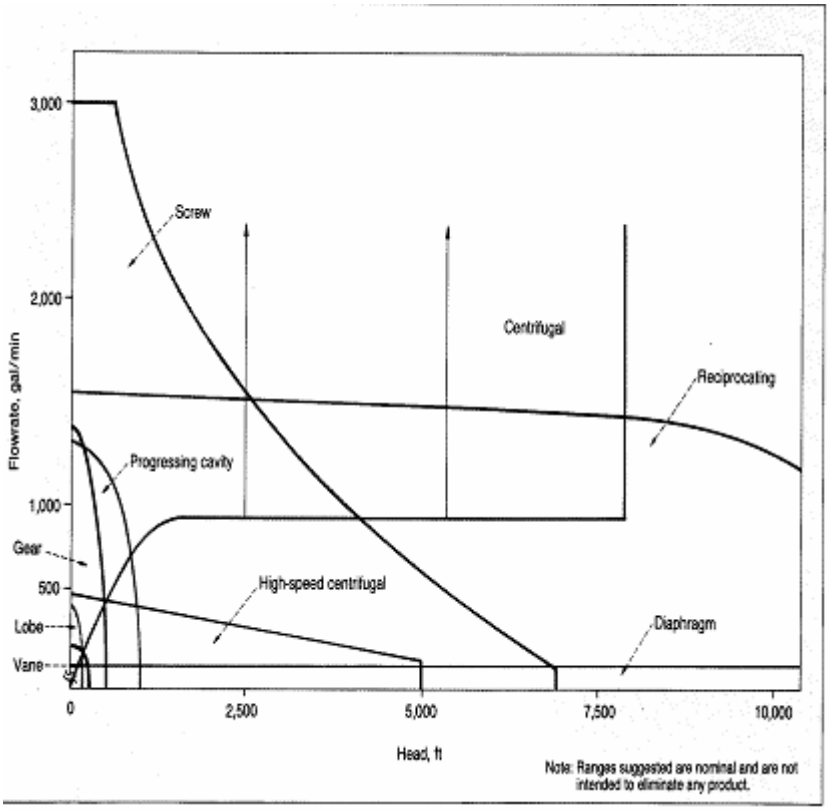
راندمان حجمی‌این پمپها (نسبت ظرفیت واقعی به تئوریک) می‌تواند بین ۵۰ تا ۹۸ درصد باشد. پمپهائی که خوب طراحی شده باشند غالباً با راندمان حجمی۸۵تا ۹۵ درصد کارمی‌کنند. علاوه بر کیفیت طراحی پمپ (لقی بین قطعات پمپاژ کننده)، عوامل دیگری نظیر اختلاف فشار قسمت‌های دهش و مکش پمپ، ویسکوزیته مایع، سرعت دورانی پمپ نیز می‌توانند برروی راندمان حجمی‌آن اثر به‌گذارد، به‌نحوی که با افزایش فشار، راندمان حجمی‌پمپ کاهش یافته، در عوض با افزایش ویسکوزیته مایع و سرعت دورانی پمپ میزان نشتی کاهش (راندمان حجمی‌افزایش) می‌یابد.



شکل (۱۵-۱): منحنی مشخصه پمپهای جابجائی مثبت

پمپهای فوق از نظر هیدورولیکی نیز مشکل چندانی در مقابل بالا بردن فشار نداشته و اگر از نظر مقاومت مکانیکی خوب طراحی شده باشند، دارای سقف محدود کننده اعمال فشار نخواهند بود. درصورتی که پمپهای گریزازمرکز اگر با سرعت دورانی و پروانه معینی مورد بهره‌برداری قرار گیرند،حداکثر فشار (ارتفاع) قابل دسترس آن محدود می‌باشد. علت این تفاوت اساسی بین پمپهای جابجائی مثبت و گریز ازمرکز را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد. *اعمال انرژی جهت افزایش فشار (ارتفاع) در پمپهای گریزازمرکز نخست از طریق افزایش انرژی جنبشی مایع مورد پمپاژ صورت پذیرفته و آنگاه در پوسته پمپ بخش اعظمی‌از انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود. از آنجائی که انرژی جنبشی داده شده به مایع تابعی از سرعت دورانی و قطر پروانه پمپ می‌باشد، لذا در یک پمپ گریزازمرکز بامشخصه‌های ثابت، حداکثر ارتفاع (فشار) قابل دسترس محدود می‌باشد. حال آنکه در پمپهای جابجائی مثبت، افزایش فشار از طریق کاهش حجمی‌از مایع به تله افتاده در بین فضای تراکم صورت می‌گیرد و تا زمانی که پمپ بتواند بر مقاومت موجود در مقابل خود غلبه نماید، افزایش فشار ادامه می‌یابد.*

پمپهای جابجائی مثبت خود به دو دسته تقسیم می‌شوند. پمپهای دورانی و پمپهای تناوبی (رفت و برگشتی). دامنه مجازاستفاده از انواع پمپها که قبلاً در شکل (۳-۱) ارائه گردید به‌طور کاملتر در شکل (۱۶-۱) نشان داده شده‌است.



شکل (۱۶-۱): دامنه کاربرد انواع پمپها

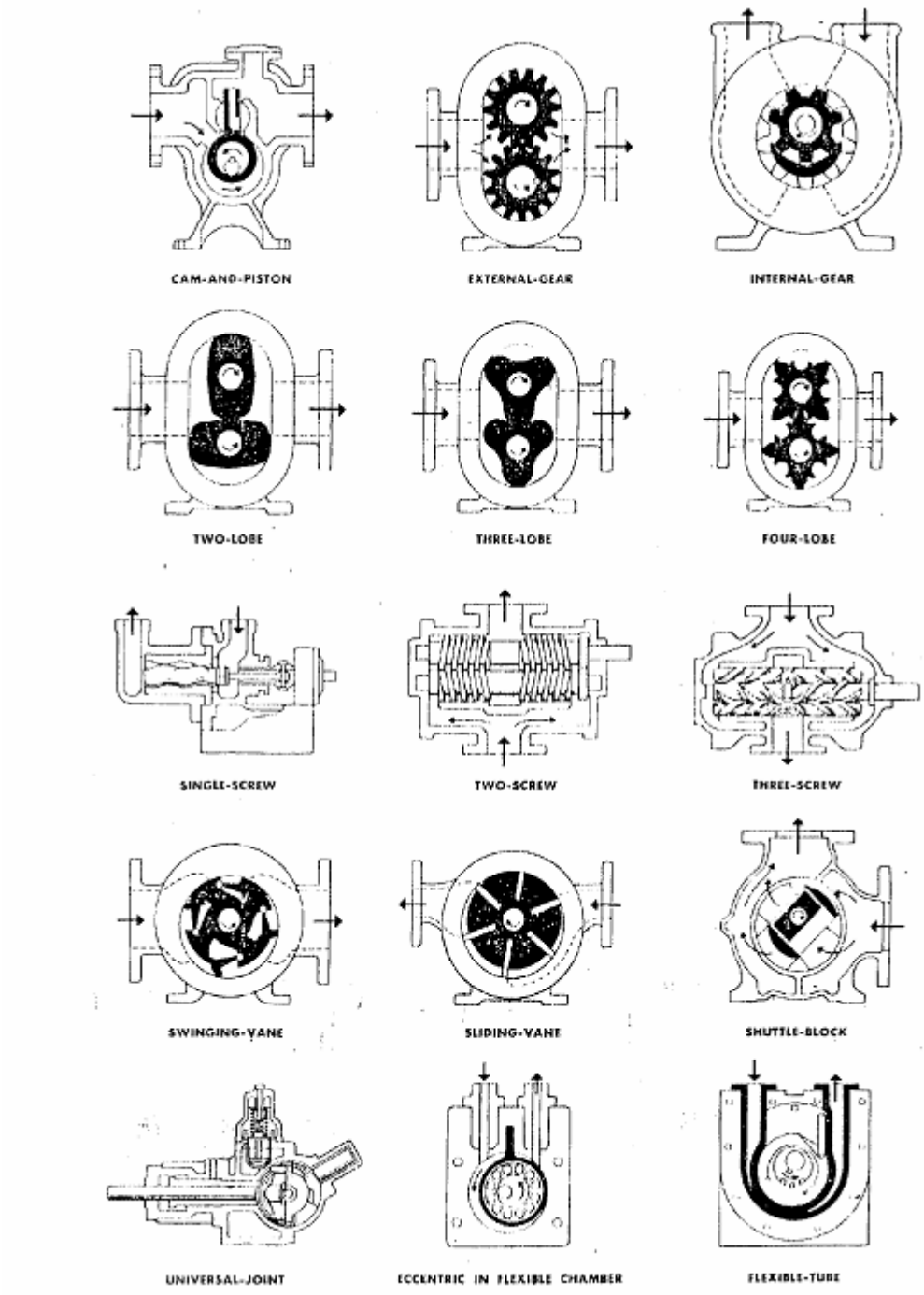
منحنی مشخصه پمپهای دورانی و تناوبی دارای مغایرتهائی بوده و به همین خاطر دراین بخش به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۱۲-۱: منحنی مشخصه پمپهای دورانی

پمپهای دورانی را می‌توان به ۵ دسته اصلی تقسیم کرد:

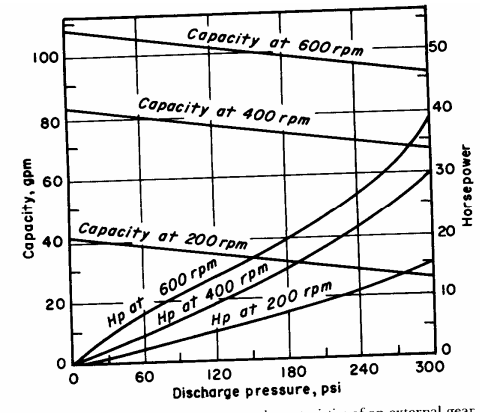
دنده ای (Gear Pump)، مارپیچ(Screw Pump)،گوشواره ای(Lobe Type)، تیغه ای (Vane Pump) وروتورهای مارپیچی خروج ازمرکز(Eccentric Helical Rotor) تقسیم کرد. درشکل(۱۷-۱) انواع پمپهای فوق نشان داده شده اند.

با وجود تفاوتهای چشمگیری که در ساختار مکانیکی پمپهای فوق وجود دارد، منحنی مشخصه آنها تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد. ازنظر تئوریک منحنی فوق باید خطی مستقیم و موازی محور طولها باشد، ولی با توجه به افزایش نشتی داخلی با افزایش فشار، منحنی فوق در عمل خطی مستقیم با شیب منفی (نزولی) می‌باشد (شکل ۱۵-۱) .



شکل (۱۷-۱): انواع پمپهای دورانی.

در شکل (۱۸-۱)، منحنی مشخصه یک پمپ دنده ای در سرعتهای مختلف نشان داده شده‌است. همانطوری که قبلاً گفته شد، عملکرد این پمپها به ویسکوزیته مایع مورد پمپاژ نیز وابسته می‌باشد. با افزایش ویسکوزیته مایع، نشتی داخلی پمپ کاهش یافته و به همین خاطر دبی آن افزایش می‌یابد، درعوض با وجود افزایش راندمان هیدرولیکی دراثر کاهش نشتی، به‌لحاظ افزایش اصطکاک داخلی، راندمان کلی و توان مصرفی آن افزایش می‌یابد (شکل ۱۹-۱).



شکل (۱۸-۱): منحنی مشخصه یک پمپ دنده ای.

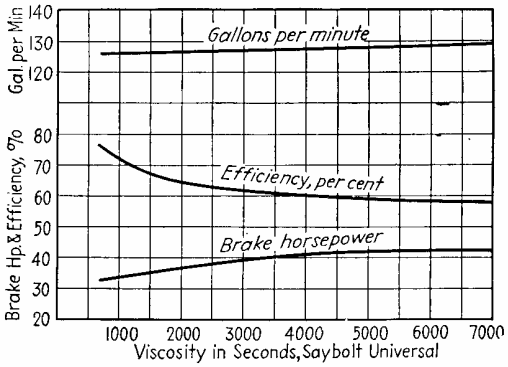


FIG. 217.—Characteristic curves for a screw pump handling fuel oil.

شکل (۱۹-۱): تأثیر ویسکوزیته مایع بر منحنی مشخصه پمپهای دورانی

۲-۱۲-۱: منحنی مشخصه پمپهای تناوبی

پمپهای تناوبی شامل پمپهای پیستونی، انگشتی (Plunger) و دیا فراگرامی‌می‌باشد. به‌علت شرایط خاص طراحی و عملکردآنها، مایع خروجی از این پمپها دارای ضربان (Pulsation) خواهد بود. به همین خاطر منحنی مشخصه آنها دارای شکلی تناوبی (سینوسی) می‌باشد. اگر از یک سمت قطعه متحرک (مثلاً پیستون) برای جابجائی مایع‌استفاده شود پمپ را یک طرفه (Single Acting) می‌نامند، در صورتی که اگراز دو طرف قطعه متحرک برای پمپاژ مایع‌استفاده شود، پمپ دو طرفه (Double Acting) نامیده می‌شود.

در شکل (۱-۲۰ a) منحنی مشخصه یک پمپ یک پیستونی یک مرحله‌ای، در شکل (۱-۲۰b) منحنی مشخصه دو پمپ تناوبی یک طرفه و دوطرفه و در شکل (۱-۲۰c) منحنی مشخصه سه دسته از پمپهای تناوبی یک طرفه با تعداد پیستونهای مختلف نشان داده شده‌است.

بررسی اطلاعات موجود در عملکرد پمپهای تناوبی نشان می‌دهد که اگر دبی متوسط یک پمپ تناوبی ۱۰۰ واحد (مثلاً ۱۰۰ لیتر در دقیقه) در نظر گرفته شود هریک از پمپها برحسب نوع طراحی دارای یک حداقل و یک حداکثر دبی لحظه ای می‌باشند که مقادیر مربوطه در جدول (۱-۲) نشان داده شده‌است.

در شکل (۱-۲۰c)، شیب منحنی، همان شتاب جریان مایع از پمپ می‌باشد. اگر شتاب مایع در پمپ (a) و جرم آن m و سطح مقطع لوله دهش A باشد، در این صورت ضربان فشار(P_p) برابراست با:

$$P_p = \frac{m.a}{A} \qquad (۱-۹)$$

رابطه (۱-۹) نشان می‌دهد که با کاهش شتاب مایع می‌توان ضربان فشار را کاهش داد. این امر از طریق کاهش شیب منحنی مشخصه پمپ یا به‌عبارت ساده تر با افزایش تعداد سیلندرها امکان پذیراست. تأثیر نظریه فوق را می‌توان در جدول (۱-۲) مشاهده کرد.

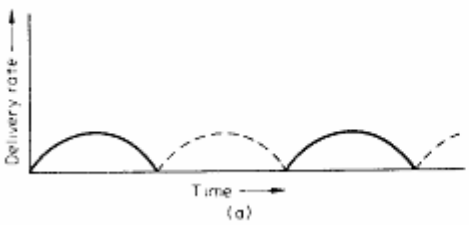
از سوی دیگر مقایسه میزان ضربان پمپهای ۳، ٤، ٥ و۶ پیستونی، مغایر نظریه فوق می‌باشد. در حالی که پمپ سه پیستونی ۲۳ درصد نوسان دبی را از خود نشان می‌دهد، پمپ با ٤ پیستون دارای ۳۲/٥ درصد نوسان می‌باشد. به‌عبارت ساده تر هرچند که در یک جمع بندی کلی، افزایش تعداد سیلندرها موجب کاهش ضربان می‌گردد، ولی فرد بودن تعداد سیلندرها در مقایسه با زوج بودن آنها دارای مزیتی در جهت کاهش ضربان خواهد بود.

نوع پمپ	حداقل دبی لحظه ای	حداکثر دبی لحظه ای	اختلاف حداقل و حداکثردبی لحظه ای
دوپیستونی- یک طرفه	۰	۱۶۰	۱۶۰
دوپیستونی- دوطرفه	۷۸/ ٥	۱۲٤/۱	٤٥/۶
٤پیستونی- یک طرفه	۷۸/٥	۱۱۱	۳۲/٥
۳پیستونی- یک طرفه	۸۳/۱	۱۰۶/۱	۲۳
۶پیستونی- یک طرفه	۹۰/۲	۱۰٤/۸	۱٤
٥ پیستونی- یک طرفه	۹٤/۸	۱۰۱/۸	۷

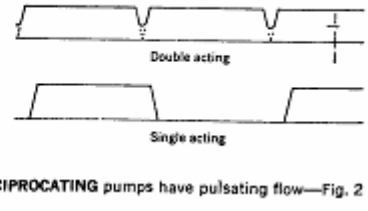
جدول (۲-۱): تأثیر طراحی پمپهای تناوبی بر نوسان دبی (ضربان)

روشهای دیگری نظیراستفاده از منبع ذخیره(Accumulator)، فیلترآکوستیک(Acoustic Filter) نیز می‌تواند در کاهش میزان ضربان مؤثر باشند. مخزن ذخیره حاوی مایع مورد پمپاژومقداری گاز (درتماس مستقیم و یا غیر مستقیم با مایع) است. انتخاب ابعاد صحیح و موقعیت نصب مناسب آن بسیارمهم بوده وبی توجهی به آن نه تنها مشکل ضربان را حل نخواهد کرد، بلکه می‌تواند مشکلات موجود در سیستم را افزایش دهد. درشکل (۲۱-۱) انواع روشهای کاهش ضربان به‌کمک مخزن ذخیره نشان داده شده‌است. انتخاب صحیح منبع ذخیره همراه با نصب مناسب آن، ضمن کاهش ضربان می‌تواند در جلوگیری از پدیده کاویتاسیون (Cavitation)، ضربه قوچ (Water hammer) و کاهش موج فشار (Pressure Surge) مؤثر واقع شود. مثلاً هرچه منبع به پمپ نزدیکتر باشد، تأثیر آن برکاهش ضربان بیشتر خواهد بود.

فیلترآکوستیک ازدومخزن که توسط لوله‌های کوچکی به یکدیگر متصل شده اند ساخته می‌شود(شکل ۲۲-۱).



(a)



RECIPROCATING pumps have pulsating flow—Fig. 2

(b)

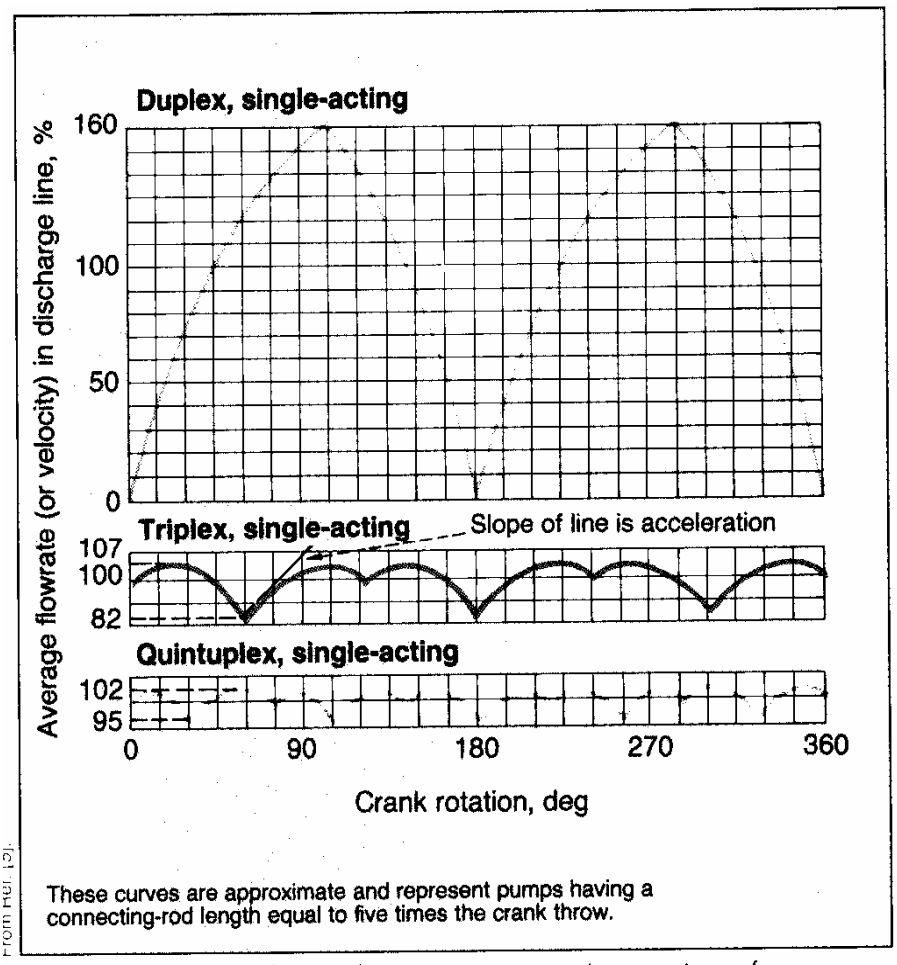


Figure 9 — For reciprocating pumps, a greater number of cylinders minimizes pressure pulse transmitted to the system

(c)

شکل (۲۱-۱): منحنی مشخصه انواع پمپهای تناوبی

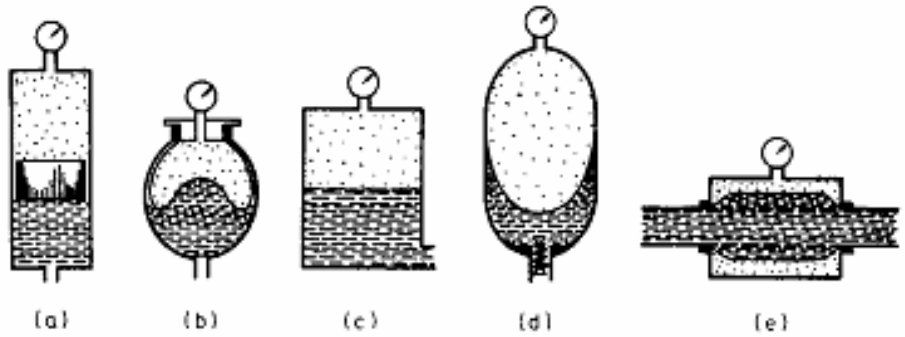
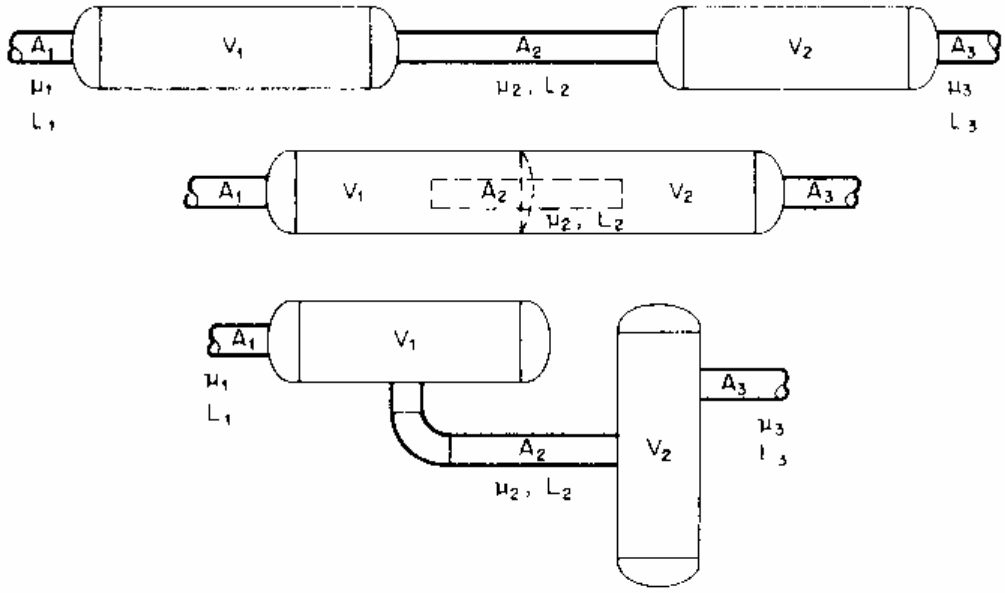


FIG. 6 Types of accumulators: (*a*) piston, (*b*) diaphragm, (*c*) gas-charged, (*d*) bladder, (*e*) in-line.

شکل (۲۲-۱) مخزن ذخیره جهت کاهش ضربان پمپهای تناوبی



$$\mu_j = \frac{A_j}{L_j + 1/2\sqrt{\pi A_j}} \quad \text{for } j = 1, 2, 3$$

$$f = \frac{a}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{2}\left[\frac{\mu_1 + \mu_2}{V_1} + \frac{\mu_2 + \mu_3}{V_2} \pm \sqrt{\left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{V_1} - \frac{\mu_2 + \mu_3}{V_2}\right)^2 + \frac{4\mu_2^2}{V_1 V_2}}\right]}$$

FOR EQUAL VOLUMES, THE RESONANT FREQUENCY IS APPROXIMATELY:

$$f = \frac{a}{\sqrt{2}\,\pi}\sqrt{\frac{L_2}{V_1}}$$

FIG. 5 Two-chamber resonator system with both ends open. V = volume, ft^3 (m^3); f = resonant frequency, Hz; L = choke tube length, ft (m); A = choke tube area, ft^2 (m^2); a = acoustic velocity, ft/s (m/s); μ = acoustic parameter.

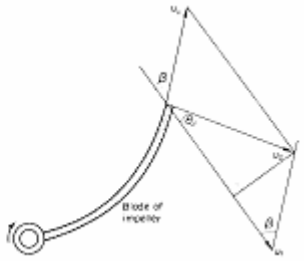
شکل (۲۳-۱): نمونه ای از فیلتر آکوستیک جهت کاهش ضربان پمپ‌های تناوبی

بخش دوم:
تئوری عملکردپمپهای گریز ازمرکز

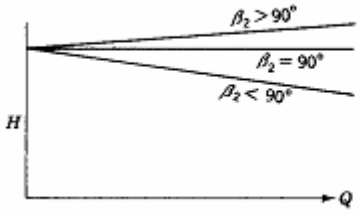
۱-۲: منحنی مشخصه (H-Q) پمپهای گریز ازمرکز در شرایط ایده ال

بررسی تئوری عملکرد پمپهای گریز ازمرکز مبحث پیچیده ای از علم مکانیک سیالات بوده که به‌طور مفصل در کتابها و مقالات مربوطه بدان اشاره شده‌است. لئونارد اولر(Leonard Euler) دانشمند وریاضیدان نامی‌سوئیسی (۱۷۰۷-۱۷۸۳) در تحلیل‌های خود در این زمینه و با فرض اینکه پروانه قطعه ای‌است که از تعداد زیادی تیغه شعاعی با عرض ناچیز و فاصله نزدیک به صفر ساخته شده، ثابت کرد که اگر پروانه ای به شعاع r وعرض b، با سرعت زاویه ای ω(رادیان برثانیه)در پوسته پمپی بچرخد، به‌طوری که زاویه بین لبه تیغه پروانه و خط مماس بر دایره ای که لبه پروانه روی آن دوران می‌کند β_2 باشد(شکل ۱-۲)، در این صورت ارتفاع قابل دسترس توسط پمپ برابراست با:

$$H = \frac{r^2\omega^2}{g} - \frac{Q\omega}{2\pi bg\tan\beta_2} = A - \frac{BQ}{\tan\beta_2} \qquad (۲-۱)$$



شکل (۱-۲): مثلث سرعت در لبه یک تیغه پروانه



شکل(۲-۲): منحنی مشخصه پمپهای گریز از مرکز براساس نظریه اولر

که درآن g شتاب ثقل زمین، A و B مقادیرثابت می‌باشند. برای $\beta_2 \langle 90^\circ$، پروانه را اصطلاحاً روبعقب(Backward) و برای $\beta_2 \rangle 90^\circ$، پروانه را رو به جلو (Forward) می‌نامند. همانطوری که ازرابطه (۱-۲) پیداست، H وQ با هم رابطه خطی داشته وبرحسب مقادیر مختلف β_2 می‌توانند. نزولی، صعودی ویا موازی محور طولها باشد.

درشکل (۲-۲) منحنی مشخصه پمپهای گریز از مرکز براساس نظریه اولر نشان داده شده‌است.

مقدار β_2 برای پمپهای واقعی می‌تواند بین ۱۵ تا ۳۵ درجه تغییر کند ولی غالباً آن‌را بین ۲۰ تا ۲۵ درجه درنظر می‌گیرند. در طراحی پروانه، زاویه ورودی مایع به‌درون پروانه (β_1) نیز غالباً بین ۱۵ تا ۵۰ درجه منظور می‌گردد. انرژی داده شده به مایع با رابطه کلی (۲-۲) نمایش داده می‌شود.

$$WHP = K_1 Q - \frac{K_2 Q^2}{\tan\beta_2} \qquad (۲-۲)$$

که در آن:

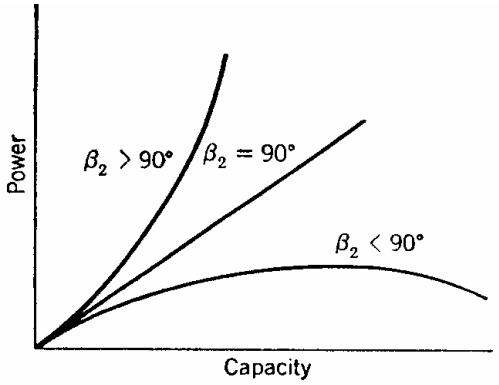
WHP = توان داده شده به مایع اسب بخار

K_1, K_2 = مقادیر ثابت که به طراحی پمپ بستگی دارند

Q = بی پمپ مترمکعب در ساعت

اگر $\beta_2 = 90^\circ$ باشدتغییرات توان داده شده به مایع نسبت به دبی پمپ یک خط مستقیم بوده که ازمرکز مختصات می‌گذرد. برای $\beta_2 \rangle 90^\circ$، منحنی توان مصرفی، سهمی‌شکل و مماس برخط فوق که در قسمت فوقانی آن قرار داشته و برای $\beta_2 \langle 90^\circ$ منحنی توان مصرفی سهمی‌شکل و مماس برخط فوق که درقسمت زیرآن قرارمی‌گیرد شکل (۳-۲).

همانطوری که از رابطه (۱-۲) پیداست، ارتفاع ایجاد شده توسط پمپ گریز ازمرکز مستقل از وزن مخصوص مایع مورد پمپاژ بوده، در صورتی که فشار مایع به وزن مخصوص بستگی دارد. به همین دلیل برای راه اندازی پمپ‌های گریزازمرکز نخست باید آن‌را هواگیری (Priming) کرد. اگر در هنگام راه اندازی پمپ، پوسته آن پر از هوا باشد، فشار دهش پمپ به نسبت وزن مخصوص هوا به آب کاهش یافته و به همین خاطر قادر به غلبه بر مقاومت موجود در قسمت دهش پمپ نبوده و پمپ نمی‌تواند مایعی را جابجا نماید.



شکل (۳-۲): منحنی تغییرات توان داده شده به مایع برحسب زاویه β_2

۲-۲: از دست رفت ارتفاع در پمپ‌های گریزازمرکز

در تحلیل‌هائی که در قسمت قبل برروی عملکرد پمپ‌های گریز ازمرکز انجام شد، پمپ گریز از مرکز یک ماشین ایده ال فرض گردیده و از دست رفت انرژی (ارتفاع) در آن ناچیز در نظر گرفته شد.

ولی درپمپهای واقعی همواره مقداری از انرژی (ارتفاع) در داخل آن به‌شکل‌های مختلف بهدر رفته و موجب می‌شود تا منحنی مشخصه H-Q واقعی پمپ درزیرمنحنی مشخصه تئوریک پمپ گریزازمرکزدرشرایط ایده ال قرار گیرد.

شناخت عوامل مؤثر در از دست رفت ارتفاع در پمپ، ضمن اینکه می‌تواند در شناخت منحنی مشخصه واقعی آن کمک کند، بلکه در زمینه اعمال اصلاحات لازم در طراحی و ساخت پمپ و کاهش از دست رفت ارتفاع و افزایش راندمان آن نیز مفید واقع شود. به‌طوری که امروزه راندمان پمپهای گریزازمرکزبه پیش از ۹۰ درصد نیز رسانیده شده‌است. عمده‌ترین عوامل ازدست رفت ارتفاع در پمپهای گریزازمرکز عبارتند از:

۱-۲-۲: از دست رفت ناشی از اصطکاک Friction Loss

همانطوری که در قسمت (۳-۵-۱) اشاره شد، ازدست رفت ناشی از اصطکاک در اثر عبور مایع از درون مجاری (پوسته پمپ) تابعی از دبی بوده که با رابطه (۵-۱) نشان داده شده‌است.

$$H_f = KQ^n \qquad (۱-۵)$$

که در آن n به نوع جریان بستگی داشته (غالباً n=2 در نظر گرفته می‌شود) و K تابعی از طول مسیر مایع در پمپ، شعاع هیدرولیکی (نسبت سطح مقطع جریان مایع به محیط‌تر شده توسط آن)، سطح مقطع‌های جریان مایع در پمپ و نسبت آنها و ضریب اصطکاک (و عوامل مؤثر برروی آن نظیر زبری سطح، ویسکوزیته مایع و...) بستگی دارد.

۲-۲-۲: ازدست رفت ناشی از جریان گردابی(Turbulence)

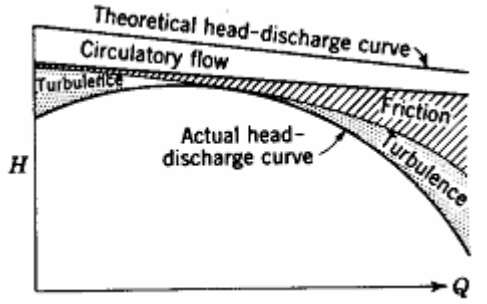
پروانه عبارت‌است از تعدادی تیغه که به‌صورت منحنی در آمده تا جریان مایع در پمپ آرام و به‌دون اغتشاش صورت پذیرد. با افزایش تعداد تیغه‌ها، هدایت جریان مایع در پمپ بنحو مطلوبتری صورت پذیرفته، در صورتی که با کاهش آن، از دست رفت انرژی در اثر جریان گردابی و گردشی(Circulation) در پروانه افزایش می‌یابد. همانطوری که بعداً به آن اشاره خواهد شد، زاویه لبه تیغه پروانه تأثیر بسزائی برروی عملکرد پمپهای گریزازمرکز می‌گذارد.

درهنگام طراحی پروانه و تعیین زاویه‌های ورودی و خروجی تیغه‌های آن، دبی معینی به‌نام *(دبی طراحی)* در نظر گرفته شده وبه‌دنبال آن مشخصه‌های ابعادی پروانه محاسبه ودرساخت آن مورداستفاده قرار می‌گیرد. بدیهی است که اگر دبی واقعی پمپ با دبی طراحی مغایرت داشته باشد، پمپ نمی‌تواند رفتاری مشابه با شرایط طراحی داشته باشد، که عوارض آن به‌صورت مختلف و ازجمله بهم خوردن زاویه بردار سرعت نسبی در قسمت‌های ورودی وخروجی پروانه یا به‌عبارت دیگر بروز پدیده جریان گردابی خود را نشان می‌دهد. همانطوری که در شکل (۲-٤) مشاهده می‌شود میزان جریان گردشی در دو سمت BEP غیر قابل چشم پوشی بوده ولی در BEP به صفر می‌رسد. اساساًهرگونه انحراف در زوایای ورودی و خروجی مایع در پروانه در مقایسه با زوایای β_1, β_2 یا به‌عبارت دیگر تغییر بردار سرعت نسبی مایع به پروانه می‌تواند موجب بروز جریان گردابی شده که اصطلاحاً از دست رفت شوکی (Shock Loss) نیز نامیده می‌شود.

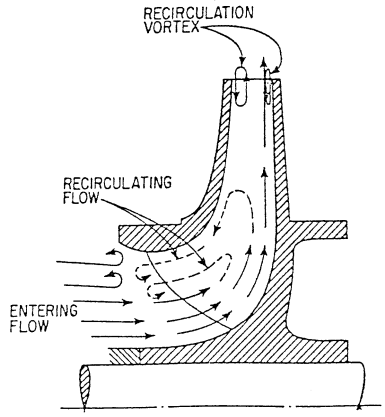
۳-۲-۲: جریان گردشی (Circulatory Flow)

اولر در تحلیل عملکرد پمپهای گریزازمرکز، فرض نمود که تعداد تیغه‌های پروانه بینهایت باشد. اجرای فرضیه فوق در عمل غیر ممکن بوده و تعداد تیغه‌های پروانه بین ۳ تا ۱۰ (عموماً ۵ تا ۷)می‌باشد. کاهش تعداد تیغه‌های پروانه باعث می‌شود تا زاویه واقعی بردار سرعت مایع خروجی از پروانه β_2' نتواند با مقدار فرض شده β_2 یکسان گردد. مغایرت فوق باعث می‌شود

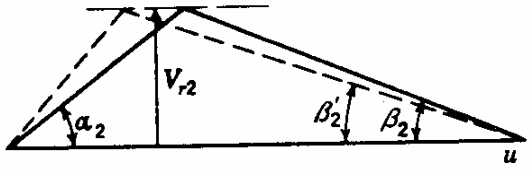
تا مثلث سرعت در لبه خروجی پروانه تغییر کرده (شکل ۵-۲) و مقداری مایع قبل ازخروج ازپروانه مجدداً به قسمت مکش آن برگشت می‌یابد(شکل۶-۲).



شکل (٤-۲): از دست رفت ارتفاع در پمپهای گریزازمرکز



شکل (٦-۲): جریان گردشی در مکش پمپ



شکل (٥-۲): تغییر زاویه بردار سرعت مایع خروجی از پروانه (جریان گردشی)

پدیده فوق می‌تواند باعث کاهش بردار سرعت خروجی از پروانه و نهایتاً کاهش ارتفاع قابل دسترس در پمپهای واقعی در مقایسه با پمپهای ایده ال گردد.

بدیهی‌است در دبی‌های کم به‌علت بالا رفتن اختلاف فشار بین قسمتهای مکش و دهش و وجود لقی بین پروانه و پوسته پمپ، میزان جریان گردشی در مقایسه با مواردی که دبی پمپ بیشتراست، زیادتر می‌باشد.

۳-۲: نقطه بهترین راندمان Best Efficiency Point

همانطوری که در شکل (٤-۲) مشاهده می‌شود، در یک نقطه معینی از دبی بهره‌برداری از پمپ، اختلاف فاصله بین دو منحنی واقعی و ایده ال که همان از دست رفت ارتفاع در پمپ می‌باشد به حداقل خود رسیده یا به‌عبارت دیگر راندمان پمپ در این نقطه به حداکثر مقدارخود می‌رسد. این نقطه را (*نقطه بهترین راندمان*) یا به‌اختصارBEP می‌نامند. بنابر یکی از اصول اساسی علوم مهندسی *(هرماشین هنگامی‌دارای حداکثر راندمان‌است که در شرایط طراحی خود به‌کارگرفته شود). بنابراین BEP را می‌توان همان نقطه طراحی (Design Point)* پمپ *دانست*. هرچند که به‌لحاظ ویژگیهای خاص جریان گردشی و اصطکاک، مقادیر ازدست رفت‌های ارتفاع مربوط به

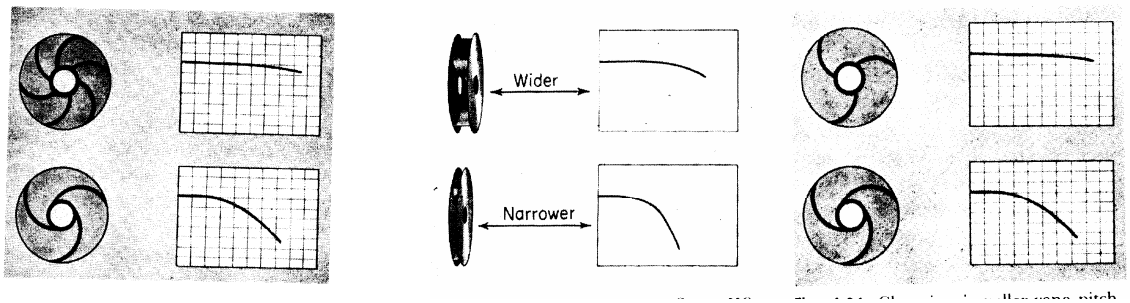
هریک ازعوامل فوق در BEP حداقل نمی‌باشد، ولی به‌لحاظ کاهش شدید از دست رفت ارتفاع ناشی از پدیده جریان گردابی، کل ازدست رفت ارتفاع در پمپ در BEP به حداقل رسیده و به همین خاطر مغایرت ارتفاع تئوریک و واقعی کمترین مقدار خود را نشان می‌دهد.

۴-۲: تأثیر ویژگیهای پروانه برروی شکل ظاهری منحنی مشخصه پمپ

شکل ظاهری منحنی مشخصه پمپ، می‌تواند اطلاعات وسیعی را در زمینه ویژگیهای پمپ و قطعات اصلی آن نظیرپروانه وپوسته دراختیار خریداران قرار دهد. مثلاً تخت یا تیز بودن منحنی مشخصه پمپ می‌تواند ناشی از ویژگیهای خاصی در طراحی پروانه باشد، که عمده‌ترین آنها بشرح زیر می‌باشد:

الف-عرض پروانه:

باافزایش عرض پروانه، دبی پمپ افزایش یافته ومنحنی مشخصه آن تخت‌ترمی‌شود. (شکل۷a-۲)



(a) (b) (c)

شکل (۷-۲): تأثیر ویژگیها ی پروانه برروی منحنی مشخصه پمپ

ب - زاویه خروجی تیغه پروانه:

همانطوری که قبلاً گفته شد، یکی از عوامل مؤثر برروی منحنی مشخصه پمپهای گریزازمرکز زاویه (Pitch)تیغه‌های آن می‌باشد. با تیزشدن تیغه‌ها، منحنی مشخصه پمپ تخت‌تر می‌شود (شکل ۷b-۲).

ج - تعداد تیغه‌ها:

افزایش تعداد تیغه‌های پروانه موجب تخت شدن منحنی مشخصه پمپ می‌گردد. حداقل تعداد تیغه‌های پمپ‌های گریز ازمرکز ۳ عدد بوده و بجز شرایط خاص در اغلب پمپها تعداد تیغه‌ها را بین ۵ تا ۷ عدد در نظر می‌گیرند(شکل ۷c-۲)

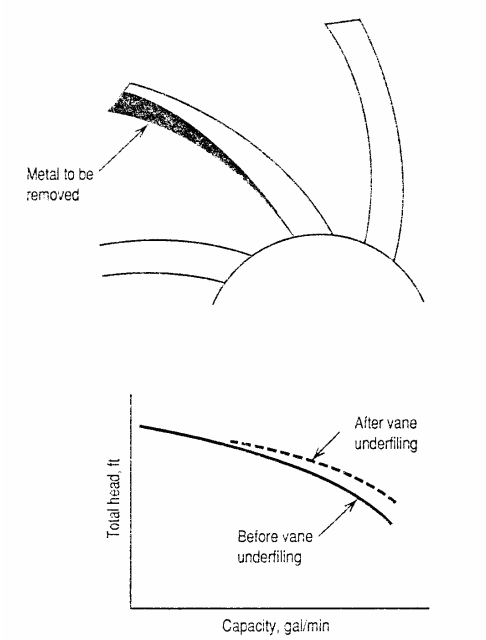
د- تیزکردن لبه تیغه‌ها:

بارگیری ازلبه زیرین تیغه‌های پروانه که(Underfiling) نامیده می‌شود می‌تواند باعث تغییرمنحنی مشخصه پمپ گردد(شکل ۸-۲). برحسب شرایط طراحی پروانه، تغییرات ارتفاع پمپ می‌تواند حتی تا ۱۰ درصد ارتفاع در نقطه BEP و یا نقاط نزدیک به آن صورت پذیرد. لازم به ذکراست که بررسی ویژگیهای پروانه وتأثیرآن برعملکرد ومنحنی‌های مشخصه پمپ‌های

گریزازمرکز به‌کمک پارامتر سرعت مخصوص (Specific Speed) صورت می‌گیرد که در قسمتهای بعد به‌طور مفصل بدان اشاره خواهد شد.

۵-۲: از دست رفت انرژی در پمپ

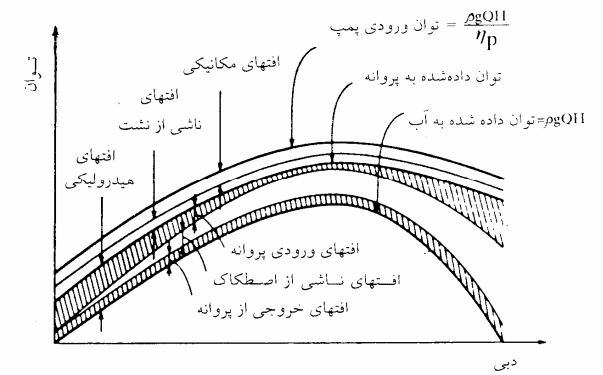
توان داده شده به شافت پمپ را توان‌ترمزی (Brake Horsepower) یا به‌اختصار BHP می‌نامند.



شکل (۸-۲): تأثیر تیزکردن لبه زیرین تیغه‌ها برروی منحنی مشخصه پمپ

البته تمامی انرژی فوق مستقیماً به مایع مورد پمپاژ (Water Horsepower) داده نمی‌شود، بلکه مقداری از آن به‌لحاظ وجود ازدست رفت‌های هیدرولیکی (جریان گردشی، اصطکاک وپدیده شوک) و بخشی نیز در اثر پدیده‌های مکانیکی نظیر نشتی، اصطکاک مکانیکی (یاطاقانها، آب‌بندکننده) و اصطکاک دیسکی (Disk Friction) به هدر می‌رود.

درشکل (۹-۲) از دست رفت انرژی دراثر پدیده‌های فوق در یک پمپ گریزازمرکز نشان داده شده است.



شکل (۹-۲): ازدست رفت انرژی در پمپ

۶-۲: راندمان پمپ

فرض می‌شودکه ازکل دبی پمپ (Q_t)، مقداری ازآن (Q_l) به‌لحاظ وجود لقی بین لبه نافی چشمه پروانه (Impeller Eye Hub) وپوسته پمپ ازقسمت فشار قوی به قسمت فشار ضعیف(چشمه پروانه) برگشت نماید. در این صورت دبی واقعی پمپ (Q_P) برابراست با:

$$Q_p = Q_t - Q_l \qquad (۲-۳)$$

بنا بر تعریف راندمان حجمی‌پمپ برابراست با نسبت دبی واقعی به دبی کل:

$$E_v = \frac{Q_p}{Q_t} = \frac{Q_p}{Q_p + Q_l} \qquad (۲-٤)$$

همانطوری که قبلاً گفته شد به‌لحاظ وجود مغایرت‌هائی بین شرایط بهره‌برداری و شرایط طراحی وحتی به‌صورت دقیقتر مغایرت با پیش فرضهای اولر، ارتفاع واقعی پمپ (h_p) ازارتفاع تئوریک (h_t) آن کمتر بوده که نسبت آنهارا راندمان هیدرولیکی پمپ می‌نامند.

$$E_h = \frac{h_p}{h_t} \qquad (۲-۵)$$

راندمان مکانیکی پمپ برابراست با:

$$E_m = \frac{BHP - FHP}{BHP} \qquad (۲-۶)$$

که در آن FHP از دست رفت انرژی ناشی از اصطکاک در یاطاقانها، سیستم آب‌بندکننده و اصطکاک دیسکی می‌باشد.

راندمان کلی پمپ عبارت‌است از نسبت توان داده شده به مایع مورد پمپاژ (WHP) به توان داده شده به شافت پمپ (BHP) که برابراست با حاصلضرب راندمانهای حجمی، هیدرولیکی و مکانیکی.

$$E_p = \frac{WHP}{BHP} = E_v . E_h . E_m \qquad (۲-۷)$$

بخش سوم:
دسته بندی پمپهای گریزازمرکز

۱-۳: مقدمه

پمپهای گریزازمرکز را می‌توان از دیدگاههای مختلفی دسته بندی کرد که عمده‌ترین آنها عبارت‌است از:

الف: دسته بندی پمپ ازنظر ساختار پوسته یا حلزونی.

وظیفه حلزونی در پمپهای گریزاز مرکز جمع آوری مایع خارج شده از پروانه و تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل (ارتفاع یا فشار) می‌باشد. پوسته‌ها براساس ساختار آنها به‌صورت پیچکی، افشان و یا توربینی تقسیم می‌شوند.

ب: دسته بندی از نظر ساختار پروانه‌ها

با توجه به اهمیت پروانه در عملکرد پمپها و تنوع زیادی که در این زمینه وجود دارد پروانه‌ها را می‌توان از زوایای مختلفی تقسیم بندی کرد که اهم آنها بشرح زیر می‌باشد:

a: نوع جریان مایع در پروانه: جریان شعاعی(Radial Flow)، جریان محوری (Axial Flow) و جریان مختلط (Mixed Flow)

b: نحوه ورود مایع به درون پروانه : یک یا دو مکش (Single or Double Suction)

c: نحوه پوشش تیغه‌های پروانه:پروانه باز(Open)، پروانه نیمه باز(Semi Open) وپروانه بسته (Closed)

ج: دسته بندی از نظر تعداد مراحل:

در پمپهائی که برای دبی محدود و ارتفاع زیادی طراحی می‌شوند، جهت بالا بردن ارتفاع، پمپ به‌صورت چند مرحله‌ای (Multi Stages) ساخته می‌شوند. تعداد مراحل هر پمپ عبارت‌است از تعداد پروانه‌هائی که به‌صورت سری در داخل پوسته نصب شده اند.

د: دسته بندی از نظر طراحی مکانیکی پوسته

پوسته پمپها را می‌توان از نظر شعاعی و یا محوری ۲ تکه ساخت، که در این صورت آن‌را ۲ تکه محوری (Axially Split) و یا دو تکه شعاعی (Radially Split) می‌نامند. دسته بندی دیگر پوسته‌ها براساس محور چرخش آنها صورت می‌گیرد که در این صورت پمپ افقی (Horizental)، عمودی (Vertical) و در مواردی خاصی مورب (Inclined) نامیده می‌شود.

هـ: دسته بندی از نظر مجرای ورود مایع به‌درون پمپ

ورود مایع به‌درون پمپ غالباً از طریق لوله‌های مکش صورت می‌گیرد ولی در بعضی از طرحها به‌ویژه پمپهای عمودی‌ترجیح داده می‌شود که دهانه مکش پمپ درون مایع قرار داده شده باشد. پمپهای عمودی را می‌توان به‌صورت حوضچه خشک (Dry-Pit) و یا حوضچه مرطوب (Wet-Dit) تقسیم کرد.

به‌هرحال آنچه در این قسمت مورد توجه می‌باشد، بیشتر رفتارهیدرولیکی پمپ‌است تا ساختار مکانیکی آن. به همین خاطر پمپهای گریز ازمرکز را می‌توان از نظر رفتار هیدرولیکی که بیشتر به نوع پروانه و پوسته آن بستگی دارد به‌صورت زیر تقسیم بندی نمود:

الف: پیچکی(Volute)

ب: افشان (Diffuser)

ج: توربینی(Turbine) یا احیائی (Regenerative)

د: جریان محوری (Axial Flow) یا ملخی (Propeller)

هـ: جریان مختلط (Mixed Flow)

۲-۳: پمپهای پیچکی Volute Pumps

پمپهای پیچکی متداولترین نوع پمپهای گریزازمرکز می‌باشند. در این پمپ، مایع از طریق چشمه (Eye) و به‌صورت محوری (Axially) وارد پروانه شده و به‌صورت شعاعی (Radially) از پروانه بداخل پوسته (Casing) پمپ رانده می‌شود. پوسته پمپ طوری طراحی می‌گردد که مجرای جریان سیال در آن شکل گشاده شونده داشته باشد. حرکت دورانی پروانه موجب افزایش چشمگیر انرژی جنبشی و افزایش جزئی انرژی پتانسیل (فشار یا ارتفاع) مایع می‌شود. جریان مایع در مجرای گشادشونده پوسته باعث کاهش انرژی جنبشی و نتیجتاً افزایش انرژی پتانسیل (فشار) مایع می‌گردد.

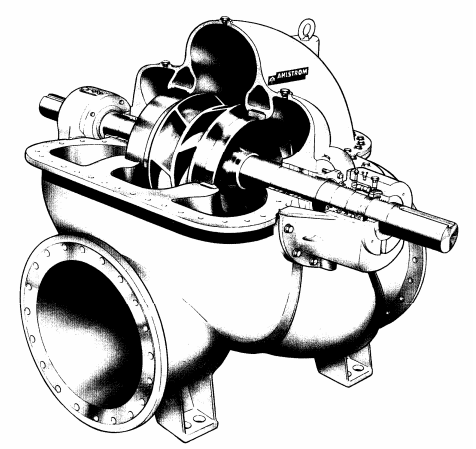
درشکل (۱-۳) پمپ یک طبقه پیچکی که قسمت مکش درته آن قرار دارد(End-Suction) ودارای یک لوله مکش می‌باشد (Single - Suction) باپروانه نیمه بسته نشان داده شده‌است.

شکل (۱-۳): پمپ پیچکی یک طبقه با یک مکش در قسمت ته آن و پروانه نیمه بسته

یاطاقانهای (Bearings) مورداستفاده در این نوع پمپها بایستی طوری طراحی گردند که قادر به مقاومت در مقابل نیروهای هیدرولیکی ناشی از بالانس نبودن نیروهای هیدرولیکی وارد بر پروانه‌ها باشند.

در شکل (۲-۳) پمپ پیچکی که دارای دو قسمت مکش می‌باشد نشان داده شده‌است. مایع مورد انتقال از دو سمت متقابل پمپ وارد پروانه شده و همین امر موجب متعادل شدن بار

هیدرولیکی واردبر پروانه گردیده و مشکلات مربوط به طراحی یاطاقانها بـه‌مقـدار زیـادی حـل می‌شود. به همین خاطرازاین پمپها میتوان برای کاردرفشارهای بالاتری در مقایسه با پمپهای بایک مکش‌استفاده کرد.



شکل (۲-۳): پمپ پیچکی با دوقسمت مکش

وجود دو قسمت مکش باعث کاهش سرعت ورودمایع بـه‌درون چـشمه پمـپ گردیـده و نهایتـاً موجب کاهش NPSHR می‌گـردد. پمپهـای بایـک مکـش عمومـاً دارای پوسـته تکـه ای عمـودی (Vertical - Split) می‌باشند، در عوض پمپهای با دو قسمت مکش غالباً با پوسـته تکـه ای افقـی ساخته می‌شوند. به‌هرحال پمپهای افقی با دو قسمت مکش برای انجام تعمیرات به تکنسین‌های بـا تخصص بالاتری نسبت به پمپهای با یک قسمت مکش نیاز دارند. جهت کاهش جریـان برگـشتی از قسمت فشار قوی به قسمت فـشار ضـعیف پروانـه ونهایتـاً افـزایش رانـدمان پمـپ ازحلقـه‌هـای آب‌بندی (Seal Ring) ویارینگهای فرسایش (Wear Ring)استفاده می‌شود.

در پمپهای چند طبقه مایع خروجی از هر طبقـه بـه‌عنـوان ورودی طبقـه بعـدی عمـل نمـود ه و پروانه‌ها که به‌صورت سری نصب شده اند، موجب افـزایش تـدریجی ارتفـاع مـایع مـی‌گردنـد. پمپهای چند طبقه را نیز می‌توان با یک یا ۲ قسمت مکش ساخت.

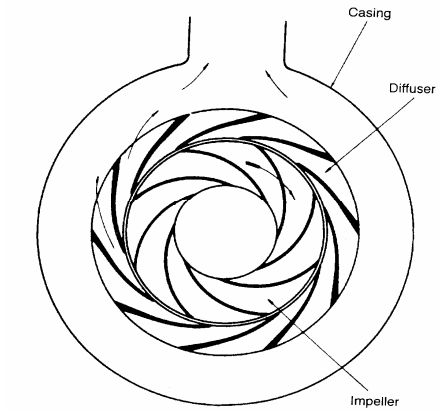
همانطوری که قبلاً نیزگفته شد، پمپهای بایک مکش ازلحاظ هیدرولیکی بالانس نبـوده وبـه همـین خـاطردرانواع چندطبقـه ای، آنهـاراطوری میـسازند، تـادارای تعدادمـساوی خروجـی درقـسمت معکـوس (Opposite Direction) باشـند. در پمپهـای چنـد طبقـه کـه دارای دو قـسمت مکـش می‌باشند، پروانه‌ها خود بالانس هیدرولیکی بوده و لازم نیست که پروانه‌ها دارای تعـداد مـساوی خروجی در جهت عکس هم باشند.

اتصال پمپ به الکتروموتور می‌تواند به‌صورت مستقیم، کوپلینگی و یا تـسمه ای باشـد. در حالـت اتصال مستقیم،ترازنمودن پمپ و الکتروموتور ضروری نبـوده و میتـوان آن‌را بـه هـر شـکلی در سیستم نصب نمود. در عوض برای پمپهائی که به‌صورت غیر مستقیم (مثلاً توسـط کوپلینـگ و یـا تسمه) بیکدیگر متصل هستند،ترازکردن مجموعه بسیار مهم می‌باشـد. مزیـت ایـن روش انتقـال

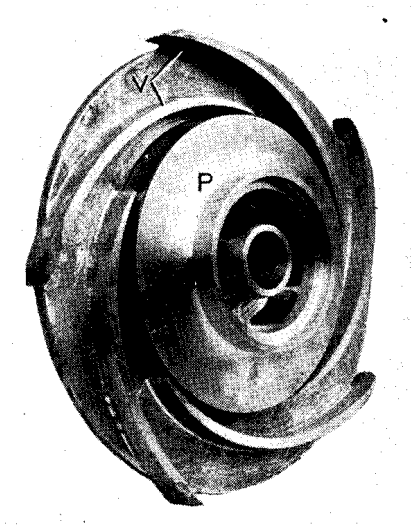
قدرت در این‌است که تعمیرات پمپ و یا الکترموتور بدون باز کردن دیگری صورت می‌گیرد. عموماً از پمپهای اتصال مستقیم برای انتقال مایعات با دمای کمتر از ۹۳ درجه سانتیگراداستفاده می‌شود.

۳-۳: پمپهای افشان Diffuser Pumps

همانطوری که قبلاً اشاره شد، یکی از عوامل اصلی از دست رفت انرژی (ارتفاع) در پمپ‌های گریزازمرکز وجود پدیده شوک می‌باشد که باعث بهم خوردن بردار سرعت جریان مایع در قسمت‌های ورودی و خروجی پروانه می‌گردد. برهمین اساس با به‌کارگیری از تیغه‌های ثابت (شکل ۳-۳) و یا قابل در آوردن (شکل٤-۳) که اصطلاحاً افشاننده (Diffuser) نامیده می‌شود، پدیده شوک به‌مقدار زیادی در پمپهای پیچکی کاهش داده شده و پمپ پیچکی اصلاح شده را پمپ افشان می‌نامند.



شکل (۳-۳): پمپ افشان با تیغه‌های ثابت



شکل (٤-۳): تیغه‌های قابل در آوردن در پمپهای افشان

کاهش پدیده شوک در پمپهای افشان نه تنها باعث افزایش راندمان پمپ می‌گردد، بلکه موجب افزایش ارتفاع قابل دسترس توسط پمپ نیز می‌شود، به‌نحوی که اگر زاویه تیغه‌های پروانه و افشاننده سازگاری لازم را با هم داشته باشند، راندمان این پمپها به بیش از ۹۰ درصد نیز می‌رسد.

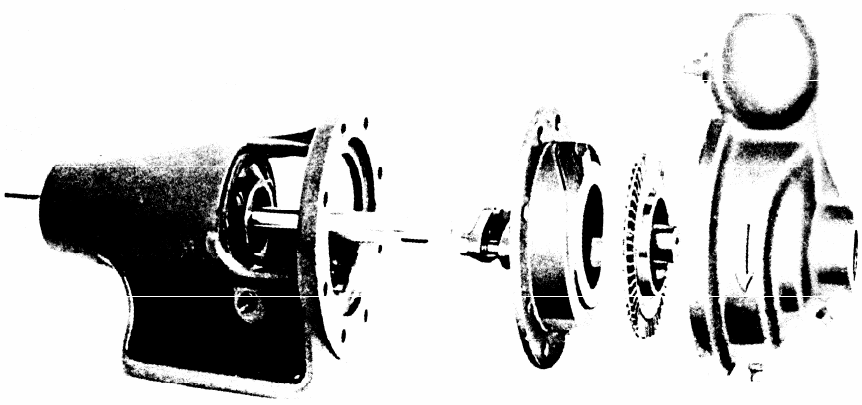
پمپهای افشان غالباً برای ارتفاع زیاد مورداستفاده قرار می‌گیرند. این پمپها به‌صورت چند طبقه نیز ساخته می‌شوند. تعداد طبقات پمپهای افشان در مقایسه با پمپهای پیچکی، برای دست یابی به ارتفاع معین، کمتر می‌باشد. درآرایش پروانه‌ها سعی می‌شودکه پروانه‌ها به‌صورت مساوی در دو سمت مکش قرار گرفته تا از این طریق بار محوری (Axial Thrust) در آن حذف گردد. علاوه بر آن وجود افشاننده باعث کاهش بارشعاعی (Radial Thrust) نیزمی‌شود، مشکلی که درپمپهای پیچکی بشدت وجود داشته ودرمواردی حتی می‌تواند با ایجاد نوسان بار عمودی باعث بروز پدیده خستگی (Fatigue) در شافت و در نهایت بریدن آن گردد. برای دبی و ارتفاع معین،

پمپهای افشان ازپمپهای پیچکی کوچکتر بوده و این امرناشی ازبهبود شرایط جریان مایع در پوسته پمپ ناشی از کاهش عوارض پدیده شوک می‌باشد. لازم به ذکراست که طراحی صحیح افشاننده اهمیت زیادی داشته وعدم رعایت آن نه تنهاباعث بهبودکیفیت پمپ نمی‌شود، بلکه می‌تواند برروی کارآئی پمپ تأثیر نامطلوب نیز به‌گذارد. به‌عنوان مثال دور شدن پیش از حداز BEP در این پمپها باعث می‌شود تا تیغه‌های افشاننده موجب افزایش شوک و جریان گردابی در پمپ گردیده و پمپ در شرایط نا پایداری کار کند. به‌عنوان مثال اگر دبی پمپ به میزان ۵ تا ۱۰ در صد دبی طراحی برسد، عوارض پدیده شوک و جریان گردابی در حدی خواهد شد که می‌تواند ارتفاع ایجاد شده را در حد غیر قابل تصوری کاهش دهد. به همین خاطر منحنی مشخصه این پمپهادر منطقه دبی کم (در نزدیکی Q=0 یا نقطه بسته بودن شیر خروجی) شکل نزولی (Droop)راگرفته ونمی‌توان از این پمپها به‌صورت موازی‌استفاده کرد. این امربه این معنی نیست که منحنی مشخصه این پمپها شکل نزولی دارند، بلکه با رعایت نکات لازم درطراحی پروانه و افشاننده، انتخاب صحیح زاویه‌ها، انحناءِ مناسب تیغه‌ها و طراحی صحیح جریان مایع در افشاننده می‌توان مانع از بروز نقیصه فوق در پمپهای افشان شد.

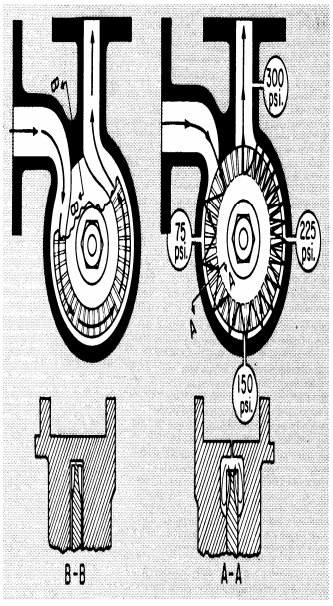
یکی از دیگر معایب پمپهای افشان، پائین بودن انعطاف پذیری آنها می‌باشد. در پمپهای پیچکی برای سازگار نمودن ظرفیت پمپ با نیازهای سیستم، قطر پروانه را می‌توان تا ۳۰-۲۰ درصد کاهش داد، بدون آنکه راندمان پمپ در اثرافزایش از دست رفت‌های هیدرولیکی کاهش چشمگیری نماید. ولی در پمپهای افشان کاهش قطر پروانه درحد فوق دارای عوارض شدیدی بوده که ناشی از بالارفتن فاصله هوائی بین تیغه‌های پروانه و افشاننده می‌باشد، به‌نحوی که کارآئی پمپ بشدت کاهش می‌یابد. به همین خاطر حداکثر میزان مجاز برای کاهش قطر پروانه درپمپهای ا فشان حدود ۱۰-۵ درصد قطر بزرگترین پروانه آن میباشد. در صورت نیاز به کاهش بیشتر قطر پروانه بهتراست که از افشاننده با طراحی جدید و قطر کمتراستفاده شود. با این وجود محاسن به‌کارگیری از افشاننده در پمپها آنچنان قابل توجه‌است که از آن برای پمپهای ملخی و توربینی عمودی نیزاستفاده می‌شود .

۴-۳: پمپهای توربینی (احیائی) Turbine (Regenerative) Pumps

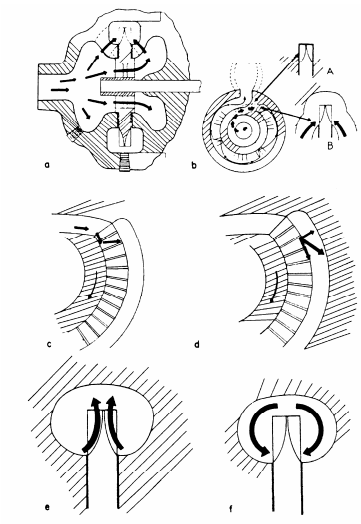
در پمپهای توربینی، روش اعمال انرژی و افزایش فشار(ارتفاع) مایع باسایر پمپهای گریز ازمرکز تفاوت‌های زیادی دارد. پروانه این پمپها (شکل ۵-۳) دارای تعدادی تیغه شعاعی بوده که در دوسمت یک قاب(Rim) قرار داشته ودر یک محفظه دو جداره (Annular) می‌چرخد. مایع وارد شده به‌درون پوسته پروانه جریان یافته و همین امر موجب تعادل هیدرولیکی بار محوری در این پمپها می‌گردد. چرخش پروانه در محفظه ای بالقی بسیار کم صورت می‌پذیرد (شکل ۶a-۳).



شکل (۵-۳): نمائی از یک پمپ توربینی



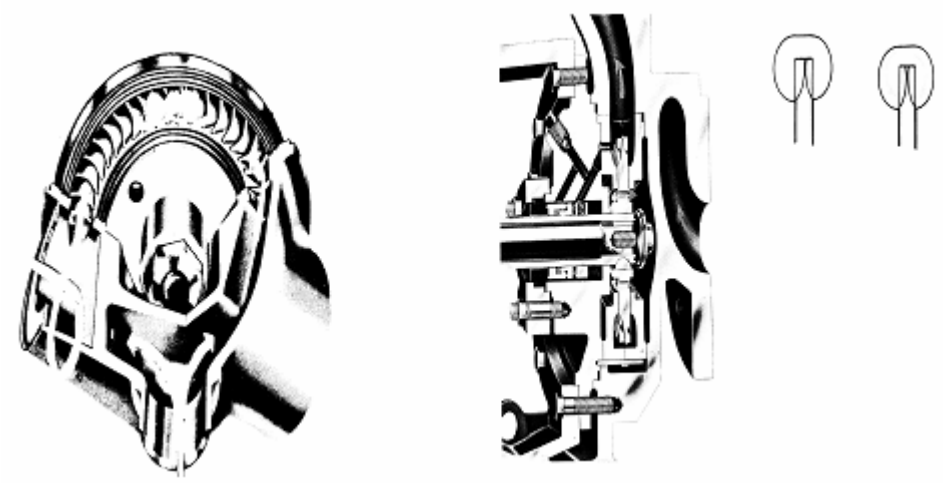
شکل (۷-۳): چگونگی افزایش فشار در پوسته یک پمپ توربینی



شکل (٦-۳): نحوه اعمال فشار در پمپهای توربینی

مایع وارد شده به‌درون پوسته، به فضای بین تیغه‌ها کشیده شده و نیروی گریزازمرکز باعث افزایش انرژی جنبشی مایع می‌شود که در داخل پوسته به انرژی پتانسیل (ارتفاع) تبدیل می‌گردد. هر پوسته مجهز به دیواره جداکننده (Stripper) بوده که دارای لقی بسیار کم می‌باشد (شکل ۳-۶b نقطه A) درست در قسمت پشت این دیواره و درجهت دوران پروانه، مجرای دوقلوی مکش که از داخل دیواره آب‌بندکننده می‌گذرد، داخل محفظه پروانه (نقطه B) می‌شود. تیغه‌های پروانه، مایع خارج شده از مجرای مکش را کشیده و نیروی گریزازمرکز باعث خارج سازی آن از قسمت محیطی پروانه می‌گردد(شکل ۳-۶c). مایع به‌هنگام‌ترک تیغه‌های پروانه دارای انرژی جنبشی بیشتری در مقایسه با شرایط ورودی خود به لای تیغه‌ها خواهد بود(شکل ۳-۶b). جریان مایع از درون پوسته با کاهش تدریجی سرعت و افزایش فشار (ارتفاع) همراه خواهد بود. خروج مایع از پروانه و ورود مجددآن به لای تیغه‌ها درشکلهای (۳-۶e) و (۳-۶f)نشان داده شده‌است. از آنجائی که این فرآیند برحسب نوع طراحی پمپ ۲تا ۵۰ بار تکرار

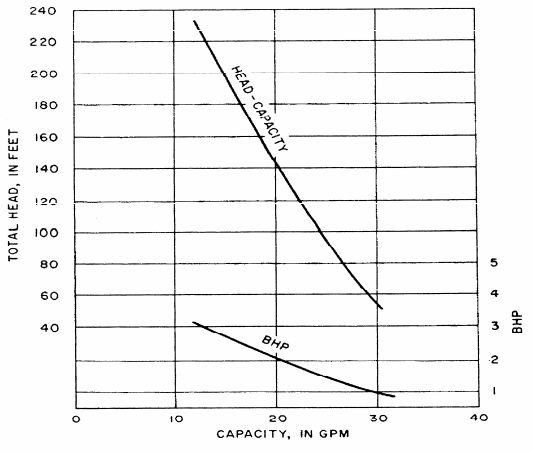
می‌گردد، لذا پمپهای توربینی درمقایسه با پمپهای پیچکی باسرعت دورانی و قطر پروانه یکسان، قادربه اعمال فشار(ارتفاع) بیشتری می‌باشند. درشکل (۷-۳)نحوه افزایش فشار در پوسته یک پمپ توربینی نشان داده شده‌است. در شکل (۸-۳) جریان مایع در پمپهای توربینی از نوع یک طرفه (Single-Side) و دو طرفه (Double-Side) نشان داده شده‌است.



ب: دوطرفه (Double-Side) الف: یک طرفه (Single-Side)

شکل (۸-۳): جریان مایع در پمپهای توربینی

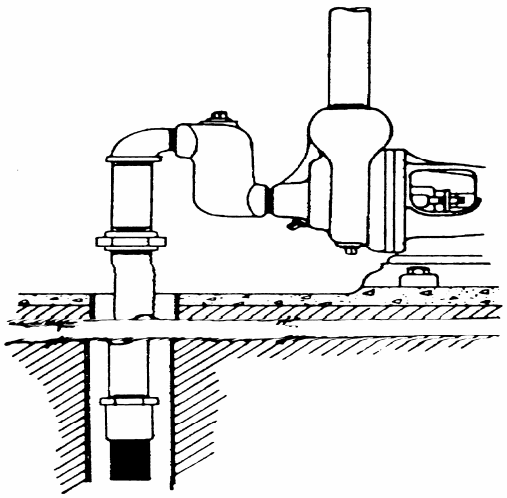
شکل منحنی مشخصه (H-Q) پمپهای توربینی به‌لحاظ تیز بودن، شباهت زیادی به منحنی مشخصه پمپهای با سرعت مخصوص بالا را دارد که در شکل (۹-۳) نشان داده شده‌است. توان مصرفی در این پمپها نیز با کاهش دبی افزایش می‌یابد به‌طوری که در نقطه Q=0 به حداکثر خود می‌رسد.



شکل (۹-۳): منحنی مشخصه پمپهای توربینی

راندمان این پمپها در مقایسه با سایر پمپهای گریز ازمرکز کمتر بوده ولی از آنجائی که در دبی کم قادر به اعمال ارتفاع زیاد بوده ودر ضمن می‌توان آن‌را به‌صورت چند طبقه ساخت، لذا برای مواردی که لازم باشد پمپ در دبی کم، ارتفاع زیادی اعمال نماید، پمپ مناسبی می‌باشد. ارتفاع قابل دسترس در پمپهای توربینی کوچک (با دبی کمتر از ۲۵ متر مکعب در ساعت) نزدیک به

۱۵۰ تا ۱۸۰ متر بوده و در طرحهای خاصی با دبی تا ۴۵ متر مکعب در ساعت ارتفاع قابل دسترس توسط آن به ۳۶۰ تا ۴۶۰ متر نیز می‌رسد. البته امروزه با ساخت پمپهای گریز ازمرکز چند مرحله‌ای با توجه به قیمت کمتر و راندمان بهره‌برداری بالاتر، می‌توان جایگزین مناسب‌تری را برای پمپهای توربینی پیدا کرد. از آنجائی که پمپهای توربینی برای دبی کم ساخته می‌شوند لذا NPSHR آنها بسیار کم می‌باشد. وجود مایع در فضای بین پروانه و دیواره جداکننده و کم بودن لقی بین قطعات باعث می‌شودتا این پمپ دارای خاصیت خود هواگیری (Self -Priming) باشد . این امر با تخلیه هوا از خط لوله مکش و نگهداری مایع در هنگام خاموش بودن در تله ای که در پمپ جاسازی شده‌است صورت می‌گیرد (شکل ۱۰-۳). وجود مجرای گشاده شونده در قسمت خروجی پمپ باعث کاهش سرعت مایع خروجی از پمپ و جدا سازی گاز از مایع می‌شود.



شکل (۱۰-۳): تله نگدارنده مایع در پمپهای توربینی

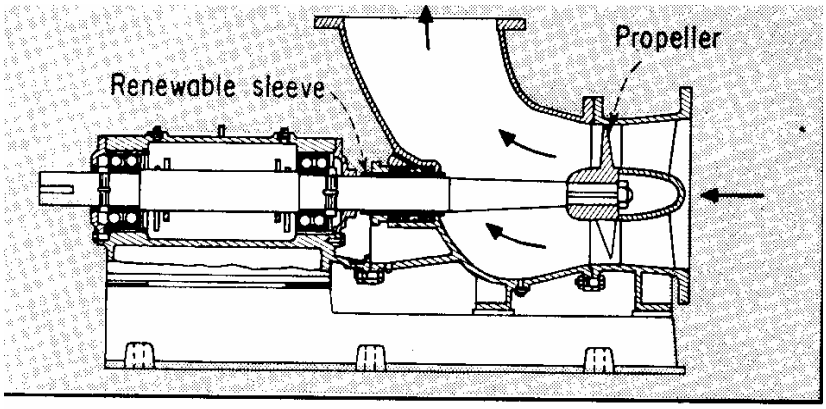
از آنجائی که بهره‌برداری مناسب از پمپهای توربینی منوط به حفظ لقی بین پروانه و دیواره پوسته می‌باشد، لذا این پمپها برای جابجائی مایعات دارای خاصیت خوردگی وحاوی ذرات جامد و معلق مناسب نمی‌باشند. خاصیت خورندگی و یا سایش مایع مورد پمپاژ باعث افزایش لقی قطعات گردیده که بنوبه خود موجب افزایش جریان گردشی و کاهش کارآئی پمپ می‌گردد. به همین خاطراستفاده از این پمپها فقط برای مایعات غیر خورنده و فاقد ذرات جامد و معلق توصیه گردیده و بهتراست که در قسمت مکش آن توری با دانه بندی (Mesh40) نصب شود. حساسیت بیش از حد این پمپها در مقایسه باپمپهای گریزازمرکز به رعایت لقی مورد نیاز باعث می‌شود تا به بازرسی و تعمیر و نگهداری بیشتری نیاز داشته باشد، در صورت افزایش لقی باید نسبت به‌ترمیم و یا تعویض قطعات آسیب دیده و یا تغییر واشری که میزان لقی را تضمین می‌کند، اقدام شود. با نصب یک شیر آزاد کننده (Relief Valve) در قسمت خروجی پمپهای توربینی می‌توان از افزایش بیش از حد فشار خروجی جلوگیری کرد. اگر فشاردر قسمت دهش

پمپ از حداکثر مورد نیاز تجاوز کند، شیرآزاد کننده با برگشت مایع از قسمت دهش به مکش پمپ مانع ازآسیب رسیدن به پمپ توربینی می‌گردد.

ویسکوزیته مایع موردجابجائی توسط پمپهای توربینی نبایستی از SSU ۲۵۰ (حدود ۴۸ سانتی‌استوک) بیشتر باشد. پمپاژ مایعات با ویسکوزیته بالاتر موجب کاهش شدید راندمان پمپ گردیده و عملاًاستفاده از این پمپها منتفی می‌باشد.

۵-۳: پمپهای جریان محوری (ملخی) (Axial Flow or Propeller) Pumps

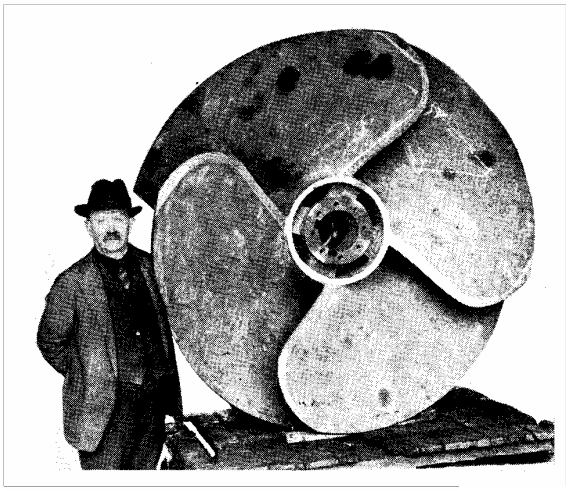
پمپهای ملخی، گاهی اوقات پمپ جریان محوری (Axial Flow)یا جریان مستقیم (Straight Flow) نیز نامیده می‌شوند. چرا که در این پمپها مایع بموازات محور پمپ در داخل پروانه وپوسته جریان می‌یابد. به‌عبارت دیگر مؤلفه بردار سرعت مایع در پروانه بیشتر در جهت محور پروانه بوده تا در راستای شعاع آن. نمونه ای از پمپهای ملخی در شکل (۱۱-۳) نشان داده شده‌است.

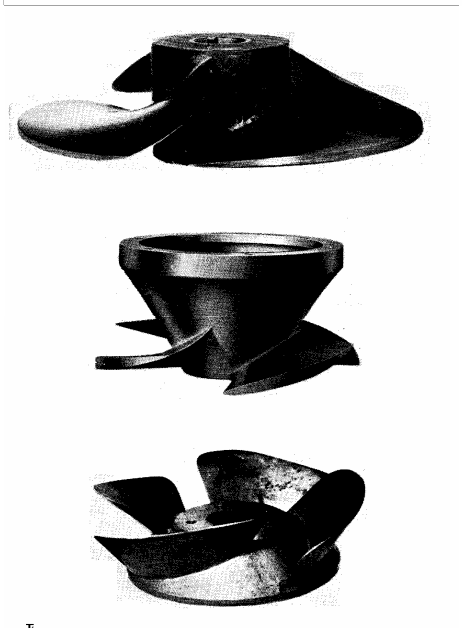


شکل (۱۱-۳): نمونه ای از یک پمپ ملخی

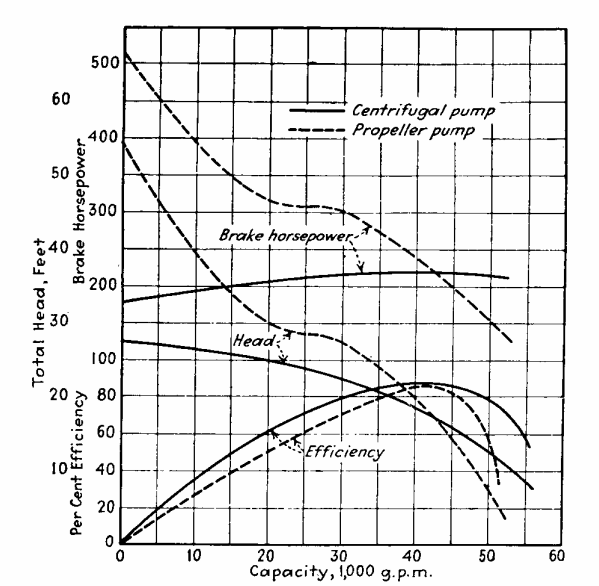
پمپهای ملخی (جریان محوری) دارای سرعت مخصوص N_s)160 (در سیستم متریک) بوده و به همین خاطر شکل پروانه‌ها طوری‌است که بیشتر در جهت اعمال دبی عمل می‌کند تا اعمال ارتفاع (فشار).

در شکل (۱۲-۳) نمونه ای از پروانه مورداستفاده در پمپهای ملخی نشان داده شده‌است. برخلاف سایر انواع پمپهای گریزازمرکز در این نوع پمپها، به مجرای پیچکی نیازی نمی‌باشد. به‌هرحال تیغه‌های افشاننده در قسمت خروجی پمپ قرار داشته و باعث حذف حرکت چرخشی (Swirl) داده شده به سیال توسط پروانه ملخی می‌شود. منحنی مشخصه یک پمپ ملخی همراه با منحنی مشخصه یک پمپ پیچکی درشکل (۱۳-۳) نشان داده شده‌است. همانطوری که ازشکل فوق پیداست، پمپهای پیچکی دارای منحنی مشخصه (H-Q) نسبتاً مسطح بوده، در صورتی که در پمپهای ملخی با کاهش دبی جریان، ارتفاع قابل دسترس با شدت زیادی افزایش می‌یابد. به‌عبارتی دیگر باافزایش دبی جریان، ارتفاع قابل دسترس بشدت کاهش می‌یابد.



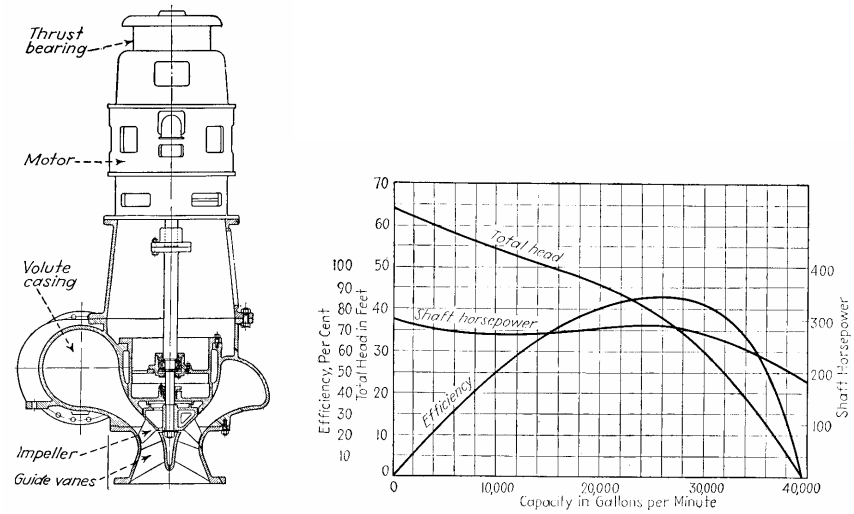


شکل (۱۲-۳): انواع پروانه‌های مورداستفاده در پمپهای ملخی



شکل (۱۳-۳): مقایسه منحنی مشخصه پمپهای ملخی و پیچکی

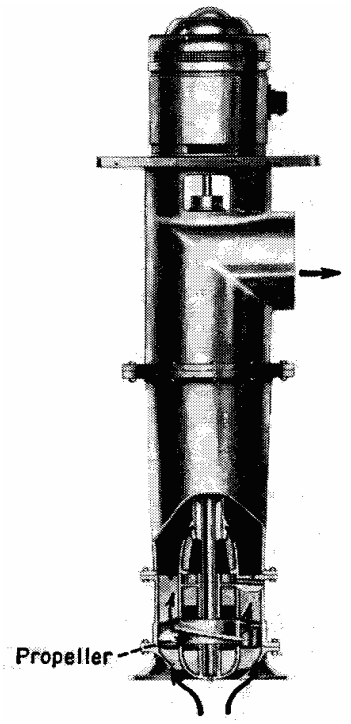
این دوپمپ برای کاردر ارتفاع ۱۷ فوت و دبی ٤۲۰۰۰ گالن در دقیقه طراحی شده اند (چون دراین نقطه هر دو پمپ دارای حداکثر راندمان ۸۳٪ می‌باشند) و توان مصرفی درهردوپمپ ۲۲۰ اسب بخاراست. درارتفاعات کمتر از ۱۷ فوت، ارتفاع و راندمان در پمپهای پیچکی با شیب بیشتری نسبت به پمپ ملخی کاهش می‌یابد. مسئله دیگری که بایستی مورد توجه قرار گیرد محدوده کار (کاربا راندمان مطلوب) در انواع پمپهااست. به‌عنوان مثال پمپ پیچکی مورد نظر در ظرفیت‌های ۵۰۰۰۰ - ۳۰۰۰۰ گالن در دقیقه دارای راندمان ۸۰ ٪ و یا بیشتر بوده در صورتی که پمپهای ملخی همین شرایط راندمان‌را در یک دامنه محدودتری از ظرفیت (٤۵۰۰۰ -۳۷۰۰۰ گالن دردقیقه) دارا می‌باشد. در شکل (۱٤-۳) منحنی مشخصه یک پمپ ملخی که به‌صورت عمودی بوده و در سرعت زیاد و با پروانه ای با٤ تیغه طراحی گردیده نشان داده شده‌است



شکل (۱٤-۳): منحنی مشخصه یک پمپ ملخی عمودی

بالاترین راندمان این پمپ در ارتفاع ۳۷ فوتی و دبی ۲۶۰۰۰ گالن دردقیقه بوده و توان مصرفی در آن ۲۸۰ اسب بخاراست. ارتفاع فوق خارج از توانائی پمپهای ملخی قرار دارد که عموماً در ارتفاع زیر ۳۰ فوت کار می‌کنند. در دبی صفر (شیر خروجی بسته)، ارتفاع قابل دسترس ٦٤ فوت و توان مصرفی آن ۳۰۰ اسب بخاراست. این امر نشان می‌دهد که این پمپ فقط می‌تواند در شرایط موقتی با شیر خروجی بسته کارکند. این درحالی‌است که پمپهای پیچکی قادر ند تحت همین شرایط در دوره طولانی‌تری با شیر بسته و بدون وارد شدن باراضافی بر الکتروموتور کار کنند. در حالت کلی شکلهای (۱۳-۳) و (۱٤-۳) بیانگر این امر می‌باشد که این نوع پمپها برای کار در ارتفاع کم مناسب می‌باشند. پمپهای ملخی عموماً به‌صورت عمودی مورداستفاده قرار می‌گیرند این نوع پمپها به‌صورت فشرده (Compact) ساخته شده و در منبع مکش نصب می‌شوند تا مشکل هواگیری (Priming) نداشته باشند. نصب آن غالباً به‌صورتی‌است که در

داخل مایع سیال قرار میگیرند (Wet Pit) که نمونه ای از آن در شکل (۱۵-۳) نشان داده شده‌است.



شکل (۱۵-۳): یک پمپ ملخی مخصوص چاه عمیق قابل نصب در داخل منبع مایع

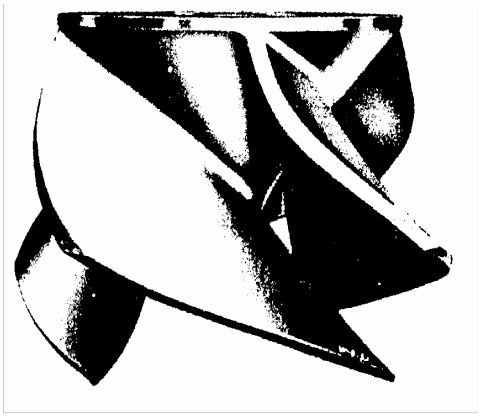
مشکل کار در دبی کم توسط این پمپ را میتوان بااستفاده از پروانه‌های ملخی با تیغه‌های قابل تنظیم (Adjustable Blade Propeller) برطرف نمود. تیغه‌ها طوری تنظیم می‌گردند که مشخصات کار در سیستم با ویژگیهای پمپ سازگاری داشته باشند.

ارتفاع قابل دسترس در این پمپها حداکثر به ۴۰ فوت می‌رسد به همین لحاظ از این پمپها برای مواردی که ارتفاع کم و آبدهی زیادمورد نظر باشداستفاده می‌شود. کشیدن آب ازروخانه‌ها (Drainage)، انتقال فاضلاب، تخلیه آب جمع شده در اثرسیل، آبیاری (Irrigation)، و سایر موارد مشابه نمونه‌هائی از مصرف این نوع پمپها در صنایع و بالاخص در امور کشاورزی می‌باشد.

۶-۳: پمپهای جریان مختلط Mixed - Flow Pumps

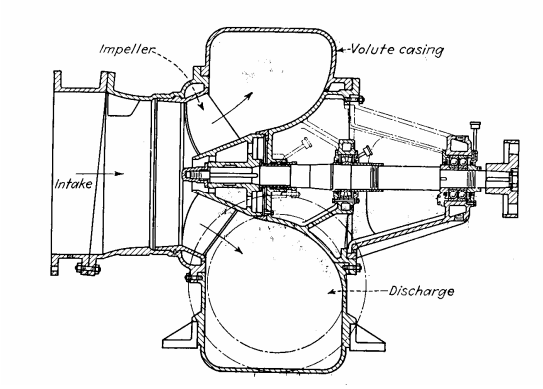
همانطوری که قبلاً نیز گفته شد، پمپهای پیچکی مایع را به‌طور شعاعی از پروانه‌ها خارج ساخته و پمپهای ملخی همین کار را در جهت محور پروانه انجام می‌دهند. به‌عبارت دیگر پمپهای جریان شعاعی برای دست یابی به ارتفاع زیاد مناسب می‌باشند در صورتی که پمپهای جریان محوری بیشتر برای اعمال دبی مناسب بوده و قابلیت اعمال ارتفاع (فشار) در آن پائین می‌باشد. در بسیاری از موارد شرایط کار ایجاب می‌کند که پمپ مورداستفاده در هر دوزمینه (اعمال ارتفاع و دبی) از وضعیت مطلوبی برخوردار باشد. ادغام ویژگیهای پمپهای پیچکی و ملخی و یا به‌عبارتی دیگر طراحی پروانه به‌شکلی که هر دو قابلیت فوق را دارای باشد زمینه ساخت پمپهای جریان مختلط را مهیا نموده‌است. در شکل (۱۶-۳) نمونه ای از پروانه جریان مختلط نشان داده

شده‌است. از پروانه‌های جریان مختلط غالباً در پمپهای چاه عمیق و یا پمپهای توربینی‌استفاده می‌شود.



شکل (۱۶-۳): نمونه ای از یک پروانه جریان مختلط

سرعت مخصوص پمپهای جریان مختلط حدود $160 \rangle N_s \rangle 80$ می‌باشد. در شکل (۱۷-۳)نمونه ای از پمپهای جریان مختلط نشان داده شده‌است.



شکل (۱۷-۳): نمونه ای از یک پمپ جریان مختلط

بخش چهارم :

پروانه‌ها (Impellers)

۱-۴: انواع پروانه‌ها

وظیفه پروانه در پمپهای گریز ازمرکز انتقال انرژی ازشافت به مایع مورد پمپاژ بوده تا انرژی جنبشی مایع افزایش یابد. این عمل توسط تیغه‌ها (Vanes) صورت می‌گیرد. تیغه‌های پروانه تنها قطعه پمپ بوده که قادر به افزایش انرژی مایع می‌باشندوسایر قطعات پمپ، حتی آنهائی که وظیفه تبدیل انرژی رابعهده دارند (نظیر پوسته)، مصرف کننده انرژی هستند. به همین خاطر پروانه رامیتوان مهمترین قطعه پمپهای گریزازمرکزدانست. البته با توجه به افزایش تدریجی سطح مقطع جریان مایع در بین تیغه‌های پروانه، بخشی از انرژی جنبشی در همین قسمت به انرژی پتانسیل (فشار) تبدیل می‌شود (شکل۵-۹). پروانه‌ها رامیتوان به‌صورت‌های مختلفی تقسیم بندی کردکه عمده‌ترین آنهاعبارتند از:

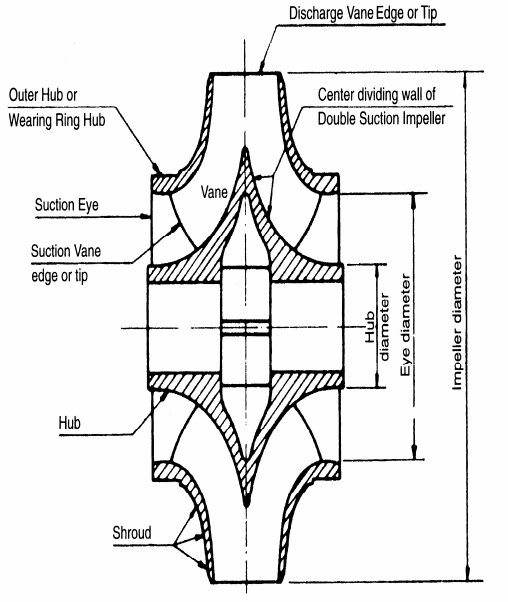
۱- نحوه نصب برروی شافت.

۲- آرایش ورودی (مکش) مایع به‌درون پروانه

۳- شکل تیغه‌ها.

٤- نحوه محصور کردن تیغه‌ها.

قبل از ورود به بحث پروانه‌ها نخست لازم‌است که بااصطلاحات مربوط به پروانه آشنا شد. باتوجه به شکل (۱-٤)، مایع از درون چشمه مکش (Suction Eye) که دارای کمترین سطح مقطع تا قبل از تیغه‌ها می‌باشد وارد پروانه شده و بعد ازعبورازکانالهائی که توسط تیغه‌ها و جداره پوشش دهنده تیغه‌ها(Shroud &Hub) شکل داده‌است، در قسمت لبه خروجی (Discharge Tip) از پروانه خارج می‌شود.



شکل (۱-٤): قسمتهای مختلف یک پروانه با دو مکش

انتقال گشتاور از پروانه به تیغه‌ها توسط نافی (Hub) صورت می‌گیرد. نشت مایع ازقسمت فشار قوی(دهش) به قسمت فشار ضعیف (مکش) به‌کمک کاهش لقی (Clearance) جداره بیرونی پروانه و یا حلقه سایشی (Wear Ring) کنترل می‌شود.

تقسیم بندی پروانه‌ها براساس نحوه نصب آن برروی شافت یک نگرش مکانیکی می‌باشد. اگر پروانه دریکسرشافت نصب شده وشافت به‌طورکامل ازچشمه پروانه خارج نشود، پروانه راآویزان (Overhung) می‌نامند. این نحوه قرار دادن پروانه برروی شافت از نظر هیدرولیکی ایده آل می‌باشد، چرا که موجب کاهش سطح مقطع مفید چشمه پروانه نمی‌گردد. اگر شافت ازدرون چشمه پروانه عبور کند، روش نصب را عبوری (Shaft Through Eye) می‌نامند. این روش موجب کاهش سطح مقطع مفید جریان مایع از درون چشمه پروانه گردیده وبه همین خاطر لازم‌است که سطح مقطع چشمه پروانه در مقایسه با روش آویزان بزرگتر در نظر گرفته شود. افزایش سطح مقطع چشمه پروانه موجب افزایش خالص فشار مثبت مورد نیاز در قسمت مکش (NPSHR) خواهد شد که چندان مطلوب نمی‌باشد. علاوه برآن با افزایش نسبت قطر چشمه پروانه به قطر پروانه، راندمان پمپ کاهش می‌یابد، چرا که موجب کاهش طول تیغه‌ها و افزایش بارواردہ برآن در هنگام انتقال انرژی می‌گردد.

پروانه‌ها می‌توانند دارای یک یا دو مکش(یک یا دو چشمه) باشند. در پمپ‌های با پروانه از نوع دو مکش، پوسته طوری طراحی می‌شود که مایع ورودی به دهانه پمپ(Nozzle) ، از طریق دو کانال جدا گانه که درون پوسته وجوددارد‌به چشمه‌های پروانه برسد.استفاده از هریک از طرح‌های فوق به شرایط موردنظردربهره‌برداری از پمپ بستگی دارد.

مثلاً اغلب پمپ‌های کوچک، پوسته دوتکه شعاعی از نوع افقی و یا عمودی دارای پروانه با یک مکش بوده، در صورتی که در پمپ‌های متوسط وبزرگ بدودلیل از پروانه بادو مکش‌استفاده می‌شود. اولاً دردبی مشخص درمقایسه با پمپ‌های با یک مکش دارای (NPSHR) کمتری بوده، ثانیاً بار محوری (Axial Thrust) درآن کاهش یافته و به همین خاطریاطاقانهای مخصوص بارمحوری درآن کوچکترمی‌باشد. اغلب پمپ‌های چند مرحله‌ای دارای پروانه با یک مکش می‌باشند، تا ازاین طریق پیچیدگی ساختمانی آن کاهش یابد. طراحی و آرایش تیغه‌ها را می‌توان به ٤ دسته تقسیم کرد:

الف: تیغه‌های تخت (Plain) (شکلهای ۲-٤ و ۹-٤ تا۱۱-٤). این تیغه‌ها فقط دارای یک انحناء بوده و سطح تیغه‌ها موازی محور دوران می‌باشد.

ب: در پروانه‌های با تیغه فرانسیس (Francis)، تیغه‌ها دارای دو انحناء هستند (شکلهای ۳-٤ تا ٥-٤) که عموماً برای پمپهای با سرعت مخصوص کم $30\langle N_s \rangle 80$ در سیستم SI (معادل ۱۵۰۰ تا ٤۲۰۰ در سیستم آمریکائی) مورداستفاده قرار می‌گیرند.

ج: اگر بردار سرعت مایع در تیغه‌ها دارای دو مؤلفه باشد، پروانه را جریان مختلط (Mixed-Flow) می‌نامند. این پروانه‌ها عموماً در پمپهای بایک مکش و سرعت مخصوص $80\langle N_s\rangle 160$ در سیستم SI (معادل ٤٢٠٠ تا ٨٤٠٠ در سیستم آمریکائی) مورداستفاده قرار می‌گیرند.

د: اگر مؤلفه شعاعی بردار سرعت مایع در پروانه ناچیز باشد (پروانه‌های با سرعت مخصوص $N_s\rangle 160$) پروانه جریان محوری (Axial-Flow) ویا ملخی (Propeller) نامیده می‌شود (شکل ٧-٤). دراین پروانه مایع تقریباً بموازات شافت پمپ جریان می‌یابد. رابطه شکل پروانه با سرعت مخصوص در شکل (٨-٤) نشان داده شده‌است. دسته بندی پروانه‌ها براساس شکل تیغه‌ها به‌صورت قراردادی می‌باشد، چرا که انواع پروانه‌ها را می‌توان در پمپهای مختلف به‌کار گرفت. به‌عنوان مثال پروانه‌های مورداستفاده در پمپهای با یک یا دو مکش با سرعت مخصوص کم طوری ساخته می‌شوند که تیغه‌ها تا درون چشمه پروانه کشیده شده باشند، این امر باعث می‌شود تا یک جریان مختلط در چشمه پروانه با کمترین از دست رفت انرژی در سرعت‌های دورانی بالا برقرار شده ولی خروج مایع از پروانه بروی سطوح تخت تیغه‌ها صورت پذیرد.

در پمپهای با سرعت مخصوص بالاتر که برای دبی زیاد و ارتفاع کم مورداستفاده قرار می‌گیرند، تیغه‌ها در طول خود دارای دو انحناء هستند. پروانه‌های جریان مختلط که غالباً برای پمپهای با یک مکش‌استفاده می‌شوند، را می‌توان نیمی‌از یک پروانه با تیغه‌های فرانسیس با دو قسمت مکش تلقی کرد.

مجاری تیغه‌ها را برحسب پوشش آن توسط صفحات جانبی می‌توان به سه دسته باز، نیمه باز، وبسته تقسیم بندی کرد. در پروانه‌های باز (شکل ٦-٤ و ٩-٤) تیغه‌ها فقط به نافی پروانه(Hub) متصل شده اند. نشتی از کناره تیغه‌ها توسط کاهش لقی محوری پوسته ودر پوش (Cover) کاهش داده می‌شود.

این طرح دارای دو محدودیت مکانیکی می‌باشد: اولاً تیغه‌ها از نظر مقاومت مکانیکی ضعیف شده و لازم‌است که تا حدودی توسط صفحات نگهدارنده تقویت شوند، ثانیاً جهت بهره‌برداری در شرایط اقتصادی مطلوب لازم‌است پوسته ویا صفحه درپوش آن قابلیت تنظیم داشته تا به‌کمک آن بتوان لقی را درحد مناسب تنظیم کرد. باطراحی مطلوب تیغه‌های پروانه باز، پمپ قادراست مایعات حاوی مقدارقابل قبولی ازذرات جامد را بدون ایجادهرگونه گرفتگی درمجاری جریان مایع بین پروانه وپوسته، جابجا نماید.

بادرنظر گرفتن محدودیتهای فوق، از پروانه‌های باز فقط در موارد خاصی که مایع حاوی ذرات جامداست‌استفاده می‌شود. در پروانه‌های نیمه باز (شکل ١٠-٤) سمت پشتی آن توسط صفحه نگهدارنده پوشش داده شده‌است. با اجراء این اصلاحیه، محدودیت مکانیکی مربوط به پروانه‌های

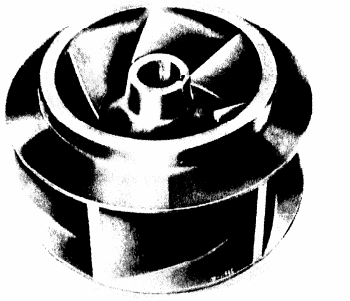
باز به‌مقدار زیادی رفع گردیده و مقاومت تیغه‌ها ولقی بین پروانه و پوسته با تنظیم روتور به‌مقدار قابل قبول رسانیده می‌شود. صفحه پشت تیغه‌ها غالباً در سمت محفظه آب‌بندکننده (Stuffing Box) قرار داده می‌شود (شکل ۱۱-٤) تا از این طریق اولاً فشار سمت محفظه آب‌بندکننده کاهش داده شده و ثانیاً در فضای بین صفحه پشتی تیغه‌ها وپوسته عاری از مواد جامد باشد. اگر صفحه نگهدارنده تیغه‌ها دارای سوراخهای تعادل در قسمت لبه‌های ورودی تیغه‌ها باشد، تیغه‌های خارج کننده مایع موجب کاهش نشتی مایع به قسمت مکش پمپ می‌گردد.
از پروانه‌های نیمه باز برای مواردی که مواد معلق درون مایع نسبتاً کم باشنداستفاده می‌شود. این پروانه‌ها در شرایط سخت بهره‌برداری در صنایع شیمیائی، کاغذ سازی، انتقال فاضلاب بشدت مورد توجه می‌باشند. جدا از شرایط مطلوب در مقابل گرفتگی مواد جامد در پوسته پمپ که توسط این پروانه بنحو مطلوب حل شده‌است، لقی مجاز برای سایش یا به‌عبارت دیگر کار آئی پمپ را می‌توان بدون باز کردن پمپ در حد قابل قبول نگهداشت. پروانه‌های بسته (شکلهای ۲-٤ تا۵-٤) دارای دو صفحه نگهدارنده در دو سمت تیغه‌ها بوده و همین امر نشت مایع از لبه تیغه‌ها را تقریباً منتفی می‌سازد. البته در مواردی که پمپ برای انتقال مایعات در فشار بالا مورداستفاده قرار می‌گیرد، سعی می‌شود با اعمال گرفتگی از طریق کاهش لقی (توسط رینگ سایشی)میزان نشتی ازقسمت دهش به قسمت مکش پمپ به حداقل رسانیده شود.
برای اکثر پمپها مگر در اندازه‌های کوچک، پروانه‌های بسته در مقایسه با دونوع باز و نیمه باز دارای راندمان بالاتری بوده واستفاده از آن اقتصادی‌تر می‌باشد. علت این امرحساسیت دونوع پروانه فوق نسبت به رعایت لقی در حد فاصل بین پروانه و پوسته بوده و همین امر باعث می‌شود تا پمپهائی که در آن از پروانه‌های باز و نیمه بازاستفاده می‌شود از پیچیدگی و دقت بالاتری برخوردار باشند. البته این امر به‌معنی عدم حساسیت پروانه‌های بسته نسبت به نشتی داخلی نمی‌باشد، ولی به‌هرحال به‌علت بسته بودن آن، نشتی مایع از قسمت فشار قوی به قسمت فشار ضعیف را به‌لحاظ وجود دوصفحه پوشش دهنده تیغه‌ها به‌مقدار زیادی کاهش می‌دهد. این امرتنها نیازبه رعایت کنترل لقی درمحیط خارجی پروانه باپوسته داشته وکنترل لقی محوری چندان ضروری نمی‌باشد. با توجه به ویژگیهای فوق، در طراحی پمپهای گریز ازمرکز سعی می‌شود که حتی الامکان از پروانه‌های بسته به‌ویژه برای جابجائی مایعات تمیزاستفاده شود. این پروانه‌ها در مقایسه با دونوع دیگر پروانه نسبتاً کوچکتر و ارزانتر بوده، و در پمپهائی که لقی در آن غیر قابل تنظیم باشد، کنترل لقی با تعویض قطعات فرسوده صورت می‌گیرد.

۲-۴: طرح‌های مخصوص

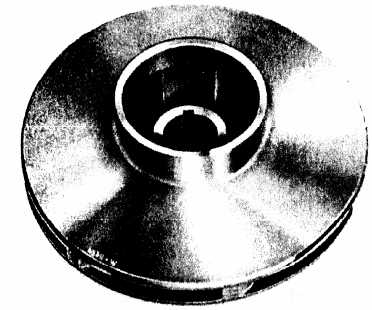
از آنجائی که پمپهای گریزازمرکز برای شرایط بسیار متنوعی در صنعت مورداستفاده قرار می‌گیرند، به همین خاطر برحسب ویژگیهای مورد نظر، پروانه‌های آن در طرح های گوناگون

ساخته می‌شوند.

مایعات حاوی ذرات جامد، می‌توانند به‌سرعت موجب گرفتگی مجاری پروانه‌ها گردند. درچنین مواردی راه حل مناسب تر برای رفع مشکل، استفاده ازپروانه‌های بسته باکانالهای داخلی وسیع وضخیم میباشد(شکل ۱۲-٤) که اصطلاحاً پروانه غیر قابل گرفتگی (Nonclog) نامیده می‌شود. در پمپهای با قطر دهانه خروجی تا اندازه۱۶-۱۲ اینچ پروانه دارای ۲ تیغه بوده وپمپهای بزرگتردارای حداکثر ۳تا٤ تیغه می‌باشند. اگر میزان مواد جامد در مایع مورد پمپاژ آنقدر زیاد باشد که نتوان باپروانه غیرقابل گرفتگی آن‌راپمپاژکرد از پروانه‌های جریان آزاد (Free - Flow) یا القائی مغشوش (Induced Vortex) استفاده می‌شود (شکل ۱۳-٤). این پروانه در قسمت عقب پوسته جاگذاری می‌شود تا جریان مایع براحتی صورت پذیرد. پروانه فوق دارای شکلی ساده با تیغه‌های شعاعی بوده و به‌صورت نیمه باز ساخته می‌شود.

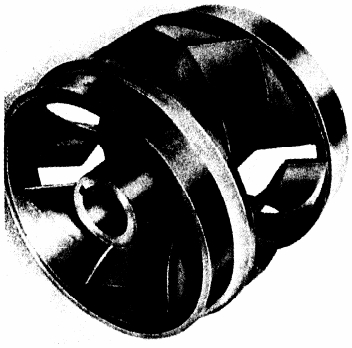


شکل (۳-٤): پروانه بسته با دو مکش و تیغه‌های فرانسیس

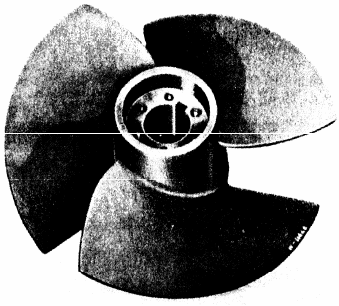


شکل (۲-٤): پروانه بسته با یک مکش و تیغه‌های تخت

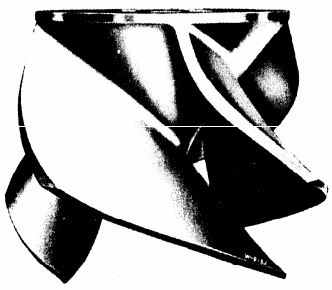
شکل (٥-٤): پروانه بسته، یک مکش، تیغه فرانسیس با سرعت مخصوص کم



شکل (٤-٤): پروانه بسته، با دو مکش و تیغه‌های تیغه‌های فرانسیس و سرعت مخصوص زیاد



شکل (۷-٤): پروانه جریان محوری



شکل (٦-٤): پروانه باز از نوع جریان مختلط

ارتفاع مورد نیاز با انتقال گشتاوردرپمپ اعمال می‌شود. مایع با گشتاور کم در قسمت نافی وارد پروانه شده و شتاب آن توسط پروانه افزایش می‌یابد وبااعمال انرژی به مایع گشتاور آن افزایش داده می‌شود. راندمان این پروانه‌ها کم بوده ولی مشخصه‌های رفتاری آن شبیه پروانه‌های نیمه باز می‌باشد.

پروانه‌های بسته که برای مایعات حاوی لجن مورداستفاده قرارمی‌گیرند دارای تیغه‌های ساده وضخیم با صفحات نگهدارنده مقاوم بوده تا در اثر سایش زود فرسوده نشود. جهت محدود کردن میزان نشتی داخلی وجریان آزاد مایع، صفحه جلوئی پروانه دارای تیغه‌های خارج کننده مایع می‌باشد (شکل ١٤-٤).

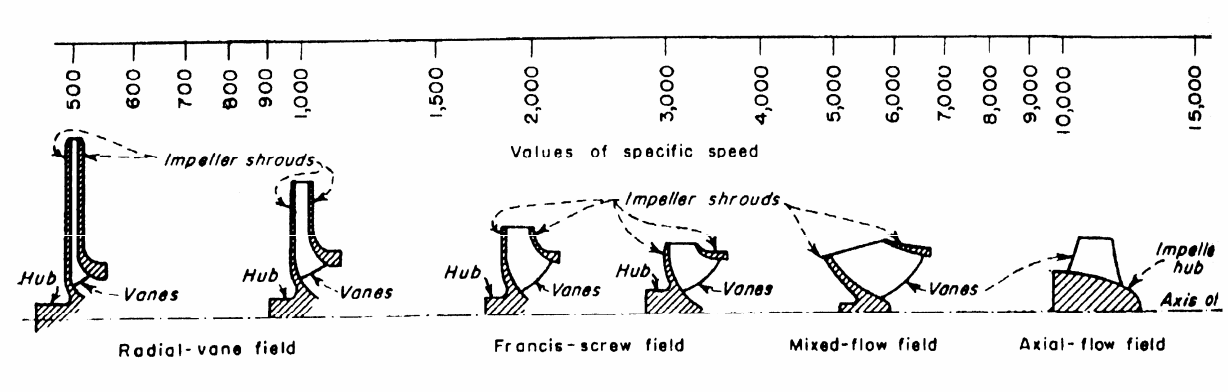
برای مواردی که پروانه با ارتفاع زیاد (بیشتر از ۲۰۰ متر) و توان بیشتر از ۲۲۵ کیلووات و یا مواردی که جریان با ضربان فشار و سروصدای کم اهمیت داشته باشد، لازم‌است که اصلاحات لازم برروی پروانه صورت پذیرد. البته هدف اصلی، کاهش فشار ضربان در اثر عبور تیغه‌ها از گلوئی حلزونی می‌باشد.

اولین مرحله در دست یابی به هدف فوق داشتن حداقل لقی بین پروانه و تیغه‌های جمع آوری کننده (Collector Vanes) می‌باشد (شکل ١٥-٤). مقدار لقی درحدود ۲-۱ در صد قطر پروانه بسیار کم بوده وبهتراست که مقدار آن به ۵-۳ در صد قطر پروانه رسانیده شود تا ضمن رفع مشکلات فوق، پمپ دارای راندمان و عملکرد قابل قبول باشد.

یک راه حل منطقی برای دست یابی به جریان برگشتی کم، استفاده از پروانه‌های با تیغه‌های تناوبی (Staggered) بوده که در پمپهای با دبی زیاد (Fan Pump) مورداستفاده قرار می‌گیرد (شکل ١٦-٤). این پروانه‌ها دارای ۲ قسمت مکش بوده و به‌لحاظ آرایش خاص تیغه‌ها میزان ضربان در آن به نصف کاهش داده می‌شود. در پروانه‌های مخصوص با ارتفاع خیلی زیاد (بیشتر از ۷۵۰ متر) وتوان ۱۳۵۰۰ کیلو وات بادوتکه کردن وتناوبی نمودن تیغه‌ها می‌توان مشکل مقاومت پیچشی تیغه‌ها در بین صفحات نگهداری کننده را بهبود بخشید. استفاده از پیش ران (Inducer) (شکل ١٧-٤)یک طرح خاص برای پمپهای جریان محوری می‌باشد. این قطعه در جلوی پروانه اصلی و به‌صورت سری با آن نصب شده تا ارتفاع مایع ورودی به پروانه اصلی را به‌مقدار مورد نیاز افزایش داده تا ازاین طریق NPSHA افزایش یابد. از آنجائی که این قطعه یک پروانه با ارتفاع کم می‌باشد لذا (NPSHR) آن بسیار نا چیز بوده ولذا با کمترین میزان کاویتاسیون و بدون آسیب رساندن به پروانه اصلی وکاهش ارتفاع پمپ کار می‌کند.

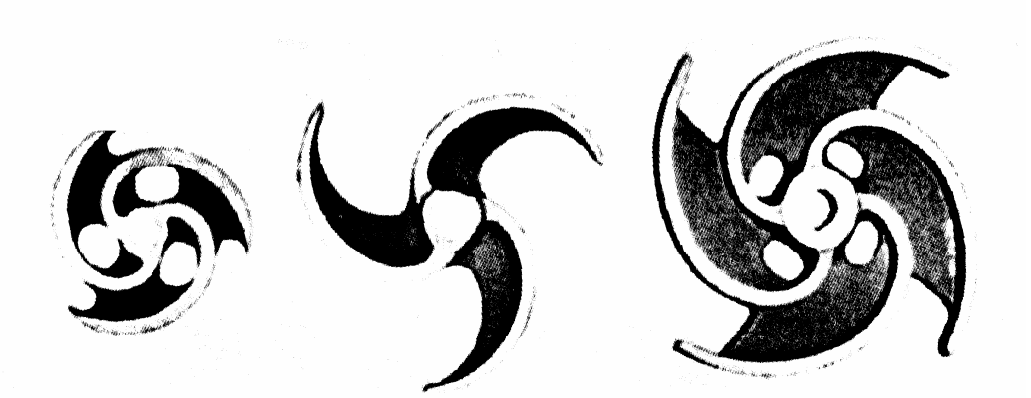
اگرپیش ران به‌طور صحیح طراحی و به‌کار گرفته شود، اجازه می‌دهد تا پمپ با ارتفاع بالاتر(با همانNPSHA قبلی) و یا با ارتفاع قبلی (با NPSHA کمتر) کار کند. البته قطعه فوق دارای

محدودیت‌هائی از نظر شرایط کاری قابل قبول می‌باشد، مثلاُ برای دبی زیاد، ارتفاع اعمال شده از سوی آن ممکن‌است چندان بالا نباشد تا بتواند NPSHR پروانه راتأمین نماید.
بهره‌برداری ازآن در شرایط خارج از شرایط پایدار(Stable) در پمپ می‌تواند باعث بروز کاویتاسیون، سروصدا، لرزش گردد.

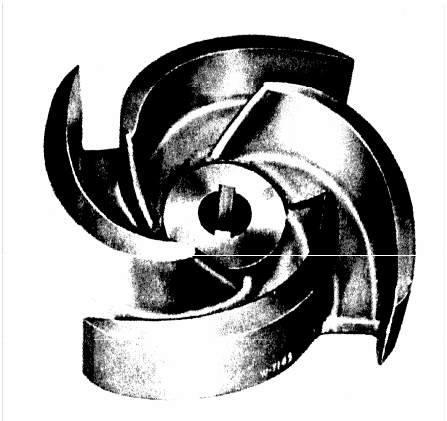


شکل (۸-٤): تغییرات سرعت مخصوص با شکل پروانه

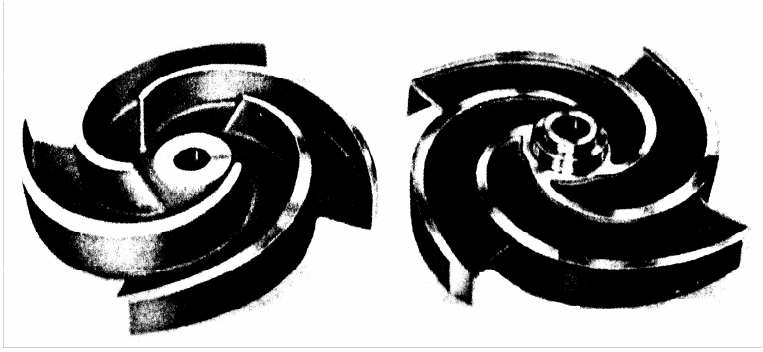
تذکر: مقادیر داده شده در شکل در سیستم آمریکایی بوده و برای تبدیل آن به سیستم متریک باید برعدد ۵۱/۶۵ تقسیم کرد.



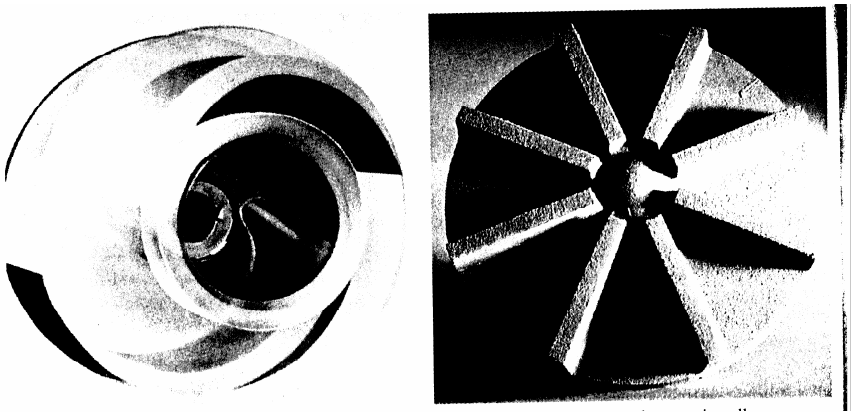
شکل (۹-٤): پروانه‌های باز - شکلهای چپ و راست با صفحات نگهدارنده تقویت شده اند.



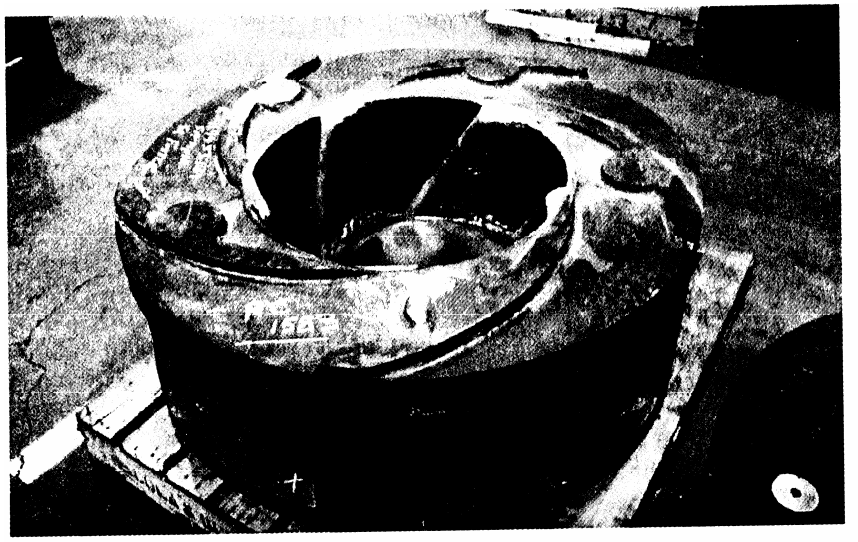
شکل (۱۰-٤): پروانه نیمه باز



شکل (۱۱-٤): پروانه نیمه باز - شکل سمت چپ (سمت عقب)، شکل سمت راست (سمت جلو)



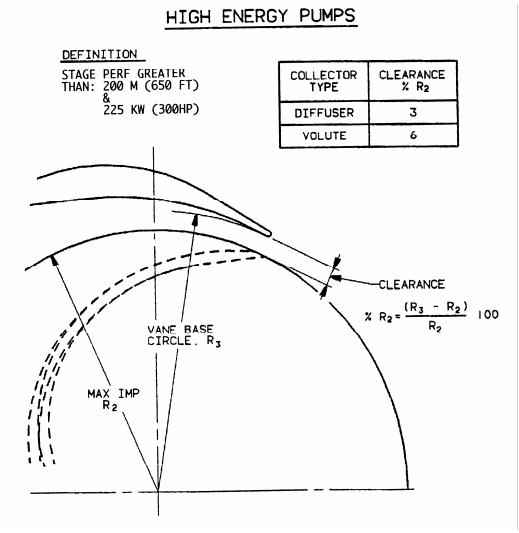
شکل (۱۳-٤): پروانه القایی مغشوش شکل (۱۲-٤): پروانه غیر قابل گرفتگی با تیغه‌های شعاعی



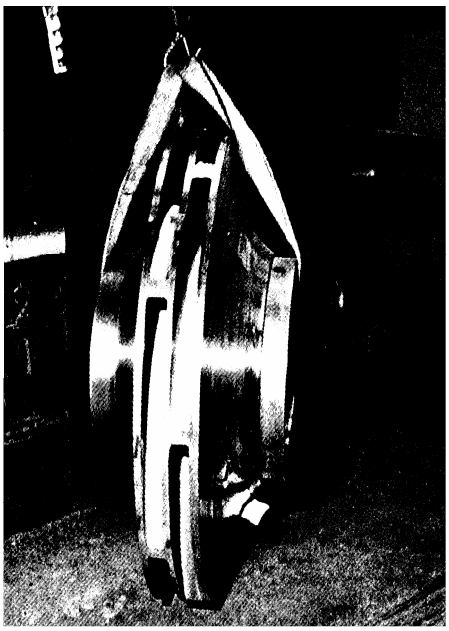
شکل (١٤-٤) پروانه بسته جهت انتقال لجن‌های آبکی

۳-۴: ساخت

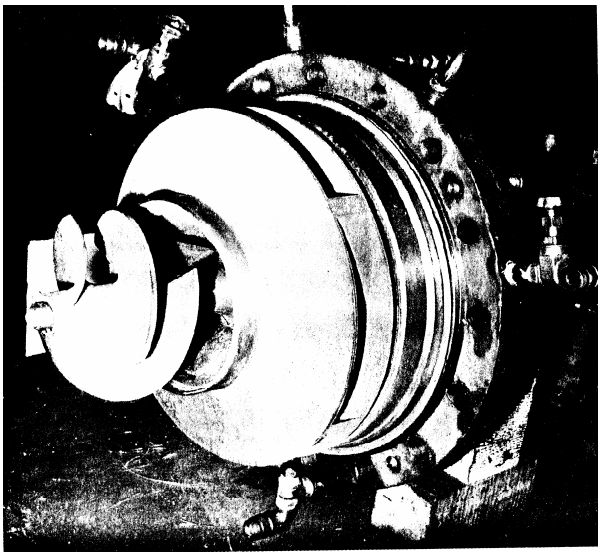
در گذشته اغلب پروانه، به‌صورت ریخته گری ساخته می‌شدند. پروانه‌های ساخته شده غالباً یک پارچه بوده مگر در اندازه‌های کوچک و یامواردی که سرعت مخصوص پروانه درحدی باشدکه اجباراً می‌بایستی پروانه را دو تکه ساخته وبعد ازعملیات ماشین کاری آن‌رامونتاژ کرد. امروزه به‌لحاظ نیاز به طراحی پروانه‌های خاص نظیر پروانه‌های بسته کوچک، بسیاری از آنها به‌شکل پرسی و از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شده وسپس جوشکاری موضعی می‌گردند.



شکل (۱۵-٤): لقی محوری بین پروانه و تیغه‌های ثابت (فاصله هوایی B)



شکل (۱٦-٤): پروانه با دو مکش همراه با تیغه‌های تکه ای (Split) تناوبی (Staggered)



شکل (۱۷-٤): پروانه با قطعه پیش ران (Inducer)

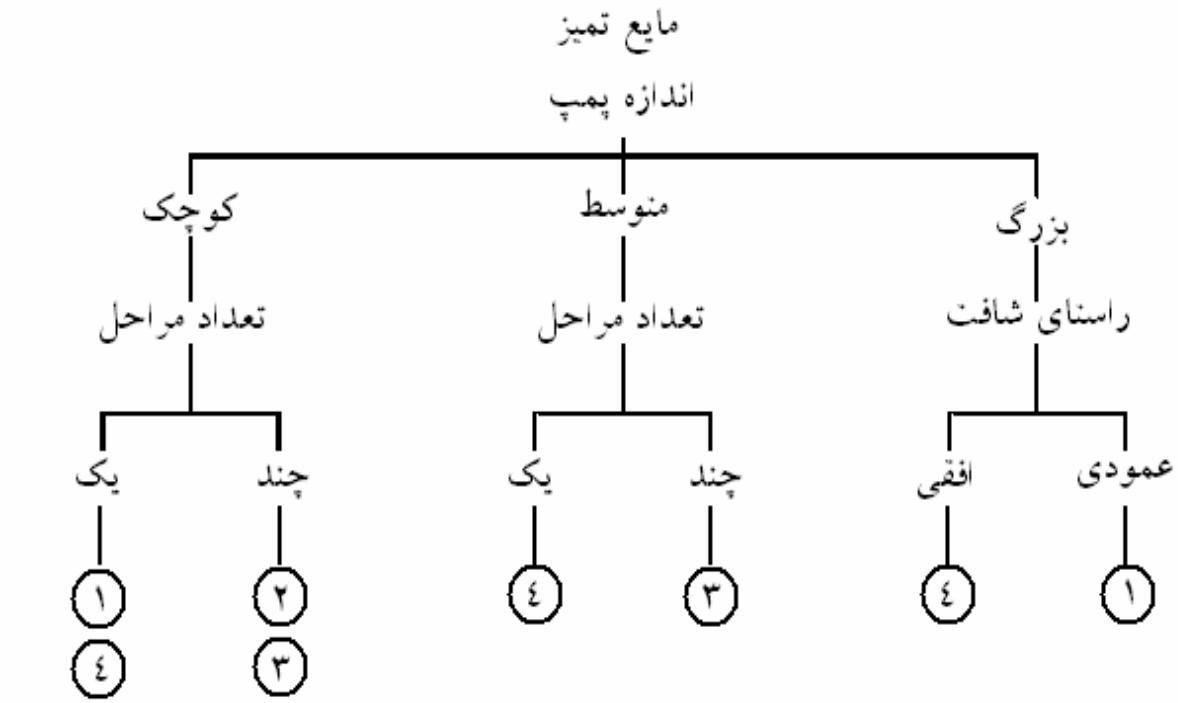
پروانه‌هائی که با این روش ساخته می‌شوند دارای دقت وکیفیت بهتری بوده و به همین خاطر راندمان آنها بالاتر از پروانه‌های ساخته شده به‌روش ریخته گری می‌باشد. بالا بودن سرعت تولیدموجب کاهش قیمت تمام شده آنها می‌گردد. ازترکیب دو روش فوق برای ساخت پروانه‌های بزرگ پمپها و توربین‌هااستفاده می‌شود. این روش ضمن بهبود شرایط طراحی و کیفیت پروانه، باعث کاهش قیمت پروانه نیز می‌گردد. با این وجود هنوز هم‌استفاده از ریخته گری به‌عنوان متداولترین روش جهت ساخت پروانه‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. پروانه‌های پلاستیکی به‌روش قالب گیری ساخته می‌شوند.

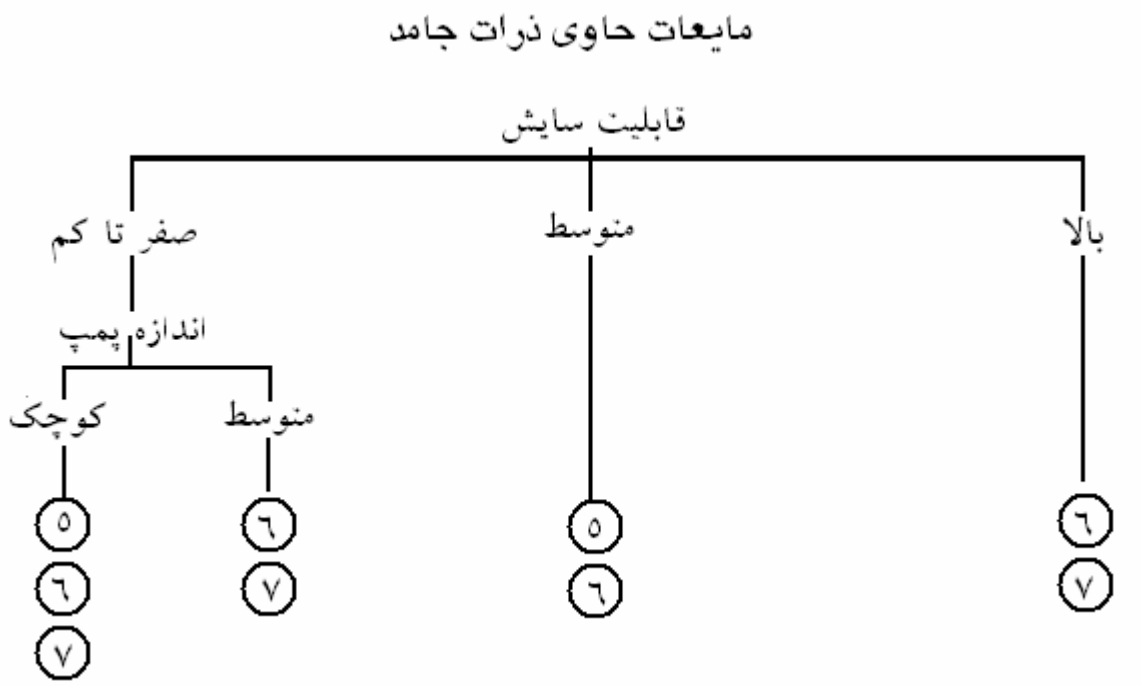
۴-۴: انتخاب نوع پروانه

با توجه به مطالب گفته شده دراین بخش، میتوان نتیجه گرفت که انتخاب پروانه بشدت به شرایط بهره‌برداری و خصوصیات مایع مورد پمپاژ بستگی دارد. در شکل (۱۸-٤) چگونگی انتخاب پروانه مناسب به‌صورت یک دستورالعمل ارائه شده‌است که ازآن می‌توان به‌عنوان یک راهنما والگودرانتخاب پروانه مناسب‌استفاده کرد.

۴-۵: تعمیرات پروانه

بعد از باز کردن پروانه، باید وضعیت آن از نظر سایش، خوردگی و کاویتاسیون مورد بررسی دقیق قرار گیرد. به‌علت بالا بودن عمر مفید برنز، بسیاری از سازندگان پمپ‌ترجیح می‌دهند که پروانه را از جنس برنز بسازند. اگر مایع مورد پمپاژ حاوی مقدار کمی‌شن و ماسه باشد، پروانه را می‌توان از برنز، چدن، چدن نیکل دار ساخت. در مواردی که مسئله سایش توسط مایع مورد پمپاژ شدید باشد، بهتراست که پروانه سخت کاری





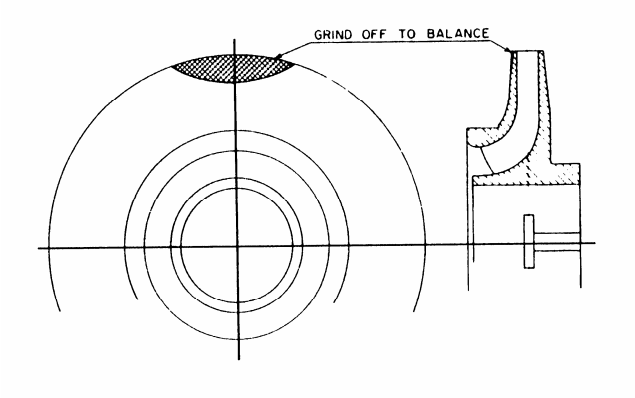
شکل (۱۸-٤): راهنمای انتخاب پروانه

۱-پروانه بسته آویزان با یک مکش ۲-پروانه بسته بایک مکش باشافت عبوری ۳-مشابه۲ باپروانه دومکش برای مرحله اول٤-پروانه بسته، دومکش باشافت عبوری ۵-پروانه باز آویزان بایک مکش ۶-پروانه نیمه بسته آویزان بایک مکش ۷- پروانه طرح ویژه برای شرایط سخت از نوع آویزان با یک مکش

شده تا در مقابل سایش مقاومت لازم را داشته باشد. در پمپهای کوچک، بهتراست که پروانه آسیب دیده را تعویض کرد واز بازسازی آن به هر طریق خودداری نمود. ولی در پروانه‌های بزرگ می‌توان به روش‌های مناسب آن‌را باز سازی کرد. گاهی اوقات خرابی پروانه به‌ویژه در سوراخ نافی و جای خار، ناشی از ریخته گری نا مناسب می‌باشد. وجود هرگونه نشتی درسوراخ نافی وجای خارمی‌تواند موجب تسریع سایش و لق شدن شافت گردد. با توسعه میزان‌ترک پروانه، لرزش ناشی از نوسان فشار که در اثر جریان گردشی داخلی، پدیده عبور تیغه ای (Vane Passing) و یا خرابی پروانه در هنگام تولید وجودداشته‌است، افزایش می‌یابد. تصمیم در مورد تعمیر و یا تعویض پروانه‌ترک برداشته، به اندازه، جنس و محل خرابی آن بستگی دارد.

به‌هرحال از آنجاکه پروانه یک قطعه متحرک می‌باشد، بعد از هرگونه تغییری در ساختار اولیه آن و یا در هر دوره تعمیرات اساسی باید از نظر بالانس بودن مورد بررسی قرار گیرد. انتخاب روش بالانس کردن(دینامیکی و یااستاتیکی) به نسبت عرض به قطر و سرعت دورانی پروانه بستگی دارد. به‌عنوان یک دستورالعمل کلی توصیه می‌شود که هر گاه نسبت قطر به عرض پروانه کمتر از ۶ بوده و یا سرعت دورانی آن بیشتر از ۳۶۰۰ دور در دقیقه باشد، پروانه باید حتماً بالانس دینامیکی شود. در صورت نیاز به بالانس دینامیکی، باید توجه نمود هر پروانه ای که

از نظر دینامیکی بالانس باشد، قطعاً از نظراستاتیکی بالانس خواهد بود ولی عکس آن صادق نمی‌باشد.



شکل (۱۹-٤): نحوه بارگیری از پروانه جهت بالانس کردن آن

چرا که بسیاری از پروانه‌هائی که از نظراستاتیکی بالانس هستند می‌توانند بطرز غیر قابل تصوری از نظر دینامیکی بالانس نبوده، به‌نحوی که حتی ممکن‌است بالانس کردن دینامیکی آن غیر ممکن باشد. به همین خاطر در مواردی که بالانس کردن دینامیکی پروانه ضروری باشد، نیازی به بالانس کردن‌استاتیکی آن نبوده و همان بالانس کردن دینامیکی کافی خواهد بود. در اغلب موارد بالانس کردن دینامیکی با بارگیری از روی پروانه صورت می‌گیرد، لذا در چنین مواردی باید دقت شود که این امر تأثیر نامطلوب برروی عملکرد هیدرولیکی و قابلیت اعتماد مکانیکی آن نگذارد. برای این منظور توصیه می‌شود که هرگز بارگیری از قسمت مجاری جریان مایع صورت نگیرد. مگر اینکه دراین قسمت تغییرات ضخامت زیاد وجود داشته باشد. هرگز از سوراخکاری و یا دندانه ای (Milling) کردن پروانه برای بالانس کردن آن‌استفاده نشود. هردو روش می‌توانند باعث تیز شدن نقاط گوشه ای شده که در نهایت می‌تواند موجب سایش و یا شروع‌ترک برداشتن پروانه گردد.

برای بالانس کردن پروانه‌هائی که تیغه‌ها دارای صفحه می‌باشند (پروانه‌های بسته و یا نیمه بسته) بهتراست که آن‌را روی دستگاه‌تراش با گیره لنگ نصب کرده و بار مورد نظر را از قسمت لبه ای پروانه برداشت (شکل ۱۹-٤). درصورتی که پروانه بسته باشد، بار مورد نظر رامی‌توان از دو صفحه برداشت کرد. تصمیم گیری در این زمینه به ضخامت صفحات و میزان بار مورد نظر بستگی دارد.

برای بالانس کردن پروانه‌های نیمه بسته، بار مورد نظر را می‌توان از صفحه و یا تیغه‌ها بر داشت کرد و این امر به ضخامت آنها بستگی دارد. برای پروانه‌های باز، فقط بارگیری از تیغه‌ها امکان پذیر می‌باشد.

بخش پنجم:
سرعت مخصوص و کاربری‌های آن

۱-۵:مقدمه

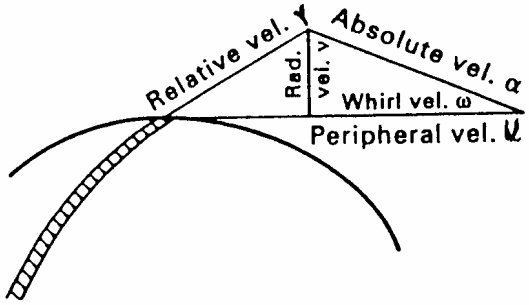
همواره در بررسی عملکرد ورفتار پمپهای گریز ازمرکز این سئوال مطرح می‌شود که آیا روش مناسبی برای دسته بندی این پمپها ازنظر رفتاری وجوددارد یا خیر ؟

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که رفتار هرپمپ گریز ازمرکزعمدتا" به مشخصه‌های طراحی پروانه وکانال جریان مایع درپوسته آن بستگی دارد. به همین خاطر براساس الگوی ریاضی موردنظر، می‌توان پمپهای گریزازمرکزرابدون توجه به ابعاد فیزیکی آن در گروههای معینی دسته بندی نمود که ازنظر رفتار هیدرولیکی دارای مشابهت‌های زیادی می‌باشند. واژه ای که معرف ویژگیهای رفتاری پمپ می‌باشد را اصطلاحا" عدد شکل (Shape Number) ویا سرعت مخصوص (Specific Speed) می‌نامند.

سرعت مخصوص می‌تواند در شناخت چگونگی رفتار پمپ (از نظر تغییرات ارتفاع، توان مصرفی، راندمان و...) و انتخاب پمپ مفید واقع گردد. آنچه در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد شامل تعریف سرعت مخصوص، نحوه محاسبه آن، شناخت رفتار پمپ بر حسب سرعت مخصوص آن، استفاده از آن در انتخاب پمپ مناسب، تغییرات راندمان پمپ بر حسب سرعت مخصوص پمپ و... می‌باشد.

۲-۵: محاسبه سرعت مخصوص

درشکل (۱-۵) مثلث سرعت جریان مایع در خروجی تیغه پروانه پمپ نشان داده شده‌است:



- Typical outlet velocity diagram.

شکل (۱-۵): مثلث سرعت در خروج پمپ

در مثلث فوق سرعت محیطی پروانه (u)، سرعت نسبی مایع در قسمت خروجی پروانه (r) و سرعت مطلق مایع در هنگام خروج از پروانه (a) نشان داده شده‌است.

فرض می‌شود که دریک پمپ تئوریک، بردار سرعت مطلق مایعی که از پروانه خارج می‌شود (a) با سرعت و زاویه مایع در حلزونی (Volute)پمپ منطبق می‌باشد، به‌عبارت دیگر فرض بر این‌است که خروج مایع از پروانه بدون بروز پدیده شوک (Shock) صورت پذیرد. ضمنا" فرض می‌شود که دبی جریان در پمپ تحت شرایط فوق همان دبی طراحی پمپ بوده و راندمان

هیدرولیکی پمپ حداکثر باشد. به‌عبارت دیگر اگر t، سرعت جریان مایع در حلزونی باشد، در اینصورت خواهیم داشت: a=t بنابر قرارداد اگر Y نسبت هندسی پمپ باشد:

$$Y = \frac{A_i}{A_t} = \frac{t}{r} \qquad (۵-۱)$$

که در آن A_t, A_i به‌ترتیب سطح مقطع جریان مایع در خروجی پروانه و گلوئی کانال پیچک می‌باشد.

بدیهی‌است که خصوصیات رفتاری پمپ به نسبت فوق (Y) بستگی داردو در بهترین شرایط Y=1 می‌باشد.

براساس قوانین هیدرولیکی در پمپهای گریز از مرکز:

$$\text{H (ارتفاع)} \propto u^2 \propto D_i^2 N^2 \Rightarrow D_i \propto \sqrt{H}/N \qquad (۵-۲)$$

$$\text{a (سرعت مطلق پروانه)} = \text{t (سرعت در پیچک)} \propto u \propto \sqrt{H} \qquad (۵-۳)$$

$$\text{Q (دبی پمپ)} = t \times A_t \propto \sqrt{H}.A_t \qquad (۵-٤)$$

لذا:

$$A_t \propto \frac{Q}{\sqrt{H}} \Rightarrow D_t \propto \frac{\sqrt{Q}}{H^{1/4}} \qquad (۵-۵)$$

که در آن D_t, D_i به‌ترتیب قطر پروانه و قطر گلوئی پیچک می‌باشد. بنابراین با توجه به روابط (۵-۲)و(۵-۵)خواهیم داشت: (۵-۶)

$$\propto \frac{D_t}{D_i} \propto \frac{\sqrt{Q}/H^{1/4}}{\sqrt{H}/N} = N\sqrt{Q}/H^{3/4} \text{(سرعت مخصوص)}$$

بنابر تعریف اگر پمپی با سرعت دورانی N دور در دقیقه در ارتفاع ۱ متر بتواند دبی برابر با ۱ متر مکعب در ثانیه را بر قرار کند، سرعت مخصوص پمپ در سیستم SI (n_q)برابر با N خواهد بود:

$$n_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{0.75}} \qquad (۵-۷)$$

که در آن:

n_q = سرعت مخصوص در سیستم SI

Q = دبی پمپ — متر مکعب در ثانیه

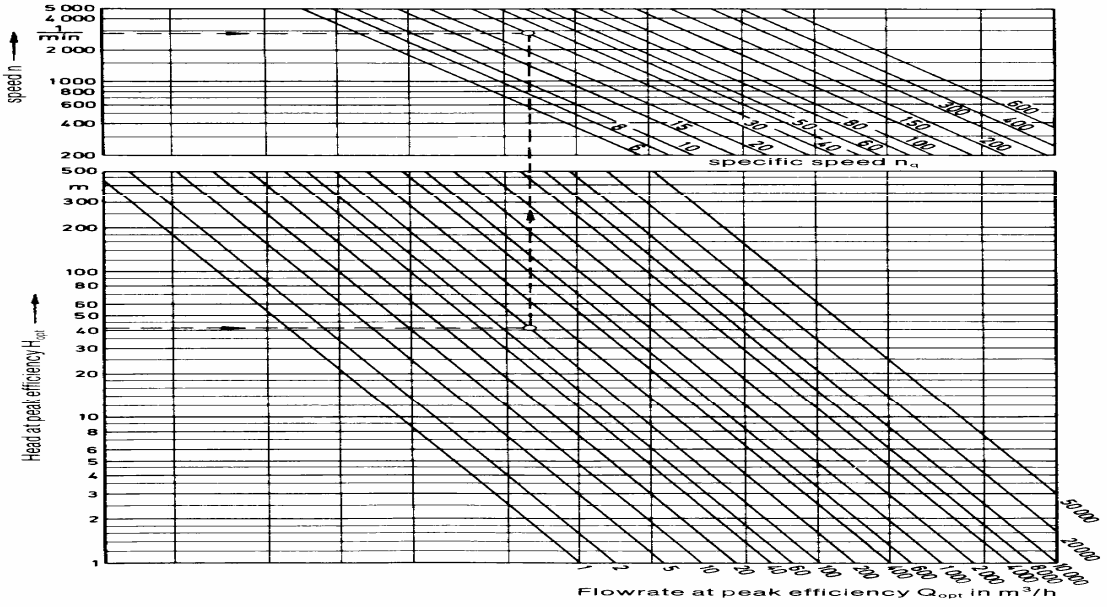
H = ارتفاع — متر

N = سرعت دورانی پمپ — دوردردقیقه

لازم به ذکراست که Q,H، مقادیر مربوط به نقطه بهترین راندمان پمپ (BEP) می‌باشد.

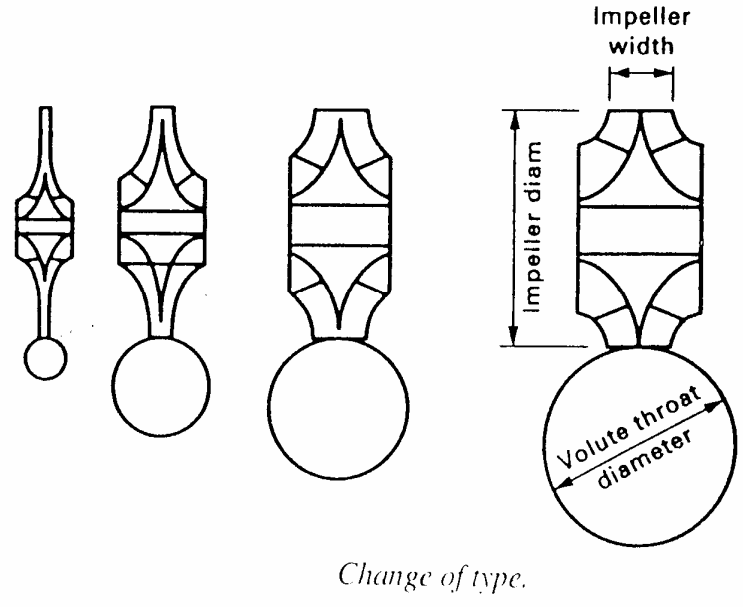
اگر پمپ دارای دو قسمت مکش باشد (Double - Suction)، مقدار Q مورداستفاده در رابطه (۵-۷) باید نصف دبی پمپ در نظر گرفته شود. رابطه (۵-۷) برای پمپهای یک مرحله‌ای بوده و

لذا برای پمپهای چند طبقه ای، ارتفاع کلی پمپ باید بر تعداد طبقات تقسیم شده و ارتفاع قابل دسترس در هر طبقه در رابطه (۷-۵) مورداستفاده قرار گیرد



شکل (۲-۵): نمودار محاسبه سرعت مخصوص

در شکل(۲-۵)، تغییرات سرعت مخصوص بر حسب شکل پروانه (بافرض ثابت بودن قطر پروانه) نشان داده شده‌است. شکل (۲-۵) نشان می‌دهد که با تغییر نسبت قطر گلوئی (یا عرض پروانه) به قطر پرو انه می‌توان مشخصه‌های رفتار پمپ را تغییر داد. مثلاً پمپی که برای ارتفاع زیاد و دبی کم ساخته می‌شوند، دارای پروانه ای با قطر زیاد و عرض کم بوده، حال آنکه پمپی که پروانه آن دارای قطر کم و عرض زیاد می‌باشد، برای کاردرارتفاع کم و دبی زیاد مورداستفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۲-۵): تغییرات سرعت مخصوص بر حسب شکل پروانه با فرض ثابت بودن قطر پروانه

مورد فوق را می‌توان با سرعت مخصوص نیز تعریف کرد. پمپهای با سرعت مخصوص کم (پمپهای جریان شعاعی Radial - Flow) برای ارتفاع زیاد و دبی کم و پمپهای با سرعت مخصوص زیاد (پمپهای جریان محوری Axial - Flow) برای ارتفاع کم و دبی زیاد مناسب می‌باشند. پمپهائی که سرعت مخصوص آن بین دونوع پمپ فوق قرار دارد، یا به‌عبارت دیگر برای دبی و ارتفاع متوسط مناسب می‌باشند را پمپهای جریان مختلط (Mixed - Flow) می‌نامند.

بزرگترین ویژگی n_q این‌است که به‌کمک آن می‌توان پمپها را با توجه به سرعت دورانی آن و ازنظر H,Q قابل دستیابی و بدون در نظر گرفتن ابعاد پمپ دسته بندی نمود. یا به‌عبارت دیگر این امکان‌را مهیا می‌سازد که بتوان پمپهای گریز ازمرکز رادر خانواده‌های معینی طبقه بندی کرد. این طبقه بندی نشان می‌دهد که پمپهای با سرعت مخصوص یکسان و یا نزدیک بهم قطعاً دارای تشابه فراوانی در ساختار مکانیکی پروانه خواهند بود. به‌عبارت دیگر بادر دست داشتن n_q می‌توان شکل پروانه، شکل منحنی H-Q وحتی منحنی P-Q (P توان مصرفی پمپ می‌باشد) وراندمان پمپ راازقبل پیش بینی کرد.

هنگامی‌دو پمپ را مشابه می‌نامند که یک نسبت تشابه بین سطوح تر شده (Wetted Surfaces) آن وجود داشته باشد. پمپهائی که ازنظر هیدرولیکی مشابه می‌باشندرااصطلاحاً هم خانواده (Homologous) می‌نامند.

تذکر: در سیستم آمریکائی که دبی پمپ بر حسب گالن در دقیقه (GPM) و ارتفاع بر حسب فوت تعریف می‌شود، سرعت مخصوص با N_S نشان داده شده و رابطه n_q و N_S به‌صورت زیر می‌باشد.

$$N_S = ۶۵/۵۱ \times n_q \qquad (۵-۸)$$

۳-۵: دسته بندی پمپها براساس منحنی سرعت مخصوص

همانطوری که قبلاً گفته شد، منحنی مشخصه (منحنی H-Q) پمپهای گریز از مرکزرا بر حسب سرعت مخصوص آن می‌توان تقسیم بندی نمود. در این زمینه در مراجع مختلف نسبت به محدوده تقسیم بندی پمپها وحدت نظریه وجود نداشته و اختلاف نظر در این زمینه وجود دارد. در این زمینه نظرات دو مرجع مختلف ارائه می‌گردد.

در مرجع [۱]، نظر براین‌است که پمپهای با n_q ۱۲۰ $> (N_S$ <6200) جزء پمپهای جریان شعاعی، پمپهای با n_q=۴۰-۲۰۰ (N_S =۲۰۰۰-۱۰۰۰۰) جزء پمپهای جریان مختلط و بالاخره پمپهای با n_q = ۱۶۰-۳۵۰ (N_S=۸۰۰۰-۱۸۰۰۰) جزء پمپهای جریان محوری می‌باشند.

نویسنده مرجع [۸] معتقداست که حداکثر n_q برای پمپهای جریان شعاعی ۸۰ بوده و پمپهای با n_q=۸۰-۱۸۰ جزء پمپهای جریان مختلط و n_q بالاتر از ۱۸۰ جزء پمپهای جریان محوری می‌باشند.

البته به نظر می‌رسد که تقسیم بندی اعلام شده از سوی مرجع [۸] از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد.

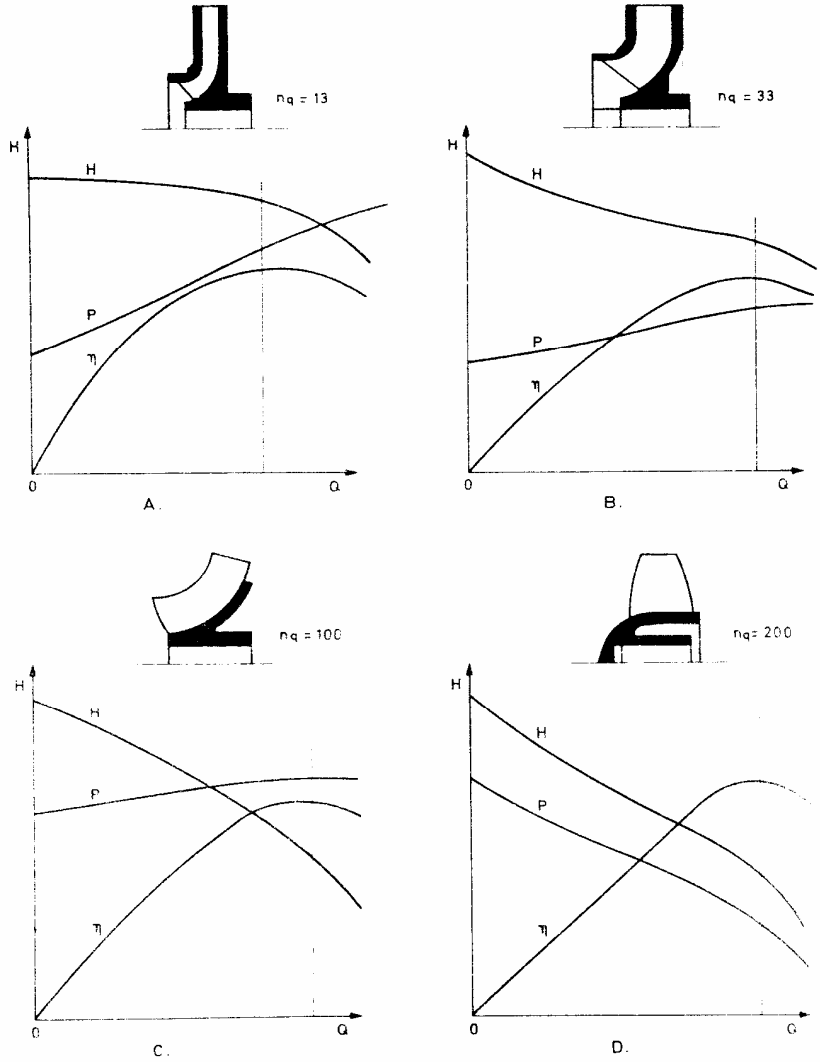
همانطوری که قبلاً نیز گفته شد، سرعت مخصوص پمپها به شکل پروانه‌های آن بستگی داشته و در شکل (۸-٤) مقادیر N_S برای انواع پروانه‌ها نشان داده شده‌است.

در شکل (۳-۵) منحنی‌های مشخصه ٤ پمپ و در شکل (٤-۵) منحنی‌های H-Q و (η-Q) پمپ‌های مختلف بر حسب سرعت مخصوص آنها نشان داده شده‌است.

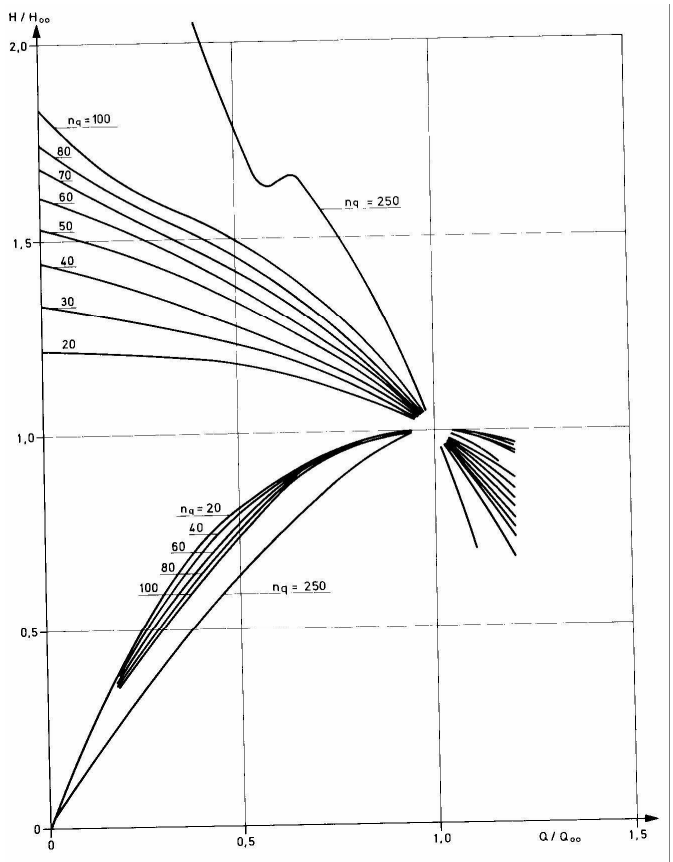
همانطوری که قبلاً گفته شد بامحاسبه سرعت مخصوص می‌توان نوع پمپ مورد نیاز راپیش بینی کرد. مثلاًاگربه پمپی نیاز باشد تاباسرعت دورانی ۲۹۰۰ دوردردقیقه بتواند ۲۰۰ متر مکعب در ساعت آب رادرارتفاع کلی ۶۰ متر جابجاکند، دراین صورت:

$Q = 200/3600 = 0.0556$ متر مکعب در ثانیه

$$n_q = \frac{2900\sqrt{0.0556}}{(60)^{0.75}} = 31.7 \Rightarrow N_S = 1637$$ پمپ جریان شعاعی



شکل (۳-۵): منحنی مشخصه پمپ بر حسب شکل پروانه و سرعت مخصوص



Approximate head and efficiency evolution as a function of pump delivery for various specific speeds.

شکل (٤-٥): نمودار منحنی‌های (H-Q) و (η -Q) بر حسب سرعت مخصوص پمپ

۴-۵: رابطه راندمان پمپ با سرعت مخصوص

در انتخاب پمپ مناسب جهت پمپاژ مایعات، راندمان پمپ تأثیر بسزائی برروی هزینه‌های جاری سیستم می‌گذارد. بررسی‌های انجام شده برروی پمپهای گریزازمرکز نشان می‌دهد که راندمان این پمپهابه سرعت مخصوص و ظرفیت (اندازه) پمپ بستگی دارد. در شکل (۵-۵) منحنی تغییرات راندمان پمپ (η) نسبت به سرعت مخصوص (n_q) و دبی پمپ (Q) نشان داده شده‌است.

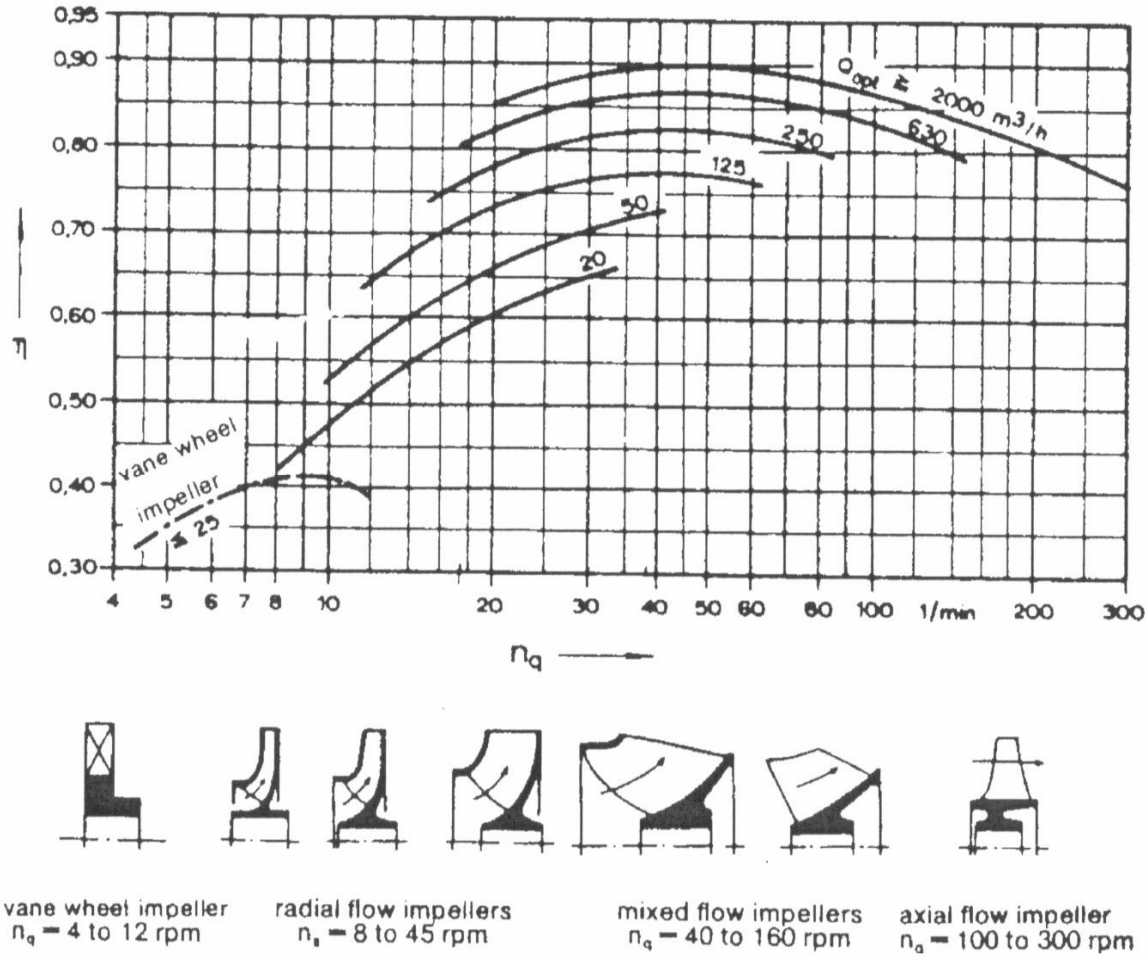
مثال: پمپ مدل ۲۵۰-۱۲۵ ساخت شرکت پمپیران باسرعت دورانی ۱٤٥۰ دوردردقیقه در BEP، ۲۱۵مترمکعب درساعت آب را در ارتفاع ۲۰ متری پمپاژ می‌کند. راندمان پمپ در شرایط فوق حدوداً چه میزان باید باشد ؟

حل:

$$n_q = \frac{1450\sqrt{215/3600}}{(20)^{0.75}} = 37.5$$

پمپ فوق از نوع جریان شعاعی بوده و راندمان آن براساس شکل (۵-۵) باید حدود ۸۲٪ باشد. در کاتالوگ این پمپ راندمان آن در BEP حدود ۸٤/۵٪ذکرشده‌است. ازآنجائی که نمودار

(۵-۵) دریک دامنه وسیعی از پمپهای گریزازمرکز تعریف شده‌است مغایرت حدود ۲/ ۵٪، بالا بودن دقت این نمودار را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۵): منحنی تغییرات راندمان پمپهای گریزازمرکز نسبت به n_q و Q

راندمان پمپ به از دست رفت انرژی (ناشی از اصطکاک، پدیده شوک و...) در پوسته پمپ بستگی دارد.

همانطوری که از شکل فوق پیداست، به ازاءِ دبی معین، باافزایش سرعت مخصوص (تا n_q=۵۰) راندمان پمپ افزایش یافته و بعداز آن مجدداً کاهش می‌یابد. پائین بودن راندمان در سرعت مخصوص کم رابابد ناشی از بالا بودن قطر پروانه و باریک بودن عرض آن(ونتیجتاً عرض پیچک پوسته پمپ) دانست که منجر به بالا رفتن از دست رفت انرژی ناشی از اصطکاک می‌گردد.

باافزایش سرعت مخصوص (کاهش قطر پروانه و افزایش عرض آن)، تأثیر نامطلوب ازدست رفت انرژی ناشی از اصطکاک کاهش یافته و همین امر باعث افزایش راندمان پمپ می‌گردد. افزایش راندمان تا میزان معینی از سرعت مخصوص ادامه داشته ولی بعد از آن سیر نزولی به خود می‌گیرد. علت امردراین‌است که تأثیر پدیده فوق در سرعت‌های مخصوص بالا، به‌تدریج کاهش یافته، در عوض به‌خاطر عریض و کوتاه شدن جریان مایع در پروانه و دورشدن از شرایط

طراحی پروانه و پوسته، هدایت جریان مایع درپروانه مشکل شده و به همین خاطر دراین شرایط ازدست رفت انرژی دراثر جریان نامطلوب مایع درپروانه افزایش یافته که بسهم خود موجب کاهش راندمان پمپ می‌گردد.

درحدفاصل سرعت مخصوص کم و زیاد (پمپهای جریان شعاعی و جریان محوری) شرایطی وجود دارد که پمپهای طراحی شده برای این شرایط، دارای راندمان مطلوبی می‌باشند (پمپهای جریان مختلط). این امر به طراحان اجازه می‌دهد تاباانتخاب عددشکل (سرعت مخصوص)و سرعت دورانی مناسب، ویژگیهای مورد نظر خودرادر طراحی پمپ اعمال نمایند.

نمودار فوق نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت (بزرگ شدن پمپ) در سرعت مخصوص ثابت، راندمان پمپ افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که در یک گروه معینی از پمپهای گریزازمرکز، هرچه پمپ درابعاد بزرگتری ساخته شود، راندمان آن افزایش می‌یابد. این امررامی‌توان ناشی از کاهش سهم ازدست رفت انرژی ناشی ازاصطکاک وپدیده شوک درمقابل کل انرژی داده شده به پمپ دانست.

لازم به ذکراست که هرچه نحوه ورود مایع به‌درون پروانه بهتر (زاویه ورودی بزرگتر) باشد، راندمان پمپ افزایش می‌یابد. امروزه پروانه پمپهای گریزازمرکز بازاویه ورودی ۲۵-۱۰ درجه ساخته می‌شوند، ولی از آنجائی که افزایش زاویه ورودی مایع به‌درون پروانه باعث افزایش NPSHR می‌گردد، لذا امروزه اغلب پروانه‌ها بازاویه ورودی ۱۷درجه ساخته می‌شوند.

۵-۵: کاربری‌های سرعت مخصوص

الف: انتخاب پمپ

در انتخاب پمپ مورد نظر، نخست باید سعی شود که نقطه کار حتی الامکان به BEP پمپ خریداری شده نزدیک باشد. با این فرض که در اغلب موارد نیز واقعیت دارد می‌توان دبی، ارتفاع و سرعت مخصوص پمپ مورد نیاز و به‌دنبال آن نوع پمپ مناسب برای شرایط بهره‌برداری را انتخاب کرد.

ب: محاسبه توان مصرفی

در طراحی پروژه‌های صنعتی بسیاری از موارد، ماهها قبل از انتخاب و خرید پمپ، باید توان مصرفی پمپ را محاسبه تا به‌کمک آن بتوان توان برق مصرفی در واحد را پیش بینی کرد. برای این منظور با تعین دبی، ارتفاع و سرعت دورانی پمپ می‌توان سرعت مخصوص پمپ را محاسبه و سپس به‌کمک شکل (۵-۷) راندمان تقریبی پمپ را به‌دست آورد. آنگاه بااستفاده از رابطه (۵-۹) توان مصرفی پمپ را محاسبه کرد.

$$P_{(KW)} = \frac{\rho Q H}{367 \eta} \qquad (۵-۹)$$

که در آن ρ وزن مخصوص مایع، Q دبی پمپ بر حسب مترمکعب در ساعت، H ارتفاع پمپ بر حسب متر و η راندمان پمپ می‌باشد.

مثال ۱: برای انتقال آب با دبی Q=200 m3/hr و ارتفاع کل ۸۰ متر، پمپ با سرعت ۲۹۰۰ دور در دقیقه مورد نظر می‌باشد، توان مصرفی پمپ چقدر می‌باشد؟

حل:

$$n_q = \frac{2900\sqrt{200/3600}}{(80)^{0.75}} = 25.5$$

پمپ مورد نیاز از نوع جریان شعاعی می‌باشد.

بااستفاده از شکل (۵-۵) و با دردست داشتن n_q و دبی پمپ راندمان پمپ حدود ۷۹٪ می‌باشد.

$$P = \frac{1 \times 200 \times 80}{367 \times 0.79} = 55.2KW$$

مثال ۲-۵: بااستفاده از قوانین تشابه اثر قطر پروانه و سرعت دورانی پمپ را برروی سرعت مخصوص آن تعین کنید.

حل:

بر اساس قوانین تشابه:

$$Q = K_1 ND \qquad (۵-۹)$$

$$H = K_2 N^2 D^2 \qquad (۵-۱۰)$$

با قراردادن روابط فوق در رابطه (۵-۷) نتیجه می‌شود:

$$n_q = \frac{N\sqrt{K_1 ND}}{(K_2 N^2 D^2)^{0.75}} = \frac{K_1^{0.5} N^{1.5} D^{0.5}}{K_2^{0.75} N^{1.5} D^{1.5}} = K_3 \frac{1}{D} \qquad (۵-۱۱)$$

به‌عبارت دیگر سرعت مخصوص پمپهای گریز ازمرکز بر خلاف ظاهر رابطه (۵-۷) مستقل از سرعت مخصوص بوده ولی با افزایش قطر آن کاهش می‌یابد.

ج: تعیین تعداد مراحل پمپ

هرچند که از نظر تئوری می‌توان کلیه پمپ‌های گریزازمرکز را بصورت یک مرحله‌ای ساخت ولی به‌لحاظ بهبود راندمان، کاهش توان مصرفی، کاهش هزینه‌های تعمیراتی و... در مواردی که ارتفاع مورد نیاز در سیستم بالا باشد،ترجیحاً از پمپ‌های چند مرحله‌ای‌استفاده می‌شود. چرا که در صورت‌استفاده از پمپهای یک مرحله‌ای برای دست یابی به ارتفاع زیاد، سرعت مخصوص پمپ پائین بوده و همین امر منجر به انتخاب پمپ با راندمان پائین می‌گردد. پمپهای با راندمان پائین دارای توان مصرفی زیاد واستعداد خرابی‌های زودرس می‌باشد. با افزایش تعداد مراحل پمپ، هرچند که قیمت پمپ افزایش می‌یابد ولی در عوض توان مصرفی و میزان خرابی‌های آن (خرابی یاطاقانها، آب‌بندکننده، فرسایش قطعات دراثر جریان برگشتی و...) بهبود یافته و به همین خاطر در چنین مواردی بهتراست که از پمپ‌های چند مرحله‌ای‌استفاده شود.

البته افزایش تعداد مراحل ضمن افزایش قیمت پمپ، موجب افـزایش هزینـه‌هـای تعمیراتـی آن، پیچیده و طولانی شدن زمان تعمیرات را به‌دنبال خواهد داشت لذا باید دقت شود کـه ایـن امـر به‌نحوی صورت پذیرد که در نهایت منجر به انتخاب بهینه پمپ مورد نیاز گردد. مـوارد فـوق را می‌توان به‌کمک مثال زیر تشریح کرد.

مثال ۳-۵: برای انتقـال آب بـا دبـی ۱۰۰ متـر مکعـب در سـاعت و ارتفـاع ۱۵۰ متـر پمـپ چنـد مرحله‌ای مناسب می‌باشد؟

حل:

با توجه به بالابودن ارتفاع مورد نیاز نخست فرض می‌شود که سرعت دورانـی پمـپ ۲۹۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. اگر پمپ به‌صورت یک مرحله‌ای انتخاب شود:

$$m=1 \Rightarrow (n_q)_1 = \frac{2900\sqrt{50/3600}}{(200)^{0.75}} = 6.43$$

با مراجعه به شکل (۷-۵) مشخص می‌گردد که بـرای دبـی ۲۰۰ متـر مکعـب در سـاعت حـداقل سرعت مخصوص مجاز حدود ۱۵ می‌باشد.

از طرفی اگر پمپ به‌صورت mمرحله باشد.

$$n_q = \frac{N\sqrt{Q}}{(\frac{H}{m})^{0.75}} = m^{0.75} \times (n_q)_1 \qquad (۵-۱۲)$$

$$m=2 \Rightarrow (n_q)_2 = (2)^{0.75} \times 6.43 = 10.8 \langle 15$$

$$m=3 \Rightarrow (n_q)_3 = (3)^{0.75} \times 6.43 = 14.65 \langle 15$$

$$m=4 \Rightarrow (n_q)_4 = (4)^{0.75} \times 6.43 = 18.2 \Rightarrow \eta = 75\%$$

پمپ فوق از نظر راندمان در حد قابل قبول بوده ولی با این وجود بهتراسـت کـه شـرایط پمـپ مورد نظر به‌صورت ۵ مرحله‌ای نیز مورد بررسی قرار گیرد.

$$m=5 \Rightarrow (n_q)_5 = (5)^{0.75} \times 6.43 = 21.5 \Rightarrow \eta = 78\%$$

راندمان پمپ ۵ مرحله‌ای در مقایسه با ٤ مرحلـه‌ای حـدود ۳ درصـد بیـشتر بـوده و در عـوض قیمت آن بیشتراست. امروزه راندمان پمپ در مقایسه با قیمت آن از اهمیت بالایی قـرار داشـته و اکثراً طراحان سیستم‌های پمپاژترجیح می‌دهند که از پمپهای با راندمان بالاتراستفاده کنند. چـرا که ضمن کاهش هزینه انرژی در دوران بهره‌برداری، میزان توقفات آنها نیز کمتر مـی‌باشـد. در عوض قیمت و هزینه‌های تعمیـرات آن بیـشتر خواهـد بـود. در هـر حـال انتخـاب نهـایی بعهـده مهندس طراح پروژه می‌باشد.

بخش ششم:
تأثیر خواص فیزیکی مایع مورد پمپاژ برعملکرد پمپهای گریزازمرکز

۶-۱: مقدمه

کارآئی و عملکرد پمپهای گریزازمرکز به‌صورت یک دسته منحنی‌های مشخصه شامل منحنی‌های تغییرات ارتفاع قابل دسترس (H)، توان مصرفی (P)، راندمان (η) و NPSHR بر حسب دبی (Q) از سوی شرکتهای سازنده پمپ تهیه شده و در اختیار مشتریان قرار داده می‌شود.

با توجه به تنوع زیادی که در خواص فیزیکی مایعات نظیر وزن مخصوص، ویسکوزیته، درصد مواد جامد و میزان گاز حل شده در مایع وجوددارد، عملاً امکان ارائه اطلاعات لازم برای تأثیر هر یک از آنها برروی عملکرد پمپهای ساخته شده از سوی شرکتهای تولید کننده پمپ برای مشتریان وجود ندارد.

به همین خاطر، کلیه اطلاعات مورد نیاز دررابطه با عملکرد پمپهای گریزازمرکز برای آب خالص به‌عنوان پر مصرف‌ترین مایع در صنایع تهیه شده ودر اختیار مشتریان قرار داده می‌شود.

بدیهی‌است هرگونه تغییر در خواص فیزیکی مورد اشاره در مایع مورد انتقال موجب تغییر در رفتار پمپ گردیده و به همین خاطر چگونگی تأثیرآنها در منحنی‌های مشخصه پمپ باید مورد توجه قرار گیرد.

دراین بخش تأثیر خواص فیزیکی مایع مورد انتقال نظیر وزن مخصوص، ویسکوزیته، در صد گازحل شده در مایع و حضور مواد جامد برروی عملکرد پمپهای گریزازمرکز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۲: تأثیر وزن مخصوص

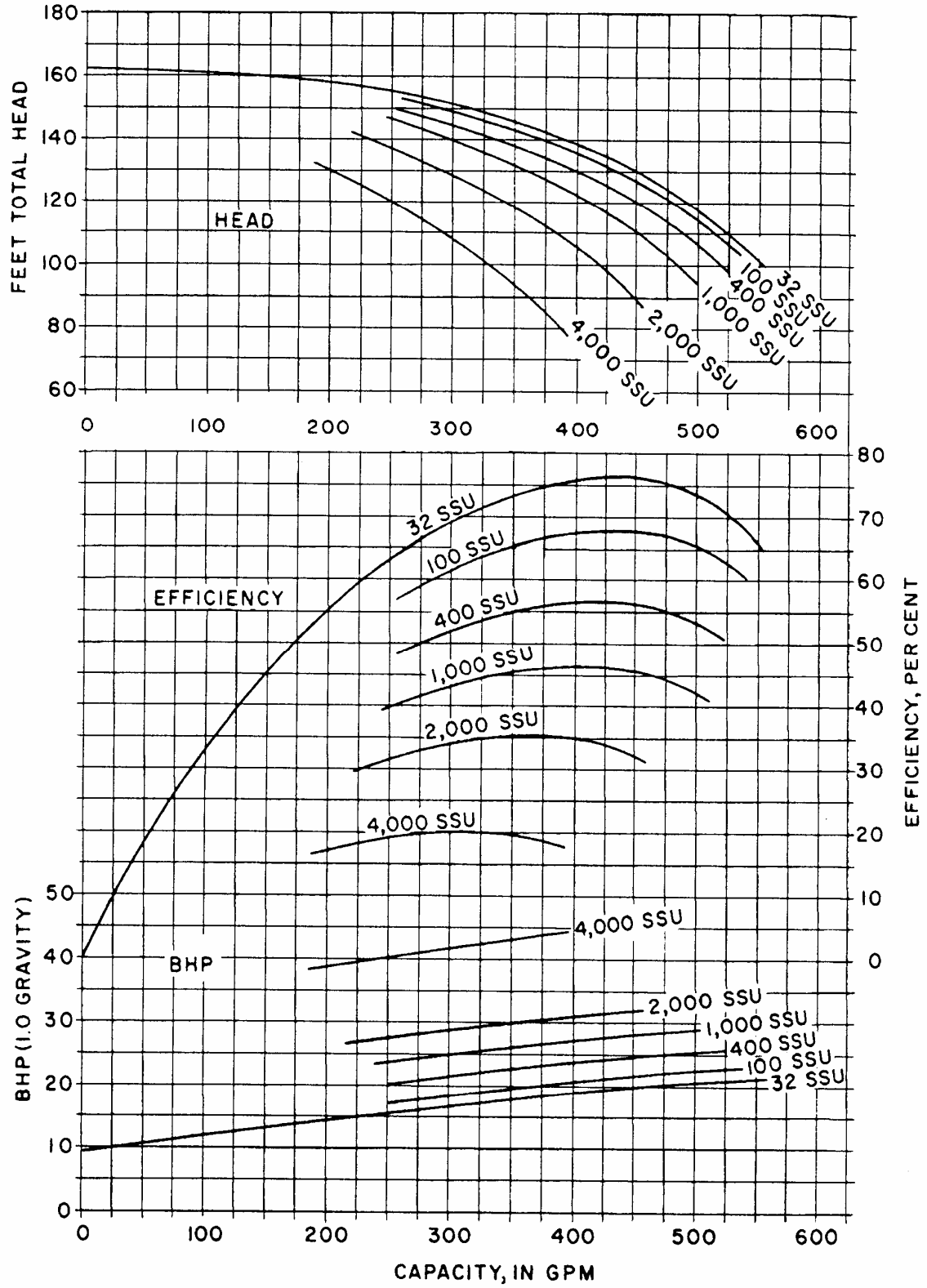
اگر وزن مخصوص مایع مورد انتقال مغایر وزن مخصوص آب باشد (با فرض ثابت ماندن سایر مشخصه‌های فیزیکی مایع) فقط برروی توان مصرفی پمپ تأثیر گذاشته و سایر مشخصه‌های رفتاری پمپ نظیر دبی، ارتفاع، راندمان و NPSHR تغییر نکرده و اطلاعات داده شده برای آب، در مورد مایع جدید نیز صادق می‌باشد. همانطوری که دررابطه (۶-۱) اشاره شد، توان مصرفی در پمپ با وزن مخصوص مایع رابطه خطی داشته و لذا در صورت وجودهرگونه مغایرت دروزن مخصوص مایع مورد انتقال با آب باید توان مصرفی را از روی منحنی مشخصه پمپ برای آب به‌دست آورده و سپس در وزن مایع مورد پمپاژ ضرب نمود.

۶-۳: تأثیر ویسکوزیته

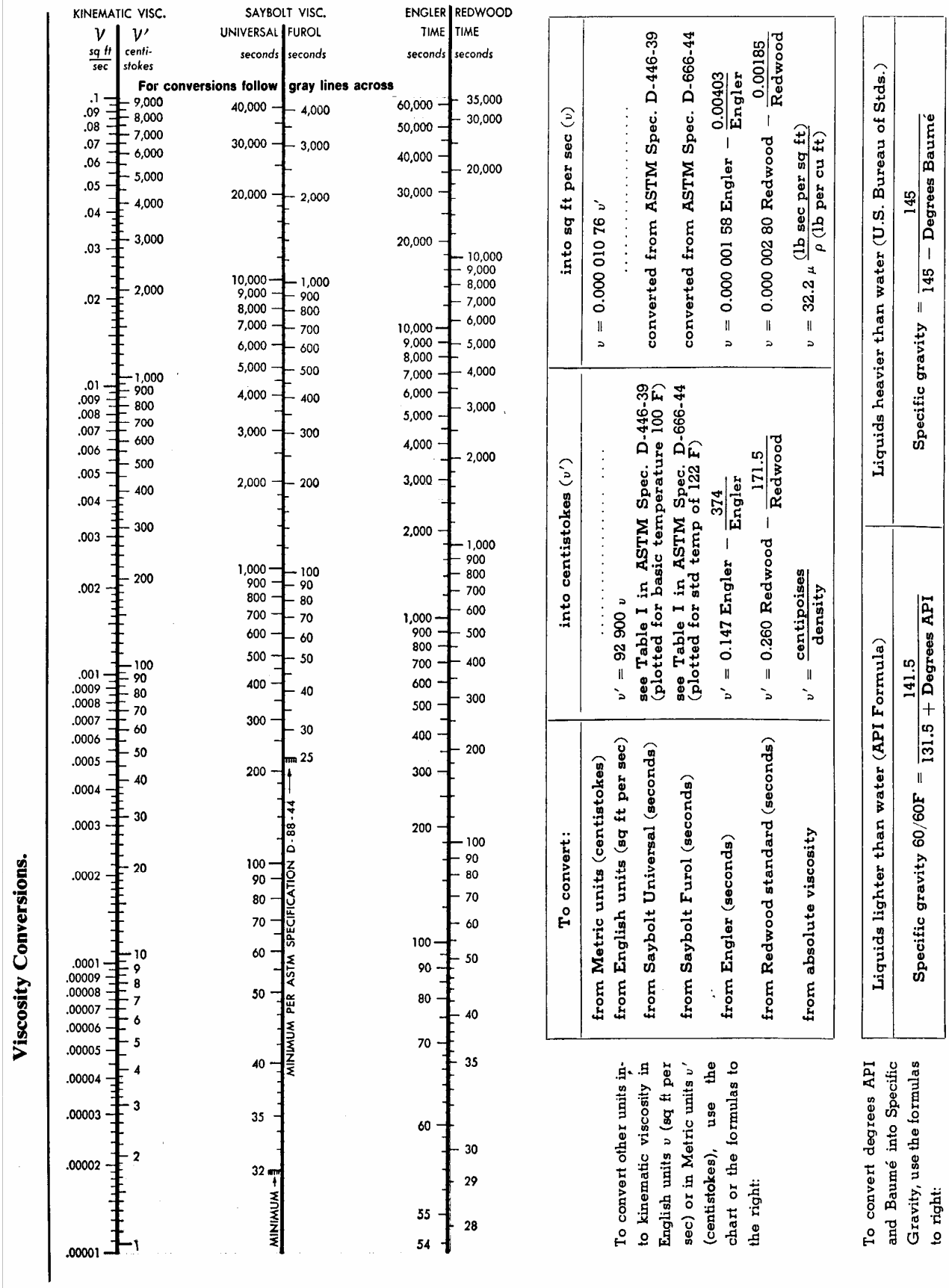
از نظر تئوریک منحنی مشخصه پمپ و به‌ویژه منحنی (دبی - ارتفاع) مستقل از ویسکوزیته مایع مورد پمپاژ بوده و نباید تأثیری برروی عملکرد پمپ به‌گذارد. ولی عملاً وجود پدیده اصطکاک مایع (Liquid Fraction) و اصطکاک دیسکی (Disk Fraction) در پمپ باعث می‌شود تارفتار واقعی پمپ با شرایط ایده آل مغایر بوده و از آنجائی که از دست رفتهای انرژی ناشی از دو پدیده فوق به ویسکوزیته مایع مورد پمپاژ بستگی دارد، لذا در صورت مغایرت ویسکوزیته مایع با

ویسکوزیته آب، منحنی مشخصه‌های ارائه شده از سوی شرکت‌های سازنده پمپ برای مایع مورد انتقال صادق نبوده و باید تأثیر آن برروی منحنی‌های مشخصه پمپ منظور شود.
تحلیل دقیق چگونگی تأثیر ویسکوزیته برروی منحنی‌های مشخصه پمپ بحث مفصلی بوده که در حوصله این مجموعه نمی‌باشد و جهت کسب اطلاعات بیشتر دراین زمینه می‌توان به کتابهای مکانیک سیالات و توربو ماشینها مراجعه کرد. آنچه که دراین بخش بدان اشاره می‌شود، فقط چگونگی تأثیر ویسکوزیته مایع برروی منحنی‌های مشخصه پمپهای گریزازمرکز می‌باشد.
ویسکوزیته جزء خواص دینامیکی سیال بوده و لذا با تغییر آن مشخصه‌های رفتار دینامیکی پمپ نیز تغییر خواهد کرد. در شکل (۱-۶) تغییرات منحنی‌های مشخصه یک پمپ گریزازمرکز بر حسب تغییرات ویسکوزیته آن نشان داده شده‌است.
واحد ویسکوزیته مورداستفاده دراین شکل SSU (Saybolt Second Universal) بوده که جزء واحدهای ویسکوزیته سینماتیکی‌است که در صنایع نفت و پتروشیمی‌کاربرد زیادی دارد. در سیستم متریک عموما" ازاستوک (Stock) استفاده می‌شود که معادل $1 cm^2/s$ بوده و هر سانتی‌استوک (cst) معادل۰/۰۱استوک می‌باشد.
از آنجائی که واحدهای ویسکوزیته مورداستفاده در صنایع بسیار متنوع می‌باشد، در شکل (۲-۶) دیاگرام تبدیل واحدهای مختلف ویسکوزیته به یکدیگر نشان داده شده‌است. موضوع اصلی که در این بخش باید مورد بررسی قرا گیرد چگونگی دست یابی به منحنی‌های مشخصه پمپهای گریز ازمرکز برای مایعاتی با ویسکوزیته مغایر با آب (ویسکوزیته آب معادل ۱ c.St یا ۳۲ SSU است) می‌باشد. برای این منظور می‌توان از شکل (۳-۶)استفاده کرد. نحوه دست یابی به منحنی‌های مشخصه پمپ برای انتقال مایعاتی با ویسکوزیته مغایر با ویسکوزیته آب بشرح زیر می‌باشد.
۱- نقطه ای مانند Q_1 راروی محور طولهای منحنی‌های مشخصه پمپ انتخاب کرده و با رسم خطی عمودبر آن، مقادیر ارتفاع (H_1)، راندمان (η_1) رابرای دبی Q_1 از روی منحنی‌های مشخصه پمپ به‌دست آورید.
۲- در شکل (۲-۶)، برروی محور طولها مقدار Q_1 را علامت گذاری کنید (نقطه A) و از آنجا خطی عمودبر محورطولها رسم نموده (خط ۱) تاخطوط مورب وموازی مربوط به ارتفاع رادرارتفاعی معادل (H_1) قطع کند.
در مثال شکل (۲-۶)، Q_1 =۱۲۰ متر مکعب در ساعت و H_1 =۱۰ متر می‌باشد.
۳- از نقطه B خطی به موازات محور طولها رسم نموده (خط ۲) تا خط مربوط به ویسکوزیته مایع مورد انتقال را قطع کند (نقطه C). دراین مثال ویسکوزیته مایع $500 \times 10^{-6} m^2/S$ است
٤- از نقطه C خطی عمود بر محور طولها رسم نموده (خط ۳) تا خط مربوط به سرعت دورانی پمپ را قطع کند (نقطه D). دراین مثال سرعت دورانی پمپ ۱٤٥۰ دوردردقیقه می‌باشد.

۵- از نقطه D خطی به موازات خطوط مربوط به سرعت دورانی پمپ رسم کرده (خط ٤) تا محور مربوط به سرعت مخصوص پمپ $\left(n_q\right)$ را قطع نماید. (نقطه E).



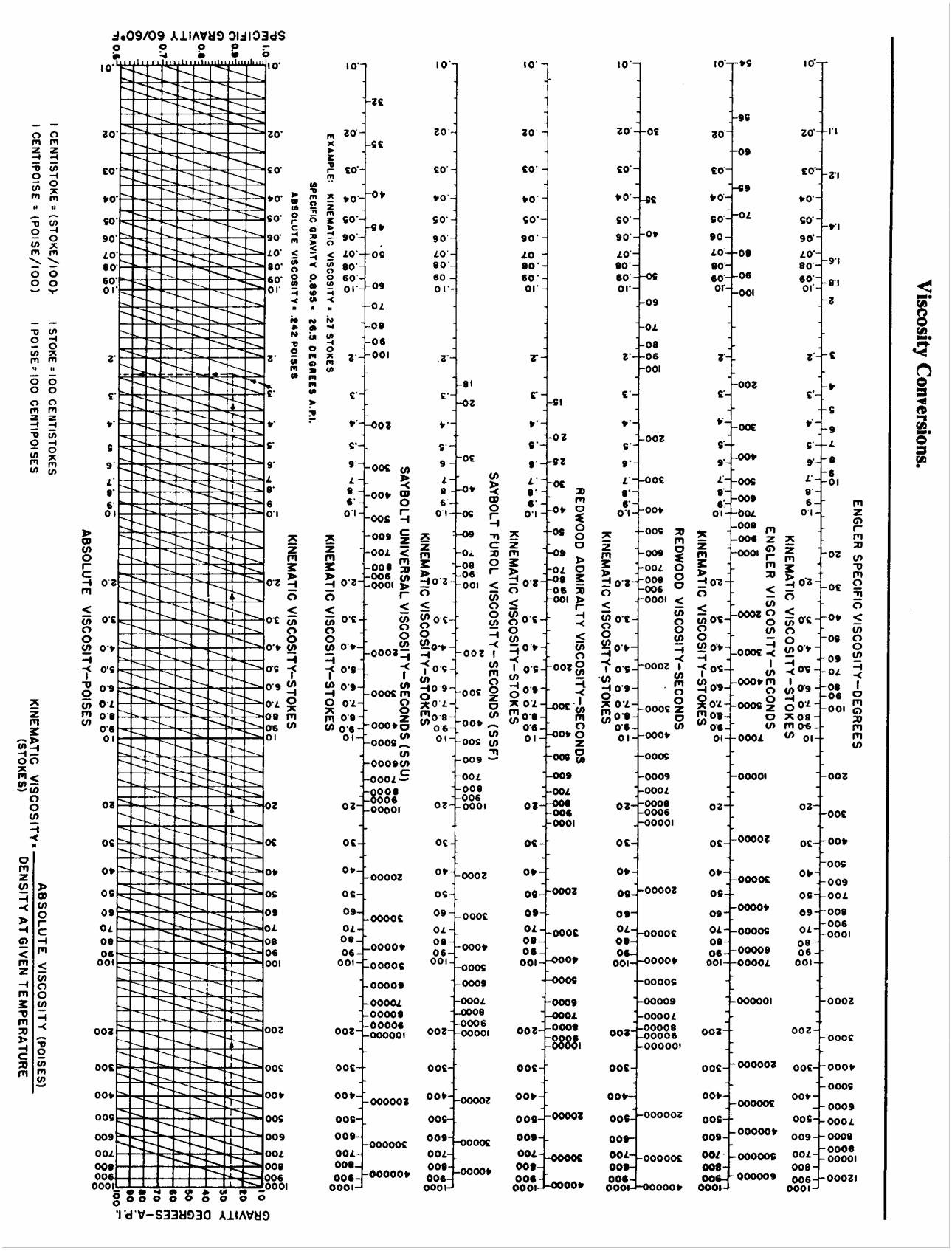
شکل (۱-٦): تأثیر ویسکوزیته برروی منحنی‌های مشخصه یک پمپ گریزازمرکز



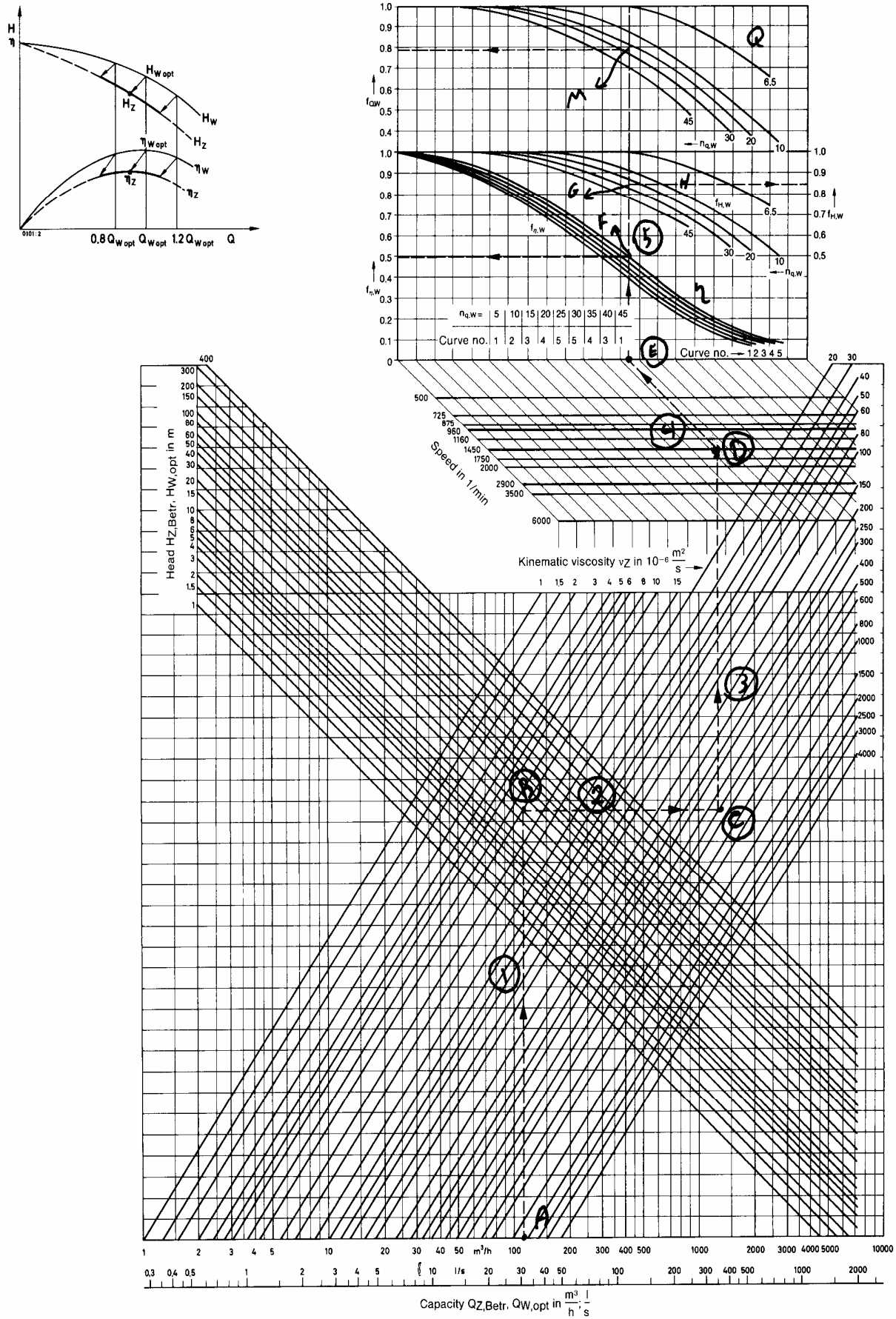
To convert:	into centistokes (ν')	into sq ft per sec (ν)
from Metric units (centistokes)	.....	$\nu = 0.000\,010\,76\ \nu'$
from English units (sq ft per sec)	$\nu' = 92\,900\ \nu$	.....
from Saybolt Universal (seconds)	see Table I in ASTM Spec. D-446-39 (plotted for basic temperature 100 F)	converted from ASTM Spec. D-446-39
from Saybolt Furol (seconds)	see Table I in ASTM Spec. D-666-44 (plotted for std temp of 122 F)	converted from ASTM Spec. D-666-44
from Engler (seconds)	$\nu' = 0.147\ \text{Engler} - \frac{374}{\text{Engler}}$	$\nu = 0.000\,001\,58\ \text{Engler} - \frac{0.00403}{\text{Engler}}$
from Redwood standard (seconds)	$\nu' = 0.260\ \text{Redwood} - \frac{171.5}{\text{Redwood}}$	$\nu = 0.000\,002\,80\ \text{Redwood} - \frac{0.00185}{\text{Redwood}}$
from absolute viscosity	$\nu' = \frac{\text{centipoises}}{\text{density}}$	$\nu = 32.2\ \mu\ \frac{(\text{lb sec per sq ft})}{\rho\ (\text{lb per cu ft})}$

Liquids lighter than water (API Formula)	Liquids heavier than water (U.S. Bureau of Stds.)
Specific gravity 60/60F $= \frac{141.5}{131.5 + \text{Degrees API}}$	Specific gravity $= \frac{145}{145 - \text{Degrees Baumé}}$

شکل (۲a-۶): نمودار تبدیل واحدهای مختلف ویسکوزیته



شکل (b ۲-٦): نمودار تبدیل واحدهای مختلف ویسکوزیته



شکل (۳-۶): تعیین ضرایب اصلاح مشخصه‌های پمپ برای مایعات غیر از آب

۸- برای Q_1 مقادیر جدیدی انتخاب کرده و مراحل فوق را تکرار کنید.

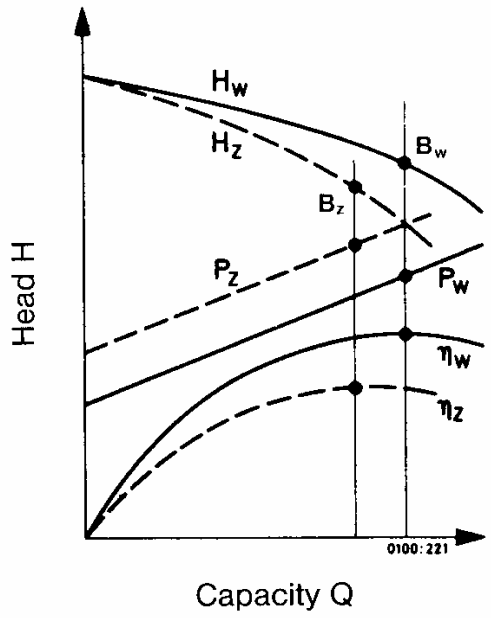
۹- بااستفاده از رابطه (۶-۱)، توان مصرفی رابرای هر یک از مقادیر η_Z, H_Z, Q_Z و بادر نظر گرفته وزن مخصوص مایع مورد انتقال محاسبه نمائید.

۱۰- جدولی به‌شکل زیر تشکیل دهید (جدول ۱-۶).

	Q_Z	H_Z	η_Z	P_Z
وضعیت ۱				
وضعیت ۲				
وضعیت ۳				
وضعیت ٤				
وضعیت ۵				

جدول (۱-٦): راهنمائی تهیه اطلاعات مربوز به رفتار پمپ برای مایع با ویسکوزیته مغایربا آب

۱۱- منحنی تغییرات H_Z، η_Z و P_Z را برای Q_Zهای مختلف رسم کنید. شکلی نظیر شکل (٤-۶) به‌دست می‌آیدکه نمونه از آن در شکل (۱-۶) نشان داده شده‌است.



شکل (٤-٦): تغییر منحنی مشخصه پمپ گریزازمرکز برای مایعی غیر از آب

تذکرات: استفاده از این روش و نمودار مربوط به تعیین ضریب اصلاح مشخصه‌های پمپ برای موارد زیر صادق‌است:

الف: پمپ از نوع یک مرحله‌ای با پوسته پیچکی و جریان شعاعی باشد.

ب: سرعت مخصوص پمپ ٤۵-۶ = n_q باشد.

ج: ویسکوزیته مایع از $4000 \times 10^{-6}\ m^2/s$ تجاوز نکند.

د: بعداز تعیین توان مصرفی باید دقت شود که آیا شافت مورداستفاده در پمپ قابلیت انتقال توان مورداستفاده در پمپ رادارد ؟ اگر افزایش توان مصرفی زیاد باشد، لازم‌است که اصلاحات مورد نیاز برروی شافت پمپ صورت پذیرد.

هـ: در صورت‌استفاده از منحنی فوق برای پمپهای چند مرحله‌ای ضریب اصلاحیه رابابد برای هر مرحله از پمپ مورداستفاده قرار داد.

جمع بندی کلی:

براساس بررسی نتایج حاصل از افزایش ویسکوزیته مایع برروی عملکرد پمپهای گریزازمرکز مشخص می‌شود که این امر موجب کاهش دبی، ارتفاع و راندمان پمپ گردیده و در عوض توان مصرفی مخصوص (توان مخصوص P'، عبارت‌است از نسبت P/Q یا به‌عبارت دیگر توان مصرف شده برای واحد دبی) افزایش می‌یابد.

تأثیر افزایش ویسکوزیته برروی سه پارامتر دبی، ارتفاع و راندمان یکسان نمی‌باشد و در این بین راندمان پمپ بیشترین کاهش را داشته و بعد از آن دبی و ارتفاع کمترکاهش می‌یابند.

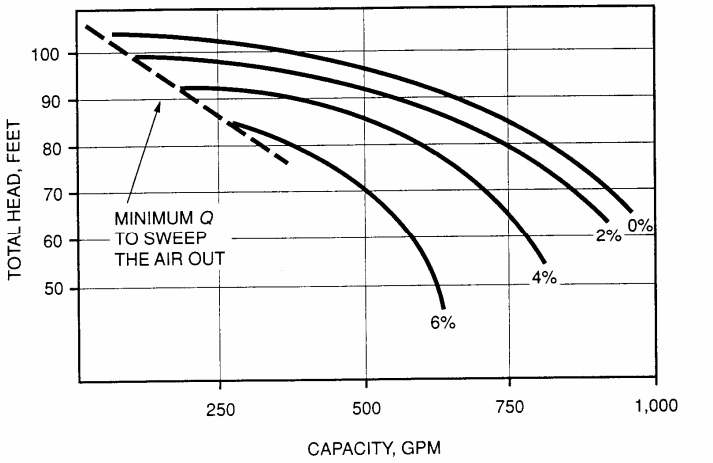
تأثیر نامطلوب ویسکوزیته برعملکرد پمپهای گریزازمرکز از آنچنان اهمیتی برخورداراست که امروزه اکیداً توصیه می‌شود که از به‌کارگیری پمپهای گریزازمرکز برای انتقال مایعات با ویسکوزیته بیشتر از ۱۰۰۰SSU (معادل ۲۲۰ سانتی‌استوک) خودداری شده و بجای آن سعی شود از پمپهای جابجائی مثبت (نظیر پمپهای دورانی) برای جابجائی مایعات با ویسکوزیته زیاداستفاده شود.

۴-۶: حضور هوا و سایر گازها در مایع مورد پمپاژ

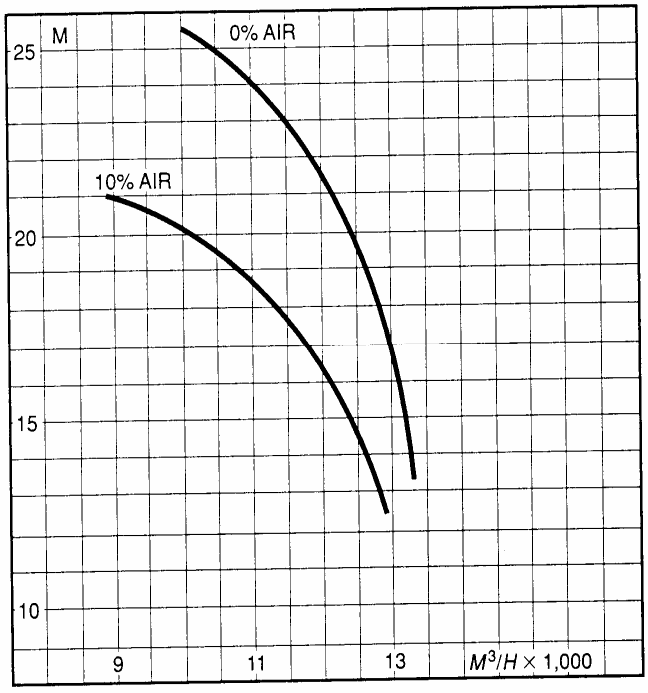
حتی اگر مقدار کمی‌هوا و یا گاز دیگر (مثلاً یک در صد) در مایع مورد انتقال وجود د اشته باشد، می‌تواند برروی منحنی دبی-ارتفاع پمپهای گریزازمرکزتأثیرات شدید و نامطلوبی به‌گذارد که در شکل (۵-۶) نشان داده شده‌است. با افزایش میزان گاز موجود در مایع تأثیر نامطلوب آن شدت بیشتری بخود می‌گیرد، به‌نحوی که در مقادیری نزدیک به ۶ درصد می‌تواند حتی موجب توقف جریان مایع از پمپ گردد.

نمونه ای از تأثیر حضور گاز در مایع مورد انتقال در شکل (۶-۶) نشان داده شده‌است که دارای مغایرت زیادی با آنچه که در شکل (۵-۶) مشاهده شد، می‌باشد. علت این امر را باید در تأثیر عوامل متعدد بر نحوه تأثیر گذاری حضور گاز در مایع مورد انتقال عملکرد پمپ دانست. لذا در یک جمع بتدی کلی نمی‌توان قانونمندی کلی برای آن تدوین نمود، و فقط می‌توان اظهار داشت که حضور گاز در مایع مورد انتقال یک پدیده نامطلوب بوده که میتواند برروی عملکرد پمپ عوارض جدی به‌گذارد ولی شدت تأثیر گذاری آن به عوامل متعددی نظیر در صد گاز، نوع گاز،

دبی پمپ، طراحی پمپ و... بستگی داشته کـه لازم‌اسـت بـرای هـر پمـپ معـین از طریـق انجـام یکسری آزمایش ویژه شناسائی شود.



شکل (٥-٦): تأثیر حضور هوا (گاز) در مایع مورد انتقال بر عملکرد یک پمپ گریزازمرکز



شکل (٦-٦): تأثیر وجود هوا بر منحنی دبی - ارتفاع یک پمپ گریزازمرکز

۵-۶: تأثیر مواد جامد بر عملکرد پمپهای گریزاز مرکز

در طراحی پمپهای گریزازمرکز، فرض براین‌است کـه پمـپ مـایعی فاقـد ذرات جامـد را منتقـل می‌سازد. حضور ذرات جامد در مایع مورد انتقال می‌تواند بر ارتفـاع قابـل دسـترس و رانـدمان پمپ تأثیر نامطلوب باقی گذاشته و باعث کاهش ارتفاع و راندمان پمپ گردد.

با این وجود در بسیاری از موارد ناچاراً باید از پمپهای گریز ازمرکـز بـرای انتقـال مـواد لجنـی و مایعات حاوی ذرات جامد (نظیر خمیر کاغذ)استفاده شود. درچنـین مـواردی ابعـاد ذرات جامـد،

غلظت آن، وزن مخصوص مایع و ماده جامد موجود در آن، ویسکوزیته، قابلیت سایشی، سختی و قابلیت خورندگی ماده جامد باید مورد توجه قرار گیرد.

تأثیر مواد جامد در مایع مورد انتقال آنطوری که برروی ارتفاع قابل دسترس تأثیر می‌گذارد، برروی دبی پمپ تأثیر نامطلوب کمتری دارد. این امر به‌ویژه در مورد پمپهای کوچکتر (یا به‌عبارت دیگر پروانه کوچکتر) بیشتر به‌چشم می‌خورد.

در مورد چگونگی تأثیر حضور مواد جامد در مایع مورد انتقال برروی عملکرد پمپ‌های گریزازمرکز دستورالعمل کلی وجود نداشته و به همین خاطر بهتراست که به اطلاعات ویژه ای که در سیستم بهره‌برداری و بر حسب خصوصیات پمپ مورداستفاده و مایع مورد انتقال تهیه گردیده‌است استناد نمود.

تأثیر نامطلوب حضور مواد جامد برروی ارتفاع قابل دسترس و راندمان پمپهای گریزازمرکز را می‌توان به‌صورت زیر تحلیل کرد:

الف: لغزش بین ذرات مایع مورد انتقال و ذرات جامد موجود در آن باعث می‌شود تا شتاب ماده لجنی مورد انتقال دائماً در حال افزایش و کاهش بوده و همین امر موجب از دست رفت انرژی در پمپ می‌گردد.

ب: در اثر برخورد ذرات جامد با یکدیگر و اصطکاک ناشی از آن مقداری از انرژی داده شده به مایع به هدر رود.

وجود پدیده‌های فوق و تأثیر آن برروی ارتفاع و راندمان پمپ باعث می‌شود تا منحنی مشخصه پمپی که برای آب تهیه شده‌است اصلاح گردیده و برای این منظور از ضریب اصلاحی به‌نام نسبت ارتفاع (نسبت ارتفاع برای ماده لجنی به ارتفاع آب) تحت عنوان HR و نسبت راندمان (نسبت راندمان برای ماده لجنی به راندمان برای آب) با نشانه ER استفاده شود.

۶-۶: تعین ضریب اصلاحیه مربوط به حضور ذرات جامد

جهت تعیین مقادیر HR و ER دو روش وجود دارد: اصلاحیه Morris-Gould و نمودار Warman. در هر دو روش مایعات حاوی ذرات جامد به‌دودسته تقسیم می‌شوند:

الف: مایع با سرعت ته نشتی زیاد

مایعاتی که حاوی ذرات جامد درشت با در صد کم بوده و سرعت ته نشنی ذرات بالاتر از حدود ۹ متر در دقیقه می‌باشد.

ب: مایعات با سرعت ته نشینی کم

ذرات جامد در این مواد ریز بوده و یا در صد آنها زیاد می‌باشد. از آنجائی که راندمان پمپ در اثر لغزش بین ذرات جامد و مایع کاهش چندانی نمی‌یابد، لذا در چنین مواردی فقط تأثیر افزایش ویسکوزیته مایع مورد توجه قرار گرفته و باید از دستورالعمل داده شده در قسمت

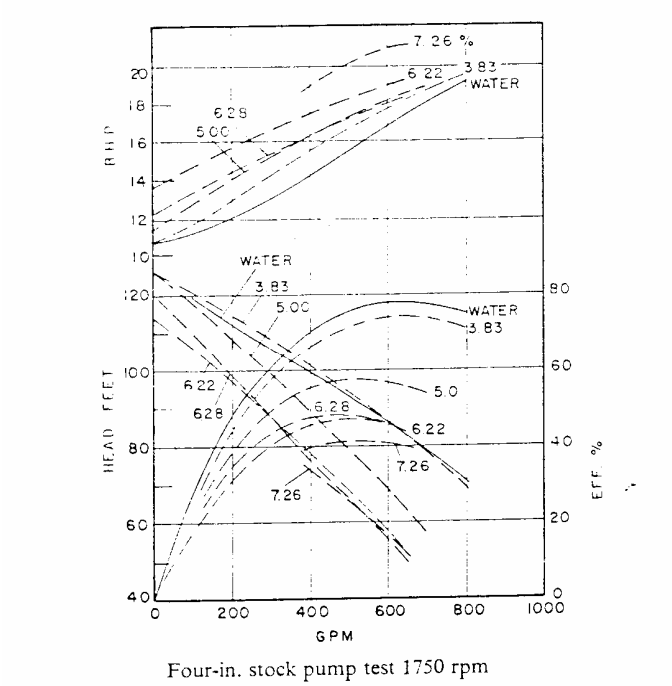
(۳-۶) برای اصلاح منحنی‌های مشخصه پمپ به‌جهت افزایش ویسکوزیته مایع مورد انتقال‌استفاده کرد.

در روش ارائه شده از سوی Morris-Gould، مقادیر HR و ER مساوی در نظر گرفته می‌شود. اندازه ذرات بین ۰/۰۳ تا ۱۰ میلی متر بوده و نسبت وزن مخصوص جامد به مایع بین ۱۰ - ۱/۲۵ می‌باشد. در این صورت:

$$HR = ER = 1 - 0.075 \times C_1 \times C_2 \qquad (۶-۱)$$

مقادیر C_1 و C_2 را می‌توان از روی نمودار ارائه شده از سوی Morris - Gould به‌دست آورد. در نمودار داده شده از سوی Warman مواردی که در صد حجمی‌مواد جامد کمتر از ۲۰ درصد باشد ER و HR با هم مساوی خواهند بود. در هرحال مقادیر HR و ER به اندازه ذرات جامد، درصد حجمی‌ذرات جامد، نسبت اندازه ذرات به قطر پروانه بستگی دارد.

در شکل (۷-۶) تغییرات منحنی‌های مشخصه یک پمپ گریزازمرکز برای آب و خمیر کاغذ با در صدهای مختلف نشان داده شده‌است. در مقادیر کم ذرات جامد موجود در آب (تا ٤ درصد) و به‌لحاظ بالا بودن سرعت جریان در پمپ، نقطه بهره‌برداری در ناحیه جریان در هم (Turbulent) قرار داشته و لذا از دست رفت ناشی از اصطکاک با شرایط انتقال آب تفاوت چندانی ندارد. ولی با افزایش در صد مواد جامد، کارآئی پمپ کاهش یافته و BEP به سمت چپ منحنی جابجا می‌شود.



شکل (۷-٦): تأثیر ذرات جامد بر منحنی‌های مشخصه پمپهای گریزازمرکز

افزایش توان مصرفی به‌خاطر افزایش از دست رفت ناشی از اصطکاک دیسکی و از دست رفت‌های هیدرولیکی در پمپ می‌باشد.

بخش هفتم:

کاویتاسیون *Cavitationv*

۱-۷: مقدمه

اکثر ماشین‌ها دارای نقاط ضعفی هستند که می‌توان آن‌راپاشنه آشیل (Achilles'Heel) ماشین دانست. پاشنه آشیل پمپها (به‌ویژه پمپهای گریزازمرکز) قسمت مکش آن می‌باشد. چرا که اگر شرایط بهره‌برداری از سیستم به‌نحوی باشد که بتوان سیال مورد انتقال را به‌صورت مایع به‌دهانه پمپ رسانید، پمپ در انتقال مایع به محل مورد نظر کمتر دچار مشکل می‌گردد. اکثر مشکلات و خرابی‌های پمپهای گریزازمرکز به قسمت مکش آن مربوط بوده که در بین آنها هوا گرفتن و بروز پدیده کاویتاسیون (Cavitation) جزءِ مشکلات اساسی پمپ‌ها می‌باشد. هرچند که کاویتاسیون مختص پمپها نمی‌باشد و در هر سیستم انتقال مایع (نظیر لوله، شیرها و...)می‌تواند به‌وقوع بپیوندد ولی در این بخش فقط بروز این پدیده درپمپهای گریزازمرکز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

(دریک تعریف ساده کاویتاسیون عبارت‌است از تشکیل حبابهای گازدر قسمت مکش (دراثر کاهش فشار)، ورود حبابها به‌درون پروانه و پوسته،ترکیدن حبابها درداخل پروانه و پوسته، آزاد شدن انرژی و بروز خرابی درقطعات پمپ).

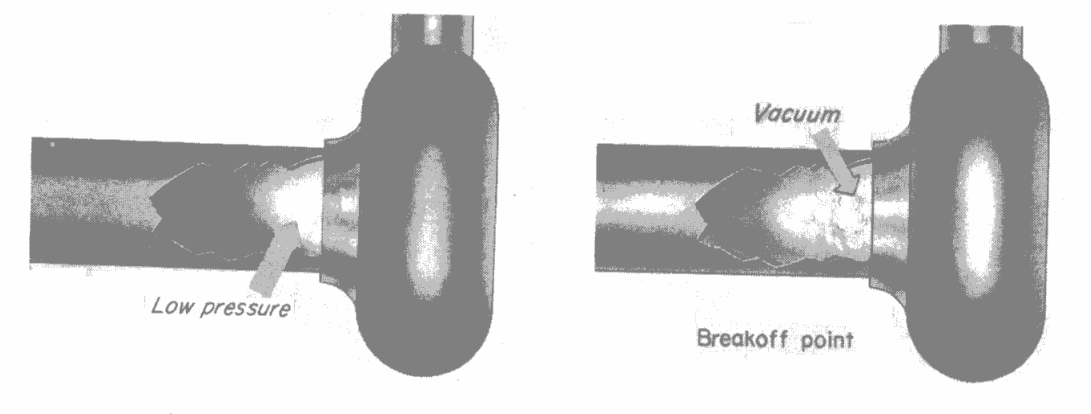
انرژی آزاد شده دراثرترکش حبابها، همان انرژی نهان تبخیر مایع بوده که درزمان تبخیر به مایع داده می‌شود. از نظر لغوی، کاویتاسیون معادل (حفره زائی) می‌باشد، چراکه دراثر جوشش (Boiling) مایع، حبابهای بخار تشکیل شده و همزمان با آن گازهای حل شده در مایع آزاد گردیده و حفره‌هائی (Cavities) دردرون مایع تشکیل می‌گردد که از حبابهای گاز و بخار پرشده اند. این حبابها در منطقه فشار قوی‌ترکیده و به‌صورت مایع در می‌آیند (Condensation) و در پی آن حفره‌ها محو شده و آسیب دیدگی سطوحی که باآن در تماس می‌باشند را از خود باقی می‌گذارند. به همین خاطر این پدیده را حفره زائی یا کاویتاسیون می‌نامند که فرآیندی هیدرودینامیکی می‌باشد.

فرآیند تبخیر مایع و یا متصاعد شدن گازهای محلول درآن و یا بروز هم زمان دو پدیده فوق، گسترش، متراکم شدن و از بین رفتن آنها در مدت زمان بسیار کوتاهی (در حدود یکصدم تا یکهزارم ثانیه) صورت می‌گیرد. بنابراین عمر حبابها بسیار کوتاه بوده و حالت کاویتاسیون بسیار ناپایدار می‌باشد. حبابها به همراه جریان مایع جابجا شده و درمنطقه فشار قوی و در تماس با جداره جامد قطعات (پروانه و یا پوسته) متراکم می‌گردد. ذرات مایع در جستجوی پرکردن چنین حفره‌های موضعی، با سرعت زیاد بمرکز این حفره‌ها برخورد کرده و با له شدن وترکیدن موجب ایجاد ضربه موضعی برروی سطوح قطعات می‌گردند.

افزایش فشار موضعی موجب وارد شدن نیروی زیاد با فرکانس بالا برروی سطوح گردیده که فرسایش و تخریب قطعات را به‌دنبال خواهد داشت. لازم به ذکراست که فرسایش سطوح نه در

قسمت تشکیل حبابها و بلکه در محل‌ترکش آنها صورت می‌پذیرد. اگر مایع مورد پمپاژ حاوی حبابهای گاز دیگری (نظیر هوا) باشد، با کاهش فشار، حلالیت گازدر مایع کاهش یافته و از آن خارج می‌شود. این حبابها نیز می‌توانند در مناطق با فشار زیادترکیده و پدیده ای به‌نام کاویتاسیون کاذب (Pseudo-Cavitation) ایجاد نمایند. تشکیل حبابها می‌تواندبه دودلیل مختلف باعث بروز مشکلاتی در عملکرد پمپ گردد:

اولاً گسترش حبابها باعث گرفتگی مجاری جریان مایع در پمپ گردیده و عملکرد هیدرولیکی آن‌را تحت الشعاع قرار می‌دهد (شکل ۱-۷).



شکل (۱-۷): تشکیل حباب و گرفتگی مجرای مکش در اثر کاهش فشار مایع

ثانیاً تشکیل حبابها وترکیدن آن برروی سطح آزاد قطعات، آنها را در معرض تنش موضعی شدیدی قرار داده که موجب بروز پدیده خستگی (Fatigue) و آسیب دیدگی سطحی که در معرض‌ترکش حبابها قرار دارند می‌شوند. با توجه به دلایل فوق پمپهای گریزازمرکز قادرند پدیده کاویتاسیون راتا حد معینی تحمل نموده که سطح آن به شرایط بهره‌برداری، خواص فیزیکی سیال مورد انتقال و... بستگی دارد. میزان خرابی به‌وجود آمده در پمپ به ویژگیهای فلزات به‌کار برده شده در ساخت قطعات و مدت زمانی که پمپ در معرض پدیده کاویتاسیون قرار دارد بستگی داشته وخصوصاً نوع ساختاری پمپ در این زمینه اهمیت زیادی دارد. هرچند که پمپهای با سرعت خطی پائین پروانه به‌لحاظ داشتن فشار (ارتفاع) دهش کم قادرند تا در دوره زمانی طولانی شرایط سخت پدیده کاویتاسیون را تحمل نمایند ولی پمپهای با مراحل زیاد (نظیر پمپهای تغذیه دیگ بخار) که باید در سرعت زیاد کارکنند، بروز پدیده کاویتاسیون در آنها در یک دوره زمانی بسیار کوتاه می‌تواند صدمات شدیدی بر قطعات پمپ وارد سازد.

بروز پدیده کاویتاسیون همواره با عوارض نامطلوبی توأم بوده که عمده‌ترین آنها عبارت‌است از کاهش راندمان، نوسان شدید فشار مایع خروجی از پمپ، صدمات مکانیکی، فرسایش سطوح و قطعات داخلی پمپ، افزایش میزان لرزش، ایجاد سرو صدای غیر طبیعی ناشی از ضربات هیدرولیکی و... . سرو صدای ایجاد شده از گونه خاصی می‌باشد، به‌نحوی که می‌توان آن‌را به

صدای عبور ذرات شن از داخل پوسته پمپ تشبیه کرد. هر چند که تمامی‌نقاط داخل پوسته پمپ می‌توانند در معرض آسیب دیدگی ناشی ازترکش حبابها قرار گیرند، ولی بااین وجود، پروانه و به‌ویژه در سطوح محدب آنها بیشتر در معرض آسیب دیدگی ناشی از پدیده کاویتاسیون قرار دارند.

بروز پدیده کاویتاسیون در پمپهای گریزازمرکز یک حادثه اتفاقی و بی مقدمه نبوده و به شرایط بهره‌برداری و طراحی پمپ بستگی دارد. قبلاً در تحلیل عملکرد پمپهای گریزازمرکز و به‌ویژه شرایط قسمت مکش آن از واژه‌هائی نظیر حداکثر مکش (Lift) مجاز و یا ارتفاع (Head) مورد نیاز مکش‌استفاده می‌شد. اولاً مفاهیم فوق تنها برای آب معتبر بوده، ثانیاً به فشار جو بستگی دارند. ضمناً در تعریف واژه‌های فوق نقش درجه حرارت مایع در آن‌ها منظور نگردیده که این خود یک نقطه ضعف بزرگ برای آنها محسوب می‌شد. به همین خاطر امروزه در بررسی شرایط قسمت مکش پمپ از واژه ای به‌نام خالص ارتفاع مثبت بالاتر از فشار بخار مایع و یا به صورت رایج‌تر خالص ارتفاع مثبت در قسمت مکش (Net Positive Suction Head) یا به‌اختصار (NPSH)استفاده می‌شود که به‌طور مفصل در قسمتهای بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۷: فشار بخار Vapor Pressure

بنا بر تعریف دمائی که مایع به گاز (و بالعکس) تبدیل می‌شود را دمای اشباع (Saturation Temprature) می‌نامند. دمای اشباع هر مایع به فشار آن بستگی دارد. مثلاً آب در فشار یک اتمسفر (۱/۰۱۳۳ بار) در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد بجوش می‌آید. تعریف فوق را می‌توان به صورت دو گزاره زیر بیان کرد:

الف: دمای اشباع آب در فشار ۱/۰۱۳۳ بار، ۱۰۰ درجه سانتیگراداست.

ب: فشار بخار آب در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد ۱/۰۱۳۳ بار می‌باشد .

همانطوری که از جدول (۱-۷) پیداست دمای اشباع آب با کاهش فشار کاهش می‌یابد (و بالعکس) ویا فشار بخار آب با کاهش درجه حرارت کاهش می‌یابد (و بالعکس). فشار بخار جزءِ خواص فیزیکی هر سیال می‌باشد. پدیده کاویتاسیون در پمپها هنگامی‌به‌وقوع می‌پیوندد که فشار مایع در قبل از چشمه پروانه، (وحتی در مواردی در داخل پروانه) از فشار بخار آن در دمای پمپاژ کمتر گردد (شکل ۲-۷).

در شکل (۲a-۷)، حداقل فشار در چشمه پروانه و بخش ابتدائی تیغه‌ها در حدی‌است که از فشار بخار مایع در دمای انتقال بالاتر بوده و لذا پمپ فارغ از بروز پدیده کاویتاسیون به‌کار خود ادامه می‌دهد. ولی در شکل (۲b-۷) در مناطقی از قسمت مکش و یا چشمه پروانه و حتی در قسمت‌های ابتدائی تیغه‌های پروانه، فشار مایع می‌تواند آنقدر کاهش یابد که از فشار بخار آن در دمای پمپاژ کمتر گردیده و همین امر می‌تواند موجب بروز پدیده کاویتاسیون شود.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بروز پدیده کاویتاسیون در انتقال هرمایع در درجه نخست به دمای مایع مورد پمپاژ و میزان فشار در مسیر جریان مایع از قسمت مکش تا داخل پروانه بستگی دارد. ولی درکنار آن عوامل دیگری نظیر مشخصه‌های رفتاری پمپ(پروانه) نیز در بروز این پدیده مؤثر بوده که به‌طور جامع در قسمت‌های بعد بدان اشاره خواهد شد.

۳-۷: خالص ارتفاع مثبت در قسمت مکش NPSH

پدیده کاویتاسیون در پمپهای گریزازمرکز هنگامی‌به‌وقوع می‌پیوندد که خالص ارتفاع مثبت در قسمت مکش پمپ از آنچه که شرکت سازنده پمپ توصیه نموده‌است کمتر شده باشد. بنا براین برای تحلیل شرایط بروز این پدیده در پمپهای گریزازمرکز لازم‌است که هم شرایط قسمت مکش پمپ از نظر فشار (ارتفاع) و هم مشخصه‌های پمپ مورداستفاده از نظر وجود حداقل شرایط مورد نیاز جهت ممانعت از بروز این پدیده مورد بررسی قرار گیرد. جهت سهولت در تحلیل فوق NPSH به دو دسته تقسیم می‌شود:

الف: خالص ارتفاع مثبت قابل دسترس در قسمت مکش پمپ (NPSHA)

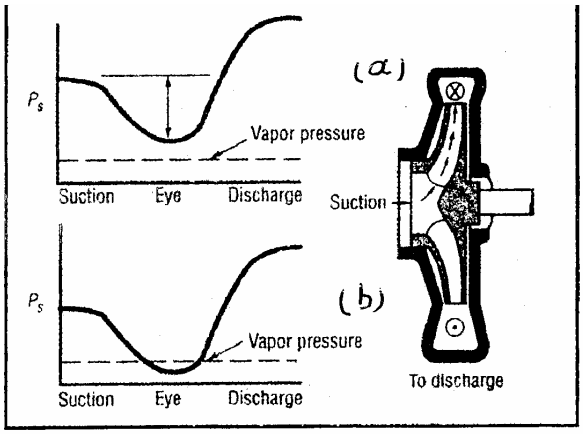
ب: خالص ارتفاع مثبت مورد نیاز در قسمت مکش پمپ (NPSHR)

NPSHA جزءِ مشخصه‌های سیستم پمپاژ بوده و به عوامل متعددی نظیر فشار جو، خواص فیزیکی مایع مورد پمپاژ (درجه حرارت، وزن مخصوص، فشار بخار در دمای انتقال، ویسکوزیته و...)، اختلاف سطح انرژی پتانسیل (فشار یا ارتفاع) در منبع مکش تا دهانه چشمه پروانه، تعداد و نوع اتصالات مورداستفاده در قسمت مکش، طول و قطر لوله مکش، دبی جریان و... بستگی دارد. بنابراین تعیین آن بعهده طراحان سیستم پمپاژمی‌باشد.

NPSHR به مشخصه‌های رفتاری و طراحی، دبی جریان، سرعت دورانی و... پمپ بستگی داشته که از سوی شرکت سازنده پمپ و به‌صورت یک دسته منحنی سهمی‌گونه صعودی برای قطرهای مختلف پروانه‌های مورداستفاده در پمپ بر حسب تغییرات دبی پمپ تهیه شده و در اختیار مشتریان قرار داده می‌شود (شکل ۸-۱) . وجه مشترک NPSHR با NPSHA وابستگی هر دو آنها به دبی جریان مایع می‌باشد. با این تفاوت، در حالی که NPSHR با افزایش دبی افزایش می‌یابد، NPSHA با افزایش دبی کاهش یافته و همین مغایرت رفتاری باعث می‌شود که بتوان اذهان داشت که یکی از عوامل اصلی بروز کاویتاسیون در پمپهای گریزازمرکز بالا بودن دبی جریان می‌باشد.

t °C	T K	p_D bar	ρ kg/dm³	t °C	T K	p_D bar	ρ kg/dm³	t °C	T K	p_D bar	ρ kg/dm³
0	273.15	0.00611	0.9998					138	411.15	3.414	0.9276
1	274.15	0.00657	0.9999	61	334.15	0.2086	0.9826	140	413.15	3.614	0.9258
2	275.15	0.00706	0.9999	62	335.15	0.2184	0.9821	145	418.15	4.155	0.9214
3	276.15	0.00758	0.9999	63	336.15	0.2286	0.9816	150	423.15	4.760	0.9168
4	277.15	0.00813	1.0000	64	337.15	0.2391	0.9811	155	428.15	5.433	0.9121
5	278.15	0.00872	1.0000	65	338.15	0.2501	0.9805	160	433.15	6.181	0.9073
6	279.15	0.00935	1.0000	66	339.15	0.2615	0.9799	165	438.15	7.008	0.9024
7	280.15	0.01001	0.9999	67	340.15	0.2733	0.9793	170	433.15	7.920	0.8973
8	281.15	0.01072	0.9999	68	341.15	0.2856	0.9788	175	448.15	8.924	0.8921
9	282.15	0.01147	0.9998	69	342.15	0.2984	0.9782	180	453.15	10.027	0.8869
10	283.15	0.01227	0.9997	70	343.15	0.3116	0.9777	185	458.15	11.233	0.8815
11	284.15	0.01312	0.9997	71	344.15	0.3253	0.9770	190	463.15	12.551	0.8760
12	285.15	0.01401	0.9996	72	345.15	0.3396	0.9765	195	468.15	13.987	0.8704
13	286.15	0.01497	0.9994	73	346.15	0.3543	0.9760	200	473.15	15.55	0.8647
14	287.15	0.01597	0.9993	74	347.15	0.3696	0.9753	205	478.15	17.243	0.8588
15	288.15	0.01704	0.9992	75	348.15	0.3855	0.9748	210	483.15	19.077	0.8528
16	289.15	0.01817	0.9990	76	349.15	0.4019	0.9741	215	488.15	21.060	0.8467
17	290.15	0.01936	0.9988	77	350.15	0.4189	0.9735	220	493.15	23.198	0.8403
18	291.15	0.02062	0.9987	78	351.15	0.4365	0.9729	225	498.15	25.501	0.8339
19	292.15	0.02196	0.9985	79	352.15	0.4547	0.9723	230	503.15	27.976	0.8273
20	293.15	0.02337	0.9983	80	353.15	0.4736	0.9716	235	508.15	30.632	0.8205
21	294.15	0.02485	0.9981	81	354.15	0.4931	0.9710	240	513.15	33.478	0.8136
22	295.15	0.02642	0.9978	82	355.15	0.5133	0.9704	245	518.15	36.523	0.8065
23	296.15	0.02808	0.9976	83	356.15	0.5342	0.9697	250	523.15	39.776	0.7992
24	297.15	0.02982	0.9974	84	357.15	0.5557	0.9691	255	528.15	43.246	0.7916
25	298.15	0.03166	0.9971	85	358.15	0.5780	0.9684	260	533.15	46.943	0.7839
26	299.15	0.03360	0.9968	86	359.15	0.6011	0.9678	265	538.15	50.877	0.7759
27	300.15	0.03564	0.9966	87	360.15	0.6249	0.9671	270	543.15	55.058	0.7678
28	301.15	0.03778	0.9963	88	361.15	0.6495	0.9665	275	548.15	59.496	0.7593
29	302.15	0.04004	0.9960	89	362.15	0.6749	0.9658	280	553.15	64.202	0.7505
30	303.15	0.04241	0.9957	90	363.15	0.7011	0.9652	285	558.15	69.186	0.7415
31	304.15	0.04491	0.9954	91	364.15	0.7281	0.9644	290	563.15	74.461	0.7321
32	305.15	0.04753	0.9951	92	365.15	0.7561	0.9638	295	568.15	80.037	0.7223
33	306.15	0.05029	0.9947	93	366.15	0.7849	0.9630	300	573.15	85.927	0.7122
34	307.15	0.05318	0.9944	94	367.15	0.8146	0.9624	305	578.15	92.144	0.7017
35	308.15	0.05622	0.9940	95	368.15	0.8453	0.9616	310	583.15	98.700	0.6906
36	309.15	0.05940	0.9937	96	369.15	0.8769	0.9610	315	588.15	105.61	0.6791
37	310.15	0.06274	0.9933	97	370.15	0.9094	0.9602	320	593.15	112.89	0.6669
38	311.15	0.06624	0.9930	98	371.15	0.9430	0.9596	325	598.15	120.56	0.6541
39	312.15	0.06991	0.9927	99	372.15	0.9776	0.9586	330	603.15	128.63	0.6404
40	313.15	0.07375	0.9923	100	373.15	1.0133	0.9581	340	613.15	146.05	0.6102
41	314.15	0.07777	0.9919	102	375.15	1.0878	0.9567	350	623.15	165.35	0.5743
42	315.15	0.08198	0.9915	104	377.15	1.1668	0.9552	360	633.15	186.75	0.5275
43	316.15	0.08639	0.9911	106	379.15	1.2504	0.9537	370	643.15	210.54	0.4518
44	317.15	0.09100	0.9907	108	381.15	1.3390	0.9522	374.15	647.30	221.2	0.3154
45	318.15	0.09582	0.9902	110	383.15	1.4327	0.9507				
46	319.15	0.10086	0.9898	112	385.15	1.5316	0.9491				
47	320.15	0.10612	0.9894	114	387.15	1.6362	0.9476				
48	321.15	0.11162	0.9889	116	389.15	1.7465	0.9460				
49	322.15	0.11736	0.9884	118	391.15	1.8628	0.9445				
50	323.15	0.12335	0.9880	120	393.15	1.9854	0.9429				
51	324.15	0.12961	0.9876								
52	325.15	0.13613	0.9871	122	395.15	2.1145	0.9412				
53	326.15	0.14293	0.9866	124	397.15	2.2504	0.9396				
54	327.15	0.15002	0.9862	126	399.15	2.3933	0.9379				
55	328.15	0.15741	0.9857	128	401.15	2.5435	0.9362				
56	329.15	0.16511	0.9852	130	403.15	2.7013	0.9346				
57	330.15	0.17313	0.9846								
58	331.15	0.18147	0.9842	132	405.15	2.8670	0.9328				
59	332.15	0.19016	0.9837	134	407.15	3.041	0.9311				
60	333.15	0.19920	0.9832	136	409.15	3.223	0.9294				

جدول (۱ -۷): خواص ترمودینامیکی آب



منحنی بالایی نشان می‌دهد مادامی که فشار سیستم (P_s) در تمامی مراحل مکش، ورود به پروانه و تخلیه، بالاتر از فشار بخار مایع پمپ شونده باشد کاویتاسیون رخ نخواهد داد. منحنی پایینی حالتی را نشان می‌دهد که فشار سیستم به هنگام ورود مایع به چشم پروانه از فشار بخار مایع پایین‌تر رفته و این مسئله باعث بروز پدیدهٔ کاویتاسیون خواهد شد. مقطع مجرای حلزونی یک پمپ در سمت راست مسیر جریان را از میان پروانه نشان می‌دهد.

شکل (۲-۷): منحنی تغییرات فشار در قبل، داخل و بعد از پروانه پمپ گریز ازمرکز

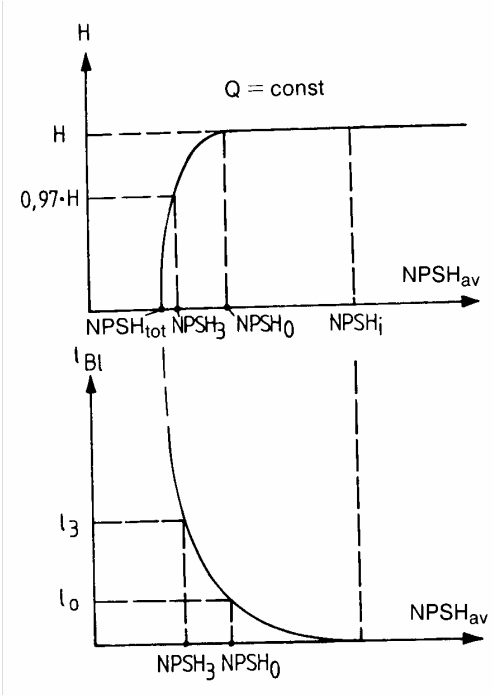
۴-۷: خالص ارتفاع مثبت مورد نیاز در قسمت مکش پمپ (NPSHR)

NPSHR را می‌توان انرژی پتانسیل مورد نیاز (ارتفاع برحسب متر) در قسمت مکش پمپ مازاد بر فشار بخار مایع در دمای انتقال(برحسب متر) تعریف کرد که امکان بهره‌برداری از پمپ بدون بروز پدیده کاویتاسیون در آن‌را میسر می‌سازد. NPSHR جزءِ مشخصه‌های رفتاری پمپ (یاپروانه) بوده و تابعی از سرعت جریان مایع به‌درون پروانه می‌باشد و مقدار آن تقریباً با مربع دبی پمپ افزایش می‌یابد.

عوامل دیگری نظیر قطر چشمه پروانه، سطح مقطع مکش پروانه، تعداد تیغه‌های پروانه، فضای بین تیغه‌ها، قطر شافت، قطر نافی پروانه، سرعت مخصوص پمپ، طراحی مجاری مایع در قسمت مکش پروانه و... نیز برروی NPSHR مؤثر می‌باشند. در یک تعریف تجربی NPSHR در عمل عبارت‌است از افت فشار بین دهانه ورودی پمپ تا لبه خروجی پروانه که اگر مقدار آن از NPSHA تجاوز نماید، مایع به‌صورت ناگهانی تبخیر (Flashing) شده و در منطقه فشار قوی خواهدترکید.

۵-۷: بررسی وضعیت شروع پدیده کاویتاسیون در پمپها

تا زمانی که NPSHA در حدی باشد که پمپ را از بروز پدیده کاویتاسیون مصون نگهدارد، مقدار آن نمی‌تواند بر عملکرد هیدرولیکی پمپ تأثیر به‌گذارد، یا به‌عبارت دیگر ارتفاع قابل دسترس توسط پمپ مقداری ثابت و مستقل از NPSHA خواهد بود (شکل ۳-۷).



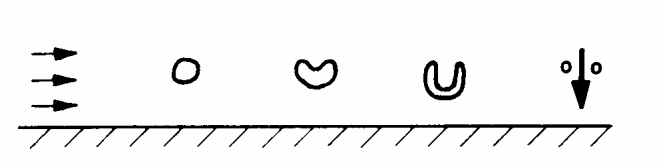
شکل (۳-۷): تغییرات ارتفاع و طول دنباله حبابها برحسب NPSHA

با کاهش NPSHA ارتفاع کل پمپ در دبی ثابت تغییری نخواهد کرد ولی در نقطه ای مانند NPSHi، اولین حبابهای بخار در پروانه پمپ تشکیل می‌شود که اصطلاحاً آن‌را کاویتاسیون مقدماتی یا ابتدائی (Incipient Cavitation) می‌نامند. با وجود تشکیل حباب، منحنی مشخصه پمپ و ارتفاع اعمال شده توسط آن تغییر نمی‌کند. بااستمرار کاهش NPSHA، در وضعیت خاصی $(NPSH_o)$ به‌لحاظ افزایش میزان حبابهای تشکیل شده، شرایطی به‌وجود می‌آید که ارتفاع کل پمپ شروع به کاهش می‌نماید.

بنابرقرار داد شروع پدیده کاویتاسیون هنگامی‌است که مقدار NPSHA در حدی نزول یابد که باعث شود تا ارتفاع کل پمپ به میزان ۳ درصد کاهش یابد. مقدار NPSH در این وضعیت را NPSHR (براساس کاهش ارتفاع به میزان ۳ در صد) و یا به‌اختصار $NPSH_3$ می‌نامند.

۶-۷: فرسایش ناشی از کاویتاسیون

بیشترین صدمات ناشی از کاویتاسیون هنگامی‌به‌وقوع می‌پیوندد که فشار موضعی در مسیر جریان مایع حتی از فشار دهش نیز بیشتر شود $(P \rangle P_D)$. حبابها دراین منطقه نخست تحت تأثیر فشار موضعی کوچک شده، حالتی نظیر کلیه را بخود گرفته و سپس دراثرترکیدن محو می‌شوند (شکل ٤-۷).



شکل (٤-۷): تغییر شکل وترکیدن حبابها در اثر افزایش فشار موضعی

دررابطه با تخریب سطح قطعاتی که در معرض کاویتاسیون قرار می‌گیرند دو نظریه وجود دارد:

براساس نظریه اول، دراثرترکش حبابها، ذرات مایع با سرعت زیاد (Micro Jet) به سطح قطعات بر خورد کرده و باعث بروز پدیده خستگی و کنده شدن ذرات سطح فلز می‌گردد. این پدیده بوسیله دور بین‌های فیلم برداری با سرعت زیاد تأئید شده‌است.

در نظریه دوم، فرض براین‌است که‌ترکش حبابها باعث ایجاد فشار موضعی شدیدی گردیده که قادر به تخریب سطوح فلزی می‌باشند. شدت این موج فشار می‌تواند حتی به 10^5 بار نیز برسد.

در هر حال تجربیات عینی نشان می‌دهد که میزان فرسایش قطعاتی که در معرض کاویتاسیون قرار می‌گیرند به ٤ عامل زیر بستگی دارد:

× دوره زمانی که قطعه در معرض کاویتاسیون قرار می‌گیرد.

× شدت پدیده کاویتاسیون

× خواص فیزیکی مایع

× مقاومت مکانیکی فلزی که در معرض کاویتاسیون قرار دارد.

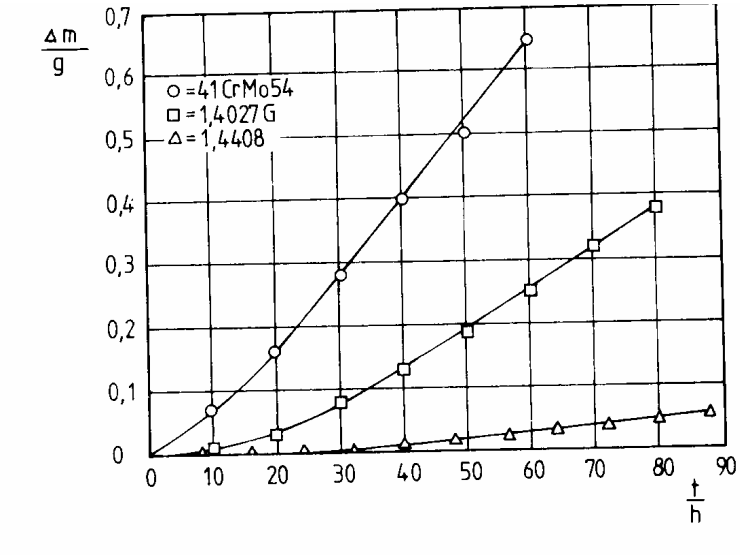
در اکثر موارد بر حسب شکل فیزیکی قطعه ای که در معرض کاویتاسیون قرار می‌گیرد، شدت آسیب دیدگی آن ممکن‌است وضعیت خاص خود را داشته باشد. مثلاً در قسمت لبه جلوئی پروانه، سرعت خرابی حالتی پیشرونده را بخود می‌گیرد. در موارد نادری، حفره‌ها ممکن‌است توسط مایع پر شده و همین امر باعث می‌شود تاMicro Jetنتواند با شدت زیاد باعث آسیب دیدگی قطعه گردد.

دررابطه با تأثیر خواص فیزیکی مایع برروی شدت فرسایش ناشی از کاویتاسیون اطلاعات جامعی دردست نمی‌باشد. ولی بنظر می‌رسد که هیدروکربنها در مقایسه با آب سرد کمتر قادر به آسیب رسانی به قطعات می‌باشند. این امر برای آب گرم $(t\rangle 150^{oc})$ نیز صادق می‌باشد. مقاومت فلز در مقابل کاویتاسیون به خواص مکانیکی آن نظیر مقاومت کششی (Tensile Strength) بستگی دارد. در شکل (۵-۷) شدت فرسایش سه آلیاژ مختلف در مقابل کاویتاسیون نشان داده شده‌است. بروز پدیده‌هایی نظیر خوردگی همزمان باکاویتاسیون نیزمی‌تواند برروی میزان فرسایش قطعات تأثیر به‌گذارد. چراکه در فرآیند خوردگی، تشکیل لایه‌های مقاوم مانع از تسریع آن گردیده، در حالی که بروز کاویتاسیون، باعث تخریب لایه مقاوم درمقابل خوردگی شده و همین امر موجب تسریع فرسایش قطعات دراثر خوردگی می‌گردد.

۷-۷: علائم بروز کاویتاسیون در پمپهای گریزازمرکز

پدیده کاویتاسیون همانند هر عارضه دیگری دارای نشانه‌ها و علائمی‌بوده که به‌کمک آن می‌توان بروز پدیده کاویتاسیون در پمپ را شناسائی کرده و سپس براساس دستورالعمل‌هائی

که در ادامه این بخش ارائه خواهد شد، تصمیم مناسب جهت غلبه بر آن اتخاذ نمود.



شکل (۵-۷): مقاومت مکانیکی آلیاژها در مقابل پدیده کاویتاسیون

همانطوری که قبلاً گفته شد، شروع کاویتاسیون در پمپ هنگامی‌است که در اثر کاهش NPSHA، ارتفاع پمپ به میزان ۳ درصد کاهش یابد. اما واقعیت امر دراین‌است که‌استناد به تعریف فوق برای شناخت بروز پدیده کاویتاسیون درپمپها کافی نبوده وگاهی اوقات غیرقابل تشخیص می‌باشد، به نحوی که غالباً، هنگامی‌اپراتورها ویا تعمیرکاران به وقوع این پدیده نامطلوب در پمپها پی می‌برند که پمپ دچارخسارات جبران ناپذیری گردیده‌است. بنابراین لازم‌است کلیه افرادی که به‌نحوی باپمپها سروکاردارند، به علائم مشخصه بروزکاویتاسیون درپمپها آشناشده تابه محض مشاهده آنها باانجام یک سری عملیات اصلاحی، مانع ازپیشرفت کاویتاسیون درپمپهاوبروزصدمات شدیددرساختارمکانیکی آن گردند. مهمترین علائم مشخصه بروز کاویتاسیون درپمپهای گریزازمرکزعبارتند از تشکیل حباب در پروانه و پوسته، ایجاد سروصدا، افزایش لرزش، کاهش ارتفاع و دبی و راندمان پمپ، کاهش فشار دهش، لرزش در فشار سنج‌های مکش و دهش، خرابی زودرس یاطاقانها، آسیب دیدگی قطعات داخلی پمپ و... .

الف: تشکیل حباب

همانطوری که قبلاً اشاره شده، بروز پدیده کاویتاسیون با تشکیل حباب‌های بخار شروع می‌شود. برای این منظور می‌توان از تجهیزاتی که قادربه نشان دادن شرایط داخلی پمپ نظیرEndoscope می‌باشد، استفاده کرد.

ب: سروصدا

تشکیل حباب وترکش آنها در اثر پدیده کاویتاسیون همواره با بروز سروصدای غیر عادی (صدائی نظیر عبور ماسه از درون پوسته پمپ) توأم خواهد بود.

در شناخت کاویتاسیون اندازه گیری مقدار سروصدا (میزان مطلق آن) لازم نبوده و بلکه تغییر سطح (Level) آن باید معیار تشخیص قرار گیرد. این روش اجازه می‌دهد تا براساس آن بتوان سیستم‌های هشداردهنده را براساس سطح فشار صوتی ناشی از کاویتاسیون برای تشخیص وضعیت هشدار، توقف و یا کنترل پیش بینی کرده و از آن جهت کنترل شرایط بهره‌برداری استفاده نمود.

ج: لرزش

لرزشی که در زمان بروز کاویتاسیون در پمپ پدید می‌آید ناشی از سه پدیده زیر می‌باشد:

۱: به‌علت وجود تفاوت‌های اجتناب ناپذیردر تیغه‌ها، دنباله کاویتاسیون در تمامی‌تیغه‌ها یکسان نمی‌باشد، در نتیجه جریان مایع در اطراف تیغه‌ها در حال تغییر بوده و همین امر باعث نابالانسی در پروانه گردیده که لرزش پمپ را به‌دنبال خواهد داشت.

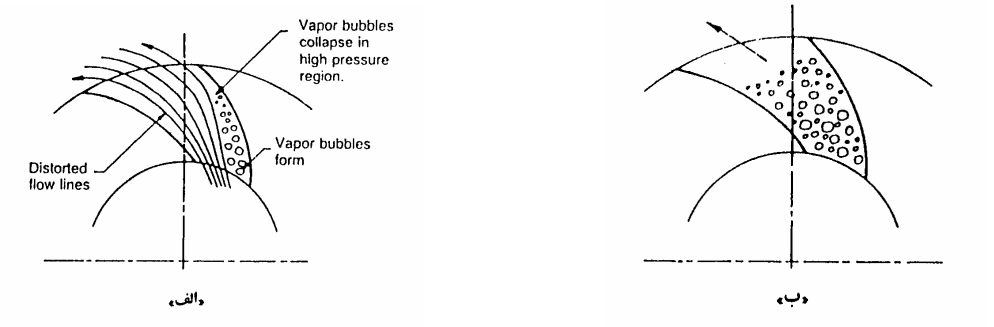
۲: دنباله کاویتاسیون دائماً در حال تغییر بوده و همین امر باعث بروز کاویتاسیون با فرکانس زیاد و در حال تغییر خواهد شد.

۳:اگر گسترش دنباله کاویتاسیون درحدی باشدکه جریان مایع به‌طور چشم گیری پخش شود(کاهش ارتفاع)، جریان مایع خروجی از پروانه یکنواخت نبوده و می‌تواند باعث بروز پدیده جدا شدن در قسمت پائین دستی مجرای هر تیغه گردد. هرچه جریان مایع در اثر کاویتاسیون در پروانه بیشتر پخش شود، مایعی که به گلوئی پوسته پمپ می‌رسد دارای نوسان بیشتری خواهد بود. فرکانس لرزش در این حالت برابراست با فرکانس دوران ضربدر تعداد تیغه‌های پروانه. در اینجا ذکر این نکته ضروری‌است که بروز کاویتاسیون ابتداءِ با تشکیل مقادیر جزئی حباب شروع گردیده و در این مرحله فقط قسمتی از پروانه توسط حباب پر خواهد شد (شکل الف۶-۷) که اصطلاحاً آن‌را (کاویتاسیون جزئی) می‌نامند. بعد از گسترش کاویتاسیون، پروانه از حبابهای گاز پر شده (شکل ب۶-۷) و کاویتاسیون حالت کلی را بخود می‌گیرد. در حالت کاویتاسیون جزئی هرچند که لرزش ناشی ازترکش حبابها در مقایسه با کاویتاسیون کلی کمتر می‌باشد ولی به‌خاطر غیر یکنواختی توزیع سیالات (مایع و بخار) در آن، لرزش ناشی از نابالانسی در پروانه زیادتر از کاویتاسیون کلی خواهد بود. به همین خاطر در تحلیل فرآیند کاویتاسیون کاهش لرزش را نباید یک عامل بهبود شرایط عملکرد سیستم (رفع کاویتاسیون) تلقی کرد، بلکه خود می‌تواند تأئیدی بر پیشرفت و گسترش کاویتاسیون در پمپ باشد.

د: کاهش ارتفاع قابل دسترس، دبی و راندمان پمپ

در مواردی که NPSHA درحدی باشد که پمپ دچار کاویتاسیون نگردد، نقطه کار پمپ، محل تلاقی منحنی مشخصه سیستم با منحنی مشخصه پمپ خواهد بود. عدم بروز کاویتاسیون باعث ثبات منحنی مشخصه پمپ گردیده و لذا ارتفاع قابل دسترس، دبی وراندمان پمپ مقادیر قابل

قبول را خواهند داشت. ولی در شرایط بروز کاویتاسیون، منحنی مشخصه پمپ دچار تغییرات نامطلوبی گشته و قادر به اعمال ارتفاع همانند شرایط عادی نخواهد بود و همین امر باعث کاهش ارتفاع قابل دسترس، دبی و راندمان پمپ خواهد شد (شکل ۷-۷).



شکل (٦-٧): کاویتاسیون جزئی(الف) و کلی (ب)

همانطوری که در شکل (۷-۷) مشاهده می‌شود بروز کاویتاسیون در پمپ باعث انتقال محل تلاقی منحنی مشخصه پمپ با منحنی مشخصه سیستم به‌سمت چپ (دبی کمتر) شده و نقطه کار دارای ارتفاع، دبی و راندمان کمتری در مقایسه با حالتی که NPSHA در حد کافی می‌باشد، می‌گردد.

هر چند که در منابع علمی‌اشاره چندانی به تأثیر کاویتاسیون برروی توان مصرفی در پمپ تحت شرایط بروز کاویتاسیون نگردیده ولی با بررسی رابطه (۷-۱) شاید بتوان نتیجه گرفت که با توجه به کاهش همزمان دو پارامتر Q وH در صورت و کاهش راندمان در مخرج کسر نباید انتظار افزایش توان مصرفی را داشته و احتمال کاهش توان مصرفی بیشتری می‌باشد. ولی در هر حال اظهار نظر قطعی در این زمینه نیازمند تعیین مقادیر Q، H و η بوده تا براساس آن بتوان نظر قطعی را در زمینه تأثیر کاویتاسیون برروی توان مصرفی در پمپ اعلام کرد.

هـ: کاهش فشار دهش

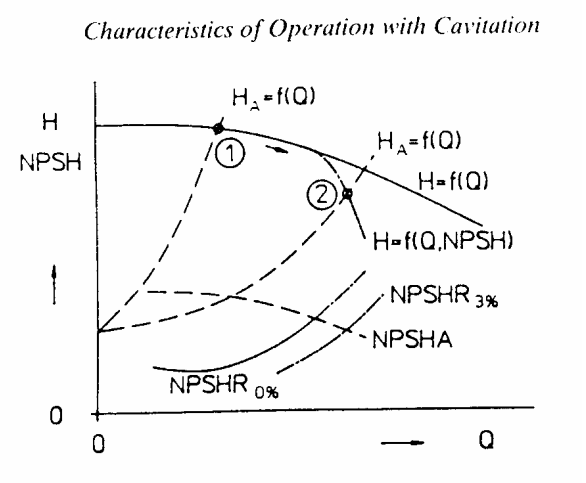
با توجه به رابطه(۷-۱) می‌توان نتیجه گرفت:

$$H = \frac{10.2P}{SG} \Rightarrow P = \frac{H.SG}{10.2} \qquad (۷-۱)$$

بروز پدیده کاویتاسیون ضمن کاهش ارتفاع قابل دسترس، باعث تشکیل حبابهای بخار گردیده که دارای وزن مخصوص کمتری نسبت به فازمایع می‌باشند. با توجه به رابطه (۷-۱)بدیهی‌است که کاهش ارتفاع قابل دسترس و وزن مخصوص مایع موجب کاهش فشار دهش پمپ خواهد شد.

و: نوسان شدید عقربه فشار سنج‌های مکش و دهش

درمواردی که پمپ دچارپدیده کاویتاسیون می‌گردد، فاقد رفتار یکنواخت وپایدارخواهد شد. یکی ازمهمترین ناهماهگنی رفتاری آن نوسان شدید درفشار مکش و دهش بوده که به‌صورت نوسان شدید در عقربه‌های فشارسنج‌های مکش ودهش می‌توان آن‌رامشاهده کرد.



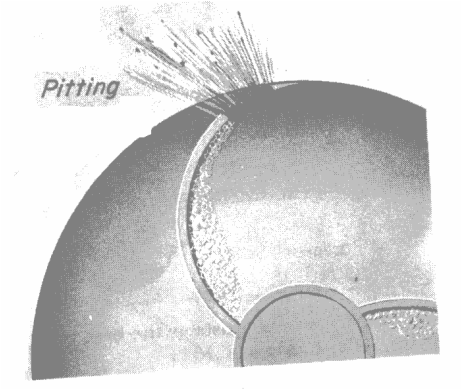
شکل (۷-۷): تأثیر کاویتاسیون بر عملکرد پمپ گریزازمرکز

ز: خرابی زودرس یاطاقانها

پمپهای گریزازمرکز غالباً دارای دونوع یاطاقان (Bearing) می‌باشند که یکی ازآنهابرای بارشعاعی (Radial Load) بوده ودیگری برای تحمل بارمحوری (Axial Load) می‌باشد. بروز پدیده کاویتاسیون درپمپها موجب تغییرات شدید بارهای وارده بریاطاقانها گردیده وهمین تغییرات شدید بار وارده، موجب تغییرات شدید در بردارنیروهای وارده بریاطاقانها خواهد شد که نهایتا" باعث کاهش عمرمفید وخرابی زودرس یاطاقانها می‌شود.

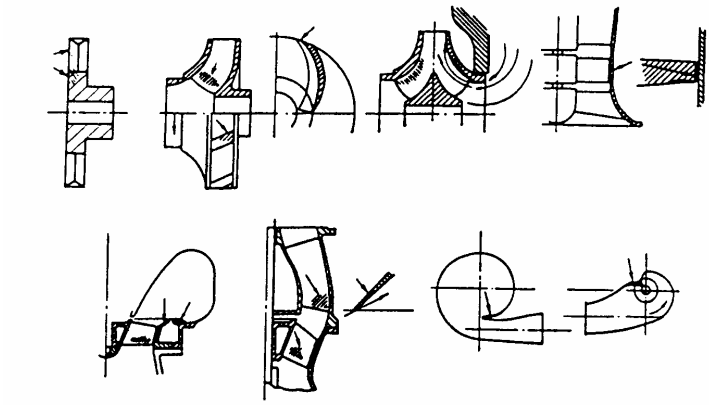
ص: بروز صدمات وخرابی درپروانه وپوسته یک پمپ

تشکیل حباب درهنگام بروز پدیده کاویتاسیون درداخل پروانه پمپ غالبا" درقسمت فشارضعیف تیغه پروانه صورت پذیرفته وبدیهی‌است هنگامی‌که این حبابها به مناطقی بافشار زیادمی‌رسند، واردشدن فشاربراین حبابها موجب‌ترکیدن آنها خواهدشد.ترکیدن حبابها همواره باآزادشدن مقدارزیادی انرژی توأم بوده که همان انرژی نهان تبخیر مایع می‌باشد که در زمان تبخیر، به مایع داده شده‌است. انرژی آزادشده، برروی سطوحی که حبابها برروی آن می‌ترکندنیرو واردکرده ومی‌تواندباعث کنده شدن ذرات فلزازبدنه پروانه وپوسته گردد. کنده شدن فلزازبدنه پروانه رااصطلاحا" آبله گون شدن (Pitting) می‌نامند (شکل ۸-۷).



شکل (۸-۷): آبله گون شدن پروانه در اثر پدیده کاویتاسیون

آثار تخریبی کاویتاسیون نه در محل تشکیل حبابها و بلکه در نواحی با فشار بالا که در اثر افزایش فشار، حبابها می‌ترکند به‌وقوع می‌پیوندد. اگر ترکش حبابها در حین جریان مایع به‌وقوع بپیوندد آسیبی به پمپ وارد نمی‌شود ولی در نزدیکی دیواره قطعات و در اثر پدیده ضربه جت (Jet Impact)، در ابتدای امر فقط سطح قطعه آسیب دیده ولی به‌مرور زمان در عمق آن نفوذ خواهد کرد. در شکل (۹-۷) نقاطی که می‌توانند در معرض آسیب دیدگی ناشی از کاویتاسیون قرار گیرند با پیکان نشان داده شده‌است که شامل تیغه‌های پروانه اندکی دورتر از لبه هدایت کننده و در قسمت پشتی آن، نقاطی که لقی متحرک (Running Clearance) وجود دارد، قسمت ورودی پروانه جائی که تغییر ناگهانی مسیر جریان بروزمی‌کند و در تیغه‌های هدایت کننده بعدی به‌وقوع می‌پیوندد.



شکل (۹-۷): مکانهای بروز کاویتاسیون در پمپ‌های گریزازمرکز

لازم به ذکراست که در زمان تعمیرات پمپها غالباً مسئولین تعمیرات با خرابی‌هایی برروی پروانه وپوسته پمپ مواجه می‌شوند که درابتدای امر به نظرمی‌رسد ناشی ازبروزپدیده کاویتاسیون می‌باشد. حال آنکه خرابی‌های موجودممکن‌است ناشی ازپدیده خوردگی (Corrosion) ویاسایش (Erosion) ویامجموعه ازدو یا سه پدیده فوق باشد. شناخت علت خرابی پروانه وپوسته پمپ ویافتن راه حل مناسب برای برطرف کردن ویاجلوگیری ازآن اهمیت بسزائی دارد که در قسمتهای بعدی همین بخش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۸-۷: روشهای غلبه بر کاویتاسیون

پدیده کاویتاسیون هنگامی‌در پمپ‌های گریزازمرکز به‌وقوع می‌پیوندد که شرایط قسمت مکش (فشار مایع) در حد مطلوب نبوده، به‌نحوی که مایع قبل از ورود بداخل پروانه (و درمواردی حتی درقسمت‌های ابتدائی پروانه) به بخار تبدیل نشود. لذا جهت جلوگیری از بروز این پدیده لازم‌است که شرایط مایع در دهانه ورودی پمپ در حدی باشد که مایع مورد انتقال در طول عبور از مسیر مکش تا قسمت خروجی پروانه به‌صورت بخار تبدیل نشود. برای این منظور از نظر تئوریک کافی‌است که NPSHA از NPSHR پمپ در دبی بهره‌برداری بیشتر باشد. اکثر

سازندگان پمپهای گریزازمرکز توصیه می‌کنند که جهت اطمینان از بروز پدیده کاویتاسیون بهتراست که NPSHA حداقل۰/۵ متراز NPSHR بیشتر باشد(رابطه ۲-۷). در بعضی از مراجع توصیه شده‌است که NPSHA برای آب حدود ۲۰ در صد و برای هیدروکربورها حداقل ۱۰ درصد از NPSHR بیشتر بوده ولی مقدار اختلاف نباید از۰/۵ متر کمتر باشد.

$$NPSHA \geq NPSHR + 0.5(m) \qquad (۷-۲)$$

به‌هرحال ممکن‌است شرایطی در سیستم انتقال مایع به‌وجود آید که عملاً شرایط فوق برقرار نبوده و پمپ در معرض کاویتاسیون قرار گیرد. همانطوری که قبلاً گفته شد NPSH (مورد نیاز و قابل دسترس) مقادیر ثابتی نبوده و خود تابعی از دبی جریان در سیستم می‌باشند.

منحنی تغییرات NPSHA و NPSHR بر حسب دبی، شکلی سهمی‌گونه دارند. NPSHA با افزایش دبی کاهش یافته (به‌جهت افزایش از دست رفت ناشی از اصطکاک در سیستم)، در عوض NPSHR با افزایش دبی پمپ کاهش می‌یابد. درشکل (۷-۱۰) تغییراتNPSHA و NPSHR برحسب دبی نشان داده شده‌است.

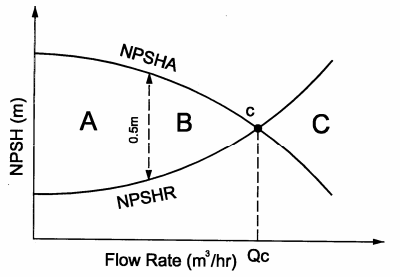
همانطوری که در شکل (۷-۱۰) مشاهده می‌شود، بهره‌برداری از پمپ را می‌توان به سه منطقه تقسیم کرد. در منطقه (A)، NPSHA به اندازه کافی از NPSHR بیشتر بوده و به همین خاطر می‌توان آن‌را (منطقه امن بهره‌برداری) نامید. احتمال بروز پدیده کاویتاسیون در مواردی که $Q\langle Q_A$ باشد تقریباً صفرمی‌باشد. در منطقه B هرچند که NPSHA〉NPSHR می‌باشد، ولی اگر به هر دلیلی در طی بهره‌برداری از پمپ، NPSHA کاهش یابد (نظیر وجود گرفتگی در مسیر مکش و چشمه پروانه و...)، احتمال بروز کاویتاسیون وجود داشته و به همین خاطر این منطقه را باید *(منطقه احتیاط)* در بهره‌برداری نامید. در منطقه C که در آن $Q \geq Q_C$ می‌باشد بروز کاویتاسیون قطعی بوده و به همین خاطر بهره‌برداری از پمپ در شرایط فوق به‌هیچ عنوان توصیه نمی‌شود.

برای غلبه بر کاویتاسیون می‌توان از روش‌های زیراستفاده کرد:

الف: افزایش NPSHA

ب: کاهش NPSHR

ج: افزایش مقاومت مکانیکی قطعات پمپ در مقابل کاویتاسیون



شکل (۷-۱۰): منحنی تغییرات NPSHA و NPSHR بر حسب دبی

۹-۷: روشهای افزایش NPSHA

NPSHA جزءِ مشخصه‌های سیستم و مایع مورد پمپاژ می‌باشد. بنابر این جهت افزایش آن باید در شرایط طراحی و بهره‌برداری از سیستم و مشخصه‌های فیزیکی مایع مورد انتقال تجدید نظر بعمل آورد. بنا بر تعریف NPSHA از رابطه (۳-۷) و در دهانه مکش پمپ محاسبه می‌شود:

NPSHA = ارتفاع سرعتی + ارتفاع معادل فشار بخار مایع - ارتفاع‌استاتیکی مکش

ارتفاع معادل از دست رفت انرژی در قسمت مکش - اختلاف ارتفاع مایع تا منبع مکش ±

رابطه فوق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

$$\text{NPSHA} = \frac{(\text{P}_\text{S} - P_V) \times 10.2}{SG} + \frac{V_1^2}{2g} \pm Z - \sum h_L \qquad (۳-۷)$$

که در آن:

$P_S =$	فشار مطلق در منبع مکش	بار
$P_V =$	فشار بخارمایع در دمای پمپاژ	بار
$V_1 =$	سرعت مایع در دهانه مکش پمپ	متر بر ثانیه
Z=	اختلاف ارتفاع سطح مایع تا دهانه مکش پمپ	متر
$\sum h_L$	جمع از دست رفت انرژی در لوله مکش	متر
SG =	وزن مخصوص مایع	

تذکر: اگر سطح مایع از دهانه مکش پمپ بالاتر باشد (Head)، علامت Z مثبت بوده و اگر از دهانه مکش پمپ پائین‌تر باشد (Lift)، علامت Z منفی خواهد بود. در حالتی که مایع و دهانه مکش پمپ در یک سطح قرار دارند Z=0 می‌باشد. جهت افزایش NPSHA لازم‌است که در رابطه (۳-۷) مقادیر مثبت افزایش داده شده و یا مقادیر با علامت منفی کاهش داده شود. افزایش NPSHA موجب افزایش هزینه‌های ثابت (هزینه‌های لوله کشی)در سیستم می‌گردد. .

مثال: ۱-۷: مطلوب‌است محاسبه NPSHA در سیستمی‌که پمپ مایع را از منبع مکش بسته (شکل۱۱-۷)دریافت می‌کند. آب = مایع موردپمپاژ

$t = 55^{oC}$

$SG = 0.9857$

$P_V\,(at 55^{oC}) = 0.1574 bar(a)$

$P_a = 1.025 bar(a)$

$P'(Tank) = 0.38 bar(g)$

$Z = -3.5m$

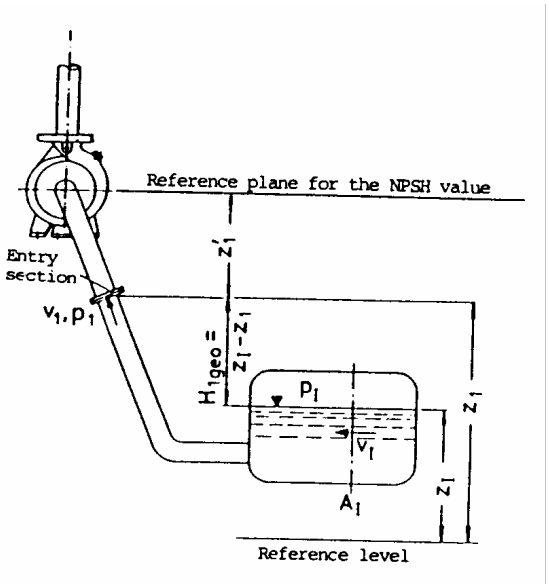
$\sum h_L = 4.5m$

حل:

$$P_S = P_a + P' = 1.025 + 0.38 = 1.405 bar(a)$$

در اکثر موارد از ارتفاع معادل انرژی جنبشی ($\frac{V_1^2}{2g}$) صرف نظر می‌شود.

$$NPSHA = \frac{(1.405 - 0.1574) \times 10.2}{0.9857} - 3.5 - 4.5 = 4.91m$$



شکل (۱۱-۷): محاسبه NPSHA با مکش از منبع بسته

یاد آوری: اگر منبع مکش روباز باشد (نظیراستخر و چاه آب)، $P' = 0$ در نظر گرفته می‌شود.

حال اگر NPSHRپمپی که در این سیستم به‌کار گرفته می‌شود در دبی بهره‌برداری ۵ متر باشد، با توجه به رعایت ۰/۵ مترتفاوت مورد نیاز جهت اطمینان ازعدم بروز کاویتاسیون، NPSHA باید حداقل ٤/۵ متر باشد.

۱۰-۷: روشهای غلبه بر کاویتاسیون از طریق افزایش NPSHA

همانطوری که قبلاً اشاره شد، جهت افزایش NPSHA لازم‌است که در رابطه (٤-۷) مقادیر منفی را کاهش و یا مقادیر مثبت را افزایش داد. برای این منظور می‌توان از روشهای زیراستفاده کرد:

الف: افزایش فشار در منبع مکش (P_S)

این روش برای مواردی که پمپ مایع مورد انتقال را ازمخزنی بسته دریافت می‌کند قابل اجراء می‌باشد. افزایش فشار منبع مکش می‌تواند با تزریق گاز به بالای سطح مایع و افزایش فشار مایع موجود در منبع به‌طور مستقیم صورت پذیرد. گاز مورداستفاده باید سازگاری لازم را با مایع مورد انتقال داشته باشد. در شرایط عادی غالباً از هوا و در شرایط خاص (ضرورت خنثی بودن گاز مورداستفاده) عموماً از ازت‌استفاده می‌شود.

ب: کاهش فشار بخار مایع از طریق سرد کردن آن

همانطوری که در قسمت (۲-۷) اشاره شد، فشار بخار مایعات تابعی از دمای آن بوده و با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد (و بالعکس). در مواقعی که امکان کاهش درجه حرارت مایع

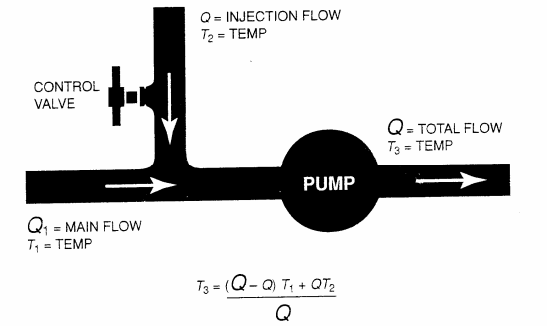
موردانتقال مجازباشد، بااستفاده از مبدل حرارتی و یا تزریق مایع سرد به قسمت مکش پمپ می‌توان درجه حرارت مایع و در نتیجه فشار بخار آن‌را کاهش داد.

در صورت‌استفاده از مبدل حرارتی از آنجائی که عبور مایع مورد انتقال از درون مبدل حرارتی خود باعث کاهش فشار مایع در قسمت مکش پمپ می‌شود که چندان مطلوب نمی‌باشد. بنابراین مبدل حرارتی باید طوری طراحی شود که افت فشار مایع به‌هنگام عبور از آن حتی الامکان کم بوده و در حدی باشد که نتایج حاصل از کاهش دمای مایع را که منجر به کاهش فشار بخار آن می‌شود خنثی نسازد.

تزریق مایع سرد به مایع مورد انتقال حتی در مقادیر کم می‌تواند نتایج بسیار مطلوبی را در پی داشته و به همین خاطر در اکثر موارد برای کاهش فشار بخار مایع از این روش‌استفاده می‌شود. در سیستمی‌که برای انتقال آب گرم (با دمای 163^{oC} معادل 325^{oF}) طراحی شده‌است، تزریق آب با دمای 79^{oC} (معادل 175^{oF}) به میزان ٤ درصد باعث افزایش NPSHA به میزان ۲۰فوت (۱/۶ متر) می‌شود. در شکل (۱۲-۷) نحوه تزریق مایع سرد به قسمت مکش پمپ نشان داده شده‌است.

ج: بالا بردن سطح مایع در منبع مکش

شاید در نظر اول بالا بردن سطح مایع در منبع مکش جهت افزایش NPSHA راه حل ساده ای بنظر برسد ولی در خیلی از موارد این امر تقریباً غیر ممکن می‌باشد. مثلاً اگر پمپ برای انتقال آب از رودخانه و یا دریاچه به‌کارگرفته شود و یا هزینه بالا بردن منبع مکش زیاد باشد، امکان اجراءِ این دستورالعمل تقریباً غیر ممکن خواهد بود. با این وجود در مواردی که این اقدام عملی باشد، افزایش جزئی ارتفاع سطح مایع ضمن حل مشکل کاویتاسیون این امکان‌را مهیا می‌سازد تا بتوان ازپمپ ارزانتر وباراندمان بیشتراستفاده کرد که در نهایت منجر به کاهش هزینه خرید، هزینه‌های بهره‌برداری (مصرف انرژی) و تعمیرات خواهد شد.



شکل (۱۲-۷): تزریق مایع به قسمت مکش جهت سرد کردن مایع مورد انتقال

د: پائین بردن پمپ

در اکثر موارد پائین بردن پمپ و کاهش میزان مکش (Lift) و یا افزایش ارتفاع (Head) آسان‌تر از بالابردن سطح مایع (بندج) می‌باشد. نتایج حاصل از این اقدام همانند حالت قبل خواهد بود.

یک روش جایگزین و مشابه آن‌استفاده از پمپهای عمودی که پروانه آن در قسمت زیرین پمپ و پائین‌تر از سطح زمین قرار دارد می‌باشد. مشکل این روش در روانکاری یاطاقانهای پمپ خواهد بود. باید بررسی شود که آیا مایع مورد انتقال قابلیت روانکاری مطلوب یاطاقانها را دارا می‌باشد یا خیر ؟ امروزه با پیشرفت‌هائی که در طراحی و انتخاب مواد اولیه یاطاقانها حاصل شده‌است مشکل روانکاری یاطاقانها تقریباً حل شده‌است. با این وجود نباید انتظار داشت که عمر مفید یاطاقانها حتی هنگامی‌که باروغن ویا گریس روانکاری می‌شوند در حد عمر پمپ باشد. در هر حال این روش موجب افزایش میزان تعمیرات مورد نیاز برای پمپ می‌گردد.

هـ: کاهش ازدست رفت انرژی در لوله مکش

جریان مایع از منبع مکش تا دهانه چشمه پروانه همواره با از دست رفت انرژی (افت فشار)توام می‌باشد. بنابراین هر اقدامی‌در زمینه کاهش افت فشار ناشی از عبور مایع از درون لوله و اتصالات موجود در مسیر مکش پمپ می‌تواند در افزایش NPSHA مؤثر واقع گردد که عمده‌ترین آنها عبارتند از:

۱- کاهش دبی پمپ

۲- کاهش طول مسیر مکش

۳- کاهش تعداد اتصالات

٤- افزایش قطر لوله مکش

۵-استفاده از اتصالات با از دست رفت انرژی کمتر

هریک از اقدامات فوق تأثیری جداگانه در کاهش از دست رفت انرژی در لوله مکش (افزایش NPSHA) باقی می‌گذارد. از دست ارتفاع در سیستم‌های لوله کشی با مربع دبی جریان (ویا به‌عبارت صحیح‌تر با $Q^{1.85}$) رابطه مستقیم دارد. از سوی دیگر کاهش دبی موجب کاهش NPSHR نیز خواهد شد.

همانطوری که در شکل (۱۰-۷) مشاهده می‌شود، با کاهش دبی، فاصله NPSHA از NPSHR زیادتر شده و عملکرد پمپ در جهت بهره‌برداری با شرایط امن‌تر هدایت می‌شود. برای کاهش دبی پمپ می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر تغییر سرعت دورانی، ایجاد مقاومت در قسمت مکش و یا ایجاد مقاومت در مسیر دهش (استفاده از شیر کنترل دبی) و... استفاده کرد.

ایجاد مقاومت در قسمت مکش (Suction Throttling) هرچند که باعث کاهش دبی جریان در لوله مکش می‌گردد ولی باتوجه به اینکه خود باعث افزایش افت فشار در لوله مکش می‌شود روش منطقی نبوده و به هیچ وجه توصیه نمی‌شود. تغییر سرعت دورانی جهت کاهش دبی پمپ در صورت قابلیت اجراءِ روش مطمئنی می‌باشد. ایجاد خفگی در مسیر دهش پمپ جهت کاهش

دبی روش ساده ای بوده و لذا جهت حل مقطعی مشکل بروز کاویتاسیون می‌توان آن‌را بهترین روش دانست.

البته کاهش دبی خود عوارض جدیدی را به‌دنبال داشته که عمده‌ترین آن بروز جریان گردشی در قسمت مکش پمپ می‌باشد، لذا نباید این روش را به‌عنوان یک راه حل قطعی تلقی نمود.

کاهش طول مسیر مکش از طریق نزدیک کردن پمپ به منبع مکش هرچند که روی ارتفاع کل مورد نیاز در سیستم تأثیری نمی‌گذارد ولی باعث کاهش ازدست رفت انرژی در لوله مکش و افزایش NPSHA می‌گردد. به همین خاطر در طراحی سیستم لوله کشی به‌ویژه در مواردی که احتمال بروز کاویتاسیون زیاد می‌باشد اکیداً توصیه می‌شود که پمپ در نزدیک‌ترین محل نسبت به منبع مکش نصب گردد. تأثیر طول مسیر برروی افت فشار یک رابطه خطی بوده و لذا میزان ازدست رفت انرژی در لوله مکش با کم کردن طول آن به‌طور خطی کاهش می‌یابد.

افزایش قطر لوله و سایر اتصالات موجود در لوله مکش تأثیر زیادی برروی کاهش ازدست رفت انرژی باقی می‌گذارد. به‌طوری که مثلاً با ۲ برابر کردن قطر لوله مکش، میزان افت انرژی در آن حدود ۳۲ برابر(معادل 2^5) کاهش می‌یابد.

در اکثر سیستم‌های انتقال حتی در مواردی که احتمال بروز کاویتاسیون کم می‌باشد توصیه می‌شود که لوله مکش حدود یک تا دو اندازه (Size)، از لوله دهش بزرگتر در نظر گرفته شود.

با کاهش تعداد اتصالات وحذف قطعات غیر ضروری در مسیر مکش می‌توان NPSHA را افزایش داد. مثلاً باید از پیچ وخم دادن غیر ضروری مسیر مکش خودداری کرد و یا در مواقعی که منبع مکش در پائین‌تر از دهانه ورودی پمپ قرار دارد نیازی به نصب شیر تعمیراتی (Repair Valve) در لوله مکش نمی‌باشد.

اتصالات براساس کیفیت طراحی و ساختمان آنها دارای از دست رفت انرژی مختلفی می‌باشند، مثلاً از دست رفت انرژی در زانوئی شعاع بلند (Long Radius Elbow) در مقایسه با زانوئی‌استاندارد (Standard Elbow) بسیار کمتر بوده، و یا افت فشار در هنگام عبور مایع از درون شیر کشوئی (Gate Valve) چندین برابر کمتر از شیر بشقابی (Globe Valve) می‌باشد.

به همین خاطر در انتخاب اتصالات برای نصب در قسمت مکش پمپها باید سعی شود از اتصالاتی‌استفاده شود که از دست رفت انرژی در آن در حداقل ممکن باشد.

و:استفاده از پمپ تقویتی (Booster Pump) درقسمت مکش

این روش به‌ویژه برای مواردی که پمپ اصلی برای اعمال ارتفاع (فشار) زیاد طراحی شده‌است بسیار مؤثر می‌باشد، چرا که اجازه می‌دهد تا پمپ اصلی با سرعت بیشتری کارکرده و همین امر ضمن کاهش قیمت پمپ اصلی، موجب افزایش راندمان، کاهش تعداد مراحل و افزایش قابلیت اعتماد در سیستم می‌گردد.

پمپ‌های تقویتی عموماً پمپهای با سرعت و ارتفاع کم و از نوع یک مرحله‌ای با NPSHR کم می‌باشند که با افزایش جزئی فشار مایع، NPSHA در دهانه مکش پمپ اصلی را افزایش می‌دهند.

۱۱-۷: روشهای کاهش NPSHR

بر خلاف NPSHA که به ویژگیهای سیستم لوله کشی و خواص فیزیکی مایع بستگی داشت، NPSHR جزءِ مشخصه‌های رفتاری پمپ و به‌ویژه پروانه آن می‌باشد. بنابراین کاهش NPSHR نیازمند به انجام اقداماتی در زمینه بهبود شرایط عملکرد و یا انتخاب پمپ (پروانه) مناسب می‌باشد.

پمپ‌های با NPSHR کم غالباً گران و با راندمان کم بوده و پمپهای با سرعت مخصوص مکش (N_{SS}) بالا را شامل می‌شود. خریداران پمپ علاقه مندند که منحنی NPSHR با افزایش دبی باشیب کمتری افزایش یابد. در این قسمت روشهای متداول برای کاهش NPSHR مورد بررسی قرار می‌گیرد:

الف: کاهش سرعت دورانی

هنگامی‌که براساس شرایط مورد نیاز در سیستم پمپ انتخاب شده دارای سرعت مخصوص مکش کم‌است، این امر به‌معنی پائین بودن سرعت دورانی پمپ نیز می‌باشد. با توجه به پائین بودن سرعت دورانی پمپ جهت دست یابی به دبی و ارتفاع مورد نیاز در سیستم ناچاراً باید از پمپ بزرگتر که قطعاً گران نیز خواهد بوداستفاده شود. کاهش سرعت دورانی بسهم خود موجب کاهش راندمان پمپ نیز خواهد شد، به همین خاطر این روش از نظر اقتصادی نمی‌تواند تصمیم مناسبی برای رفع مشکل کاویتاسیون در سیستم باشد. البته اگر شرایط پوسته پمپ اجازه دهد می‌توان عوارض ناشی از کاهش سرعت دورانی روی دبی و ارتفاع را به‌کمک افزایش قطر پروانه جبران کرد.

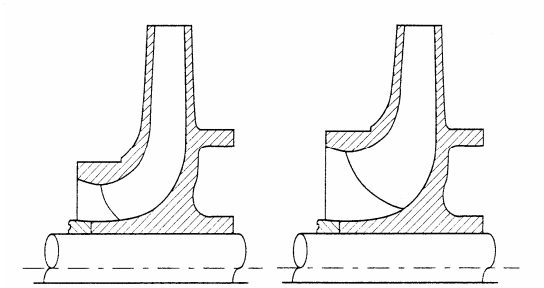
ب: استفاده از پروانه با دو مکش

عموماً برای مواردی که دبی مورد نیاز در سیستم زیاد باشد،ترجیح داده می‌شود که از پمپ‌هائی با پروانه دومکش‌استفاده شود. این اقدام باعث کاهش سرعت جریان مایع به‌درون پروانه و نهایتاً کاهش NPSHR می‌گردد.

ج: استفاده از پروانه با چشمه (Eye) وسیع‌تر

افزایش سطح جریان مایع به‌درون پروانه (Eye Area)موجب کاهش NPSHR می‌گردد. چرا که با توجه به ثابت نگهداشتن دبی، افزایش سطح مقطع باعث کاهش سرعت جریان مایع به‌درون پروانه می‌شود. هرچند که این اقدام تأثیر چندانی روی عملکرد پمپ در نزدیکی BEP نمی‌گذارد ولی هنگامی‌که دبی پمپ از BEP کمتر باشد، این اقدام می‌تواند باعث افزایش

سروصدا، بروز پدیده موج (Surge) هیدرولیکی و سایش زودرس پروانه شود. در شکل (۱۳-۷) دو نمونه از پروانه با چشمه‌های مختلف نشان داده شده‌است.



شکل (۱۳-۷): تغییر چشمه پروانه جهت کاهش NPSHR

در هر حال این اقدام می‌تواند عوارض جانبی به‌دنبال داشته و حتی الامکان باید از به‌کارگیری از این روش خودداری شود. در پمپهای چند طبقه، فقط تغییر دهانه پروانه مرحله اول توصیه می‌شود و تغییر چشمه پروانه مراحل بعدی تأثیری برروی NPSHR نمی‌گذارد.

د: استفاده از پمپ بزرگتر (Oversizing)

از آنجائی که NPSHR در یک خانواده از پمپهای گریزازمرکز با بزرگ شدن ابعاد پمپ، کاهش می‌یابد، در موارد خاصی برای حل مشکل کاویتاسیون و کاهش NPSHRترجیح داده می‌شود که از پمپ بزرگتراستفاده شود.

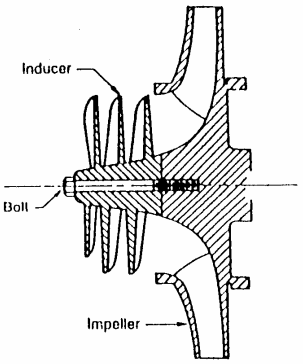
البته باید توجه داشت که در اکثر ماشین آلات صنعتی (به‌ویژه پمپهای گریزازمرکز)، باید سعی شود که مشخصات رفتاری ماشین با سیستم بهره‌برداری نزدیکی قابل قبول را داشته باشد. مغایرت بین شرایط بهره‌برداری و شرایط طراحی ماشین غالباً با عوارض نا مطلوبی توام بوده که در زمینه‌استفاده از پمپ بزرگتر جهت حل مشکل کاویتاسیون، نباید از افزایش قیمت پمپ، کاهش راندمان و خرابی‌های ناشی از بهره‌برداری از پمپ در ظرفیت‌های پائین غفلت کرد. عوارض مربوط به این تصمیم گیری همانند بزرگ کردن دهانه چشمه پروانه می‌باشد.

هـ: استفاده از پیش ران Inducer

پیش ران پروانه ای با ارتفاع کم (Low Head) از نوع جریان محوری با تعداد کمی‌تیغه (بین ۲ تا ٤ عدد) بوده که در جلوی پروانه اصلی نصب می‌شود شکل (۱٤-۷).

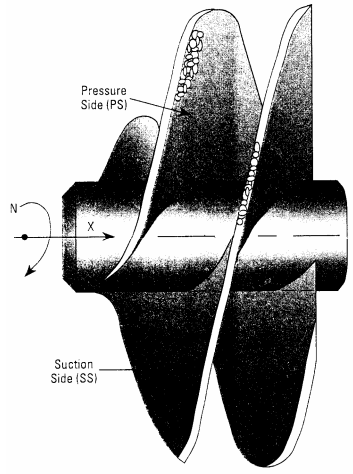
در شکل (۱۵-۷) تشکیل حباب برروی یک پیش ران نشان داده شده‌است. NPSHR پیش ران در مقایسه با پروانه اصلی کم بوده و لی در عوض با افزایش جزئی فشار مایعی که به‌سمت پروانه اصلی در جریان‌است، NPSHR مجموعه پروانه اصلی و پیش ران را کاهش می‌دهد. بنابراین پیش ران را می‌توان یک پمپ تقویتی جهت تأمین NPSHR پمپ اصلی تلقی کرد. در شکل (۱۶-۷) تأثیر پیش ران بر NPSHR یک پمپ گریزازمرکز نشان داده شده‌است. کاهش

NPSHR پمپ این امکان را مهیا می‌سازد تا بتوان از پمپ اصلی در سرعت‌های بالاتر بهره‌برداری کرد.

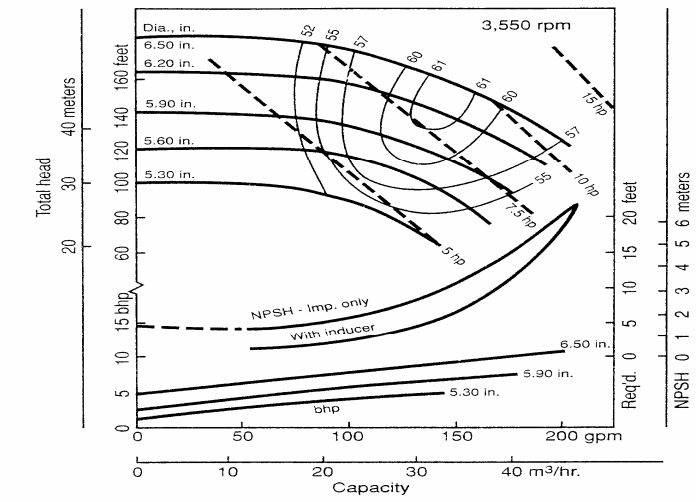


شکل (۱٤-۷): به‌کارگیری از پیش ران در پمپهای گریزازمرکز

طراحی صحیح پیش ران باعث می‌شود تا NPSHR پمپ حتی تا میزان ۵۰ درصد کاهش یابد.



شکل (۱۵-۷): تشکیل حباب برروی یک پیش ران



شکل (۱۶-۷): تأثیر پیش ران برروی NPSHR یک پمپ گریزازمرکز

هرچند که راندمان پیش ران چندان بالا نمی‌باشد ولی با این وجود تأثیر نامطلوب چندانی برروی راندمان پمپ اصلی نمی‌گذارد. به‌کارگیری از پیش ران ممکن‌است نتواند عملاً امکان بروز

کاویتاسیون در پمپ را منتفی سازد ولی در خیلی از موارد باعث می‌شود تا حبابهائی که در اثر جوشش مایع مورد انتقال در لوله مکش ایجاد شده اند در اثر افزایش فشار حاصل از کار کرد پیش ران در بیرون از پوسته پمپ و برروی پیش ران‌ترکیده و مانع از آسیب دیدگی قطعات پمپ اصلی گردد. به همین خاطر در انتخاب ماده اولیه برای ساخت پیش ران سعی می‌شود که از فولادهای آلیاژی مقاوم در مقابل کاویتاسیون‌استفاده شود.

در هنگام به‌کارگیری از پیش ران باید دقت شود که لوله مکش در قسمت دهانه پمپ حداقل به اندازه ۱۰-۵ برابر قطر لوله مکش مستقیم و فاقد هرگونه اتصالی باشد.

لازم به ذکراست که‌استفاده از پیش ران باعث می‌شود تا در دبی‌های زیاد، NPSHR بشدت افزایش یافته و به همین خاطر بهره‌برداری از پمپ مجهز به پیش ران در دبی زیاد مجاز نمی‌باشد. این امر برای دبی‌های کم نیز صادق‌است که به‌طور مشهود در شکل (۱۶-۷) نشان داده شده‌است. بنابراین پیش ران فقط در یک دامنه محدودی از دبی قابل دسترس توسط پمپ می‌تواند باعث کاهش NPSHR گردیده و در خارج از این محدوده نه تنها باعث کاهش NPSHR نمی‌شود بلکه حتی موجب افزایش آن شده و همین امر موجب محدودیت در به‌کارگیری آن می‌گردد. جهت جلوگیری از گرفتگی مسیر جریان مایع به‌لحاظ حضور حباب در آن، غالباً پیش ران برای حدود ۱/۵-۲/۳ برابر ظرفیت طراحی پمپ ساخته می‌شود.

و: استفاده از چند پمپ کوچکتر به‌صورت موازی

اساساً NPSHR مورد نیاز برای پمپهای کوچک در مقایسه با پمپهای بزرگتر که دارای سرعت دورانی یکسان هستند، کمتر می‌باشد. استفاده از این ویژگی‌ها و بهره‌برداری از چند پمپ کوچک بجای یک پمپ بزرگتر که به‌صورت موازی کار می‌کنند باعث افزایش هزینه‌های سرمایه ای، تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری می‌شود. ولی در خیلی از مواردااستفاده از سه پمپ که ۲ تای آن در حال کارو دیگری به‌صورت یدکی در یک سیستم بجای یک پمپ بزرگتر نصب شده اند و یا اینکه اصلاً پمپ یدکی در سیستم نصب نشده باشد (در سیستم‌هائی که کاهش دبی پمپ چندان بحرانی نیست)، چندان باعث افزایش هزینه‌های سیستم انتقال مایع نمی‌گردد. ازسوی دیگر اساساً در سیستم‌هائی که تغییرات دبی در طول سال زیاد باشد بهتراست که بجای یک پمپ بزرگ از دو یا چند پمپ کوچکتر جهت سازگاری سیستم پمپاژ با سیستم مصرف کننده‌استفاده شود. این روش ضمن حل مشکل کاویتاسیون (کاهش NPSHR)، باعث کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های تعمیراتی می‌گردد.

هـ: تغییر زاویه و تعداد تیغه‌ها

برای پمپهای تغذیه دیگ بخار که دمای مایع زیاد می‌باشد، سعی می‌شود که پروانه‌های مورداستفاده در آن طوری طراحی گردد که زاویه جریان مایع در آن کم بوده (کمتر از ۱۰

درجه)، تعداد تیغه‌های آن حتی الامکان کم (حداکثر ٤ تیغه) و عرض تیغه‌ها باریک باشد.
کاهش تعداد تیغه‌ها و باریک کردن آن باعث افزایش سطح آزاد جریان مایع در پروانه و کاهش امکان گرفتگی درمسیر جریان مایع در پروانه می‌گردد. کاهش زاویه ورودی مایع به‌درون پروانه و افزایش قطر چشمه پروانه باعث محدودیت در بهره‌برداری از پمپ در ظرفیت‌های کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت طراحی می‌شود.
همانطوری که قبلاً گفته شد، NPSHR را می‌توان ارتفاع مورد نیاز جهت غلبه بر از دست رفت انرژی ناشی از اصطکاک در هنگام عبور از درون پروانه تعریف کرد. بدیهی‌است با افزایش سطح آزاد جریان مایع در پروانه، سرعت عبور مایع در پروانه کاهش یافته که بنوبه خود موجب کاهش از دست رفت انرژی ناشی از اصطکاک گردیده که این امر در واقع همان کاهش NPSHR می‌باشد.

۱۲-۷: مقاومت در مقابل کاویتاسیون

با وجود تدابیر متعددی که جهت غلبه بر کاویتاسیون پیش بینی شده و در قسمت‌های قبل مورد اشاره قرار گرفت، باز هم احتمال بروز این پدیده در پمپ‌های گریزازمرکز وجود دارد. محدودیت‌های موجود در سیستم وطراحی پمپ ممکن‌است به‌نحوی باشد که بنا به دلایلی، به‌کارگیری از هریک از روش‌های قبلی غیر ممکن بوده و یا اثر بخش نباشد. لذا در قدم آخر ناچاراً باید قابلیت پایداری پروانه و سایرقسمت‌های پمپ که در معرض آسیب دیدگی قرار دارندراافزایش داد. برای این منظور می‌توان به دوروش زیراشاره کرد:
الف: انتخاب مواد اولیه با مقاومت مطلوب در مقابل کاویتاسیون
فلزات و آلیاژهای فلزی به‌خاطر داشتن خواص مکانیکی و متالورژی متفاوت در مقابل پدیده کاویتاسیون دارای قابلیت‌های متفاوتی بوده و به همین خاطر میزان فرسایش آنها در مقابل این پدیده یکسان نمی‌باشد.
براین اساس طی آزمایشات متعددی که برروی فلزات و آلیاژهای مختلف در مقابل پدیده کاویتاسیون صورت پذیرفته، برحسب شدت کاویتاسیون و خواص فیزیکی مایع مورد انتقال می‌توان از مواد اولیه مناسب برای ساخت قطعاتی که در معرض این پدیده قرار دارند (نظیر پروانه و پوسته پمپ)استفاده کرد.
بدیهی‌است که این روش هیچگونه تأثیری بر بروز این پدیده نداشته و فقط عمر مفید قطعات را در مقابل کاویتاسیون افزایش می‌دهد. آزمایشات انجام شده دراین زمینه نشان می‌دهد که افزایش سختی، صیقلی بودن سطوح، مقاومت در مقابل پدیده خستگی می‌تواند در نیل به این هدف مفید واقع گردد.
ب: افزایش مقاومت قطعات به‌روش روکش دادن (Coating)

روش دیگر جهت افزایش مقاومت قطعات در مقابل عوارض ناشی از کاویتاسیون روکش دادن با مواد اولیه مناسب و مقاوم در مقابل فرسایش ناشی از کاویتاسیون می‌باشد. در جدول (۳ -۷) میزان فرسایش ناشی از کاویتاسیون در تعدادی ازترکیبات الاستومری که در دوره‌های زمانی مختلف در معرض پدیده کاویتاسیون قرار داده شده اند و قابلیت مقاومت مکانیکی آنها در مقابل این پدیده نشان داده شده‌است.

Cavitation Erosion Resistance of Elastomeric Coatings

Material	Subtype	Thickness of coating in rotating-disk cavitation tests, in (mm)	Cavitation test exposure period, h	Degree of erosion after exposure period, 150 ft/s (45.7 m/s)
Neoprene solvent base, brush-applied	A	0.030(0.76)	24	Slight
	B	0.025(0.64)	17	Slight
Neoprene, cured sheet, cold-bonded	...	0.062(1.57)	14	None
Neoprene, in situ cured and bonded	...	0.060(1.52)	10 1/2	None
Polyurethane, liquid	A	0.062(1.57)	12	Slight
	B	0.018(0.46)	12	Severe
	C	0.062(1.57)	12	None
Polyurethane, cured sheet, cold-bonded	A	0.060(1.52)	14	None
	B	0.062(1.57)	12	Severe
Polysulfide, liquid	...	0.062(1.57)	12	Severe
Polysiloxane, liquid	...	0.062(1.57)	7	Severe
Butyl, cured sheet, cold-bonded	...	0.060(1.52)	2 1/2	Severe
Butyl, in situ cured and bonded	...	0.060(1.52)	12	Severe
Cis-polybutadiene(98%) cured sheet, cold bonded	...	0.060(1.52)	10	None
Polybutadiene (polysulfide modified) in situ cured and bonded	...	0.060(1.52)	13	Severe
Styrene-butadiene copolymer, in situ cured and bonded (SBR)	...	0.060(1.52)	24	None
Natural rubber, cured sheet, cold-bonded	...	0.062(1.57)	10	None
Natural rubber, in situ cured and bonded	...	0.060(1.52)	16	Severe

جدول (۳ -۷): مقایسه مقاومت‌ترکیبات الاستومری در مقابل فرسایش ناشی از

مراجع (References) :

الف : کتابهاي خارجي

1)I.J.Karassik,T.McGuire, "Centrifugal Pumps" , Chapman &Hall,2nd Ed.,1998

2)I.J.Karassik , W.C. Krustsch , W.H.Fraser , T.P. Messina " Pump Handbook", 2nd. Ed. Mc Graw - Hill Co. 1986

3)I.J . Karassik ,"Engineers' Guide To Centrifugal Pump " , Mc Graw- Hill Book Co., 1964

4)J.W.Dufour, W.Ed Nelson, "Centrifugal Pump Sourcebook" ,McGraw-Hill, Inc.,1992

5) I.J.Karassik,R.Carter, "Centrifugal Pumps, Selection, Operation and Maintenance", McGraw-Hill Co.,1960

6)R.H.Warring, "Pumping Manual" ,7th Ed.,Gulf Pub.Co.,1984

7) T.G . Hicks " Pump Application Engineering " , 1971

8) T.G . Hicks " Pump Operation And Maintenance",McGraw-Hill Co.,1958

9)" Sulzer Centrifugal Pump Handbook " , Sulzer Brothers LTD , Nov 1987

10)" Basic Principles For The Design Of Centrifugal Pump Installations " , SIHI - HALBERG GmbH , 1988

11)A.J.Stepanoff."Centrifugal And Axial Flow Pumps"2nd.Ed.John Willey&Sons, Inc. , 1957

12)V.S.Lobanoff , R.R.Ross, " Centrifugal Pumps Design & Application " , Gulf Pub. 1989

13)H.H.Anderson," Centerifugal Pump And Allied Machinary " . 4th Ed. , Elsevier Advanced Technology , 1994

14)H.P.Bloch,F.K.Geitner,"Improving Machinery Reliability",Vol.1,2nd.Ed., Gulf Pub.Co., 1988

15)H.P.Bloch,F.K.Geitner, "Machinary Failure Analysis And Troubleshootig",Vol.2, Gulf Pub.Co., 1986

16)H.P.Bloch,F.K.Geitner, "Machinary Component Maintenance and Repair",Vol.3, Gulf Pub.Co., 1990

17)H.P.Bloch,F.K.Geitner, "Major Process Equipment Maintanence and Repair" ,Vol.4 , Gulf Pub. Co.,1989

18)H.L.Stewart, "Pumps" ,3rd.Ed. Theodore Audel & Co.,1982

19)V.M.Cherkassky, "Pumps,Fans,Compressors" ,Mir Pub.1985

20)A.J. Stepanoff, "Pumps and Blowers",John Wiley & Sons,1965
21) F. Pollak , "Pump Users' Hand book" , Gulf Pub. Co. , 1980

22)J.Davidson, "Process Pump Selection,A System approach",1984

23)"Process Pumps" ,The Inst.Mech.Eng.,1973

24)Lexicon, "Centrifugal Pump",3rd .Ed. KSB Co.,1990

25)A.M.Michael,S.D.Khepar,"Water Well and Pump Engineering",Tata McGraw-Hill Co. 1985

26)F.A.Kristal, "Pumps" ,McGraw-Hill Co.,1940

27)L.B.Escritt, "Pumping Station Equipment And Design" ,C.R.Books Ltd.,1962

28) "Process Piping Design" , Vol.2 ,Gulf Pub. Co.,1990

29)W.Tillner , "The Avoidence Of Cavitation Damage",Mech.Eng.Pub.,1993

30) "Pump Installation And Maintenance" , TPC Training Systems,1974

31) "Centrifugal Pump Design" ,KSB Co.,1990

ب : مقالات خارجي

1)C.Thurlow III, "Centrifugal Pumps" ,Chem.Eng.,Oct.11,1971

2)E.J.Serven,"Centerifugal Pumps And Rotative Speed",Chem.Eng.,Apr.1,1963

3) P.Staddon , "Getting To The Heart Of Trouble Free Pumping" , World Pump, Nov.1997

4)F.A.Holland& F.S.Chapman,"Centrifugal Pumps-Types,Charactristictcs,System Design" ,
Chem. Eng . , July 4,1966

5)J.K.Jacobs, " Select Your Pump By Specific Speed" , Pet.Ref., Oct.1957

6)R.F.Neerken,"Pump Selection For The Chemical Process Industries", Chem.Eng., Feb.18,1974

7)S.M.Childs, "New Approach To Pump Selection", Chem.Eng., May,1963

8)J.K.Jacobs, "How To Select And Specify Process Pump?", Hyd.Proc.,June,1965

9) I.J . Karassik , "Centrifugal Pumps And System Hydraulics",Chem.Eng.,Oct.4,1982

10) N . B . Heaps , " Longer Life For Centerifugal Pump " Chem . Eng . ,May 4,1959 ,

11) N . B . Heaps , " How To Extend Centerifugal Pump Life " Chem . Eng , June 1 , 1959 , P128 - 132
12)R.F.Neerken, "Selecting The Right Pump" Chem.Eng. ,Apr.3,1978
13) S.T.Shiels , "Hidden Dangers In Centrifugal Pumps Specification : Part Two" , World Pumps, Feb.1995

14)A.W.F.Garbers & A.K.Wasfi, "Preventing Cavitation In High Energy Centrifugal Pumps", Hyd.Proc.,Jul.1990

15)E.Schiavello, "Troubleshoot Centrifugal Pumps" , Chem. Eng. Prog. Nov.1992

16)E.Clark, "Maximize Centrifugal Pump Reliability" , Chem.Eng.Feb.1994

17)G.R.Martin, "Pumps And NPSH : Avoid Problems And Improve Reliability" , Hyd.Proc.May 1996

18) A.M.Whistler, "A Yardstick For NPSH Requirments" , Pet.Ref.Jan.1960

19)A.F.Sherazer, "Net Positive Suction Head" , Chem.Eng.Prog.Sep.1959

20)P.Hergt , "Cavitation In Centrifugal Pumps" , KSB Co.

21)S.Z.Akhtar, "Sizing Pumps For Slurries" , Hyd.Proc.,Nov.1996

22)R.Kern, "Pump Piping Design" , Chem.Eng.,Oct.1971

23) R.Kern, " How To Design Piping For Pump Suction Condition" Chem . Eng . Apr . 1975

24)R.Kern , " How To size Piping For Pump Suction Condition" , May . 1975 .

25)P.P Van Blarcom , " By Pass System For Centrifugal Pumps" , Chem . Eng . , Feb , 1974

26)J.A.Reynolds , "Pump Installation and Maintenance" Chem . Eng . , Oct . 1971

27)R.Kern , " How To Get The Best Process Plant Layout For Pumps and Compressors" , Chem . Eng Dec . 1977

28) W.H. Stindt , "Keys To Pump Selection" , Chem . Eng . , Oct . 1971

29) J.R.Birk & J.H.Peacock , "Pump Requirements For The Chemical Process Indusries" , Chem . Eng . Feb . 1974

30)J.D.Doolin, "Select Pumps To Cut Energy Cost",Chem.Eng.Jan.1977

31)J.A.Reynold, "Saving Energy And Costs In Pumping System", Chem.Eng.Jan.1976

32)G.J.De Santis, "How To Select a Centirifugal Pump", Chem.Eng.Nov.1976

33)U.S.Hattiangadi, "Specifying Centrifugal And Reciprocating Pumps", Chem.Eng.Feb.1970

34)J.I.Dalstad, "Slurry Pump Selection And Application" Chem.Eng.Apr.1977

35)J.Doolin, "Pumping Difficult Fluids", Chem.Eng.Dec.1991
36)C.Thurlow, "Pumps And The Chemical Plant,Part I:Selection", Chem.Eng.May.1965

37) C.Thurlow, "Pumps And The Chemical Plant,Part II:Installation And Operation", Chem.Eng.June.1965

38)H.M.Pollak, "How To Select Centrifugal Pumps", Chem.Eng.Feb.1963

39)W.S.Tinney, "How To Obtain Troublefree Performance From Centrifugal Pumps", Chem.Eng.June.1978

40)S.Yedidiah, "Diagnosing Problems Of Centrifugal Pumps,Part I", Chem.Eng.Oct.1977

41))S.Yedidiah, "Diagnosing Problems Of Centrifugal Pumps,Part II", Chem.Eng.Nov.1977

42))S.Yedidiah, "Diagnosing Problems Of Centrifugal Pumps,Part III", Chem.Eng.Dec.1977

43)F.Buse, "The Effect Of Dimensional Variations On Centrifugal Pumps",Chem.Eng. Sep.1977

44)W.R.Penney, "Inert Gas In Liquid Mars Pump Performance", Chem.Eng.July. 1978

45)S.Yedidiah, "Unusual Problems With Centrigugal Pumps", Chem.Eng.

46)G.G.Chase, "Match Centrifugal Pumps To Piping Systems", Chem.Eng.May,1993

47)H.P.Bloch, "How And Why Centrifugal Pumps Continue To fail ? ", Chem.Eng.,Nov.1994

48)S.Yedidiah, "Recirculation Sheds Its Villainous Image", Chem.Eng.July 1994

49)W.Sag, "Rate Your Centrifugal Pumps In Use", Chem.Eng.July,1955

50)W.E.Nelson,J.W.Dofour, "Problemfree Pumping System:A Guide To Holistic Design", Chem.Eng.,Jan.1995

51) W.W.French, " Tipes For Troubleshooting Pumps" ,Chem.Eng.Prog.June 1992

52)S.T.Shiels , "Hidden Dangers In Centrifugals Pump Specification : Part One" , World Pumps, Jan.1995