



WHITE PAPERS

ASK-RD-ENG-011

R&D Department

ARYA SEPEHR KAYHAN (ASK) | SHAHID SALIMI INDUSTRIAL CITY, TABRIZ, IRAN

شرکت آریا سپهر کیهان با نام اختصاری ASK، طراح و تولیدکننده پمپ های گریز از مرکز و روتاری و ارائه دهنده راهکارهای بهینه سازی سیستم های فرایندی و پمپاژ می باشد.

توجه!

مقالات تخصصی با عنوان White Papers جهت افزایش دانش عمومی پمپ ها در بخش تحقیق و توسعه این شرکت نگارش شده است. استفاده از این مقالات رایگان می باشد و لازم است جهت استفاده از محتویات آن به موارد ذیل توجه فرمایید:

- 1- انتشار مجدد مطالب مقالات (به شکل اولیه و بدون تغییر در ساختار محتوایی و ظاهری) با ذکر منبع، بلامانع است.
- 2- استفاده تجاری از محتویات مقالات در نشریات مجاز نمی باشد.

تصحیح عملکرد پمپ

در بسیاری از کاربردها، مشخصه های پمپ باید بر روی نقاط عملکردی مورد نظر تنظیم شود. برای این منظور تعدادی گزینه و انتخاب وجود دارد تا عملکرد پمپ به عملکرد دلخواه تغییر داده شود. در بسیاری از مواقع هدف کاهش هد یا کاهش توان است و در بسیاری از مواقع دیگر هدف افزایش هد یا افزایش توان است. به همین منظور راهکارهای مختلفی وجود دارد که می تواند ارزان ساده یا گران و سخت باشد. حال سؤال این است که چه راهکاری برای چه هدفی امکان پذیر و کدام مناسب است؟

در این مقاله تلاش شده که با در نظر گرفتن حالات مختلف تغییر در عملکرد، راه های ممکن معرفی شوند و سپس با تجزیه و تحلیل یکی از این روش ها (تراشکاری پره) به شناخت بهتر نسبت به تغییرات ایجاد شده در عملکرد پرداخته شود.

• هدف : افزایش هد و ثابت نگه داشتن دبی

برای این هدف ۶ راهکار معرفی می گردد:

۱. زیرسوهان زنی^{۵۲} پره در خروجی و از سمت مکش
۲. جوشکاری پره ها و زیرسوهان زنی پره در خروجی و از سمت مکش همزمان
۳. کاهش اتالات هیدرولیکی
۴. طراحی پره جدید با قطر خارجی، پهنای خروجی، تعداد پره و یا زاویه ی خروجی بزرگتر
۵. اضافه کردن طبقه (در صورت چند طبقه بودن پمپ)
۶. جلوگیری از چرخش^{۵۳} سیال در ورودی پره

هرکدام از ۶ راهکار فوق که به کار گرفته شود، باید موارد زیر را دوباره بررسی کرد:

۱. منحنی هد-دبی تخت تر می شود و امکان ناپایداری بیشتر می شود.
۲. تنش های روی شفت و محفظه دوباره بررسی شود.

• هدف : کاهش هد و توان و ثابت نگه داشتن دبی

برای این هدف ۵ راهکار معرفی می گردد:

۱. کم کردن قطر خارجی پره (تراشیدن^{۵۴})
۲. کاهش تعداد طبقه (در صورت چند طبقه بودن پمپ)
۳. در پمپ های چند طبقه : افزایش پیش چرخش در ورودی پره به دو روش:
 - ا. کوتاه کردن پره های بازگشت^{۵۵}
 - ب. اضافه کردن یک فاصله ی کوچک بین پره های بازگشت و عناصر محفظه ی طبقه (مانند شکل ۱)

⁵² Under-filing

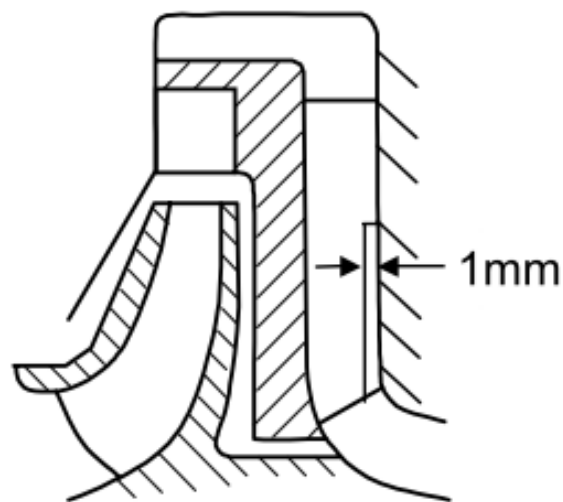
⁵³ Counter rotate

⁵⁴ Trimming

⁵⁵ Return vane

۴. طراحی پره ی جدید با قطر خارجی، زاویه ی خروج و تعداد پره کمتر
۵. اضافه کردن یک دریچه^{۵۶} روی نازل تخلیه که باعث می شود بازده شدیداً کاهش یابد ولی توان ثابت بماند)

پس از اعمال تغییرات فوق، شیب منحنی هد-دبی بیشتر می شود.



شکل ۱

• هدف: افزایش هد و انتقال نقطه ی BEP به دبی بالاتر

برای این هدف ۲ راهکار معرفی می گردد:

۱. بزرگتر کردن مساحت گلویی دیفیوزر یا حلزونی که باعث می شود تا ۱۵٪ افزایش در تغییرات دبی بهینه به وجود آید.
۲. علاوه بر بزرگتر کردن مساحت گلویی دیفیوزر یا حلزونی، یک پره جدید طراحی شود که قطر، تعداد پره، ضخامت خروجی و زاویه ی خروجی بزرگتری داشته باشد. (اگر سرعت مخصوص بزرگ باشد می توان ضخامت در ورودی و زاویه ورودی را نیز بزرگتر کرد).

با اعمال تغییرات زیر، تبعات زیر اتفاق می افتد:

۱. منحنی هد-دبی تخت تر می شود و به احتمال فراوان ناپایداری پدید می آید.
۲. مقدار NPSH_A باید دوباره بررسی شود.
۳. ریسک کاویتاسیون در سطح طرف فشار بالا می رود.
۴. تمام موارد فوق در سرعت مخصوص پایین تر، تشدید می شوند.
- ۵.

• هدف: کاهش هد و انتقال نقطه ی BEP به دبی پایین تر

برای این هدف ۲ راهکار معرفی می گردد:

۱. کوچکتر کردن مساحت گلویی دیفیوزر یا حلزونی که باعث می شود تا ۲۵٪ کاهش در تغییرات دبی بهینه به وجود آید.
۲. علاوه بر کوچکتر کردن مساحت گلویی دیفیوزر یا حلزونی، یک پره جدید طراحی شود که قطر، تعداد پره، ضخامت خروجی و زاویه ی خروجی بکوچکتري داشته باشد.

استفاده از راهکارهای فوق تبعات زیر را در پی دارد:

۱. شیب منحنی هد-دبی بیشتر می شود.
۲. برای سرعت مخصوص های $n_q < 25$ ریسک کاویتاسیون در دیفیوزر یا حلزونی زیاد است.
۳. در سرعت مخصوص های پایین تر اثرات بالا تشدید می شود.

تراشکاری پره ها

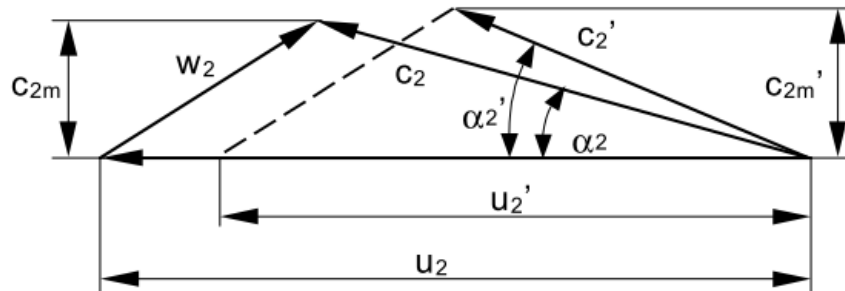
بنا بر دلایل اقتصادی یک سایز پمپ برای پوشش دامنه ی مشخصی از عملکرد مورد انتظار مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از راه های رسیدن به این هدف کاهش قطر خارجی پره ی پمپ مورد نظر است. تراشیدن پره منجر به کاهش هد پمپ تا مقدار مورد نیاز، فارغ از هزینه های زیاد غیرلازم برای طراحی پمپ جدید، می شود.

به دست آوردن مشخصه های پمپ پس از تراشیدن پره ی آن با استفاده از قوانین تشابه امکان پذیر نیست، زیرا پره ی تراشیده شده هندسه ای متفاوت از پره ی اولیه دارد. پهنای پره در خروجی معمولاً تغییر چندانی نمی کند و شاید کمی افزایش یابد، در حالی که زاویه ی خروج تغییر کرده و پره کوتاه تر می شود. تراش پره ها باعث می شود که بار بیشتری روی پره وارد شود و به دلیل افت ضریب لغزش γ انحراف جریان کمتری مورد انتظار است. در شکل ۱ عبارات فوق با استفاده از مثلث سرعت در خروجی نشان داده شده است.

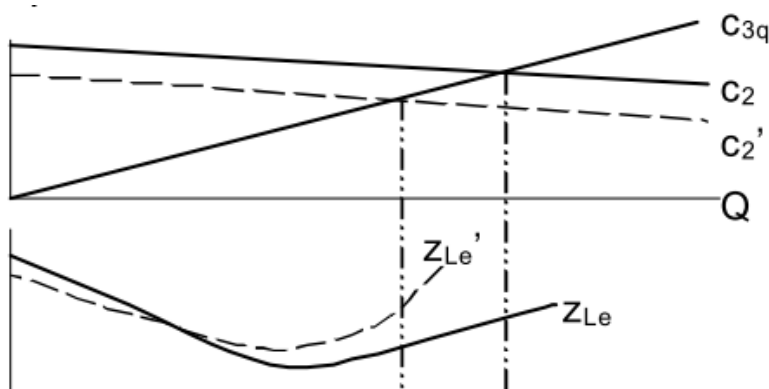
در دبی جریان یکسان، C_{2m} متناسب با کاهش قطر خارجی پره افزایش می یابد و با کاهش قطر هد نیز کاهش یابد. معادلات زیر نشان دهنده ی گزاره های بیان شده است:

$$H = \frac{\eta_h u_2^2}{g} \left[\gamma - \frac{QLa}{A_2 u_2 \tan \beta_{2B}} \left(\tau_2 + \frac{A_2 d_{1m}^* \tan \beta_{2B}}{A_1 \tan \alpha_1} \right) \right]$$

$$u_2 = \frac{\pi d_2 n}{60}$$



شکل ۱



شکل ۲

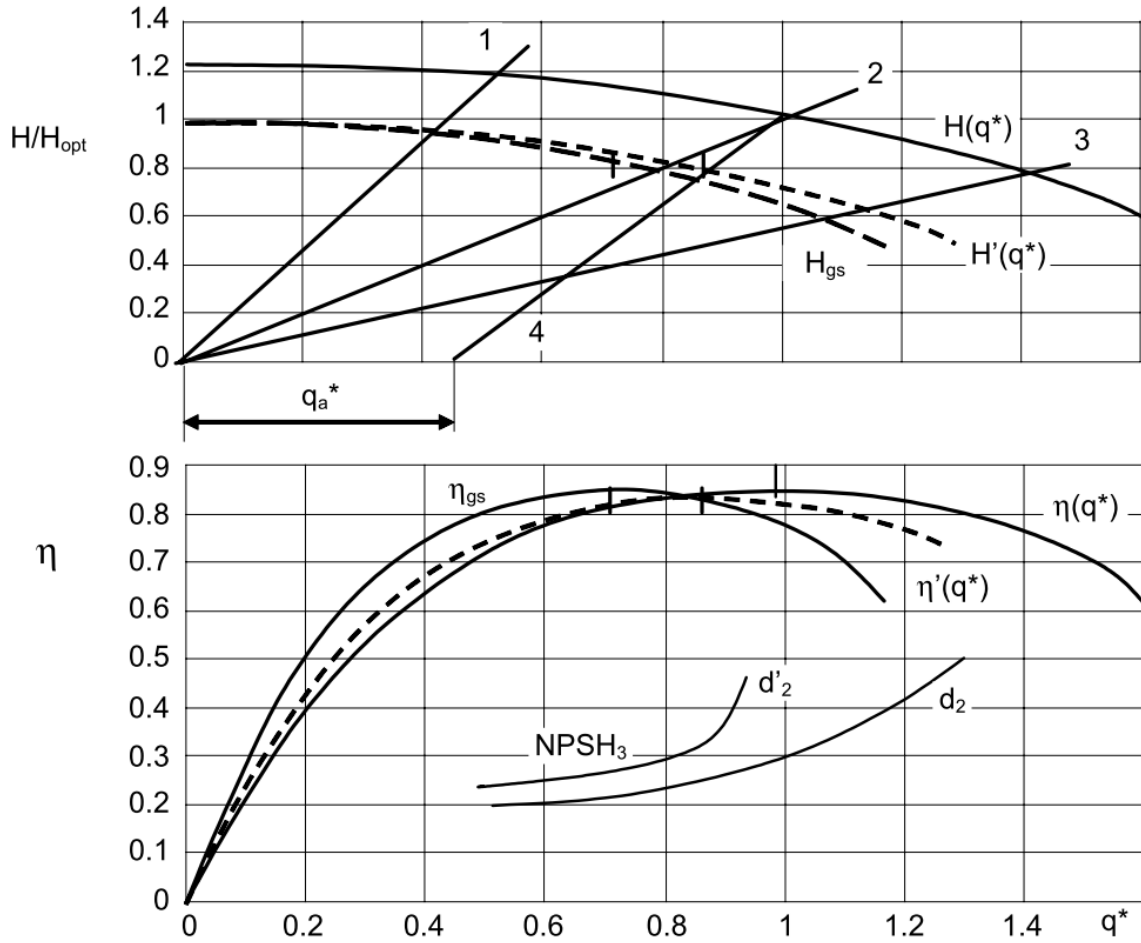
$$C_{2m} = \frac{Q L a}{\pi d_2 b b_2}$$

در دستگاه مختصات مرجع، زاویه ی تخلیه از α_2 به α_2' افزایش می یابد. نسبت $\frac{C_{3q}}{C_2}$ به دلیل عدم تغییر در کلکتور، در دبی ثابت افزایش می یابد. به شکل ۲ مراجعه شود.

نقطه ی BEP به دبی پایین تری منتقل می شود و مشخصه های حلزونی بی تغییر می مانند. شایان ذکر است که انتقال BEP به دبی پایین تر نسبت به حالتی که هندسه ی پره متشابه با هندسه ی پره ی اولیه باشد (یعنی هنگامی که تراش صورت نگیرد و پره ی جدیدی طراحی شود) کوچکتر است. به عبار دیگر کاهش دبی مقدار زیادی نخواهد داشت.

برای درک بهتر تاثیر تراشکاری پره ها به ارائه ی مثالی پرداخته می شود. پمپی با پره ی ورودی دوپل در سرعت مخصوص $n_q = 25$ در دو حالت پره ی کامل و ۱۰٪ تراش پره مقایسه می شود. شکل ۳ تاثیر تراش پره را روی این پمپ نشان می دهد. همچنین مشخصه های پمپی با پره ی ۱۰٪ کوچکتر با هندسه ی مشابه با پره ی اولیه نیز جهت مقایسه ارائه شده است.

میزان انحراف پره ی تراشکاری شده از قوانین تشابه بستگی به هندسه ی پره ی اولیه و توزیع فشار روی آن دارد. هر قدر پره کوتاهتر باشد (هر قدر سرعت مخصوص بیشتر باشد)، کاهش هد بیشتر برای درصد تراشکاری ثابت مورد انتظار است. با توجه به

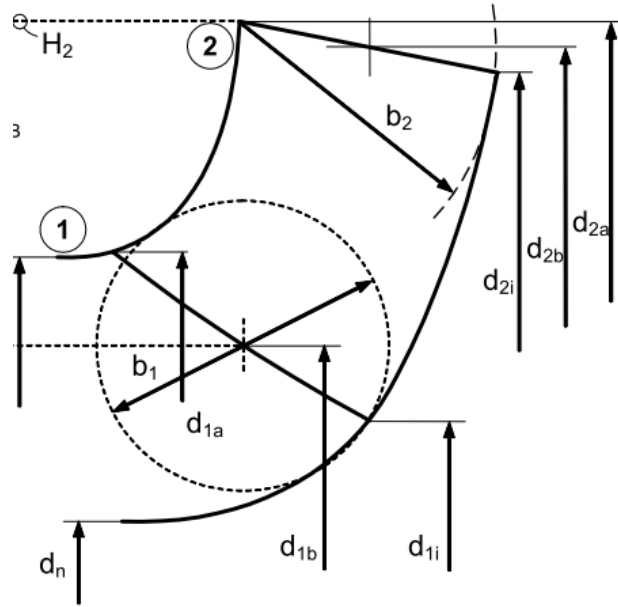


شکل ۳

بندهای فوق، بدیهی است که با استفاده از روابط تئوری نمی توان مشخصه های پمپ با پره های تراشکاری را به دست آورد. به همین دلیل باید از روابط تجربی استفاده کرد. این روابط تجربی مانند هندسه ی هر پمپ منحصر به فرد هستند. خطوط ۱، ۲ و ۳ که در شکل ۳ رسم شده اند خطوط تصادفی ای هستند که از مبدا تا منحنی $H=f(Q)$ مربوط به پره کامل تلاقی داده شده اند. برای هر زوج مرتب (Q, H) به دست آمده از تلاقی، مقدار زوج مرتب (Q', H') مربوط به پره ی تراش داده شده یادداشت می شود. اگر پارامترهای پمپ دار را مربوط به پره تراشکاری شده نسبت دهیم، روابط زیر نتیجه می شود:

$$\frac{Q'}{Q} = \left(\frac{d'_2}{d_2}\right)^m$$

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{d'_2}{d_2}\right)^m = \frac{Q'}{Q}$$



شکل ۴

نمای m بسته به هندسه ی پره بین ۲ تا ۳ است. اگر تراش پره بیش از ۵٪ قطر پره باشد نمای m نزدیک به ۲ و اگر پره در خروجی زیر سوهان زنی شده باشد نمای m نزدیک ۳ است. نقطه بهترین عملکرد (BEP) برای تمامی پره های تراشکاری شده روی خط ۴ واقع است. مقدار q_a^* از رابطه ی زیر تعیین می شود:

$$q_a^* = 0.005 \text{ to } 0.01 n_q$$

البته بنا بر اشاره ی برخی منابع فرض $m=2$ نیز چندان نادرست نیست. در منبعی دیگر روابط زیر جهت تصحیح عملکرد پمپ پیشنهاد شده است:

$$\frac{Q'}{Q} = K$$

$$\frac{H'}{H} = K^2$$

که در آن مقدار K با استفاده از قطرهای قبل و بعد از تراشکاری و با توجه به شکل ۴ به دست می آید:

$$K = \sqrt{\frac{d_{2b}'^2 - d_{1b}^2}{d_{2b}^2 - d_{1b}'^2}}$$

بعد از تراشکاری پره بازده کاهش می یابد مطابق رابطه ی زیر خواهد داشت:

$$\Delta \eta = \varepsilon \left(1 - \frac{d_2'}{d_2}\right)$$

مقدار ضریب ε به صورت زیر تعیین می شود:

- برای پمپ های با حلزونی : $0.15 \leq \varepsilon \leq 0.25$
- برای پمپ های با دیفیوزر: $0.4 \leq \varepsilon \leq 0.5$

همچنین بعد از تراشکاری مقدار توان پمپ نیز به صورت زیر تغییر می کند:

$$\Delta P = \frac{P'}{\eta_0} \varepsilon (1 - d_2^*)$$

که در آن d_2^* با رابطه ی $d_2^* = \frac{d_2'}{d_2}$ مشخص می شود.

با افزایش توان هزینه ی انرژی نیز افزایش می یابد. برای محاسبه ی مقدار افزایش انرژی می توان از رابطه ی زیر استفاده کرد:

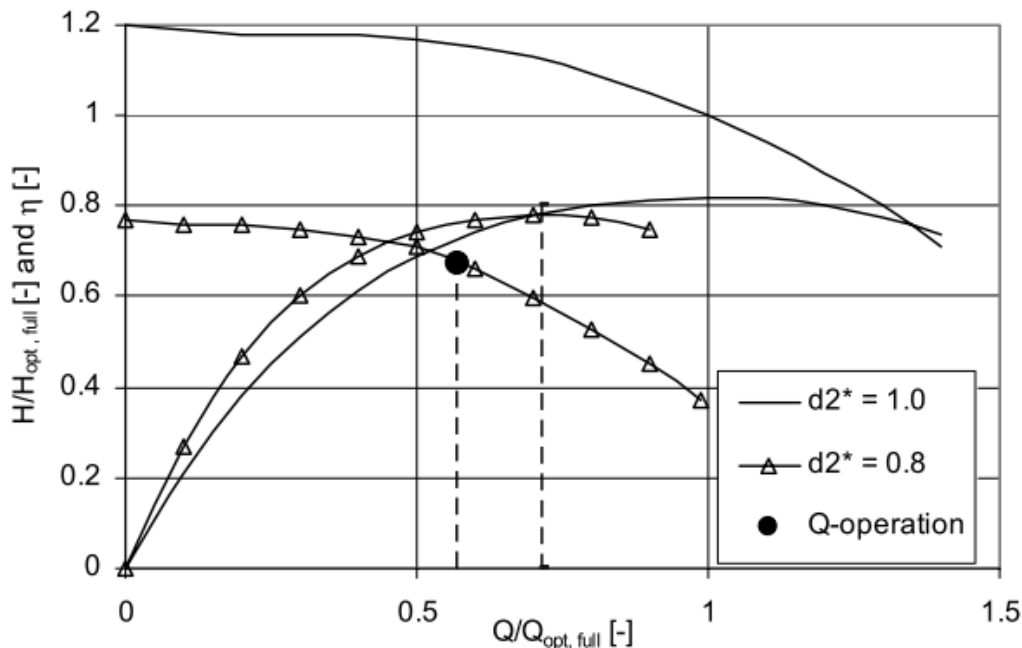
$$\Delta K_E = z_{pp} k_{KW} \frac{P'}{\eta_0} \varepsilon (1 - d_2^*)$$

که در آن k_{KW} هزینه ی انرژی به ازای هر کیلووات بوده و z_{pp} تعداد پمپ های موازی با پره ی تراشکاری شده است. ΔK_E نیز تغییرات هزینه می باشد. اگر افزایش هزینه ی به دست آمده از روش فوق بیشتر از هزینه ی لازم برای طراحی و ساخت پره ی جدید باشد، استفاده از تراشکاری مناسب نیست. اگر حد افزایش هزینه ی انرژی مشخص شده باشد و با ΔK_E^* نشان داده شود، می توان حداکثر میزان تراشکاری مجاز پره را با رابطه ی زیر به دست آورد:

$$d_2^* = 1 - \frac{\eta_0 \Delta K_E^*}{z_{pp} k_{KW} P' \varepsilon}$$

علاوه بر ملاحظات اقتصادی و مسئله ی انرژی، رفتار عملکردی پمپ بعد از تراش پره نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. اگر پره بیش از حد کوتاه شود، ممکن است اوضاع از حالت قبل هم وخیم تر شود. برای درک بهتر این مسئله به شکل ۵ مراجعه شود. در این شکل منحنی مشخصه ی پمپی با پره در حالت نرمال ($d_2^* = 1$) و با پره ی تراشکاری شده به میزان ۲۰٪ ($d_2^* = 0.8$) رسم شده است. پمپ مورد نظر در سرعت مخصوص $n_q = 25$ کار می کند. نقطه ای که با علامت نقطه ی سیاه نشان داده شده است نقطه ی عملکردی (یا نقطه ی گارانتی) است.

از آنجا که دبی ورودی به پره با کاهش قطر آن تغییری نمی کند، ورودی پره در حدود ۵۷٪ نقطه ی بهترین عملکرد پره ی کامل قرار دارد. چنین پمپی همواره در ورودی بازگردش خواهد داشت. این اتفاق برای پمپ های کوچک با توان کم قابل اغماض است ولی در پمپ های بزرگ توان بالا باعث نویز و ارتعاشات زیادی خواهد شد. زیرا با کوتاه شدن پره ها بار روی هر پره هم زیاد خواهد شد.



شکل ۵

برای اجتناب از کوتاه کردن بیش از حد پره ها توصیه می شود که کاهش قطر پره (در پمپ های با حلزونی) به صورت زیر محدود شود:

- برای سرعت مخصوص $n_q < 40$

$$\frac{d_2'}{d_2} \geq 0.8 \text{ to } 0.85$$

- برای سرعت مخصوص $40 < n_q < 100$

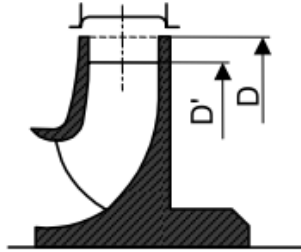
$$\frac{d_2'}{d_2} \geq (0.8 \text{ to } 0.85) + 0.0025(n_q - 40)$$

محدودیت های فوق برای پمپ هایی با سایز متوسط است و در نتیجه برای پمپ های کوچک که در آنها نوپز چندان موضوع مهمی نیست می توان از قطر های کوچکتر نیز استفاده کرد. در کل استفاده از مقدار $\frac{d_2'}{d_2} 0.85$ معمولا مشکلی به وجود نمی آورد.

برخی ملاحظات تراشکاری پره ها

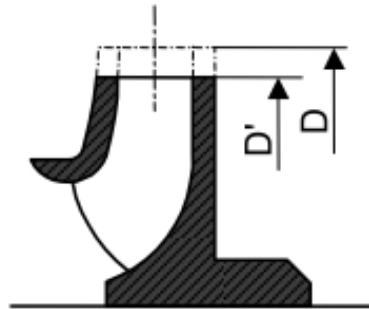
❖ در پمپ های دیفیوژری، اگر پره ها بیش از حد کوتاه شوند امکان ناپایداری مشخصه ها بسیار زیاد است. برای این پمپ ها محدوده ی کوتاهی پره به صورت تجربی مشخص می شود ولی در کل توصیه می شود که پره بیشتر از ۵٪ تراش نخورد. اگر بنا به هر دلیلی تراش بیشتری ضروری است باید دیفیوژری با قطر ورودی کوچکتر طراحی شود. با توجه به هزینه ی کمتر طراحی دیفیوژر جدید نسبت به حلزونی جدید، در مواردی که توان کمتر از توان دلخواه است استفاده از دیفیوژر به صرفه تر است.

❖ در پمپ های دیفیوزری در هنگام تراشکاری پره، شروود دست نخورده باقی خواهد ماند و نباید تراش زده شود. دلیل این امر اجتناب از ناپایداری هایی که در سطور بالا توضیح داده شد و همچنین تغییرات تراست محوری در بار جزئی و حداقل نگه داشتن تبادل ممنوم بین جریان اصلی و جریاد در گپ کناری پره است. شکل ۶ تراشکاری پمپ دیفیوزری را نشان می دهد.



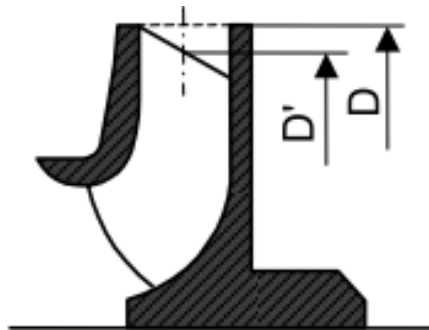
شکل ۶

❖ در پمپ های دیفیوزری به دلیل تراش نخوردن شروود، کاهش بازده بیشتر از حالت مشابه در پمپ های با حلزونی است.
 ❖ در پمپ های با حلزونی، شروود به هما اندازه که پره تراش خورده است، تراش می خورد. شکل ۷ تراش خوردن پمپ های با حلزونی را نشان می دهد.



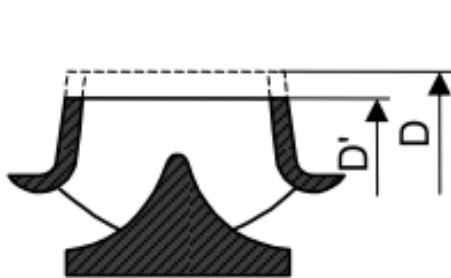
شکل ۷

❖ معمولا اگر تراش به صورت مورب زده شود در مقایسه با تراش موازی، فشار shut-off بیشتر خواهد شد. زاویه ی مناسب برای تراش مورب ۵ تا ۱۵ درجه است. شکل ۸ نمایی از این تراش را نشان می هد. در کل تراش مورب برای سرعت مخصوص های $n_q > 40$ سفارش می شود تا خطوط جریانی خیلی کوتاه نباشند.



شکل ۸

❖ پمپ‌هایی با پره‌های دو ورودی و با سرعت مخصوص پایین معمولاً به گونه‌ای تراش زده می‌شوند که لبه‌های عقبی پره همچنان با محور روتور موتزی بماند. در شکل ۹ این موضوع نشان داده شده است.



شکل ۹

❖ با توجه به اینکه کاهش هد با تراش پره بر اساس پارامترهای متنوعی صورت می‌گیرد که غیرقابل تعیین دقیق هستند، ترجیح داده می‌شود که تراش پره در چند مرحله انجام شود تا از هد مورد نظر دور نشود.

❖ تراش زدن شدید پره (بیش از ۱۰٪ قطر آن) باعث اختلال در پارامترهای مکش می‌شود. به دلیل تغییر در توزیع فشار روی پره و افزایش بار روی آن $NPSH_3$ افزایش خواهد یافت. در پمپ‌های چند طبقه یا پره‌ی طبقه‌ی مکش را تراش نمی‌زنند یا کمتر از سایر پره‌ها تراش می‌خورد.

منابع و مراجع

- KSB-Kreiselpumpen-Lexikon. 3. Aufl, KSB AG, Frankenthal, 1989
- Raabe J: Hydro Power. VDI, Düsseldorf, 1985
- Centrifugal pumps, Johhan F.Gulich, Springer, Leipzig, 2007.