

## تحلیل عوامل موثر بر عملکرد انواع پمپهای مارپیچ دوار

واژه های کلیدی : پمپ دوار، روتور مارپیچ، طراحی پمپ، هندسه پمپ دوار

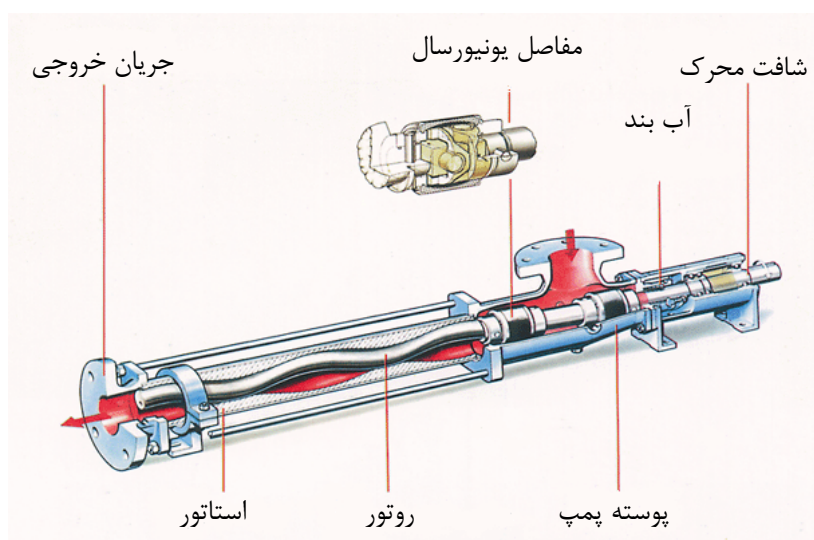
چکیده:

سرعت دوران پایین و نرخ پایین برش درونی، پمپهای مارپیچ دوار را به یکی از پر کاربردترین پمپها در صنایع از جمله صنعت نفت نموده است. در این راستا، هدف معرفی انواع، بررسی نحوه عملکرد و تعیین پارامترهای مهم در طراحی این پمپ میباشد. از دیدگاه محدوده جریان قابل انتقال و فشار کاری، پمپهای مارپیچ دوار توانایی رقابت با هر پمپ دیگری را دارا می باشند. این پمپها دارای توان انتقال دبی از یک گالون تا چندین هزار گالون در دقیقه و فشار کاری تا ۱۰۰۰ پاسکال می باشند. پس از تعیین ارتباط هندسی موجود بین پارامترهای طراحی پمپ مارپیچ دوار مانند میزان انحراف از مرکز، گام روتور، دایره مرجع، دایره قطر ماکزیمم و قطر مینیمم روتور و استاتور، اقدام به بررسی پارامترهای مهمتر از جهت کاربردی می نماییم. بنابراین با استفاده از اصول هندسی پمپ و کمترین محاسبات ریاضی، پیچیدگی و نکات پنهان عملکرد پمپ مارپیچ دوار بررسی میشود، همچنین به بخشی از عیب یابی این پمپ بر پایه نتایج تجربی نیز پرداخته میشود.

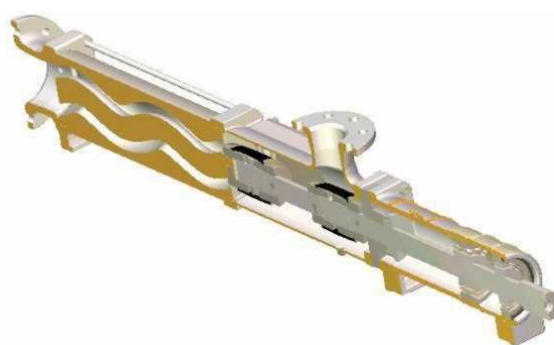
۱. مقدمه:

جهت معرفی عمومی این نوع پمپ در ادامه به یک نوع از پرکاربردترین آنها اشاره میگردد. پمپی خودکار و دوار، دارای روتور مارپیچ که بدون هرگونه شیرآلات کنترلی ارائه میگردد. این نوع از پمپهای جابجایی مثبت، دارای ساختار ساده ای هستند که تنها از دو جز روتور و استاتور تشکیل شده اند. روتور دارای سطح مقطع دایره ای میباشد که مرکز این دایره با

گامی به اندازه میزان خارج از مرکزی (e) حول محور طولی روتور میچرخد. اما استاتور این پمپ دارای گامی به اندازه نصف گام روتور است. میزان قطر و گام و خروج از مرکز با توجه به اندازه ی پمپ تفاوت دارد و تعیین کننده ی اندازه ی بسیاری از اجزاء و حتی ظرفیت انتقال سیال میباشدند. با توجه به سطح مقطع، روتور و استاتور در دو نقطه تماس دارند که از منظر طولی به صورت خطوط تماس دیده میشود. توانایی این پمپها در ایجاد خلا در هنگام مکش از یک خط لوله، که به معنای خود تحریک بودن نیز میباشد، وابسته به نوع آب بندی، ترکیب مواد استفاده شده برای ساخت الاستومر استاتور و همچنین نوع فلز بکار رفته برای ساخت روتور، می باشد. [۱] "شکل ۱" "شکل ۲"

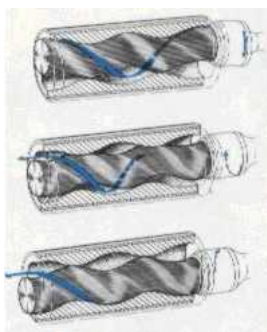


شکل ۱- نمای کلی از یک پمپ دوار



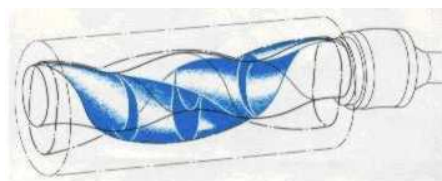
شکل ۲- نمای برش خورده از یک پمپ دوار با روتور مارپیچ

استفاده همزمان از ترکیبات الاستیک و غیر الاستیک برای ساخت اجزای انتقال دهنده پمپ به خصوص در هنگام استفاده از این پمپها در انتقال سیالات ساینده، باعث ارتقاء کیفیت آن در قیاس با پمپهایی که در آنها از فلز خالص برای ساخت این اجزا استفاده شده است، گشته است. "شکل ۳" نشان دهنده موقعیتهای مختلف عناصر انتقال دهنده در یک پمپ هلیکال دوار است. در تصویر بالایی، یک مسیر کاملاً بسته نشان داده شده است. این مسیر در تصویر میانی بعد از ۹۰ درجه چرخش روتور بسته به جهت چرخش، از یک سو وارد ناحیه دهش پمپ میشود در حالی که بخش دیگر آن نیز وارد ناحیه مکش گردیده است. تصویر پایینی نیز روتور را پس از ۱۸۰ درجه چرخش نمایش میدهد. این فرایند بطور پیوسته پیشرفت میکند. سوراخ ها و محفظه های جدید این کار را بطور ثابت ادامه می دهند.



شکل ۳ - موقعیت های مختلف روتور در یک پمپ هلیکال دوار

همانطور که در "شکل ۴" نشان داده شده است این نوع پمپهای با روتورهای مار پیچ خارج از مرکز توانایی انتقال ذرات جامد بزرگتری را دارد.



شکل ۴ - عناصر انتقال دهنده اجزای روتور

## ۲. روش ساخت

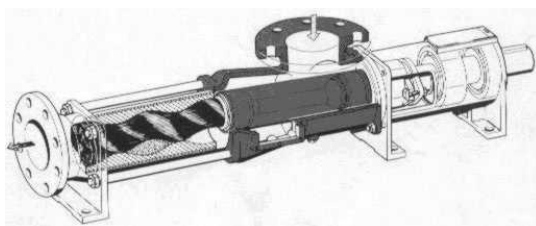
در استاتور از لاستیکهایی جهت مقاومت دستگاه در مقابل پیچش استفاده شده است. در این پمپ، روتور بوسیله دو تا مفصل گاردان و چهارشاخ گاردان که به وسیله محور متحرک به حرکت در آورده میشود، می گردد. بنابراین مفصل

گاردانها بسیار ضروری هستند. پمپهائی با روتورهای مارپیچ خارج از مرکز میتوانند بوسیله تمام محرکها به چرخش در بیایند اما روتورهای سه فازه ترجیح داده می شوند.

### ۳. معرفی انواع پمپ هائی با روتورهای مارپیچ خارج از مرکز

#### ۳.۱. نوع H

اساسا پمپهای مدل H، یک قالب قابل تغییر هستند. در واقع با توجه به نوع مکانیزم مونتاژی این نوع پمپها، تنها با تغییر قسمتهای کمی از پمپ، عمدتاً در پوسته پمپ، میتوان انواع دیگری از این پمپ را بوجود آورد. پمپهای مدل H به صورت افقی نصب می شوند، دارای اتصالات فلانچی هستند و از پمپهای پر کاربرد در تمام صنایع برای جابجائی مواد لزج یا غیر لزج، یا سیالات همراه با ذرات جامد و کار در محیطهای خنثی یا غیر خنثی، میباشند. "شکل ۵"



شکل ۵ - پمپ با روتور مارپیچ خارج از مرکز نوع H

با توجه به تعداد مرحله کاری پمپ، پمپهای مدل H به انواع زیر تقسیم میشوند:

- مدل EH :

یک مدل تک مرحله ای با فشار دهش کم تا ماکزیمم ۶ بار.

- مدل E2H :

یک مدل دو مرحله ای با فشار دهش متوسط تا ماکزیمم ۱۲ بار.

- مدل E4H :

یک مدل چهار مرحله ای با فشار دهش زیاد تا ماکزیمم ۲۴ بار.

حداکثر فشار دهشی این پمپها که در بالا به آنها اشاره شد، برای کار با سیال با لزجت کم صادق است. بسته به ترکیبات و لزجت سیال انتقال داده شده، پمپهای مدل H میتوانند به حداکثر دبی ۲۲۰ مترمکعب بر ساعت برسند.

### ۲.۳. نوع KU

نوع KU از پمپهای مارپیچ دوار به دلیل پوسته پلاستیکی خود تنها در بخشی از صنعت مورد استفاده قرار میگیرد که نیاز به انتقال سیالات بدون اجزاء ساینده وجود دارد. از موارد کاربرد آن میتوان به صنایع شیمیایی اشاره کرد. به دلیل وزن کم، به راحتی جابجا میشوند و در خطوط لوله به صورت افقی نصب میگردند. دو مدل از این نوع پمپ ساخته شده است :

#### - مدل Eku :

این مدل دارای یاتاقان و محور دوار مجزا بوده و یک محور انعطاف پذیر، رابط بین خروجی موتور و روتور پمپ است.

#### - مدل Ekun :

در این مدل، به دلیل عدم وجود یاتاقان، محور خروجی موتور مستقیماً به روتور پمپ متصل است. این نوع ساختار دارای مزایای زیر است:

- طول کوتاه
- وزن کم
- قابلیت حمل
- تمیزکاری آسان

### ۳.۳. نوع L

پمپ های مدل L با تغییر تعدادی از قطعات مدل H بوجود آمده اند. بصورت افقی نصب میشوند و دارای اتصالات فلنجی میباشند. در مدل L محفظه به صورت استوانه ای نصب میشود. پمپ مستقیماً با محرک موتور توسط میله مخصوصی از طریق موتور ارتباط دارد. موتور در همان لحظه ای که پمپ انجام می شود کار می کند. در ساخت پوسته پمپهای نوع L یا از جنس چدن خاکستری استفاده میشود و یا از استیل مقاوم در برابر مواد اسیدی.

دو نمونه از این نوع پمپ موجود میباشد:

- مدل EL :

یک مدل تک مرحله ای با فشار دهش کم تا ماکزیمم ۶ بار.

- مدل E2L :

میانگین فشار دهش تا حداکثر ۱۲ بار.

بسته به نوع محیط کاری پمپ و ویسکوزیته سیالی که توسط آن انتقال میابد ، نوع L میتواند به حداکثر دبی ۴۲ مترمکعب بر ساعت برسد.

۴.۳. نوع S :

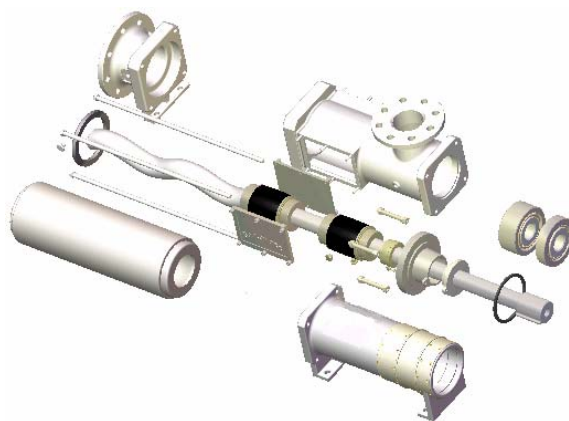
پمپهای مدل S با تغییرات کمی از نوع H ساخته شده اند. تنها اختلاف بیرونی این دو، دو میله کششی است که در بیرون جعبه یاتاقان آن بسته شده است. مزیت عمده این نوع پمپ دوار، تمیز کاری بسیار آسان آن است که نتیجه دمونتاز بسیار راحت تمامی قطعات پمپ است. این خصوصیت، آن را تبدیل به یکی از پر کاربردترین پمپها در صنعت مواد غذایی، صنعت مواد دارویی، صنعت مواد آرایشی و صنایع رنگسازی نموده است. بسته به نوع محیط کاری پمپ و ویسکوزیته سیالی که توسط آن انتقال میابد، نوع S میتواند به حداکثر دبی ۴۲ مترمکعب بر ساعت برسد.

۵.۳. نوع U :

پمپهای این مدل نسبت به نوع H از لحاظ عمودی بودن و طراحی در جاسازی مختلف می باشند. این نوع معمولا به صورت عمودی نصب میشود و با مواد لزج یا غیر لزج نیز قابل استفاده اند. محل قرار گرفتن این پمپ ها مستقیما بالای ظرف یا چاهی که در حال خالی شدن است، نصب میشود. از موارد کاربرد این نوع میتوان به استفاده در چاههای نفت، صنایع معدنی، فاضلاب و یا تخلیه آب شستشو در تانکهای حمل شکر اشاره کرد. [۲]

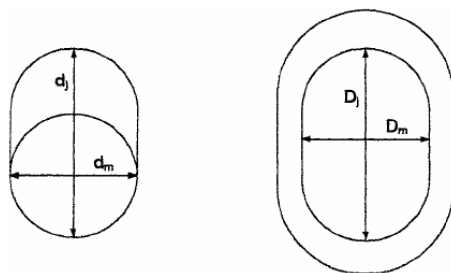
۴. فرضیاتی که طراحی وابسته به آنها میباشد:

بعد از تعیین ارتباط هندسی موجود بین پارامترهای طراحی پمپ هلیکال دوار مانند میزان انحراف از مرکز (e)، گام روتور (p)، دایره مرجع (cr)، دایره قطر ماکزیمم و قطر مینیمم روتور و استاتور ( $D_j$ ،  $d_j$ ،  $D_m$ ،  $d_m$ )، اقدام به بررسی پارامترهای مهمتر از جهت کاربردی، مینماییم. "شکل ۶"



شکل ۶- نمای انفجاری یک پمپ دوار با روتور مارپیچ

از دید کاربردی پارامترهای میزان انحراف از مرکز (e)، اقطار مینیمم و ماکزیمم روتور و استاتور و گام روتور و استاتور دارای اهمیت بیشتری میباشد. شکل زیر مشخصات هندسی استاتور یک پمپ  $PC^1$  را نمایش میدهد.



شکل ۷- هندسه استاتور یک پمپ PC

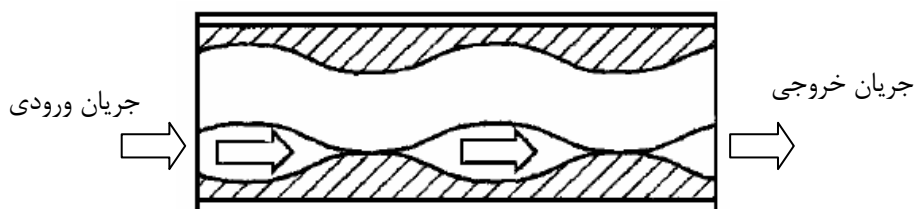
#### ۱.۴. ضخامت الاستومر استاتور:

از دیدگاه طراحی و کاربردی، ضخامت الاستومر بسیار حائز اهمیت است. الاستومر می بایست دارای ضخامت کافی برای به حداقل رساندن تنشهای ناشی از لغزش روتور بر روی استاتور در حین عملکرد پمپ، باشد. از سوی دیگر ضخامت زیاد الاستومر منجر به فشرده شدن بیش از حد آن و نهایتاً ناتوانی این الاستومر نرم شده در جلوگیری از نشتی پمپ که ناشی از برگشت جریان از مدخل خروجی به ناحیه مکش پمپ است، میشود. لذا در کنار پارامترهای مهم هندسی پمپ که در بالا به آن اشاره شد، ضخامت الاستومر نیز دارای اهمیت بسزایی برای طراح پمپ میباشد.

#### ۲.۴. دیگر پارامترهای کلیدی طراحی پمپ عبارتند از:

سطح مقطع جریان، حجم حفره، میانگین سرعت سیال، بیشینه سرعت ذره، بیشینه سرعت سایش. از میان این پارامترها، سه پارامتر سرعت سیال، سرعت سایش و سرعت ذره جهت تعیین آن ترکیبی از مشخصات هندسی که منجر به عمر کافی پمپ PC و قابلیت اطمینان آن میشود، به کار برده میشوند. سه متغیر اصلی ای که دارای بیشترین تاثیر بر میزان این سرعت ها هستند عبارتند از: میزان انحراف از مرکز، اقطار بیشینه و کمینه و گام. "شکل ۸" نشان دهنده میانگین سرعت سیال است. این سرعت به دلیل تاثیر بر سایش پمپ دارای اهمیت زیادی است. سرعت خیلی زیاد سیال باعث سایش داخلی پمپ و سرعت خیلی کم آن نیز باعث ته نشینی ذرات جامد در پمپ و خوردگی آن میشود. [۳]

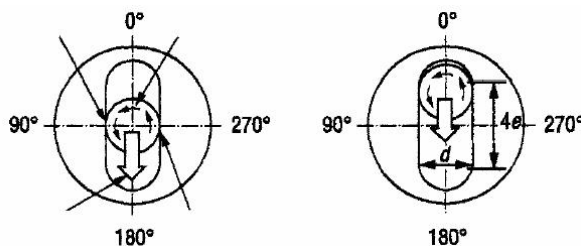
$$A.F.V = \frac{\text{Flowrate}}{\text{Flowarea}} = \frac{Q \times 0.321}{A_{fluid}} = \frac{Q \times 0.321}{4ed_m} \text{ (ft/sec.)}$$



شکل ۸ - سرعت میانگین سیال



همانطور که در "شکل ۹" دیده میشود، سرعت سایشی (IV)، مجموع یا تفاضل دو جزء است :  
 سرعت دورانی (که ثابت است) و سرعت انتقالی (که متغیر است) . زمانی که روتور در موقعیت میانی استاتور قرار میگیرد، این سرعت دارای میزان ماکزیمم و در دو موقعیت بالایی و پایینی استاتور دارای مقدار صفر است.



شکل ۹- سرعت میانگین سیال

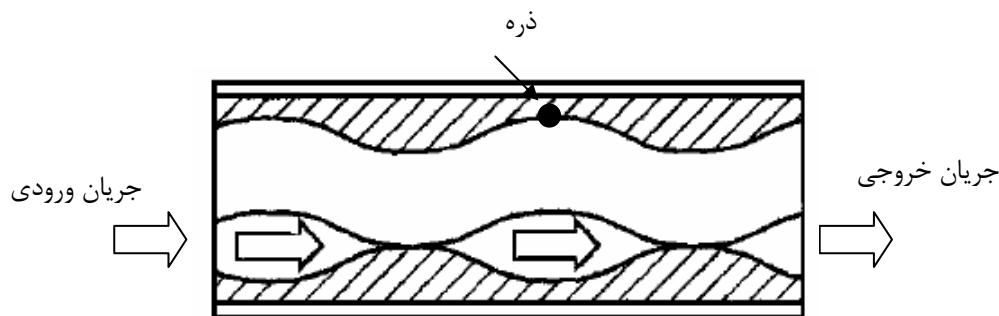
"شکل ۱۰" ماکزیمم سرعت یک ذره را در حال عبور از بیشترین فاصله نسبت به مرکز (سرعت دورانی ماکزیمم)، نشان میدهد. [۴]

$$\text{ماکزیمم سرعت یک ذره} = \frac{rpm \times \sqrt{\pi^2 (4e + d_{mo})^2 + P_R^2}}{229} \text{ (ft/sec)}$$

$$V_{rot} = \frac{rpm \times d_m}{229} \text{ ft/sec}$$

$$V_{trant} = \frac{rpm \times 8e}{12} \text{ ft/sec}$$

$$V_{surft} = rpm \times (d_m / 229 \pm 8e/12) \text{ ft/sec}$$

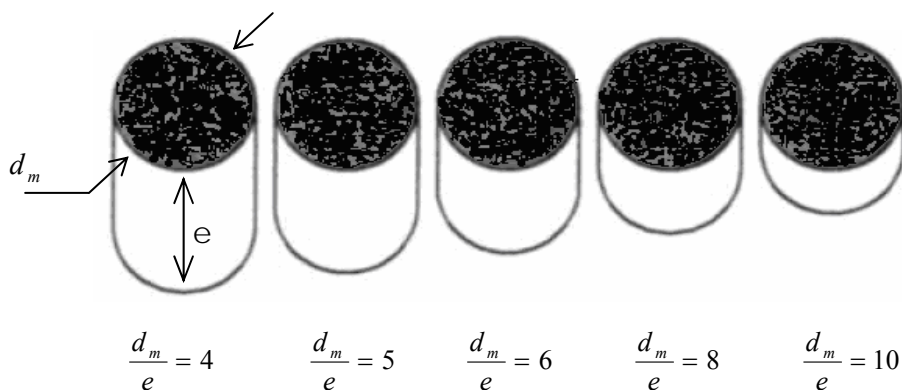


شکل ۱۰- ماکزیمم سرعت یک ذره

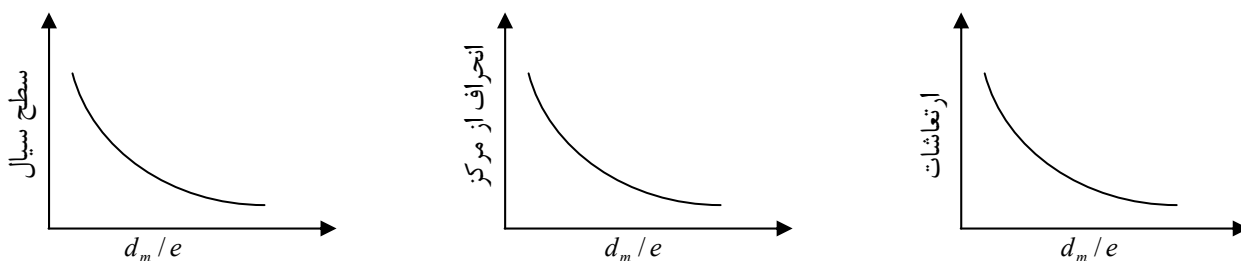
### ۳.۴. تغییرات دو نسبت و تاثیر آنها بر عملکرد و عمر پمپ:

#### ۳.۴.۱. نسبت قطر - فاصله از مرکز ( $d_m/e$ ):

این نسبت دارای تاثیر بسزایی بر روی ارتعاشات پمپ است. به دلیل روتور غیر مستقیم، که درون استاتور با آف سستی به اندازه انحراف از مرکز دارای نوسان است، پمپهای PC ذاتا پمپهایی غیر متعادل هستند. همانطور که در "شکل ۱۱" دیده میشود، اگر با ثابت نگه داشتن قطر مینیمم، نسبت  $d_m/e$  تغییر نماید، در نسبتهای  $d_m/e$  بزرگتر، توانایی گذر جریان کاهش میابد. نیروی گریز از مرکز که باعث ایجاد ارتعاشات میشود برابر است با حاصلضرب جرم روتور در مجذور سرعت دورانی ضربدر میزان انحراف از مرکز ( $e$ ). به ازای یک سطح مقطع جریان، این نیرو با افزایش نسبت ( $d_m/e$ ) افزایش میابد. "شکل ۱۲"



شکل ۱۱- ماکزیمم سرعت یک ذره



شکل ۱۲- نمودار نسبت قطر- فاصله از مرکز

۲.۳.۴. نسبت گام - فاصله از مرکز ( $p_s / e$ ):

این نسبت دارای تاثیرات زیر است:

**نرخ فرسایش:**

افزایش نسبت فوق باعث افزایش نرخ فرسایش میشود.

**شکل حلزونی:**

افزایش نسبت فوق باعث ایجاد حلزونهایی آرام تر میشود.

**جریان گذر:**

افزایش نسبت فوق باعث افزایش جریان گذر میشود.

**هزینه:**

یک پمپ با گام بلند دارای فرایند ساخت راحت تری است.

**هد مکش مورد نیاز:**

افزایش نسبت فوق باعث کاهش خصوصیات مورد نیاز ممکشی میشود.

**سیالات لزج:**

جهت استفاده برای سیالات لزج، بهتر است از مقادیر کم این نسبت استفاده شود. زیرا نرخ برش با افزایش این نسبت، افزایش میابد.

**میانگین سرعت سیال:**

نسبتهای بیشتر  $p_s / e$  باعث افزایش سرعت میانگین سیال میشود. "شکل ۱۳"

**سرعت ذرات:**

با افزایش نسبت، افزایش میابد. "شکل ۱۳"

**آب بندی:**

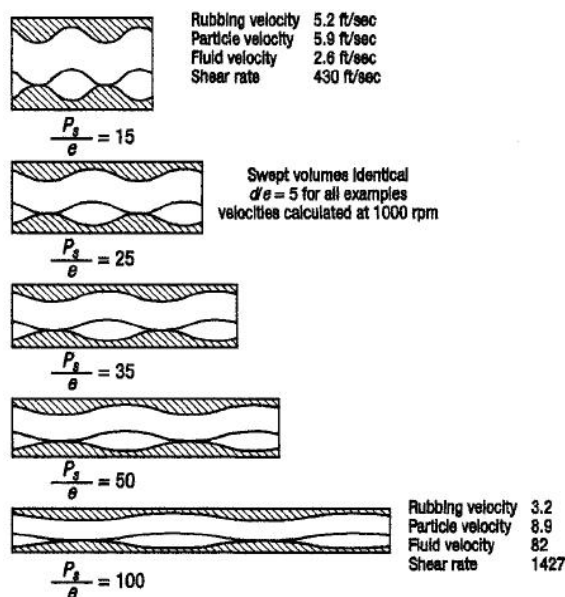
در نسبتهای بالاتر، آب بندی پمپ بسیار دشوار میگردد.

**گشتاور راه انداز:**

با افزایش نسبت فوق، گشتاور لازم برای شروع افزایش میابد.

## انسداد ذرات:

با افزایش نسبت فوق، زاویه های برخورد بین روتور و استاتور کاهش یافته که احتمال به دام افتادن ذرات بیشتر میشود. [۵]



شکل ۱۳- گام پیچ بلند تر باعث افزایش سرعت ذره و سیال میشود

## ۵. عیب یابی بوسیله نتایج تجربی:

انتقال مواد ساینده بوسیله پمپهای دوار هلیکال که به پمپهای پیچ خارج از مرکز نیز معروف میباشند، توسط روتور مارپیچ آنها صورت میگیرد. در زمان انتقال مواد آبکی، مهم است که روتور، به آرامی به الاستومر استاتور مالیده شود. در غیر این صورت، ذرات کوچک ساینده ای که مابین روتور و استاتور قرار میگیرند، باعث شکافتن الاستومر میشوند. در زیر به بخشی از نتایج تجربی یکی از استفاده کنندگان این نوع پمپ پرداخته میشود:

بیرون کشیدن و تعویض پی در پی روتور و استاتور یک پمپ دوار تک مرحله ای، در طول شش ماه گذشته تبدیل به معضل عمده ای گشته است. از این پمپ برای انتقال محلولی آبکی حاوی ذرات ماسه ای با حداکثر قطر ۰.۵ میلیمتر، استفاده میشد. به طور معمول در بازه های زمانی ۴ تا ۶ ماهه، تعویض روتور و استاتور صورت میگرفت. اما ناگهان این تعویض به هر دو هفته یکبار و حتی هفته ای یکبار رسید. مشکل از آنجا شروع شد که به پیشنهاد سازنده پمپ، به دلیل دمای بالای عملیات، اقدام به تغییر در تلورانس روتور نمودیم. پیشنهاد سازنده پمپ استفاده از یک روتور باریک تر بود. بدینوسیله، امکان انبساط روتور با افزایش دما در حین عملیات فراهم میگشت. نمونه هایی از این روتورهای باریک شده به

صورت پی در پی نصب و به دلیل عدم کارایی و پایین آمدن کیفیت انتقال مواد، تعویض گردید. و نهایتاً دوباره همان روتورهای اولیه نصب شدند.

این آزمایش دارای نتایجی به شرح زیر میباشد:

- میبایست فشار بسیار کمی ما بین روتور فلزی و استاتور لاستیکی وجود داشته باشد، تا از طریق مالش خفیف روتور و استاتور، ذرات ساییده ریز انتقال یابند. اختلاف بین باریک ترین و قطورترین روتوری که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت ۰,۸ میلیمتر بود که دمای کاری ۸۰ درجه سانتیگراد هیچگاه نتوانست فاصله ایجاد شده ناشی از کاهش قطر روتور را از طریق انبساط آن پر کند.
- فاصله بیش از ۰,۴ میلی متر بین روتور و استاتور باعث برگشت مواد پمپ شده به درون حفره های پمپ و چپانده شدن مواد بین روتور و استاتور میگردد.
- این تراکم بین روتور و استاتور است که باعث آب بندی حفره های پمپ میشود. برای تغییر فاصله بین روتور و استاتور، قطر روتور را کم میکنیم. با افزایش فاصله بین روتور و استاتور، سیال تحت فشار، باعث تراکم و فشرده شدن لاستیک استاتور شده و زمینه برگشت سیال پمپ شده و کاهش شدید دبی پمپ را فراهم میکند. در موارد انتقال جامدات بزرگ و کلفتی مانند تکه های گوشت و یا میوه، استفاده از روتورهای باریک شده توصیه میشود اما برای انتقال سیال حاوی ذرات جامد، استفاده از روتورهای قطورتر که فاصله کمتری با استاتور دارند، بهتر است.
- در فشار بالا و دور پایین پمپ (دور بر دقیقه)، مواد درون حفره پمپ چپانده شده و باعث افزایش فاصله روتور و استاتور میشوند. برگشت سیال از حفره پر فشار به حفره کم فشار پمپ اتفاق میافتد.
- با افزایش درصد جامد در سیال انتقال یافته، سرعت دوران روتور را کاهش دهید تا میزان سایش و خوردگی کاهش یابد. در زمان استفاده از پمپ برای سیالات خورنده، بهتر است از پمپهای بزرگتر با روتور و استاتور قطورتر و در دور پایین تر استفاده شود. به این وسیله، دبی مشابهی فراهم میشود با این تفاوت که با کاهش سرعت دوران روتور، میزان سایش و خوردگی به طور قابل ملاحظه ای کاهش میابد.
- راه دیگر کاهش نرخ سایش، کاهش فشار در هر نقطه است. برای این کار از روتور و استاتور بلندتر برای افزایش مرحله کاری پمپ استفاده میشود. به این وسیله، فشار در سطحی بسیار بزرگتر توزیع میشود که این نیروهای تماسی و در نتیجه نرخ سایش را کاهش میدهد.

## ۶. نتیجه گیری:

پس از تعیین ارتباط هندسی موجود بین پارامترهای طراحی پمپ مارپیچ دوار مانند میزان انحراف از مرکز، گام روتور، دایره مرجع، دایره قطر ماکزیمم و قطر مینیمم روتور و استاتور، اقدام به بررسی پارامترهای مهمتر از جهت کاربردی گردید. با استفاده از اصول هندسی پمپ و کمترین محاسبات ریاضی، پیچیدگی و نکات پنهان عملکرد پمپ مارپیچ دوار بررسی شده است.

در این مقاله سعی بر این شده است که جدا از پیچیدگیهای فرآیند ساخت پمپ با روتور مارپیچ دوار، به اصول حاکم در طراحی این نوع پمپ به صورت کامل پرداخته شود. از این نکات می توان به عنوان گامی بلند برای رسیدن به نحوه ساخت این نوع پمپ ها یاد کرد. گام آخر در معرفی این نوع پمپ پرداختن به آن از دیدگاه مصرف کننده میباشد و لذا به بخشی از عیب یابی این پمپ بر پایه نتایج تجربی نیز پرداخته شده است.

## مراجع:

1. Nelik L, Positive Displacement Pumps, Short Course, 15th International Pump Users Symposium, Texas A&M University, Houston, TX, March 2000.
2. Cholet H, Progressing Cavity Pumps, Editions Technip, Paris, 1997.
3. Vetter G. and Wirth W, Understanding Progressing Cavity Pumps Characteristics and Avoid Abrasive Wear, paper presented at the Texas A&M University 12th International Pump Users Symposium, March 1995.
4. Samuel R and Saveth K, Progressing Cavity Pump (PCP) New Performance Equations for Optimal Design, Richardson, TX, Society of Petroleum Engineers, 1996.
5. Delpassand M, Progressing Cavity Pump Design Optimization for Abrasive Applications, Artificial Lift July 1997.