

مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر در عملکرد پمپ پرستالتیکی و طراحی یک نمونه

محمدصادق فتحی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی حکاکي فرد* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، پاییز ۱۳۹۹
دوره ۳، شماره ۲، ص. ۸۳-۷۳

در این نوشتار ابتدا «حرکت پرستالتیکی» به طور عام معرفی شده و بعد پمپ ساخته شده بر مبنای این حرکت و کاربرد آن بررسی شده است. سپس حرکت سیال در یک پمپ پرستالتیکی که به وسیله‌ی این مدل حرکتی، سیال درون لوله را جابه‌جا می‌کند، بررسی شده است. ابتدا با المان‌گیری سیال در ناحیه‌ی فشرده‌گی دیواره‌ی لوله‌ی پمپ و نوشتن معادلات نویر - استوکس (در حالت پایا) و ساده‌سازی معادلات با در نظر گرفتن شرایط مرزی لوله، توزیع سهموی سرعت سیال در لوله و نحوه‌ی تغییرات دبی پمپ به دست آمده است. سپس روابط فشارکششی پوسته‌ی لوله و فشار غلتک پمپ و فشار سیال نوشته شده و رابطه‌ی تعادلی بین این نیروها ارائه شده است. پس از آن با انتخاب فشار بیشینه‌ی سیال، نمونه‌ی خاص طراحی شده است. در ادامه رابطه‌ی بین سه متغیر فشرده‌گی لوله، فشار سیال و فشارکشسانی لوله به‌خوبی توصیف شده است. همچنین نشان داده شده است که یک رابطه‌ی خطی بین سرعت، حرکت غلتک و سرعت انتقال سیال وجود دارد. نمودارهای دبی و فشار و توزیع سرعت سیال در موقعیت‌های مختلف فشرده‌گی لوله به دست آمده و دبی کل برای یک نمونه‌ی عددی خاص محاسبه شده است. دبی به دست آمده از پمپ (سیال آب) دارای چهار غلتک چرخان، حدود ۱/۸ لیتر بر دقیقه به دست آمده است.

واژگان کلیدی: پرستالتیک، فشرده‌گی لوله، سرعت سیال، دبی، فشار سیال.

۱. مقدمه

پمپ‌های پرستالتیکی یک نوع پمپ جابه‌جایی مثبت هستند که کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند. در این پمپ‌ها سیال در محیطی بسته توسط فشار دیواره‌های لوله جابه‌جا می‌شود. این پمپ‌ها در مواردی کاربرد دارند که ایزوله کردن سیال از محیط (نظیر کاربردهای پزشکی) ضروری باشد. در این نوشتار به مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن‌ها پرداخته شده و در نهایت نیز یک پمپ برای کاربردی ویژه طراحی و ارائه شده است.

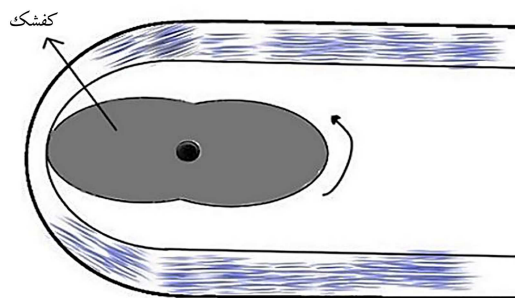
به طور کلی حرکتی که با انقباض و انبساط متداول دیواره‌های یک لوله یا صفحه یا ... باعث انتقال یک ماده می‌شود، حرکت پرستالتیکی می‌گویند. اولین مدل‌های حرکت پرستالتیکی بر پیش‌بینی حرکات سیال داخلی که با جابه‌جایی مشخصی از دیواره‌ی لوله شامل سیال (مانند پمپ پرستالتیک) هدایت می‌شوند، متمرکز شده است. در خصوص نحوه‌ی حرکت انعطافی دیواره‌ی لوله در حرکت پرستالتیکی، تحقیقاتی انجام شده و معادلات آن با شرایط مرزی متناوب دیواره‌ی لوله حل شده است.^[۱] برای ساده‌تر کردن تحلیل مکانیک سیالات، مدل‌ها با موج‌هایی با دامنه‌ی کم فرض شده، و مربوط به زمانی است که جریان سیال دارای عدد رینولدز پایین است

* نویسنده مسئول

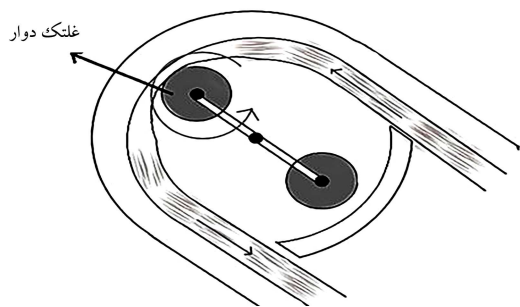
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۴/۶، پذیرش ۱۳۹۹/۴/۲۸.

DOI:10.24200/J40.2020.55035.1544

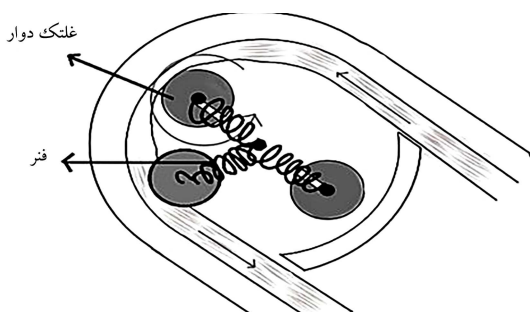
از جمله موارد حرکت پرستالتیکی است. پمپ‌های پرستالتیک نیز با همان اصل کار می‌کنند، با این تفاوت که پشوران‌ها معمولاً از طریق غلتک یا کفشک به دیواره‌ی لوله منتقل می‌شوند تا امواج جابه‌جایی در دیواره ایجاد شود. در رابطه با پمپ پرستالتیکی، محققین پمپ مواد جامد را توسط حرکت پرستالتیکی به صورت تحلیلی مطالعه کرده‌اند.^[۱۱] همچنین نحوه‌ی خمش دیواره‌ی پمپ در فشار مدل‌سازی دقیق شده است.^[۱۲] مدل‌سازی حرکت پرستالتیکی سیال در پمپ تحت هر دو حالت پایا و ناپایا بررسی شده است.^[۱۳] در رابطه با کاربردهای نوین پمپ پرستالتیکی در ریزکانال‌ها روابطی تحلیلی برای تنظیم فشار خروجی یک حجم فشرده سیال از پمپ به ریزکانال عرضه شده و بر این مبنای پمپ پرستالتیکی با دیافراگم متغیر (حتی با فشار دست) برای تنظیم دقیق فشار خروجی از سیال پمپ نیز طراحی شده است.^[۱۴] در بعضی از مطالعات، از



شکل ۱. شماتیک پمپ کفشکی (شلنگی).



شکل ۲. شماتیک پمپ لوله‌یی (غلتکی).



شکل ۳. شماتیک پمپ غلتکی فنری.

فشرددگی وجود دارد. نمونه‌ی شماتیک این نوع پمپ در شکل ۳ نشان داده شده است.

در اکثر تحقیقات مربوط به لوله تحت موج پرستالتیکی از جمله در مقالات تانگ و رنکین^۴ (۱۹۹۳) و تگکی و بالمفورث^۵ (۲۰۱۱)، به ترتیب حرکت سیال ترکیبی (نیوتونی و غیرنیوتونی) در مجاورت پوسته‌ی انعطاف‌پذیر بررسی و برای توصیف شکل انعطاف پوسته با توجه به فشار درونی و ... معادله‌ی بی‌دست آورده شده و در پژوهش دیگری^{۱۱} حرکت سیال در یک لوله‌ی دوبعدی با مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفته و راه حل‌های عددی برای تحلیل موج فشرددگی ایجاد شده در لوله، در دو حالت تک‌موجی و موج نوسانی متعدد، ارائه شده است؛ همچنین راندمان هر کدام نسبت به میزان آب جابه‌جا شده در هر حالت به دست آمده که بیشترین راندمان برای حالت تک‌موج به دست آمده است. در پژوهشی پس از این، تگکی و همکاران^۸ انتقال مواد جامد را با همین سازوکار در طول موج بلند مورد بررسی قرار دادند. همچنین در پژوهشی دیگر حرکت سیال در لوله در حالت ناپایا مورد بررسی عددی قرار گرفته که بیشترین میزان پمپ سیال در تک‌موج با دامنه‌ی بلند به دست آمده است.^{۱۲} در این تحقیق همچنین با توجه به کاربرد صنعتی پمپ‌های پرستالتیکی، بررسی کاربردی با تمرکز بر روابط تحلیلی در پارامترهای مؤثر، خصوصاً در زمینه‌ی هندسی (روابط بین شعاع غلتک و طول موج لوله و ...) و ارتباط آن‌ها با پارامترهای فیزیکی پمپ (مانند فشار سیال و فشار غلتک و پوسته‌ی لوله و سرعت انتقال سیال ...) انجام شده است. در نهایت نیز چارتری برای طراحی این پمپ‌ها ارائه شده است.

۲. فرضیه‌های محاسباتی پمپ

فرضیات لازم برای بررسی و مطالعه‌ی این نوع پمپ‌ها عبارت‌اند از:^{۱۱}

۱. سیال نیوتنی است. بیشتر مطالعات نظری با فرض این که آب و برخی مایعات فیزیولوژیکی کاربردی در پمپ پرستالتیکی مانند مایعات نیوتنی رفتار کنند،

سیال دارای ذرات نانومغناطیسی برای پمپ سیال استفاده شده است؛ بدین منظور که با دافعه‌ی مغناطیسی دو قطب باری همنام بین دیواره و سیال نانومغناطیسی حرکتی در سیال برای انتقال به وجود می‌آورد.^{۱۵}

پمپ پرستالتیکی غلتکی برای اولین بار توسط پورتر - بردلی در سال ۱۸۵۵ ساخته شده است که برای چاه آب استفاده می‌شد و در آن یک غلتک استوانه‌یی دور یک لوله می‌غلتید و به سر آن دسته‌یی وصل بود که به صورت مکانیکی چرخانده می‌شد.^{۱۶}

در سال ۱۸۷۷، بر همین مبنای، یک پمپ برای انتقال خون طراحی شد. در سال ۱۹۹۲ پمپ غلتکی ویژه (ثبت اختراع ایالات متحده ۵۲۲۲۸۸) با استفاده از لوله‌های تخت و نرم برای سیستم‌های پیوندی قلبی - روی توسعه یافت. اولین پمپ پرستالتیک فنی و تجاری با دوام برای استفاده، در سال ۱۹۹۶ توسط برنارد رفسون، تولید شد و توسعه یافت و تا امروز مدل‌های پرسرعت‌تر با دبی بیشتر تولید شده است.^{۱۸} این پمپ‌ها امروزه به دو دسته: «پمپ‌های شلنگی^۱» و «پمپ‌های لوله‌یی^۲» تقسیم می‌شوند.

در پمپ‌های شلنگی پرستالتیکی با فشار بالا - که معمولاً به صورت پایدار تا فشار ۱۶ بار عمل می‌کنند - از کفشکی دوار برای ایجاد فشرددگی روی لوله و انتقال سیال استفاده می‌شود. از روکش‌های روغنی آغشته به روان‌کننده برای جلوگیری از سایش و کمک به هنگام گرم‌زدگی، روی پوسته‌ی پمپ استفاده می‌شود. شماتیک یک پمپ شلنگی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

پمپ‌های لوله‌یی پمپ‌هایی هستند که به طور معمول دارای روکش خشک و غلتکی همراه با لوله‌اند. در این پمپ‌ها از غلتک‌ها برای فشار دادن لوله استفاده می‌کنند؛ به این ترتیب، با فشار غلتک به ابتدای لوله خلاء ایجاد شده در قسمت فشرددگی، باعث مکش سیال شده و با ایجاد موج فشرددگی روی دیواره‌ها توسط غلتک، سیال به انتهای لوله هدایت می‌شود. پمپ‌های لوله‌یی دارای دست‌کم دو غلتک ۱۸۰ درجه‌ی جدا از هم هستند و ممکن است تا هشت یا حتی دوازده غلتک نیز داشته باشند. افزایش تعداد غلتک‌ها موجب افزایش لرزش و ارتعاش فشار مایع شده در خروجی می‌شود و لزوماً مناسب نیست. سرعت چرخش غلتک‌ها معمولاً از ۰٫۱ تا ۶۰۰ دور بر دقیقه است.^{۱۹} شماتیک یک پمپ لوله‌یی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در یک دسته‌بندی دیگر این پمپ‌ها به دو دسته‌ی انسداد ثابت^۳ و فنری تقسیم می‌شوند. پمپ‌های انسداد ثابت برای یک فشرددگی ثابت در لوله طراحی می‌شوند و قابلیت تغییر فشرددگی را ندارند (نظیر پمپ‌های شکل ۱ و ۲). در این نوع پمپ‌ها اگر لوله‌ی پمپ دارای ضخامت متغیر در طول خود باشد، باعث تغییر فشرددگی لوله در محدوده‌ی کم خواهد شد. اما در پمپ‌های فنری، فشرددگی لوله با توجه به ثابت فنر و فشار سیال تغییر پیدا می‌کند و حالت خودتنظیمی در

در شکل ۴، \hat{w} سرعت در راستای \hat{r} و \hat{u} سرعت در راستای طول لوله (\hat{z}) است. معادلات حاصله عبارت خواهند بود از:

$$\frac{\delta}{\hat{r}\delta\hat{r}}(\hat{r}\hat{u}) + \frac{\delta\hat{w}}{\delta\hat{z}} = 0 \quad (1)$$

معادله‌ی اندازه حرکت در راستای شعاعی:

$$\frac{\delta\hat{P}}{\delta\hat{r}} = 0 \quad (2)$$

معادله‌ی اندازه حرکت در راستای \hat{z} :

$$\frac{\delta\hat{P}}{\delta\hat{z}} = \frac{1}{\hat{r}} \frac{\delta}{\delta\hat{r}} \left(\hat{r}\hat{\mu} \frac{\delta\hat{w}}{\delta\hat{r}} \right) \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳ فشار محلی سیال است. میزان تغییر فشار سیال در طول لوله مطابق معادله‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

برای معادلات ناویر-استوکس در رابطه با محور y (معادله‌ی ۲)، به دلیل این که اندازه حرکت در راستای y وجود ندارد (یعنی \hat{u} در \hat{w} مقدار بسیار اندکی دارد، پس $\hat{u} = 0$) و با صرف نظر از مقدار اتلاف، گرادینان تغییرات فشار نسبت به شعاع حدوداً صفر به دست می‌آید که نتیجه‌ی معقولی است؛ زیرا چنان که در فرضیات آمد، سیال اینرسی ندارد و به سبب نیروی گریز از مرکز و ... در راستای شعاعی شتاب برایش در نظر گرفته شود و مقدار شعاع لوله هم بسیار ناچیز است.

۲.۳. شرایط مرزی

برای حل معادلات اندازه حرکت و پیوستگی نیاز به دو شرط مرزی است، تا با حل معادلات، توزیع سرعت در طول لوله به دست آید. شرط اولیه‌ی مسئله عبارت است از:

$$\frac{\delta\hat{a}}{\delta t} = -c \frac{\delta\hat{a}}{\delta\hat{z}} = \hat{u}$$

$$\hat{w} = 0 \text{ for } \hat{r} = \hat{a}$$

شرایط اولیه در این معادلات نشان می‌دهد که سرعت در مرز شعاع لوله (\hat{a}) برابر صفر است.

۳.۳. روابط حاکم بر پارامترهای فیزیکی پمپ

در این بخش رابطه‌ی بین پارامترهای مؤثر در مسئله ارائه می‌شود تا فشار سیال و غلتک و فشار کشسان پوسته برحسب تغییر شعاع (میزان فشردگی) به دست آید. سپس این مقادیر برای حل در معادلات ناویر-استوکس جایگذاری شده و توزیع سرعت و دبی به صورت تابعی از مکان در همه‌ی لوله به دست می‌آید. در شکل ۵، بخشی از لوله‌ی تحت فشردگی توسط غلتک نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵، در پمپ پرستالتیکی لوله‌ی مشابه دور یک پوسته قرار گرفته است و غلتکی با فشار F که موج فشاری ایجاد شده توسط آن، به متغیر z (طول لوله) و t (زمان) و سرعت خود غلتک وابسته است، بر روی لوله فشردگی ایجاد می‌کند و سیال را جابه‌جا می‌کند. \hat{z} مختصه‌ی ثابت در دستگاه آزمایشگاه است. c نیز سرعت چرخش غلتک است که تقریباً برابر با سرعت پمپاژ سیال است.

انجام شده است. اگرچه این رویکرد ممکن است درک رضایت بخشی از سازوکار پرستالتیک را فراهم کند؛ اما چنانچه سازوکار پرستالتیک درگیر در رگ‌های خونی کوچک، عروق لنفاوی، روده، عضلات دهان و ... بررسی شود، این فرض درست نبوده و خون یک سیال غیر نیوتنی است. در این تحقیق به دلیل این که پمپ مورد بررسی به‌عنوان پمپ آب استفاده می‌شود، سیال نیوتنی در نظر گرفته می‌شود.

۲. سیال، تراکم ناپذیر و با لزجت کم (مانند آب) در نظر گرفته می‌شود.

۳. سیال بدون اینرسی^۶ در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی عدد رینولدز (Re) آن بسیار کم بوده و سیال از خود سرعت و اینرسی ندارد و صرفاً با نیروی فشاری خود غلتک‌ها روی لوله، در حرکتی نسبتاً همگام با خود غلتک‌ها جلو می‌رود.^[۱۲]

۴. لوله به نسبت شعاع خود، بسیار طویل است ($R \ll L$) و اثر فشردگی و خمش در ناحیه‌ی زیر غلتک، در جای دیگر لوله در نظر گرفته نمی‌شود.

۵. از نیروی جاذبه‌ی زمین صرف‌نظر می‌شود.

۶. نوع موج ایجاد شده توسط غلتک دایروی حرکت‌کننده روی لوله، یک نوع موج کسینوسی با طول موج بلند فرض می‌شود. با استفاده از این فرض می‌توان فرورفتگی در دیواره‌ی لوله را با یک تابع کسینوسی تخمین زد. البته می‌توان مدل‌های فشردگی دیگری هم در نظر گرفت؛ اما این حالت در مقاله‌های علمی^[۲۰،۲۱] بیشتر در نظر گرفته شده و با توجه به شکل دایروی غلتک‌ها، تخمینی دقیق‌تر ارائه می‌دهد.

۳. مدل‌سازی ریاضی مسئله

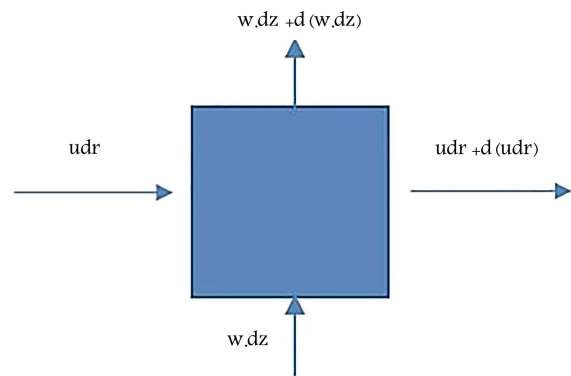
۱.۳. معادلات حاکم

با انتخاب یک المان که در شکل ۴ نمایش داده شده، معادلات حاکم برای سیال در قسمت فشردگی لوله نوشته می‌شود:^[۱۲]

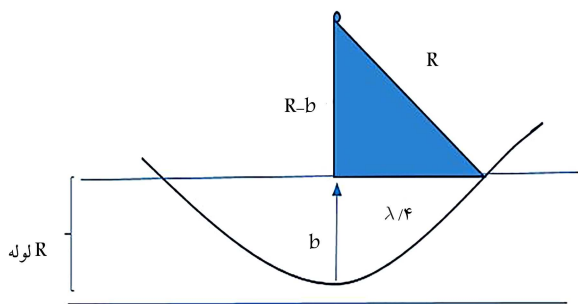
۱. معادله‌ی پیوستگی جرمی؛^۷

۲. معادلات نیرو و شتاب (ناویر-استوکس) برای المان در حالت فشردگی در دو راستای \hat{r} و \hat{z} ؛

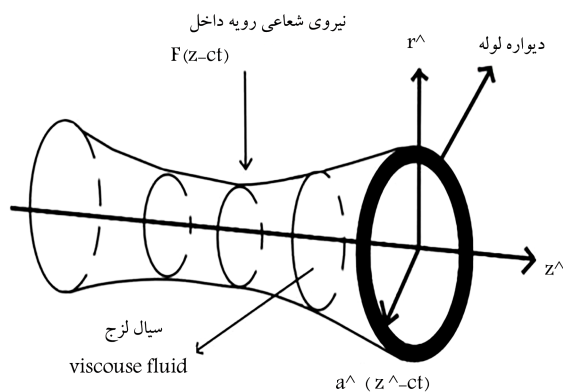
۳. رابطه‌ی تعادلی بین فشار غلتک و فشار سیال و مقاومت الاستیک لوله (روابط حاکم بر پارامترهای فیزیکی پمپ).



شکل ۴. موازنه جرمی المان در نظر گرفته شده برای سیال.



شکل ۶. فشردگی پوسته‌ی لوله.



شکل ۵. فشردگی ایجاد شده در لوله توسط فشار غلتک.

۴.۳. بی‌بعدسازی و حل معادلات حاکم

با بی‌بعدسازی پارامترهای طول ($z = \frac{\hat{z}-ct}{L}$), سرعت ($w = \frac{\hat{w}-c}{c}$), شعاع ($a = \frac{\hat{a}}{R}$) و فشار ($P = \frac{\hat{P}-P_0}{\mu c L} \times R^2$) در معادله‌ی ناویر - استوکس و داشتن شرایط مرزی، معادله‌ی توزیع سرعت افقی (\hat{w}) به دست می‌آید که با جایگذاری روابط شعاع و فشارها (روابط ۶ و ۸) در معادله‌ی ۳ ناویر - استوکس و حل آن‌ها، سرعت سیال در راستای لوله (برحسب شعاع) به دست می‌آید:

$$\hat{w} = \frac{c}{\nu} \times \left(\frac{\lambda}{\mu c}\right) \times \frac{d\hat{P}}{dz} \times (\hat{r}^2 - \hat{a}^2) \quad (8)$$

$$\hat{w} = \left(\frac{-\lambda}{\nu \mu}\right) \times \left(\frac{\nu \pi}{\lambda} \times F_0 \sin\left(\frac{\nu \pi}{\lambda} \times (\hat{z} - ct)\right)\right) - \frac{\nu \pi}{\lambda h (\lambda - \nu^2)} \sin\left(\frac{\nu \pi}{\lambda} \times (\hat{z} - ct)\right) \times (\hat{r}^2 - (R + b \times \cos\left(\frac{\nu \pi}{\lambda} \times (\hat{z} - ct)\right)))^2 \quad (9)$$

سپس با توجه به داشتن سرعت، دبی به دست می‌آید:

$$\hat{q} = \pi c (R^2 - \hat{a}^2) - \left(\frac{\pi}{\lambda \mu}\right) \times \frac{\nu \pi}{\lambda} \times \left(\frac{\nu \pi}{\lambda} \times F_0 \sin\left(\frac{\nu \pi}{\lambda} \times (\hat{z} - ct)\right)\right) - \frac{\nu \pi}{\lambda h (\lambda - \nu^2)} \sin\left(\frac{\nu \pi}{\lambda} \times (\hat{z} - ct)\right) \times \hat{a}^4 \quad (10)$$

۴. روابط بین پارامترهای هندسی لوله و طول موج

برای طراحی پمپ باید میزان فشردگی لازم (b) و روابط بین طول موج و ابعاد هندسی غلتک محاسبه شود. در شکل ۶ نحوه‌ی انحنای پوسته‌ی لوله به صورت شماتیک نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶:

$$\left(\frac{\lambda}{4}\right)^2 + (R - b)^2 = R^2 \quad (11)$$

در نتیجه با داشتن شعاع غلتک (R) و میزان فشردگی لوله (b), می‌توان طول موج فشردگی لوله (λ) را به دست آورد. با توجه به مسئله موجود مقدار شعاع صفحه‌ی پمپ از وسط لوله تا مرکز دوران (R_{disk}) مقداری دلخواه تعیین شده و مقدار فشردگی لوله نیز از رابطه‌ی ۱۳ با توجه به قطر لوله و ضخامت آن، به دست می‌آید.

برای محاسبه‌ی مقدار فشردگی (b) از رابطه‌ی مهندسی ۱۲ می‌توان استفاده کرد تا میزان مناسب هم محاسبه شود (حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد فشردگی y قابل

نیروهای اعمال شده در قسمت فشردگی لوله عبارت‌اند از: نیروهای حاصل از فشار سیال درونی، فشار کشسان ناشی از فشردگی لوله و فشار نیروی غلتک. همه‌ی نیروها شعاعی هستند.

طبق نظریه‌ی ورق و پوسته، فشار کشسان ناشی از فشردگی وارد بر پوسته لوله با شعاع R و شعاع متغیر \hat{a} , مساوی است با: [۲۳]

$$F_E = \frac{E(\hat{a} - R)}{h(\lambda - \nu^2)} \quad (4)$$

که در آن $\frac{E}{h(\lambda - \nu^2)}$ ضریب سفتی لوله است که تابعی از مدول یانگ و ضخامت لوله h و ضریب پواسن (ν) آن است. همچنین \hat{a} شعاع محلی لوله و R شعاع لوله در حالت بدون فشردگی است. پس با توجه به تعادل فشارها که در قسمت قبل توضیح داده شده، بین نیروی کششی پوسته لوله و فشار درونی سیال و فشار خارجی غلتک رابطه‌ی تعادل زیر برقرار است:

$$\hat{P} = \frac{E}{h(\lambda - \nu^2)} \times (\hat{a} - R) + F_{Roller} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵، P فشار سیال در لوله و $(\hat{a} - R)$ میزان فشردگی شعاع نسبت به حالت اولیه‌اش است؛ F_{Roller} نیز فشار غلتک است. روابط در نظر گرفته شده برای شعاع محلی (\hat{a}) عبارت است از:

$$\hat{a} = R + b \times \cos\left(\frac{\hat{z} - ct}{\lambda} \times 2\pi\right) \quad (6)$$

که در آن b میزان دامنه‌ی موج فشردگی لوله است، به عبارت دیگر، بیشینه فشردگی لوله از ابتدای شعاع R تا انتها، معادل b است. λ نیز برابر با طول موج کسینوسی فشردگی لوله است.

فشار غلتک (F_{Roller}) به صورت موجی کسینوسی در نظر گرفته شده که به صورت هم‌فاز با موج تغییر شعاع تغییر می‌کند:

$$F_{Roller} = F_0 \times \cos\left(\frac{\hat{z} - ct}{\lambda} \times 2\pi\right) \quad (7)$$

که در آن F_0 میزان دامنه‌ی عددی فشار غلتک است. حال با توجه به المان‌گیری انجام شده در قسمت قبل در ناحیه‌ی فشردگی و در حالتی که دستگاه مختصات روی موج در نظر گرفته شده (مختصات نسبی $z = \hat{z} - ct$), معادلات با توجه به آن بی‌بعد می‌شود و روابط بالا نیز در معادلات ناویر - استوکس جایگذاری می‌شود.

$$y = \frac{(2h - g)}{2h} \times 100 \quad (\text{فشرده‌گی}) \quad (12)$$

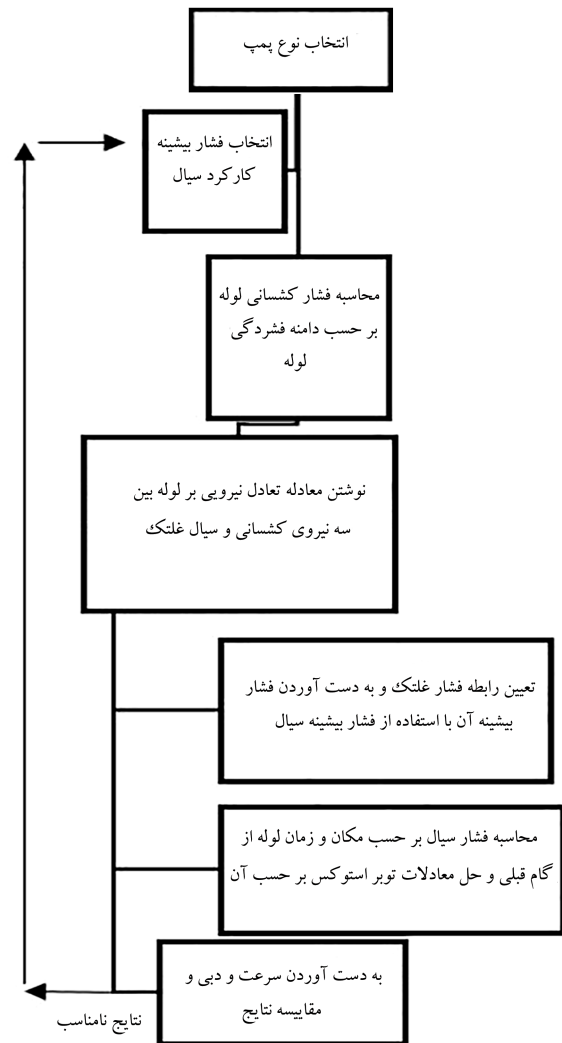
که در آن g قطر خارجی لوله در بیشترین میزان فشردگی و h برابر با ضخامت لوله است. نسبت ضخامت به شعاع ۴۰ درصد در نظر گرفته شده، که با توجه به مقادیر موجود در کاتالوگ‌های پمپ‌های تولید شده در بازار به صورت کلی نسبت متداولی است. حال با توجه به رابطه‌ی ۱۳، میزان انسداد (y) ۱۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. همچنین در مرجع [۲۰] توصیه شده است:

$$b = 2R_{OD} + 0.3h \quad (13)$$

که در آن R_{OD} شعاع خارجی لوله است.

۵. طراحی یک نمونه پمپ پریستالتیکی

روش گام به گام در نظر گرفته شده برای طراحی پمپ در شکل ۷ آمده است:



شکل ۷. فلوچارت نحوه‌ی طراحی پمپ.

در این مطالعه پمپ غلتکی (۴ غلتک) انسداد ثابت برای نمونه طراحی خواهد شد. فشار بیشینه‌ی سیال پمپ ۷ بار در نظر گرفته می‌شود؛ سیال مورد نظر نیز آب است. با مراجعه به کاتالوگ پمپ‌های تجاری پریستالتیکی، مقادیر هندسی و فیزیکی مورد نیاز برای طراحی پمپ انتخاب می‌شود تا در روابط به دست آمده در قسمت‌های قبل جایگذاری شوند. در نتیجه مطابق رابطه‌ی ۱۴ مجموع فشردگی مناسب کل لوله (b') برابر است با:

$$b' = 0.0066m \approx 6mm \quad (14)$$

در واقع میزان فشردگی مناسب در مجموع هر دو طرف لوله، ۶ میلی‌متر است؛ اما میزان دامنه‌ی فشردگی با فرض این که لوله از هر دو طرف فشرده می‌شود، ۳ میلی‌متر است. پس در محاسبات این مقدار گذاشته می‌شود.

$$b = 3mm \quad (15)$$

حال شعاع غلتک باید متناسب با سایز لوله و قطر صفحه‌ی دایروی شکل تعیین شود. شعاع غلتک پمپ‌های تجاری موجود به صورت تخمینی حدود یک سوم شعاع صفحه‌ی است که غلتک‌ها به آن متصل شده‌اند؛ [۲۵] در نتیجه برای شعاع ۷/۵ سانتی‌متری صفحه‌ی پمپ، شعاع ۱/۵ سانتی‌متری برای غلتک مناسب است، تا غلتک‌ها کوچک‌تر هم باشند و طول موج مناسبی داشته باشیم. پس با جایگذاری اعداد در رابطه‌ی ۱۱، ۸ نیز به دست می‌آید.

۱.۵. نیروی فشاری کشسان لوله

در رابطه با میزان ضریب کشسانی (E) باید گفت برای این که بتوان به ازای مقدار مشخصی از فشار غلتک، میزان فشردگی بهینه باشد، ضریب کشسانی باید مقدار کمی باشد. همچنین میزان نیروی کشسانی لوله باید کم باشد تا لوله دچار لهیدگی نشود و با کمترین حد لازم از نیروی غلتک بیشترین فشردگی مورد نیاز در لوله وجود داشته باشد.

یک لوله‌ی نرم^۹ با قابلیت اعطاف و دوام بالا مانند PVC [۲۷،۲۶] یا سیلیکون^{۱۰} می‌تواند انتخاب شود؛ در این مقاله با انتخاب PVC که مدول کشسانی آن در حدود $10^6 \times 6/6$ پاسکال است، همچنین سفتی^{۱۱} لوله حدود ۳/۶ Gpa خواهد بود. [۲۸] لازم به ذکر است، کمترین حد E در نظر گرفته می‌شود تا که نیروی وارده‌ی الاستیک، بر پوسته لوله کمینه شود. پس بیشینه‌ی فشار و تنش نیروی الاستیک لوله با جایگذاری اعداد در رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید.

$$\max\left(\frac{E}{h(1-\nu^2)}\right) = 21.7 \times 10^9 pa \quad (16)$$

۲.۵. تعیین میزان فشار غلتک (F)

با در نظر گرفتن موازنه‌ی نیروهای وارد بر پوسته‌ی لوله (رابطه‌ی ۵) می‌توان فشار غلتک را به دست آورد. با توجه به رابطه‌ی ۱۵ برای تعیین نیروی F باید مقدار دو فشار P و R را بدانیم. مقدار فشار نیروی p البته معادل فشار محفظه است؛ یعنی با احتساب فشار یک بار هوای بیرون لحاظ شده و در اصل فشار سیال داخل لوله ۸ بار در نظر گرفته شده است. با توجه به این که فشار سیال انتخاب شده و فشار کشسانی بیشتر محاسبه شده، بیشینه فشار غلتک (F_0) با جایگذاری در معادله‌ی ۱۵ به راحتی قابل محاسبه است.

یادآور می‌شود فشار غلتک (F_{Roller})، فشاری است که به صورت هم‌فاز با شعاع a تغییر می‌کند؛ یعنی اگر تغییرات شعاع را به صورت کسینوسی با طول موج

λ فرض کرده باشیم، این جا هم همین فرض را برای F_{Roller} باید داشته باشیم. پارامترهای عددی محاسبه شده برای پمپ در جدول ۱ آمده است.

۶. نتایج

۱.۶. سرعت سیال در امتداد لوله (\hat{w})

با توجه به اعداد به دست آمده در جدول ۱، نمودار تغییرات سرعت (معادله ۹) در هر حالت فشردگی قابل حصول است. لازم به ذکر است که در مقطع کمینه چون شعاع داخلی به صفر می‌رسد، سرعت صفر (به صورت لحظه‌ای) به دست می‌آید، ولی با توجه به رابطه ۶، می‌توان برای فازهای متفاوت کسینوس $(\frac{r}{\lambda} \times (\hat{z} - ct))$ ، شعاع محلی لوله (\hat{a}) در هر حالت از فشردگی را به دست آورد و توزیع سرعت را در آن ناحیه‌ها رسم کرد. برای مثال، در شکل ۸ توزیع سرعت برای فاز $\frac{5\pi}{4}$ که شعاع محلی (\hat{a}) برابر $b\sqrt{\frac{r}{\lambda}}$ است، نشان داده شده است:

چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در بازه‌ی شعاعی ناحیه‌ی مزبور، سرعت سیال از صفر تا 0.76 متر بر ثانیه به صورت سهمی تغییر می‌کند، که سرعت نسبتاً زیادی است. اما یادآور می‌شود میزان دبی این سیال که در ادامه محاسبه خواهد شد، بسیار کم است (به دلیل کمی سطح مقطع). نکته‌ی دیگری که قابل مشاهده است، این است که در شعاع قسمت مرز پایین لوله (شعاع برابر $10^{-2} \times 8/7$ متر

جدول ۱. اعداد انتخابی پمپ مورد طراحی.

R_{OD} (قطر خارجی لوله)	5 mm
h (ضخامت لوله)	2 mm
(شعاع کل پوسته پمپ) R	7/5 cm
L (طول خم لوله)	23 cm
C (سرعت غلتک)	0/4 m/s
L (طول لوله)	23 cm
R_{Roller}	1/5 cm
λ	0/49 m
μ (آب در 20° درجه سانتی‌گراد)	$21/14 \times 10^{-3}$ pas
v	0/3
F_{Roller} (فشار غلتک)	$22/4 \times 10^6$ pa
F_E (فشار کشسان لوله)	$21/7 \times 10^6$ pa
P (فشار محفظه سیال)	7 bar

است) سرعت به سمت صفر شدن می‌رود، که همان شرط لایه‌ی مرزی است که در اینجا به خوبی ارضا شده است. اکنون توزیع سرعت در فاز شعاعی $\frac{5\pi}{4}$ که همان وضعیت مشابه قبلی است در شکل ۹ رسم شده است؛ با این تفاوت که این بار شعاع با گذر زمان (t)، از فشردگی کامل (فاز π برای شعاع محلی \hat{a}) به سمت گشایش کامل (فاز $\frac{5\pi}{4}$ برای شعاع محلی \hat{a}) می‌رود. به عبارت کلی جریان پس از عبور غلتک از روی لوله بررسی شده است.

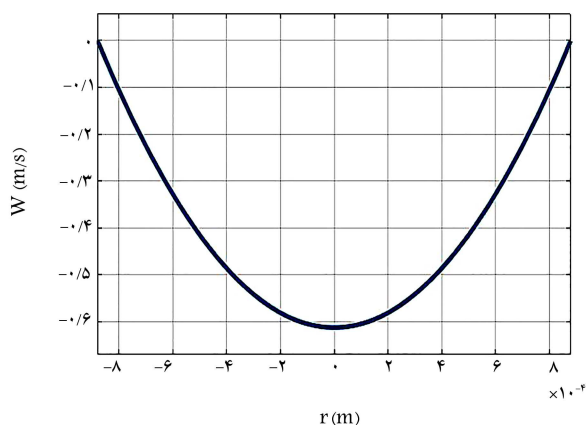
با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که سرعت مقدار منفی به خود می‌گیرد. علت این برگشت جریان در پشت غلتک (پس از فشردگی) در ادامه توضیح داده خواهد شد.

همچنین مشابه نمودار شکل ۸، از $r = 0$ که مرکز لوله در حالت فشردگی مورد نظر است تا مرز آن که سرعت برابر صفر می‌شود، یک جریان برگشتی با سرعت منفی ولی همان مقادیر قبلی سرعت در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود.

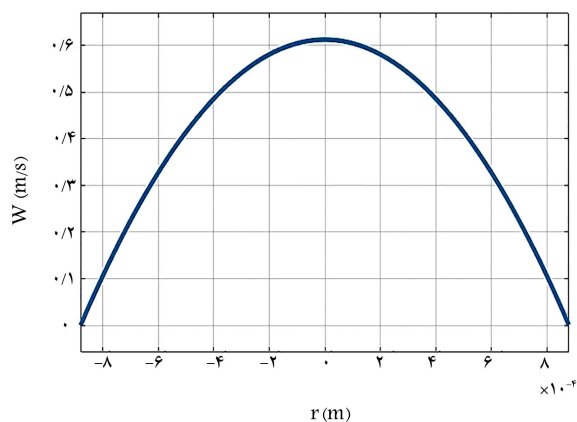
۲.۶. بررسی تغییرات جهت سرعت در طول فشردگی

چنان‌که در نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود، سرعت در بازه شعاعی منفی است؛ یعنی در اثر فشار غلتک به لوله میزانی از سیال به جلو رانده شده، اما سیال در پشت غلتک هم‌زمان با عبور آن از لوله به عقب پاشیده می‌شود و این باعث ایجاد یک دبی منفی در آن ناحیه می‌شود. البته فرض شده که به دلیل بلندی نسبی لوله این میزان سیال به عقب رانده شده در حالتی که لوله از محل فشارغلتک بیرون می‌آید، با شدت دبی رو به جلو در آن جا خنثی شده و سرعت خالص آن صفر می‌شود و با غلتک بعدی بیرون ریخته می‌شود. با توجه به حجم اندک آب برگشتی که حدوداً از یک مقطع با شعاع یک میلی‌متر گذر کرده و با رسیدن به ناحیه بازتر با شعاع پنج میلی‌متری، با سیال پر سرعت رو به جلو مواجه می‌شود، فرض همسو شدن و خنثی شدن حرکت خلاف جهت، فرض معقولی است. در شکل ۱۰ محل برگشت سیال در محل مفروض به صورت شماتیک مشخص شده است.

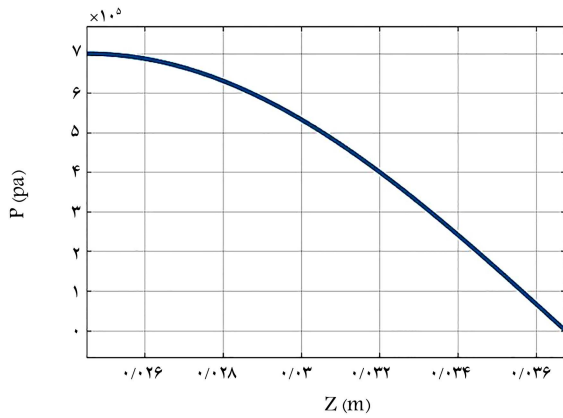
البته فرض بالا تغییری در میزان دبی محاسبه شده ایجاد نمی‌کند؛ زیرا که تابع دبی از انتگرال‌گیری از همین رژیم جریان به دست آمده است. با توجه به این که مقدار کل قطر ۱ سانتی‌متر است و با فشردگی حدود ۶ میلی‌متری یک مقطع بیضوی مانند ایجاد خواهد شد که از دو طرف تا ۳ میلی‌متر فشرده شده است. با توجه به ضخامت میلی‌متری و ابعادی که ذکر شد، مقطع در قسمت فشردگی کامل در یک لحظه برابر صفر می‌شود که در پمپ پر استاتلیت امری معمول است. اما پس از آن هم با توجه به کوچک بودن ابعاد، مقطع همچنان دایره‌ی فرض شده و محاسبات بر



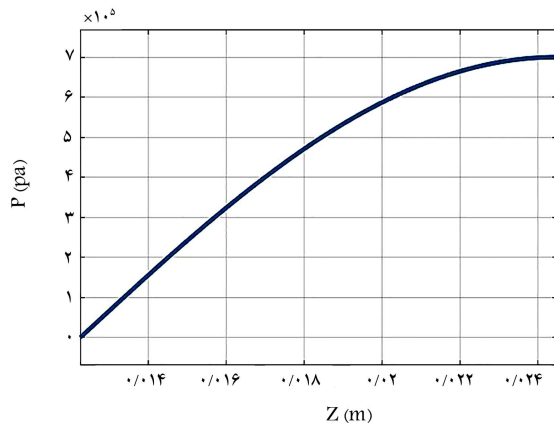
شکل ۹. نمودار توزیع سرعت بر حسب شعاع لوله.



شکل ۸. نمودار توزیع سرعت بر حسب شعاع لوله.



شکل ۱۱. نمودار توزیع فشار در ناحیه اول.



شکل ۱۲. نمودار توزیع فشار در ناحیه دوم.

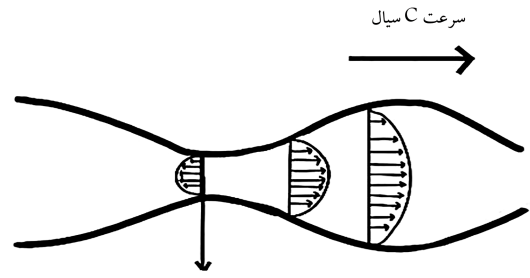
۲.۳.۶. ناحیه دوم

با این فرض که شعاع لوله در طول زمان از R به $R - b$ تغییر می‌کند، ناحیه دوم نیز مانند ناحیه اول است؛ یعنی زاویه‌ی فاز شعاع \hat{a} ، از $\pi/2$ به π می‌رود. پس مشابه قبل برحسب تغییرات z ($z = \hat{z} - ct$)، نمودار تغییر فشار در شکل ۱۲ آمده است.

با توجه به نمودار شکل ۱۲ مطابق انتظار، فشار محفظه از صفر بار به هفت بار می‌رسد. پس با توجه به دو نمودار، فشار به صورت متقارن در دو طرف فشردگی لوله توزیع می‌شود.

۳.۳.۶. ناحیه سوم

در این ناحیه، فشاری از طرف غلتک به لوله وارد نمی‌شود و بنابراین نیروی غلتک برابر صفر است و هیچ‌گونه فشردگی در لوله وجود ندارد ($\hat{a} = R$) پس فشار در طول لوله تقریباً معادل با فشار هوای بیرون از لوله است که حدود یک بار است (فشار محفظه صفر است). برای بررسی دقیق‌تر به دلیل وجود سرعت اندک سیال بین دو غلتک در حالت غیر فشرده و بر اساس معادله‌ی برنولی بین نقطه‌ی فشرده و هوای بیرون می‌توان گفت که به دلیل سرعت کم سیال فشار آن کمی از فشار هوا کم‌تر است و نوعی خلاء نسبی برای مکش سیال به داخل در لوله وجود دارد اما چون سرعت سیال به نسبت هد فشار هوا بسیار کم است، فشار محفظه سیال صفر بار در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۰. جریان برگشتی پشت غلتک (بعد از فشردگی لوله).

این فرض انجام شده که مقطع تا حدودی شکل خود را حفظ می‌کند. اما در نهایت می‌توان یک قطر هیدرولیکی برای این مقطع در نظر گرفت که از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

$$D_h = 4 \frac{A}{P} \quad (17)$$

که در آن A مساحت لوله‌ی بیضی شکل و P محیط آن است که قابل اندازه‌گیری‌اند.

۳.۶. محاسبه‌ی فشار لوله

حال با داشتن اطلاعات عددی رژیم سیال به محاسبه‌ی دبی سیال در ناحیه‌های فشردگی و عدم فشردگی می‌پردازیم. ابتدا ناحیه‌ی بررسی‌ها به سه ناحیه تقسیم می‌شود:

۱. ناحیه‌ی پس از فشردگی بیشینه‌ی لوله: تغییر شعاع لوله از $R - b$ به R ؛
۲. ناحیه‌ی پیش از فشردگی بیشینه‌ی لوله: تغییر شعاع لوله از R به $R - b$ ؛
۳. ناحیه‌ی غیرفشرده.

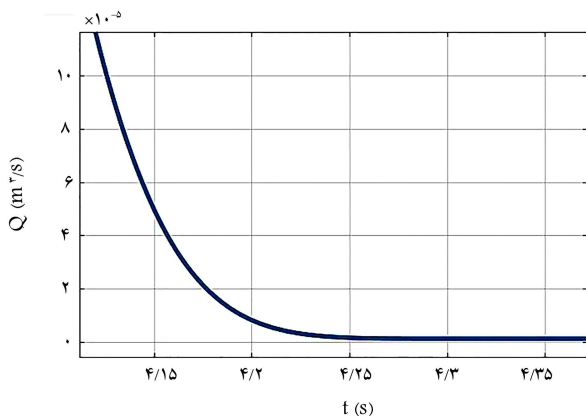
۱.۳.۶. ناحیه اول

این ناحیه فشردگی ناحیه‌ی بی‌بی است که مقطع آن کمینه $(R - b)$ بوده و به سمت مقطع با شعاع R به صورت واگرا پیش می‌رود. پس در رابطه‌ی ۶ فاز کسینوس شعاع که برابر $\frac{\sqrt{\pi}}{\lambda} \times (\hat{z} - ct)$ بوده، از سمت $\frac{\sqrt{\pi}}{\lambda}$ می‌رود:

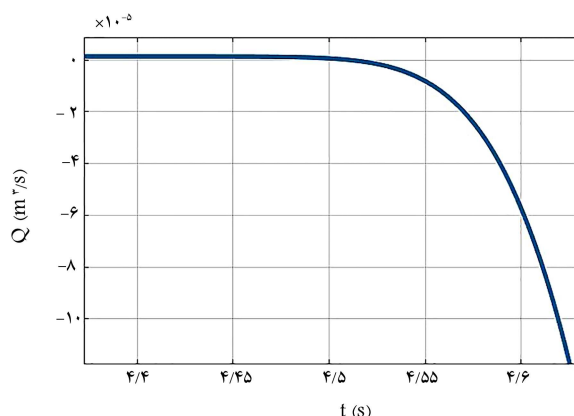
$$\hat{P} = \frac{E}{h(1-\nu^2)} \times \cos((\hat{z} - ct) \times \frac{\sqrt{\pi}}{\lambda}) + F_0 \times \cos((\hat{z} - ct) \times \frac{\sqrt{\pi}}{\lambda}) \quad (18)$$

نمودار شکل ۱۱ برای طول فاز معین بر حسب z ($z = \hat{z} - ct$) رسم شده است: همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در ابتدا که شعاع کمینه است فشار بسیار زیاد است و در بالاترین حد خود قرار دارد؛ با رفتن به سمت شعاع بیشتر و خروج از زیر غلتک در یک زمان ثابت، فشار به سمت صفر میل می‌کند. لازم به ذکر است که این فشار، فشار محفظه $(P - P_0)$ است. همچنین فشار بیشینه‌ی درونی خود سیال به هفت بار رسیده است. این مقدار همان فشار بیشینه‌ی انتخابی برای پمپ بوده است.

تذکر: تمام نمودارها مستقل از زمان و مکان رسم شده و برای هر نقطه‌ی که زمان t و \hat{z} آن در مقداری باشد که زاویه‌ی فاز آن بین $\pi/2$ و $3\pi/2$ باشد، صدق می‌کند.



شکل ۱۴. نمودار دبی بر حسب زمان در ناحیه‌ی دو.



شکل ۱۳. نمودار دبی بر حسب زمان برای ناحیه‌ی اول.

۴.۶. دبی

طبق رابطه‌ی دبی پمپ (رابطه‌ی ۱۰)، مشابه قسمت قبل در ناحیه‌های تحت فشار اول و دو نمودار دبی رسم شده تا میزان دبی عبوری از هر مکان دلخواه لوله بر حسب زمان مشخص شود و همچنین دبی آب پمپ شده توسط یک غلتک هم برای محاسبه دبی پمپ به دست آورده شده است.

۱.۴.۶. ناحیه‌ی اول

در ناحیه‌ی اول، میزان فشردگی در شعاع لوله از $R - b$ تا R متغیر است، به این ترتیب فاز شعاع $\hat{a}(\hat{z} - ct) \times (\frac{\pi}{\lambda})$ ، در رابطه‌ی ۶ از π تا $\pi/2$ تغییر می‌کند؛ یعنی تمامی عبارات فاز شعاع لوله $\hat{a}(\hat{z} - ct) \times (\frac{\pi}{\lambda})$ در رابطه‌ی ۱۰ مربوط به دبی، باید در بازه مذکور تغییر کنند (با تغییر t در بازه زمانی).

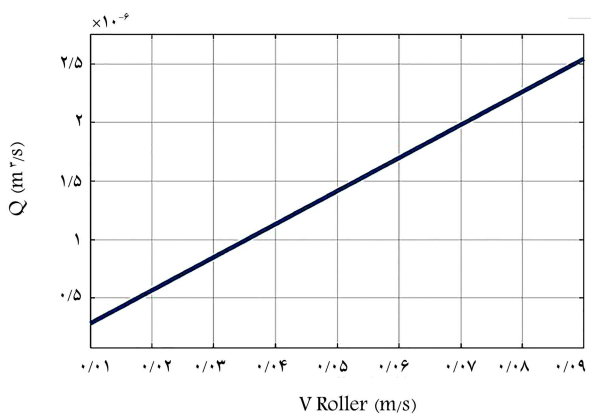
با معین کردن طول خاصی از لوله که در اینجا انتهای لوله انتخاب شده است $(\hat{z} = L = 23 \text{ cm})$ ، میزان تغییر دبی با زمان (t) در بازه تغییر فاز اشاره شده، در نمودار شکل ۱۳ رسم شده است.

چنان‌که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در ابتدا غلتک، لوله را در نهایت فشردگی قرار داده (فاز شعاعی π) و سپس از روی آن عبور کرده و لوله با تغییر زمان به شعاع اولیه خود یعنی R بازمی‌گردد (فاز $\pi/2$). نرخ دبی از ابتدای محل شعاع کمینه که فشار بیشینه است، از مقدار تقریباً صفر شروع شده (زیرا در حالت فشردگی سطح مقطع لوله بسته می‌شود و جریان صفر است) و در نهایت در جهت منفی عقب‌گرد جریان مشاهده می‌شود، که دلیل آن بیشتر توضیح داده شده است.

۲.۴.۶. ناحیه‌ی دوم

در ناحیه‌ی دوم، یعنی جایی که شعاع از $\hat{a} = R - b$ به $\hat{a} = R$ می‌رسد. فاز شعاع از $\pi/2$ به π تغییر می‌کند. باز هم مشابه ناحیه‌ی اول، برای انتهای لوله، دبی با تغییرات زمان در بازه تغییر فاز مذکور در نمودار شکل ۱۴ رسم شده است.

در شکل ۱۴، از ابتدا شعاع در آخر لوله برابر با R بوده و با آمدن غلتک به روی آخر لوله، فشردگی ایجاد خواهد شد. قابل توجه است که ۸ ثانیه قبل از شروع فشردگی طبق فرض، سرعت در لوله حدوداً صفر است؛ اما با شروع فشردگی طبق نمودار شکل ۱۳، دبی از 0.0015 متر مکعب بر ثانیه تولید می‌شود و با فشردگی بیشتر، دبی افت کرده تا با فشردگی کامل، دبی عبوری از مقطع صفر شده و تمامی سیال جاروب و تخلیه شده باشد. پس بیشترین جهش سیال در لحظه‌ی اول فشردگی خواهد بود و دبی در چندصدم ثانیه شروع به افت می‌کند تا به صفر برسد. لازم به ذکر است که مقدار بیشینه‌ی ابتدایی 15×10^{-5} متر



شکل ۱۵. نمودار نحوه‌ی تغییر دبی بر حسب تغییر سرعت غلتک.

مکعب در ثانیه است که دبی قبل رسیدن لوله به زیر فشردگی غلتک، به آن میل می‌کند.

مساحت زیر نمودار در شکل ۱۲، میزان حجم سیال جاروب شده توسط غلتک از آغاز فشردگی تا پایان آن بر انتهای لوله است $(\int_0^T q dt)$. می‌توان حجم آب پمپ شده توسط هر غلتک را چنین به دست آورد:

$$V_{\text{پمپ}} = 7 \times 10^{-6} m^3 = 7/5_{cc} \quad (19)$$

با نگاهی به کاتالوگ‌های موجود در بازارها می‌توان دریافت که برای پمپ‌هایی با سرعت غلتک ۴ سانتی‌متر بر ثانیه (۵ RPM) چنین دبی قابل ایجاد است. [۲۵]

۵.۶. بررسی وابستگی دبی به تغییر سرعت رولر

با توجه به رابطه‌ی دبی (رابطه‌ی ۱۰)، دبی بر حسب سرعت انتقالی غلتک (c)، حرکتی خطی (صرف نظر از نوسانات موج در هر نقطه) دارد. اکنون با تغییر سرعت غلتک (c) در رابطه‌ی دبی می‌توان به‌ازای یک فاز شعاع ثابت در حدود π و با ثابت نگه داشتن بقیه‌ی متغیرها، نمودار تغییرات دبی بر حسب c را در شکل ۱۵ مشاهده کرد.

همانطور که در نمودار شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در حالتی که فاز شعاع موج در π قرار دارد، وضعیت شعاع در حالت کمینه بوده و لوله کاملاً توسط غلتک فشرده شده است. رفتار دبی بر حسب تغییر سرعت غلتک سنجیده شده و تغییرات آن از بازه ۱ سانتی‌متر بر ثانیه تا ۹ سانتی‌متر بر ثانیه که بازه متداول سرعت حرکت

در این پمپ‌ها مطابقت دارد. در نتیجه با توجه به فلوجارت رسم شده در مقاله و روابط ارائه شده، یک پمپ پرستالتیک با فشار کارکردی دلخواه برای خواننده قابل طراحی است.

فهرست علائم

c : سرعت چرخش غلتک (m/s)؛
 b : دامنه‌ی فشردگی (m)؛
 E : مدول کشسانی (N/m²)؛
 F_E : فشار کششی لوله (pa)؛
 F_0 : دامنه‌ی فشار بیشینه‌ی غلتک (pa)؛
 F_{Roller} : فشار غلتک (pa)؛
 h : ضخامت لوله (m)؛
 ρ : چگالی (kg/m³)؛
 P : فشار سیال (pa)؛
 q : دبی پمپ (m³/s)؛
 r : متغیر شعاع (m)؛
 R_{OD} : شعاع لوله پمپ (m)؛
 t : زمان (S)؛
 u : سرعت سیال در عرض لوله (m/s)؛
 w : سرعت سیال در طول لوله (m/s)؛
 z : مختصات طول لوله (m)؛
 ν : ضریب پواسون؛
 μ : لزجت (pas)؛
 λ : طول موج فشردگی لوله (m)؛
 R : شعاع لوله‌ی پمپ (m)؛
 R_{Disk} : شعاع صفحه‌ی دایروی پمپ (m).

غلتک‌ها است، رسم شده است. دبی از $10^{-6} \times 25 \times 10^{-6}$ متر مکعب بر ثانیه تا حدود $10^{-6} \times 5$ متغیر است که عدد بالایی است و معمولاً در پمپ‌هایی در مقیاس بررسی شده در نوشتار، کاربرد چندانی ندارد و در پمپ‌های پرستالتیک صنعتی این میزان دبی تولید می‌شود. اما حرکت و تغییر سرعت خطی همراه با تغییر سرعت غلتک همان ویژگی است که در این پمپ‌ها وجود دارد که سیال از خود اینرسی نداشته و تماماً همراه با غلتک حرکت می‌کند. در این تحلیل این موضوع راستی‌آزمایی شد. در رابطه با بقیه‌ی حالات فشردگی هم طبق رابطه‌ی ۱۰، تنها عرض از مبدأ رابطه‌ی خطی با تغییر فاز فشردگی تغییر می‌کند و اصل رابطه‌ی خطی در همه‌ی حالات برقرار است.

۷. نتیجه‌گیری

در این مطالعه شبیه‌سازی پمپ پرستالتیک انجام شد. ابتدا با استفاده از روابط ناویر - استوکس و پیوستگی، تحلیل مکانیک سیالات بر سیال تحت فشردگی در پمپ انجام شد. با نوشتن معادله‌ی تعادل فشاری روی لوله سعی شد حلقه‌ی اتصال بین روابط فشردگی لوله و فشار سیال داخل آن به خوبی تبیین شود. در نهایت توزیع سرعت سیال به کمک معادلات به دست آورده شد. رابطه‌ی مهندسی برای تعیین میزان فشردگی مجاز لوله (که باعث عدم ایجاد لهیدگی در دیواره‌ی لوله می‌شود) ارائه شده تا میزان فشردگی برای لوله با هر هندسه‌ی تعیین شود. سپس با انتخاب یک لوله‌ی مناسب و بادوام با شعاع داخلی ۳ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر، سرعت چرخش ۴ سانتی‌متر بر ثانیه و فشار بیشینه‌ی انتخابی ۷ بار برای سیال، دبی پمپاژ شده توسط هر غلتک سانتی‌متر مکعب به دست آمد؛ دبی حاصل از پمپ دارای ۴ غلتک چرخان حدود ۰/۱ لیتر بر دقیقه است (برای آب). در پایان با تحلیل روابط و نتایج و نمودارها، نشان داده شد که سرعت سیال در یک نقطه از لوله با سرعت غلتک رابطه‌ی خطی دارد؛ و این با همان فرض واقعی بدون اینرسی بودن سیال

پانویس‌ها

- Hose pump
- Tube pump
- fixed occlusion
- Tang & Rankin
- Takagi & Balmforth
- free-inertia
- continuity
- mass conservation
- lowstrength
- silicon rubber
- stiffness

منابع (References)

- Balmforth, N.J., Coombs D. and Pachman, S. "Microelastohydrodynamics of swimming organisms near solid

boundaries in complex fluids", *Q. J. Mech. Appl. Maths*, **63**, pp 267-294 (2010).

- Fung, Y.C. and Yih, C.S. "Peristaltic transport", *J. Appl. Mech*, **35**(4), pp. 669-675 (Dec 1968).
- Shapiro, A.H., Jaffrin, M.Y. and Weinberg, S.L. "Peristaltic pumping with long wavelengths at low reynolds number", *J. Fluid Mech*, **37**(4), pp. 799-825 (July 1969).
- Lykoudis, Paul, S. and Rudolf. Roos. "The fluid mechanics of the ureter from a lubrication theory point of view", *J. Fluid Mech*, **43**(4), pp. 661-674 (October 1970).
- Brasseur, N., Hasrat, A., Réjean, J. and et al. "Biological activities of Phthalocyanines-V photodynamic therapy of EMT mammary tumors in mice with sulfonated phthalocyanines", *Photochemistry and Photobiology*, **45**(5), pp. 581-586 (May 1987).
- Seri, A.J., Park, S.C., Verguet, S. and et al. "A model of transluminal flow of an anti-HIV microbicide vehi-

- cle: combined elastic squeezing and gravitational sliding”, *Phys. Fluids*, (20), p. 083101 (May 2008).
7. Argentina, M., Skotheim, J. and Mahadevan, L. “Settling and swimming of flexible fluid-lubricated foils”, *Phys. Rev*, **99**, p. 224503 (November 2007).
 8. Takagi, D. and Balmforth, N.J. “Peristaltic pumping of viscous fluid in an elastic tube”, *J. Fluid Mech*, **67**(2), pp. 196-218 (April 2011).
 9. Joseph, B. Keller. and Meira, S. Falkovitz. “Crawling of worms” *Journal of Theoretical Biology*, **104**(3), pp. 417-442 (October 1983).
 10. Balmforth, N. J. “Building a better snail: lubrication and adhesive locomotion”, *Physics of Fluids* **17**, p. 113101 (2005).
 11. Takagi, D. and Balmforth, N.J. “Peristaltic pumping of rigid objects in an elastic tube”, *J. Fluid Mech*, **672**, pp. 219-244 (2011).
 12. Skotheim, J. and Mahadevan, L. “Soft lubrication: the elastohydrodynamics of conforming and non-conforming contacts”, *Phys. Fluids* **17**, p. 092101 (2005).
 13. Li, M. and Bresseur, J.G. “Non-steady peristaltic transport in finite-length tubes”, *J. Fluid Mech*, **248**, pp. 129-151 (1993).
 14. Xin, Li. and Chi On Chui. “Engineering finger-operated peristaltic pumps”, *Microfluidics and Nanofluidics*, **22**(14), pp.1-2 (2018).
 15. Stork, M. and Mayer, D. “Peristaltic pump with magnetoelastic drive”, *IEEE Transactions On Magnetics*, **54**(5) (2018).
 16. von Frey, M. and Gruber, M. “Untersuchungen uber denstoffwechsel isolierter organe Ein respirationsapparat fur isolierte organe”, *Arch f Physiol (Leipz)*, **9**(519) (1885).
 17. ALLEN, E. E., “Instrument for transfusion of blood”, No. 249.288, US Patent, Nov. 8 ,1881.
 18. Passaroni, A.C, Silva, M.A. and Yoshida, W.B, “Cardiopulmonary bypass: development of john gibbon’s heart-lung machine”, *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular*, **30**(2), pp. 235-245, (2015).
 19. Wagner, I., Materne, E.-M., Brincker, S. and et al. “A dynamic multi-organ-chip for long-term cultivation and substance testing proven by 3D human liver and skin tissue co-culture”, *Lab on a Chip*, **13**(18), pp. 3538-47 (2013).
 20. Gibbon, J.H. “Artificial maintenance of circulation during experimental occlusion of pulmonary artery”, *Arch Surg*, **34**, pp.1112-1113 (1105), (1937).
 21. walker latham S.B. “Fluid motion in peristaltic pump”, Thomas California Institute of Thechnology (Jun 1966).
 22. Misra, J. C., *Biomathematics: Modelling and Simulation*, World Scientific, USA, pp. 187 (2006)
 23. Takagi, D. and Balmforth, N. J. “Peristaltic pumping of viscous fluid in an elastic tube”, *Institute of Theoretical Geophysics*, **672**, pp. 196-218 (2011).
 24. Mernone, A. V. and Mazumdar, J.N. “A Mathematical study of peristaltic transport of a casson fluid”, *Mathematical and Computer Modelling*, **35**(7-8), pp. 895-912 (February 2011).
 25. WWW.Made- in -china.com (peristaltic pumps).
 26. www.graylineinc.com- (Peristaltic Pump Tubing Material Selection Whitepaper).
 27. www.maharfanabzar.com/ (پمپ پرستالتیک).
 28. Akinola, Johnson Olarewaju. “Effects of accidental explosions on low stiffness pipes buried in undrained clay”, *EJGE (Civil Engineering Department)*, **17**, pp. 106 (2012).