

مدل سازی تأثیرات متقابل حرکت سازه بر رفتار جریان سیال در عملکرد پمپ دیافراگمی تزریق مرکاپتان

حمید بخشایش* (کارشناس ارشد)

علی سررشته داری (استادیار)

هوشنگ فکری (کارشناس ارشد)

دانشکده ی مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود

مهندسی مکانیک شریف، (پار ۱۳۹۶)
دوری ۲ - ۳، شهری ۱، ص. ۹۱-۸۳

یافتن الگوی صحیح جریان سیال در پمپ های دیافراگمی، توزیع نیروی حاصل از فشار اعمالی از سوی سیال بر دیافراگم و همچنین یافتن شرایط مناسب عملکرد برای طراحی به دور از حالت های ناپایداری چون کاویتاسیون، یکی از اهداف این مطالعه است. هدف این تحقیق یافتن روشی مناسب برای شبیه سازی عملکرد این نوع از پمپ ها در مقابل روش های پیچیده تحلیلی و هزینه بر آزمایشگاهی است. یک نمونه پمپ دیافراگمی متداول در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری مورد بررسی قرار گرفته، بر اساس اطلاعات فنی استخراج شده از این پمپ، مدلی برای شبیه سازی آن با نرم افزار آنسیس سی اف ایکس پیشنهاد شده است. نرخ جریان سیال مرکاپتان با توجه به اطلاعات فنی پمپ در ایستگاه دریافت و نتایج مدل سازی با آن مقایسه شده است. برخی از نتایجی که در این مقاله به آن اشاره شده است عبارتند از میدان های سرعت و فشار برای سیال ورودی و خروجی، نرخ جریان سیال برحسب جابه جایی دیافراگم، حجم سیال ورودی و خروجی برحسب زمان و همچنین نرخ جریان سیال خروجی برحسب فرکانس حرکتی دیافراگم که نتایج موجود در بیشترین حالت دارای خطایی کمتر از ۱۰ درصد می باشند.

واژگان کلیدی: پمپ دیافراگمی، برهمکنش سازه و سیال، نرم افزار ANSYS CFX.

۱. مقدمه

باسکال برای تزریق سیالات با لزجت بالا استفاده می شود.^[۸-۶] چنان که اشاره شد یکی از کاربردهای این گونه پمپ ها صنایع نفت و گاز است. با توجه به بی بودن گاز طبیعی، برای تشخیص آن هنگام انتشار از مواد شیمیایی -- نظیر مواد مرکاپتان^۲ که بسیار سمی است و مقدار دقیقی از آن به منظور بودار کردن گاز شهری نیاز است -- پمپی که وظیفه ی تزریق این سیالات را به درون گاز شهری بر عهده دارد باید از قابلیت تزریق کنترل شده و ثابت در کنار آب بندی کامل قطعات برخوردار باشد. پمپ های دیافراگمی از جمله پمپ های جابه جایی مثبت اند که در مقایسه با دیگر پمپ ها این وظیفه را به خوبی انجام می دهند.

کارایی و بهره وری پمپ های دیافراگمی بستگی به میدان جریان بین دیافراگم، سیال و شیرهای کنترلی ورودی و خروجی و نیز حرکت دیافراگم دارد.^[۳،۲] برخلاف پمپ های گریز از مرکز در این گونه از پمپ ها تغییرات فشار تأثیر زیادی بر دبی جریان ندارد.

به منظور طراحی یک پمپ با راندمان بالا، داشتن دانش کامل نسبت به چگونگی طراحی پارامترهای مختلف پمپ و تأثیر هریک بر میدان جریان از اهمیت بالایی

عمل پمپاژ در یک پمپ دیافراگمی مشابه پمپ پیستونی یک طرفه است. با نفوذ دیافراگم به قسمت بالای حفره پمپ سیال از طریق سوپاپ یک طرفه ی لوله مکش وارد پمپ می شود. با پایین رفتن دیافراگم سیال از طریق سوپاپ یک طرفه ی لوله ی خروجی از سیلندر خارج می شود. با تکرار شدن این چرخه، سوپاپ خروجی در اثر فشار ناحیه ی خروجی و مکش ایجاد شده بر اثر ضربه ی ورودی بسته می شود. از مزایای پمپ های دیافراگمی^۱ در صنایع مختلف می توان به توانایی بالا در پمپاژ سیالات با شرایط شیمیایی خاص -- مانند سیالات خورنده، سمی -- و نیز آب بندی مناسب و دوام بالای قطعات داخلی اشاره کرد.^[۱] پمپ های دیافراگمی پیشرفت شگرفی در صنایع مختلف مانند نفت و گاز، معدن و خودروسازی به همراه داشته اند. این پمپ ها با توجه به فشار مورد نیاز سیستم، خواص و شرایط فیزیکی سیال عامل در انواع مختلف ساخته می شوند.^[۵-۲] با توجه به کاتالوگ شرکت های سازنده، از مقادیر ۲۰ کیلو باسکال برای تزریق سیالات با مقدار و لزجت پایین، تا ۷۰۰۰۰ کیلو

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۳۱، پذیرش ۱۳۹۵/۳/۱۹.

برخوردار است. این مطالعه بر شبیه سازی رایانه ای برهمکنش های جریان سیال و سازه ی داخلی یک پمپ دیافراگمی تزریق مرکپتان تمرکز دارد. زمانی که برهمکنش بین سازه و سیال قابل توجه باشد، تحلیل با برهمکنش بین سازه و جریان سیال قابل انجام است. اگر برهمکنش به صورت دینامیکی باشد، برهمکنش یک طرفه برای نشان دادن وابستگی زمانی سیستم ناکافی است و این روش بسیار زمان بر است. تحلیل های سازه یی معمولاً با استفاده از ابزارهای قدرتمند و کاربردی تحلیل اجزاء محدود^۳ و تحلیل های سیالی با استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی^۴ که نیازمند دانش گسترده ای از مکانیک سیالات اند انجام می گیرد.

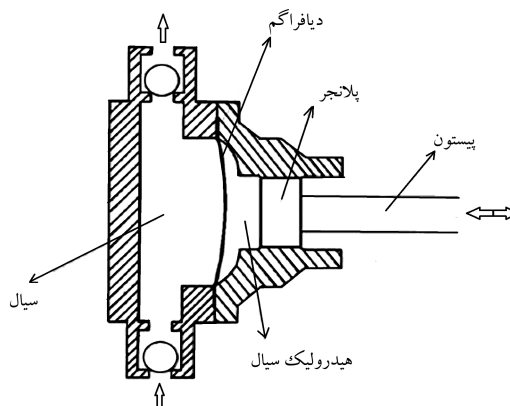
پیشرفت های قابل توجهی که در سال های اخیر در تحلیل جریان سیال به وجود آمده، باعث توسعه ی کدهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی شده که از کارایی راحت و کاربردی برای تحلیل جریان سیال برخوردارند. افزون بر این، تلاش هایی که اخیراً در امر تولید نرم افزارهای طراحی و تحلیلی انجام گرفته منجر به تولید نرم افزارهای هوشمند شده است. این نرم افزارها با ایجاد محیط هایی جذاب برای کاربر باعث تولید طرح ها و شبکه های کاملاً کاربردی و همچنین ایجاد شرایط مرزی مشخص و مناسب شده اند. تحلیل انتگرالی سیالات و سازه ها به طور همزمان قابل انجام است.^[۹-۱۳]

با استفاده از روش لاگرانژی در تحلیل سازه یی، و در مقابل روش اولبری برای سیال، سیستم کاملاً مزدوج را با استفاده از نرم افزاری مانند Ansys CFX در برگیرنده ی تمامی این روش هاست می توان حل کرد.^[۱۴]

در مطالعه ی حاضر سعی بر آن است تا به کمک نرم افزار Ansys CFX برهمکنش یک طرفه ی سازه و سیال شبیه سازی شود. به منظور افزایش دقت و کارایی این شبیه سازی سعی شده با استفاده از یک نمونه پمپ واقعی که در صنعت گاز کاربرد دارد، خروجی های این مطالعه کاربردی تر شود؛ این همراهی شبیه سازی و صنعت خود نیز از نوآوری های این پژوهش محسوب می شود.

۲. تشریح مسئله

در پمپ های دیافراگمی هنگام عمل مکش، حرکت دیافراگم سبب می شود توپی شیر یک طرفه سمت مکش از روی نشیمن خود حرکت کند و سیال به داخل پمپ وارد شود. در همان لحظه توپی شیر یک طرفه سمت رانش بر روی نشیمن خود فشرده می شود و امکان خروج سیال را غیرممکن می سازد. هنگام رانش عکس این عمل اتفاق می افتد. عملیات پمپاژ در پمپ های دیافراگمی به صورت رفت و برگشتی و دورحله یی است در شکل ۱ شماتیکی از این پمپ ها نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک کلی پمپ دیافراگمی.

پمپ های دیافراگمی با توجه به مدل و شرایط پمپاژ از بسیاری جهات با یکدیگر متفاوت اند. پمپ دیافراگمی که در این مطالعه انتخاب شده، از نوع پمپ های سلونوتیدی است که در یکی از ایستگاه های تقلیل فشار شهرستان تربت حیدریه در استان خراسان رضوی از آن استفاده می شود و وظیفه ی آن تزریق ماده ی مرکپتان به درون گاز شهری به منظور بودار کردن گاز به منظور تشخیص آن در زمان نشت است.

با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه ی شبیه سازی عددی برهمکنش سازه و سیال، پیچیدگی و محدود بودن روش های تحلیلی و نیز هزینه بر بودن کارهای آزمایشگاهی از یک سو، و افزایش روزافزون سرعت سیستم های محاسباتی و توسعه ی کدهای تجاری نظیر نرم افزار Ansys CFX از سوی دیگر، نشان می دهد که روش های شبیه سازی عددی بر روش های هزینه بر و پیچیده ی تحلیلی و آزمایشگاهی در زمینه ی برهمکنش سازه و سیال ارجحیت دارند.^[۱۵-۱۸] در این زمینه مدل سازی پمپ دیافراگمی تزریق سیال بودارکننده با نرم افزار مذکور امکان پذیر است؛ به همین منظور در این نوشتار به معرفی مدل سازی انجام شده پمپ دیافراگمی و همچنین نتایج به دست آمده از این مدل سازی خواهیم پرداخت.

۳. مدل ریاضی برهمکنش جریان های سیال و سازه

در این مطالعه سیال هم دما و غیر قابل تراکم فرض شده و دیافراگم به صورت ایزوتروپیک و کشسان با جابه جایی ها و کرنش های کوچک در نظر گرفته شده است.^[۱۹، ۲۰] به دلیل تماس بین سطوح جامد و سیال و همچنین تغییر شکل های کوچک دیافراگم، حل به صورت غیرخطی است. معادلات حاکم حل شده برای سیال و جامد در یک کوپلینگ یک طرفه در ادامه توضیح داده شده است. معادلات مربوط به سیال غیرقابل تراکم و معادلات ناویر - استوکس عبارت است از:^[۲۱، ۲۲]

$$\frac{1}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{معادله ی پیوستگی} \quad (۱)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho (u_j - \frac{\partial d_j}{\partial t}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{معادله ی ممنتوم} \quad (۲)$$

که در آن، β مدول بالک سیال، p فشار، ρ چگالی، u_i جزء سرعت در جهت i ، و d_j نشان دهنده ی جابه جایی در فصل مشترک سازه و سیال و همچنین دیگر مرزهای متحرک است. تانسورهای تنش و کرنش عبارت اند از:^[۲۱، ۲۲]

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (۳)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (۴)$$

δ_{ij} دلتای کرونیکر و μ گرانروی (ویسکوزیته) است. پارامتر گرانز نیز ناچیز فرض شده است. مدل سازی ریاضی جامد با فرمولاسیون لاگرانژی انجام گرفته است:^[۲۱]

$$\frac{\partial \tau_{ij}^s}{\partial x_j} = \rho^s \frac{\partial^2 d_i^s}{\partial t^2} \quad (۵)$$

τ_{ij}^s تانسور تنش کوشی، d_i^s جابه جایی اجزا و ρ^s چگالی ماده است. شرایط کوپل شدن در مرز مشترک سازه و سیال مطابق روابط ۶ تا ۸ است:^[۲۱]

$$d_i = d_i^s \quad (۶)$$

$$\frac{\partial d_i}{\partial t} = \frac{\partial d_i^s}{\partial t} \quad (۷)$$

$$\tau_{ijn} = f_i^s|_s \quad (۸)$$

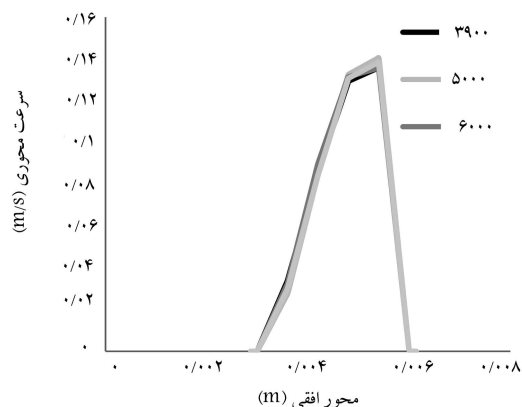
از آنجا که پمپ مورد نظر به صورت دوبعدی شبیه سازی شده است، d در رابطه‌ی ۱۳ عمق فرضی هندسه است. در نهایت با برابر قراردادن حجم نمونه‌ی مدل سازی شده با حجم واقعی جابه جایی دیافراگم، عمق فرضی هندسه به دست می آید:

$$d = \frac{0.141 \times 10^{-6}}{S} = 0.6 \text{ mm} \quad (13)$$

در این مدل سازی جابه جایی دیافراگم و فرکانس حرکتی آن همانند مدل سه بعدی است. فرکانس حرکتی پمپ های دیافراگمی با توجه به مقدار سیال مورد نیاز برای تزریق قابل تنظیم است و این یکی از مزیت های چنین پمپ هایی است. فرکانس حرکتی دیافراگم در این پمپ با توجه به آنچه در کاتالوگ آزمایش های مبتنی بر آن انجام گرفته، ۹۰ هرتز است.^[۲۳] اگر بخواهیم از این فرکانس زمان هر رفت و برگشت دیافراگم را استخراج کنیم، ۱/۵ ثانیه برای کل چرخه می شود.

سیال و سازه توسط نرم افزار Ansys CFX مدل سازی شده است. شرایط مرزی سیال برای ورودی و خروجی، فشار در نظر گرفته شده است.^[۲۰] شرط مرزی فشار ورودی با توجه به فشار کاری مخزن متصل به پمپ که در کاتالوگ آورده شده است و فشار کاری که توسط اپراتور اعمال می شود ۲۰۷ کیلو پاسکال، و فشار خروجی نیز با توجه به بیشینه فشار که در کاتالوگ ذکر شده و همچنین فشار خط گازی که مرکپتان به آن تزریق می شود ۱۹۳۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. دیواره های پمپ دارای شرط عدم لغزش بوده و دیافراگم به صورت مش متحرک است.

از جمله پارامترهایی که دقت نتایج را افزایش می دهد نوع شبکه ی محاسباتی و خصوصیات مربوط به آن است. تعداد المان ۳۹۵۰ و تعداد گره ۸۴۸۸ در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن استقلال از شبکه ی مدل نرم افزاری، حل برای چندین شبکه انجام گرفته است. با توجه به همگرایی و اختلاف کم آن ها مناسب ترین انتخاب و حل بر اساس تعداد المان آن شبکه انجام گرفته است. با توجه به همگرایی و اختلاف کم آن ها مناسب ترین حل در زمان ۱/۵ ثانیه و بیشینه جابه جایی ۴ میلی متر برای دیافراگم انجام شده اما برای زمان ها و جابه جایی های مختلف دیافراگم قابل تعمیم است. این همگرایی در شکل ۲ برای ۳ شبکه با تعداد المان ۶۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۳۹۵۰ به مقایسه گذاشته شده و چنان که دیده می شود اختلاف سرعت در مقطع خروجی پمپ در این سه نمودار در بیشترین حالت کم تر از ۴ درصد است. بنابراین تعداد ۳۹۵۰ المان به دلیل دقت مناسب انتخاب شده است. جریان سیال به صورت گذرا، همدم و غیر قابل تراکم فرض شده که با توجه به خصوصیات مکانیکی سیال و اعتبارسنجی انجام شده در ادامه، فرض مناسبی است. سیال عامل که در کاتالوگ



شکل ۲. پروفیل سرعت روی خط مشخص شده برای زمان ۰/۷۵ ثانیه و بیشینه جابه جایی دیافراگم ۴ میلی متر.

که در آن، f بردار کششی اعمالی روی سطح سازه، و m بردار یکه ی نرمال بر فصل مشترک است.

در این مسئله پارامترها و تعداد چرخه های بسیاری برای پمپ در شرایط عملیاتی باید تکرار شود تا به یک محدوده ی چرخه ی پایدار برای حل دست یابیم. با توجه به وجود شیرهای ورودی و خروجی که باعث شدند چرخه ی کاری پمپ دومرحله یی شود، می توان حل را نیز در دو مرحله انجام داد: مرحله ی اول ورود سیال و مرحله ی دوم خروج سیال از پمپ است. از خروجی های مرحله ی اول به عنوان شرایط اولیه ی مرحله ی دوم استفاده شده است.

۴. مدل نرم افزاری

شبیه سازی جریان برای پمپ دیافراگمی تزریق مرکپتان باعث افزایش زمان کاری رایانه می شود. به همین منظور برای کاهش زمان محاسبات، مدل سازی به صورت دوبعدی انجام شده است. با توجه به شکل واقعی جریان ورودی و خروجی، دیافراگم و شیرها، باید به شرایط مرزی توجهی ویژه داشت. به منظور داشتن میدان های سرعت و فشار برای حالت دوبعدی که به شرایط سه بعدی نزدیک باشند باید برخی پارامترها را مقیاس بندی کرد. به منظور ارائه ی میدان فشار صحیح، باید به مقدار مشابه نیروی خارجی بر واحد سطح اجزاء محرک مدل دوبعدی اعمال شود. نیروی محرک در این پمپ از جابه جایی اجباری دیافراگم حاصل می شود. برای ساده سازی و کاهش محاسبات، شیرهای ورودی و خروجی در مدل سازی وارد نشده اند اما اثر آن ها به صورت شرایط مرزی ورودی و خروجی پمپ وارد شده است.^[۱۹] برای محاسبه ی نرخ جریان عبوری از ورودی و خروجی، فرض واحد بودن ضخامت برای ناحیه ی شامل سیال را نمی توان استفاده کرد. به عنوان جایگزین این مقدار واحد، یک ضخامت معادل می توان یافت که تأثیرات پمپ سه بعدی را ارائه داده و در مدل سازی به عنوان ضخامت کلی مدل در نظر گرفته شود. برای یافتن ضخامت مدل دوبعدی از مقدار حجم جابه جا شده توسط دیافراگم که در کاتالوگ مقدار آن ۰/۱۴۱ میلی لیتر اعلام شده استفاده شده است.^[۲۳] روابط ۹ تا ۱۳ نشان می دهند که انتخاب مقدار ۰/۶ میلی متر برای ضخامت این مدل مناسب است؛ در ادامه جزئیات این عملیات نیز ارائه شده است.

دیافراگم در حالت بیشینه جابه جایی خود با رابطه ی ۹ را می دهد. این رابطه با استفاده از اندازه گیری های عملی و مطالعات میدانی از پمپ در حال کار در محل ایستگاه تقلیل فشار استخراج شده است:

$$x = 0.005 \left(1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2 \right) \quad (9)$$

در نتیجه سطح جاروب شده توسط حرکت دیافراگم برابر خواهد بود با:

$$S = \int_{y=-r}^r 0.005 \left(1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2 \right) dy \quad (10)$$

با داشتن شعاع دیافراگم که برابر با ۳/۵ سانتی متر است، مساحت جاروب شده برابر خواهد بود با:

$$S = 2.334 \times 10^{-2} \text{ m} \quad (11)$$

در نتیجه حجم سیال جابه جا شده بر اثر حرکت دیافراگم در نمونه ی مدل سازی شده برابر خواهد بود با:

$$V = S \times d \quad (12)$$

درج شده و آزمایش‌ها براساس آن انجام گرفته مرکاپتان است. در این مطالعه نیز آب به عنوان سیال در نظر گرفته شده است. پارامترهای مکانیکی دیافراگم در جدول ۱ گردآوری شده است. یادآور می‌شود دیواره‌ها با همان بدنه‌ی پمپ به صورت صلب در نظر گرفته شده و تنها دیافراگم کشسان است.

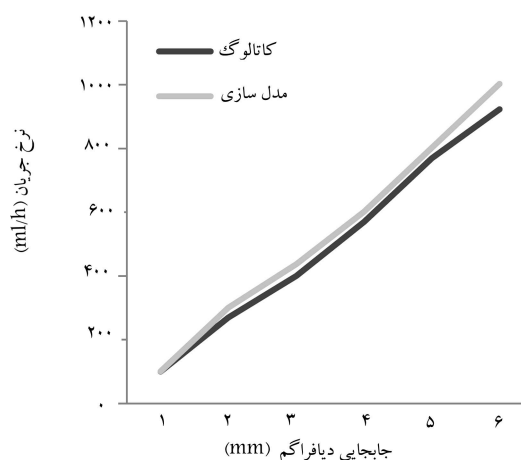
۵. نتایج محاسبات

به منظور اعتبارسنجی مدل سازی و همچنین صحت نتایج خروجی از نمودار نرخ جریان در واحد زمان برحسب جابه‌جایی دیافراگم با توجه به کاتالوگ استفاده شده است. در شکل ۳ مقایسه‌ی مدل و کاتالوگ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود اختلاف بسیار ناچیز دو نمودار ناشی از برخی ساده‌سازی‌های مانند فرض دوبعدی بودن مدل سازی است. خطای این دو نمودار در بیشترین حالت ۷ درصد است.

ابتدا فرض بر آن بوده که سیال در داخل پمپ قرار دارد و شیرهای ورودی و خروجی هر دو بسته باشند. در این صورت حل در دو مرحله انجام می‌گیرد. از زمان صفر تا ۰/۷۵ ثانیه دیافراگم به سمت جلو حرکت می‌کند که براساس آنچه در نمونه‌ی واقعی دیده شده برای جابه‌جایی‌های ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۵ میلی‌متر اعمال شده است. با ایجاد شرط مرزی بسته برای ورودی و شرط مرزی فشار ثابت ۱۹۳۰ کیلو پاسکال برای خروجی سیال از پمپ خارج می‌شود. با بازگشت به سمت عقب شیر خروجی بسته شده و شیر ورودی با شرط مرزی فشار ۲۰۷ کیلو پاسکال باز می‌گردد و سیال به داخل محفظه پمپ می‌شود. شرایط مرزی اولیه در این مرحله براساس مرحله‌ی قبل است و سیال از مرحله‌ی قبل دارای میدان‌های سرعت است؛ این مرحله تا ۰/۱۵ ثانیه و بازگشت کامل دیافراگم به محل اولیه خود ادامه می‌یابد. هرکدام از مراحل رفت و برگشت دیافراگم ۰/۷۵ ثانیه طول می‌کشد. البته این برنامه‌ریزی

جدول ۱. خواص فیزیکی سیال و دیافراگم.

آب		دیافراگم (sst ۳۱۵)	
چگالی (Kg/m ³)	۱۰۰۰	چگالی (Kg/m ³)	۷۸۵۰
لزجت (Kg/(m.s))	۰/۰۰۰۸۸۹	مدول الاستیسیته (Gpa)	۲۰۰
فشار بخار (Kpa)	۲۰۴	ضریب پواسون	۰/۳
دما (C)	۲۰		

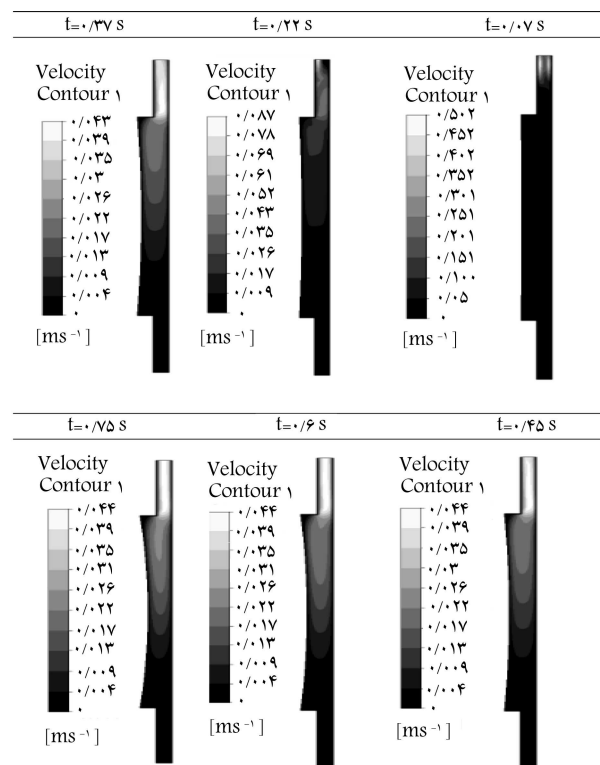
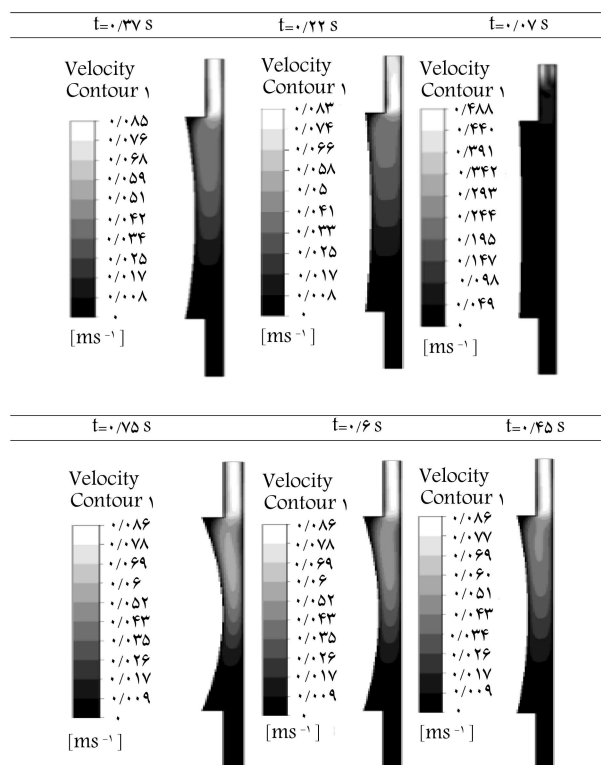


شکل ۳. مقایسه‌ی مدل سازی و نمونه آزمایشگاهی.

پمپاژ براساس نیاز خط و شرایط است و قابل افزایش یا کاهش توسط مرکز کنترل است. شکل‌های ۴ تا ۸ میدان‌های سرعت برای جابه‌جایی‌های مختلف دیافراگم در پمپ دیافراگمی، چگونگی ورود و خروج سیال به داخل پمپ و همچنین حرکت دیافراگم را نشان می‌دهد.

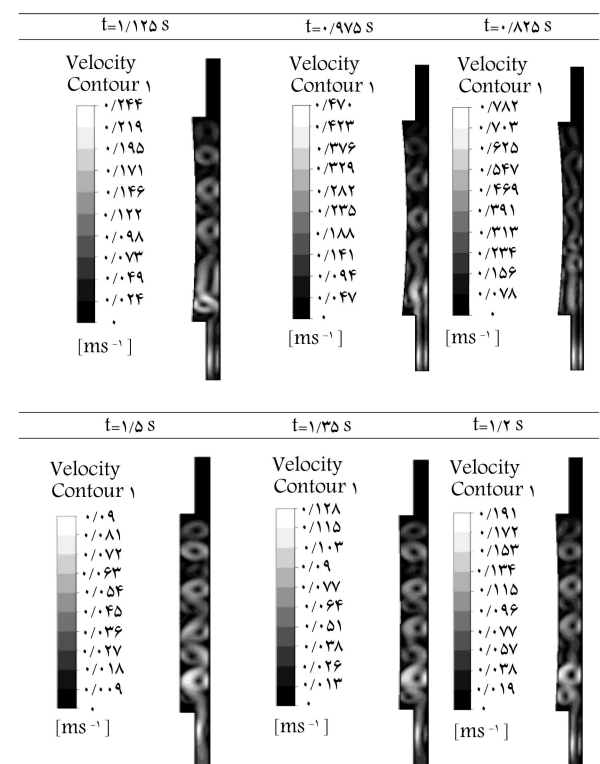
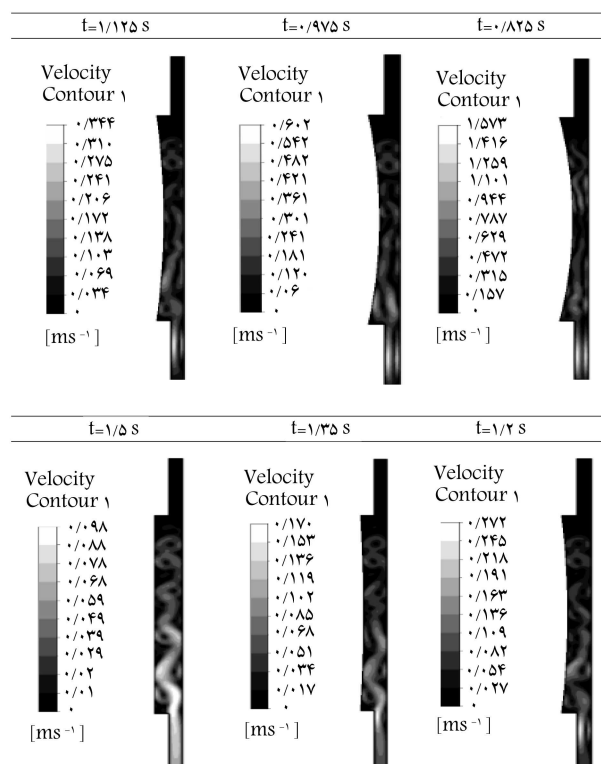
بیشینه سرعت در بیشترین جابه‌جایی دیافراگم ایجاد می‌شود. بنابراین میزان بیشینه سرعت را باید در شکل‌های ۸ و ۹ و همچنین در زمان ۰/۷۵ ثانیه برای خروج سیال و ۰/۸۲۵ ثانیه برای ورود سیال و جابه‌جایی بیشینه ۵ میلی‌متر برای دیافراگم یافت. با توجه به چگالی، لزجت سیال و همچنین مقطع عبور سیال و سرعت آن، مقدار عدد رینولدز برای خروجی که جریان در آن کاملاً آرام است معادل ۶۷۵، و برای ورودی مقداری در حدود ۲۲۱۰ است. البته ذکر این نکته اهمیت دارد که این میزان جابه‌جایی برای این مدل از پمپ کم‌تر انجام می‌شود و تنها به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد محاسبه قرار گرفته است؛ در مدل واقعی بیشینه جابه‌جایی از مقدار ۵ میلی‌متر به مراتب کوچک‌تر بوده و مقادیر ۰/۱۵ و ۰/۳ میلی‌متر است (شکل‌های ۴ تا ۹) و در نتیجه بیشینه سرعت نیز از این مقدار کوچک‌تر است. چنان که مشاهده می‌شود در مدتی که سیال از پمپ خارج یا به آن وارد می‌شود، سرعت سیال تدریجاً کاهش می‌یابد. جریان سیال در هنگام ورود به پمپ نسبت به خروج آن از پمپ نامنظم‌تر و مغشوش‌تر است و این نیز تا حدودی ناشی از تغییر حجم ناگهانی و برخورد سیال ورودی با سیال داخل پمپ است. در مجرای خروجی سیال دیواره‌ی دیافراگم به آن متصل است باعث افت سرعت و در نتیجه اتلاف انرژی سیال می‌شود. پیش‌تر بیان شد که گام‌های زمانی مشابه انتخاب شده است. در شکل‌های ۴، ۶ و ۸ گام اول تنها خروج سیال است اما در گام‌های بعد سیال تا نقاط پایین‌تری در پمپ انتقال یافته است، تا جایی که در زمان ۰/۷۵ ثانیه تقریباً جریان سیال چیزی در حدود ۷۰ درصد پمپ را در بر گرفته است. این روند برای ورود سیال در شکل‌های ۵، ۷ و ۹ تا حدود ۸۰ درصد هم می‌رسد. با دقت در شکل‌های ۴، ۶ و ۸ نقاطی در خروجی دیده می‌شوند که به دلیل شکل پله‌ی پمپ باعث کاهش شدید سرعت شده و احتمال ایجاد جریان ثانویه را به وجود می‌آورند. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ میدان‌های فشار برای بیشینه جابه‌جایی‌های ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۵ میلی‌متر برای دیافراگم نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود تغییرات فشار در خروجی و ورودی نسبت به شرط مرزی که برای ورودی و خروجی در نظر گرفته شده تقریباً یکنواخت است. دیده می‌شود هنگامی که سیال به خارج از پمپ انتقال می‌یابد شیر خروجی باز اما شیر ورودی بسته است؛ در نتیجه سیال قبل از دیافراگم که در قسمت ورودی قرار گرفته دارای فشار بیشتری است. به منظور بررسی پدیده‌ی حفره‌بندی با توجه به خصوصیات مکانیکی سیال فشار بخار سیال مرکاپتان برابر ۲۰۴ کیلو پاسکال است که در مقایسه با مقدار فشارها در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ مشاهده می‌شود که کم‌ترین فشار برابر ۲۰۵ کیلو پاسکال است. بنابراین فشار بخار سیال بزرگ‌تر است و در نتیجه پدیده حفره‌بندی در این پمپ ایجاد نمی‌شود. به دلیل اختلاف اندک بین کم‌ترین فشار پمپ و فشار بخار سیال بهتر است نواحی تیره‌تر که شامل فشارهای کوچک‌ترند بیشتر مورد توجه قرار بگیرند زیرا این نواحی برای ایجاد حباب به مراتب مستعدترند.

انباشتگی حجم سیال ورودی و خروجی در شکل ۱۶ آورده شده است. در این نمودار حجم سیال ورودی و خروجی در طول زمان برای یک مرحله رفت و برگشت دیافراگم گزارش شده است؛ محور افقی زمان و محور عمودی حجم سیال برحسب میلی‌لیتر است. از ثانیه‌ی صفر تا ۰/۷۵ به دلیل بسته بودن شیر ورودی حجم صفر است ولی پس از این زمان سیال تدریجاً وارد می‌شود. در مورد نمودار حجم سیال خروجی می‌توان دریافت که این حجم تا زمان ۰/۷۵ ثانیه به دلیل باز بودن شیر



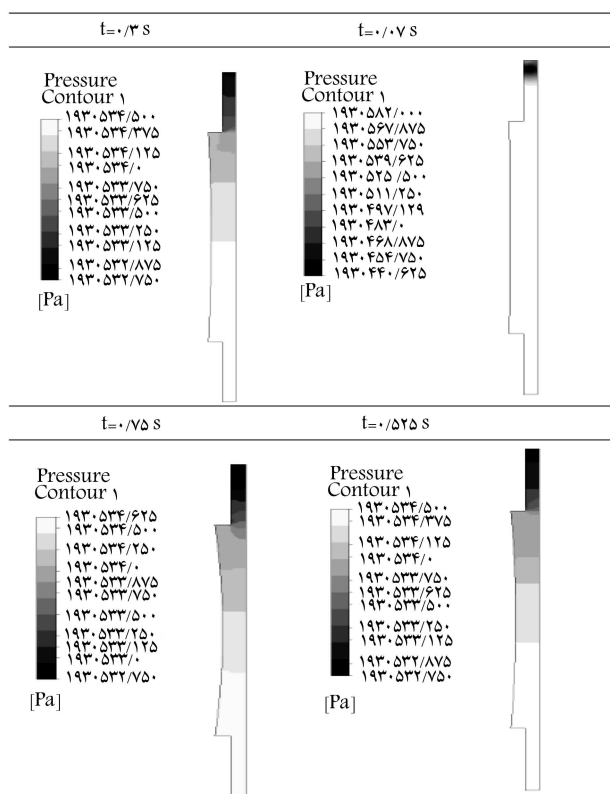
شکل ۳. میدان‌های سرعت خروج سیال در بیشینه جابه‌جایی ۳ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.

شکل ۴. میدان‌های سرعت خروج سیال در بیشینه جابه‌جایی ۱/۵ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.

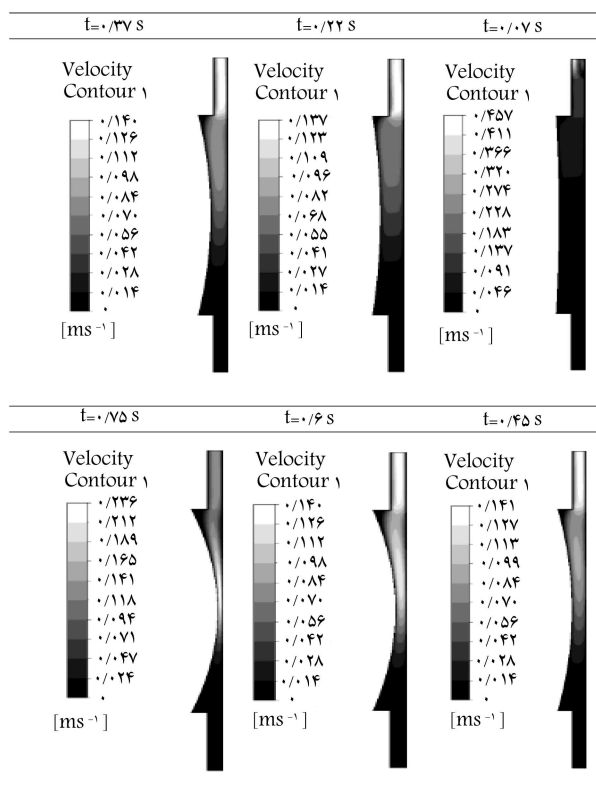


شکل ۵. میدان‌های سرعت ورود سیال در بیشینه جابه‌جایی ۳ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.

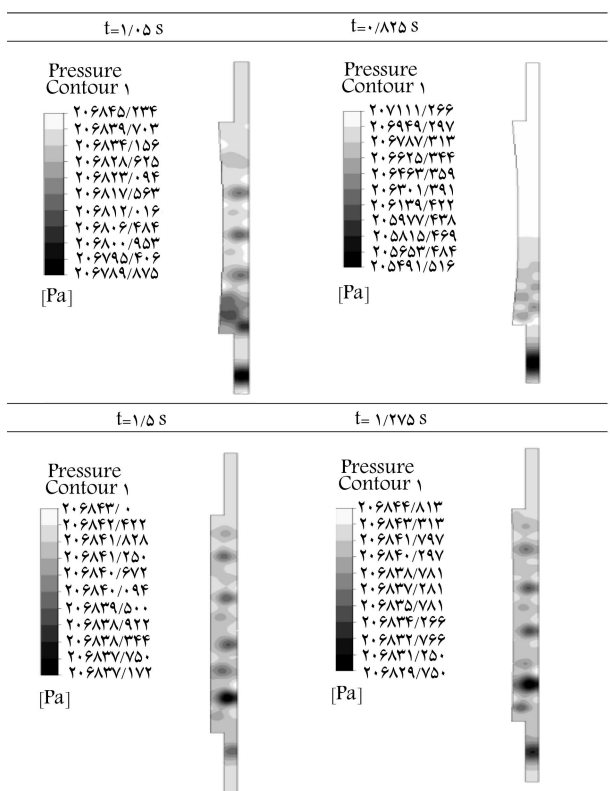
شکل ۶. میدان‌های سرعت ورود سیال در بیشینه جابه‌جایی ۱/۵ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



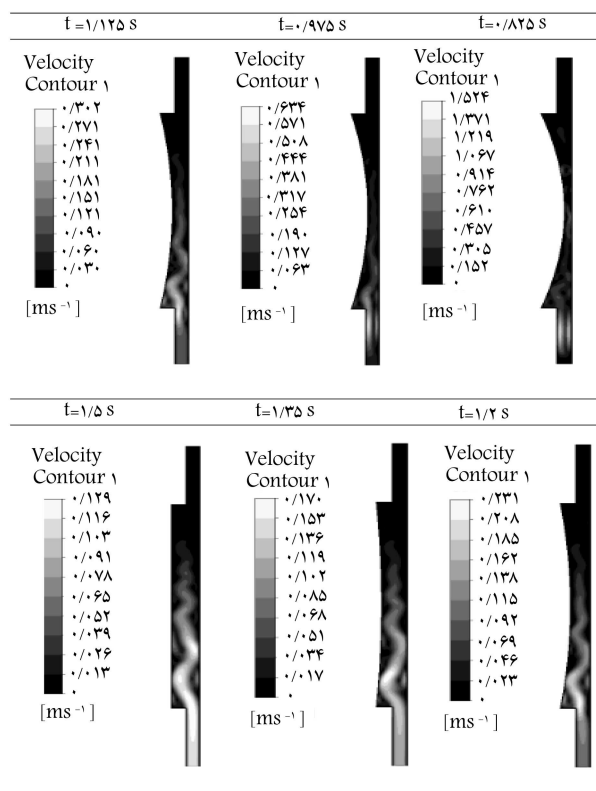
شکل ۷. میدان‌های فشار خروج سیال در بیشینه جابه‌جایی ۱٫۵ میلی متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



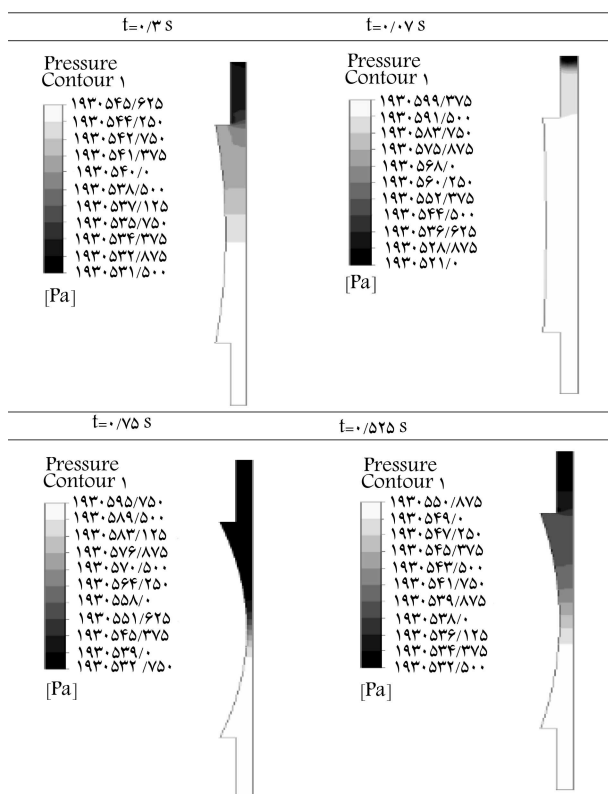
شکل ۸. میدان‌های سرعت خروج سیال در بیشینه جابه‌جایی ۵ میلی متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



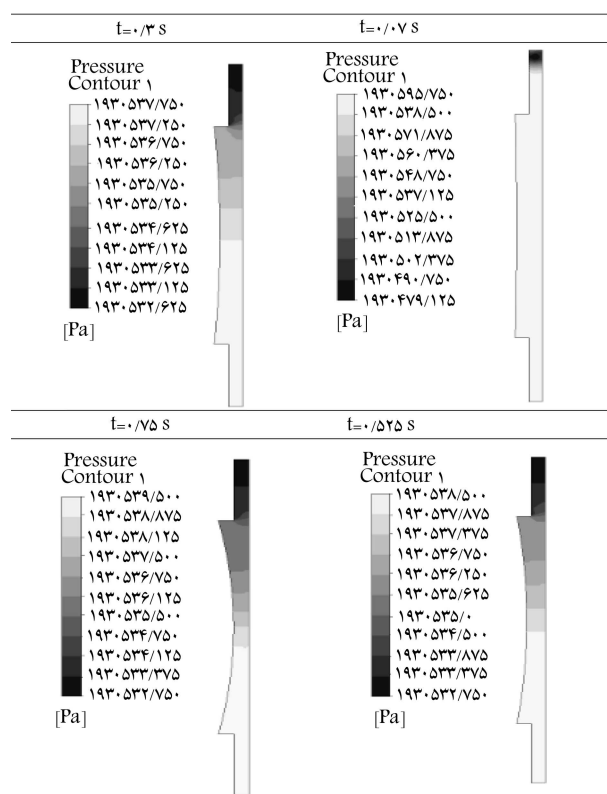
شکل ۹. میدان‌های سرعت ورود سیال در بیشینه جابه‌جایی ۱٫۵ میلی متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



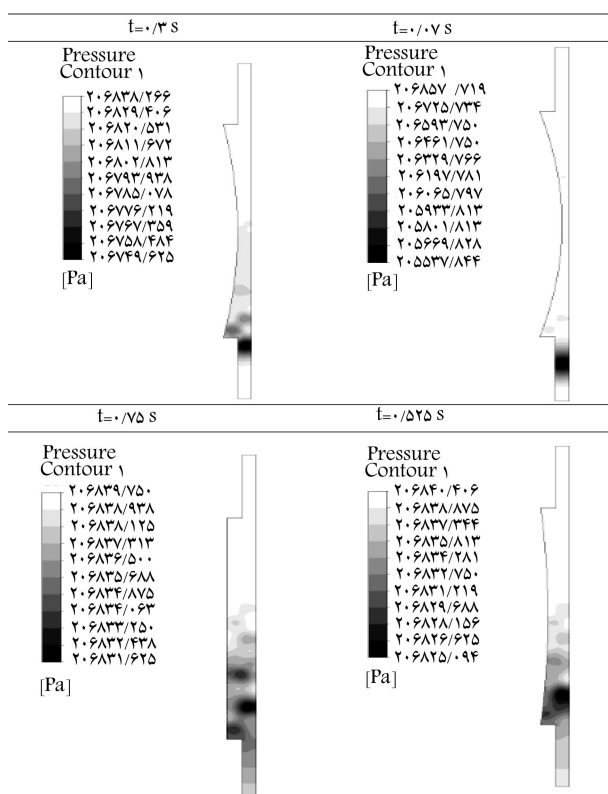
شکل ۱۰. میدان‌های سرعت ورود سیال در بیشینه جابه‌جایی ۵ میلی متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



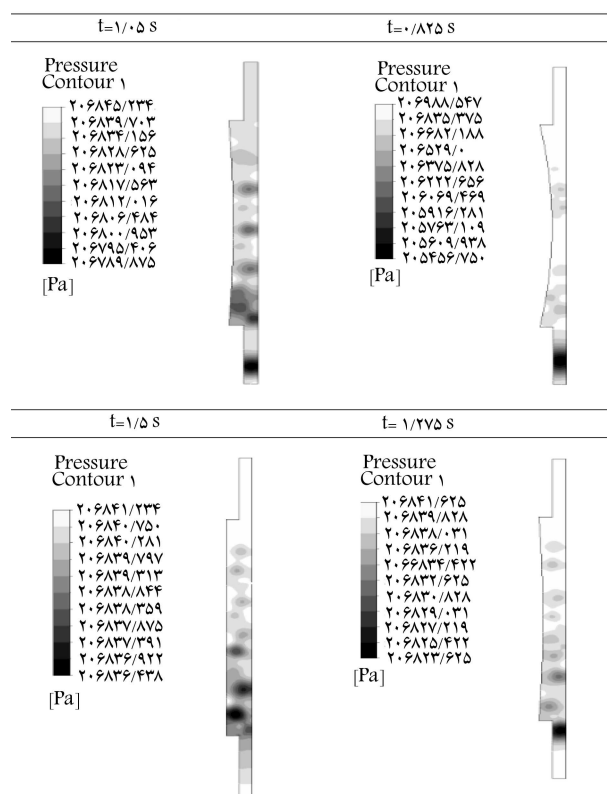
شکل ۱۴. میدان‌های فشار خروج سیال در بیشینه جابه‌جایی ۵ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



شکل ۱۲. میدان‌های فشار خروج سیال در بیشینه جابه‌جایی ۳ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



شکل ۱۵. میدان‌های سرعت ورود سیال در بیشینه جابه‌جایی ۵ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.



شکل ۱۳. میدان‌های سرعت ورود سیال در بیشینه جابه‌جایی ۳ میلی‌متر دیافراگم در زمان‌های مختلف.

بر دقیقه نسبت به دور موتور نشان داده شده است که مشابه مطالعات پیشین^[۲۰] دارای سیر صعودی و خطی است. با توجه به جنس دیافراگم و ابعاد پمپ و قدرت موتور، نرخ جریان و میزان جابه‌جایی دیافراگم قابل افزایش و کاهش است.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج مهم این مطالعه را می‌توان خلاصه‌وار چنین ذکر کرد:

۱. با استفاده از مقیاس‌های مناسب برای پارامترها، یک پمپ دیافراگمی سه‌بعدی با برهم‌کنش‌های سازه و سیالی را می‌توان با یک مدل دوبعدی به‌طور تخمینی معادل گرفت. این کار به‌شکل قابل توجهی هزینه‌های محاسبات را کاهش می‌دهد و با توجه به مقایسه‌ی انجام‌شده بین نتایج مدل‌سازی و نمونه‌ی عملی می‌توان دریافت که نتایج مدل‌سازی مورد قبول است.
۲. فشار بخار سیال مرکاپتان برابر ۲۰۴ کیلو پاسکال است که در مقایسه با مقدار فشارها در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵، کم‌ترین فشار برابر ۲۰۵ کیلو پاسکال است. بنابراین فشار بخار سیال بزرگ‌تر است و در نتیجه پدیده‌ی حفره‌بندی در این پمپ ایجاد نمی‌شود. اما محل‌هایی که حساسیت بیشتری در این پدیده دارند در شکل‌ها مشاهده می‌شود که باید در جهت تقویت این نواحی گام برداشت.
۳. جریان‌های چرخشی و گردابه‌ها که معمولاً وظیفه‌ی اتلاف انرژی را بر عهده دارند در برخی از مناطق جریان داخل پمپ دیده می‌شوند. صیقلی بودن گوشه‌های نوک تیز در نزدیک محل‌های عبور جریان به حل این معضل کمک می‌کنند.
۴. در پمپ‌های تزریق برخلاف پمپ‌های گریز از مرکز، تغییرات فشار تأثیر زیادی بر دبی ندارد و یکی از پارامترهایی که دبی این پمپ‌ها با آن رابطه‌ی مستقیم دارد «میزان جابه‌جایی دیافراگم» است. به همین منظور میدان‌های سرعت خروجی برای جابه‌جایی‌های مختلف دیافراگم بررسی شد و نتیجه‌ی حاصل شد با افزایش بیشینه جابه‌جایی و همچنین افزایش فرکانس حرکتی دیافراگم مقدار نرخ جریان سیال خروجی افزایش یافت.

تقدیر و تشکر

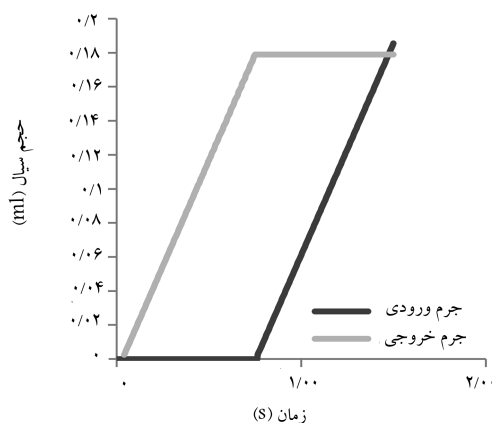
از شرکت ملی گاز استان خراسان رضوی برای حمایت مالی و علمی این تحقیق، و همچنین جناب مهندس هوشنگ فکری ریاست محترم ایمنی که مشاور صنعتی این پروژه بوده‌اند تشکر می‌شود.

پانویس‌ها

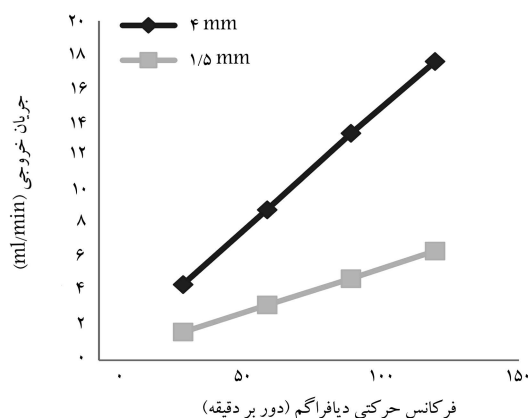
1. diaphragm pump
2. Merccaptan
3. finite element analysis
4. computational fluid dynamics

منابع (References)

1. Karassik, I.J., Heald, C., Cooper, P. and Messina, J.P., *Pump Handbook*, 4th edition, McGraw Hill (2007).



شکل ۱۶. انباشتگی حجم سیال بر حسب زمان.



شکل ۱۷. میزان نرخ جریان بر حسب دور موتور برای بیشینه جابه‌جایی ۴ و ۱/۵ میلی متری دیافراگم.

خروجی ادامه دارد اما پس از این زمان تا ۷۵ ثانیه مقدار آن ثابت است. از مزایای پمپ‌های دیافراگمی علاوه بر آنچه قبلاً توضیح داده شد، توانایی تزریق سیالات با دبی‌های مختلف تنها به‌واسطه‌ی تغییر فرکانس حرکتی دیافراگم و آن هم به‌واسطه‌ی تنظیم دور موتور است. هرچه دور موتور افزایش یابد طبیعتاً سرعت رفت و برگشت پیستون و در نتیجه جابه‌جایی دیافراگم افزایش یافته و نرخ جریان عبوری نسبت به زمان افزایش می‌یابد. در شکل ۱۷ نرخ جریان خروجی بر حسب میلی‌لیتر

2. US Army, *Technical Manual, TM 5-4320-275-13 and P, Pump, Recipro Power-Driven; Diaphragm, Gasoline Engine Driven, Wheel MTD*, U.S. Dept of Defense, U.S. Air Force, 221 p. (19 June 2010).
3. Prominent group, "Motor-driven and process metering pumps for all capacity ranges," catalogue edition, Prominent (2017).
4. Hicks, T.G. and Edwards, T.W., *Pump Application Engineering*, 1th edition, McGraw-Hill (1971).
5. Manring, N.D., *Fluid Power Pumps and Motors: Analysis, Design and Control*, 1th edition, McGraw-Hill (22 July 2013).

6. Csanady, G.T., *Turbomachinery: Design and Theory*, CRC Press. 424 p. (12 August 2003).
7. Hendricks, R.C., Tam, L.T. and Muszynska, A., *Turbomachine Sealing and Secondary Flows, Part 2: Review of Rotordynamics Issues in Inherently Unsteady Flow Systems With Small Clearances*, BiblioGov, NASA Technical Reports Server (NTRS), 84 p. (31 July 31 2013).
8. Round, G.F., *Incompressible Flow Turbomachines: Design, Selection, Applications, And Theory*, 1th edition, ELSEVIER (2011).
9. González, P., Knochen, M. and Sasaki, M.K. "Pulsed flows in flow analysis: Potentialities, limitations and applications," *Talanta*, **143**, pp. 419-430 (2015).
10. Prasad, B., Hinoand, T. and Suzuki, K. "Numerical simulation of free surface flows around shallowly submerged hydrofoil by OpenFOAM", *Ocean Engineering*, **102**, pp. 87-94 (2015).
11. Richter, D., Shaqfeh, S.G. and Iaccarino, G. "Numerical simulation of polymer injection in turbulent flow past a circular cylinder", *Fluids Eng of the ASME*, **133**, pp. 10-15 (2011).
12. Bathe, K.J. "The solution of Maxwell's equations in multiphysics", *Computers & Structures*, **132**, pp. 99-112 (2014).
13. Bathe, K.J. "A mesh adaptivity procedure for CFD and fluid-structure interactions", *Computer Modeling and Simulation in Engineering*, **87**, pp. 604-617 (2009).
14. ANSYS, Inc, "Ansys CFX-Solver Modeling Guide," 15th edition (2013).
15. Souli, M. "ALE and fluid structure interaction", *Mater. Sci.*, **465-466**, pp. 143-150 (2004).
16. Jairazbhoy, V. and Stevenson, R.C. "Mathematical modeling of molten metal dispensing: A study of a pneumatically actuated diaphragm-driven pump", *Applied Mathematical Modeling*, **32**, pp. 141-169 (2008).
17. Nayer, G.D., Kalmbach, A., Breuer, M., Sicklinger, S. and Wüchner, R. "Computers & fluids flow past a cylinder with a flexible splitter plate: A complementary experimental – numerical investigation and a new FSI test case", *Comput. Fluids*, **99**, pp. 18-43 (2014).
18. Wang, Z., Tsai, G. and Chen, Y. "One-way fluid-structure interaction simulation of an offshore wind turbine", *Engineering and Technology Innovation*, **249**, pp. 2011-2012 (2014).
19. Van Rijswick, R. and Van Rhee, C. "Fluid structure interaction in piston diaphragm pumps", *Proceedings of the EUROMECH/ERCOFTAC Colloquium 549 on Immersed Boundary Methods: Current Status and Future Research Directions*, Leiden (The Netherlands), pp. 77-79 (17-19 June 2013).
20. Li J.Z., Raney, M. and Zheng, X. "Flow simulation of a direct-injection Gasoline diaphragm fuel pump with structural interactions", *The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space*, **2000**(724), 10 p. (2000).
21. Bazilevs, Y., Takizawa K. and Tezduyar, E., *Computational Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications*, Willy Series in Computational Mechanics, 404 p. (2013).
22. Tallec, P.L. and Mouro, J. "Fluid structure interaction with large structural displacements", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **190**(24), pp. 3039-3067 (2001).
23. *Diaphragm Dosing Pump*, Petrosavis Company (2010).