



امکان سنجی عددی استفاده از پمپ‌های پیزوالکتریک جهت کاربرد به عنوان پمپ تزریق با در نظر گرفتن برهمکنش سیال و سازه

رفعت محمدی^{۱*}، محمدرضا شیخ‌الاسلامی^۱، فاطمه راهزانی^۲، محمدرضا قادری^۲ و مجتبی مهجری^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک

^۳ محقق، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

چکیده

در این مقاله عملکرد یک پمپ پیزوالکتریک با در نظر گرفتن معادلات اصلی جریان سیال، دیافراگم الاستیک و میدان الکتریکی به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. با توجه به اینکه در عملکرد پمپ‌های پیزوالکتریک سیال و سازه هر دو روی هم تاثیر می‌گذارند، شبیه‌سازی با منظور نمودن تاثیرات برهمکنش سیال و سازه به روش دو طرفه انجام شده است. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و حداکثر خطا در مقایسه با نتایج تجربی در تحلیل پایدار ۹/۶۶ درصد و در تحلیل ناپایدار ۸/۹۵ درصد محاسبه شده است. با توجه به پاسخ زمانی خوب و امکان کنترل دبی توسط پمپ‌های پیزوالکتریک، امکان استفاده از پمپ پیزوالکتریک به عنوان پمپ تزریق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پمپ مورد بررسی می‌تواند جهت تزریق ماده بودارکننده به گاز طبیعی مورد استفاده قرار گیرد؛ به طوری که اگر ایستگاه تقلیل فشار گاز پابلوت در حداکثر ظرفیت خود (۱۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت) کار کند، پمپ پیشنهادی در ولتاژ ۲۰۰ ولت و فرکانس ۰/۱۶۷ هرتز، دبی مورد نیاز ماده بودارکننده را تزریق خواهد کرد. سیستم بودارکننده پیشنهادی علاوه بر امکان کنترل دقیق مقدار ماده تزریق شده، نسبت به سیستم کنارگذر موجود در ایستگاه، هزینه اولیه و بهره‌برداری کمتری دارد.

کلمات کلیدی: پمپ پیزوالکتریک؛ مدل‌سازی عددی؛ برهمکنش سیال و سازه؛ پمپ تزریق.

A Numerical Feasibility Study on Using Piezoelectric Pumps as Dosing Pumps by Implementing Fluid-Structure Interaction

R. Mohammadi^{1,*}, M.R. Sheykhosslami¹, F. Rahzani², M.R. Ghaderi², M. Mohajeri³

¹ Assistant Prof., Mech. Eng., Arak Univ., Arak, Iran.

² Msc. Student, Mech. Eng., Arak Univ., Arak, Iran.

³ Research Assistant, Mech. Eng., Arak Univ., Arak, Iran.

Abstract

In this paper, the performance of a piezoelectric pump is numerically simulated by considering the main equations of fluid flow, elastic diaphragm and electric field. The simulation is conducted using the two-way fluid-structure interaction approach, as the fluid and structure affect each other in the performance of piezoelectric pumps. The simulation results are compared with experimental results and the maximum error in the steady analysis is obtained 9.66% and in the unsteady analysis is 8.95%. Due to the good time response and the possibility of flow control by piezoelectric pumps, the feasibility of using piezoelectric pumps as dosing pumps is investigated. The simulation results showed that the designed piezoelectric pump could be used as a dosing pump; so that if the pilot gas pressure reducing station operates at its maximum capacity (10,000 cubic meters per hour), the proposed pump will inject the required odorant at a voltage of 200 volts and a frequency of 0.167 Hz. In addition to the possibility of precise control of the amount of injected odor, the proposed odorizer system has a lower initial cost and operation cost than the present bypass system at the station.

Keywords: Piezoelectric Pump; Numerical Modeling; Fluid-Structure Interaction; Dosing Pumps.

۱- مقدمه

با توجه به مصرف روزافزون انرژی در جهان، نیاز به استحصال بیشتر منابع انرژی امری اجتناب‌ناپذیر است. از آنجایی که در فرآیند تبدیل گاز طبیعی به انرژی حرارتی، آلودگی زیست محیطی کمتری نسبت به سایر حامل‌های انرژی فسیلی تولید می‌شود، توسعه و گسترش استفاده از گاز طبیعی به عنوان انرژی پاک‌تر و سازگارتر با محیط زیست، الزامی گریزناپذیر و از پیش نیازهای توسعه پایدار است. با توجه به اینکه متان یک گاز بی‌بو و بی‌رنگ است، روشی که امروزه در صنعت گاز برای هشداردهی به مصرف‌کنندگان جهت پیشگیری از بروز خطرات احتمالی ناشی از نشت گاز و جلوگیری از به هدر رفتن آن به کار می‌رود، بودار کردن گاز طبیعی به وسیله مواد بودارکننده است. در ایران اغلب از مرکاپتان به منظور بودار کردن گاز طبیعی استفاده می‌شود. بر اساس استاندارد شرکت ملی گاز ایران به ازای هر متر مکعب استاندارد گاز طبیعی، مقدار ۱۰-۲۵ میلی‌گرم مرکاپتان باید به گاز اضافه شود [۱]. در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری (CGS)^۱، سیستم‌های بودارکننده^۲ وظیفه اضافه کردن مرکاپتان به گاز طبیعی را به عهده دارند و به طور کلی به دو دسته تزریق شیمیایی^۳ و جذب شیمیایی^۴ تقسیم می‌شوند [۲].

در روش تزریقی ماده بودارکننده توسط پمپ‌های تزریق به خط گاز تزریق و گاز درون خط را بودار می‌کند. از این بودارکننده‌ها معمولاً در ایستگاه‌های با ظرفیت بالا استفاده می‌گردد [۱]. در این نوع سیستم‌ها اغلب از پمپ‌های دیافراگمی با عملگر هیدرولیکی یا پنوماتیکی استفاده می‌شود.

از انواع سیستم‌های بودارکننده جذب شیمیایی می‌توان به سیستم‌های نوع عبوری^۵ (کنارگذر) اشاره نمود [۳]. در سیستم‌های بودارکننده کنارگذر به واسطه اختلاف فشاری که در خط لوله خروجی گاز ایستگاه CGS ایجاد می‌شود، بخشی از گاز طبیعی وارد خط کنارگذر شده و با عبور از مخزن مرکاپتان بودار شده و مجدداً به خط اصلی برمی‌گردد.

سیستم‌های بودارکننده کنارگذر برای حالتی که دبی گاز طبیعی کمتر از ۱۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. مشکل اساسی دستگاه‌های بودارکننده کنارگذر این است که با تغییر دما، فشار یا دبی جریان گاز طبیعی در خط اصلی، میزان بودارکنندگی تغییر می‌کند و امکان کنترل میزان ماده بودارکننده اضافه شده وجود ندارد. در صورتیکه لازم است، همواره مقدار مرکاپتان اضافه شده در محدوده مجاز استاندارد شرکت ملی گاز ایران باشد. اگر مرکاپتان اضافه شده بیشتر از حد مجاز باشد، سمی بودن این ماده و خطراتی که استنشاق آن به دنبال دارد باعث بروز مشکلاتی خواهد شد و اگر کمتر از حد مجاز مرکاپتان اضافه شود، تشخیص نشت گاز ممکن نبوده و خطرات جبران‌ناپذیری به دنبال خواهد داشت؛ لذا لازم است، مقدار مرکاپتان اضافه شده به گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز با ظرفیت پایین کنترل شود تا مقدار مرکاپتان در گاز طبیعی درون سیستم توزیع از مقدار مجاز تجاوز نکند.

اغلب تحقیقات انجام شده در زمینه بودار کردن گاز طبیعی بر انتخاب ماده بودارکننده مناسب متمرکز شده‌اند [۵] و [۶]. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی عملکرد سیستم‌های بودارکننده کنارگذر می‌توان به شبیه‌سازی CFD فرایند بودار کردن گاز طبیعی اشاره کرد [۷]. در این تحقیق فرایند اختلاط گاز طبیعی و یک جریان از ماده بودارکننده به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده و پروفیل غلظت ماده بودارکننده در جریان اصلی به دست آمده است. در تحقیق دیگری یک دستگاه بودارکننده برای ایستگاه‌های CGS با ظرفیت پایین با استفاده از فرایندهای غشایی طراحی شده است. فرآیند غشایی پیشنهاد شده تراوش تبخیری است که با استناد به آن اختلاف فشار جزئی ماده بودارکننده در دو طرف ورقه غشا عامل اصلی انتقال ماده بودارکننده از میان غشا است. غشای به کار رفته از جنس پلیمر لاستیکی پلی دی متیل سیلوکسان و یا از جنس ژلاتین پیشنهاد شده است [۸]. مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های بودارکننده کنارگذر توسط نگارش و همکاران صورت گرفته و یک سیستم کنترلی از نوع پیشخور^۶ جهت تنظیم مقدار ماده بودارکننده پیشنهاد شده است [۹].

¹ City Gate Station

² Odorizer

³ Chemical Injection

⁴ Chemical Absorption

⁵ Bypass

⁶ Feedforward

مرور تحقیقات منتشر شده در زمینه پمپ‌های پیزوالکتریک نشان می‌دهد که بررسی عملکرد این پمپ‌ها معمولاً یا به صورت آزمایشگاهی و یا به صورت تحلیلی و بدون در نظر گرفتن برهمکنش سازه و سیال صورت گرفته است [۱۰-۱۳]. در تحقیقات محدودی که تأثیرات برهمکنش سیال و سازه در شبیه‌سازی میکروپمپ‌های پیزوالکتریک مد نظر قرار گرفته، عمدتاً کاربرد این پمپ‌ها در تحویل دارو و کاربردهای پزشکی مد نظر بوده است [۱۴-۱۶]. تا کنون امکان کاربرد این پمپ‌ها در صنعت گاز و در تزریق مواد بودار کننده مورد بررسی قرار نگرفته است.

در ایستگاه‌های CGS ظرفیت پایین که در آنها از سیستم‌های بودارکننده کنارگذر استفاده می‌شود، مقدار مرکاپتان لازم برای افزودن به گاز طبیعی بسیار کم و حداکثر ۰/۱۵ لیتر بر ساعت است. پمپ‌های تزریق مورد استفاده در صنایع مختلف، معمولاً امکان تامین این محدوده پایین از دبی را ندارند و در صورت تامین این مقدار دبی، تکنولوژی پیچیده و هزینه خرید و هزینه تعمیر و نگهداری بسیار بالایی دارند. در صورتیکه پمپ‌های پیزوالکتریک، علیرغم ساختار ساده، امکان تامین دبی در این محدوده کم را دارند. از دیگر ویژگی‌های پمپ‌های پیزوالکتریک می‌توان به پاسخ زمانی خوب و کنترل دبی دقیق آنها اشاره نمود که این ویژگی‌ها می‌توانند مشکلات اشاره شده در سیستم‌های بودارکننده کنارگذر را برطرف سازند؛ بنابراین در این پژوهش برای اولین بار امکان استفاده از پمپ‌های پیزوالکتریک در صنعت گاز و جهت تزریق ماده بودارکننده به گاز طبیعی، بررسی شده است. به این منظور عملکرد یک پمپ پیزوالکتریک با در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سازه و سیال به صورت سه بعدی با نرم افزار ANSYS شبیه‌سازی شده و امکان استفاده از آن برای تزریق مرکاپتان به گاز طبیعی در ایستگاه‌های گازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

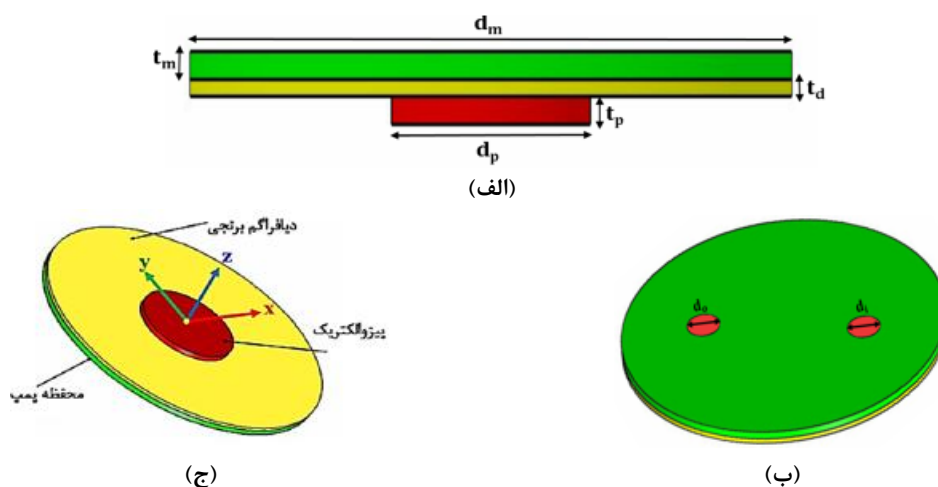
۲- معرفی مسئله

پمپ پیزوالکتریک مورد بررسی از دیسک پیزوالکتریک، دیافراگم فلزی (از جنس برنج)، محفظه سیال و دریچه سیال ورودی و دریچه سیال خروجی تشکیل شده است. در شکل ۱ هندسه پمپ و اجزای تشکیل دهنده آن قابل مشاهده است. همچنین در جدول ۱ ابعاد هندسی پمپ ارائه

با توجه به مشکل عدم امکان کنترل دبی مرکاپتان اضافه شده به گاز در سیستم‌های بودارکننده کنارگذر مورد استفاده در ایستگاه‌های CGS با ظرفیت پایین، در این مقاله امکان استفاده از پمپ‌های پیزوالکتریک به منظور تزریق مرکاپتان به گاز طبیعی در ایستگاه‌های با ظرفیت پایین بررسی خواهد شد. میکروپمپ‌های پیزوالکتریک در حوزه‌های مختلفی همچون سیستم‌های تحویل دارو، سیستم‌های خنک‌کننده قطعات الکترونیکی و جت جوهر پرنترها کاربرد دارند [۱۰-۱۳]. در این پمپ‌ها از دیافراگم‌های پیزوالکتریک برای ایجاد جریان سیال استفاده می‌شود. با توجه به اینکه عملکرد این پمپ‌ها ناشی از تأثیر جابجایی دیافراگم و تغییر شکل آن بر میدان جریان سیال است، شبیه‌سازی دقیق رفتار آنها نیازمند منظور نمودن تأثیرات برهمکنش سیال و سازه (FSI)^۱ است.

از جمله تحقیقات منتشر شده در زمینه مدل‌سازی و بررسی عملکرد پمپ‌های پیزوالکتریک می‌توان به مقاله صادقیان و همکاران [۱۰] اشاره کرد که در آن رویکردی تحلیلی برای طراحی یک پمپ پیزوالکتریک ارائه گردیده و پمپ پیزوالکتریک طراحی شده، جهت کاربرد در پرنتر ساخته شده است. در یک تحقیق دیگر هالدکار و همکاران [۱۴] به مدل‌سازی و تحلیل جریان میکروپمپ پیزوالکتریک با در نظر گرفتن برهمکنش سازه و سیال پرداختند. کاربرد میکروپمپ پیزوالکتریک مورد بررسی در این تحقیق، تحویل دارو بوده و تأثیر شکل میکروسوزنی که جهت تزریق دارو به کار می‌رود بر جریان سیال میکروپمپ و کاهش درد مریض بررسی شده است. وانته و راماکریشننان [۱۵] یک مدل سه بعدی میکرو پمپ پیزوالکتریک را جهت کاربردهای انتقال دارو، با روش المان محدود و با در نظر گرفتن برهمکنش سازه و سیال، شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که نرخ جریان و فشار، مستقیماً با ولتاژ و فرکانس ورودی متناسب است. لی و یان [۱۶] یک پمپ پیزوالکتریک بدون شیر با ساختار هندسی جدید را به روش عددی و سه بعدی، شبیه‌سازی و اثرات پارامترهای محفظه پمپ را روی نرخ جریان خروجی بررسی کردند.

^۱ Fluid Structure Interaction



شکل ۱- هندسه پمپ پیزوالکتریک: (الف) نمای روبرو، (ب) نمای بالا و (ج) نمای پایین

جدول ۲- خواص مکانیکی برنج [۱۷]

نام ماده	مدول الاستیسیته (Gpa)	ضریب پواسون (Kg/m ³)	چگالی (Kg/m ³)
برنج	۱۱۰	۰/۳۳	۸۴۳۰

جدول ۱- ابعاد پمپ پیزوالکتریک [۱۰]

نام پارامتر	نماد	اندازه (mm)
ضخامت دیسک پیزوالکتریک	t_p	۰/۲۰
ضخامت دیافراگم برنجی	t_d	۰/۱۳
ضخامت محفظه سیال	t_m	۰/۲۰
قطر محفظه سیال و قطر دیافراگم	d_m	۵۰
قطر دیسک پیزوالکتریک	d_p	۱۶/۵
قطر دریچه ورودی	d_o	۵
قطر دریچه خروجی	d_i	۵

سیال مرکاپتان خاصیت خوردگی دارد. از این رو جهت جلوگیری از خورده شدن دیسک پیزوالکتریک، یک دیافراگم بین صفحه پیزوالکتریک و سیال مرکاپتان در این پمپ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که آلیاژ برنج به‌طور معمول مقاومت بالایی در محیط‌های خوردنده دارد، آلیاژ برنج به عنوان جنس این دیافراگم انتخاب شده است. خواص مکانیکی برنج در جدول ۲ ارائه شده است. دیافراگم برنجی واسطه بین پیزوالکتریک و محفظه سیال است. محفظه پمپ پیزوالکتریک که سیال درون آن قرار می‌گیرد نیز از جنس آلیاژ برنج انتخاب شده است و در دریچه‌های ورودی و خروجی، شیرهای یکطرفه در نظر گرفته شده است. سیال مورد بررسی در این شبیه‌سازی مرکاپتان است که چگالی آن ۰/۰۰۰۳۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته آن ۰/۰۰۰۳۶۹ پاسکال ثانیه در نظر گرفته شده است.

در طراحی این پمپ از دیسک پیزوالکتریک با جنس زیرکونات تیتانات سرب (PZT)^۱ که یک محلول جامد

شده است. ابعاد هندسی پمپ مطابق با ابعاد پمپ مرجع [۱۰] در نظر گرفته شده است تا بتوان صحت نتایج شبیه‌سازی را مورد ارزیابی قرار داد.

روند عملکرد پمپ پیزوالکتریک بدین صورت است که اعمال یک تحریک الکتریکی (ولتاژ سینوسی، پله‌ای، ...)، موجب تغییر شکل و ایجاد تحدب و تقعر در صفحه پیزوالکتریک و در نتیجه دیافراگم برنجی می‌شود. به گونه‌ای که دور شدن دیافراگم از محفظه سیال باعث ایجاد مکش و ورود سیال از دریچه ورودی به محفظه پمپ شده و نزدیک شدن دیافراگم به سیال باعث فشردن سیال و تخلیه سیال از دریچه خروجی به بیرون از محفظه پمپ خواهد شد.

^۱ Lead Zirconate Titanate

پیزوالکتریک در این معادلات به شکل ماتریس به کار می‌روند.

$$\{S\} = [s^E] \{T\} + [d]^T \{E\} \quad (۴)$$

$$\{D\} = [d] \{T\} + [\varepsilon^t] \{E\} \quad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵)، s^E ماتریس نرمی، ε^t ماتریس نفوذپذیری الکتریکی، d ماتریس ثابت پیزوالکتریک، S بردار کرنش، T بردار تنش، E بردار میدان الکتریکی و D بردار شارژ یا القای الکتریکی است. ماتریس پیزوالکتریک عامل کوپل کننده بین جملات الکتریکی و مکانیکی در روابط (۴) و (۵) است. در کاربردهایی مانند پمپ‌های پیزوالکتریک که از پیزوالکتریک برای ایجاد حرکت استفاده می‌شود، رابطه (۴) و در کاربردهایی که از پیزوالکتریک برای تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی استفاده می‌شود (مانند سنسورها)، از رابطه (۵) استفاده می‌شود. همانطور که ذکر شد، خواص و آرایه‌های ماتریس‌های پیزوالکتریک از مرجع [۱۸] استخراج شده است.

۴- روش حل

با توجه به اینکه در عملکرد پمپ‌های پیزوالکتریک سیال و سازه هر دو روی هم تاثیر می‌گذارند، شبیه‌سازی با منظور نمودن تاثیرات برهمکنش سیال و سازه به صورت دو طرفه انجام شده است. به این منظور از نرم افزار انسیس ورکبنچ^۱ با استفاده از دو حلگر جامداتی^۲ و سیالاتی^۳ استفاده شده و در نهایت سیستم کوپلینگ^۴ سازه و سیال دو طرفه استفاده شده است. در مدل‌سازی بخش سیالاتی تنظیمات مش متحرک در نظر گرفته شده است. سیگنال تحریک، ولتاژ الکتریکی است که به سطح پیزوالکتریک وارد می‌شود و بر اساس معادلات بخش جامداتی (روابط (۳-۵))، جابه‌جایی‌ها در بخش جامداتی محاسبه شده و به حلگر سیالاتی منتقل می‌شود. در بخش سیالاتی بر اساس این جابه‌جایی‌ها و با توجه به اعمال مش متحرک، شبکه‌بندی اصلاح شده و میدان جریان سیال بر اساس معادلات مربوطه (روابط (۱-۲))، حل شده و

فروالکتریک و پیزوالکتریک کاملاً شناخته شده با قطبش دائمی، گذردهی دی‌الکتریک و ضریب پیزوالکتریک بالا است، استفاده شده گرفته است. خواص لازم در شبیه‌سازی این ماده از مرجع [۱۸] استخراج شده است.

۳- معادلات حاکم

جهت بررسی عملکرد سازه‌های متحرک یا تغییر شکل پذیر با جریان سیال داخلی یا حول آنها، لازم است تاثیرات برهمکنش سیال و سازه در مدلسازی لحاظ گردد. امروزه تاثیرات برهمکنش سیال و سازه در زمینه‌های مختلفی همچون کاربردهای بیومکانیک [۱۹]، بررسی عملکرد پره توربین‌ها [۲۰]، احتراق [۲۱] و پمپ‌های پیزوالکتریک [۱۴-۱۶] مد نظر قرار می‌گیرد. تحلیل چنین مسائلی شامل دو بخش جامداتی و سیالاتی است که نتایج تحلیل در این دو بخش با یکدیگر کوپل می‌شوند.

در تحقیق حاضر جریان سیال، آرام در نظر گرفته شده و از تاثیرات دما صرف نظر می‌شود. با توجه به پایین بودن عدد رینولدز (حداکثر ۱۵۰۰) فرض آرام بودن جریان معتبر است. با توجه به آرام بودن جریان سیال، معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات پیوستگی و ناویراستوکس به فرم زیر می‌باشند [۲۲].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (۱)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + f \quad (۲)$$

در روابط فوق U بردار سرعت، p بیانگر فشار، f بردار نیروی حجمی، ρ چگالی سیال و μ لزجت دینامیکی سیال است. معادله حاکم بر سطح جامد الاستیک، عبارت است از [۲۳]:

$$\rho_s \cdot \frac{\partial^2 d_s}{\partial t^2} - \nabla \sigma = F_V \quad (۳)$$

که در آن ρ_s چگالی ماده جامد، d_s بردار جابه‌جایی سطح الاستیک، σ تانسور تنش و F_V نیروی حجمی می‌باشند.

معادلات حاکم بر پیزوالکتریک‌ها در فرم‌های مختلفی ارائه می‌شوند. فرم ماتریسی معادلات الکترومکانیکی مربوط به مواد پیزوالکتریک در روابط (۴) و (۵) ارائه شده است [۱۸]. پارامترهای الکتریکی و مکانیکی و همچنین ثوابت

^۱ Ansys Workbench 18.0

^۲ Transient Structural

^۳ Fluid Flow (Fluent)

^۴ System Coupling

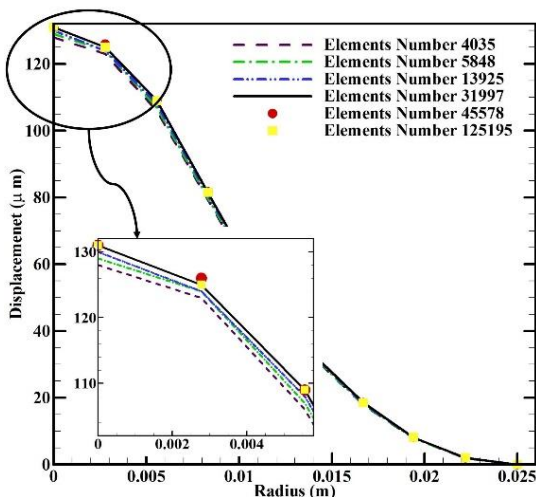
انسیس استفاده شده است. به گونه‌ای که با استفاده از یک رابط کاربری، دستوراتی برای اعمال یک ولتاژ با پالس سینوسی ارائه شده است. این دستورات شامل فرکانس، دوره تناوب، تعداد سیکل، مقدار ولتاژ پیک و رابطه ولتاژ سینوسی است. قید چسبیدن^۶ پیزوالکتریک و دیافراگم برنجی نیز لحاظ شده است.

به منظور شبکه بندی هندسه پمپ پیزوالکتریک، از شبکه‌های سه وجهی استفاده شده و استقلال از شبکه در دو بخش جامداتی و سیالاتی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی استقلال از شبکه در قسمت جامداتی، در شکل ۲ میزان جابجایی دیافراگم بر حسب شعاع در شبکه‌بندی‌های مختلف نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش تعداد شبکه به بیش از ۳۱۹۷۷ المان در بخش جامداتی، تفاوت چندانی در میزان جابجایی دیافراگم ایجاد نمی‌کند و نتایج به دست آمده برای تعداد ۳۱۹۹۷ شبکه از دقت کافی برخوردار است. به منظور بررسی استقلال از شبکه در قسمت سیالاتی، در شکل ۳ دبی جرمی بر حسب زمان در مقطع خروجی پمپ برای شبکه‌بندی‌های مختلف قابل مشاهده است. از شکل ۳ می‌توان دریافت در بخش سیالاتی مسئله، برای تعداد ۴۸۴۴۶

نیروهای ایجاد شده به حلگر جامداتی منتقل می‌شوند. این فرایند در گام‌های زمانی بعدی و تا پایان زمان شبیه‌سازی تکرار می‌شود.

در شبیه‌سازی قسمت سیالاتی پمپ پیزوالکتریک، برای حل معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر مسئله از تقریب حجم محدود و حل کننده فشار محور^۱ در نرم افزار استفاده شده است. جهت گسسته‌سازی معادلات نیز روش بالادست مرتبه دوم^۲ مورد استفاده قرار گرفته است؛ همچنین برای حل جریان سیال از الگوریتم سیمپل^۳ استفاده شده است. در عمل سیکل کاری پمپ در دو مرحله صورت می‌گیرد، به همین دلیل شبیه‌سازی هم در دو مرحله انجام می‌شود. مرحله اول خروج سیال و مرحله دوم ورود سیال می‌باشد. از نتایج مرحله اول به عنوان شرایط اولیه مرحله دوم استفاده شده است. در دریچه‌های ورودی و خروجی، شیرهای یک طرفه وجود دارد که عملکرد آنها با شرط مرزی فشار ورودی و خروجی مدل شده است، زیرا در حالت ایده‌آل هیچ گونه برگشت جریان رخ نخواهد داد. شرط مرزی فشار ورودی باتوجه به فشار کاری مخزن متصل به پمپ ۲۰ psi و فشار خروجی نیز با توجه به فشار خط گازی که مرکاپتان به آن تزریق می‌شود، ۲۵۰ psi در نظر گرفته شده است. مابقی سطوح پمپ در تحلیل و شبیه‌سازی بخش سیالاتی، کاملاً صلب و دارای شرط مرزی عدم لغزش بوده و از این رو شرط دیواره^۴ برای آن‌ها در نظر گرفته شده است.

در شبیه‌سازی قسمت جامداتی پمپ با توجه به اینکه لبه دیافراگم با پیچ محکم می‌شود، درجات آزادی مکانیکی گره‌های روی لبه دیافراگم صفر در نظر گرفته شده و برای لبه دیافراگم برنجی قید ثابت بودن^۵ لحاظ شده است. در تحلیل حالت پایدار، به سطح پایینی پیزوالکتریک ولتاژ صفر و به سطح بالایی آن که به دیافراگم چسبانده می‌شود، ولتاژی با دامنه‌ای از ۲۰۰- تا ۲۰۰ ولت اعمال می‌شود. در تحلیل ناپایدار به سطح بالایی دیسک پیزوالکتریک ولتاژ صفر و برای اعمال ولتاژ به سطح زیرین آن از کامدنویسی در نرم‌افزار

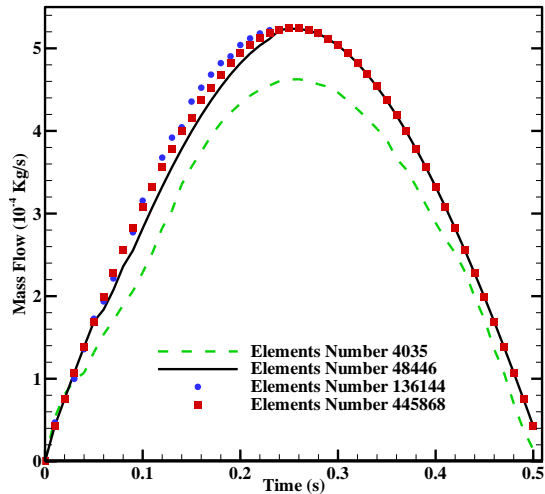


شکل ۲- تغییر شکل دیافراگم در طول شعاع به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف در ولتاژ مؤثر ۲۰۰ ولت

¹ Pressure Based
² Second Order Upwind
³ SIMPLE
⁴ Wall
⁵ Fixed Support

⁶ Connections

می‌افتد و با نزدیک شدن به دیواره دیافراگم، تغییر شکل صفر خواهد شد.

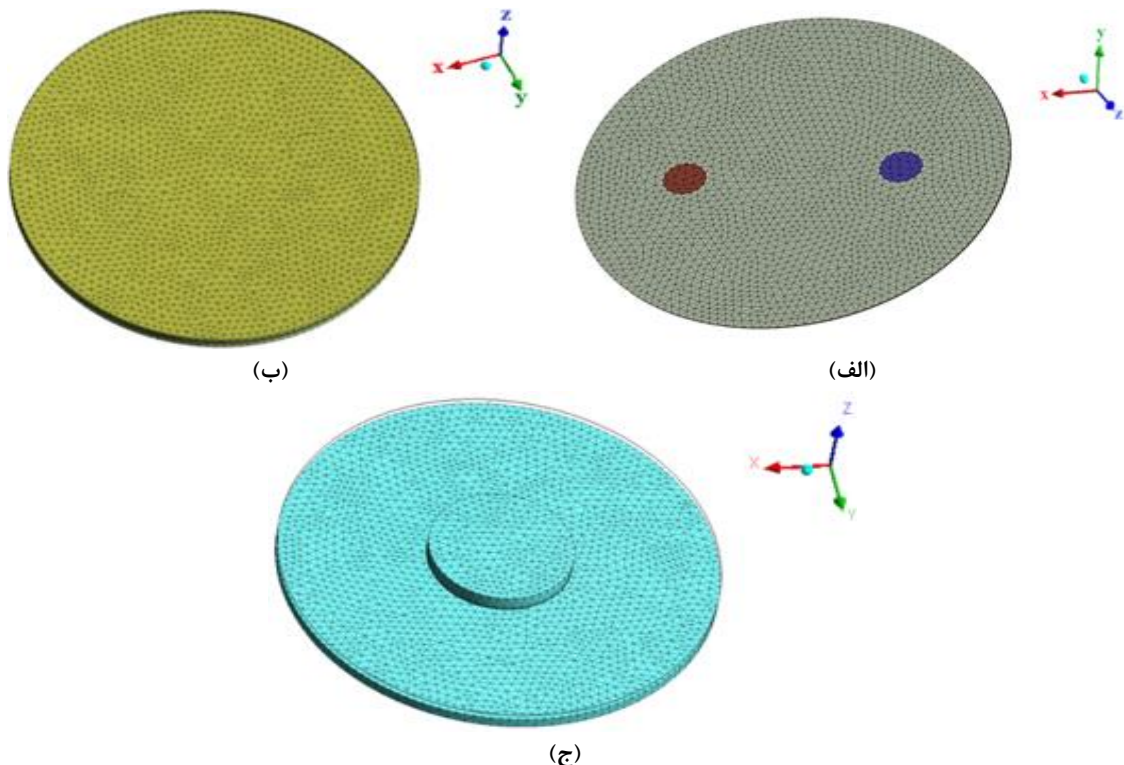


شکل ۳- دبی جرمی سیال بر حسب زمان در مقطع خروجی برای شبکه‌بندی‌های مختلف در ولتاژ مؤثر ۲۰۰ ولت

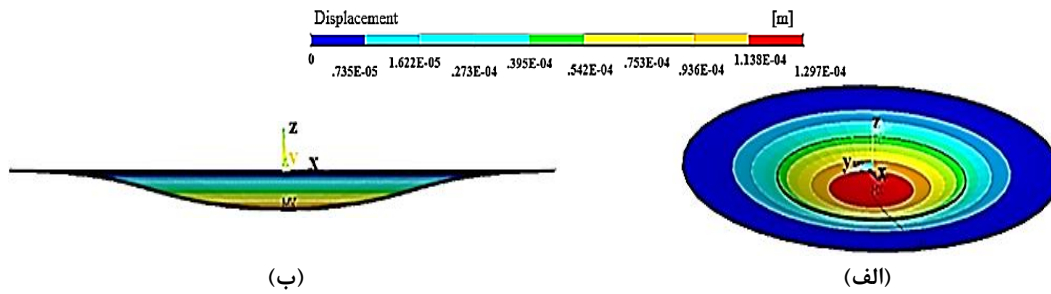
شبکه، نتایج از دقت خوبی برخوردار است. در شکل ۴ شبکه‌بندی نهایی ایجاد شده در قسمت‌های مختلف پمپ پیزوالکتریک قابل مشاهده است.

۵- نتایج

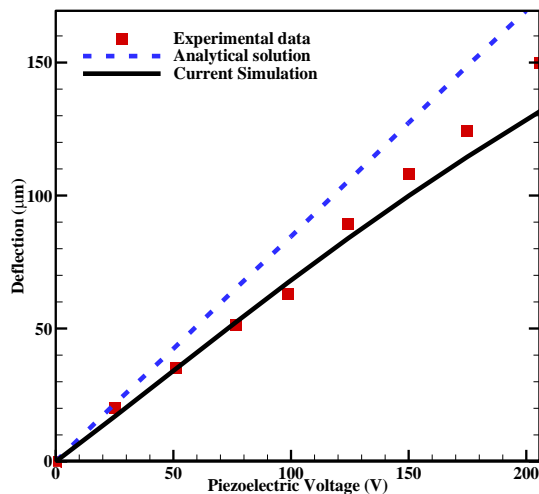
۵-۱- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی در حالت پایدار
در تحلیل پایدار برای بررسی حرکت دیسک پیزوالکتریک و دیافراگم برنجی متصل به آن، به هر دو سطح پایینی و بالایی دیسک پیزوالکتریک مقدار ثابتی از ولتاژ اعمال می‌شود. در شکل ۵ کانتور تغییر شکل دیافراگم در ولتاژ مؤثر ± 200 ولت نشان داده شده است. به گونه‌ای که اعمال ولتاژ منفی به سطح بالایی دیسک پیزوالکتریک و ولتاژ مثبت به سطح زیرین آن موجب ایجاد تقعر بر سطح دیسک پیزوالکتریک و دیافراگم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، مطابق با رفتار عملی دیافراگم پیزوالکتریک، در نتایج شبیه‌سازی هم حداکثر تغییر شکل در وسط دیافراگم اتفاق



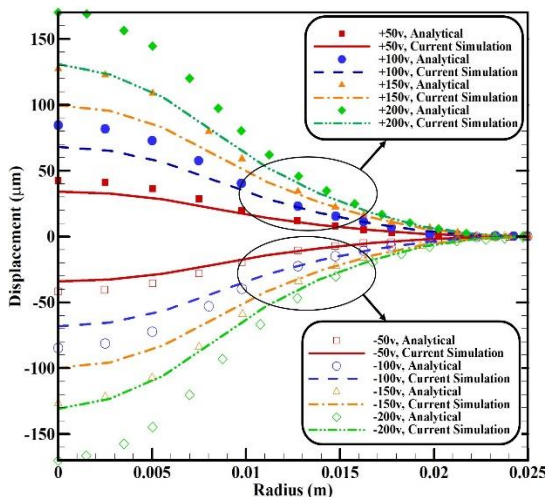
شکل ۴- الف) شبکه‌بندی سطح رویی و درجه‌های پمپ، ب) شبکه‌بندی محفظه سیال و ج) شبکه‌بندی دیافراگم برنجی و دیسک پیزوالکتریک



شکل ۵- تغییر شکل دیافراگم در اختلاف پتانسیل ۲۰۰ ولت (الف) نمای بالا و (ب) نمای روبرو



شکل ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی و تحلیلی مرجع [۱۰]



شکل ۷- مقایسه نتایج عددی و تحلیلی [۱۰] تغییر شکل دیافراگم در طول شعاع در ولتاژهای مختلف

به منظور صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، مقدار حداکثر جابجایی مشاهده شده در شکل ۵ با حداکثر جابجایی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مقایسه شده و نتایج برای ولتاژهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که حداکثر جابجایی دیافراگم و دیسک پیزوالکتریک با افزایش ولتاژ، به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین میزان نزدیکی و تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، با نتایج آزمایشگاهی به وضوح در شکل ۶ قابل مشاهده است. به طوری که بیشترین میزان خطا در این شبیه‌سازی در حالت پایدار ۹/۳۹ درصد است. در شبیه‌سازی رفتار پیزوالکتریک خطی در نظر گرفته شده است، در حالی که رفتار واقعی مواد پیزوالکتریک، خطی نیست. این رفتار غیر خطی، در ولتاژهای بالاتر اثر بیشتری بر تغییر شکل دیافراگم دارد. به همین دلیل بیشترین میزان خطا در ولتاژهای بالاتر مشاهده می‌شود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که دقت نتایج شبیه‌سازی حاضر بیشتر از نتایج تحلیلی است.

در شکل ۷ تغییر شکل دیافراگم در طول شعاع، بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی حاضر با نتایج تحلیلی مرجع [۱۰] مقایسه شده است. در این شکل محور افقی فاصله از مرکز دیافراگم بر حسب متر و محور قائم تغییر مکان هر نقطه بر حسب میکرون است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر جهت ولتاژ جهت تغییر شکل عوض شده و هر چه اختلاف پتانسیل بیشتر شود، تغییر مکان نیز بیشتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، رفتار نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تحلیلی مرجع [۱۰] مشابه است و تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تحلیلی مرجع وجود دارد؛ ولی در ولتاژهای بالاتر مقادیر جابجایی دیافراگم در

حالت ناپایدار ۸/۹۵ درصد است که در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز ایجاد شده است.

۵-۳- تحلیل عملکرد پمپ پیزوالکتریک

عملکرد پمپ پیزوالکتریک طی یک سیکل کاری و در دو مرحله کامل می‌شود. دوره تناوب عملکرد پمپ ۱ ثانیه و ولتاژ موثر ۲۰۰ ولت در نظر گرفته شده است. در نیمه اول در بازه زمانی صفر تا نیم ثانیه، سیال تحت فشار ۲۵۰ Psi از محفظه پمپ خارج و به گاز طبیعی تزریق می‌شود. در پایان نیمه اول و در لحظه $t = 0.5$ (s) در حالی که دیافراگم کمترین فاصله از سیال را دارد، شیر خروجی بسته و شیر ورودی باز می‌شود و نیمه دوم کاری آغاز می‌شود. در مرحله دوم از مراحل کاری پمپ پیزوالکتریک و در بازه زمانی نیم تا یک ثانیه، سیال تحت فشار ۲۰ Psi وارد محفظه پمپ شده و دیافراگم از سیال دور شده و عمل مکش مرکاپتان انجام می‌شود. در پایان نیمه دوم و در لحظه $t = 1$ (s) در حالی که دیافراگم بیشترین فاصله تا سیال را دارد شیر ورودی بسته شده و عملکرد پمپ پیزوالکتریک در مدت زمان یک ثانیه و طی دو مرحله کامل می‌شود. این سیکل به صورت متناوب تکرار می‌شود.

نتایج تحلیلی مرجع و نتایج شبیه‌سازی حاضر متفاوت است. با توجه به اینکه نتایج شکل ۶ نشان داد که دقت نتایج شبیه‌سازی حاضر بیشتر از نتایج تحلیلی است، بنابراین اختلاف بین نتایج تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۷، به دلیل دقت کم نتایج تحلیلی است.

۵-۲- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی در حالت ناپایدار

جهت بررسی حرکت دیسک پیزوالکتریک و دیافراگم برنجی در تحلیل ناپایدار، ولتاژ اعمال شده به سطح بیرونی پیزوالکتریک که مستقیماً به جریان برق متصل می‌شود، ثابت و برابر صفر بوده و با تغییرات زمان دچار تغییر نمی‌شود. این در حالی است که به سطح داخلی پیزوالکتریک یا سطحی که در تماس با دیافراگم برنجی است ولتاژی متغیر با زمان به صورت یک پالس سینوسی اعمال می‌شود. شبیه‌سازی با فرکانس‌های مختلف انجام و نتایج شبیه‌سازی عددی حاضر با نتایج مرجع [۱۰] در جدول ۳ مقایسه شده است.

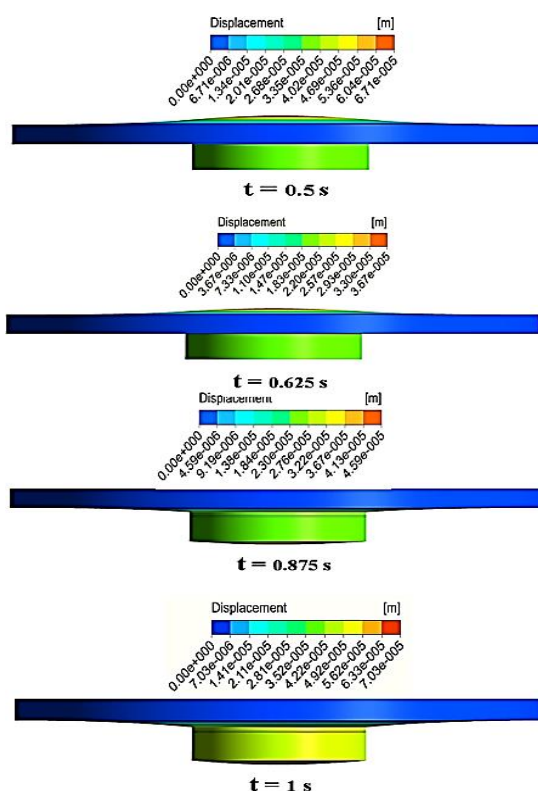
با بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۳، در حالت ناپایدار هم تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی مشاهده می‌شود. حداکثر میزان خطا در این شبیه‌سازی در

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی در ولتاژ موثر ۲۰۰ ولت برای حالت ناپایدار

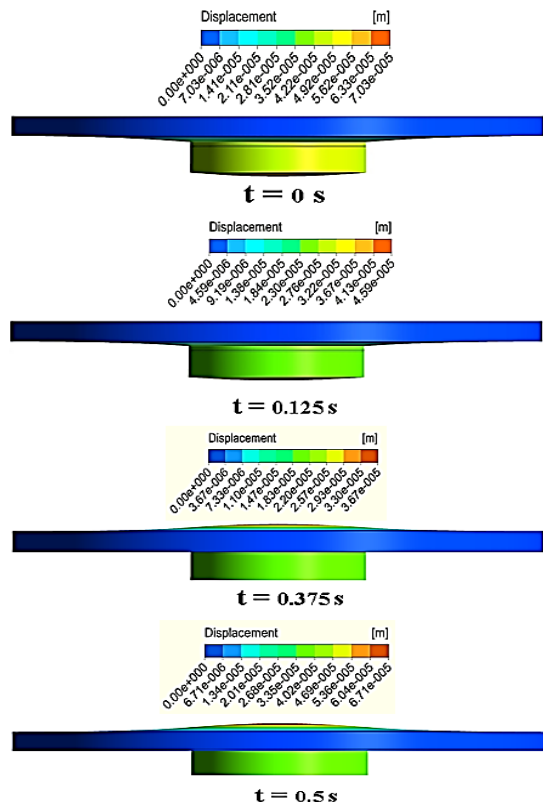
فرکانس (Hz)	حداکثر جابجایی دیافراگم در شبیه‌سازی (m)	نتایج تجربی حداکثر جابجایی دیافراگم (m) [۱۳]	درصد خطا
۱	۰/۰۰۰۱۴۰۸	۰/۰۰۰۱۳۱	۷/۴۸
۵	۰/۰۰۰۱۳۵۶	۰/۰۰۰۱۲۸	۵/۹۴
۱۰	۰/۰۰۰۱۲۰۲	۰/۰۰۰۱۲۶۸	۵/۲۱
۱۵	۰/۰۰۰۱۱۸۹	۰/۰۰۰۱۲۶۵	۶/۰۱
۵۰	۰/۰۰۰۱۱۶۴	۰/۰۰۰۱۲۵۴	۷/۱۸
۱۰۰	۰/۰۰۰۱۱۳۲	۰/۰۰۰۱۲۲۳	۷/۴۴
۳۰۰	۰/۰۰۰۱۰۹۴	۰/۰۰۰۱۱۸۷	۷/۸۳
۶۰۰	۰/۰۰۰۱۰۱۲	۰/۰۰۰۱۱۱۱	۸/۹۱
۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰۹۷۲۴	۰/۰۰۰۱۰۶۸	۸/۹۵

شکل ۸ کانتور توزیع جابجایی دیافراگم در نیمه اول از سیکل کاری پمپ پیزوالکتریک را در چهار زمان مختلف نشان می‌دهد. در این شکل تنها نواحی جامد مساله (دیسک پیزوالکتریک و دیافراگم برنجی) نشان داده شده و برای وضوح بیشتر، هندسه در راستای ضخامت (محور Z در شکل ۱) برابر بزرگتر نشان داده شده است. در نیمه اول که شیر خروجی باز و شیر ورودی بسته است، اعمال ولتاژ متغیر با زمان به دیسک پیزوالکتریک و دیافراگم برنجی، موجب دور شدن دیافراگم از سیال می‌شود. به گونه‌ای که دیافراگم از حالتی که بیشترین فاصله تا سیال را دارد، به سمت بالا متمایل شده و به سیال نزدیک می‌شود. با گذشت زمان میزان تغییر شکل دیافراگم کاهش می‌یابد، تا جایی که دیافراگم به حالت تعادل برسد که هیچ تغییر شکلی در سطح آن وجود ندارد. سپس در ادامه حرکت دیافراگم، با گذشت زمان میزان تغییر شکل دیافراگم افزایش می‌یابد تا جایی که دیافراگم به حداکثر جابجایی خود از حالت تعادل برسد. این حالت در پایان نیمه اول و در لحظه

شکل ۹ کانتور توزیع جابجایی دیافراگم در نیمه دوم از سیکل کاری پمپ پیزوالکتریک را در چهار زمان مختلف نشان می‌دهد. در نیمه دوم که شیر ورودی باز و شیر خروجی بسته است، اعمال ولتاژ متغیر با زمان به دیسک پیزوالکتریک و دیافراگم برنجی، موجب دور شدن دیافراگم از سیال می‌شود. به گونه‌ای که دیافراگم از حالتی که بیشترین فاصله تا سیال را دارد، به سمت بالا متمایل شده و به سیال نزدیک می‌شود. با گذشت زمان میزان تغییر شکل دیافراگم کاهش می‌یابد، تا جایی که دیافراگم به حالت تعادل برسد که هیچ تغییر شکلی در سطح آن وجود ندارد. سپس در ادامه حرکت دیافراگم، با گذشت زمان میزان تغییر شکل دیافراگم افزایش می‌یابد تا جایی که دیافراگم به حداکثر جابجایی خود از حالت تعادل برسد. این حالت در پایان نیمه اول و در لحظه



شکل ۹- کانتور توزیع جابجایی دیافراگم و دیسک پیزوالکتریک در نیمه دوم از سیکل کاری

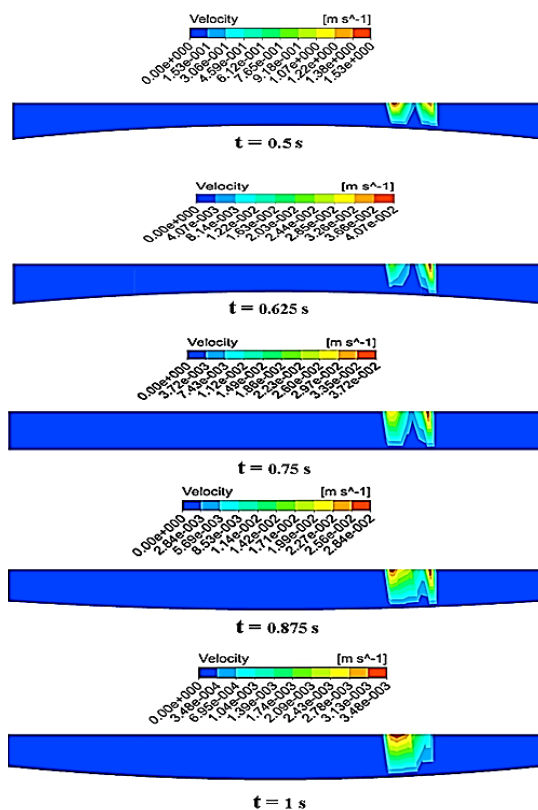


شکل ۸- کانتور توزیع جابجایی دیافراگم و دیسک پیزوالکتریک در نیمه اول از سیکل کاری

نشان می‌دهد. در نیمه دوم که شیر ورودی باز و شیر خروجی بسته است، جهت حرکت دیافراگم نسبت به نیمه اول عکس می‌شود؛ بنابراین با گذشت زمان به تدریج دیافراگم از سیال دور می‌شود. کانتورهای سرعت سیال در این محدوده زمانی نشان می‌دهند که در این نیمه با گذشت زمان و دور شدن دیافراگم از سیال، سیال به درون محفظه پمپ وارد می‌شود.

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات دبی جرمی سیال بر حسب زمان در یک دوره تناوب نشان داده شده است. نمودار تغییرات دبی جریان خروجی سیال بر حسب زمان در این شکل با رنگ آبی و نمودار تغییرات دبی جریان ورودی سیال بر حسب زمان در این شکل با رنگ قرمز نشان داده شده است.

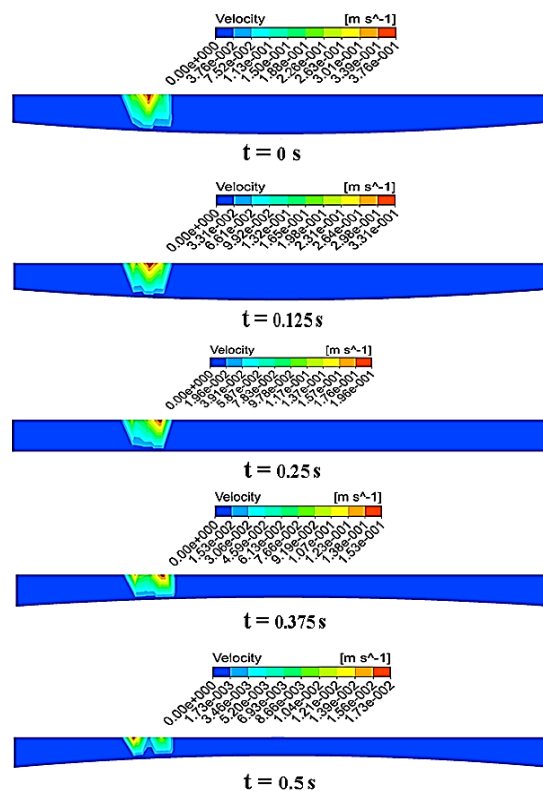
در نیمه اول با شروع حرکت دیافراگم از دورترین فاصله تا سیال در لحظه $t=0$ (s)، دبی جرمی سیال خروجی از



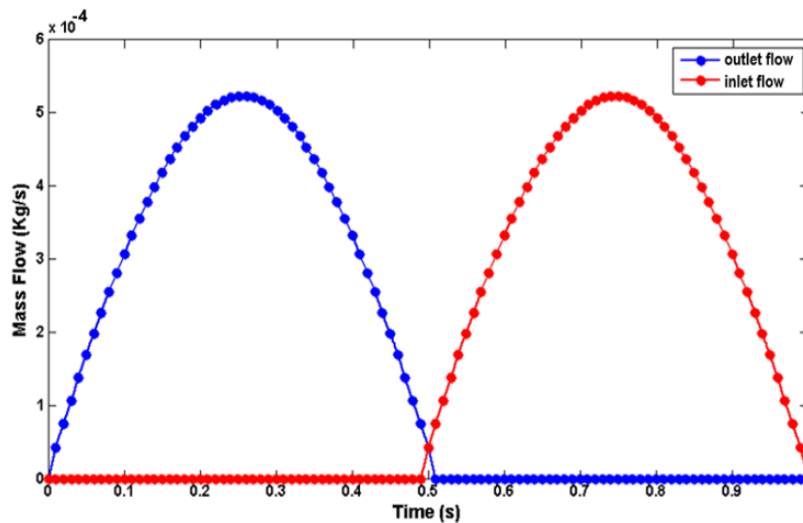
شکل ۱۱- کانتور توزیع سرعت سیال در نیمه دوم از سیکل کاری

شکل ۱۰ کانتور توزیع سرعت سیال در نیمه اول از سیکل کاری پمپ پیزوالکتریک را در پنج زمان مختلف نشان می‌دهد. در این شکل تنها ناحیه سیال نشان داده شده و برای وضوح بیشتر، هندسه در راستای ضخامت (محور Z در شکل ۱) برابر بزرگتر نشان داده شده است. شکل ۸ نشان داد که در نیمه اول که شیر خروجی باز و شیر ورودی بسته است، با گذشت زمان به تدریج دیافراگم به سمت سیال حرکت می‌کند. به طوری که در لحظه $t=0$ (s) دیافراگم بیشترین فاصله از سیال را دارد. با شروع حرکت دیافراگم به مرور این فاصله کاهش یافته و در پایان این نیمه، در لحظه $t=0/5$ (s) دیافراگم در کمترین فاصله از سیال قرار می‌گیرد. کانتورهای سرعت نشان می‌دهند که در این محدوده زمانی، سیال از شیر خروجی خارج می‌شود.

شکل ۱۱ کانتور توزیع سرعت سیال در نیمه دوم از سیکل کاری پمپ پیزوالکتریک را در پنج زمان مختلف



شکل ۱۰- کانتور توزیع سرعت سیال در نیمه اول از سیکل کاری



شکل ۱۲- نمودار تغییرات دبی جرمی سیال ورودی و خروجی بر حسب زمان

است. متوسط دبی خروجی از پمپ پیزوالکتریک در شرایط مورد بررسی (ولتاژ موثر ۲۰۰ ولت و فرکانس ۱ هرتز) برابر 0.000265 کیلوگرم بر ثانیه است.

۴-۵- امکان سنجی استفاده از پمپ پیزوالکتریک مورد

بررسی جهت تزریق مواد بودارکننده به گاز طبیعی

همان‌طور که گفته شد، در این پژوهش امکان استفاده از پمپ پیزوالکتریک جهت تزریق ماده بودارکننده به گاز طبیعی بررسی می‌شود. ایستگاه پالوت معرفی شده از طرف شرکت گاز استان مرکزی، ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS واقع در مشهدمیقان با حداکثر ظرفیت 10000 مترمکعب در ساعت می‌باشد. محاسبات انجام شده بر اساس استانداردهای شرکت ملی گاز ایران که پیش‌تر به آن اشاره شد نشان می‌دهد که متوسط مقدار ماده بودارکننده مرکاپتان مورد نیاز جهت تزریق به گاز طبیعی درون سیستم توزیع ایستگاه مذکور، در حالتی که ایستگاه با حداکثر ظرفیت کار کند، 0.000042 کیلوگرم در هر ثانیه می‌باشد. این در حالی است که با توجه به نتایج بخش قبل، متوسط دبی خروجی از پمپ پیزوالکتریک مورد بررسی در ولتاژ ۲۰۰ ولت و فرکانس ۱ هرتز برابر 0.000265 (kg/s) می‌باشد. با تغییر شرایط عملکردی پمپ می‌توان دبی مرکاپتان مورد نیاز ایستگاه گازی پالوت را ایجاد کرد. به گونه‌ای که اگر ایستگاه در حداکثر ظرفیت خود، معادل

محفظه پمپ افزایش می‌یابد و این افزایش دبی تا جایی ادامه دارد که دیافراگم به حالت تعادل که هیچ تغییر شکلی در سطح آن وجود ندارد، برسد. این حالت تعادل در لحظه $t = 0.25$ (s) ایجاد می‌شود و در این لحظه دبی جرمی سیال بیشترین مقدار را دارد. سپس در ادامه حرکت دیافراگم به سمت سیال و با افزایش جابجایی دیافراگم، دبی جرمی سیال کاهش می‌یابد و این کاهش دبی تا جایی ادامه می‌یابد که دیافراگم به نزدیکترین فاصله از سیال برسد. این حالت در پایان نیمه اول و در لحظه $t = 0.5$ (s) رخ می‌دهد. در تمام مدت نیمه اول شیر ورودی بسته بوده و دبی جریان ورودی به محفظه پمپ برابر صفر می‌باشد. پس از اتمام نیمه اول بلافاصله شیر خروجی بسته و شیر ورودی باز می‌شود و نیمه دوم از عملکرد پمپ پیزوالکتریک آغاز می‌شود. با شروع حرکت دیافراگم از نزدیکترین فاصله به سیال در لحظه $t = 0.5$ (s) دبی جرمی سیال ورودی نیز افزایش می‌یابد و این افزایش دبی جرمی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیافراگم به حالت تعادل برسد که هیچ تغییر شکلی در سطح آن وجود ندارد. این حالت تعادل در لحظه $t = 0.75$ (s) ایجاد می‌شود و در این لحظه دبی جرمی سیال ورودی بیشترین مقدار را دارد. سپس در ادامه حرکت دیافراگم با افزایش جابجایی دیافراگم دبی جرمی سیال ورودی کاهش می‌یابد. در تمام مدت نیمه دوم شیر خروجی بسته بوده و دبی جریان خروجی از محفظه پمپ برابر صفر

۶- نتیجه‌گیری

مشکل اساسی استفاده از دستگاه‌های بودارکننده کنارگذر موجود در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز با ظرفیت پایین، این است که با تغییر دما، فشار یا دبی جریان گاز، میزان بودارکنندگی تغییر می‌کند و در نتیجه امکان کنترل میزان ماده بودارکننده اضافه شده به گاز طبیعی وجود ندارد. لذا لازم است مقدار ماده بودارکننده اضافه شده به گاز طبیعی کنترل شود تا مقدار مرکاپتان در گاز طبیعی درون سیستم توزیع، از مقدار مجاز استاندارد تجاوز نکند.

از ویژگی‌های پمپ‌های پیژوالکتریک می‌توان به پاسخ زمانی خوب و امکان کنترل دبی آن‌ها اشاره نمود. این ویژگی‌ها می‌تواند مشکلات مذکور در استفاده از سیستم‌های بودارکننده کنارگذر را برطرف سازد. در این مقاله عملکرد یک پمپ پیژوالکتریک تحت میدان الکتریکی با در نظر گرفتن معادلات اصلی جریان سیال، میدان الکتریکی و همچنین منظور نمودن تعامل سازه و سیال، به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های تئوری مقایسه شد. حداکثر خطا در این شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی در تحلیل پایدار برابر ۹/۶۶ درصد و در تحلیل ناپایدار برابر ۸/۹۵ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود است.

همچنین امکان استفاده از پمپ پیژوالکتریک مورد بررسی برای تزریق مواد بودارکننده به گاز طبیعی در ایستگاه تقلیل فشار گاز پایلوت مورد بررسی قرار گرفت. محاسبات نشان داد که پمپ مذکور می‌تواند دبی مورد نیاز مرکاپتان را تامین نماید، به طوری که اگر ایستگاه در حداکثر ظرفیت خود، معادل ۱۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت کار کند، پمپ در ولتاژ ۲۰۰ ولت و فرکانس ۰/۱۶۷ هرتز دبی مورد نیاز مرکاپتان را تزریق خواهد کرد. با تغییر مقدار گاز طبیعی خروجی از ایستگاه پایلوت، مقدار دبی مرکاپتان مورد نیاز تغییر خواهد کرد. در این شرایط فرکانس پمپ با توجه به سیگنال دریافتی از تغییر مصرف گاز، تغییر کرده و دبی مرکاپتان تنظیم خواهد شد. در نهایت پس از امکان سنجی استفاده پمپ از نقطه نظر فنی، هزینه سیستم پیشنهادی با سیستم بودارکننده کنارگذر موجود مقایسه شده و تخمین زده شد که هزینه سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم

۱۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت کار کند، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پمپ در ولتاژ ۲۰۰ ولت و دوره تناوب ۶ ثانیه (معادل فرکانس ۰/۱۶۷ هرتز) دبی مورد نیاز مرکاپتان را تزریق خواهد کرد.

با تغییر مصرف گاز و تغییر مقدار گاز طبیعی خروجی از ایستگاه، مقدار دبی مرکاپتان مورد نیاز تغییر خواهد کرد. در این شرایط فرکانس پمپ با توجه به سیگنال دریافتی از تغییر مصرف گاز، تغییر کرده و دبی مرکاپتان تنظیم خواهد شد. بنابراین مقدار مرکاپتان تزریق شده به گاز به صورت دقیق در محدوده مجاز استاندارد شرکت ملی گاز ایران قابل تنظیم می‌باشد؛ همچنین بر خلاف سیستم کنارگذر موجود در ایستگاه، در صورت استفاده از پمپ پیژوالکتریک پیشنهادی جهت تزریق مواد بودارکننده، مخزن نگهدارنده مرکاپتان تحت فشار نبوده و لذا قیمت آن و خطرات احتمالی کاهش می‌یابد. با توجه به تحقیقات و برآوردهای صورت گرفته، هزینه تقریبی کلی سیستم پیشنهادی کمتر از هزینه خریداری سیستم کنارگذر خواهد بود. به این ترتیب مزایای فنی و اقتصادی سیستم بودارکننده پیشنهادی با استفاده از پمپ پیژوالکتریک، نسبت به سیستم‌های کنارگذر مورد استفاده در ایستگاه‌های تقلیل فشار با ظرفیت پایین به شرح زیر است:

- امکان تزریق دقیق و کنترل شده ماده بودارکننده به خط اصلی گاز طبیعی و پاسخ زمانی مناسب
- عدم قرارگیری مخزن مرکاپتان تحت فشار
- قیمت پایین‌تر

با توجه به مزایای ارائه شده سیستم بودارکننده تزریقی پیشنهادی که در آن از پمپ پیژوالکتریک جهت تزریق استفاده می‌شود، به عنوان جایگزین مناسبی برای سیستم‌های کنارگذر پیشنهاد می‌شود. مزیت این پمپ نسبت به دیگر پمپ‌های دیافراگمی رایج در سیستم‌های بودارکننده تزریقی (پمپ‌های دیافراگمی با عملگر هیدرولیکی) این است که پمپ پیژوالکتریک سیستم ساده‌تر و قطعات کمتری دارند. همچنین در دبی‌های مرکاپتان بسیار پایین مورد نیاز در ایستگاه‌های با ظرفیت کم، لازم است از میکروپمپ‌های دیافراگمی با عملگر هیدرولیکی استفاده گردد که هزینه بالاتری نسبت به پمپ پیژوالکتریک دارند.

موجود در حدود ۵۰ درصد کمتر خواهد بود، در حالیکه دبی	S	بردار کرنش
مرکاپتان به صورت دقیق تنظیم شده و مخزن مرکاپتان نیز	T	بردار تنش، Pa
تحت فشار نخواهد بود که از نظر ایمنی نکته مثبتی محسوب	E	بردار میدان الکتریکی، N/C
می‌شود.	D	بردار القای الکتریکی

۷- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت و پشتیبانی شرکت گاز استان مرکزی اجرا شده است.

۹- مراجع

- [1] Odorizer, Injection Type, IGS-M-PM-101(0), 1996.
- [2] Welker K (2012) Overview of odorization systems. ASGMT.
- [3] Odorizer, Bypass Type, IGS-PM-100(0), 1996.
- [4] Odorizer, Meter Driven Type, IGS-M-PM-102(0), 1997.
- [5] Graff F, Kroger K, Reimert R (2007) Sulfur-free odorization with gas odor S-Free - a review of the accompanying research and development activities. *Energy Fuels* 21(6): 3322-3333.
- [6] Liszka K, Laciak M, Oliinyk A (2014) Analysis of new generation odorants applicability in the polish natural gas distribution network. *AGH Drilling, Oil, Gas* 31(1): 59-70.
- [7] Tukmakov AL, Mubarakshin BR, Tonkonog VG (2016) Simulation of the Process of Odorizing a Natural Gas. *J Eng Phys Thermophys* 89(1): 135-140.
- [8] رزاززاده ا (۱۳۹۱) امکان‌سنجی و طراحی دستگاه بودار کننده‌ی گازی برای مصارف کم با استفاده از فرایندهای غشایی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [9] Negaresh M, Farrokhnia M, Mehranbod N (2018) Modeling and control of natural gas bypass odorizer. *J Nat Gas Sci Eng* 50: 339-350.
- [10] Sadeghian H, Hojjat Y, Ghodsi M, Sheykholeslami MR (2014) An approach to design and fabrication of a piezo-actuated microdroplet generator. *Int J Manuf Technol* 70: 1091-1099.
- [11] Tang Y, Jia M, Ding X, Li Z, Wan Z, Lin Q, Fu T (2019) Experimental investigation on thermal management performance of an integrated heat sink with a piezoelectric micropump. *Appl Therm Eng* 16: 114053.
- [12] Bußmann A.B, Durasiewicz C.P, Kibler S.H, Wald C.K (2021) Piezoelectric titanium based microfluidic pump and valves for implantable medical applications. *Sens Actuator A Phys* 323: 112649.

۸- فهرست علائم و نشانه‌ها

ضخامت دیسک پیزوالکتریک، mm	t_p
ضخامت دیافراگم برنجی، mm	t_d
ضخامت محفظه سیال، mm	t_m
قطر محفظه سیال و قطر دیافراگم، mm	d_m
قطر دیسک پیزوالکتریک، mm	d_p
قطر دریچه ورودی، mm	d_i
قطر دریچه خروجی، mm	d_o
چگالی سیال، kg/m^3	ρ
بردار سرعت، m/s	U
فشار، psi	p
بردار نیروی حجمی، N	f
لزجت دینامیکی، Pa.s	μ
چگالی ماده جامد، kg/m^3	ρ_s
بردار جابجایی سطح الاستیک، mm	d_s
تانسور تنش، Pa	σ
نیروی حجمی، N	F_V
ماتریس نرمی	S^E
ماتریس نفوذپذیری الکتریکی	ϵ^t
ماتریس ثابت پیزوالکتریک	d

- sequentially-coupled FSI analysis with the space-time topology change method. *Comput Mech* 65: 1167-1187
- [۲۰] شجاعی فرد م، ساجدین ا، خلخالی ا (۱۳۹۹) تحلیل اثر توزیع ضخامت پره بر عملکرد توربین توربوشارژر در حالت پذیرش کامل و جزئی. *نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۳۱۱-۳۹۷: (۱): ۱۰.
- [۲۱] فتاحی ل، علی‌پور ع (۱۴۰۰) شبیه‌سازی عددی رفتار ارتعاشی دیواره یک محفظه احتراق آزمایشگاهی. *مجله مهندسی مکانیک امیرکبیر* ۸۹۶-۸۸۱: (۲): ۵۳.
- [22] Currie IG (2016) *Fundamental mechanics of fluids*. CRC Press. 4th edn. Marcel Dekker, Inc., New York.
- [23] Ghalambaz M, Jamesahar E, Ismael MA, Chamkha AJ (2017) Fluid-structure interaction study of natural convection heat transfer over a flexible oscillating fin in a square cavity. *Int J Therm Sci* 111: 256-273.
- [13] Asadi Dereshgi H, Dal H, Yildiz MZ (2021) Piezoelectric micropumps: state of the art review. *Microsyst Technol* 27: 4127-4155.
- [14] Haldkar RK, Gupta VK, Sheorey T (2017) Modeling and flow analysis of piezoelectric based micropump with various shapes of microneedle. *J Mech Sci Technol* 31(6): 2933-2941.
- [15] Vante AB, Ramakrishnan R (2021) A fluid structure interaction based simulation study of piezoelectric micropump for drug delivery application. *IOP Conf* 1123: 012001.
- [16] Li C, Yan T, (2021) Design and numerical simulation analysis of valve-less piezoelectric pump with semi-cylinder bluff body. *ICIIP Conf* 305-308.
- [17] Baker H (1998) *Metals handbook desk edition*. 2nd edn. Joseph R. Davis.
- [18] Fuxu Li, Guangji Li (2015) Application of ANSYS APDL in the Design of Piezoelectric Transducer. 5th International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology 506-511.
- [19] Terahara T, Takizawa, Tezduyar TE, Bazilevs Y, Hsu MC (2020) Heart valve isogeometric