مقاله

تأثیر تغییرات فرکانس بر ارتعاشات دیافراگم میکروپمپ الکترومغناطیسی

سارا راهدار*
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان
sarah_rahdar@yahoo.com

طاهره فنائی شیخ‌الاسلامی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سیستان و بلوچستان
tfanaei@yahoo.ca

مجتبی میرحسینی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان
m_mhoseini@yahoo.ca

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۱۰

چکیده

در سیستم‌های میکروفلوئیدی، میکروپمپ‌ها نقش اصلی انتقال مواد را برعهده دارند. نحوهٔ حرکت و ارتعاش دیافراگم از مهمترین پارامترهای مؤثر در بازده میکروپمپ است. کنترل حرکت دیافراگم موجب کنترل حرکت مایع می‌شود. در این مقاله رفتار این المان شبیه‌سازی شده است. میکروپمپ مورد بررسی یک سیستم مکانیکی است که در آن نیروی الکترومغناطیسی موجب حرکت ارتعاشی دیافراگم می‌شود. تغییرات جریان عبوری از سیم‌پیچ، نیروی مغناطیسی متغیر را به جریان مایع تبدیل می‌کند. در این میان نحوهٔ تأثیر فرکانس بر ارتعاشات دیافراگم و در نتیجه بر میزان انتقال مایع از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله اثر این پارامتر بر بازده سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: سیستم میکروفلوئیدی[۱]، میکروپمپ، نیروی الکترومغناطیسی، ارتعاش دیافراگم

۱. مقدمه

پیشرفت فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[۲]، ساخت بسیاری از قطعات مانند موتورهای بسیار کوچک، شیرها، پمپ و دیگر ادوات در مقیاس میکرو و با حساسیت بیشتر را ممکن کرده است. در این میان سیستم‌های میکروفلوئیدی نه‌تنها در علوم مکانیکی و الکترونیکی که در سایر علوم مانند هوافضا، پزشکی و نظامی نیز جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. یکی از مهمترین اجزای این سیستم‌ها میکروپمپ‌ها هستند که کاربردهای بسیاری در سیستم‌هایی چون تحویل دارو[۳]، میکرو رادیاتورها و جز این‌ها دارند [۱]. میکروپمپ‌ها را براساس سازوکار پمپاژ به‌کار رفته به دو دستهٔ کلی تقسیم می‌کنند: مکانیکی و غیرمکانیکی. میکروپمپ‌های مکانیکی دیافراگم (قسمت متحرک) دارند و ارتعاش ناشی از یک محرک فیزیکی موجب شکل‌گیری فرایند پمپاژ می‌گردد [۱]. از مزایای این نوع سادگی ساخت آنها و در عین‌حال بازده بسیار بالای آنهاست و از معایب آنها طول عمر کمتر دیافراگم به‌دلیل استهلاک و نیز ایجاد نوسانات جریان در

دبی مایع است. اما در نوع غیرمکانیکی نیروی غیرمکانیکی سبب حرکت سیال درون میکروکانال‌ها می‌گردد [۱]. از مزایای آنها نیز امکان دستیابی به فرکانس بالاتر و نیز دبی جریان پیوسته‌تر است و از معایب آنها اینکه به فناوری ساخت بالاتر نیاز دارند. از انواع میکرپمپ‌های مکانیکی می‌توان به نوع الکترومغناطیسی اشاره کرد که در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد. این میکروپمپ به‌عنوان سیستم تحویل دارو برای مصارف پزشکی طراحی شده است.

۲. نمونهٔ ساخته‌شده

۲-۱. اجزای میکروپمپ

دیافراگم پردهٔ بسیار نازک ارتجاعی است که فرایند پمپاژ را ایجاد می‌کند. در انتخاب مادهٔ دیافراگم پارامترهایی چون خاصیت ارتجاعی، عدم واکنش‌پذیری با مایع انتقال و نیز سهولت فرایندهای ساخت نظیر ماشینکاری میکرونی[۴]، ایجاد پیوند[۵] و قیمت حائز اهمیت می‌باشند. امروزه مواد پلیمری به‌دلیل ویژگی‌های خاص آنها (قیمت مناسب، خاصیت الاستیکی و ارتجاعی در عین‌حال مقاومت بالا و عدم واکنش با طیف وسیعی از حلال‌های اسیدی و بازی) به‌عنوان دیافراگم یا پایهٔ اصلی سیستم استفاده می‌شوند. در این پروژه از پلی متیل متاکریلات[۶] جهت دیافراگم استفاده شده است [۲]. مگنت ماده‌ای مغناطیس‌شونده از جنس مگنت نئودیمیوم[۷] است [۴]. در این پروژه مخزن و دریچه‌های ورودی و خروجی در زیرلایه‌ای از پلی متیل متاکریلات قرار گرفته اند [۲]. سیم‌پیچ نیز متشکل از تعداد ۲۰۰۰ دور سیم AWG32 است که حول هستهٔ آهن با قطر ۵ میلی‌متر پیچیده شده است. مدار راه‌انداز نیز درایور سیستم یک اسیلاتور موج مربعی با خروجی Push Pull، با فرکانس کاری صفر تا ۲۰۰ هرتز و با قابلیت کنترل توان خروجی می‌باشد.

۲-۲. اصول عملکرد

ارتعاش و حرکات رفت‌وبرگشتی دیافراگم با ایجاد اختلاف فشار در مخزن موجب حرکت مایع انتقالی از دریچهٔ ورودی به دریچهٔ خروجی می‌شود. نوع ساختار دریچه‌ها و کانال‌های ورودی و خروجی به‌گونه‌ای است که جریان مایع را از سمت ورودی به خروجی هدایت و میزان بازگشت مایع را به حداقل برساند [۳]. همان‌طور که اشاره شد، تأمین نیروی این سیستم براساس یک محرک الکترومغناطیسی خارجی است. این محرک یک سیم‌پیچ با هستهٔ آهن به قطر ۵ میلی‌متر است که تعداد ۲۰۰۰ دور سیم مسی AWG32حول آن چرخیده است. اندوکتانس سیم‌پیچ برابر ۱۴۰ میلی هانری و میزان مقاومت آن برابر ۱۷۰ اهم است (اندازه‌گیری توسط GPS132A در فرکانس ۱۰۰ هرتز). با عبور جریان از سیم‌پیچ میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. نیروی الکترومغناطیسی حاصل که موجب حرکت دیافراگم در جهت عمودی می‌شود از رابطهٔ ۱ قابل محاسبه است:

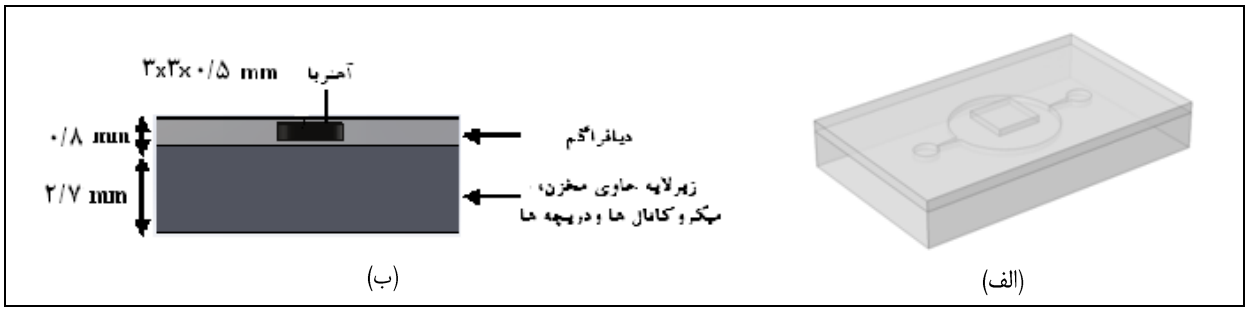
$$F_z = B_r \int_z^{z+h_m} S_m \frac{\delta H_z}{\delta z} dz \qquad (۱)$$

در این رابطه H_z مؤلفهٔ عمودی میدان حاصل از سیم پیچ، B_r پسماند مغناطیسی، S_m مساحت سطح و h_m ضخامت مگنت و $\delta H_z / \delta z$ گرادیان میدان مغناطیسی است. همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد، میزان نیروی حاصل علاوه بر پارامترهایی چون نوع و ابعاد مگنت به‌کار رفته و نیز مشخصات سیم‌پیچ، رابطهٔ مستقیمی با گرادیان تغییرات میدان دارد. بنابراین هرچه گرادیان میدان بیشتر باشد، نیروی حاصل بیشتر و جابه‌جایی دیافراگم بیشتر خواهد بود. از طرفی گرادیان میدان مغناطیسی رابطهٔ مستقیم با تغییرات و میزان جریان عبوری از سیم‌پیچ دارد [۴]. سیم‌پیچ فوق در فاصلهٔ ۵ میلی‌متر از دیافراگم قرار داده شده است. توسط نیروسنج دقیق ماکزیمم نیرویی معادل ۲۳/۷ میلی‌نیوتن در حالت مکش و ۲۱/۷ میلی‌نیوتن در حالت دهش اندازه‌گیری شد. (ولتاژ درایور برابر ۱۲ ولت و جریان عبوری از سیم پیچ ۱۷۰ میلی‌آمپر می‌باشد.)

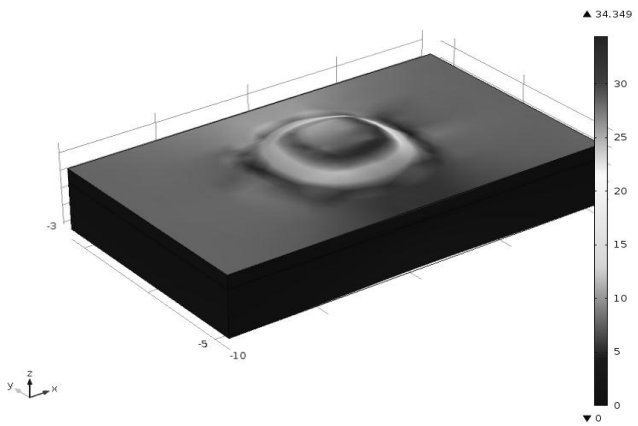
۳. شبیه‌سازی

با دانستن تغییرات نیرو، رفتار دیافراگم در نرم‌افزار COMSOL 4.3 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج

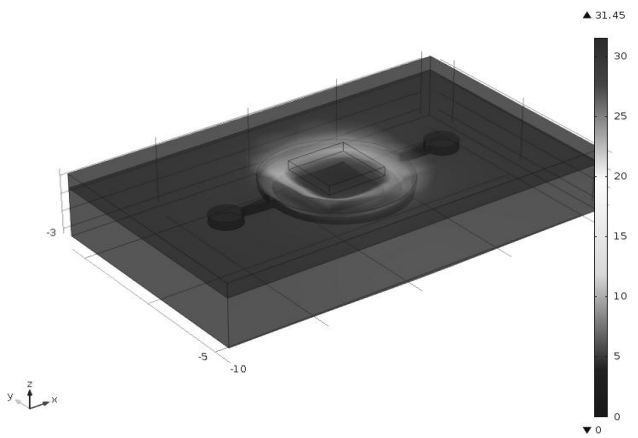
شبیه‌سازی در شکل‌های ۲ تا ۴ نمایش داده شده است. شکل ۵ نیز تغییرات جابه‌جایی دیافراگم را در یک سیکل پمپاژ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ماکزیمم جابه‌جایی در هنگام مکش برابر ب ۳۴/۳۴ میکرومتر و در حالت دهش برابر با ۳۱/۴۵ میکرومتر است. باتوجه به مطالب عنوان‌شده انتظار می‌رود با افزایش فرکانس پمپاژ (سیکل رفت و برگشت دیافراگم) میزان بازده انتقال مایع افزایش یابد. اما در عمل این‌گونه مشاهده نشد. نرخ انتقال مایع خروجی در فرکانس‌های مختلف با تغییر مایع انتقالی در دو مادهٔ آب و روغن پارافین در شکل ۶ نمایش داده شده است.



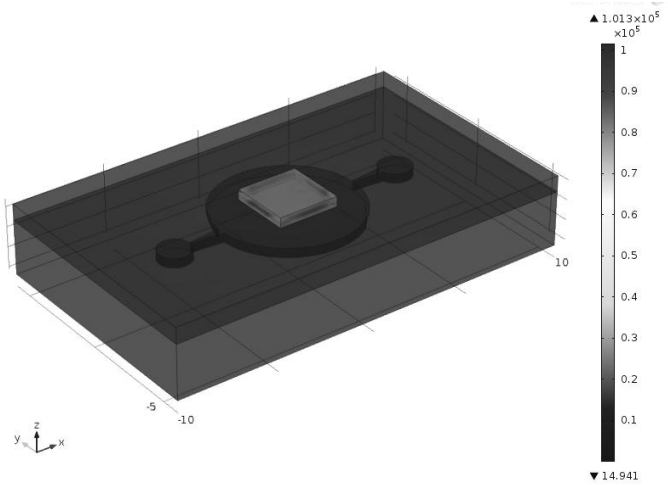
شکل ۱. نمایی از الف) مدل سه‌بعدی میکروپمپ ساخته‌شده، ب) ابعاد میکروپمپ



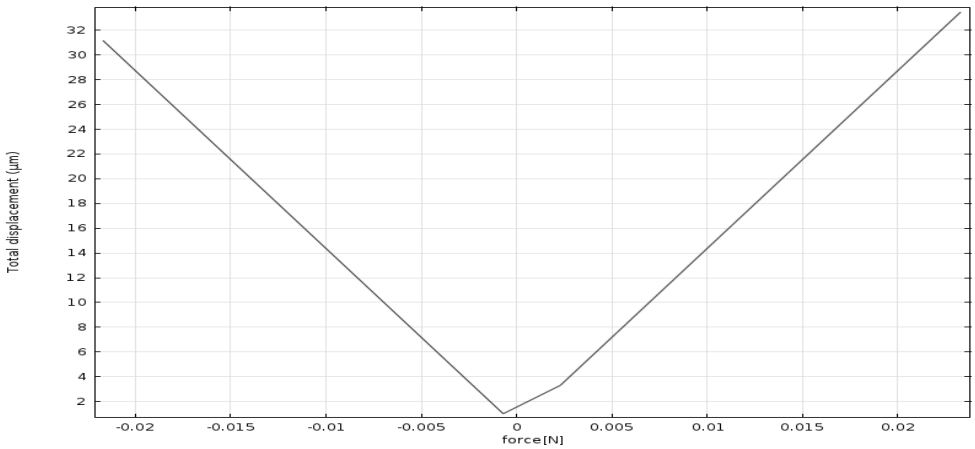
شکل ۲. بیشینهٔ جابه‌جایی دیافراگم به ازای نیروی مکش ۲۳/۷ میلی نیوتن



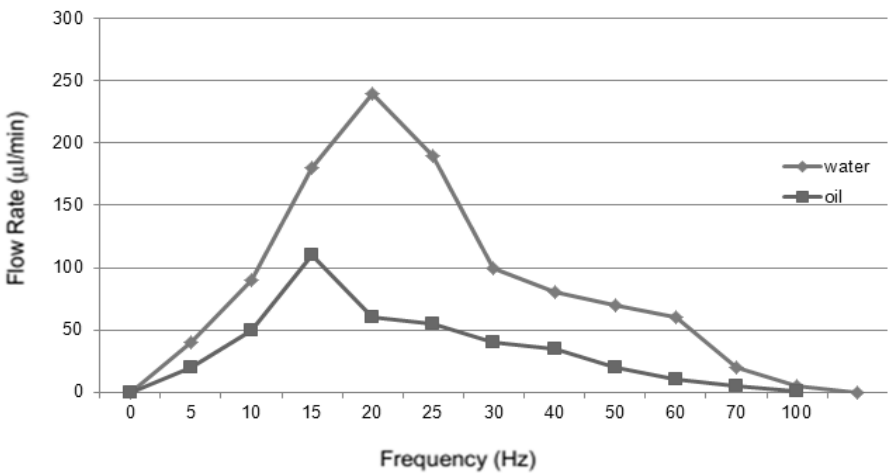
شکل ۳.بیشینهٔ جابه‌جایی دیافراگم به ازای نیروی دهش ۲۱/۷ میلی نیوتن



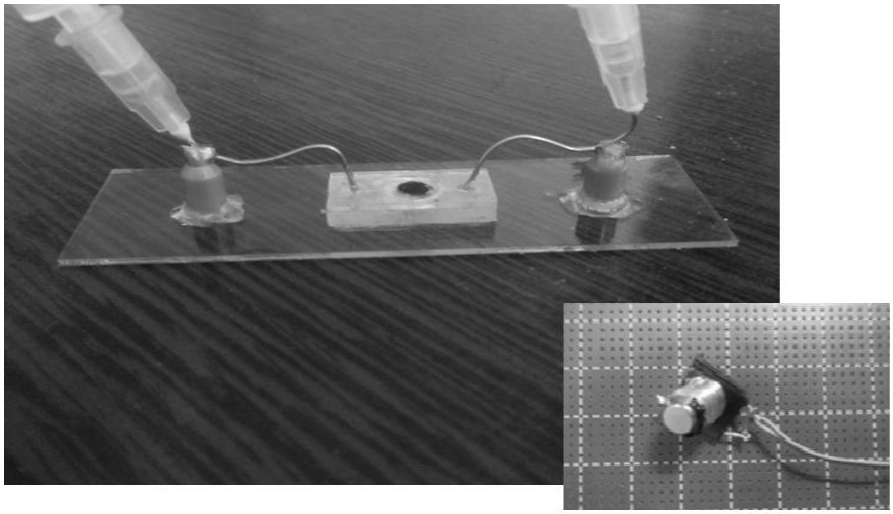
شکل ٤. میزان استرس وارده به دیافراگم در حالت مکش



شکل ٥. نمودار تغییرات جابه‌جایی دیافراگم به ازای تغییرات نیرو



شکل٦. اثر تغییرات فرکانس بر بازده با تغییر مایع انتقالی



شکل ۷. میکروپمپ ساخته‌شده به‌همراه سیم‌پیچ با هسته آهن

در شکل ۶ مشاهده می‌شود فرکانس کار میکروپمپ تابع نوع مادهٔ انتقالی است. لزجت مادهٔ انتقالی در نوع ارتعاش دیافراگم و تعیین فرکانس کار میکروپمپ نقش مهمی دارد. در نمونهٔ آزمایشی آب و روغن پارافین غلیظ مقایسه و به‌صورت تجربی مشاهده شد که خواص ماده انتقالی علاوه بر دیگر موارد مهم مانند خاصیت ارتجاعی دیافراگم بر فرکانس تشدید و نقطهٔ کار میکروپمپ اثر بسیار مهمی دارد. در فرکانس‌های بالا مواد چگال‌تر قادر به تعقیب ارتعاش دیافراگم نبوده و عملاً سیکل مکش و دهش را برهم می‌زند. این فرکانس به ریزموجک‌هایی در سطح مایع تبدیل می‌شود که در داخل مخزن منتقل و منعکس شده و عملاً انرژی الکترومغناطیسی ارسالی از سیم‌پیچ میکروپمپ بدین‌گونه تلف می‌شود. اما در مواد روان مانند آب و الکل فرکانس کار و بازده میکروپمپ بسیار بالاتر است که در نمونهٔ آزمایشی فرکانس کار برای آب ۲۵ هرتز بود و نرخ انتقال حدود ۲۵۰ میکرولیتر در دقیقه است که در مقایسه با روغن پارافین که در فرکانس ۱۵ هرتز با نرخ انتقال حداکثر ۱۱۰ میکرولیتر در دقیقه اختلاف بسیار زیادی دارد.

٤. نتیجه‌گیری

امروزه میکروپمپ‌های مکانیکی به‌دلیل بازده خوب، پایداری و قابلیت ساخت آسان‌تر مورد توجه بسیاری از حوزه‌های صنعت قرار گرفته‌اند. مهمترین عامل در ایجاد جریان مایع و فرایند پمپاژ، نوسانات دیافراگم است و همان‌طور که نشان داده شد این فرایند تابع فرکانس کار خود و نوع ارتعاشات دیافراگم می‌باشد. حرکت دیافراگم با افزایش فرکانس تا مقدار مشخصی بهبود پیدا می‌کند؛ زیرا سیکل پمپاژ حاصل از یک حرکت مکش و دهش را افزایش می‌دهد. اما مشاهده شد پس از افزایش فرکانس در یک بازهٔ مشخص، دیافراگم قابلیت تعقیب فرکانس را ندارد و تشکیل موجک‌ها در سطح دیافراگم سبب آشفتگی و حرکات نامنظم دیافراگم و در نتیجه کاهش بازده می‌گردد. عوامل زیر در محاسبهٔ فرکانس کار دیافراگم مؤثرند:

۱. آثار محدودکننده ناشی از اثر اندوکتانس سلفی (و نیز آثار جانبی اهمی و خازنی): با افزایش فرکانس، اندوکتانس به‌شدت افزایش می‌یابد که منجر به افزایش تلفات و کاهش راندمان انتقال مایع در میکروپمپ خواهد شد.

$$X_L = 2\pi f L \qquad (۲)$$

۲. میزان ارتجاع و شکست کششی[۸] مادهٔ دیافراگم تأثیر بسزایی در تعقیب فرکانس اعمالی درایور و نیز مقاومت آن نسبت به استرس اعمالی در فرکانس‌های بالا دارد. در شبیه‌سازی انجام‌شده میزان استرس بررسی شد.

۳. هسته‌های سیم‌پیچ با افزایش ضریب مغناطیسی k در افزایش نیروی اعمالی اثرگذارند و در فرکانس‌های

مختلف توابع کاری مختلف دارند. در فرکانس‌های پایین از هستهٔ آهن و در فرکانس بالاتر از موادی چون فریت[9] می‌توان بهره برد.

۴. میزان لزجت مایع انتقالی درنوع ارتعاش دیافراگم و فرکانس کار میکروپمپ نقش بسیار مهمی ایفا می‌نماید (شکل ۶).

۵. دیگر عوامل مانند نوع ساختار میکروپمپ، شکل مخزن و دریچه و کانال‌ها نیز در تولید، انعکاس و هدایت ریزموج‌های ایجادشده و تعیین فرکانس کار اثر مهمی دارند.

۵. مآخذ

[1] Abbhari, F., J. Jaafar, N.A.M. Yunus. "A Comprehensive Study of MicropumpsTechnologies." *International Journal of Electrochemical Science* 7(2012).

[2] Ashraf, M.W., T. Shahzadi, N. Afzulpurkar. "Micro Electromechanical Systems (MEMS) Based Microfluidic Devices for Biomedical Applications." *International Journal of Molecular Sciences,* ISSN 1422-0067 (2011).

[3] Lederer, T., M. Heinisch, W. Hilber, B. Jakoby. "ElectromagneticMembrane-Pump with an Integrated Magnetic Yoke." *IEEE SENSORS 2009 Conference*, 2009.

[4] Pamme, N. "Magnetism and Microfluidics." *The Royal Society of Chemistry journal*.

پی‌نوشت

1. micro fluidic system
2. micro electro mechanical systems
3. drug delivery
4. micromachining
5. bonding
6. poly-methyl methacrylate
7. neodymium magnet
8. tensile of fracture strength
9. Ferrite