

طراحی دو موتور اولتراسونیک خطی با محرک‌های دوگانه پیزوالکتریک

جعفر حیدری^۱، عباس شیر^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران j.heidari@sru.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق قدرت، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران abbas.shiri@sru.ac.ir

مقدمه

پدیده پیزوالکتریک یکی از خواص غیرمعمولی است که برخی از سرامیک‌ها و پلیمرها از خود نشان می‌دهند. در این مواد در اثر اعمال فشار یا اعمال نیروی خارجی، دوقطبی‌های موجود در ساختار آنها تحریک شده و میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. وارونه کردن اثر نیرو نیز در این مواد (مثلاً از کششی به فشاری) جهت میدان را معکوس می‌کند. از این مواد در مبدل‌ها و تجهیزاتی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند یا برعکس استفاده می‌شود. کاربردهای نام‌آشنایی از جمله پیکاپ گرامافون، میکروفون‌ها، مولدهای ماوراء صوت و حسگرهای سونار از خاصیت پیزوالکتریک استفاده می‌کنند. اثر پیزوالکتریک معکوس به معنی تغییر شکل مواد پیزوالکتریک بر اثر اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی است. اگر دو وجه روبرویی در هر یک از این بلورها را به اختلاف پتانسیل متناوب الکتریکی وصل کنیم، تغییر شکل متناوبی در آن رخ می‌دهد و به ارتعاش در می‌آید [۱]. پلاریته پتانسیل دو وجه بلور در دو حالت تنش و کرنش هم‌ارزند و هرچه میزان فشار یا کشش بیشتر باشند، اختلاف پتانسیل تولید شده به صورت خطی بیشتر خواهد شد. اثر معکوس پیزوالکتریک نیز در این معنی که تغییر شکل بلور در اثر اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو وجه روبروی آنها می‌باشد در صورت اعمال اختلاف پتانسیل بیشتر تغییر شکل نیز بیشتر خواهد بود. به عبارتی موتورهای پیزوالکتریک برعکس سنسورهای پیزو الکتریک که در آن تغییر شکل یا لرزش مواد پیزوالکتریک بار الکتریکی ایجاد می‌کند، در اثر اعمال میدان الکتریکی ارتعاش تولید می‌کنند. بنابراین موتور پیزوالکتریک یا موتور پیزو نوعی موتور برقی است که بر اساس تغییر شکل ماده پیزوالکتریک هنگام اعمال یک میدان الکتریکی ساخته می‌شود. یک مدار الکتریکی باعث ایجاد لرزش‌های صوتی یا اولتراسونیک در مواد پیزوالکتریک می‌شود که باعث ایجاد حرکت خطی یا چرخشی می‌شوند. [۲].

موتورهای اولتراسونیک را می‌توان بر اساس ویژگی‌های لرزش به دو دسته اصلی موتورهای دارای موج انتقالی و موتورهای ایستاده طبقه بندی کرد [۳]. نوعی دیگر از طبقه‌بندی، بر اساس کارکرد مولد آن‌ها است. یک گروه متشکل از موتور شبه استاتیک است که توابع

چکیده

یکی از روش‌های موجود برای افزایش دقت و کاهش ابعاد در ساخت ربات و تجهیزات پزشکی استفاده از موتورهای پیزوالکتریک^۱ است. در ساخت ربات فضای کافی برای نصب موتور دوار سنتی وجود ندارد و بنابراین از یک موتور پیزوالکتریکی خطی برای عمل انگشتان رباتیک استفاده می‌شود. در این تحقیق، دو موتور خطی پیزوالکتریک با محرک‌های^۲ دوگانه از جنس (PZT^۳) طراحی شده است. در طراحی اول، ابتدا یک موج انتقالی با تحریک محرک‌های پیزوالکتریک روی استاتور موتور خطی اولتراسونیک ایجاد می‌شود. این تحریک به یک اسلایدر انتقال و سپس تبدیل به حرکت خطی افقی می‌شود. در طرح دیگر از پنج جفت پیزوالکتریک استفاده می‌شود و اسلایدر آن نیز پنج قسمت در زیر این جفت پیزوالکتریک‌ها قرار می‌گیرند. این اسلایدرها را می‌توان مستقیماً و بدون استفاده از سیستم تبدیل حرکت به محورهای انگشتان ربات وصل کرد. با تحریک هر جفت پیزوالکتریک، اسلایدر زیر آن حرکت کرده و به تبع آن انگشت وصل شده به آن نیز حرکت خواهد کرد. ساختار موتورهای طراحی شده با ابعاد، شرایط ولتاژ اعمالی و پارامترهای دیگر شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌های پیشنهادی با نرم افزار المان محدود (CAE^۴) شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی ضمن تأیید عملکرد طرح‌های پیشنهاد شده، تأثیر تنظیم پارامترهای مهمی از جمله موقعیت‌های قرار گرفتن دو محرک پیزو الکتریک، فرکانس تحریک و دامنه ولتاژ اعمالی را مشخص می‌کند. نمونه اولیه بهترین حالت‌های طراحی شده و موقعیت‌های پیزوالکتریک و فرکانس تحریک با استفاده از مدل‌سازی و نتایج شبیه سازی ارائه شده است.

واژه های کلیدی

موتور خطی پیزوالکتریک، محرک‌های دوگانه، اسلایدر، موج انتقالی

¹ - Piezoelectric Motor

² - Actuator

³ - PZT, or lead zirconate titanate (Pb[Zr(x)Ti(1-x)]O₃), piezoelectric ceramic materials

⁴ - Complete Abaqus Environment

عملکرد طرح‌ها و نیروی محرکه و سرعت اندازه‌گیری می‌شود. سپس ولتاژ، فرکانس تحریک، حالت لرزش، ابعاد و موقعیت قطعات پیزوالکتریک برای تعیین بهترین پارامترهای طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرآیند طراحی موتور خطی اولتراسونیک

در کارکردهای ظریف و کوچک همانند دست رباتیک، فضای کافی برای نصب موتور دوار سنتی وجود ندارد و بنابراین از یک موتور خطی برای عمل انگشتان رباتیک استفاده می‌شود. یک موتور خطی مشترک به دلیل مکانیسم پیچ، در جهت محور طولانی است و قرار دادن موتورها در یک دست رباتیک برای حرکت هر یک از انگشتان دشوار است. این مطالعه حرکت انگشتان را با استفاده از موتور خطی اولتراسونیک پیشنهاد کرده است که مزایای آن کوچک بودن و داشتن پاسخ سریع است. ابعاد مدل پیشنهادی از لحاظ پهنا و عرض باید در حد ۶ سانتیمتر باشد. در بهترین حالت باید پنج انگشت دست ربات توسط موتور حرکت کند و موتور قابلیت این را داشته باشد تا هر انگشت را به طور جداگانه حرکت دهد. استفاده از یک قطعه متحرک در موتور و وصل آن به تمام انگشتان در مطالعات ذکر شده پیشنهاد شده بود ولی مشکل این روش‌ها این است که اول برای تبدیل و انتقال حرکت موتور به انگشتان قطعات زیادی لازم است که سبب کاهش سرعت، افزایش استهلاک و درگیری‌های مکانیکی و افزایش احتمال خرابی در این حالت شده و ثانیاً سبب افزایش وزن و ابعاد می‌شود.

در ابتدا قبل از بیان طراحی و ارائه آن به بررسی مختصر مدل دو تکه‌ای موتور پیزو الکتریک پرداخته می‌شود. شکل ۱- یک نمونه از مدل موتور پیزو الکتریک خطی با محرک‌های دوگانه که در تحقیق [۱۲] پیشنهاد شده است، را نشان می‌دهد. همانطور که در این تصویر نشان داده شده است، محرک‌های پیزوالکتریک در دو طرف قرار دارند و با تحریک آنها به طور همزمان موجی انتقالی در استاتور این موتور ایجاد می‌شود. اجزای اصلی این موتور خطی اولتراسونیک عبارت است از دو محرک پیزوالکتریک که در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل ۱- قرار می‌گیرند، و یک استاتور خطی با دندان‌های مستطیلی شکل و مفاصل کششی در دو طرف است. دو محرک پیزوالکتریک در نزدیکی هر دو انتها قرار می‌گیرند یک اسلایدر کشویی به استاتور وصل می‌شود. به علت محدودیت فضا در یک دست رباتیک، موتور خطی اولتراسونیک پیشنهادی دارای استاتور با طول ثابت است. دو تحریک با ۹۰ درجه اختلاف فاز یعنی ولتاژهای $\sin(\omega t)$ و $\cos(\omega t)$ برای تحریک استفاده می‌شوند که ω فرکانس درایو و t زمان است. استاتور با حرکت به سمت بالا و پایین به دلیل تغییر حجم پیزوالکتریک‌ها در اثر اعمال ولتاژ متناوب، موج گذرا را تولید می‌کند. دو طرح در این تحقیق پیشنهاد می‌شود که به ترتیب بیان می‌شود. با توجه به اینکه دو انتهای استاتور به بسط کششی متصل است روشن است در قسمت‌های میانی استاتور آزادی عمل بیشتر است. بدین ترتیب برای بدست آوردن نیروی بیشتر در طرح اول پیشنهاد می‌شود که دو پیزوالکتریک در وسط قرار بگیرند. اگر دو

در یک فرکانس نسبتاً پایین مانند موتورهای اینچ ورم ۵ هستند. گروه دیگر متشکل از موتور التروسونیک است که توابع نسبتاً بالا در فرکانس رزونانس را دارند. موتور اینچ ورم به طور کلی از سه عملکرد پیزوالکتریک که در یک نوار لغزنده مونتاژ شده است، هدایت می‌شود. محرک دیگر در این مرکز برای تغییر طول آن و در هر دو طرف دیسک جهت سرکوب نمودن نوار لغزنده مورد استفاده قرار گرفته است. یک نمونه اولیه موتور اینچ ورم خطی در تحقیق [۴] معرفی شده است که عملکرد خروجی کارآمدی دارد. یک نیروی محرک رو به بالا تا ۱۵۰ نیوتن در این تحقیق معرفی شده است.

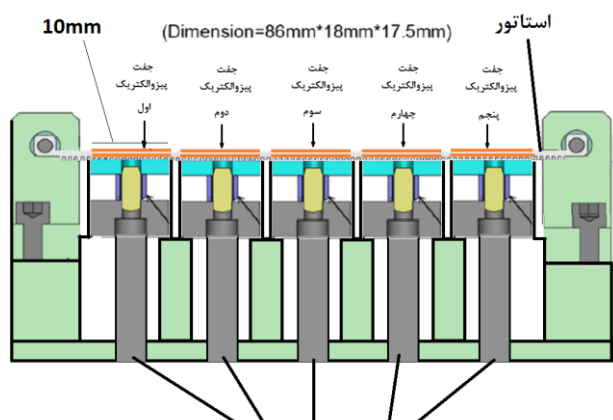
در تحقیقی دیگر، خلاصه‌ای جامع از موتورهای پیزو الکتریک را با طبقه‌بندی از ایده اولیه این موتورها تا انواع پیشرفته تر آن ارائه شده است [۵]. پویایی موتورهای اولتراسونیک نیز در تحقیق دیگری مورد مطالعه قرار گرفته و یک مدل پویا تولید شده و شبیه‌سازی و آزمایش آن صورت پذیرفته است [۶]. ویژگی‌های موتورهای خطی اولتراسونیک موج‌ایستاده و انتقالی در تحقیق [۷] بررسی شده است. این مطالعه یک تجزیه و تحلیل کامل از یک نوع موتور موج خطی انتقالی ارائه می‌دهد و به بررسی تأثیر هندسه‌های مختلف و تغییر مواد مختلف در این نوع موتور می‌پردازد [۸]. این تحقیق با استفاده از یک ساختار یک بعدی، مدل‌ها و آزمایش‌های مختلفی را برای مطالعه نتایج تحریک امواج انتقالی و لرزشی ایجاد کرده است.

در مطالعه‌ای دیگر یک ساختار تجربی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ارتعاش یک ورقه فلزی خمشی تحت تحریک دو طرفه ارائه شده است [۹]. در منبع [۱۰] نیز یک موتور خطی اولتراسونیک ایجاد شده است که از محرک‌های پیزوالکتریک دوگانه استفاده می‌شود. از یک تست عملکرد ساده برای اندازه‌گیری نیروی محرکه و سرعت نمونه اولیه استفاده شده است. در طرح مفهومی مشابه دیگری ابعاد و موقعیت‌های تکه‌های پیزوالکتریک تنظیم شده است تا تأثیر آن بر موتورهای خطی بیشتر باشد [۱۱]. در تحقیق مشابه دیگری نیز موقعیت‌های دو محرک پیزوالکتریک و فرکانس‌های اعمالی به دو تکه پیزو الکتریک تنظیم شده است [۱۲]. در تحقیقی دیگر با استفاده از محورهای انعطاف پذیر، در کارایی موتور پیزو خطی بهبود ایجاد شده است [۱۳]. در مطالعاتی دیگر نیز به ترتیب به موضوع کنترل فازی سیستم تغذیه دو مرحله‌ای متشکل از یک محرک پیزوالکتریک موتور خطی برای استفاده در ماشین کاری و موتور پیزوالکتریک خطی برای ردیاب توپوگرافی سیم‌ال‌ماس، پرداخته شده است [۱۴] و [۱۵].

در این مطالعه، دو طرح ساخت موتور پیزوالکتریک ارائه شده است. در طرح اول با قرار دادن پیزوالکتریک‌ها در وسط استاتور بیشترین میزان ارتعاش و موج انتقالی بدست می‌آید. در طرح دوم با استفاده از ۵ جفت پیزو الکتریک موتوری طراحی می‌شود که بتوان به طور مجزا هر پنج انگشت ربات را به حرکت در آورد. از تجزیه و تحلیل عناصر محدود (FEA^6) برای تأیید امکان‌سنجی شبیه‌سازی هر دو طرح استفاده می‌شود. مدل المان محدود شبیه‌سازی شده و

⁵ - inchworm

⁶ - Finite Element Analysis



محورهای انتقال حرکت به انگشتان ربات
 شکل- ۳ موتور پیزو الکتریک پیشنهادی برای حرکت دست ربات با پنج محور برای پنج انگشت

- شبیه سازی موتورهای طراحی شده با استفاده از FEA

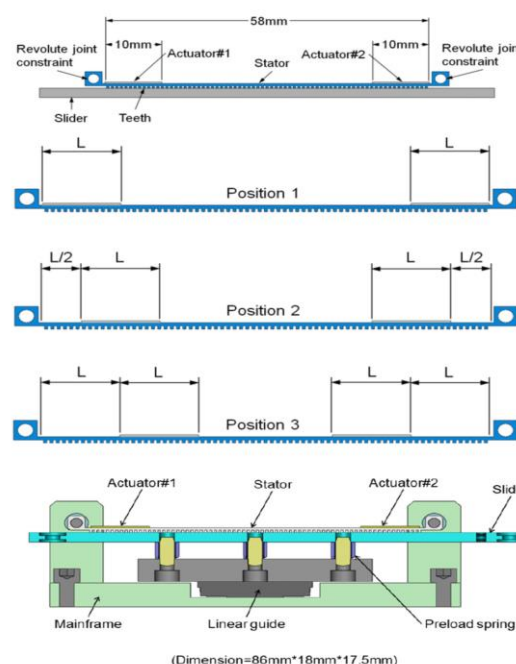
در این تحقیق از نرم افزار Abaqus برای شبیه سازی حرکات و عملکردهای موتور اولتراسونیک پیشنهادی استفاده می شود. این نرم افزار قابلیت انجام شبیه سازی های مختلف، مانند حرکت پویا، لرزش، ضربه یا تصادف و اتصال حرارتی را دارد. مشخصات مکانیکی مواد به کار رفته در طراحی موتور پیزو الکتریک اول و دوم مطابق جدول ۱- است و جنس پیزو الکتریک، استاتور و اسلایدر آن نیز مطابق با طرح پیشنهادی ذکر شده در منبع [۱۲] است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی مواد به کار رفته در طراحی موتور پیزو الکتریک

قطعه	پیزو الکتریک	استاتور	اسلایدر
مواد مورد استفاده	PZT-5H piezoelectric ceramic	Brass	Aluminum
مشخصات الاستیکی ماده (GPa)	$E_1 = 60.61$ $E_2 = 48.31$ $E_3 = 60.61$	112	68
چگالی ((kg/m ³))	7500	8780	2700
ضریب پواسون	$\nu_{12} = 0.512$ $\nu_{13} = 0.289$ $\nu_{23} = 0.408$	0.343	0.36
ثابت پیزو الکتریک Piezoelectric constant (m/V)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 741 & 0 & 0 \\ -274 & 593 & -274 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 741 \end{bmatrix}$		
گذردهی الکتریکی Electrical permittivity (F/m)	$\begin{bmatrix} 1.505 & 0 & 0 \\ 0 & 1.301 & 0 \\ 0 & 0 & 1.505 \end{bmatrix}$		

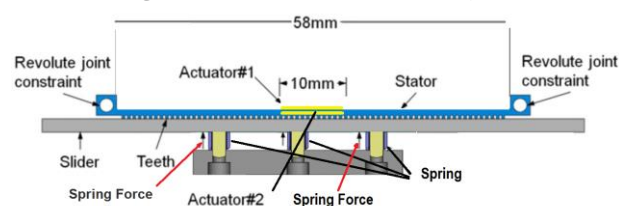
دامنه ولتاژ ۸۰ ولت و فرکانس درایو ۲۵.۱ کیلوهرتز است که برای بررسی عملکرد تغییر می یابد. پیزو الکتریک از جنس PZT-5H بوده و استاتور برای اینکه در برابر سایش مقاوم باشد از جنس آلایاژ برنج است و جنس اسلایدر لغزنده نیز به علت سبک بودن از آلومینیوم است. ضریب اصطکاک لغزشی بین سطح اسلایدر و استاتور ۰/۲ و ضریب اصطکاک سکون ۰/۱۵ تعریف شده است [۱۲]. دو تحریک سینکال $\sin(\omega t)$ به هر جفت پیزو وارد می شوند، که ω فرکانس درایو و t زمان است. پیزو الکتریک با حرکت به سمت بالا و پایین، موج انتقالی در طول استاتور دندانه دار تولید می کند. وجود دندانه ها دو نقش مهم را ایفا می کند. نقش اول آن بخشیدن خاصیت الاستیکی به استاتور برای ایجاد موج بوده و نقش دوم آن راندن اسلایدر زیر آن

پیزو الکتریک هر دو در بالای استاتور و در وسط قرار بگیرند به دلیل اشغال سطح بیشتر توسط این دو محرک پیزو الکتریک نسبت به حالتی که این دو پیزو الکتریک در دو طرف استاتور قرار می گیرند، موج ضعیف تر و به تبع آن نیروی کمتری تولید خواهد شد.



شکل ۱: طرح مدل پیشنهادی موتور پیزو الکتریک با ابعاد و محل قرار گرفتن محرک های دو گانه پیزو الکتریک [۱۲]

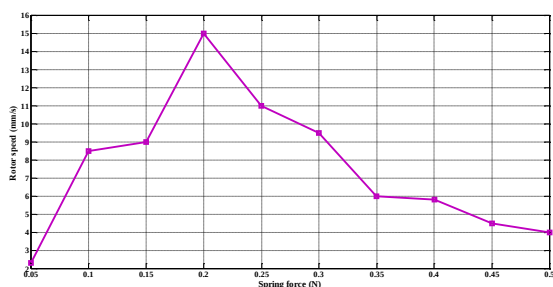
بدین ترتیب در طرح اول پیشنهاد می شود که مطابق شکل ۲- دو پیزو الکتریک در وسط استاتور و در دو طرف هم در بالا و پایین استاتور قرار بگیرند. بدیهی است در این موج بیشتری تولید شده و نیروی بیشتری نیز به آنچه که در شکل ۱- نشان داده است بدست خواهد آمد. در این حالت تغییر شکل هر دو پیزو الکتریک با هم جمع شده و نیازی به تداخل امواج و تنظیم فرکانس و موقعیت ندارد. نتایج شبیه سازی با نرم افزار آباکوس نیز این نظر را تأیید می کند.



شکل ۲: محل قرار گرفتن دو پیزو الکتریک در روبروی هم، در وسط استاتور و شکل موتور (فنرها از پایین به سمت بالا نیرو وارد می کنند و اصطکاک اسلایدر و استاتور را بیشتر می کنند)

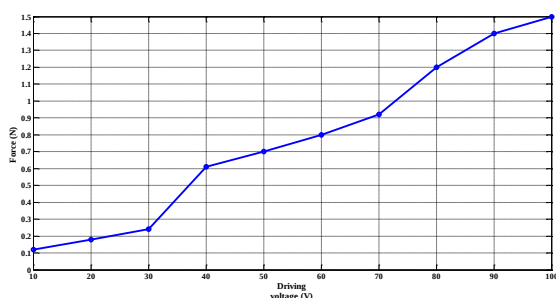
در طراحی دوم از پنج جفت پیزو الکتریک با عرض ۱۰ میلیمتر استفاده می شود. همانطور که در شکل ۳- نشان داده شده است، طراحی بگونه ای است که با تحریک هر جفت پیزو الکتریک، محور زیرین آن جابجا شده و در نتیجه یک انگشت ربات حرکت خواهد کرد. در حقیقت هر دو وجه هر جفت پیزو الکتریک در هر پنج قسمت باید به اختلاف پتانسیل اعمالی وصل باشند تا هر بار با تحریک هر کدام انگشت مورد نظر حرکت کند.

یافته و از لغزش بین استاتور و روتور کاسته می‌شود. در نتیجه حرکت انتقالی استاتور بیشتر به روتور انتقال یافته و شتاب و سرعت آن افزایش می‌یابد. ولی اگر همانطور که در شکل ۵- نشان داده شده است این نیرو از مقدار 0.2 نیوتن بیشتر شود، اصطکاک زیاد مانع حرکت روتور شده و سرعت آن کمتر خواهد شد.



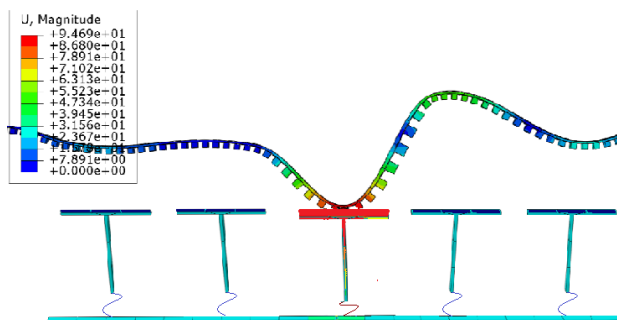
شکل ۵: سرعت روتور (mm/s) نسبت به نیروی عمودی (N) که فنرها از پایین به اسلایدر (روتور) وارد می‌کنند.

اگر دامنه ولتاژ اعمالی به محرک های پیزوالکتریک را افزایش دهیم، تغییر حجم پیزوالکتریک‌ها زیاد و در نتیجه نیروی وارد به استاتور نیز بیشتر می‌شود. این موضوع نیز در شکل ۶- نشان داده شده است.



شکل ۶: تغییرات دامنه مقدار موثر ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک (V) و نیروی وارد شده به استاتور (N)

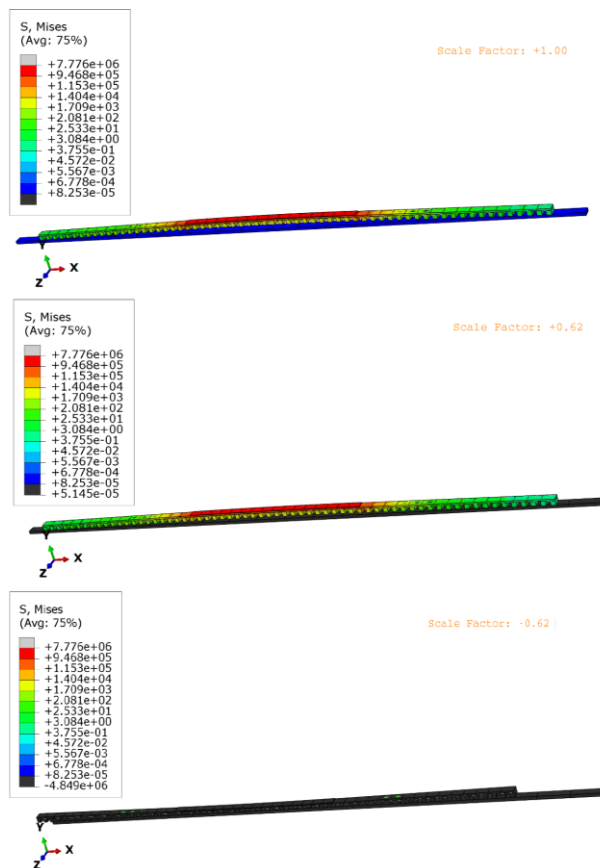
نتایج شبیه سازی مربوط به طرح دوم موتور پیزوالکتریک نیز در شکل ۷- و شکل ۸- نشان داده شده است. این شبیه‌سازی با توجه به آنچه که در شکل ۳- نشان داده شده است شکل گرفته است. در این شبیه‌سازی به دو جفت الکتریک دوم و سوم (به ترتیب شکل ۷- و شکل ۸-) ولتاژ اعمال شده است. مشخص است که نیروی عمودی حاصل از موج انتقالی سبب حرکت محور عمودی زیر جفت پیزوالکتریک می‌شود و با تحریک هر جفت پیزوالکتریک می‌توان محور عمودی زیر آن را حرکت داد.



شکل ۷: نتایج حاصل از شبیه سازی طرح موتور پیزوالکتریک دوم با نرم افزار آباکوس در تحریک جفت پیزو الکتریک سوم

است. دامنه حرکت ارتعاشات توسط فرکانس طبیعی خاص سیستم افزایش می‌یابد، و حالت‌های مختلف لرزش بدست می‌آید.

در طراحی اول که مربوط به یک جفت پیزو الکتریک در وسط و در کنار هم بود (شکل ۲-) زیر استاتور یک اسلایدر یا روتور قرار دارد که با فنری که در زیر آن قرار دارد با داندانه‌های استاتور برخورد دارد. استاتور با حرکت پیزوالکتریک در اثر تحریک و تولید موج انتقالی به روتور در راستای افقی نیرو وارد می‌کند. این حرکت یک نیروی اصطکاک ایجاد می‌کند که روتور را هدایت می‌کند. نتایج شبیه‌سازی این روش حرکت سریع روتور را تأیید می‌کند. در شکل ۴- نتایج مربوط به شبیه سازی این حالت و حرکت اسلایدر و روتور در فرکانس ۲۰۰ هرتز و ولتاژ سینوسی با مقدار موثر ۲۰ ولت را نشان داده شده است.



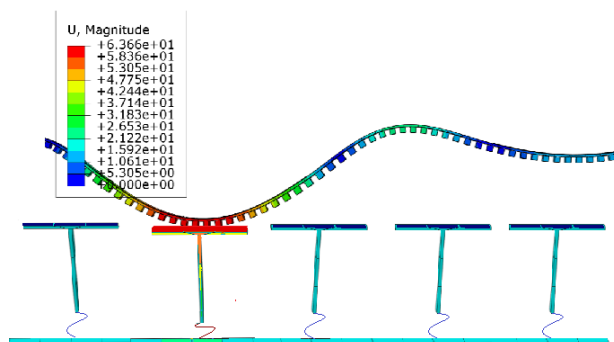
شکل ۴ نتایج مربوط به موتور التراسونیک با جفت محرک پیزوالکتریک در وسط و حرکت روتور زیرین آن در اثر موج انتقالی استاتور (ولتاژ متناوب با مقدار موثر ۲۰ ولت و فرکانس ۲۰۰ هرتز)

همانطور که در شکل ۲- نشان داده شده است، در زیر اسلایدر فنرهایی قرار داده شده است تا سطح اسلایدر به استاتور نیرو وارد کند و اصطکاک بین استاتور و اسلایدر بیشتر شود. با توجه به اینکه نیروی عمودی که دو سطح در تماس باهم به یکدیگر وارد می‌کنند ($Spring$ Force) هرچه قدر بیشتر باشد، واضح است که اصطکاک نیز بیشتر است. این موضوع روی سرعت روتور یا اسلایدر تأثیر می‌گذارد. اگر اصطکاک کم باشد استاتور و روتور روی هم می‌لغزند و سرعت پایین خواهد بود و به همین ترتیب اگر اصطکاک بیش از حد زیاد باشد، دو صفحه روی هم قفل شده و حرکت نمی‌کنند. تأثیر این موضوع را در شکل ۵- می‌توان دید. با افزایش نیروی عمودی فنر، اصطکاک افزایش

پیزوالکتریک خطی استفاده می‌شود و وجود این موتورها به دلیل دقت و سرعت پاسخ بالا بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق، دو موتور خطی پیزوالکتریک با محرک‌های دوگانه پیزوالکتریک طراحی شده است. طرح اول بگونه‌ای است که با تحریک جفت پیزوالکتریکی که در وسط قرار دارد بیشترین و سریعترین جابجایی صورت گیرد. در طرح دیگر از پنج جفت پیزوالکتریک استفاده می‌شود و اسلایدر آن نیز پنج قسمت در زیر این جفت پیزوالکتریک‌ها قرار می‌گیرند. این اسلایدرها را می‌توان مستقیماً و بدون استفاده از هرگونه سیستم پیچیده‌ای به محورهای انگشتان ربات وصل کرد. با تحریک هر جفت پیزوالکتریک، اسلایدر زیر آن حرکت کرده و به تبع آن انگشت وصل شده به آن نیز حرکت خواهد کرد. ضمن آنکه ابعاد این موتور بسیار کوچک است، سرعت اجرای دستور حرکت انگشتان دست ربات با توجه به پاسخگویی سریع این موتور بسیار افزایش می‌یابد و هر انگشت قادر خواهد بود به صورت جداگانه حرکت کند و یا قابلیت حرکت چند انگشت باهم نیز وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی مدل‌های پیشنهادی با نرم افزار المان محدود CAE، عملکرد طرح‌های پیشنهاد شده را تأیید کرده و پارامترهای موثر در آن را مشخص می‌کند.

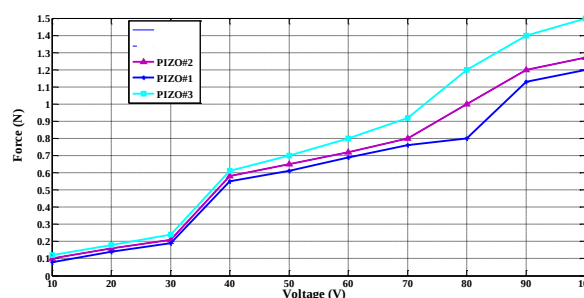
مراجع و منابع

- [1] Manbachi, A. and Cobbold, R.S., 2011. "Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection". *Ultrasound*, 19(4), pp.187-196.
- [2] Vishnevsky, V.S., Kavertsev, V.L., Kartashev, I.A., Lavrinenko, V.V., Nekrasov, M.M. and Prez, A.A., Lavrinenko Vyacheslav Vasiliev, 1977. "Piezoelectric motor structures". *U.S. Patent* 4,019,073.
- [3] Spanner, K., 2006, June. "Survey of the various operating principles of ultrasonic piezomotors". In *Proceedings of the 10th International Conference on New Actuators*.
- [4] Frank, J.E., Koopmann, G.H., Chen, W. and Lesieutre, G.A., 1999, June. "Design and performance of a high-force piezoelectric inchworm motor. In *Smart Structures and Materials 1999*" *Smart Structures and Integrated Systems* (Vol. 3668, pp. 717-723). International Society for Optics and Photonics.
- [5] Spanner, K. and Koc, B., 2016, March. "Piezoelectric motors, an overview". In *Actuators* (Vol. 5, No. 1, p. 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [6] Smith, G.L., Rudy, R.Q., Polcawich, R.G. and DeVoe, D.L., 2012. "Integrated thin-film piezoelectric traveling wave ultrasonic motors". *Sensors and Actuators A: Physical*, 188, pp.305-311.
- [7] Fernandez, J.M. and Perriard, Y., 2003, October. "Comparative analysis and modeling of both standing and travelling wave ultrasonic linear



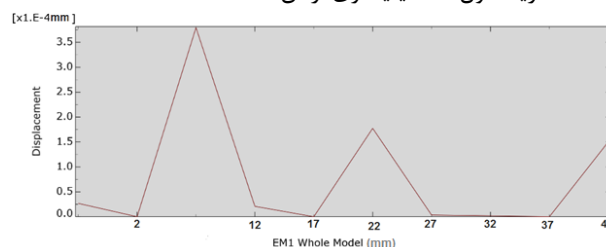
شکل ۸: نتایج حاصل از شبیه سازی طرح موتور پیزوالکتریک دوم با نرم افزار آباکوس در تحریک جفت پیزو الکتریک دوم

در طرح دوم به دلیل اینکه محل‌های جفت پیزو الکتریک‌ها متفاوت است نیروهای وارد به اسلایدرهای زیر آن نیز در یک مقدار ولتاژ متفاوت خواهد بود. علت این امر آزادی بیشتر روتور در نقاط میانی و محدودیت کششی آن در نقاط انتهایی به دلیل اتصال به مفاصل نگهدارنده است. در شکل ۹- نتایج مربوط به نیروی عمودی حاصل از تحریک دو جفت پیزوالکتریک اول و دوم در ولتاژ ۸۰ ولت با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز نشان داده شده است.



شکل ۹: نیروی عمودی حاصل از تحریک جفت پیزوالکتریک اول و دوم و سوم

با تغییرات ولتاژ و اعمال ولتاژ متفاوت به جفت پیزوالکتریک اول و دوم و سوم میزان تغییرات حجم پیزوالکتریک‌ها متفاوت شده و می‌توان نیروهای حاصل از آن‌ها را با تنظیم ولتاژهای متفاوت، برابر کرد. بردار جابجایی استاتور نیز بر حسب میلیمتر در اثر اعمال ولتاژ موثر ۸۰ ولت به صورت ضربه‌ای، هنگامیکه جفت پیزوالکتریک اول تحریک می‌شود نشان داده شده است. محور افقی فاصله نقاط از سمت چپ موتور و بعد از مفاصل نگهدارنده استاتور است یعنی از سمت چپ جفت الکتریک اول تا ۴ میلیمتری از آن است.



شکل ۱۰: جابجایی عمودی نقاط مختلف استاتور از سمت پیزو الکتریک اول تا فاصله ۴۲ میلیمتری در اثر تحریک جفت پیزوالکتریک اول

نتیجه گیری

در ساخت برخی از تجهیزات پزشکی و ساخت ربات و... که فضای کافی برای نصب موتور دوار سنتی وجود ندارد، از موتورهای

- with dual piezoelectric actuators". *Microsystem Technologies*, pp.1-8.
- [13] Chen, X., Li, M., Zhang, H., Lu, Q. and Lyu, S., 2020. "Improvement on the Structure Design of a Kind of Linear Piezoelectric Motor with Flexible Drive-Foot". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21(1), pp.81-89.
- [14] Bani Melhem MK, Simic M, Lai CY, Feng Y, Ding S. "Fuzzy control of the dual-stage feeding system consisting of a piezoelectric actuator and a linear motor for electrical discharge machining. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B". *Journal of Engineering Manufacture*. 2019 Dec 3:0954405419889201.
- [15] Cui, C., Li, Z., Zhang, Y. and Wang, Y., 2019. "Linear Piezoelectric Motor for Topography Detector of Diamond Wire". *IEEE Access*, 7, pp.166975-166983.
- motor". In *IEEE Symposium on Ultrasonics*, (Vol. 2, pp. 1770-1773). IEEE.
- [8] Fernandez, J.A. and Perriard, Y., 2004, August. "Characteristics, modeling and simulation of a traveling wave ultrasonic linear motor". In *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004 (Vol. 3, pp. 2247-2250). IEEE.
- [9] Gabai, R. and Bucher, I., 2009. "Excitation and sensing of multiple vibrating traveling waves in one-dimensional structures". *Journal of sound and vibration*, 319(1-2), pp.406-425.
- [10] Kim, G.H., Park, J.W. and Jeong, S.H., 2009. "Analysis of dynamic characteristics for vibration of flexural beam in ultrasonic transport system". *Journal of mechanical science and technology*, 23(5), pp.1428-1434.
- [11] Hariri, H., Bernard, Y. and Razek, A., 2015. "Dual piezoelectric beam robot: The effect of piezoelectric patches' positions". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(18), pp.2577-2590.
- [12] Yang, C.P., Xie, K.J. and Chang, J.Y., 2019. "Design and simulation of an ultrasonic linear motor