

## بررسی ساختارها، مقایسه شاخص‌های عملکرد و تکنولوژی ساخت میکروموتورها

آرش حسن پور اصفهانی

کارشناس ارشد مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر  
 ahasanpour@ut.ac.ir

### چکیده

امروزه میکروموتورها کاربردهای زیادی در صنایع مدرن دارد، با این حال منابع چندانی در معرفی این نوع موتورها در دسترس نیست. برای رفع این مشکل و ایجاد زمینه مناسب برای آشنایی پژوهشگران با این تکنولوژی مدرن، در این مقاله بررسی ابعاد مختلف این نوع از موتورها مورد توجه قرار گرفته است. ابتدا ساختارهای مختلف این موتورها و چالش‌های مربوط به هر ساختار بررسی شده و در ادامه مقایسه‌ای بین ساختارهای مختلف از لحاظ معیارهایی چون راندمان، چگالی انرژی، قدرت بر واحد حجم و ابعاد نیروهای تولیدی صورت گرفته، مزایا و معایب هر کدام بررسی شده است. همچنین روش‌های ساخت میکروموتورها و برخی از کاربردهای آنها شرح داده شده است.

### واژه‌های کلیدی

میکروموتور، ساختار، مقایسه، روش‌های ساخت، کاربردها.

### ۱- مقدمه

ریزنسورها دارای تعداد کمتری هستند و هنوز در مراحل اولیه قرار دارند. ریز محرکه‌ها کاربردهای مختلفی نظیر پمپ‌ها، میکرودرایوها و میکروربات‌ها، دریچه‌ها دارد. یکی از شاخه‌های اصلی ریزمحرکه‌ها میکروموتورها است. میکروموتورها انواع مختلفی دارند. این انواع در دسته‌های مختلفی مانند مکانیکی، الکتریکی، اپتیکی، شیمیایی قرار می‌گیرند [۱]. در ادامه هر جا صحبت از میکروموتور می‌شود منظور میکروموتورهای الکتریکی است.

میکروموتورها به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. سه دسته اصلی آن عبارتند از:

میکروموتورهای الکترواستاتیک

میکروموتورهای الکترومغناطیسی

میکروموتورهای پیزوالکتریک<sup>۵</sup>

تقسیم بندی فوق بر اساس عامل ایجاد حرکت در میکروموتورها انجام شده است. در میان این میکروموتورها میکروموتورهای الکترواستاتیک به دلیل برتری‌هایی که دارند و ساخت ساده‌تر بیشتر مورد توجه می‌باشند. ابعاد میکروموتورها بسیار کوچک است و اغلب کمتر از یک میلی‌متر است [۳]. در ساخت میکروموتورها از روش‌های مربوط به ساخت قطعات نیمه‌هادی و تکنولوژی میکروالکترونیک

سیستم‌های الکترومکانیکی از نظر اندازه‌ی ابعاد به سه دسته تقسیم می‌شوند [۱]:

سیستم‌های الکترومکانیکی معمول<sup>۱</sup>

سیستم‌های الکترومکانیکی در حوزه‌ی میکرو<sup>۲</sup> (MEMS)

سیستم‌های الکترومکانیکی در حوزه‌ی نانو<sup>۳</sup> (NEMS)

تئوری سیستم‌های الکترومکانیکی معمول و سیستم‌های الکترومکانیکی در حوزه‌ی میکرو بر پایه‌ی مکانیک و الکترومغناطیس کلاسیک بنا شده ولی سیستم‌های الکترومکانیکی در حوزه‌ی نانو بر پایه‌ی تئوری کوانتومی و نانو الکترومکانیک بنا شده است. ابزار تحلیل سیستم‌های MEMS، مکانیک کلاسیک لاگرانژ، نیوتن و قوانین ماکسول در الکترومغناطیس است.

صنایع MEMS در سال‌های اخیر دارای پیشرفت چشمگیری بوده است [۲]. کاربرد این محصولات نیز روز به روز در حال افزایش است. MEMS دارای شاخه‌های مختلفی است که برخی از آنها عبارتند از: میکروسنسورها، ریزمحرکه‌ها<sup>۴</sup>، ریزساختارها<sup>۴</sup> ریزمحرکه‌ها یکی از دسته‌های اصلی MEMS است که خود شامل شاخه‌های مختلفی است [۱]. محرکه به وسیله‌ای گفته می‌شود که انرژی را به حرکت قابل کنترل تبدیل می‌کند. ریز محرکه‌ها نسبت به

شبیه‌سازی هایبرید سیستم با دینامیک‌های غیرخطی مقایسه شده‌است.

در جدول (۱) زمان اجرای روش شبیه‌سازی بیان شده‌است. چارچوب کاری شبیه‌سازی بر مبنای ns-2، بسته عامل/پلانت را به کار می‌برد و انعطاف‌پذیرترین روش در شبیه‌سازی دینامیک‌های پلانت و شبکه‌های پیچیده‌ی دلخواه می‌باشد. در مجموع برای شبیه‌سازی دقیق دینامیکی سیستم می‌توان هر کدام از روش‌های فوق را به کار برد. اگرچه روش‌های فوق‌الذکر با حداقل دقت می‌باشند اما تقریب درون خطی اولر با تایم‌استپ ۱ ms بهترین دقت را با توجه به زمان شبیه‌سازی می‌دهد.



شکل ۱- میکروموتور فراصوتی

## ۲-۱- میکروموتورهای الکترومغناطیسی

در این دسته از میکروموتورها، از خاصیت و نیروی الکترومغناطیسی برای حرکت استفاده می‌شود. به علت مزیت‌های زیادی که میکروموتورهای الکترواستاتیک بر میکروموتورهای الکترومغناطیسی در مقیاس‌های پائین دارند، استفاده از موتورها الکترومغناطیسی در حوزه میکرو محدود است [۲]. میکروموتورهای الکترومغناطیسی برای کاربردهایی که در آن ولتاژ راه اندازی زیادی در دسترس نباشد یا استفاده از ولتاژ زیاد ایمن نباشد استفاده می‌شود [۶]. به عنوان مثال در کاربردهای پزشکی نظیر جراحی و ... از این نوع میکروموتورها استفاده می‌شود. اصول کار این میکروموتورها عیناً مانند موتورهای الکترومغناطیسی معمول است از این جهت از شرح آن صرف‌نظر می‌کنیم.

مساله و مشکل اصلی در ساخت میکروموتورهای الکترومغناطیسی ساخت سیم‌پیچ و هسته مغناطیسی است زیرا این دو با تکنولوژی معمول مدارهای مجتمع<sup>۱</sup> (IC) قابل ساخت نیستند [۷]. به این دلیل اندازه این میکروموتورها کمی بزرگتر از سایر انواع بوده و گاهی تا چند موتورهای الکترومغناطیسی با ابعادی تا چند میلی‌متر را نیز میکروموتور می‌نامند. در شکل (۲) یک میکروموتور الکترومغناطیسی دیده می‌شود. در دهه‌ی ۹۰ برای اولین بار متخصصین موفق به ساخت المان‌های مورد نیاز در میکروموتورهای الکترومغناطیسی مانند سیم‌پیچ مجتمع و هسته مغناطیسی در حوزه‌ی میکرو شدند [۶]. اولین میکروموتور

استفاده می‌شود [۳]. ساخت میکروموتورها بیشتر به وسیله‌ی متخصصین ساخت قطعات نیمه‌هادی صورت می‌گیرد. تولید میکروموتورها در حال حاضر بیشتر به صورت نمونه‌سازی است و هنوز به صورت وسیع تجاری نشده است. میکروموتورها در حال حاضر در پخش دارو [۴]، وسایل جراحی [۵] و ... کاربرد دارند با این حال هنوز کاربرد این تکنولوژی زیاد نیست اما پیش‌بینی می‌شود با توسعه و پیشرفت سریع صنایع MEMS، در آینده نزدیک شاهد کاربردهای قابل توجه‌ای برای این نسل از موتورها باشیم [۳].

## ۲- انواع میکروموتورها

همان طور که در مقدمه هم اشاره شد میکروموتورها دارای انواع مختلفی هستند. سه دسته اصلی آن عبارتند از:

۱- میکروموتورهای الکترواستاتیک

۲- میکروموتورهای الکترومغناطیسی

۳- میکروموتورهای پیزوالکتریک

در ادامه به بررسی این سه دسته می‌پردازیم.

### میکروموتورهای پیزوالکتریک :

در از خاصیت مواد پیزوالکتریک برای حرکت استفاده می‌کنند. مواد پیزوالکتریک موادی هستند که وقتی تحت استرس مکانیکی قرار می‌گیرند در آنها بار الکتریکی ایجاد می‌شود و برعکس با اعمال میدان الکتریکی به آنها تغییر فرم مکانیکی در آنها ایجاد می‌شود. خاصیت پیزوالکتریک برای اولین بار توسط برادران کوریه<sup>۲</sup> در سال ۱۸۸۰ کشف شد. اولین بار به صورت یک کریستال طبیعی در سال ۱۹۲۰ به کار برده شد و بعدها به صورت پلیمر هم ساخته شد.

دو دسته اصلی میکروموتورهای پیزوالکتریک عبارتند از:

۱- میکروموتورهای پیزوالکتریک پله‌ای خطی

۲- میکروموتورهای فراصوتی<sup>۳</sup>

میکروموتورهای مافوق صوت یا فراصوتی در فرکانس بین ۴۰ تا ۴۵ کیلو هرتز کار می‌کنند که در نتیجه صدای آنها برای انسان قابل شنیدن نیست و نویز صوتی ندارند. این نوع از میکروموتورها معمولاً ابعادی در حدود چند میلی‌متر دارند ولی با این حال با نام میکروموتور خوانده می‌شوند. اولین بار این میکروموتورها در سال ۱۹۸۰ و در ژاپن ساخته شد.

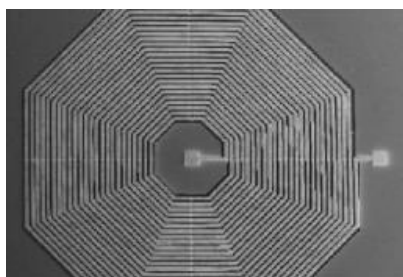
میکروموتورهای فراصوتی خود به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- موتورهای موج ایستا<sup>۴</sup>

۲- موتورهای موج رونده<sup>۵</sup>

در شکل (۱) یک نمونه از این موتورها دیده می‌شود.

روش‌های شبیه‌سازی خطی (حل ODE خارجی و اولر خطی با استپ تایم ۱ms و ۰/۱ms) با شبیه‌سازی هایبرید سیستم با دینامیک‌های خطی مقایسه شده‌است؛ همچنین روش‌های غیرخطی (تقریب غیرخطی اولر با زمان‌های استپ ۱ms و ۰/۱ms) با



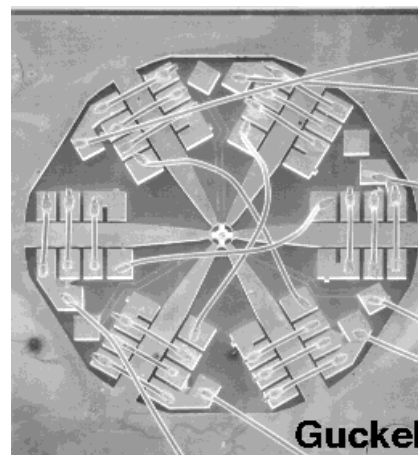
شکل ۳- سیم پیچ فشرده مسطح

### ۲-۱-۱- میکروموتورهای رلوکتانس متغیر [۶]

اصول کار و عملکرد این میکروموتور مانند موتورهای رلوکتانس متغیر معمول است. این میکروموتور دو دسته قطب برجسته دارد. دسته اول روی استاتور است که روی این قطبها سیم پیچ فازها پیچیده شده است. دسته دوم روی روتور است. این موتور به آهنربای دائم جهت تولید گشتاور نیازی ندارد. سیم پیچی استاتور در یک یا چند دسته مرتب شده است و باید به صورت مجزا و مستقل یا جفتی تحریک شوند تا قطب مجاور روتور به قطب تحریک شده استاتور جذب شود. وقتی که قطب روتور و استاتور در یک راستا واقع شد، باید فاز تحریک شده خاموش شود و یک فاز دیگر تحریک شود تا چرخش روتور به طور پیوسته ادامه یابد.

در مقایسه میان مدارهای مغناطیسی معمول و مدارهای مغناطیسی در حوزه میکرو، ملاحظه می شود که مدارهای مغناطیسی در حوزه میکرو معمولاً رلوکتانس مغناطیسی بیشتری دارند. و این به خاطر محدودیت در رسیدن به ضریب گذردهی مغناطیسی و ضخامت مورد نظر برای هسته مغناطیسی است. در تمام مدارهای مغناطیسی در حوزه میکرو رلوکتانس هسته در مقابل فاصله هوایی قابل قیاس است و بنابراین از اهداف مهم در ساخت این میکروموتورها کاهش رلوکتانس مغناطیسی آنها است. اگر نتوانیم ضریب گذردهی مغناطیسی را زیاد کنیم باید مدار را از لحاظ هندسی اصلاح نماییم. مهمترین عوامل در اصلاح هندسی مدار طول و سطح مقطع عرضی هسته است. در مواردی که برای تغییر سطح مقطع محدودیت داریم بهترین راه برای کاهش رلوکتانس کاهش طول هسته است. این روش کاهش رلوکتانس مغناطیسی می تواند روش مناسبی برای طراحی میکروموتورهای رلوکتانس متغیر باشد. مدل بهبود یافته ای این موتور در شکل (۴) دیده می شود. در این مدل قطبهای سیم پیچی شده برای همه فازها به صورت با پلاریته مخالف بسته شده است که این باعث می شود که مسیر شار کوتاه شده و در نتیجه رلوکتانس مغناطیسی مسیر کاهش یابد. در ضمن این طرح یک هسته مغناطیسی ایزوله برای عبور شار هر فاز ایجاد می کند و به عبارت دیگر شار هر فاز از فازهای دیگر مجزا خواهد بود. با این طرح می توان رلوکتانس مغناطیسی مسیر را تا ۵۰٪ کاهش داد [۶].

الکترومغناطیسی با ابعاد کمتر از یک میلی متر در سال ۱۹۹۳ و در دانشگاه ویسکانسین<sup>۱۱</sup> ساخته شد. این موتور شش قطب استاتور و چهار قطب روتور داشت و بر اساس تکنولوژی LIGA<sup>۱۲</sup> ساخته شد.



شکل ۲- میکروموتور الکترومغناطیسی

یکی از مهمترین اجزا میکروموتورها سیم پیچ استاتور آنها است و ساخت آن از مشکلات و مسائل اصلی در این نوع از میکروموتورها است. یکی از مسائل مهم و مطرح در ساخت میکروموتورها ساخت سیم پیچ فشرده برای آنها است. همان طور که می دانید میدان مغناطیسی در این موتورها باید از طریق گردش جریان در هادیها ایجاد شود و این مستلزم ساخت هادیهایی در حوزه میکرو است. ساخت این سیم پیچها با ظهور تکنولوژیهای جدید در عرصه ساخت ادوات MEMS مانند تکنولوژی LIGA و دیگر تکنولوژیهای مربوطه امکان پذیر شد. در دانشگاه فنی کالیفرنیا Caltech<sup>۱۳</sup> نیز به وسیله تکنولوژیهای Surface Micromachining و نیز Bulk Micromachining سیم پیچهای فشرده برای یک میکروموتور مغناطیسی ساخته شده است [۸].

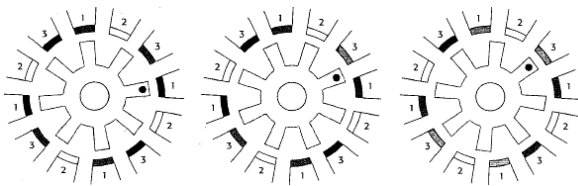
در میکروموتورها سیم پیچ مسطح بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. دلیل این مطلب آن است که اولاً ساخت این سیم پیچها ساده تر است و ثانیاً این سیم پیچها به یک یا دو نقطه ای تماس برای ایجاد حلقه ای جریان نیاز دارد در حالی که در نوع معمول در هر دو نقطه ای تماس بین لایه بالا و پائین مس نیاز است که این باعث بالا رفتن مقاومت در نقاط اتصال می شود که این مطلوب نیست [۷]. در شکل (۳) یک نمونه ساخته شده دیگر هم از سیم پیچ مسطح دیده می شود.

میکروموتورهای الکترومغناطیسی انواع مختلفی دارند که در این میان می توان به میکروموتورهای رلوکتانس متغیر<sup>۱۴</sup>، آهنربای دائم، القایی و میکروموتورهای الکترومغناطیسی لنگ<sup>۱۵</sup> اشاره کرد [۹-۱۲]. دو نوع اول یعنی میکروموتورهای رلوکتانس متغیر و آهنربای دائم بیشتر از بقیه مرسوم هستند

در این میان دو دسته اول از بقیه مهمتر است و اکثراً میکروموتورهای الکترواستاتیک ساخته شده در این دو گروه قرار می‌گیرند.

### ۲-۲-۱- میکروموتورهای الکترواستاتیک ظرفیت متغیر

این میکروموتورها خود به دو دسته پله‌ای و سنکرون تقسیم می‌شوند. طرز کار آنها شبیه به هم و بسیار ساده است. شمای یک میکروموتور الکترواستاتیک را در شکل (۵) می‌بینید.



شکل ۵- میکروموتور الکترواستاتیک و عملکرد آن

ولتاژی به الکترودهای استاتور اعمال می‌شود که باری را روی روتور هادی القا می‌کند و روتور می‌چرخد و الکترودهای روتور و استاتور در راستای هم قرار می‌گیرند که این حرکت باعث افزایش انرژی میدان الکتریکی می‌شود [۱۵].

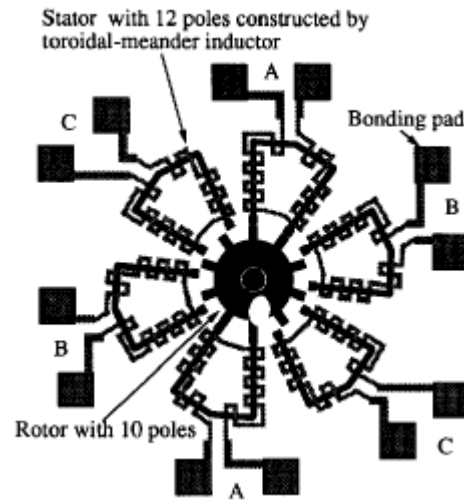
در نوع پله‌ای هر فاز با یک ولتاژ جداگانه و به طور مستقل تحریک می‌شود و این باعث یک حرکت پله‌ای روتور شده سپس فاز بعدی تحریک می‌شود. زاویه‌ای که موتور در هر پله طی می‌کند در دقت موتور برای کاربرد در سیستم‌های کنترل موقعیت مهم است و هرچه این زاویه کمتر باشد مطلوب‌تر است این زاویه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵].

$$\theta = 2\pi \left( \frac{1}{n_s} - \frac{1}{n_r} \right) \quad (1)$$

که در آن  $n_s$  و  $n_r$  به ترتیب تعداد قطب‌های استاتور و روتور هستند. در این موتورها به علت عملکرد غیرپیوسته باید گشتاور راه‌اندازی زیاد باشد. اگر ظرفیت الکترودهایی که ولتاژ به آنها اعمال شده C باشد، گشتاور از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵].

$$T = \frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta} \quad (2)$$

این گشتاور برای یک میکروموتور با ابعاد عادی برای ولتاژ درایو ۱۰۰ ولت در حد پیکو نیوتن متر است. برای حداکثر کردن گشتاور



شکل ۴- میکروموتور رلوکتانس متغیر اصلاح شده

### ۲-۱-۲- میکروموتورهای الکترومغناطیسی آهنربای دائم [۱۳]

در این نوع از میکروموتورها از آهنربای دائم برای ساختن روتور استفاده می‌شود. این میکروموتورها انواع مختلفی دارند که عبارتند از:

میکروموتورهای خطی با آهنربای لغزان<sup>۱۶</sup>

میکروموتورهای خطی با آهنربای غلتان<sup>۱۷</sup>

میکروموتورها با آهنربای چرخان

میکروموتورها با آهنربای لغزان با دو درجه آزادی<sup>۱۸</sup>

اصول کار این میکروموتورها همانند موتورهای آهنربای دائم بدون جاروبک<sup>۱۹</sup> است و سیم پیچ‌های این موتورها به طور مستقل با جریان مربعی و به صورت متوالی در بازه زمانی خاصی تحریک می‌شود.

### ۲-۲- میکروموتورهای الکترواستاتیکی

این میکروموتورها وسیع‌ترین دسته میکروموتورها هستند. مزایای زیادی که این میکروموتورها دارند موجب استفاده زیاد از آنها می‌شود. این موتورها با استفاده از نیروی الکترواستاتیک ایجاد حرکت می‌کنند. برای اولین بار تریمر<sup>۲۰</sup> در سال ۱۹۸۷ دو طرح برای میکروموتورهای الکترواستاتیک ارائه کرد و آنها را شبیه‌سازی کرد [۱۴]. اولین نمونه ساخته شده از این موتورها یک میکروموتور الکترواستاتیک ظرفیت متغیر بود که در سال ۱۹۸۸ در دانشگاه برکلی ساخته شد [۱۵]. میکروموتورهای الکترواستاتیک انواع مختلفی دارند که برخی از آنها عبارت است از:

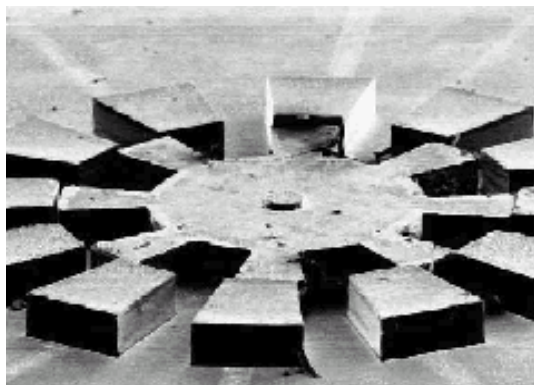
میکروموتورهای الکترواستاتیک ظرفیت متغیر (VC)

میکروموتورهای الکترواستاتیک لنگ (Wobble)

میکروموتورهای الکترواستاتیک القایی

میکروموتورهای القایی شبه استاتیک

مقارن در دور محور قرار گرفته‌اند بنابراین نیروهای جذبی در جهت شعاعی همدیگر را خنثی می‌کنند. این مطلب در مورد میکروموتورهای پله‌ای هم صدق می‌کند. بهینه‌سازی شکل و ابعاد هندسی این موتورها می‌تواند به بهبود گشتاور آنها و کاهش ولتاژ تغذیه کمک کند [۱۷ و ۱۸].



شکل ۷- میکروموتور الکترواستاتیک ظرفیت متغیر پله‌ای با تکنیک LIGA

#### ۲-۲-۲- میکروموتورهای الکترواستاتیک لنگ

به این میکروموتورها میکروموتورهای هارمونیک هم می‌گویند [۱۹]. شمای کلی آن در شکل (۸) دیده می‌شود. همان طور که در شکل هم پیداست روتور در درون حفره‌ای که در استاتور وجود دارد قرار می‌گیرد. همان طور که در شکل (۸) هم دیده می‌شود استاتور از قطعات<sup>۲۳</sup> مجزایی ساخته شده که از هم به وسیله عایق جدا شده‌اند. در این مدل استاتور از هشت قطعه ساخته شده است. روتر نیز از جداره داخلی استاتور به وسیله عایق ایزوله می‌شود. طرز کار این موتور به این صورت است که ابتدا بین قطعه اول و روتور ولتاژی اعمال می‌شود در نتیجه روتور جذب شده و در نقطه‌ای مثل RP با جداره استاتور تماس پیدا می‌کند. سپس ولتاژ به قطعه مجاور سوئیچ می‌شود و باعث می‌شود که روتور جذب این قطعه شده و در دیواره استاتور بغلتد. در ادامه ولتاژ مرتباً با فرکانس خاصی روی قطعات سوئیچ شده و روتور هم به غلتیدن ادامه می‌دهد [۲۰].

در این عمل مرکز روتور با فرکانس  $\omega_r$  حول محور استاتور می‌چرخد که این فرکانس در شرایط پایدار با فرکانس تغذیه استاتور  $\omega_s$  که در آن قطعات استاتور یک بار پیموده می‌شوند برابر است.

روتور در یک بار پیمودن دیواره استاتور بدون لغزش مسیری طولانی‌تر از محیط خودش را طی می‌کند. این اختلاف در طول مسیرها باعث تفاضل در چرخش روتور و استاتور می‌شود. فرکانس

راه‌اندازی باید پس از هر حرکت روتور در موقعیتی قرار گیرد که قطب روتور نزدیک به قطب استاتوری که قرار است در مرحله بعد تحریک شود با آن زاویه ای داشته باشد که گشتاور ماکزیمم شود. از مسائل مهم دیگر کاهش اصطکاک است. این کار به سه روش صورت می‌گیرد [۱۵]. در اولین روش ضخامت روتور را کمتر از استاتور می‌گیرند که این باعث ایجاد یک مولفه عمود بر سطح روتور در میدان الکتریکی می‌شود. این مولفه باعث می‌شود که نیرویی به طرف بالا بر روتور وارد شود. هرچند که این نیرو برای غلبه بر نیروی گرانش زمین کافی نیست ولی به علت کاهش نیروی عمود بر سطح باعث کاهش نیروی اصطکاک می‌شود. راه دوم استفاده از پوشش<sup>۲۲</sup> است که روتور بر روی آن سوار شده و باعث کاهش سطح تماس روتور و لایه زیرین می‌شود.

راه حل سوم این است که به جای استفاده توام از پلی سیلیکن در لایه زیرین و روتور، از آن فقط در روتور استفاده کنند و در لایه زیرین از نیتريد سیلیکن استفاده کنند چرا کریستال اصطکاک میان دو لایه پلی سیلیکن بیشتر از اصطکاک میان یک لایه پلی سیلیکن و یک لایه نیتريد سیلیکن است. یک نمونه از این میکروموتورها در شکل (۶) دیده می‌شود.



شکل ۶- میکروموتور الکترواستاتیک ظرفیت متغیر پله‌ای

گشتاور این میکروموتورها کم است. با ظهور تکنیک LIGA میکروموتورهایی با روتور و استاتور ضخیم‌تر ساخته شد که آن مساله باعث افزایش گشتاور تولیدی توسط این میکروموتورها شد. در شکل (۷) یک میکروموتور الکترواستاتیک ظرفیت متغیر پله‌ای که به وسیله تکنیک LIGA ساخته شده دیده می‌شود. نوع سنکرون نیز از لحاظ عملکرد و ساختار کلی مانند نوع پله‌ای است. ولی تغذیه آن مثل موتورهای سنکرون معمولی، در سه فاز صورت می‌گیرد. با اعمال ولتاژ متناوب به الکترودهای استاتور روتور حرکت می‌کند [۱۶]. الکترودهای هم فاز در استاتور به طور

دارند. آنها را می‌توان به راحتی در ابعاد کوچک ساخت و راندمان بالایی دارند. معایب: ذرات گرد و غبار در فاصله‌ی هوایی آنها باعث شکست الکتریکی می‌شود. عمر کوتاه و گشتاور کوچکی دارند. ولتاژ کار آنها بالاست.

### ۳-۲- میکروموتورهای الکترومغناطیسی

مزایا: نیروی بالایی دارند. قدرت خروجی آنها زیاد است. به آلودگی فاصله‌ی هوایی حساس نیستند. ولتاژ کار پایین و قابلیت اطمینان بالایی دارند.

معایب: ساختمان آنها پیچیده است. ساخت سیم‌پیچ آنها مشکل است. راندمان پایینی دارند. در مقیاس‌های پایین برتری ندارند. برای مقایسه میکروموتورها مهمترین معیار اثر مقیاس<sup>۲۵</sup> کوچک است. بعضی از پارامترهای فیزیکی به مقیاس و اندازه حساس هستند ولی بعضی دیگر این خاصیت را ندارند. به این خصیصه اثر مقیاس<sup>۲۶</sup> گویند. L را مشخصه طول<sup>۲۷</sup> میکروموتور تعریف می‌کنیم [۲]. فرض می‌کنیم با کم شدن L تمام ابعاد موتور با یک مقیاس و ضریب مشخصی کوچک می‌شوند.

اثر مقیاس بر نیروی الکترومغناطیسی [۲]: در میکروموتورهای جریان مستقیم معمول ابتدا سیم‌پیچ آرمیچر دارای انرژی می‌شود. تقابل بین هادی‌های حامل جریان و میدان مغناطیسی فاصله هوایی تولید نیروی الکترومغناطیسی می‌کند. اگر میانگین چگالی میدان روی آرمیچر  $B_{\delta}(av)$  و جریان هادی‌ها  $I_a$  باشد در نتیجه بر اساس قانون لورنتز:

$$F = Z_a \cdot B_{\delta}(av) \cdot l \cdot I_a \quad (4)$$

که در آن  $Z_a$  تعداد هادی‌های موثر است و با توجه به اینکه:

$$B_{\delta}(av) = \frac{\phi}{l\tau} \quad (5)$$

$$\phi = K_f I_f \quad (6)$$

داریم:

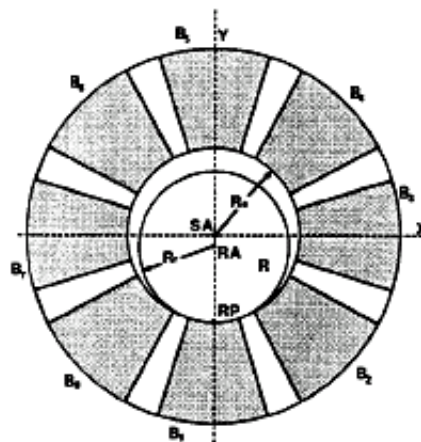
$$F = Z_a \frac{K_f I_f}{\tau} I_a \quad (7)$$

اگر فرض کنیم که چگالی سطحی جریان ثابت باشد پس  $J \propto [L^0]$  و در نتیجه  $I \propto [L^2]$  و  $F \propto [L^3]$  پس با کاهش ابعاد، نیروی الکترومغناطیسی با درجه ۳ کاهش می‌یابد. این مطلب نشان می‌دهد که در ابعاد کوچک اثر این نیرو بسیار کم می‌شود.

### ۳-۳- اثر مقیاس بر نیروی الکترواستاتیک [۲]

عملکرد میکروموتورهای الکترواستاتیک با خازن متغیر کاملاً شبیه به خازن با صفحات موازی است. وقتی ولتاژ بایاس V به یک جفت الکترود روتور و استاتور اعمال می‌شود، انرژی الکتریکی برابر است با:

خروجی روتور که روی شفت وجود دارد با فرکانس لنگ خوردن رابطه زیر را دارد:



شکل ۸- شمای کلی یک میکروموتور الکترواستاتیک لنگ

$$\omega_r = \omega_w \left[ \frac{R_s}{R_r} - 1 \right] \quad (3)$$

که در این رابطه شعاع داخلی استاتور و شعاع خارجی روتور است. در نتیجه سرعت روتور می‌تواند برابر، کوچکتر و یا بزرگتر از سرعت استاتور باشد. به این صورت این اختلاف در شعاع‌ها نقش چرخ‌دنده را بازی می‌کند. در صورتی که این دو شعاع نزدیک به هم باشد، روتور باید به تعداد زیادی دیواره داخلی استاتور را دور بزند تا محور و شفت یک دور بزند که این باعث می‌شود انرژی چندین سیکل تغذیه در یک دور جمع شود و قدرت و گشتاور بالا رود. میکروموتور الکترواستاتیک لنگ مزیت‌های زیادی بر انواع دیگر میکروموتورهای الکترواستاتیک دارند که عبارتند از:

- به خاطر نسبت دور کاهنده دارای گشتاور بالاتری هستند
- اصطکاک کمتر به علت حرکت غلتان
- مقاومت مکانیکی بیشتر
- ساده‌تر بودن عایق‌بندی روتور
- پایداری محوری<sup>۲۴</sup> خوب

### ۳- مقایسه میکروموتورهای الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی

در این بخش به مقایسه تفصیلی میکروموتورهای الکترواستاتیک و میکروموتورهای الکترومغناطیسی خواهیم پرداخت. ابتدا به صورت کلی برخی از خواص این دو نوع میکروموتور را بیان می‌کنیم:

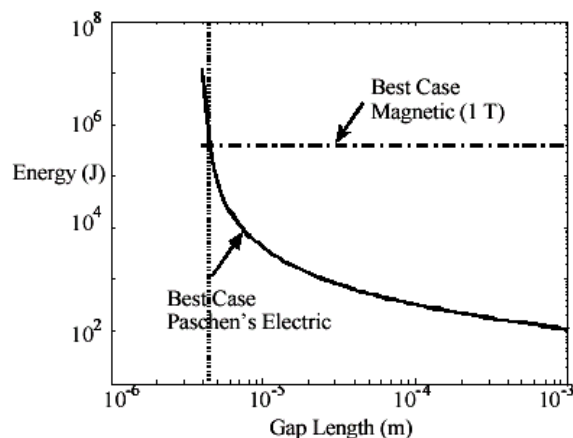
#### ۳-۱- میکروموتورهای الکترواستاتیک

مزایا: در مقیاس‌های پائین و اندازه‌های کوچک برتری‌هایی

خوبی برقرار است. بیشتر مواد فرو مغناطیس تا قبل از  $T \approx 1/5$  اشباع می شوند. بعضی از ماشین ها مانند سوئیچ رلوکتانس عمدتاً در اشباع کار می کنند. حداکثر چگالی در این موتورها را می توان  $T \approx 2$  در نظر گرفت. چون در بعضی نقاط (دندانه ها) این چگالی تا دو برابر هم افزایش می یابد پس مقدار چگالی برای نقاط عادی حداکثر  $T \approx 1$  می باشد. در حالی که اشباع یک فاکتور حاکم برای حداکثر چگالی شار و یک عامل محدود کننده در میکروموتورهای الکترومغناطیسی است، در میکروموتورهای الکترواستاتیکی ولتاژ شکست دیالکتریک عامل محدود کننده است که در هوا و برای یک فاصله ی هوایی به اندازه کافی بزرگ در حدود  $3 \text{ MV/m}$  می باشد. با جایگزینی این مقادیر در روابط (۱۶) و (۱۷) چگالی انرژی الکتریکی  $400 \text{ KJ/m}^3$  و چگالی انرژی مغناطیسی  $40 \text{ J/m}^3$  می شود. مشاهده می کنیم که چگالی انرژی الکتریکی  $10^4$  مرتبه بزرگتر از چگالی انرژی مغناطیسی است و این یک تفاوت آشکار است. یکی از عوامل مهم که در برتری میکروموتورها ذکر می شود، افزایش شدت میدان شکست در میکروموتورهای الکترواستاتیک با کاهش فاصله هوایی است. بر اساس قانون پاشن:

$$E_B = 100 \frac{p(365 \frac{\text{V}}{\text{cm} \cdot \text{Torr}})}{1.18 + \ln(pd)} \quad (12)$$

که  $p$  فشار بر حسب Torr و  $d$  هم فاصله بر حسب سانتی متر است و  $E_B$  هم شدت میدان شکست بر حسب ولت بر متر. این منحنی یک نقطه منفرد در چهار میکرومتر یا  $10^9 \text{ V/m}$  دارد که انتشار میدان مغناطیسی از این نقطه آغاز می شود. قابل ذکر است که این فرمول برای فاصله های کوچکتر از این هم برقرار است ولی مورد بحث ما نیست. اگر ما (۱۲) را در (۱۰) جایگزین کنیم رابطه جدیدی برای انرژی بدست می آید. این رابطه به صورت منحنی در شکل (۹) رسم شده است.



شکل ۹- منحنی انرژی بر حسب طول فاصله هوایی با در نظر گرفتن اشباع و میدان شکست به عنوان محدودیت ها

$$W_e = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 x IV^2}{2\delta} \quad (8)$$

در نتیجه برای نیرو داریم:

$$F = -\frac{\partial W_e}{\partial x} = -\frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{xIV^2}{\delta} \right] = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 IV^2}{2\delta} \propto V^2 \quad (9)$$

اگر فرض کنیم ولتاژ ثابت و کوچکتر از ولتاژ شکست باشد بنابراین  $F \propto [L^0]$ . این نشان می دهد که نیرو مستقل از ابعاد است. پس این نیرو قدرت لازم را برای استفاده در حوزه میکرو دارد.

### ۳-۴-۳- ارزیابی و مقایسه میکروموتورها از جهات مختلف

#### ۳-۴-۳-۱- قدرت بر واحد حجم

فقدان سیم پیچ و هسته ی فرومغناطیسی ساختار میکروموتورهای الکترواستاتیک را ساده و سبک کرده است. قدرت بر واحد حجم میکروموتورهای الکترواستاتیک متناسب با مربع شدت میدان الکتریکی است. وقتی که فاصله ی هوایی بین روتور و استاتور به کمتر از چهار میکرومتر برسد، شدت میدان شکست به صورت تیزی بالا می رود. این عدد می تواند تا مقدار  $3 \times 10^8$  ولت بر متر برسد که نزدیک به مقدار خلا است. در نتیجه قدرت بر واحد حجم در میکروموتورهای الکترواستاتیک با میکروموتورهای الکترومغناطیسی رقابت می کند [۲].

#### ۳-۴-۳-۲- راندمان

جریان پارازیتی در میکروموتورهای استاتیک بسیار کم است که در نتیجه تلفات انرژی کم و راندمان بالاست. در میکروموتورهای الکترومغناطیسی به علت پیچیده بودن ساختمان مشکل است که ابعاد را به زیر یک میلی متر رساند. با کوچک کردن ابعاد میکروموتور الکترومغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی به وسیله ی افزایش گرمای ایجاد شده در سیم پیچ ها محدود می گردد و در ضمن به خاطر خواص ویژه مواد مغناطیسی و شار نشی مقدار قدرت بر واحد حجم در این موتورها کاهش می یابد. حرارت ایجاد شده در سیم پیچ ها قابل مقایسه با توان خروجی می باشد و در نتیجه راندمان کم است [۲].

#### ۳-۴-۳-۳- چگالی انرژی

در یک محیط ایزوتروپیک چگالی انرژی الکتریکی عبارت است از:

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 \quad (10)$$

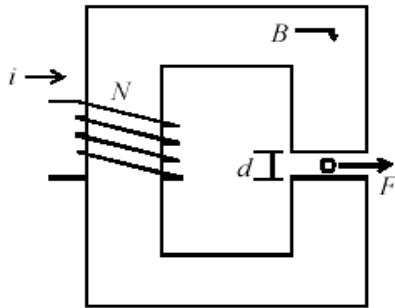
و چگالی انرژی مغناطیسی عبارت است از:

$$W_M = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \cdot B^2 \quad (11)$$

البته این در صورتی است که مشخصه ها خطی باشد ولی فرض خطی بودن همیشه برقرار نمی باشد. به هر حال به دلیل اینکه عمده توجه ما در اینجا به فاصله ی هوایی است فرض خطی بودن با تقریب

در نظر گرفتن پدیده شکستگی به افزایش رلوکتانس می‌انجامد. شار کل عبارت است از:

$$\Phi = BA = \frac{Ni}{\mathfrak{R}} \quad (13)$$



شکل ۱۲- مدار مغناطیسی عمومی برای محاسبه انرژی و نیرو

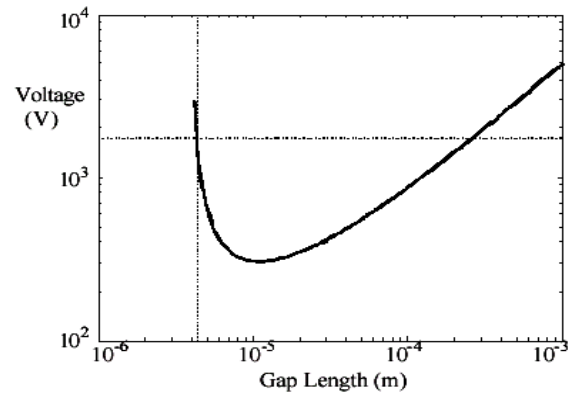
که  $N$  تعداد دور موثر سیم‌پیچ است. جریان  $i$  از انتگرال‌گیری روی سطح سیم بدست می‌آید. بنابراین چگالی میدان عبارت است از:

$$B = \mu_0 \frac{JA_w}{d} \quad (14)$$

برای یک بررسی کمی فرض می‌کنیم چگالی میدان در فاصله هوایی به طول  $10$  میکرومتر یک تسلا باشد و حداکثر چگالی جریان  $10^7$  آمپر بر متر مربع باشد. در نتیجه سطح سیم ( $A_w$ ) مورد نیاز  $0.8 \text{ mm}^2$  است که در صورت مربعی بودن سطح مقطع هر ضلع آن  $900$  میکرومتر خواهد شد. البته این محاسبه خیلی خوشبینانه است و با در نظر گرفتن ضریب سیم‌پیچی واحد بدست می‌آید. با این حال مشاهده می‌شود که سیم‌پیچ به تنهایی باعث می‌شود که اندازه موتور از میلی‌متر تجاوز کند. مانع بعدی تئوریک نیست بلکه یک مانع عملی است. و برای ساخت روی تراشه ایجاد می‌شود. برای مثال قبلی با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) مقدار  $Ni$  در این میکروموتور هشت آمپر می‌شود. در میکروموتورها تعداد دور سیم‌پیچ معمولاً خیلی کمتر از موتورهای عادی است و معمولاً کمتر از  $20$  دور است که این به خاطر محدودیت در ساخت این میکروموتورها است. جریان مناسب که به راحتی برای تراشه قابل حصول است یک میلی آمپر است و با فرض  $N=10$  دور مقدار دور آمپر  $10 \text{ mA}$  می‌شود که از مقدار  $8$  آمپر مورد نیاز بسیار کمتر می‌باشد. در شکل (۱۳) منحنی‌های انرژی در مقابل فاصله هوایی را برای  $10$  دور و جریان‌های مختلف رسم کرده است.

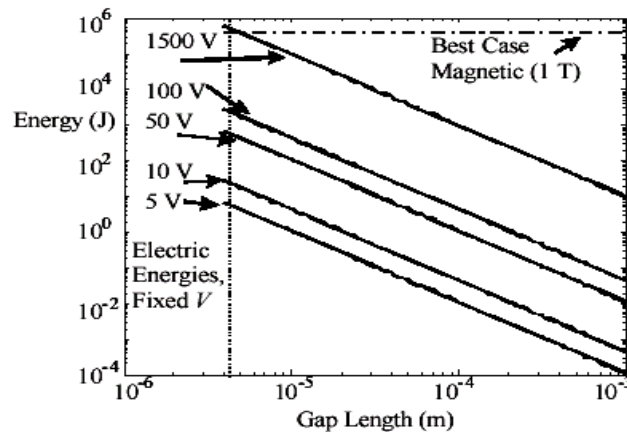
چگالی نیرو: تا اینجا فقط تأکید ما روی چگالی انرژی ذخیره شده بود ولی از اینجا به بعد ما به نیروی تولیدی توجه می‌کنیم. با توجه به شکل (۱۲) در یک میدان یکنواخت  $B$  یک هادی به طول  $L$  که جریان  $I$  را حمل می‌کند نیروی  $F$  را تجربه می‌کند که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

یکی از نقطه ضعف‌های این موتورها ولتاژ بالای آنها است زیرا این موتورها به صورت الکترونیکی درایو می‌شوند و برای انرژی که قبلاً محاسبه شد  $1500$  ولت نیاز است که عملاً در مدارهای مجتمع قابل حصول نمی‌باشد. منحنی مقدار ولتاژ لازم برای بدست آوردن حداکثر میدان شکست‌های مختلف در شکل (۱۰) آمده است.



شکل ۱۰- منحنی ولتاژ حداکثر میدان شکست بر حسب فاصله هوایی

در شکل (۱۱) چگالی انرژی بر حسب فاصله هوایی به‌ازای ولتاژهای مختلف ترسیم شده است ملاحظه می‌شود که در ولتاژ  $5$  ولت چگالی قابل حصول  $6 \text{ J/m}^3$  است که مقدار ناچیزی می‌باشد.



شکل ۱۱- منحنی انرژی بر حسب طول فاصله هوایی با در نظر گرفتن ولتاژ به عنوان محدودیت

حال فرض کنید میکروموتور الکترومغناطیسی از یک سیم‌پیچ که دور یک هسته مغناطیسی با فاصله هوایی است پیچیده شده است. شکل (۱۲) نشان‌دهنده این وضعیت است.

با صرف نظر از پدیده شکستگی رلوکتانس مغناطیسی هوا از رابطه  $\mathfrak{R} = \frac{d}{\mu_0 A}$  بدست می‌آید که  $A$  سطح مقطع عرضی هسته است.



در جدول (۱) خلاصه‌ای از مقایسه بین میکروموتورهای الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی آمده است.

جدول ۱- مقایسه میکروموتورهای الکترومغناطیسی و

الکترواستاتیکی

میکروموتور الکترواستاتیکی	میکروموتور الکترومغناطیسی	معیار
زیاد	کم	راندمان
ساده تر	مشکل	ساخت
$F \propto [L^0]$	$F \propto [L^3]$	اثر مقیاس
بیشتر برای فاصله هوایی کوچکتر از ۴ میکرومتر	بیشتر برای فاصله هوایی بزرگتر از ۴ میکرومتر	چگالی انرژی
زیاد	متوسط	قابلیت اطمینان

#### ۴- ساخت میکروموتورها

ساخت ادوات MEMS را در اصطلاح میکروماشینینگ<sup>۲۸</sup> می‌نامند. سیلیکن نقش اساسی را در پروسه میکروماشینینگ ایفا می‌کند. در سال ۱۹۸۸ برای اولین بار یک میکروموتور الکترواستاتیکی به وسیله تکنولوژی معمول ساخت IC ساخته شد ولی این میکروموتور به علت کوچک و ضعیف بودن کاربردی پیدا نکرد. ولی در ادامه تلاش‌هایی برای رفع این نقیصه شد که منجر به پیدایش کاربردهایی برای میکروموتورها شد [۲۱].  
تکنولوژی‌های ساخت میکروموتورها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

- ۱- Bulk Micromachining
- ۲- Surface Micromachining
- ۳- Moulding

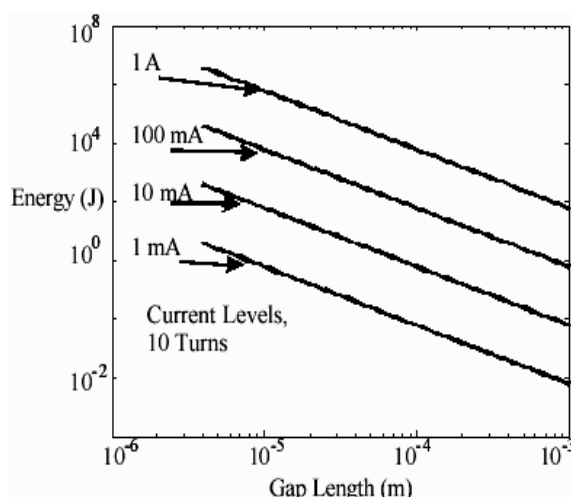
#### ۴-۱- تکنولوژی Bulk Micromachining

این تکنولوژی بر پایه تکنولوژی CMOS بهبود یافته است که با تکنولوژی میکروماشینینگ ترکیب شده است [۱]. این تکنولوژی در حدود ۳۰ سال قبل برای ساخت ساختارهای سه بعدی مطرح شد. این تکنولوژی در کنار یک سری دیگر از مراحل ساخت تجهیزات ریز می‌تواند ساختارهای سه‌بعدی پیچیده‌ای تولید کند. با این تکنولوژی می‌توان قطعاتی در ابعاد بزرگتر از میکرومتر با ارتفاع بلند (نسبت ارتفاع به طول در حدود ۱۵) ایجاد کرد. شکل (۱۴) یک میکروپمپ پیزوالکتریک را که به وسیله این تکنولوژی ساخته شده است را نشان می‌دهد.

$$F = IBL \quad (15)$$

با تقسیم طرفین بر حجم داریم:

$$F_v = JB \quad (16)$$



شکل ۱۳- منحنی انرژی بر حسب طول فاصله هوایی با در نظر گرفتن جریان به عنوان محدودیت و  $N=10$

چگالی نیرو به وسیله ظرفیت گرمایی هادی‌ها و اشباع و میدان محدود می‌شود. برای یک میدان یک تسلا این چگالی نیرو  $10^7 \text{ N/m}^3$  می‌شود. برای بررسی یک مورد الکترواستاتیکی از مدلی که در شکل ترسیم شده است استفاده می‌کنیم. این مدل یک خازن با صفحات موازی است که انرژی آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$W_E = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A_p}{d} (Ed)^2 \quad (23)$$

که در این رابطه  $A_p$  سطح صفحه‌ها است. به وسیله قانون کوانترژی چگالی حجمی نیرو این‌گونه بدست می‌آید:

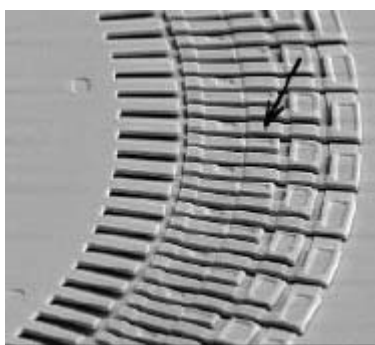
$$F_v = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 E^2}{d} \quad (17)$$

این نیرو همیشه نیروی جاذبه است که علامت منفی در رابطه موید این مطلب است. اگر بخواهیم چگالی نیرو را بر حسب ولتاژ نمایش دهیم، داریم:

$$F_v = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 V^2}{d^3} \quad (18)$$

از این رابطه مشخص می‌شود که این چگالی با کاهش فاصله به سرعت افزایش می‌یابد، پس برای مقیاس‌های کوچک مناسب است. اگر روابط را برای میدان مغناطیسی یک تسلا و ماکزیمم چگالی جریان و ماکزیمم میدان الکتریکی را بر حسب فاصله‌ی هوایی رسم کنیم، نقطه تقاطع دو منحنی در مقدار فاصله هوایی چهارمیکرومتر است. در زیر این نقطه در تمامی حالات چگالی نیروی الکترواستاتیکی بر الکترومغناطیس برتری دارد [۳].

با این روش می‌توان ساختارهای پیچیده‌ای مانند یاتاقان‌ها، لولاها و جفت و بست‌ها را با ترکیب مناسب لایه‌ها و رویه مناسب ساخت. بسیاری از میکروموتورها به این روش ساخته می‌شوند. ساخت میکروموتورها به این روش مستلزم عملیات و پروسه چند لایه<sup>۳۶</sup> است. شکل (۱۶) نمای نزدیک قطب‌های روتور و استاتور یک میکروموتور که به این روش ساخته شده است را نشان می‌دهد. این میکروموتور دارای فاصله هوایی دو میکرومتر و ضخامت لایه قطب‌های روتور و استاتور دو میکرومتر می‌باشد.



شکل ۱۶- قطب‌های روتور و استاتور یک میکروموتور ساخته شده به وسیله تکنولوژی Surface Micromachining

#### ۲-۴- Moulding تکنولوژی قالب‌گیری

پروسه قالب‌گیری یا Moulding به سه گروه اصلی تقسیم می‌شود که عبارتند از:

۱- آب فلزکاری کلاسیک

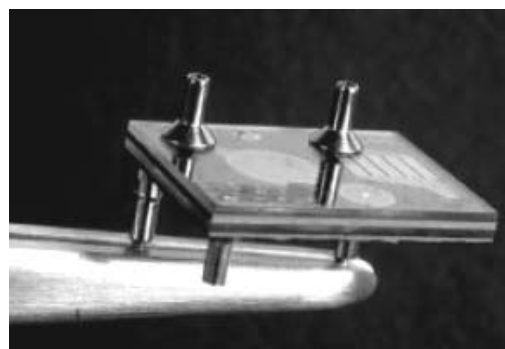
۲- LIGA<sup>۳۷</sup>

۳- HEXSIL

با هر سه روش می‌توان ساختارهایی با ارتفاع زیاد در حدود ۱۰۰ میکرومتر ایجاد کرد. ولی ساختارهای مکانیکی این قطعات ساده‌تر و از نظر گوناگونی کمتر از ساختارهای تکنولوژی Surface Micromachining می‌باشد.

#### ۱-۲-۴- روش آب فلزکاری کلاسیک

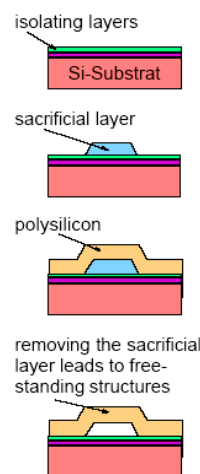
در این روش از فتورزیست یا دیگر مواد ارگانیک استفاده می‌شود. این مواد روی بسترهای مختلف با مقاومت کم یا با روکش فلزی ته نشین می‌شود. وقتی قالب‌های ما از جنس فتورزیست آماده شدند فلزاتی مانند طلا، نیکل، مس و آلیاژهای آنها را در آن رشد می‌دهند. در این روش هم از لایه‌های قربانی برای ساخت و تحقق ساختارهای نهایی نظیر پل‌ها، یاتاقان‌های معلق و لنگرهای لغزنده استفاده می‌شود. ساختار نهایی با شکاف قالب‌ها بدست می‌آید. در این روش هر قالب فقط یک بار مصرف می‌شود. در شکل‌های (۱۷ و ۱۸) به ترتیب قالب تهیه شده برای یک ریزمحرکه سنکرون خطی و ساختار نهایی آن از طلا دیده می‌شود.



شکل ۱۴- میکروپمپ پیزوالکتریک ساخته شده توسط

#### تکنولوژی Bulk Micromachining

تکنولوژی Surface Micromachining: این تکنولوژی امکان ساخت ریز ساختارهای لایه‌ای به صورت لایه نازک را فراهم می‌نماید. این تکنولوژی را تکنولوژی لایه نازک<sup>۳۹</sup> نیز می‌نامند. در این تکنولوژی بیشتر از سیلیکن به عنوان ماده فعال<sup>۴۰</sup> و از اکسید سیلیکن<sup>۴۱</sup> به عنوان لایه از بین رونده<sup>۴۲</sup> (نابودشونده یا قربانی) استفاده می‌شود. یک انتخاب دیگر می‌تواند آلومینیوم به عنوان ماده فعال و ترکیبات ارگانیکی<sup>۴۳</sup> مانند فتورزیست‌ها به عنوان لایه نابود شونده باشد. این لایه‌ها به وسیله حک کردن تریا پلاسما<sup>۴۴</sup> یا حک نوری<sup>۴۵</sup> (فتولیتوگرافی) طرح و شکل می‌گیرند. در نهایت بخش‌های زائد را از بین می‌برند تا ساختار نهایی ایجاد شود. ساختارهایی که با تکنولوژی Surface Micromachining ساخته می‌شوند معمولاً به سمت بالا بنا می‌شوند به این معنی که ابتدا لایه پائینی روی بستر قرار می‌گیرد. در شکل (۱۵) مراحل ساخت یک ساختار به وسیله تکنولوژی Surface Micromachining را نشان می‌دهد. در این شکل ابتدا لایه‌های عایق روی بستر قرار می‌گیرد. سپس لایه قربانی و در نهایت لایه اصلی قرار می‌گیرد. با از بین بردن لایه قربانی ساختار مطلوب حاصل می‌شود.

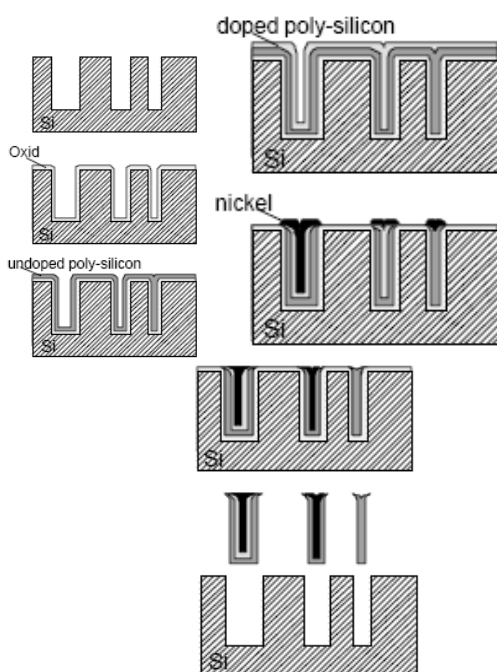


شکل ۱۵- مراحل ساخت یک ساختار به وسیله تکنولوژی

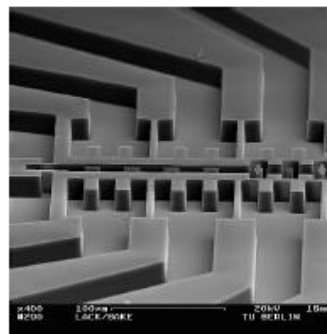
#### Surface Micromachining

#### ۴-۲-۲- روش HEXSIL

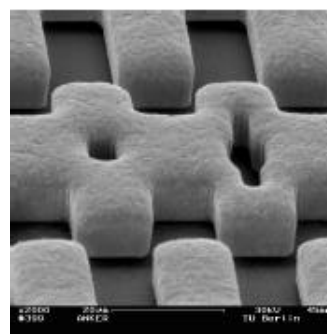
این روش در دانشگاه برکلی به وجود آمد [۲۱]. این روش از فرآیند LPCVD<sup>۳۸</sup> و قالب‌های سیلیکونی که به وسیله فرآیند DRIE<sup>۳۹</sup> بر روی ویفرهای سیلیکونی ساخته شده استفاده می‌کند.



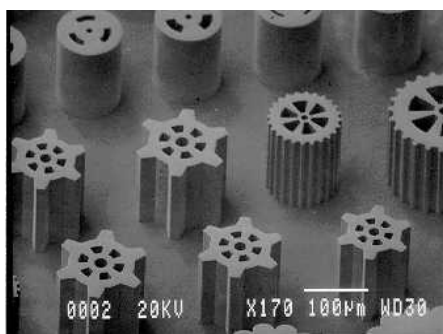
شکل ۱۹- مراحل مختلف ساخت یک قطعه به روش HEXSIL



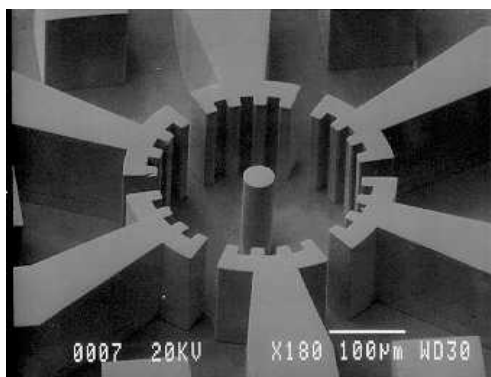
شکل ۱۷- قالب تهیه شده برای یک ریزمحرکه سنکرون خطی



شکل ۱۸- یک ریزمحرکه سنکرون خطی ساخته شده به روش آب فلزکاری کلاسیک



شکل ۲۰- قطعه ساخته شده به روش LIGA



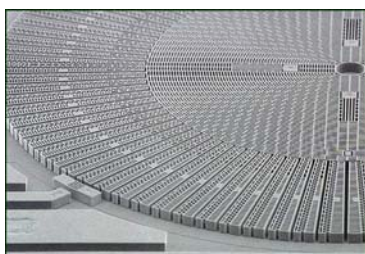
شکل ۲۱- قطعه ساخته شده به روش LIGA

قطعات ساخته شده روی بستر باقی نمی‌مانند در نتیجه از این قالب‌ها می‌توان چندین بار استفاده کرد. شکل (۱۹) مراحل مختلف ساخت یک قطعه را به این روش نشان می‌دهد.

#### ۴-۲-۳- روش LIGA

این روش در آلمان ابداع شد [۲۱]. اخیراً در ساخت میکروموتورها بسیار مورد توجه واقع شده است. به وسیله این روش می‌توان قطعاتی با ضخامت‌های بالا ساخت که در میکروموتورهای الکترواستاتیک باعث بالا رفتن گشتاور تولیدی می‌شود. این روش برپایه لیتوگرافی با اشعه X بنا شده است. از مزیت‌های دیگر این روش این است که به وسیله آن می‌توان میکروموتورهایی با ابعاد بزرگتر از معمول ساخت که در مورد میکروموتورهای الکترواستاتیک ظرفیت متغیر منجر به زیاد شدن دندانه‌های روتور و استاتور و در نتیجه زیاد شدن گشتاور تولیدی می‌شود. در شکل‌های (۲۰ و ۲۱) قطعات ساخته شده به وسیله این روش مشاهده می‌شود.

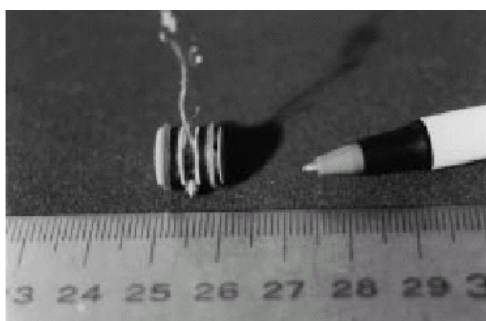
است و این به خاطر تشدید مکانیکی و لرزش در بازو و یاتاقان‌های هد می‌باشد. برای افزایش چگالی شعاعی یک نوع سرو موقعیت<sup>۴۳</sup> دو پله‌ای طراحی شده که از یک سرو مغناطیسی معمولی و یک میکرو سرو گردان تشکیل شده است. به این وسیله دقت موقعیت یابی و در نتیجه ظرفیت بیشتر می‌شود. نمونه‌ای از این میکروموتورها میکروموتور الکترواستاتیک شکل (۲۳) است.



شکل ۲۳ - میکرو سرو مورد استفاده در درایور دیسک

### ۵-۳- میکروروبات‌ها [۲۳-۲۵]

یکی از کاربردهای میکروموتورها استفاده از آن در میکروروبات‌ها است. به عنوان مثال در شکل (۲۴) یک میکروروبات ۱۰ میلیمتری دیده می‌شود که از یک میکروموتور الکترومغناطیسی لنگ با قطر خارجی هشت میلیمتر استفاده می‌کند.



شکل ۲۴ - میکروروبات ۱۰ میلیمتری

### ۵-۴- میکروپمپ‌ها [۲۶-۲۷]

میکروپمپ‌ها سه دسته اصلی‌اند که عبارتند از میکروپمپ‌های پیزوالکتریک، الکترومغناطیسی، الکترواستاتیکی. در سال‌های اخیر میکروپمپ‌های الکترواستاتیکی به شدت مورد توجه قرار گرفته و از یک میکروموتور الکترواستاتیک ساده خطی بهره می‌گیرد.

### ۵-۵- کاربردهای اپتیکی [۲۸ و ۲۱]

در شکل (۲۵) یک میکروشاتر دیده می‌شود که برای مدولاسیون تشعشعات در آشکارسازهای نوری و گرمایی استفاده می‌شود. در شکل (۲۶) نیز میکروموتور مورد استفاده در آن دیده می‌شود. به منظور انجام عمل مدولاسیون روی روتور آن گودال‌هایی ایجاد شده است.

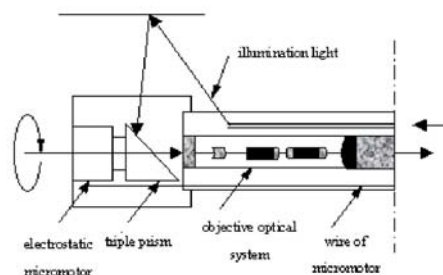
## ۵- کاربردها

میکروموتورها در حال حاضر هنوز به طور وسیعی کاربرد ندارند ولی انتظار می‌رود که در آینده نزدیک شاهد کاربردهای فراوان آنها باشیم. در واقع بعضی از کاربردهای آن هنوز کشف نشده است. برخی از کاربردهای میکروموتورها عبارتند از: کاربردهای پزشکی نظیر وسایل جراحی، رساندن دارو، ریزربات‌ها<sup>۴۰</sup>، میکروپمپ‌ها، درایور دیسک و غیره که اکنون به شرح برخی از آنها می‌پردازیم.

### ۵-۱- دستگاه اندسکوپي [۲]

یکی از روش‌های جدید در جراحی روش جراحی با عوارض کم<sup>۴۱</sup> یا MSI می‌باشد که به جراحی اندسکوپیک<sup>۴۲</sup> هم معروف است. این روش جراحی باعث کاهش هزینه و صدمات ناشی از جراحی می‌شود. اندسکوپ اپتیکی یکی از ابزارهای مورد نیاز در این روش است که به طور وسیعی در تشخیص ضایعات شکمی، مغزی و مجاری ادراری مورد استفاده قرار می‌گیرد. حوزه دید اندوسکوپ‌های معمولی کم است. برای افزایش حوزه‌ی دید باید لنز موجود در سر دستگاه امکان چرخیدن داشته باشد. این کار به وسیله یک میکروموتور با قطر خارجی کمتر از یک میلیمتر انجام می‌شود. به خاطر این ابعاد کوچک باید از میکروموتورهای الکترواستاتیک استفاده کرد. با استفاده از این میکروموتور زاویه دید دستگاه ۳۶۰ درجه می‌شود. در شکل (۲۲) دستگاه اندسکوپ به همراه میکروموتور به کار رفته در آن دیده می‌شود.

گشتاور تولیدی به وسیله‌ی میکروموتورهای الکترواستاتیک معمولاً کوچک است و برای چرخاندن منشور واقع در دستگاه کم است. استفاده از نوعی میکروموتور الکترواستاتیک ظرفیت متغیر با استاتور دابل در حال مطالعه است. با استفاده از بهینه‌سازی هندسه‌ی این میکروموتور به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک گشتاور ۲/۵ میکرونیوتن متر هم حاصل شده که برای چرخاندن منشور کافی است.



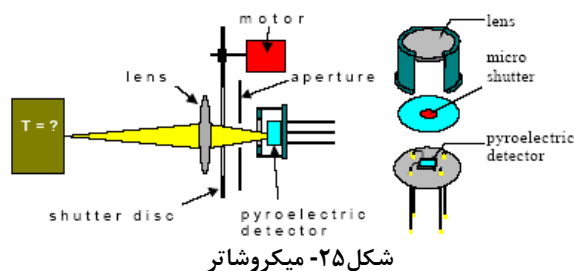
شکل ۲۲ - دستگاه اندسکوپ

### ۵-۲- درایور دیسک [۲۲]

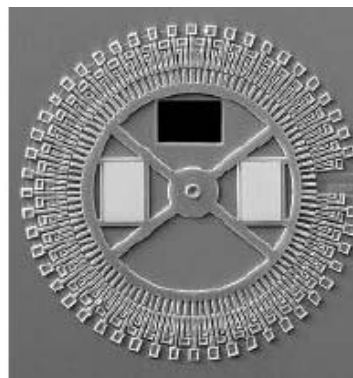
کاربرد دیگر میکروموتورها در درایو دیسک است. در یک درایو دیسک معمولی چگالی بیت در راستای یک تراک حدود ۴۰۰ کیلو بیت بر اینچ است ولی چگالی شعاعی فقط ۲۵ کیلو تراک بر اینچ

### ۶- جمع بندی

در این مقاله بررسی مسائل مختلف میکروموتورها مورد توجه قرار گرفت. به این منظور در ابتدا به معرفی این نوع از موتورها و انواع مرسوم آنها پرداخته شده، خواص و چالش های مربوط به هر ساختار بررسی شده است. در ادامه مقایسه میکروموتورها با توجه به شاخص های مختلف انجام شده است که برتری میکروموتورهای الکترواستاتیکی را در مجموع نشان می دهد. در ادامه روش های ساخت میکروموتورها به اختصار بیان شده و برخی از کاربردهای آنها تشریح شده است.

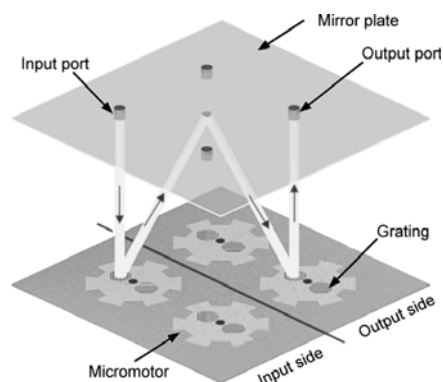


شکل ۲۵- میکروشاتر



شکل ۲۶- میکروموتور مورد استفاده در میکروشاتر

نمونه دیگری از کاربرد میکروموتورها در سوئیچ های اپتیکی است. شکل (۲۷) نمایشگر نسل جدیدی از این سوئیچ ها است.



شکل ۲۷- میکروموتور مورد استفاده در سوئیچ اپتیکی

در جدول (۲) به طور مختصر کاربردها و نوع میکروموتور مورد استفاده نمایش داده شده است.

جدول ۲- نوع میکروموتور در کاربردهای مختلف

کاربرد	نوع میکروموتور معمول
پزشکی	الکترومغناطیسی، پیزو الکتریک
دیسک درایو	الکترو استاتیکی
اپتیکی	الکترو استاتیکی
میکرو روبات	الکترومغناطیسی، پیزو الکتریک
میکرو پمپ	الکترومغناطیسی، الکترو استاتیکی، پیزو الکتریک

### ۷- مراجع

- [1] S. E. Lyshevski, "MEMS and NEMS, Systems, devices and structures" CRC Press, 2002.
- [2] Wang Xinli, Cui Shumei and cheng Shukang, "Advantages of Electrostatic Micromotor and Its Application to Medical Instrument," Industry Applications Conference, Vol. 4, pp. 2466-2468, Oct. 2002.
- [3] P. L. Chapman and P. T. Krein, "Micromotor Technology: Electric Drive Designer's Perspective," Industry Applications Conference, Vol. 3, pp. 1978-1983, Sept 2001.
- [4] N. Maluf, An Introduction to Microelectromechanical Systems, Artech House, 2000.
- [5] D. Polla, et al, "Precision Micromotor for surgery," Microtechnology in Medicine and Biology, 1st Annual International conference, pp. 180-183, 2000.
- [6] Chong H., et al, "A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Statot and Coils," IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 165-173, Dec 1993
- [7] Yu. Chang Tai, "Micromotors," IEEE International Conference on Microelectronics and VLSI, pp. 8-11, Nov. 1995.
- [8] M.V. Shutov, et al, "A microfabricated electromagnetic linear synchronous motor," Journal of Sensors and Actuators, , Vol. 121, pp. 566-575, 2005.
- [9] D. P. Arnold, et al, "Magnetic Induction Machines Integrated Into Bulk-Micromachined Silicon," IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 406-414, Apr. 2006.
- [10] H. Koser and J. H. Lang, "Magnetic Induction Micromachine—Part III: Eddy Currents and Nonlinear Effects," IEEE

- [22] B. Murari, "Is Micromachining Still a Dream or an Industrial Reality?," in Proc. Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE Int. Conf., pp. 5-7, July 2001.
- [23] M. Flynn, et al, "Piezoelectric Micromotors for microrobots," Journal of microelectromechanical Systems, Vol. 1, No.1, March 1992.
- [24] P. Dario, et al, "A Mobile Microrobot Actuated by a New Electromagnetic Wobble Micromotors," IEEE Trans. On Mechatronics, Vol. 3, No. 1, March 1998.
- [25] M. Feldmann and S. Büttgenbach, "Novel Microrobots and Micromotors Using Lorentz Force Driven Linear Microactuators Based on Polymer Magnets," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 10, pp. 3891-3895, October 2007.
- [26] Scott McDonald, Tingrui Pan, and Babak Ziaie, " A Magnetically Driven PDMS Micropump with Micro-Ball Valves," in Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, San Francisco, CA, USA, September 1-5, 2004, pp 2650-2653.
- [27] T. Y. Jiang, et al, "Dynamic Analysis of an Electrostatic Micropump," Doc. Form Institute of High Performance Computing, National University of Singapore.
- [28] Marc Simard, Zeeshan Khalid, and Andrew G. Kirk, " Digital Optical Space Switch Based on Micromotor Grating Scanners," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No. 2, pp. 313-315, Jan. 2006.
- [29] W. Zhang, G. Meng, H. Li "Electrostatic micromotor and its reliability," Journal of Microelectronics Reliability, Vol. 45, 2005, pp. 1230-1242.
- [11] F. Cros, H. Koser, M. G. Allen, and J. H. Lang, "Magnetic Induction Micromachine—Part II: Fabrication and Testing," IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 15, No. 2, pp. 427-439, Apr. 2006.
- [12] H. Koser, and J. H. Lang, "Magnetic Induction Micromachine, Part I: Design and Analysis," IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 415-426, Apr. 2006.
- [13] B. Wagner, et al, "Permanent Magnet Micromotors on silicon Substrates," IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, pp. 23-29, March 1993.
- [14] W.S.N Trimmer, et al, "Design Consideration for a practical Electrostatic Micro-Motor," Sensors and Actuators A., Vol.11, No. 2, pp. 189-206, March 1987.
- [15] L. S. Fan, et al, "IC-Proceed Electrostatic Micromotors," Sensors and Actuators, Vol. 20, pp. 41-47, 1989.
- [16] K. Matsuzaki, et al, "Comparison Electrostatic and Electromagnetic Motors Based on Fabrication and Performance Criteria," in Proc. Micro Machine and Human Science Symp., pp. 77-81, Oct. 1994.
- [17] V. Behjat, A. Vahedi, " Study the influence of geometric parameters on the torque of electrostatic micromotors," Journal of Electrical Eng., Vol. 89, pp. 61-65, 2006.
- [18] Mohamed A. Basha, Safieddin Safavi-Naeini, and Sujeet K. Chaudhuri, "Design and fabrication of an electrostatic micromotor with a low poerating voltage," in Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Solid State Sensors, Lyon, France, 10-12 June 2007, pp. 1139-1142.
- [19] W. Trimmer, and B. Jebbens, "An Operational Harmonic Electrostatic Motor" in Proc. MEMS, An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots, pp. 13-16, Feb. 1989.
- [20] S. C. Jacobsen, et al "The Wobble Motor: An Electrostatic Planetary-Armature, Microactuators," in Proc. MEMS, An Investigation of Micro Structures Sensors, Actuators, Machines and Robots, pp. 17-24, Feb. 1989.
- [21] E. Thielicke, E. Obermeier, "Microactuators and their Technologies," Journal of Mechatronics, Vol. 10, pp. 431-455, 2000.

### ۸- پی نوشت‌ها

- 1 - Conventional Electro Mechanical Systems
- 2 - Micro Electro Mechanical Systems
- 3 - Nano Electro Mechanical Systems
- 4 - Micro Actuators
- 5 - Piezoelectric
- 6 - Curie
- 7 - Ultrasonic
- 8 - Standing Wave Motors
- 9 - Traveling Wave Motors
- 10 - Integrated Circuit
- 11 - Wisconsin
- 12 - Lithographie Galvanofornung Abformung
- 13 - California Institute of Technology
- 14 - Variable Reluctance

- 
- 15- Wobble Electromagnetic Micromotor
  - 16- Sliding Magnet
  - 17- Rolling Magnet
  - 18- Tow Degrees of Freedom of Movement
  - 19- Brushless Permanent Magnet Motor
  - 20- Trimmer
  - 21- Variable Capacitance
  - 22- Bushing
  - 23- Segments
  - 24- Axial stability
  - 25- Scale
  - 26- Scaling effect
  - 27- همان دیمانسیون طول است
  - 28- Micromachining
  - 29- Thin Film Technology
  - 30- Active
  - 31- Silicon-Oxide
  - 32- Sacrificial
  - 33- Organic Compounds
  - 34- Wet or Plasma Etch
  - 35- Photolithography
  - 36- Multi layer surface machining process
  - 37- Lithographie Galvanoformung Abformung
  - 38- Low-Pressure Chemical Vapor Deposition
  - 39- Deep Reactive Ion Etching
  - 40- Microrobots
  - 41- Mimimally Invasive Surgery
  - 42- Endoscopic Surgery
  - 43- Positioning Servo