بسم الله الرحمن الرحیم

میکروپمپ

مولفان :

مهندس سید امیررضا عبد اللهی

مهندس سید حسین عبداللهی

انتشارات ارسطو (چاپ و نشر ایران)

۱۴۰۱

تقدیم به

ساحت مقدس حضرت ولی‌عصر (عجل‌الله تعالی فرجه)

پیشگفتار

در کتاب حاضر سعی شده است تا ضمن شناخت انواع میکروپمپ، جدیدترین دستاوردهای علمی در زمینه میکروپمپ ارائه گردد. این کتاب از ۸ فصل تشکیل شده است که حاصل تجربه‌های عملی و پژوهش‌های دانشگاهی هست که باتوجه‌به اهمیت میکروپمپ‌ها در صنعت کشور به‌صورت مجموعه‌ای مدون تقدیم حضور خوانندگان محترم می‌شود.

مخاطبین اصلی این کتاب پژوهشگران و دانشجویان رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، مهندسی عمران و مهندسی انرژی است.

در این کتاب ابتدا به معرفی کلی و تاریخچه‌ای از میکروپمپ‌ها اشاره مفید و مختصری شده است سپس در ادامه فصل اول پمپ‌های مکانیکی و غیرمکانیکی توضیح داده شده است. در سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه میکروپمپ انجام شده است در فصل دوم این کتاب جدیدترین پژوهش‌ها در حوزه میکروپمپ جمع‌بندی و بررسی شده است. برای این که بتوان عملکرد میکروپمپ‌ها را بهتر مورد بررسی قرار داد و بازده میکروپمپ‌ها را افزایش داد نیاز به مدل‌سازی میکروپمپ‌ها است. در فصل سوم مدل‌سازی میکروپمپ در نرم‌افزار کامسول شرح داده شده است. در فصل چهارم، به بیان مشخصات و انواع میکروپمپ‌های الکتروسینتیک پرداخته شده است. فصل پنجم کتاب به تفصیل به بررسی میکروپمپ‌های دیناموهیدرومغناطیسی پرداخته است. فصل ۶ کتاب میکروپمپ اصول میکرومحرک‌ها و میکروپمپ‌های مغناطیسی را مورد بررسی قرار می‌دهد. فصل ۷ و ۸ این کتاب به ترتیب در مورد میکروپمپ‌های الکترواسمزی و میکروپمپ‌های موئین بحث می‌کند.

از استاد بزرگوار و ارجمند جناب آقای دکتر کامران پورقاسمی که در تمامی مراحل این کتاب با صبر و متانت مشاوره این کتاب و پژوهش را تقبل نمودند خالصانه و خاضعانه تشکر و قدردانی می‌کنیم.

خوانندگان محترم می‌توانند دیدگاه‌ها و نظرات ارزشمند خویش را پیرامون این کتاب به آدرس s.a_abdollahi@yahoo.com ارسال نمایند.

فهرست

فصل ۱: مقدمه‌ای بر میکروپمپ ۱۲

۱-۱- مقدمه ۱۲

۱-۲- تاریخچه میکروپمپ‌ها ۱۵

۱-۳- انواع میکروپمپ ۱۵

۱-۳-۱- شیرهای فعال ۱۶

۱-۳-۲- شیرهای غیرفعال ۱۶

۱-۳-۳- شیرهای دینامیک (نازلی - دیفیوزر) ۱۷

۱-۴- میکروپمپ‌های مکانیکی ۱۸

۱-۴-۱- میکروپمپ‌های پیزوالکتریک ۱۸

۱-۴-۲- میکروپمپ‌های ترموپنوماتیکی ۱۹

۱-۴-۳- میکروپمپ‌های الکترواستاتیک ۲۰

۱-۴-۴- میکروپمپ‌های الکترومغناطیس ۲۱

۱-۴-۵- میکروپمپ‌های ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار (نیکل تیتانیم) ۲۲

۱-۵- میکروپمپ‌های غیرمکانیکی ۲۳

۱-۵-۱- میکروپمپ الکتروهیدرودینامیک ۲۳

۱-۵-۲- میکروپمپ‌هایی با سازوکار انتشار موج خمشی صفحه‌ای ۲۴

۱-۵-۳- میکروپمپ‌های الکتروکینتیک ۲۵

۱-۵-۴- میکروپمپ‌های با سازوکار خیس‌کنندگی الکتریکی پیوسته ۲۶

۱-۵-۵- میکروپمپ‌های هیدرودینامیک مغناطیسی ۲۷

۱-۵-۶- میکروپمپ‌های حبابی ۲۷

منابع فصل ۱ ..... ۲۸

فصل ۲: مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه میکرو پمپ **۳۰**
۲-۱- مقدمه ۳۰
۲-۲- عملگرهای پیزوالکتریک ۳۲
۲-۳- مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده ۳۳
منابع فصل ۲ ..... ۴۲

فصل ۳: مدل‌سازی میکروپمپ توسط نرم‌افزار کامسول ۴۵
۳-۱- مقدمه‌ای بر تداخل سیال و جامد (FSI) ۴۵
۳-۲- الگوریتم حل اندرکنش سیال - سازه ۴۸
۳-۳- پیزوالکتریکها و روابط حاکم بر آن‌ها ۴۹
۳-۳-۱- مقدمه ۴۹
۳-۳-۲- خاصیت پیزوالکتریسیته ۴۹
۳-۳-۳- مزایا و محدودیت‌های پیزوسرامیک‌ها ۵۱
۳-۴- روابط بنیادین پیزوالکتریک‌ها ۵۷
۳-۵- مدل‌سازی ۶۳
۳-۵-۱- معادلات ساختاری خطی مواد پیزوالکتریک ۶۳
۳-۵-۲- نمادگذاری روابط مکانیکی ۶۳
۳-۵-۳- معادلات اصلی پیزو الکتریک ۶۴
۳-۵-۴- مدل الکترومکانیکی از پیزو المان ۶۵
۳-۵-۵- مواد دیالکتریک و پلاریزاسیون ۶۷
۳-۵-۶- پیزوالکتریسیته و تانسور مرتبه سوم ۶۹
۳-۵-۷- تئوری تغییر شکل برشی مرتبهٔ اول برای صفحات ۷۰
۳-۶- کاربردها ۷۴

۳-۶-۱- کنترل ارتعاشات ۷۴
۳-۶-۲- ساختار نظارت بر سلامت سازه ۷۵
۳-۷- پیزو عملگرها ۷۶
۳-۷-۱- پیزو سنسورها ۷۶
۳-۷-۲- سایر کاربردها ۷۷
۳-۸- طراحی مدل سه‌بعدی ۷۸
۳-۹- مراحل طراحی مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار کامسول ۷۸
۳-۹-۱- مدل‌سازی هندسی ۷۹
۳-۹-۲- مدل‌سازی سیال ۸۰
۳-۹-۳- مدل‌سازی صفحه دیافراگم ۸۱
۳-۹-۴- مدل‌سازی صفحه پیزو ۸۱
۳-۹-۵- مواد مورداستفاده ۸۱
۳-۹-۶- مدل‌سازی ۸۳
۳-۹-۷- مدل‌سازی تداخل سیال و سازه ۸۳
۳-۹-۸- شبکه‌بندی ۸۴
۳-۹-۹- مدل‌سازی مکانیک جامدات ۸۵
۳-۹-۱۰- مدل‌سازی الکترواستاتیک ۸۵
منابع فصل ۳ ..... ۸۸

فصل ۴: میکروپمپ الکتروسینتیک ۹۰
۴-۱- مقدمه ۹۰
۴-۲- میکروپمپ‌های الکترواسموتیک ۹۲
۴-۳- شکل‌های مختلف پدیده‌ی الکتروسینتیک ۹۳

۴-۴- مشخصات میکروپمپ‌های الکترواسموتیک ۹۳
۴-۵- مقایسه‌ی انواع میکروپمپ‌ها ۹۵
۴-۶- مروری برمطالعات انجام شده در زمینه‌ی میکروپمپ‌های الکترواستیمک ۹۶
۴-۷- مروری برمطالعات انجام شده درزمینه‌ی میکروپمپ الکترواسمتیک ۹۷
۴-۸- مروری برمطالعات انجام شده در زمینه انتقال الکترواسمزی سیالات غیرنیوتنی ۱۰۰
۴-۹- منشأ نقل وانتقال الکترواسمزی ۱۰۱
۴-۱۰- پمپ‌های DC ۱۰۳
۴-۱۱- پمپ‌های AC ۱۰۵
منابع فصل ۴ ..... ۱۰۹

فصل ۵: میکروپمپ دیناموهیدرومغناطیسی ۱۱۳
۵-۱- مقدمه ۱۱۳
۵-۲- کاربرد میکروپمپ ۱۱۴
۵-۳- میکروپمپ‌های دیناموهیدرومغناطیسی ۱۱۶
۵-۴- میکرومیکسرها ۱۱۸
۵-۵- میکرومیکسرهای دیناموهیدرومغناطیسی ۱۱۹
۵-۶- تحقیقات در زمینه میکروپمپ‌های اماچدی ۱۲۰
۵-۷- تحقیقات در زمینه میکرومیکسرهای اماچدی ۱۲۳
منابع فصل ۵ ..... ۱۲۵

فصل ۶: میکروپمپ‌های الکترومغناطیسی ۱۲۷
۶-۱- مقدمه ۱۲۷
۶-۲- اصول عملکرد میکرومحرک مغناطیسی ۱۲۷

۶-۳- اصول عملکرد میکروپمپ الکترومغناطیسی ۱۲۸
۶-۴- عملکرد مواد مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی ۱۲۹
۶-۴-۱- دیامغناطیس ۱۳۰
۶-۴-۲- پارامغناطیس ۱۳۱
۶-۴-۳- فرومغناطیس ۱۳۲
۶-۴-۴- آنتی فرومغناطیس ۱۳۲
۶-۴-۵- فری مغناطیس ۱۳۳
۶-۴-۶- خواص فیزیکی عمومی ۱۳۳
۶-۴-۷- پدیده سوپر پارامغناطیس ۱۳۵
۶-۵- ویژگی های خاص از نانوذرات مغناطیسی ۱۳۶
۶-۵-۱- اثر اندازه ۱۳۶
۶-۵-۲- اثر سطح ۱۳۷
۶-۶- مروری بر مطالعات میکروپمپ‌های الکترومغناطیسی ۱۳۸
۶-۷- طراحی میکرومحرک مغناطیسی ۱۵۷
۶-۸- طراحی میکروپمپ الکترومغناطیسی ۱۵۹
۶-۹- ساخت غشا مغناطیسی ۱۶۱
۶-۱۰- ساخت میکروپمپ ۱۶۳

فصل ۷: میکروپمپ الکترو اسمزی ۱۷۰
۷-۱- مقدمه ۱۷۰
۷-۲- میکروپمپ الکترواسمزی DC ۱۷۱
۷-۳- میکروپمپ الکترواسمزی AC ۱۷۱
۷-۴- تاریخچه میکروپمپ الکترو اسمزی ۱۷۲

۷-۵- نیروهای الکتریکی وارد بر سیال ۱۸۰
۷-۵-۱- نیروی دی‌الکتروفورتیک..... ۱۸۱
۷-۵-۲- نیروی الکترواستریکشن..... ۱۸۱
۷-۶- ساختار فیزیکی میکروپمپ الکترواسمزی AC..... ۱۸۲
۷-۷- مکانیزم حرکت یون در میکروپمپ الکترواسمزیAC..... ۱۸۳
منابع فصل ۷..... ۱۸۵

فصل ۸: میکروپمپ موئین..... ۱۸۸
۸-۱- مقدمه..... ۱۸۸
۸-۲- پمپهای فعال..... ۱۸۸
-۸-۳- پمپهای غیرفعال..... ۱۸۹
۸-۴- میکروپمپ غیر فعال کشش سطحی..... ۱۸۹
۸-۵- جریان معکوس در میکروپمپ غیر فعال..... ۱۹۰
۸-۶- مدلی برای مشاهدات تجربی..... ۱۹۰
۸-۷- میکرو پمپ غیر فعال کشش سطحی..... ۱۹۳
منابع فصل ۸..... ۱۹۸

فصل ۱

مقدمه‌ای بر میکروپمپ

۱-۱- مقدمه

امروزه کاربرد میکرو سیستم‌های سیالی در همه زمینه‌های علوم و مهندسی از زیست‌شناسی و علوم گرفته تا پزشکی و مایکرو الکترونیک گسترده شده است. در این سیستم‌ها حجم بسیار کوچکی از سیال پمپاژ و کنترل می‌شود تا در ابزارهای دیگر مورداستفاده قرار گیرد. برای مثال، نمونه‌های زیستی باید در مقادیر بسیار جزئی به داخل سیستم‌های مینیاتوری تست و محک، هدایت گردند و سیال خنک‌کننده باید به داخل یک مایکرو مبدل حرارتی رانده شود.

بدین منظور روش‌های مختلفی ارائه شده و درحال‌توسعه هستند. ازاین‌دست می‌توان به استفاده از نیروی کشش سطحی، انتشار موج آکوستیک سطحی[1]، محرک‌های مکانیکی نظیر مواد پیزوالکتریک[2]، آلیاژهای حافظه‌دار[3] و بسیاری دیگر اشاره کرد که در قسمت بعد به بررسی دقیق آن‌ها خواهیم پرداخت.

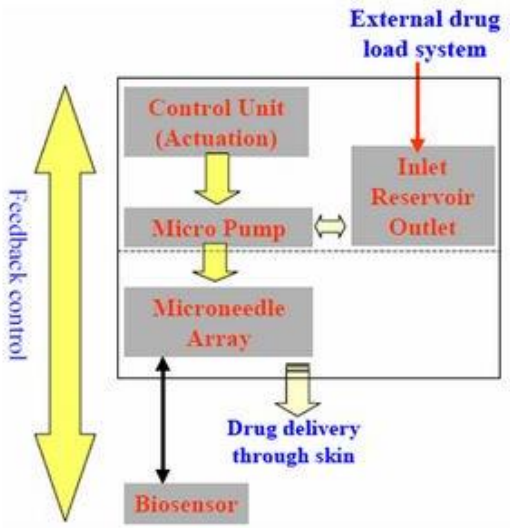
[1] Surface Acoustic Wave Propagation
[2] Piezoelectric Materials
[3] Shape Memory Alloys

بایستی در نظر داشت که باتوجه‌به کاربرد موردنیاز، نوع ریز سیستم سیالی و مشخصات آن تغییر می‌کنند. ازاین‌رو مشخصه‌هایی مانند اندازه دستگاه، توان مصرفی، مقاومت در برابر تغییرات، بازدهی و هزینه ساخت در کاربردهای مختلف متفاوت است. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های ریز سیستم‌های سیالی، میکرو پمپ‌ها[4] هستند که در حقیقت نقش قلب را برای این سیستم‌ها ایفا می‌کنند و علاوه بر این کنترل بر روی دبی و فشار سیال نیز همگی در میکرو پمپ‌ها انجام می‌گیرد و قسمت کنترلی تنها پیام موردنظر را به این قسمت می‌فرستد؛ بنابراین نوع طراحی و سازوکار این وسیله در کارایی تمام سیستم بسیار مؤثر است.

تزریق یا انتقال مقادیر بسیار جزئی از دارو به بدن در کنار بسیاری کاربردهای دیگر از ابتدا یکی از اهداف طراحان مایکرو پمپ‌ها بوده است، از آن جمله می‌توان به اولین مایکرو پمپ که در سال ۱۹۸۰ توسط جان اسمیت ساخته شد، اشاره کرد. هدف از طراحی و ساخت این مایکرو پمپ انتقال مقدار انسولین موردنیاز به بدن و کنترل میزان قند خون در افراد مبتلا به بیماری دیابت بود که با استفاده از این سیستم نیاز به تزریق مکرر از بین می‌رفت. همچنین امروزه از این سیستم‌ها در انتقال میکرو مولکولی به داخل تومورها و جریان خون در مویرگ‌ها نیز استفاده می‌شود.

مهندسان و محققان در حال کار بر روی نسل جدیدی از این ریز سیستم‌های سیالی هستند که قابل‌نصب در بدن باشند و به‌صورت کاملاً هوشمندانه عمل کنند که در صورت موفقیت تحول بزرگی در علوم پزشکی و درمان بیماری‌ها به وجود می‌آید، چراکه علاوه بر اهمیت انتقال مقدار بسیار دقیق دارو به بدن، قسمت‌های زیادی از بدن موجودات زنده از سیستم‌هایی جهت ترشح و انتقال هورمون‌ها و دیگر مایعات حیاتی استفاده می‌کند که در صورت ایجاد نقص در آن‌ها می‌توان از ریز سیستم‌های سیالی هوشمند جهت رفع مشکل بهره برد. شکل (۱-۱) اجزاء تشکیل‌دهنده یک‌ریز سیستم سیالی انتقال دارو را نشان می‌دهد که عبارت‌اند از مخزن دارو، واحد کنترلی، مایکرو پمپ و ریز سوزن که درمجموع با قرارگرفتن در یک سیستم بازخورد کنترلی باعث انتقال مقادیر بسیار دقیق دارو می‌گردد.

[4] Micro-Pumps



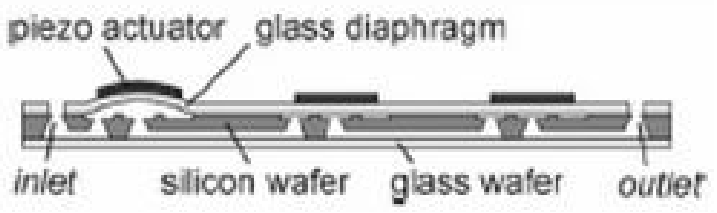
شکل ۱-۱- شماتیک میکرو سیستم سیالی به‌منظور انتقال دارو

رشد و توسعه صنایع میکرو و نانو به‌دست‌آمدن دستگاه‌ها و تجهیزات مربوط به ساخت در این ابعاد زمینه مناسبی را برای مهندسان و دانشمندان فراهم آورده تا آنچه را که در تئوری به دست آورده بودند را به عمل درآورند. ازاین‌رو روش‌های مختلف ساخت در این ابعاد به وجود آمدند که از آن جمله می‌توان به روش‌های لیگا، لیتوگرافی و روش‌های شیمیایی اشاره کرد. با استفاده ازاین روش‌ها ساخت در ابعاد حدود ۱۰۰ نانومتر محقق گردیده است. ریز سیستم‌های سیالی نیز یکی از میدان‌های کاری تکنولوژی مایکرو نانو می‌باشند که کارهای زیادی درزمینه ساخت آن‌ها صورت گرفته است و حتی نمونه‌هایی از نانوپمپ‌ها نیز ساخته شده‌اند که در حال حاضر صرفاً آزمایشگاهی بوده و جنبه کاربردی ندارند. در ادامه این نوشتار، انواع میکرو پمپ‌ها، طبقه‌بندی آن‌ها و مزایا و معایب هریک را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و سپس به تحلیل و شبیه‌سازی نوع خاصی از میکرو پمپ‌ها به نام میکروپمپ رفت و برگشتی می‌پردازیم و با بررسی مشخصه‌های رفتاری آن، بهترین نقطه کاری مشخص می‌شود.

۱-۲- تاریخچه میکروپمپ‌ها

رشد و توسعه میکروپمپ‌ها در سال ۱۹۸۰ توسط وال مارک و اسمیت در دانشگاه استنفورد آغاز شد. میکروپمپ ساخته‌شده توسط آن‌ها از حرکت کرم واره ای که توسط تحریک محرک‌های پیزوالکتریک به پوسته اعمال می‌شد، جهت رانش سیال استفاده می‌کرد (شکل ۱-۲). به دنبال این کار طرح‌ها و بهینه‌سازی‌های زیادی مطرح شد که هرکدام از جنبه‌هایی با بقیه متفاوت بود اما دسته زیادی از آن‌ها مربوط به پمپ‌هایی می‌شد که از پوسته و یا دیافراگم جهت رانش سیال استفاده می‌کردند که به آن‌ها میکرو پمپ‌های غشایی می‌گویند.

به‌طورکلی میکروپمپ‌ها را می‌توان از جهات مختلفی از قبیل نوع محرک، نوع ساخت، جنسی و طرز کار طبقه‌بندی کرد؛ اما میکروپمپ‌ها غالباً در دودسته مکانیکی و غیر مکانیکی قرار می‌گیرند که پیشرفت میکروپمپ‌های غیر مکانیکی از سال ۱۹۹۰ آغاز شد.



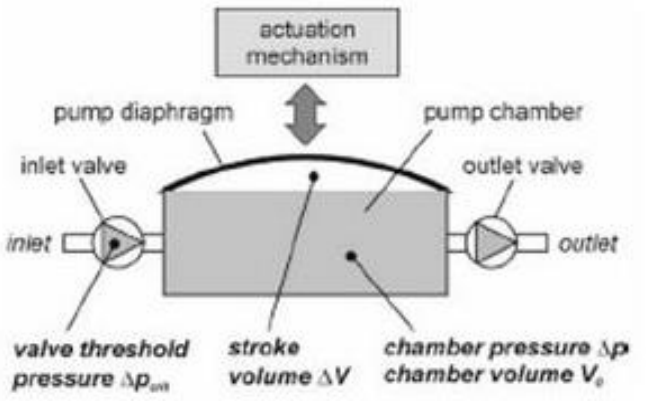
شکل ۱-۲- میکروپمپ ساخته‌شده توسط وال مارک

۱-۳- انواع میکروپمپ

همان‌طور که گفته شد میکروپمپ‌ها را می‌توان دردودسته مکانیکی و غیر مکانیکی طبقه‌بندی کرد که میکروپمپ‌های مکانیکی خود به دودسته رفت و برگشتی و کرم واره‌ای طبقه‌بندی می‌گردند. میکروپمپ‌های غیر مکانیکی نیز انواع مختلفی دارند که در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت. در اینجا لازم است تا با شیرهایی که در ساختمان میکروپمپ‌ها بکار می‌روند آشنا گردیم، چراکه آن‌ها نقش مؤثری در عملکرد میکروپمپ‌ها دارند. به‌طورکلی شیرهای ورودی و خروجی را که در ساختمان میکروپمپ‌ها بکار می‌روند را می‌توان به دودسته شیرهای فعال و غیرفعال تقسیم کرد. البته شیرهای دینامیک (نازل دیفیوزری) نیز وجود دارند که در دسته شیرهای غیرفعال جای می‌گیرند.

۱-۳-۱- شیرهای فعال

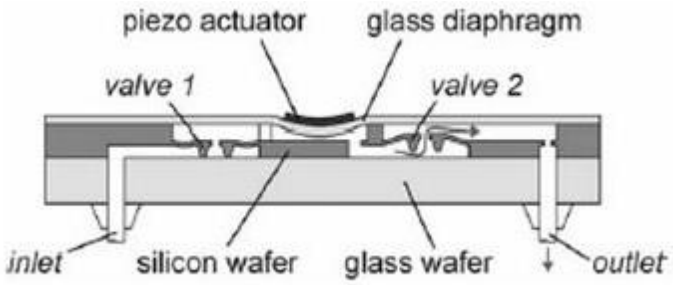
این شیرها توسط یک سیستم کنترلی خارجی و هماهنگ با بقیه قسمت‌ها باز یا بسته می‌شوند. این شیوه کارکرد دستیابی به‌دقت بالا را در میکروپمپ‌ها میسر می‌سازد؛ اما بهر حال به دلیل کوچک بودن ابعاد، ساخت آن‌ها دشوار بوده و موجب افزایش هزینه می‌گردد. در شکل (۱-۳) یک میکروپمپ رفت و برگشتی (غشایی) با شیرهای فعال نشان داده شده است.



شکل۱-۳- میکروپمپ دیافراگمی با شیر فعال

۱-۳-۲- شیرهای غیرفعال

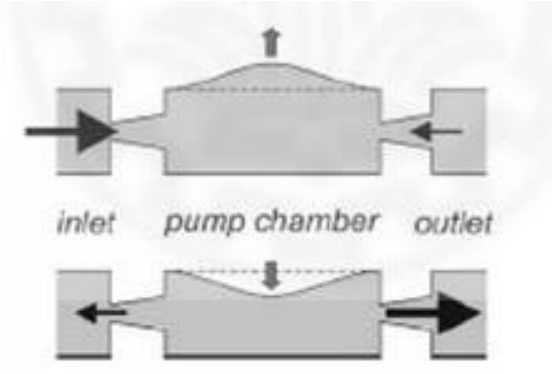
شیرهای غیرفعال توسط حرکت و فشار خود سیال باز و یا بسته می‌شوند و دیگر نیازی به کنترل‌گر خارجی ندارند؛ بنابراین ساخت آن‌ها آسان‌تر و هزینه کمتری دارد ولی در عوض نسبت به شیرهای فعال دقت کمتری دارند. شکل (۱-۴) یک نمونه از شیرهای غیرفعالی را در یک میکروپمپ غشایی نشان می‌دهد. این نوع شیرها غالباً به‌صورت پوسته و یا تیر هستند که در اثر ازدیاد نیروی وارده از طرف سیالی به آن‌ها در یک جهت گشوده می‌شوند ولی از جهت دیگر با محدودیت مواجه‌اند و ازدیاد نیروی سیال در آن جهت تنها آن‌ها را به دیواره اطراف محکم‌تر می‌فشارد. سازوکار ذکرشده باعث می‌شود تا این شیرها تحت تنش خستگی قرار گیرند و علاوه بر آن کارایی خود را در فرکانس‌های کاری بالا از دست بدهند.



شکل ۱-۴- میکروپمپ دیافراگمی با شیر غیرفعال

۱-۳-۳- شیرهای دینامیک (نازلی - دیفیوزر)

برای رفع مشکل شیرهای غیرفعال، شیرهای نازل - دیفیوزری به وجود آمدند که از این مزیت که مقاومت سیالی نازل‌ها و دیفیوزرها در جهت ورودی و خروجی متفاوت است بهره می‌برند و با بکار نبردن اجزاء متحرک از ایجاد ترک و شکست خستگی جلوگیری می‌کنند؛ اما بهر حال بازدهی کمتری نسبت به انواع قبلی دارند و همیشه یک جریان برگشتی در آن‌ها وجود دارد. شکل (۱-۵) این نوع شیر را در یک میکروپمپ غشایی نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵- میکروپمپ دیافراگمی با شیر دینامیک (نازلی – دیفیوزر)

۱-۴- میکروپمپ‌های مکانیکی

بیشتر میکروپمپ‌های مکانیکی که تاکنون گسترش پیدا کرده‌اند مربوط به دسته رفت و برگشتی می‌شوند که عموماً شامل یک محفظه فشار می‌باشند که توسط نیروی اعمالی از طرف محرک به یک غشا، فشار داخل آن تغییر می‌کند و باعث حرکت سیال می‌گردد. علاوه بر آن شیرهای فعال و یا غیرفعال نیز جهت کنترل جریان در ساختمان آن‌ها به کار می‌رود. بازده میکروپمپ‌های مکانیکی معمولاً به دلیل محدودیت‌های مکانیکی آن محدود است.

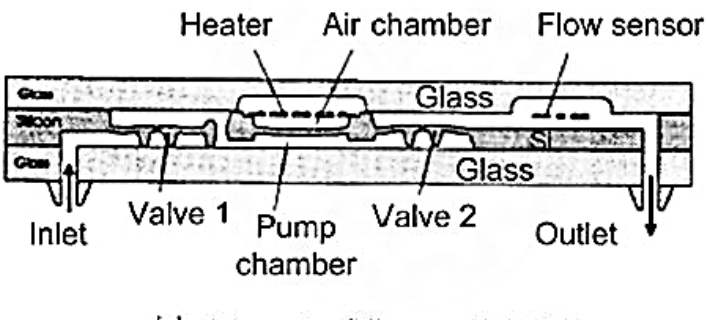
۱-۴-۱- میکروپمپ‌های پیزوالکتریک

یک میکروپمپ پیزوالکتریک شامل یک دیسک پیزوالکتریک که بر روی دیافراگمی نصب شده و محفظه فشار و شیر می‌باشد. این نوع میکروپمپ‌ها با استفاده از تغییر شکل مواد پیزوالکتریک در اثر اعمال ولتاژ به آن‌ها، تحریک می‌شوند. ازجمله مزایای این‌گونه میکروپمپ‌ها می‌توان به نیروی تحریک بالا، زمان پاسخ کوتاه و ساختار ساده اشاره کرد. در عین اینکه دارای معایبی نظیر ولتاژ کاری بالا و جابجایی کم نیز می‌باشد. به دلیل ساختار مواد پیزوالکتریک، در اثر اعمال ولتاژ به آن‌ها نیروی زیادی در جابجایی کم به دست می‌آید که منوط به کاربرد آن‌ها ممکن است در بعضی موارد ولتاژ بسیار بالا برای گرفتن جابجایی موردنیاز اعمال گردد. البته لازم به ذکر است که به دلیل وجود اجزاء مکانیکی در میکروپمپ‌ها، زمان پاسخ و یا فرکانسی عملکرد محدود می‌شود که در این خصوصی عملکرد شیرها بسیار مؤثر می‌باشند. برای افزایش فرکانس کارکردی می‌توان از شیرهای نازل دیفیوزری که پیش‌تر ذکر شد استفاده کرد. بیشتر این میکروپمپ‌ها بر روی بسترهای سیلیکونی ساخته می‌شوند. درگذشته لایه پیزوالکتریک به‌صورت دستی روی غشا که آن‌هم از سیلیکون یا شیشه بود چسبانده می‌شد؛ اما امروزه این روند به‌صورت کاملاً خودکار انجام می‌شود و همین افزایش دقت باعث افزایش بازده می‌شود.

برای مثال یک نمونه از میکروپمپ غشایی پیزوالکتریک ساخته شده در سال ۱۹۸۸، دارای نرخ جریان ۳ میکرو لیتر در دقیقه با ولتاژ ۸۰ ولت و فرکانس کاری ۱۵ هرتز بود کمی بعد با استفاده از تکنولوژی چاپ سطحی توانستند یک لایه پیزوالکتریک با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر را روی یک غشا با ابعاد ۸ میلی‌متر طولی، ۴ میلی‌متر عرض و ۷۰ میکرومتر ضخامت لایه نشانی کنند و به نرخ جریان ۱۲۰ مایکرو لیتر بر دقیقه دست یابند؛ که در آن از ولتاژ ۶۰۰ ولت در فرکانسی ۲۰۰ هرتز استفاده شده بود و به دلیل استفاده از شیرهای دینامیکی، یک فشار برگشتی ۲ کیلو پاسکال نیز در سیستم به وجود می‌آمد.

۱-۴-۲- میکروپمپ‌های ترموپنوماتیکی

میکروپمپ‌های ترموپنوماتیکی تنها در نوع تحریک با میکروپمپ‌های پیزوالکتریک متفاوت هستند؛ که در آن‌ها به‌جای استفاده از مواد پیزوالکتریک از یک گرم‌ساز، غشا و یک محفظه درزبندی شده پر از گاز یا مایع جهت ایجاد نیروی تحریک استفاده می‌شود (شکل ۱-۶).



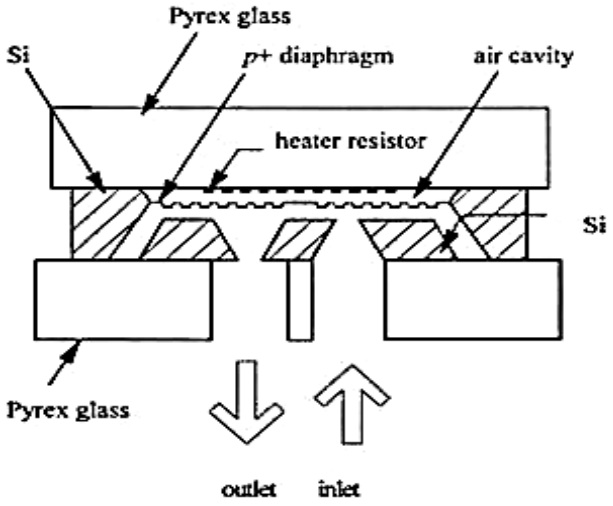
شکل ۱-۶- میکروپمپ دیافراگمی تروپنوماتیکی

در این نوع از میکروپمپ‌ها گرمایش اهمی و سرمایشی طبیعی باعث تغییر حجم سیال داخل محفظه شده و درنتیجه غشا را جابجا می‌کنند که باعث تغییر فشار و رانش سیال می‌گردد. ازجمله مزایای آن‌ها می‌توان به جابجایی بزرگ غشاء ولتاژ کاری کم آن‌ها اشاره کرد. البته معایبی نظیر ثابت زمانی بالا یا کندی پاسخ، محدودیت سازه‌ای غشاء برای ارتعاش با دامنه زیاد و توان مصرفی بالا باوجود کمی ولتاژ، در این نوع میکروپمپ‌ها دیده می‌شود.

به دلیل استفاده از حرارت به عنوان نیروی تحریک در این نوع میکروپمپ‌ها، زمان لازم برای گرم و خنک شدن سیال داخل محفظه نسبت به زمان پاسخ پیزوالکتریک زیادتر می‌باشد و همین امر باعث کندی پاسخ سیستم میکروپمپ ترموپنوماتیکی می‌گردد؛ اما در کاربردهایی که فرکانس کاری بالا مورد نظر نیست این نوع میکروپمپ‌ها به‌خوبی کار می‌کنند.

محرک‌های ترموپنوماتیکی نخستین بار توسط دبلیک و آنجل در سال ۱۹۸۷ و برای استفاده در شیرهای مینیاتوری ارائه گردید. سپس توسط ون پل و همکارانش (۱۹۹۰) رشد و توسعه پیدا کرد و دلیل آن هم در دسترس نبودن ولتاژ کاری بالای مواد پیزوالکتریک بود. یک نمونه از این میکروپمپ قادر به تولید ۳۴ میکرو لیتر بر دقیقه در فشار ۵ کیلو پاسکال ولتاژ ۶ ولت است که توان مصرفی آن ۲ وات و فرکانس کاری آن ۱ هرتز است. یک راه برای دست یافتن به غشاهای قابل انعطاف زیاد استفاده از

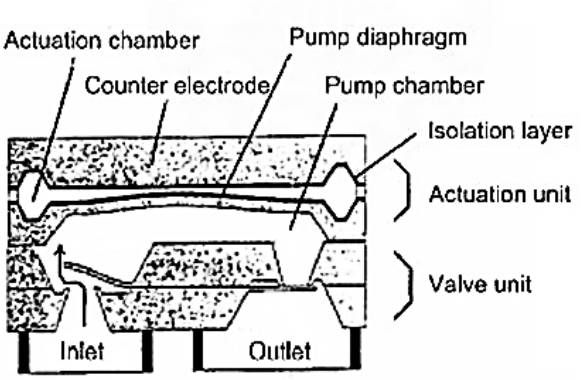
پوسته‌های چین‌دار است که تا حد قابل قبولی مشکل سختی غشا را از میان برمی‌دارد. شکل (۱-۷) طرز کار و ساختمان این نوع میکروپمپ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۷- میکروپمپ ترموپنوماتیکی با غشا چین‌دار جهت افزایش انعطاف

۱-۴-۳- میکروپمپ‌های الکترواستاتیک

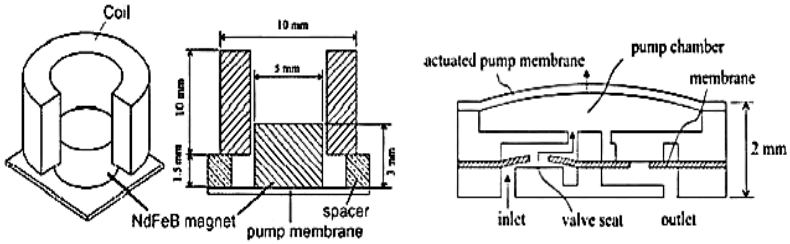
در این نوع میکروپمپ‌ها از نیروی الکترواستاتیک به‌عنوان نیروی محرک استفاده می‌شود که دارای مزایایی از قبیل توان مصرفی کم، کنترل آسان تغییر شکل غشاء با استفاده از ولتاژ اعمالی و پاسخ سریع می‌باشد و دارای معایبی مانند ولتاژ تحریک بالا و محدودیت جابجایی غشاء می‌باشد. اولین نمونه این میکروپمپ در سال ۱۹۹۱ توسط جودی و همکارانش ساخته شد که قادر به تولید ۶۴۰ نانو لیتر بر سیکل با ولتاژ ۲۰۰ ولت بود. همه قسمت‌ها ازجمله غشا و شیرها به صورت الکترواستاتیکی کنترل می‌شدند. این میکروپمپ توسط تکنولوژی میکرو ماشین‌کاری سطحی ساخته شد. هرچند در این شیوه تحریک می‌توان جابجایی خوبی به دست آورد، اما در یک فاصله بحرانی دیافراگم به الکترود ثابت می‌چسبد و میکروپمپ از کار می‌افتد برای جلوگیری از این اتفاق از یکسری لایه‌های دی‌الکتریک بر روی الکترودها استفاده می‌گردد. این نوع میکروپمپ‌ها دارای کنترل‌پذیری خوب و دقیقی می‌باشند و به همین دلیل از آن‌ها در صنایع پزشکی و داروسازی استفاده می‌گردد. شکل (۱-۸)



شکل ۱-۸- میکروپمپ الکترواستاتیکی

۱-۴-۴- میکروپمپ‌های الکترومغناطیس

تنها تفاوت این نوع میکروپمپ با نوع الکترواستاتیک در نوع نیروی تحریک می‌باشد. در اینجا غشا و بدنه نقش دو قطب مغناطیسی را ایفا می‌کنند که با استفاده از جریان الکتریسیته کنترل می‌گردند. مزایای این نوع میکروپمپ‌ها را می‌توان در عملکرد نیروی تحریک در فواصل دور ولتاژ عملکرد پایین دانست و ازجمله معایب این میکروپمپ‌ها عبارت‌اند از؛ نسبت نیروی محرک با توان سوم ضریب مقیاسی، محدودیت مواد مغناطیسی قابل ماشین‌کاری و مصرف توان بالا و اتلاف حرارتی، به دلیل اینکه نیروی الکترومغناطیسی یک نیروی حجمی می‌باشد، با کاهش ابعاد این نیرو نیز کاهشی می‌یابد؛ بنابراین در کوچک‌سازی ابعاد محدودیت وجود دارد. یک نمونه از این میکروپمپ در سال ۱۹۹۹ توسط بوهم و همکارانش ساخته شد. شکل (۱-۹). ساختمان این نوع میکروپمپ را نشان می‌دهد.



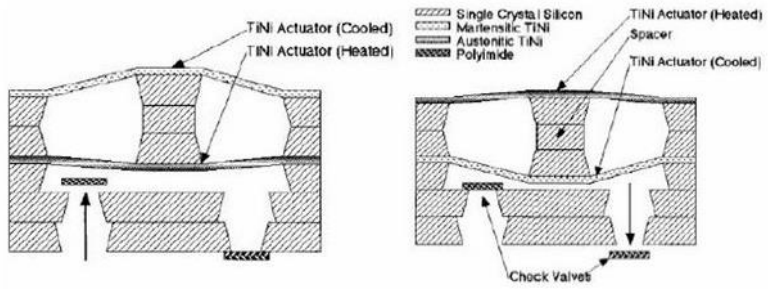
شکل ۱-۹- میکروپمپ الکترومغناطیسی ساخته شده از پلاستیک

همان‌طور که از شکل پیداست یک محرک الکترومغناطیسی روی غشای پلیمری قرار گرفته است. این میکروپمپ توانایی پمپ کردن ۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه هوا و ۱/۲ میلی‌لیتر بر دقیقه آب را با مصرف توان ۰/۵وات دارد. باید توجه داشت که تاکنون بهینه‌سازی‌ها و تغییرات زیادی در آن‌ها به وجود آمده است.

۱-۴-۵- میکروپمپ‌های ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار (نیکل تیتانیم)

ازآنجایی‌که در میکروپمپ‌هایی از این نوع نیاز به دیافراگم‌هایی با انعطاف‌پذیری بالا وجود دارد؛ بنابراین باید از آلیاژهایی با خواص مورد نظر استفاده کرد. آلیاژهای نیکل تیتانیم یکی از بهترین گزینه‌ها برای استفاده در میکروپمپ‌ها می‌باشند، چراکه قابلیت بازگشتی بالایی دارند و می‌توانند نیروی تحریک بالایی را در جابجایی‌های بزرگ فراهم آورند. این میکروپمپ‌ها دارای مزایای: تولید فشار بالا، قابلیت انعطاف غشای نیکل تیتانیم، ولتاژ تحریک پایین و معایبی ازجمله: فرکانسی کارکرد پایین، اتلاف حرارتی و بازده کم می‌باشند. در این میکروپمپ‌ها یک غشای نیکل تیتانیم متصل به یک فنر (غالباً از جنسی نیکل تیتانیم) که از پیش فشرده شده است در حالت خمیده قرار دارد و با اعمال حرارت به حالت تخت درمی‌آید و عمل مکشی را انجام می‌دهد؛ و پس از سرد شدن تحت اثر نیروی فنر حالت خمیده یا شکل اولیه خود را به دست آورده و سیال را بیرون می‌راند.

اولین میکروپمپ از این نوع در سال ۱۹۹۷ توسط بنارد ساخته شد که بیشینه جریان تولیدی آن برای آب ۴۹ میکرو لیتر بر دقیقه در فرکانس کاری ۹ هرتز ولتاژ ۰۶ ولت و توان مصرفی ۰/۵ وات بود. این میکرو پمپ در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۰- میکروپمپ نیتینولی در دو حالت مکش و پمپ

به‌طورکلی میکروپمپ‌های مکانیکی از هر نوع با دو مشکل مقاومت در برابر حباب هوا و خود راه‌انداز بودن مواجه‌اند؛ و این به دلیل اینکه حجم جابجایی بسیار کمتر از حجم مرده در میکروپمپ است به وجود می‌آید. به همین منظور در سال ۱۹۸۸ یکسری مطالعات تحلیلی توسط ریشتر و دیگران انجام شد که نشان می‌داد برای غلبه بر این مشکلات باید نسبت تراکم بیشتر گردد؛ بنابراین نیاز به یک محفظه پمپ کم عمق و در عوض با سطح زیاد بود تا بتوان بر این دو مشکل غلبه کرد.

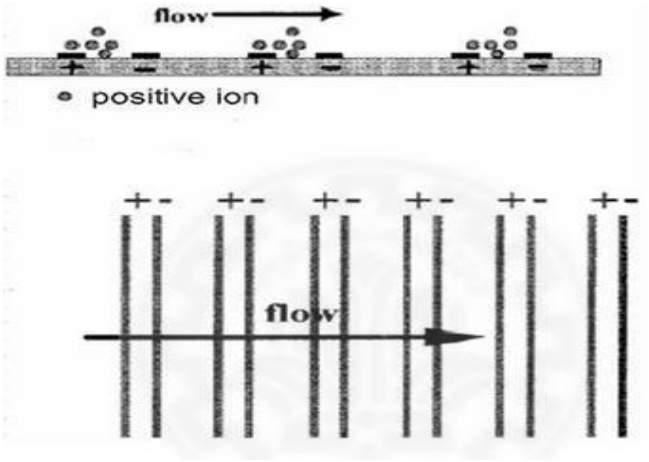
۱-۵- میکروپمپ‌های غیرمکانیکی

میکروپمپ‌های غیرمکانیکی تقریباً از سال ۱۹۹۰ مطرح شدند و تاکنون در حال پیشرفت و توسعه هستند. همان‌طور که پیش‌تر ذکر آن رفت این نوع میکروپمپ‌ها بسیار ظریف هستند و خروجی آن‌ها در مقایسه با میکروپمپ‌های مکانیکی ناچیز است. در ادامه با انواع معروف میکروپمپ‌های غیرمکانیکی آشنا می‌گردیم.

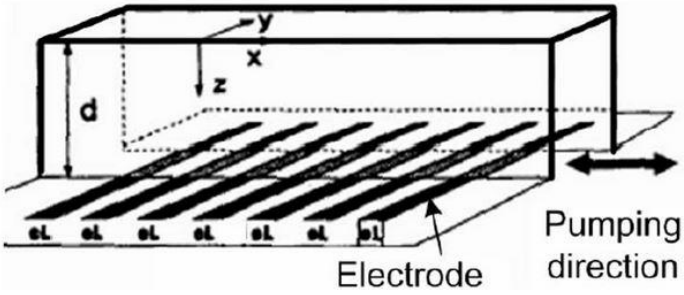
۱-۵-۱- میکروپمپ الکتروهیدرودینامیک

سازوکار این نوع میکروپمپ به این صورت است که ابتدا سیال کاری را باردار می‌کنند، سپس تحت اثر میدان الکتریکی ایجاد شده نیرو به این بارها وارد شده که سیالی را وادار به حرکت می‌کنند؛ بنابر این جریان سیال را می‌توان با استفاده از میدان الکتریکی کنترل کرد. از مزایای آن می‌توان به نبود اجزاء متحرک، روند ساخت ساده و قابلیت اطمینان بالا و از معایب آن می‌توان به حساس بودن آن به مشخصات سیال اشاره کرد.

باید توجه داشت که با این روش تنها می‌توان مایعات غیر قطبی مانند اتیل الکلی را پمپ کند. یون‌ها به طریق شیمیایی به داخل مایع تزریق می‌شوند و سپس انتشار یک موج الکتریکی در طول بدنه باعث کشیده شدن یون‌ها و به دنبال آن‌ها سیال می‌گردد. شکل (۱-۱۱) این روش کارکرد را نشان می‌دهد. نوع دیگری از همین میکروپمپ به جای استفاده از یون‌های خارجی، خود با استفاده از یک میدان الکتریکی به سیال بار القا می‌کند و سپس با حرکت این میدان سیال نیز به حرکت در می‌آید که در شکل (۱-۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۱- میکروپمپ تزریق یون الکتروهیدرودینامیک

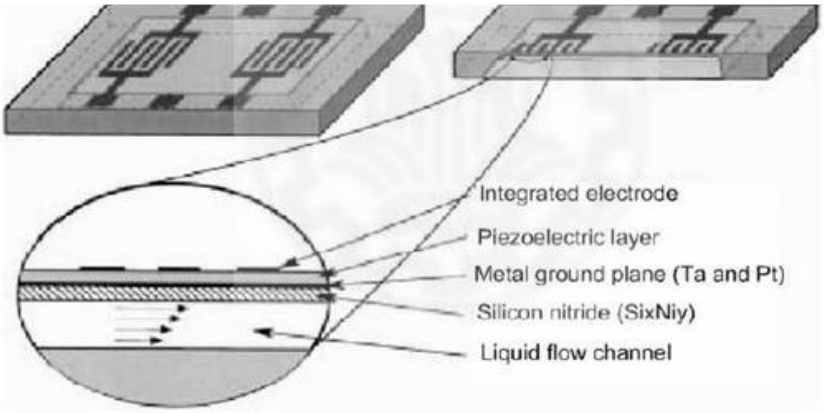


شکل ۱-۱۲- میکروپمپ القایی الکتروهیدرودینامیک

۱-۵-۲- میکروپمپ‌هایی با سازوکار انتشار موج خمشی صفحه‌ای

در این نوع از میکروپمپ‌ها، انتشار یک موج آلتراسونیک صفحه‌ای باعث حرکت سیال در راستای انتشار می‌گردد. ازجمله نکات مثبت این نوع میکروپمپ عبارت‌اند از: ولتاژ کم، عدم نیاز به شیر، نداشتن محدودیت رسانایی سیال و توانایی انتقال ذرات ریز جامد و از معایب آن‌ها می‌توان دبی و فشار پایین را نام برد.

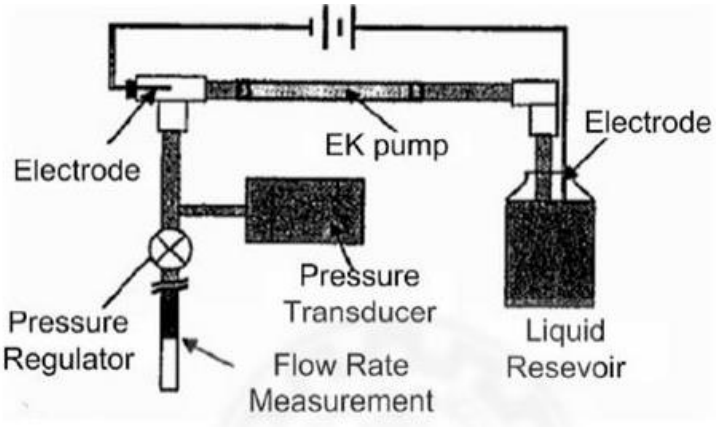
این ایده توسط وایت و دیگران در سال ۱۹۹۱ مطرح شد که انتشار یک موج خمشی صفحه‌ای روی یک پوسته می‌تواند سیال و یا جامدات دانه‌ای را در راستای انتشار به پیش براند. در این طرح از اکسید روی به‌عنوان لایه پیزوالکتریک برای تولید موج استفاده شد. ساختمان این میکروپمپ در شکل (۱-۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۳- میکروپمپ FPW با لایه پیزوالکتریک

۱-۵-۳- میکروپمپ‌های الکتروکینتیک

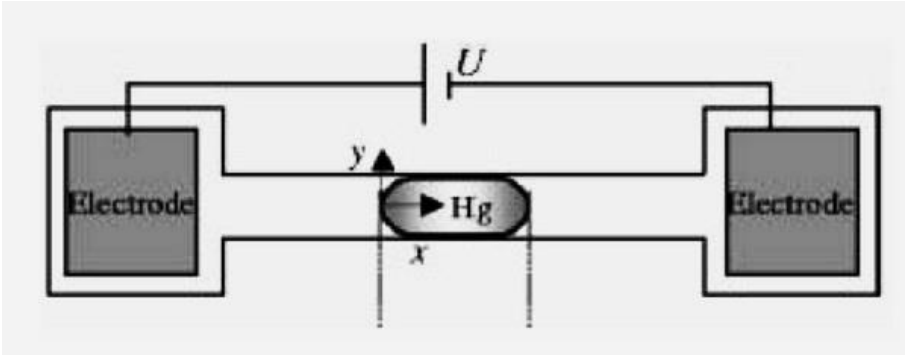
در اینجا از خاصیت اسمز الکتریکی (electro OSmosis) جهت انتقال سیال الکترولیت استفاده می‌شود. این خاصیت را می‌توان در لوله‌های موئین با قطر کمتر از ۵۰ میکرومتر مشاهده کرد. یک میدان الکتریکی در دو طرف سیال الکترولیت ایجاد می‌گردد و باعث حرکت آن می‌شود. از مزایای این روش ایجاد فشار بیشتر نسبت به دیگر میکروپمپ‌های غیر مکانیکی می‌باشد. اولین نمونه این میکروپمپ در سال ۱۹۹۸ و توسط پاولی ساخته شد. شکل (۱-۱۴) ساختمان میکروپمپ غیر مکانیکی الکتروکینتیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۴- میکروپمپ غیر مکانیکی الکتروکینتیک EK

۱-۵-۴- میکروپمپ‌های با سازوکار خیس‌کنندگی الکتریکی پیوسته

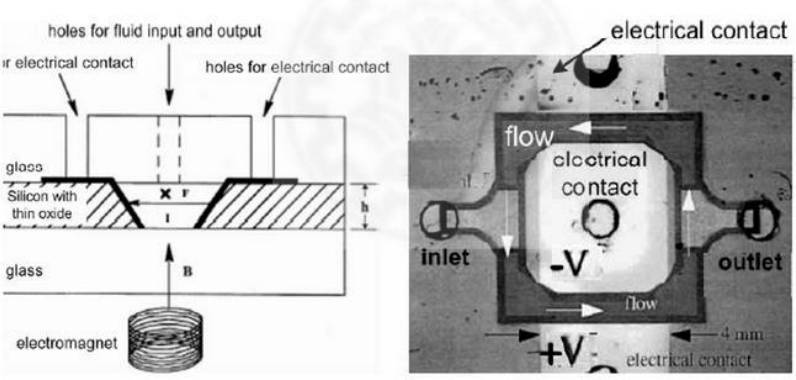
در اثر این پدیده نیروی کشش سطحی به‌طور موضعی توسط پتانسیل الکتریکی تغییر می‌کند؛ بنابر این وقتی‌که پتانسیل الکتریکی در امتداد یک کانال جریان سیالی اعمال شود. یک قطره می‌تواند در اثر تغییر نیروی کشش سطحی در طول کانال حرکت کند. این روش تحریک توسط ماتسوموتو در سال ۱۹۹۰ ارائه شد؛ که میکروپمپ آن‌ها توانایی پمپ کردن ۶۳ مایکرو لیتر بر دقیقه و با اعمال ولتاژ ۲/۳ ولت را داشت که در شکل (۱-۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۵- شمای کلی روش کار میکروپمپ‌های تغییر کشش سطحی

۱-۵-۵- میکروپمپ‌های هیدرودینامیک مغناطیسی

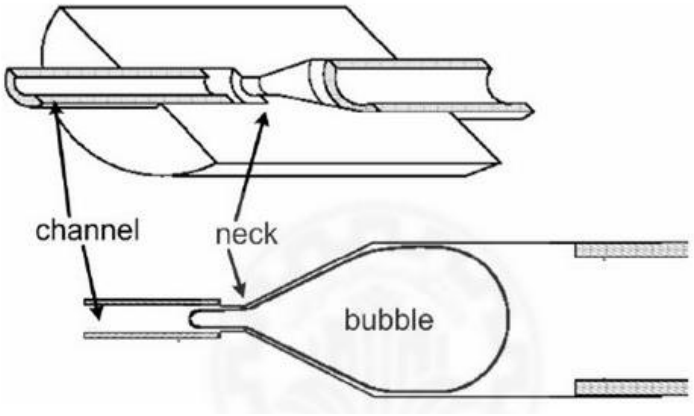
این نوع میکروپمپ‌ها که در واقع قرین میکروپمپ‌های الکتروهیدرودینامیک هستند، از یک میدان مغناطیسی برای پیش راندن سیال فرو مغناطیسی استفاده می‌کند؛ که به همین دلیل دارای محدودیت می‌باشند. شکل (۱-۱۶) میکروپمپ و مقطع آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۶- سمت چپ: مقطع میکروپمپ و سمت راست: میکروپمپ به‌صورت یک تراشه

۱-۵-۶- میکروپمپ‌های حبابی

درحالی که در تمام انواع میکروپمپ‌های ذکر شده حباب‌ها به عنوان یک مشکل ظاهر می‌شوند، در این نوع میکروپمپ از حباب‌ها به عنوان یک نیروی تحریک استفاده می‌گردد؛ و مبنای کاربر اساسی تولید و فروپاشی حباب در مجرا می‌باشد. با این روش جریان ۱۰۰ میکرو لیتر بر دقیقه به دست آمد که در خور توجه می‌باشد. در این روش با اعمال جریان متغیری قوی به یک نقطه از کانال حرارت داده می‌شود. بدین ترتیب حباب تشکیل شده و سیال روبرو را به جلو می‌راند و سپس در اثر سرد شدن نابود می‌گردد. شکل (۱-۱۷) ساختمان این نوع میکروپمپ غیر مکانیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۷- یک نوع میکروپمپ حبابی

منابع فصل ۱

- Piezo Electric Products Inc. “Piezoelectric Motor/Actuator Kit Manual”, Advanced Technology Group, Cambridge, MA, 1988.
- Salaa G. Olivierb M. Bettinia P. Sciacovellic D. “Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators for Control of Active Composite Structures”, 2004.
- Zhang M. M. Cheng L. and Zhou Y. “Control of Vortex-Induced Non-Resonance Vibration Using Piezo-ceramic Actuators Embedded in a Structure”, Journal of Smart Materials and Structures, Vol.14, pp. 1217–1226, 2005.
- Della C. N. and Shu D. “Vibration of Beams with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators”, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 529–537, 2006.
- Letty R.L. Sosnicki O. Barillot F. Claeysssen F. “Actuators in Adaptronics: Piezoelectric Actuators”, Proceedings of CONFERENCE ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, Lisbon, Portugal, July 18-۲۱, 2005.
- Prechtl E. F. “Development of a Piezoelectric Servo-Flap Actuator for Helicopter Rotor Control”, Master’s thesis in Aeronautics and Astronautics at the Massachusetts Institute of Technology, May 1994.
- Pan W. Y. Sun S. and Tuttle B. A. “Electromechanical and Dielectric Instability Induced by Electric Field Cycling in Ferroelectric Ceramic Actuators", Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 1, pp. 286-, 1992.

- Ayhan A. F. “Design of a Piezoelectrically Actuated Microvalve for Flow Control in Fuel Cells”, Master’s thesis, University of Pittsburgh, 2002.
- Yoon K. J. Park K. H. Lee S. K. Goo N. S. and Park H. C. “Analytical Design Model for a Piezo-Composite Unimorph Actuator and its Verification Using Lightweight Piezo-composite Curved Actuators”, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 13, pp..
- Anderson E. H. Holcomb M. D. Leo D. J. “Integrated Electromechanical Devices for Active Control of Vibration and Sound”, Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Dallas, Texas, November 161997.
- Sodano H. A. “Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation”, master’s Thesis Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, July 28, 2003.
- Wilkie W. K. Bryant R. G. High J. W. Fox R. L. Hellbaum R. F. Jalink A. Little B. D. and Mirick P. H. “Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications”, NASA Langley Research Center, Proceeding of SPIE’s 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, March 5-۹, 2000.
- Haertling G. H. Proceeding of SPIE Conference “Rainbow Actuators and Sensors: A New Smart Technology”, Vol. 3040, pp. 81–92, 1997.
- Borgen M. G. Washington G. N. and Kinzel G. L. “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 8, NO. 1, MARCH 2003.
- Capozzoli M. Gopalakrishnan J. Hogan K. Massad J. Tokarchik T. Wilmarth S. Banks H. T. Mossi K. M. Smith R. C. “Modeling Aspects Concerning THUNDER Actuators”, Workshop for Graduate Students, North Carolina State University, July 27-August 4, 1998.
- Chung S. W. Hwang I. S. and Kim S. J. “Large-scale Actuating Performance Analysis of a Composite Curved Piezoelectric Actuator”, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 213–220, 2006.
- Lim S. M. Lee S. Park H. C. Yoon K. J. and Goo N. S. “Design and Demonstration of a Biomimetic Wing Section Using a Lightweight Piezo-Composite Actuator (LIPCA), Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 14, pp. 496–503, 2005.
- Mossi K. Ounaies Z. Smith R. and Ball B. “Pre-stressed Curved Actuators: Characterization and Modeling of their Piezoelectric Behavior”, Technical report of CRSC, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 2003.
- Pretorius J. Hugo M. and Spangler R. “A Comparison of Packaged Piezoactuators for Industrial Applications”, Midé Technology Corporation, 02155, USA, 2003.
- Yaman Y. Caliskan T. Nalbantoglu V. Prasad E. Waechter D. “Active Vibration Control of a Smart Plate”, Proceedings of ICAS 2002 Congress.

فصل ۲

مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه میکروپمپ

۲-۱- مقدمه

میکروپمپ‌ها، میکرو ولوها، میکرو میکسرها و سنسور جریان میکرو به صورت گسترده‌ای به منظور جابجایی مایعات در مقیاس میکرو مورد توجه محققان و صنایع مختلف قرار گرفته‌اند. میکرو پمپ‌ها یک جزء اصلی از این دستگاه‌ها با توجه به پتانسیل قابل توجه آن در برنامه‌های کاربردی بیولوژیکی و لیزری می‌باشند. میکروپمپ‌های مختلف در دهه گذشته بررسی شده است. اصول مختلف تحریک، مانند تحریک پیزوالکتریک، آلیاژهای حافظه‌دار، تحریک الکترواستاتیک تحریک حرارتی و تحریک مغناطیسی به این منظور تاکنون اتخاذ شده‌اند. به منظور توسعه میکرو پمپ‌ها. با این حال، تحریک پیزوالکتریک به دلیل ساختار ساده آن، چگالی توان خروجی بالا و قدرت تحریک بالا بسیار امیدوار کننده می‌باشد.

اکثر میکروپمپ‌های گزارش شده تاکنون از سیستم کلی رفت و برگشتی جابجایی پمپ با استفاده از دیافراگم‌ها به عنوان سطح محرک استفاده می‌کنند. این پمپ‌ها به عنوان پمپ‌های غشاء و یا پمپ‌های دیافراگمی شناخته شده‌اند. پمپ‌های رفت و برگشتی میکرو پمپ‌های جابجایی هستند که در آن دریچه فعال و اتاق اولیه عامل یکی می‌باشند. از محرک‌های نوع رفت و برگشتی می‌توان به‌عنوان دریچه فعال استفاده کرد که این محرک‌ها می‌توانند به راحتی با قدرت اعمالی ورودی کنترل شوند و نیاز به هیچ فرایند ساخت اضافی برای ولو ندارند. اساس پمپ کردن در این سیستم‌ها بر پایه جابجایی دیافراگم می‌باشد که باعث اعمال فشار به سیال در جهت دلخواه می‌شوند. پمپ‌های رفت و برگشتی از لحاظ تئوریک به سه و یا بیشتر سطح رفت و برگشتی نیاز دارند.