وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

بررسی تجربی و تحلیلی دینامیک میکروپمپ موئین غیرفعال

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

فرشته صمدی طاهری

استاد راهنما: دکتر مهدی حبیبی

خرداد ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

ناچیزتر از آنست که تقدیم را شایسته باشد، ولی مطابق مرسوم و به پاس ارج نهادن به به زحماتی که جبرانشان هرگز برایم میسر نخواهد بود، تقدیم می‌دارم:

تقدیم به
پدر و مادر عزیزم

که سایه‌شان بر سرم همه مهر است و نثارم همه به پایشان همه شرم و وجودشان گواهی است بر مهربانی خداوند.

و
برادرم مهدی

سپاس و حمد فراوان به درگاه خداوند منان، نخستین آموزگار و دارنده اولین و آخرین علم.

با زبان و قلمی ناتوان، خالصانه و فروتنانه به بزرگواری‌های فرزانگان دانشوری که توان و دانش خود را با محبت و اخلاص در اختیارم گذاشتند و الفبای آموختن را به من ارزانی داشتند، سر فرود می‌آورم.

از استاد راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر مهدی حبیبی که در نهایت لطف دقت، استادانه در کلیه مراحل این پایان‌نامه مرا یاری دادند و انجام کار را می‌بایست مرهون راهنمایی‌های متوالی ایشان دانست،کمال قدرانی و تشکر را دارم.

از اساتید محترم گروه فیزیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی که از محضرشان بهره‌ها بردم و افتخار شاگردیشان را داشتم، کمال سپاسگذاری را دارم.

از خانواده مهربان و عزیزم صمیمانه متشکرم. آنان که بی‌فروغشان هرگز روشنایی را نمی‌شناختم. خوبانی که نفس‌های گرمشان، دلگرمی راهم و طپش قلبشان شیرین‌ترین صدا در گوش جانم بوده و هس.نیکانی که هر چه هست از آنان است و وصف بی‌انتهایشان در کلام نمی آید.

از آقای جوادی که در این پایان‌نامه راهنمایی‌های بسیاری به من کردند، کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم.

از کلیه دوستان و دانشجویان عزیز که در طول دوره با اینجانب همکاری نمودند، خانم‌ها و آقایان پاکپور، فرهنگی، بهمنی، شمالی، ناصری و کلیه دوستان در آزمایشگاه سیالات پیچیده تشکر می‌نمایم. بی شک اگر یاری‌های این بزرگواران نبود، هیچگاه از عهده این کار بر نمی آمدم.

از خالق منان، توفیق، بهروزی و طول عمر با عزت برای این فرزانگان را خواهانم.

چکیده

در این پایان نامه ما به بررسی یک پمپ موئین غیر فعال می‌پردازیم که به سبب نیروی کشش سطحی کار می‌کند. در این میکروپمپ با قرار دادن دو قطره سیال با اندازه‌های مختلف در ابتدا و انتهای میکروکانال جریانی از قطره کوچک به قطره بزرگ در اثر اختلاف فشار لاپلاس ایجاد خواهد شد. بر اساس رفتار قطره‌ها در آزمایش سه فاز دیده می‌شود. در فاز اول شعاع ترکنندگی دو قطره ثابت است، در فاز دوم شعاع ترکنندگی قطره کوچک ثابت و زاویه تماسی قطره بزرگ ثابت است. در فاز سوم زاویه تماسی دو قطره ثابت است. در این پایان نامه به بررسی تحلیلی و تجربی این مسئله پرداخته و نتایج تحلیلی آن را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌کنیم که توافق خوبی را نشان می‌دهد. نهایتاً پیشنهادهایی برای بهبود شارش و کنترل نرخ شارش در میکروپمپ‌های موئین ارائه می‌دهیم.

فهرست

چکیده . . . . . پنج

مقدمه . . . . . نه

۱ مقدمه‌ای بر میکروشاره

۱.۱ مقدمه ۱

۲.۱ تاریخچه ۳

۳.۱ روش‌های ساخت سیستم‌های میکرونی ۴

۴.۱ دینامیک میکروشاره ٦

۱.۴.۱ قانون یانگ–لاپلاس ۸

۲.۴.۱ نیروهای بین سطحی و اثر موئینگی ۹

۳.۴.۱ عدد موئینگی ۱۰

۴.۴.۱ مقایسه نیروی وزن با نیروی کشش سطحی و بدست آوردن طول موئینگی . . . ۱۱

۵.۴.۱ نیروهای سطحی و قطره‌ها ۱۱

۶.۴.۱ زاویه استاتیک و دینامیک ۱۲
۷.۴.۱ زاویه تماس و ترکنندگی ۱۳
۸.۴.۱ تقریب پیوستگی ۱۴
۹.۴.۱ شرایط مرزی ۱۵
۱۰.۴.۱ قانون پوآزوی ۱۷
۱۱.۴.۱ جریان پوآزوی در کانال استوانه‌ای ۱۷
۱۲.۴.۱ جریان پوآزوی در کانال با سطح مقطع مستطیل ۱۹
۵.۱ حل عددی معادلات دیفرانسیل ۲۲
۱.۵.۱ روشهای گام به گام ۲۳

۲ میکروپمپ‌ها

۱.۲ مقدمه ۲۸
۲.۲ پمپ‌های فعال ۲۹
۱.۲.۲ میکروپمپ‌های مکانیکی ۲۹
۲.۲.۲ میکروپمپ‌های الکتریکی ومغناطیسی ۳۰
۳.۲ پمپ‌های غیر فعال ۳۱
۱.۳.۲ میکروپمپ غیرفعال کشش سطحی ۳۲
۲.۳.۲ جریان معکوس در میکروپمپ غیرفعال ۳۸

۳ میکروپمپ غیرفعال کشش سطحی

۱.۳ مقدمه ۴۵

۲.۳ معرفی پمپ غیر فعال موئین مورد مطالعه دراین پایان نامه ۴۶

۳.۳ مراحل انجام آزمایش ۴۹

۴.۳ محاسبات تحلیلی ۵۲

۱.۴.۳ حل عددی روابط ۵۷

۵.۳ جمع بندی ونتیجه‌گیری ٦٦

۴ جمع بندی و پیشنهادهای برای آینده

پیوست الف ۷۳

پیوست ب ۷۸

پیوست ج ۸۴

پیوست د ۸۸

پیوست ه ۹۴

مراجع ۹۸

مقدمه

از جمله مشکلاتی که متخصصان در زمینه میکروشاره با آن مواجه‌اند، پمپ سیال داخل میکروکانال است. در راستای حل آن روشهای پمپ بسیاری گسترش یافته ولی اشکال عمده آنها نیاز به تجهیزات خارجی تخصصی و همچنین غیر قابل استفاده بودن حجم زیادی از سیال در شبکه‌های ارتباطی است. از طرف دیگر تجهیزات خارجی و وسایل جانبی این پمپ‌ها حجیم‌اند که با سادگی و کوچکی سیستم‌های مذکور ناسازگار است. در حالت کلی می‌توان میکروپمپ‌ها را به دو دسته پمپ‌های فعال و غیرفعال تقسیم کرد. پمپ‌های فعال پمپ‌هایی هستند که با نیروی خارجی کار می‌کنند. پمپ‌های غیرفعال پمپ‌هایی خودکار یا نیمه خودکار هستند که انتقال سیال به واسطه خصوصیات شیمیایی یا فیزیکی سیال مثل کشش سطحی، پخش مولکولی، تبخیر سطحی، اسمز و غیره می‌باشد. از آنجا که میکروپمپ‌های غیر فعال نیاز به نیروی خارجی برای جریان سیال ندارند، از لحاظ اقتصادی نسبت به میکروپمپ‌های فعال از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. به همین منظور در سالهای اخیر روشهای پمپ غیر فعال گسترش یافته که از مهمترین آن می‌توان به پمپ مویین اشاره کرد. ما در این پایان نامه به معرفی یک میکروپمپ موئین غیر فعال خواهیم پرداخت.

درفصل اول این پایان نامه ابتدا تاریخچه‌ای از سیستم‌های میکروشاره و چگونگی ساخت آنها بیان می‌کنیم. در ادامه به بیان روابط و معادلات حاکم بر سیالات می‌پردازیم و به بیان نیروها و اثراتی (مثل کشش سطحی) که در مقیاس میکرونی اهمیت پیدا می‌کنند می‌پردازیم. سپس قانون پوازوی را بیان و رابطه آن را برای کانالی با سطح مقطع استوانه‌ای و مستطیلی بدست می‌آوریم.

در فصل دوم به معرفی میکروپمپ‌های فعال و غیر فعال می‌پردازیم و مثالهایی از میکروپمپ های فعال بیان می‌کنیم. در ادامه به معرفی یک میکروپمپ غیر فعال کشش سطحی که توسط برتر و بیب طراحی شد، می پردازیم و اشکالات این میکروپمپ را بیان می‌کنیم. سپس به بیان جریان معکوس دیده شده در این میکروپمپ کشش سطحی که توسط جو و همکارانش گزارش شده می‌پردازیم.

در فصل سوم میکروپمپ پیشنهادی خود را معرفی می‌کنیم. ابتدا به بیان چگونگی ساخت این میکروپمپ و انجام آزمایش با آن می‌پردازیم و یک مدل تحلیلی برای میکروپمپ پیشنهادی خود ارائه می‌دهیم، سپس

روابطی که از مدل تحلیلی بدست می آوردیم به روش رانگ کوتای مرتبه چهار حل عددی می‌کنیم. در مرحله بعد به مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های بدست آمده از حل تحلیلی می‌پردازیم.

در فصل چهارم به جمع بندی مطالب بیان شده می‌پردازیم و سپس پیشنهادهایی برای ادامه کار می‌دهیم.

فصل اول

مقدمه‌ای بر میکروشاره

۱.۱ مقدمه

از سال ۱۹۹۰ تحقیقات در زمینه میکروشاره[۱] آغاز شده و بیش از هزار مقاله و چند مجله مقاله به آن اختصاص داده شده است. اصطلاح میکروشاره برای توصیف حرکت حجم‌های نانولیتری از سیال داخل میکروکانال‌ها استفاده می‌شود. میکروشاره ترکیبی از مکانیک سیالات، شیمی، فیزیک وبیولوژی است و در بسیاری از موارد اپتیک میکروسکوپی، الکترونیک، و سیستم‌های کنترلی به آن اضافه می‌شود.

سیستم‌های میکروشاره از میلیونها میکرو کانال روی قطعه‌ای به ابعاد یک اینچ مربع جمع می‌شوند و تشکیل یک مدار مجتمع[۲] را می‌دهند که در اصطلاح به آن آزمایشگاه تراشه‌ای[۳] می‌گویند. این آزمایشگاهها با کم کردن بسیار زیاد فضا، انرژی و زمان باعث تغییرات اساسی در صنعت شده است. استفاده از سیستم‌های میکرونی مزایایی مثل قابلیت حمل آسان، افزایش سرعت آنالیز، مصرف کم ماده و بالا بردن بازده واکنش‌ها را دارد[۱].

[۱] Microfluidic

[۲] Integrated circuit

[۳] lab-on-a-chip

یکی از کاربردهای اصلی سیستم‌های میکرونی در بیولوژی و شیمی می‌باشد، دلیل آن اینست که این سیستم‌ها انتظارات مشابهی نسبت به سیستم‌های بزرگ برآورده می‌سازند و مزیت آن امکان انجام آزمایش‌های متعدد به طور همزمان با صرف زمان و مقدار واکنشگر کمتر می‌باشد.

علاوه بر پیشرفت‌های زیاد سیستم‌های میکروشاره در بیولوژی و شیمی این سیستم‌ها در فیزیک سیالات نیز پیشرفت‌هایی داشته‌اند، که دیدگاههای تازه‌ای را پیش روی ما قرار داده و باعث تغییرات فیزیکی اساسی در سیالات شده است که دلیل آن تغییر مقیاس طولی می‌باشد[۲].

یکی از مهمترین تفاوت‌های میکروالکترونیک [۴] با میکروشاره این است که با کوچک شدن ابعاد سیستم تغییرات اساسی در میکروشاره ایجاد شده است، در صورتی که با کوچک شدن ترانزیستورها [۵] و بالا بردن چگالی رسیدن به مقیاس طولی که در آن خواص فیزیکی تغییر کند، یعنی از رژیم کلاسیک به رژیم کوانتومی برود بسیار مشکل است. ولی در سیستم‌های میکروشاره به سرعت به مقیاس طولی می‌رسیم که در آن اساس فیزیک سیالات به صورت چشمگیر تغییر می‌کند.

از لحاظ ابعادی پارامترهای موثر بر جریان را می‌توان به سه دسته عمده تقسیم کرد[1]:

۱ـ پارامترهایی که با مکعب طول متناسب می‌باشند (αL^3)، مانند نیروهای اینرسی [۶] و شناوری.

۲ـ پارامترهایی که با مربع طول متناسب می‌باشند(αL^2)، مانند نیروی اصطکاک، چگالی سطحی بار و نیروی مقاومت سیال [۷].

۳ـ پارامترهایی که با توان اول طول متناسب می‌باشند (αL)، مانند نیروی کشش سطحی [۸][۲].

زمانی که مقیاس طولی بزرگتر از متر باشد، نیروهای حجمی بر سایر نیروها چیره می‌شوند. در مقیاس طولی بین میلی متر و میکرومتر نیروهای سطحی بیشترین توجه را به خود جلب کرده و در مقیاس میکرومتر و کوچکتر از آن نیروهای خطی بیشترین اهمیت را دارند. بنابراین درسیستم‌های میکرونی نیروهایی با توان کمتر مثل

[۴] Microelectronic
[۵] Transistors
[۶] Initial force
[۷] Drag force
[۸] Surface tension

کشش سطحی نقش مهمی پیدا می‌کنند و ما را وارد عرصه جدیدی از روابط حاکم بر سیالات می‌کنند که میکروشاره نامیده می‌شود.

در ابتدا نگاهی به چگونگی آغاز و پیدایش میکروشاره می‌اندازیم، سپس به بیان خلاصه‌ای از تکنیک‌های میکروشاره می‌پردازیم.

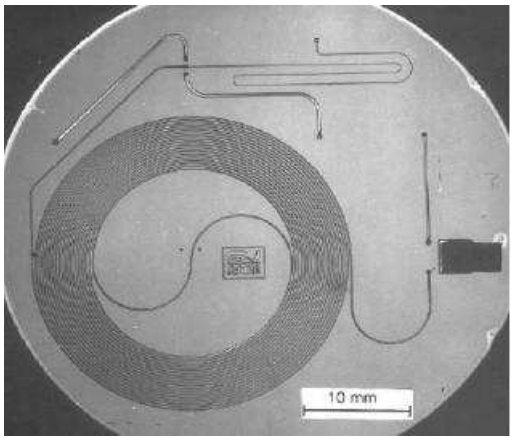
۲.۱ تاریخچه

در اواسط قرن بیستم کاربردهای کروماتوگرافی[۹] [۳, ۴, ۵] مورد توجه قرار گرفت. کروماتوگرافی تکنیکی است که برای جداسازی مواد بکار می‌رود. اساس کار این تکنیک به این صورت است که ابتدا ترکیب مورد نظر وارد ستون می‌شود، ستون یک لوله باریک و بلند است که معمولا برای اشغال جای کمتر به صورت کلاف پیچیده می‌شود. در داخل ستون دو فاز متحرک و ایستا وجود دارد که جداسازی را کنترل می‌کنند. فاز متحرک ناشی از گاز حامل است که در طول ستون با سرعت V حرکت می‌کند، فاز ایستا ماده غیر فرار جداره داخلی ستون می‌باشد که معمولا به شکل موم یا روغن می‌باشد و چون حرکت نمی‌کند به آن فاز ایستا می‌گویند. بسته به جرم مولکولی و میزان قطبیت مولکولهای ماده مورد نظر تمایل به گاز ایستا متفاوت است. به عبارت دیگر نرخ عبور مواد از ستون به مشخصه‌های فیزیکی آنها، دما و شکل ستون بستگی دارد بنابراین مواد با سرعت‌های متفاوتی از ستون عبور می‌کنند. موادی که سرعت بیشتری دارند، سریعتر از ستون خارج می‌شوند و با این روش جداسازی صورت می‌گیرد.

در ابتدا کراماتوگرافی برای جداسازی ترکیبات گازی استفاده می‌شد. اولین کراماتوگرافی ستون سیال در سال ۱۹۷۹ انجام شد. پس از چندی که تحقیقات ادامه داشت محققان دریافتند که با کوچک کردن قطر ستون و افزایش طول آن جداسازی بهتر انجام می‌شود. بنابراین ستون‌هایی با قطری از مرتبه میکرون ساخته شد. در همان زمان الکتروفورز[۱۰] مورد توجه قرار گرفت. الکترو فوروز روشی برای جداسازی ذرات با بار و اندازه‌های

[۹] Chromatography

[۱۰] Electrophoresis



شکل۱—۱: کراماتوگرافی گاز روی یک قالب سیلیکونی [۵]

مختلف در میدان الکتریکی می‌باشد. بر خلاف بکار بردن یک فشار بالا در کراماتوگرافی ستون سیال که نیاز به صرف انرژی زیاد هست بکار بردن میدان الکتریکی در میکروکانال‌ها به دلیل استفاده ساده وآسان مورد توجه محققان قرار گرفت. در سال ۱۹۹۲ اولین میکروتراشه الکتروفورز موئین توسط منز [۱۱] [۳] ساخته شد.

الکتروفورز موئین انطباق خوبی با تکنیک‌های میکروشاره‌ای دارد و حجمی در مقیاس نانو را به آسانی هدایت می‌کند و نیازی به حرکت و جابجائی قطعات ندارد. همچنین امکان جداسازی با قدرت تفکیک بالا را فراهم می آورد.

از مزایای میکروتراشه الکتروفورز موئین می‌توان به قیمت کم، اندازه کوچک، زمان تحلیل سریع و امکان جابجایی آسان اشاره کرد. در ابتدا تمرکز الکتروفورز موئین تحلیل و جداسازی DNA بود، ولی به سرعت با بسیاری از کاربردهای بیولوژیکی، صنعتی و شیمیایی سازگار شد[۵].

۳.۱ روش‌های ساخت سیستم‌های میکرونی

میکروساختارها در حالت کلی به دو روش ساخته می‌شوند:

[۱۱] Mans

۱ـ تکنیک‌هایی که بر اساس کنده‌کاری[۱۲]، لیتوگرافی[۱۳] و نهشت شیمیایی[۱۴] بنا شده و به دلیل آنکه از مواد سختی مثل شیشه[۱۵](ترکیبات سیلیکون) برای ساخت آنها استفاده می‌شود به تکنیک‌های سخت معروفند[۶, ۷].

در اولین میکروتراشه‌ها از شیشه به عنوان زیر لایه استفاده شده است. شیشه یک ترکیب سیلیکونی است که با فرایندهای میدان الکتریکی سازگار است و به دلیل استحکام بالا دارای مزیت‌های زیادی می‌باشد. با وجود مزایای شیشه معایبی نیز برای آن وجود دارد. فرایندهای ساخت میکروتراشه با شیشه هزینه ساخت بالایی دارد. شیشه بسیار شکننده است همچنین شیشه با کیفیت بالا بسیار گران است و برای نواحی فرابنفش و مرئی مات می‌باشد.

۲ـ تکنیک‌هایی که از الاستومرها مثل $PDMS$ یا مواد پلاستیکی مثل $PMMA$[۱۶] (پلی متیل متا اکریلات) استفاده می‌کنند و بسته به مواد استفاده شده از روش سایش لیزری[۱۷] یا روش نسخه‌برداری[۱۸] که نیازمند تهیه قالب است استفاده می‌شود. این تکنیک‌ها به تکنولوژی نرم یا فناوری پلاستیک معروف است. در ادامه به بیان روش لیتوگرافی نرم بر پایه $PDMS$ که یکی از روش‌های عمده ساخت میکروسیستم‌هاست پرداخته می‌شود.

برای ساخت یک میکروساختار ابتدا باید قالب آن ساخته شود. برای ساخت قالب میکروساختارها به روش لیتوگرافی نرم ابتدا باید از میکروساختار مورد نظر ماسک تهیه شود، ماسک یک صفحه کوارتز است که الگوی میکروساختار مورد نظر با ماده ماتی (معمولا کروم) بر آن کشیده می‌شود. سپس یک زیر لایه تمیز سیلیکونی توسط لایه نازکی از پلیمر حساس به نور به روش چرخشی لایه نشانی می‌شود. صفحه لایه نشانی شده در معرض تابش نور فرابنفش که از بین ماسک عبور می‌کند، قرار داده می‌شود، تا تصویر ماسک به لایه حساس به نور منتقل شود. به این ترتیب قالب میکروساختار آماده می‌شود و بارها می‌توان از آن استفاده کرد.

برای ساخت میکروساختار باید ابتدا ماده الاستومر($PDMS$) را با یک ماده اتصال دهنده ترکیب کرد. ماده

---

[۱۲] Etching
[۱۳] Lithgraphy
[۱۴] Chemical deposition
[۱۵] Silicon
[۱۶] Poly methyl methacrylate
[۱۷] Laser abrasion
[۱۸] Replica molding

اتصال دهنده باعث می‌شود $PDMS$ مایع با گذشت زمان جامد شود. ترکیب حاصل را روی قالب می‌ریزند و در کوره قرار می‌دهند تا سفت شود. در مرحله بعد ترکیب را از قالب جدا کرده و روی سطح شیشه می‌چسبانند. به این ترتیب میکروساختار آماده می‌شود. زیر لایه‌های پلیمری ($PDMS$) ارزان هستند و بر خلاف شیشه که برای ساخت آن نیاز به هفته‌ها وقت می‌باشد، در مدت چند ساعت آماده می‌شوند و برای دامنه وسیعی از نور مرئی و فرابنفش شفاف هستند.

محدودیت‌های این میکروساختارها دانش اندک از خصوصیات شیمیایی سطح این مواد و تغییرات آنها در مواجهه با مواد شیمیایی می‌باشد[۶, ۷].

۴.۱ دینامیک میکروشاره

سیالات مواد پیوسته‌ای هستند. بنابرین کمیت‌های گسسته‌ای مثل جرم نقطه‌ایی و نیرو جای خود را به کمیت‌های پیوسته‌ایی مثل چگالی و چگالی نیرو می‌دهند که بر واحد حجم تعریف می‌شود. نیروهایی که به حجم سیال وارد می‌شوند نیروهای حجمی نامیده می‌شوند و نیروهایی که بر المان سطح سیال وارد می‌شوند استرس‌های سطحی[۱۹] نامیده می‌شوند که با σ نشان داده می‌شوند. از برآیندگیری نیروهای حجمی و استرس‌های سطحی معادله ناویر—استوکس ($N.S$)[۲۰][۸] استخراج می‌شود که معادله حاکم بر سرعت سیال می‌باشد و به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$\rho\frac{\partial U}{\partial t} + \rho(U.\nabla)U = F - \nabla P + \eta\nabla^2 U \qquad (۱-۱)$$

[۱۹] Surface stresses

[۲۰] Navier-Stokes

ρ چگالی سیال، U سرعت سیال، F چگالی نیرو، P فشار وارد بر سیال و η ویسکوزیته سیال می‌باشد. اولین جمله سمت چپ وابستگی سرعت سیال به زمان را نشان می‌دهد. دومین جمله نیروی اینرسی و سومین جمله نیروی خارجی وارد بر سیال است و جمله چهارم گرادیان فشار وارد بر سیال و جمله آخر نیروی ویسکوز می‌باشد.

جریان‌های سیال را می‌توان از جهتی به دو دسته جریان‌های ویسکوز و جریان‌های غیر ویسکوز تقسیم کرد. ویسکوزیته را می‌توان چسبندگی داخل سیال استدلال کرد و به عنوان نوعی مقاومت در مقابل حرکت به حساب آورد. ویسکوزیته را می توان با انرژی اتلافی وابسته به انتقال سیال تخمین زد. همچنین ویسکوزیته نقش اساسی در تولید تلاطم در سیال دارد[۹].

در تقسیم‌بندی دیگر جریان‌ها، سیالات را می‌توان به دو دسته جریان‌های لایه‌ای و جریان‌های متلاطم تقسیم کرد .

در جریان‌های لایه‌ای سیال بدون آنکه با سیال مجاور خود مخلوط شود جریان می‌یابد و اگر مخلوط شدن نیز صورت گیرد، بر اساس پخش مولکولی است. ولی در جریان‌های متلاطم حرکت سیال بسیار نامنظم است به طوری که سرعت شارش و فشار تغییرات تصادفی با زمان دارند. این نوع جریان‌ها ناپایدارند و به آسانی سبب مخلوط شدن سیال با سیالی که در مجاورت آن قرار دارد می‌شوند. بنابراین از این حیث برای مخلوط شدن دو سیال مناسب است[۹].

عدد رینولدز[۸] عدد بی‌بعدی است که از نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز در معادله ناویر—استوکس بدست می آید که بیان می کند در کدام رژیم شارش هستیم و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R_e = \frac{UL}{\nu} \qquad (۱-۲)$$

L و U به ترتیب طول مشخصه و سرعت سیال است و ν ویسکوزیته دینامیکی سیال می‌باشد. ویسکوزیته دینامیکی نسبت ویسکوزیته سینماتیکی است به چگالی سیال است.

با توجه به هندسه ساختاری که جریان در آن صورت می‌گیرد، برای آن ساختار عدد رینولدز بحرانی تعریف می‌کنند که اگر عدد رینولدز از عدد رینولدز بحرانی کوچکتر باشد، در رژیم جریان‌های لایه‌ای هستیم به طور

مثال برای یک کانال مربعی عدد رینولدز بحرانی حدود ۵۰۰۰ می‌باشد و چون عدد رینولدز برای میکرو کانال‌ها حدود یک و کوچکتر از آن است، همیشه در رژیم جریان‌های لایه‌ای هستیم[۹]. در میکروکانالها ابعاد سیستم از ۱ تا $۱۰۰\mu m$ تغییر می‌کند. سرعت نیز متناسب ابعاد کانال می‌باشد سیال هم معمولاً آب است که ویسکوزیته کمی دارد. بنابراین در این رژیمها، عدد رینولدز(R_e) کوچک می‌باشد و از جمله اینرسی در معادله ناویر—استوکس می‌توان صرف نظر کرد و معادله حاکم بر سرعت سیالات در این کانال‌ها معادله استوکس می‌باشد که به صورت زیر است.

$$F - \nabla p + \eta \nabla^۲ U = ۰ \qquad (۱-۳)$$

۱.۴.۱ قانون یانگ—لاپلاس

در حالت کلی یک سطح آزاد خمیده سیال با دو شعاع انحنا[۲۱] $R_۱$ و $R_۲$ مشخص می‌شود که از یک نقطه رسم می‌شوند و بر هم عمودند. بر اساس قانون یانگ[۲۲]— لاپلاس[۲۳][۸] اختلاف فشار دو طرف رویه سیال با رابطه زیر داده می‌شود.

$$\triangle P = P_۲ - P_۱ = \gamma(\frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲}) \qquad (۱-۴)$$

γ ضریب کشش سطحی فصل مشترک است.

---

[۲۱] Radius of curvatore

[۲۲] Thomas Young

[۲۳] Pierre-Simon Laplace

۲.۴.۱ نیروهای بین سطحی و اثر موئینگی

یکی از مشخصه‌های برجسته میکروشاره غلبه اثرهای سطحی در مقیاس میکرو می‌باشد، چون نسبت سطح به حجم در مقیاس میکرو بزرگ می‌باشد. یکی از اثرهای سطحی، اثر موئینگی است. با مطالعه انرژی سیستم میتوان به اثر موئینگی پی برد. در حجمی از سیال که دارای سطح آزاد است، دو نوع مولکول وجود دارد. یکی مولکول‌های داخل حجم سیال و دیگری مولکول‌های سطح سیال. مولکول‌های داخل حجم سیال از همه طرف با مولکولهایی که در اطراف آن قرار دارند، پیوند برقرار می‌کنند. در صورتی که روی سطح مایع فقط از برخی جهات با مولکول‌ها پیوند برقرار می‌کنند. به همین منظور مولکول‌های داخل حجم مایع به دلیل پیوندهای بیشتر انرژی کمتری نسبت به مولکول‌های روی سطح مایع دارند. بنابراین برای آنکه مولکولی از حجم مایع به سطح آن آورده شود باید انرژی متناسب تعداد مولکول‌های سطح به آن داده شود و از آن جایی که تعداد مولکول‌های روی سطح متناسب مساحت سطح می‌باشد می‌توان انرژی سطحی را به صورت زیر تعریف کرد[۸].

$$E = \gamma S \qquad (۱-۵)$$

که در آن γ ضریب کشش سطحی و واحد آن $\frac{N}{m}$ می باشد و S مساحت سطح می‌باشد.

با توجه به رابطه انرژی، نیروی کشش سطحی متناسب با طول مشخصه سیستم می‌باشد.

$$F = \gamma L \qquad (۱-۶)$$

۳.۴.۱ عدد موئینگی

عموماً نیروهای غالب در مقیاس میکرو نیروی کشش سطحی (γL) و نیروی استوکس [۲۴] $(\mu U L)$ می‌باشد که می‌توان ارتباط آنها را از طریق یک عدد بی‌بعد به نام عدد موئینگی [۲۵] (C_a) بیان کرد. عدد موئینگی نسبت نیروی ویسکوز به نیروی کشش سطحی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_a = \frac{\mu U}{\gamma} \qquad (۱-۷)$$

η و U به ترتیب ویسکوزیته و سرعت سیال و γ ضریب کشش سطحی می‌باشد.

عدد موئینگی کوچک نشان دهنده غلبه کشش سطحی بر نیروی ویسکوز می‌باشد. از آنجا که در میکروکانال‌ها سرعت متناسب با ابعاد کانال می‌باشد، بنابراین غالباً نیروی کشش بر نیروی ویسکوز غالب است.

عدد موئینگی در شارش‌های دو فازی مهم است و در شکل‌گیری قطرات دو سیال نقش دارد. به طور مثال اگر دو سیال مخلوط نشدنی داشته باشیم، نیروی ویسکوز که به صورت موازی بر مرز وارد می‌شود، باعث کشیده شدن مرز سیال می‌شود. در صورتی که نیروی کشش سطحی سعی در کم کردن سطح مشترک دارد و سیال را به صورت قطره یا حباب از محیط دیگر جدا می‌کند. بنابرین در عدد موئینگی بزرگ فصل مشترک کشیده می‌شود و در اعداد موئینگی کوچک سیال در فصل مشترک به صورت قطره در می‌آید[۱۰].

---

[۲۴] Stokes force

[۲۵] Capillary number