



بررسی عددی اثر تعداد طبقات بر عملکرد میکرو شیر تسلا و مقایسه با میکرو شیر نازل-دیفیوزری

کاظم محمدزاده^۱، محمدابراهیم کلاهدوز^۲، ابراهیم شیرانی^{۳*}، محمدبهشاد شفیع^۴

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی صنعتی فولاد، فولادشهر، اصفهان
 - ۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه ایالتی نیویورک در بوفالو، ایالات متحده آمریکا
 - ۳- استاد مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی صنعتی فولاد، فولادشهر، اصفهان
 - ۴- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
- * صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، eshirani@cc.iut.ac.ir

چکیده- در این مطالعه، اثر تعداد طبقات بر روی عملکرد میکرو شیر تسلا بررسی شده است. بدین منظور، چیدمان‌های مختلف شامل میکرو شیرهای یک تا چهار طبقه به صورت عددی بررسی شدند. از یکسوکنندگی به عنوان معیار اصلی جهت ارزیابی عملکرد شیرها استفاده شد. از محاسبات دوبعدی و حالت پایای جریان سیال استفاده شد که وابستگی شدید یکسوکنندگی به عدد رینولدز و افت فشار را آشکار ساخت. نتایج نشان داد که در شرایط جریان یکسان میانگین یکسوکنندگی میکرو شیر دوطبقه تقریباً ۱/۳۲ برابر حالت تک طبقه است. طبقات بیشتر پیچیدگی را افزایش می‌دهند و یکسوکنندگی را به میزان قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌دهند. این گونه نتیجه گرفته شد که حالت دوطبقه از شیر تسلا در بین چیدمان‌های مورد بررسی بهترین گزینه است. چیدمان دوطبقه از این شیر در میکروپمپ بدون دریچه، ضمن فشردگی، قابلیت سازگاری در کاربردهای مختلف را دارد. همچنین، عملکرد میکرو شیر دوطبقه در سه اندازه متفاوت با یک نمونه میکرو شیر نازل-دیفیوزری مقایسه شد. مقایسه‌ها، که براساس محاسبه مقدار یکسوکنندگی در گستره قابل کاربردی از عدد رینولدز انجام شد، نشان داد که یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز مستقل از اندازه شیر است. همچنین برتری شیر تسلا در اعداد رینولدز بالاتر و ضعف این نوع شیر در اعداد رینولدز پایین‌تر نشان داده شد.

کلیدواژگان: میکروپمپ، میکرو شیر فاقد اجزای متحرک، یکسوکنندگی

Numerical study on the effect of the number of stages on the performance of Tesla microvalve and comparison with nozzle/diffuser microvalve

K. Mohammadzadeh¹, M. E. Kolahdouz², E. Shirani^{3*}, M. B. Shafii⁴

- 1- MSc., Mech. Eng., Foolad Institute of Tech., Foolad Shahr, Esfahan, Iran
 - 2- PhD Student, Mech. Eng., University at Buffalo, The State University of New York, USA
 - 3- Prof., Mech. Eng., Foolad Institute of Tech., Foolad Shahr, Esfahan, Iran
 - 4- Assoc. Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran
- * P. O. B. 8415683111 Isfahan, eshirani@cc.iut.ac.ir

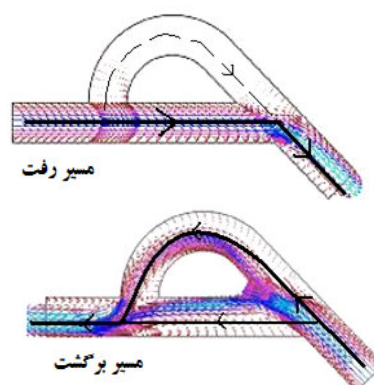
Abstract- In this study, the effect of number of stages on Tesla microvalve performance has been studied. To do this, different layouts including one to four-stage microvalves are investigated numerically. The main criterion is used for evaluation of valves performance is diodicity. Two-dimensional and steady state computations of the fluid flow have been utilized that reveal a strong dependence of diodicity on Reynolds number and the pressure drop. The results showed that for the same flow condition, the diodicity average of the two-stage microvalve is approximately 1.32 times of that of one-stage. Additional stages increase the complexity and they do not change the diodicity considerably. It is concluded that two-stage layout of Tesla type valve is the best option between the studied layouts. A two-stage layout of this valve in valveless micropump besides being compact, has the adaptability of the various functions. Also, the two-stage valve performance in three different sizes is compared with nozzle - diffuser type valve. Comparisons which are performed based on calculation of diodicity for applicable range of Reynolds numbers show that the diodicity is function of Reynolds number and is independent of the valve size. Also, the superiority of the Tesla type valve for higher Reynolds number and its weakness at lower Reynolds number are shown.

Keywords: Micropump, No Moving Part Microvalve, Diodicity

۱- مقدمه

انتقال و جابه‌جایی حجم‌های دقیق از نمونه‌های سیالاتی چالشی مهم برای تجهیزات مورد استفاده در جریان‌های میکرو می‌باشد. بنابراین، میکروپمپ‌های زیادی با کارایی و پیچیدگی‌های متفاوت مبتنی بر اصول پمپاژ گوناگون توسعه یافته‌اند. در میان انواع مختلف میکروپمپ‌ها، نمونه بدون دریچه که از نوع رفت‌وبرگشتی می‌باشد به دلیل مقیاس‌پذیری، ماندگاری و سادگی ساخت جذاب‌ترین نوع در نزد محققان است. در این میکروپمپ‌ها، از شیرهای فاقد اجزای متحرک با هندسه ثابت استفاده می‌شود. این شیرها به جای استفاده از مکانیزم‌های مکانیکی برای جلوگیری از بازگشت سیال بر اساس مشخصه‌های خود سیال کار می‌کنند و برای تولید جریان خالص در یک جهت استفاده می‌شوند. به دلیل سادگی ساخت، قیمت کم، عملکرد ساده و آسان، نداشتن اجزای متحرک و عدم نیاز به کنترل بیرونی، به‌کارگیری این نوع شیرها توصیه می‌شود. دو نوع اصلی این میکروشیرهای ثابت میکرودیفیوزرها و میکروشیرهای تسلا هستند. به دلیل نبود اجزای متحرک در این شیرها، امکان سایش و خستگی برطرف می‌شود و خطر انسداد نیز در آن‌ها کاهش می‌یابد.

هندسه پیچیده میکروشیر تسلا، همانند شیرهای نازل-دیفیوزری، مقاومت‌های متفاوتی در جهت رفت و برگشت جریان به وجود می‌آورد. عمده خاصیت یکسوکندگی شیر تسلا ناشی از تفاوت زوایایی برخورد کانال‌ها در دو قسمت شیر می‌باشد که باعث پدیدآمدن مقاومت بیشتر جریان برگشت در مقایسه با جریان رفت می‌گردد (شکل ۱).



شکل ۱ تاثیر تفاوت زوایای اتصال کانال در ایجاد خاصیت یکسوکندگی

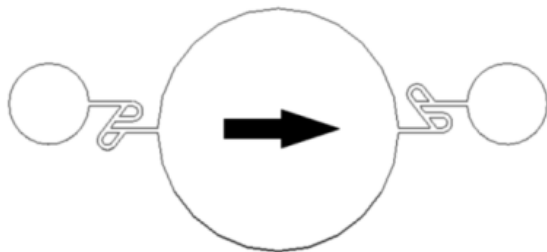
مطالعات عددی و تجربی زیادی بر روی میکروپمپ‌های بدون دریچه انجام گرفته است [۱-۶]. ایده استفاده از میکروشیرهای فاقد اجزای متحرک اولین بار توسط استم و استم [۷] در سال ۱۹۹۳ با ساخت یک نمونه میکروپمپ پیزوالکتریک، که از شیرهای نازل-دیفیوزری برای یکسوسازی جریان استفاده می‌کرد، ارائه شد. فورستر و همکاران [۸] در سال ۱۹۹۵ میکروشیر تسلا را به عنوان شیرهای دارای کارکرد بهتر نسبت به شیرهای نازل-دیفیوزری در ساختمان میکروپمپ‌های بدون دریچه معرفی کردند. با استفاده از این مفهوم که افت ویسکوز با توان اول دبی و افت دینامیکی با توان دوم دبی جریان متناسب است، نتیجه‌گیری شد که شیر تسلا در جهت رفت دارای رفتار ویسکوز است، در حالی که در جهت برگشت اتلاف دینامیکی در آن غالب می‌باشد.

نخستین موضوع قابل توجه در بهبود کارایی میکروپمپ بدون دریچه ارزیابی کارایی شیرهای آن است. عملکرد میکروشیرها نه تنها یک فاکتور اساسی در تعیین فرکانس کاری میکروپمپ است، بلکه دامنه نوسانات همه متغیرها شامل افت فشار و جریان در شیر را نیز تعیین می‌کند. قدرت یکسوسازی و سادگی ساخت دو پارامتر مؤثر در انتخاب شیر هستند. با توجه به اهمیت این موضوع، مطالعات زیادی بر روی بهینه‌سازی هندسه شیر تسلا انجام گرفته است [۸-۱۵].

نیکل تسلا [۹] دانشمند نامدار قرن بیستم در سال ۱۹۲۰ از هندسه شکل ۱ برای پمپاژ گازها در ابعاد ماکرو استفاده کرده بود و این شیر به نام وی نامگذاری شد. تسلا مجموعه‌ای از شیرهایی را که طراحی کرده بود، به صورت زنجیروار و چندطبقه، در طولی از مجرای عبور جریان گنجانده بود. با این حال وی نتوانست رابطه مشخصی برای تعداد طبقات بهینه استخراج نماید و مدعی شد که هرچند افزایش طبقات یکسوکندگی را افزایش می‌دهد، اما به دلیل وجود یک رابطه پیچیده نامشخص بین افزایش طبقات و کارایی شیر، باید طراحی را با توجه به نوع کاربرد، محدودیت‌های فضا و هزینه سیستم انجام داد.

در سال ۱۹۹۳ رید و فلا [۱۰] با برطرف کردن پاره‌ای از معایب از جمله زاویه انحراف جریان از مسیر اصلی توانستند به هندسه بهینه‌تری دست یابند. آن‌ها همچنین تعداد طبقات را مد نظر قرار دادند و با استفاده از نتایج تجربی نشان دادند

به عنوان جدیدترین و جامع‌ترین این مطالعات می‌توان به کار کلاهدوز [۱۶] اشاره کرد. وی در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود، با مبنا قراردادن میکرو شیر ارائه‌شده توسط لیا، با بررسی عددی جریان در شیر تسلا، میکرو شیر با کارکرد بهتری را از نظر نسبت یکسوکنندگی نسبت به طرح‌های پیشین پیشنهاد کرد و نمونه دوطبقه آن را در ساخت یک نمونه میکروپمپ پیژوالکتریک به کار برد (شکل ۲). نتایج حل عددی نشان داد که میکروپمپ با چیدمان شامل میکرو شیر تسلا، چه از نظر هد فشاری و چه از نظر دبی پمپاژ، وضعیت بهتری در مقایسه با نوع مرسوم نازل-دیفیوزری دارد.



شکل ۲ شیر تسلا دوطبقه در ساختمان میکروپمپ دیافراگمی [۱۶] (پیکان مشکی جهت خالص جریان پمپ‌شده را از ورودی به خروجی میکروپمپ نشان می‌دهد).

علی‌رغم مطالعات گسترده انجام‌شده در زمینه بهینه‌سازی هندسه میکرو شیر تسلا، تاکنون اثر تعداد طبقات بر عملکرد شیر تسلا به طریق عددی بررسی نشده است. همچنین تعداد انگشت‌شماری مقاله نیز به مقایسه عملکرد شیر تسلا با نمونه نازل-دیفیوزری پرداخته‌اند [۱۳، ۱۶، ۱۷]. بنابراین، در این تحقیق، اثر تعداد طبقات بر عملکرد شیر تسلا بررسی و میکرو شیر با بهترین تعداد طبقه انتخاب می‌شود. همچنین، تأثیر اندازه عرض کانال میکرو شیر تسلا بر عملکرد آن نیز بررسی خواهد شد. در ادامه عملکرد میکرو شیر تسلای منتخب در اندازه‌های مختلف با یک نمونه میکرو شیر نازل-دیفیوزری مقایسه می‌شود. در نهایت منحنی تغییرات پارامتر یکسوکنندگی (که در بخش‌های آتی به توضیح آن پرداخته خواهد شد) برحسب افت فشار نامی و عدد رینولدز در محدوده کاربردی مرسوم استخراج می‌گردد.

در ادامه، در این تحقیق، به بیان اصول عملکردی میکروپمپ‌های بدون دریچه پرداخته می‌شود. سپس به بیان

که افزایش تعداد شیرها از یک به دو یکسوکنندگی را تقریباً دو برابر می‌کند و این در حالی است که افزایش بیشتر تعداد طبقات، ضمن افزایش صعودی مقدار مطلق افت فشار، یکسوکنندگی را به نسبت کم‌تری افزایش داده و نرخ رشد یکسوکنندگی به تدریج با افزایش طبقات کاهش می‌یابد.

سرانجام فورستر و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۹ استفاده از شیر تسلا را برای اولین بار در مقیاس میکرو مطرح کردند. آن‌ها در اختراع خود، با به‌کارگیری این شیرها در میکروپمپ پیژوالکتریک، وضعیت آن را با شیرهای نازل-دیفیوزری، که قبلاً توسط استم و استم [۱۲] ارائه شده بود، مقایسه کردند.

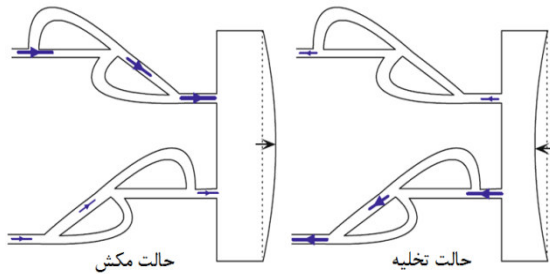
فورستر و ویلیامز [۱۳]، با استفاده از یک طراحی پارامتریک، شیر تسلا^۱ را که از ترکیب هندسه شیرهای تسلا و نازل-دیفیوزری به‌وجود آمده بود پیشنهاد کردند و با استفاده از نرم‌افزار فلونت، با حل دوبعدی و پایای جریان، عملکرد این شیر را با شیرهای نازل-دیفیوزری و تسلا ارائه‌شده تا آن زمان مقایسه کردند. با این حال آن‌ها نتوانستند برتری شیر جدید را در یک طیف از رژیم جریان نسبت به شیرهای قبلی ثابت کنند. مشخص شد که شیر نازل-دیفیوزری در اعداد رینولدز پایین ($Re < 100$) و شیر تسلا در اعداد رینولدز بالا ($Re > 100$) عملکرد بهتری دارند. آن‌ها برای محاسبه عدد رینولدز از قطر هیدرولیکی کوچک‌ترین سطح مقطع شیر استفاده کردند. شایان ذکر است که در مقاله آن‌ها شیرهای مورد تحلیل همگی دارای یک طبقه بودند.

در سال ۲۰۰۵ گاموا و همکاران [۱۴]، با به‌کارگیری روش‌های عددی و مدل‌های دینامیکی موجود، مقادیر جدیدی برای پارامترهای بهینه هندسی میکرو شیر تسلا استخراج کردند. آن‌ها به طور تجربی ثابت کردند که مدل اصلاح‌شده به‌خصوص در اعداد رینولدز بالاتر دارای نسبت یکسوکنندگی بیشتری می‌باشد. نتایج تجربی آن‌ها توانایی شبیه‌سازی‌های دوبعدی را در بهبود عملکرد شیر اثبات کرد.

در سال ۲۰۰۴، لیا [۱۵] میکرو شیر تک‌طبقه‌ای را بررسی کرد که به جای انحراف ۴۵ درجه‌ای از مسیر اصلی، به اندازه ۱۳۵ درجه، از امتداد اولیه انحراف می‌یافت و آن را T135 نامید. وی ثابت کرد که T135 نسبت یکسوکنندگی بالاتری نسبت به انواع دیگر شیرهای تسلا دارد.

1. Tesser valve

حالت پمپاژ، مطابق شکل ۳-ب، با حرکت رو به پایین دیافراگم، حجم محفظه کاهش یافته و باعث حرکت سیال از شیرها به سمت خارج محفظه می‌گردد. در این مرحله کانال خروجی شیر به عنوان دیفیوزر و کانال ورودی به عنوان نازل عمل می‌کنند. در نتیجه نرخ جریان عبوری از کانال خروجی بیشتر از کانال ورودی می‌باشد. بنابراین، در یک نوسان کامل پیستون، یک جریان منتهجه از کانال ورودی به سمت کانال خروجی برقرار می‌گردد و پمپ سیال را به گردش در می‌آورد. شکل ۴ میکرو شیرهای تسلا را همراه با میکروپمپ دیافراگمی نشان می‌دهد.



شکل ۴ شماتیکی از کاربرد میکرو شیر تسلا در ساختار میکرو پمپ‌های دیافراگمی [۵]

۲-۲- فرمول بندی و معادلات حاکم

یک میکرو شیر، در بیشترین یکسوکنندگی ممکن، بیشترین کارایی را دارد. انتظار می‌رود که یکسوکنندگی در شکل فشار بدون بعد تابعی از عدد رینولدز باشد و لذا نمی‌توان آن را با یک مقدار ثابت مشخص کرد. به همین دلیل، در این پروژه، تغییرات یکسوکنندگی با عدد رینولدز و افت فشار بررسی شده است. مشخصه مهمی که تعیین‌کننده توانایی شیر برای گذراندن جریان در مسیر رفت و جلوگیری از عبور جریان از مسیر برگشت می‌باشد نسبت یکسوکنندگی^۱ نام دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$Di = (\Delta P_{\text{Backward}} / \Delta P_{\text{Forward}})_0 \quad (1)$$

این پارامتر بیانگر نسبت افت فشار در جهت برگشت به افت فشار در جهت رفت با شرایط یکسان دبی حجمی می‌باشد. در میکرو شیر نازل-دیفیوزری، جریان در جهت دیفیوزر، جریان رفت و جریان در جهت نازل، جریان برگشت می‌باشد. لذا

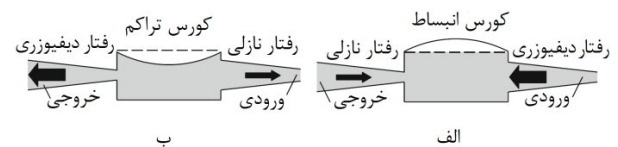
معادلات حاکم بر مسئله، تئوری‌های مربوطه و حل عددی جریان در میکرو شیرها پرداخته می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده ارائه می‌شود.

۲- شرح مسئله

۲-۱- اصول عملکرد میکروپمپ بدون دریچه

در اینجا به نوع کاربرد شیرهای نازل-دیفیوزری در ساختار میکروپمپ بدون دریچه اشاره می‌شود. بدیهی است که شیوه کارکرد در شیر تسلا از جهاتی مشابه همین شیرهاست. عملکرد این میکروپمپ‌ها می‌تواند به دو نیم‌سیکل مکش و تخلیه تقسیم شود. نحوه کار در شکل ۳ به طور شماتیک نشان داده شده است.

دیفیوزر یک کانال با ابعاد بزرگ‌شونده در جهت جریان است، حال آنکه نازل‌ها دارای مقطع کاهنده در جهت جریان هستند. عملکرد اصلی بر اساس تفاوت ساختاری نازل و دیفیوزر می‌باشد. سرعت خروجی از نازل خیلی بالاست و معمولاً به صورت جت آزاد فرض می‌شود؛ بنابراین افت فشار بیشتری ایجاد می‌کند. با فرض اینکه افت فشار دیفیوزر از نازل کم‌تر است، می‌توان گفت، با اختلاف فشار ثابت، دبی حجمی عبوری از مقطع دیفیوزری بیشتر از مقطع نازلی است. این همان فرایندی است که برای میکرو شیر تسلا نیز صورت می‌گیرد.



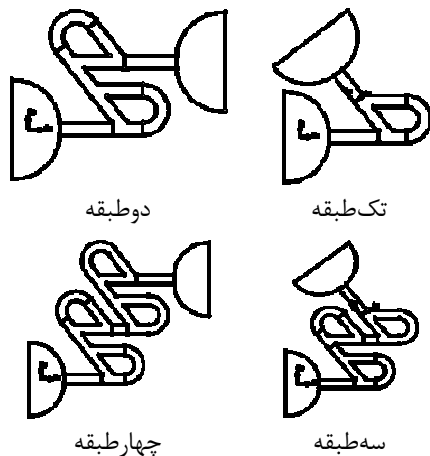
شکل ۳ عملکرد چرخه‌ای میکرو شیر نازل-دیفیوزری در حضور میکروپمپ دیافراگمی (ضخامت بیشتر پیکان‌ها به معنای نرخ جریان حجمی بیشتر است)

در طول نیم‌سیکل تغذیه، مطابق شکل ۳-الف، با حرکت رو به بالای دیافراگم، حجم محفظه افزایش یافته و اختلاف فشار یکسان در دو سمت شیرها ایجاد می‌گردد و باعث حرکت سیال از شیرها به داخل محفظه می‌گردد. با این تفاوت که در کانال خروجی، با توجه به جهت جریان، شیر به عنوان نازل عمل می‌کند، ولی کانال ورودی حکم دیفیوزر را دارد. لذا نرخ جریان عبوری از کانال خروجی کمتر از کانال ورودی می‌باشد. در

در روابط فوق، U_i و U_j به ترتیب سرعت سیال در جهت i و j جهت فضایی، ρ چگالی سیال، μ ضریب لزجت دینامیکی سیال کاری و P فشار را نشان می‌دهند.

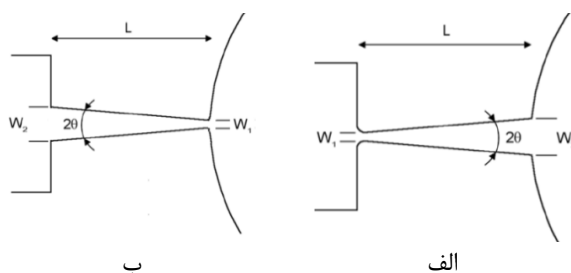
۳-۲- هندسه میکروشرها

شکل ۵ هندسه میکروشرهای تسلائی مورد بررسی را با مبنا قراردادن هندسه ارائه شده توسط مرجع [۱۶] نشان می‌دهد. در میکروشرهای تسلائی مورد بررسی، عرض همه کانال‌ها ۱۲۰ میکرون و برابر مقادیری است که مرجع [۱۶] برای طراحی میکروشر خود به کار برده است.



شکل ۵ شکل هندسی میکروشرهای تسلائی مورد بررسی

جهت مقایسه عملکرد میکروشر تسلائی دوطبقه با نمونه مرسوم نازل-دیفیوزری، هندسه میکروشرهای ساخته شده توسط یاماها [۱۹] مد نظر قرار گرفت (شکل ۶). وی در یک وسیله جدا مشخصه نرخ جریان-افت فشار میکروشر نازل-دیفیوزری را استخراج کرد و با نتایج عددی خود مقایسه کرد. پارامترهای هندسی این میکروشرها در جدول ۱ آمده است.



شکل ۶ هندسه‌های مورد بررسی، الف) دیفیوزر ب) نازل [۱۹]

در این نوع میکروشر، نسبت یکسوکندگی به شکل رابطه (۲) در می‌آید:

$$Di = (\Delta P_{\text{Nozzle}} / \Delta P_{\text{Diffuser}})_Q \quad (2)$$

افت فشار تولیدکننده نسبت یکسوکندگی به دلیل وجود نیروهای ویسکوز و اینرسی می‌باشد. افت دینامیکی (ناشی از نیروهای اینرسی) با توان دوم سرعت متناسب است، در حالی که نیروهای ویسکوز متناسب با سرعت است. این نیروها در جریان آرام مهم و قابل ملاحظه می‌باشند.

با توجه به ابعاد میکروشرهای مورد بررسی (اعم از نازل-دیفیوزری و تسلائی)، در این تحقیق می‌توان دریافت که طول‌های مشخصه در این حالت بسیار بزرگ‌تر از پویش آزاد مولکول‌های آب هستند. این امر گویای وجود شرایط پیوستگی در میکروکانال‌هاست. بنابراین می‌توان در مدل‌سازی از معادلات ناویر-استوکس استفاده کرد و شرایط مرزی نظیر اصل عدم لغزش روی دیواره‌ها را نیز با اطمینان اعمال کرد.

با توجه به ابعاد بسیار کوچک و نیز محدودیت‌های ساختمانی در پدید آمدن سرعت‌های بالا در سیال، پیش‌بینی می‌شود که عدد رینولدز جریان در شرایط اختلاف فشار اعمالی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان بالا در محدوده رژیم آرام باشد. محدوده عدد رینولدز مورد بررسی در این تحقیق در محدوده ۱۰ تا ۳۰۰ می‌باشد که برای طراحی میکروپمپ‌های موجود مناسب است. سیال کاری در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده آب می‌باشد.

به دلیل کم‌اهمیت بودن اثرات گذرا در شیر، می‌توان از شبیه‌سازی‌های حالت پایا که از نظر محاسباتی نسبتاً کم‌هزینه هستند به جای شبیه‌سازی‌های گذرا، که پرهزینه هستند، استفاده کرد. لذا، جهت مطالعه سازوکار یکسوکندگی، از شبیه‌سازی‌های حالت پایا استفاده شده است [۱۸]. بنابراین، جهت حل عددی جریان در میکروشرهای مورد بررسی، معادلات ناویر-استوکس دوبعدی پایا حل شده است. در این پژوهش، فرض می‌شود جریان آرام، تراکم‌ناپذیر و سیال نیوتنی با خواص ثابت باشد. براساس این فرضیات و با صرف نظر از نیروهای حجمی، معادله پیوستگی و مومنوم به ترتیب به شکل روابط (۳) و (۴) در آمده است.

$$\partial U_j / \partial x_j = 0 \quad (3)$$

$$\rho U_j \partial U_i / \partial x_j = -\partial P / \partial x_i + \mu (\partial^2 U_i / \partial x_j \partial x_j) \quad (4)$$

نیز معتبر خواهد بود. در نهایت به ترتیب از شبکه‌های محاسباتی با 53020 ، 93362 ، 113493 و 224148 عدد سلول برای نمونه‌های تک تا چهارطبقه استفاده شد.

به عنوان معیار همگرایی، در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده در کار حاضر حلگر تکرارها را انجام می‌دهد تا اینکه مانده‌های نرمالیزه شده به مقدار کم‌تر از 10^{-4} برسند یا اینکه در یک مقدار ثابت به اندازه کافی کوچک، که همگرایی را تضمین کند، پایدار شوند. برای اطمینان از همگرایی، از تغییر ضرایب زیر تخفیف در طول حل بین $0/3$ تا 1 استفاده شد.

برای محاسبه یکسوکندگی ابتدا جریان در حالت برگشت برای اختلاف فشارهای متفاوت حل می‌شود؛ بدین معنا که فشار دهانه خروجی بیشتر از فشار دهانه ورودی انتخاب شده و شرایط اولیه سرعت نیز مساوی صفر قرار داده می‌شود. پس از حل میدان جریان، دبی جرمی محاسبه شده، به عنوان شرط اولیه بر ورودی جریان اعمال شده و با مساوی صفر قراردادن فشار خروجی، جریان برای حالت رفت محاسبه می‌شود. در ادامه، با در نظر گرفتن اختلاف فشار به دست آمده از این مرحله و اختلاف فشار مطلوب اولیه به عنوان اختلاف فشار مربوط به حالت برگشت، نسبت یکسوکندگی در شرایط دبی یکسان طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

۴- تفسیر و تحلیل نتایج

۴-۱- بررسی اثر تعداد طبقات بر عملکرد شیر تسلا

در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از حل عددی دوبعدی در حالت پایا برای میکرو شیر تسلا تک طبقه ارائه شده توسط کلاهدوز [۱۶]، اعتبار روش عددی مورد استفاده بررسی و تأیید شد (شکل ۷). شایان ذکر است که کلاهدوز [۱۶]، جهت صحت‌سنجی نتایج خود، نتایج به دست آمده برای میکرو شیر تسلا با هندسه ارائه شده توسط فورستر [۸] را با نتایج مربوط به مدل دوبعدی به کار رفته توسط باردل [۱۸] مقایسه کرد که از تطابق خوبی برخوردار بود. علت اختلاف اندک بین نتایج عددی کار حاضر و کار مرجع [۱۶] در فشارهای نامی بالاتر تفاوت در شبکه‌های محاسباتی مورد استفاده می‌باشد. در ادامه هندسه‌های جدید با مبنا قراردادن شیر تسلا مرجع [۱۶] برای حالات دوطبقه، سه طبقه و چهارطبقه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۱ پارامترهای هندسی میکرو شیر نازل- دیفیوژری مورد بررسی [۱۹]

عمق	2θ	L	W_1	W_2
$500 \mu\text{m}$	$9/5^\circ$	$2/3 \text{ mm}$	$100 \mu\text{m}$	$500 \mu\text{m}$

۳- روش حل

حل عددی معادلات حاکم به کمک نرم‌افزار فلونت ۱۲/۱ صورت گرفته است. این کد تجاری مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی بوده و از روش حجم محدود استفاده کرده و شبکه‌های بی‌سازمان را نیز پشتیبانی می‌کند. همچنین از نرم‌افزار پیش‌پردازنده گمبیت ۲/۴ برای مدل‌سازی و تولید شبکه مورد نیاز حلگر استفاده شده است. تصحیح شبکه با افزایش چگالی شبکه در نزدیکی دیوار، تقاطع کانال‌ها و به طور کلی در مناطقی که گرادبان‌های سرعت بزرگ هستند و با کاهش چگالی مش در مناطق غیرحساس صورت گرفته است. علاوه بر این روش مش‌بندی، از وفق‌سازی شبکه^۱ توسط خود حلگر در مناطق با گرادبان‌های شدید سرعت و فشار استفاده گردیده است.

مبنای گسسته‌سازی بر اساس فرمول‌بندی حجم محدود بوده و کوپلینگ به کار رفته برای سرعت و فشار از نوع الگوریتم سیمپل (روش نیمه‌ضمنی برای معادلات متصل‌شده فشار)^۲ می‌باشد. همچنین از طرح بالادستی^۳ مرتبه اول برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم استفاده شده است. تنظیمات مربوط به حلگر بر اساس مرجع [۱۶] صورت گرفته است. در تمامی میکرو شیرهای مورد بررسی در این تحقیق، پس از همگرایی حل، بررسی استقلال شبکه از طریق تصحیح مکرر گرادبان متغیرهای سرعت و فشار و نیز مناطق حساس شبکه انجام شده است. از نرخ جریان محاسبه شده در بدترین شرایط مرزی ممکن (بیشترین اختلاف فشارها) به عنوان پارامتر مناسب جهت مقایسه جواب در شبکه‌های مختلف استفاده شده است. در مقایسه حل شبکه درشت با شبکه ظریف‌تر خطای کم‌تر از ۲ درصد مقدار قابل قبولی فرض شده است. به طور قطع شبکه به دست آمده برای بدترین حالت برای سایر حالات مورد بررسی

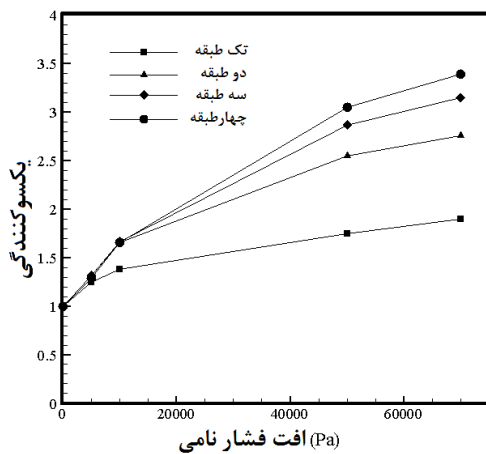
1. Grid adaptation
2. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)
3. Upwind scheme

جدول ۲ نتایج عددی مربوط به نمودار شکل ۸

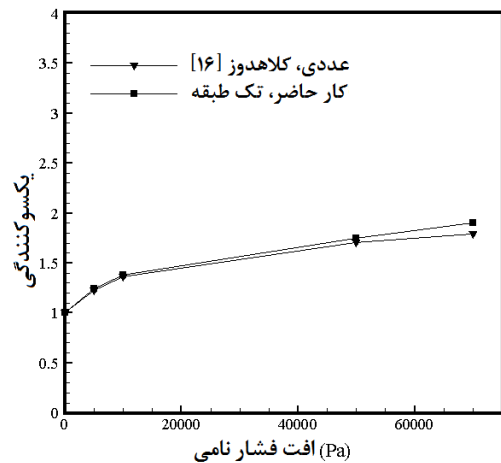
نام مدل	میانگین یکسوکنندگی	درصد افزایش یکسوکنندگی
تک طبقه	۱/۰۹۹	-
دو طبقه	۱/۲۳۰	۱۱/۹
سه طبقه	۱/۳۴۶	۲۲/۵
چهار طبقه	۱/۴۳۷	۳۰/۸

همان‌طور که شکل ۸ نشان می‌دهد، در تمام چیدمان‌ها با افزایش عدد رینولدز یکسوکنندگی افزایش یافته است که با افزایش عدد رینولدز این تغییرات شدیدتر می‌شود. دلیل این امر افزایش افت‌های اینرسی در رینولدزهای بالاتر می‌باشد، زیرا عمده افت فشاری که در شیبر تسلا موجب یکسوکنندگی می‌شود به سبب افت‌های دینامیکی است. همچنین مشاهده می‌شود که در یک عدد رینولدز مشخص با افزایش تعداد طبقات همواره یکسوکنندگی افزایش می‌یابد که در اعداد رینولدز بالاتر این افزایش شدیدتر می‌باشد. نکته دیگر این است که ایجاد طبقات بیشتر در کاربردهای با اعداد رینولدز پایین ($Re < 50$) تأثیر زیادی بر افزایش یکسوکنندگی نمی‌گذارد.

جدول ۲ کاهش نرخ افزایش میانگین یکسوکنندگی را با افزودن طبقات آشکار می‌سازد، اما جهت تعیین تعداد طبقات مناسب کافی نیست. استخراج نمودار تغییرات یکسوکنندگی بر حسب افت فشار نامی به این امر کمک شایانی می‌کند که نتایج آن در شکل ۹ ترسیم گردیده است. همچنین نتایج این نمودار در جدول ۳ آمده است.



شکل ۹ تغییرات پارامتر یکسوکنندگی بر حسب افت فشار نامی برای میکروشیبر تسلا با تعداد طبقات مختلف

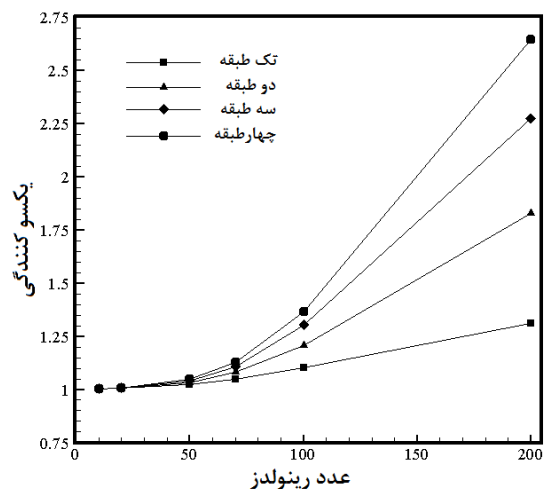


شکل ۷ اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده با نتایج مرجع [۱۶]

با حل عددی جریان در میکروشیبرهای تسلا با تعداد طبقات متفاوت و محاسبه یکسوکنندگی به طریق گفته‌شده در بخش ۳ نمودارهای عملکردی میکروشیبر رسم گردید. شکل ۸ تغییرات پارامتر یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز را برای میکروشیبر تسلا با تعداد طبقات مختلف نشان می‌دهد. نتایج این نمودار در جدول ۲ آمده است. شایان ذکر است که عدد رینولدز با توجه به حل دوبعدی جریان از رابطه (۵) محاسبه شده است.

$$Re = \rho W \bar{U} / \mu = \dot{m} / \mu \quad (5)$$

که در این رابطه W عرض میکروکانال، \bar{U} سرعت متوسط در میکروکانال و \dot{m} نرخ جریان جرمی عبوری از میکروشیبر است.



شکل ۸ تغییرات پارامتر یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز برای شیبر میکروتسلا با تعداد طبقات مختلف

جدول ۳ نتایج عددی مربوط به نمودار شکل ۹

نام مدل	میانگین یکسوکندگی	درصد افزایش یکسوکندگی
تک طبقه	۱/۵۶۶	-
دو طبقه	۲/۰۷۰	۳۲/۲
سه طبقه	۲/۲۴۸	۴۳/۶
چهار طبقه	۲/۳۴۷	۴۹/۹

می‌دهد. در ضمن همان‌گونه که در بررسی نتایج تجربی رید بیان شد، افزایش تعداد طبقات شیر تسلا به بیشتر از ۲ عملاً اثر قابل قبولی در یکسوکندگی ندارد [۱۰]. بنابراین انتخاب یک مجموعه دو طبقه از میکروشر تسلا، با توجه به مزیت‌های بیان شده، حالت قابل قبولی خواهد بود.

۲-۴- مقایسه عملکرد میکروشر تسلا با میکروشر

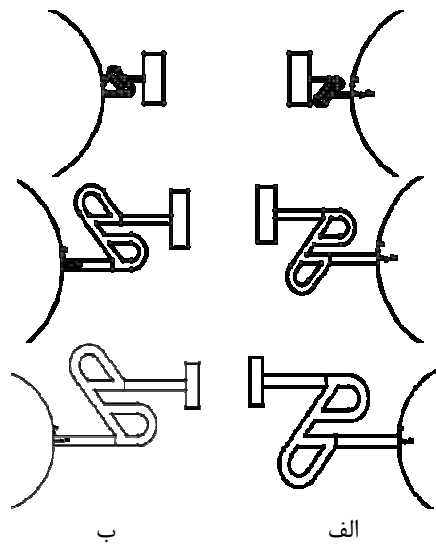
نازل-دیفیوزری

به منظور مقایسه و انتخاب کارآمدترین میکروشر در شرایط جریانی مختلف از پارامتر یکسوکندگی استفاده شده است. مقایسه با میکروشر نازل-دیفیوزری به دلیل وفور کاربرد آن در سال‌های اخیر می‌تواند ملاک خوبی در شناسایی قابلیت‌ها و امکان جایگزینی شیر تسلا به جای نمونه نازل-دیفیوزری باشد. در این بخش، با استفاده از حل عددی جریان برای میکروشر نازل-دیفیوزری ساخته شده توسط یاماها تا [۱۹] (شکل ۶)، اعتبار روش عددی مورد استفاده بررسی خواهد شد. برای شبیه‌سازی جریان در هر دو جهت نازل و دیفیوزر، در ورودی شیر از شرط مرزی فشار مشخص و در خروجی آن از شرط فشار اتمسفریک و برای سیال در تماس با دیواره‌ها از شرط عدم لغزش استفاده شده است. در اینجا پس از بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، در نهایت از یک شبکه با 52750 عدد سلول برای هندسه دیفیوزر و از یک شبکه با 17239 عدد سلول برای هندسه نازل استفاده شده است. شکل ۱۰ مشخصه نرخ جریان-افت فشار را برای هر دو جهت نازل و دیفیوزر در مقایسه با نتایج عددی [۱۹] و به همراه نتایج تجربی [۱۹] نشان می‌دهد.

یاماها تا [۱۹] از نرم‌افزار فم‌لب $2/2$ جهت شبیه‌سازی میکروشر خود استفاده کرد. علت اختلاف بین نتایج عددی کار حاضر و مرجع [۱۹] مربوط به شبکه محاسباتی و حلگر مورد استفاده می‌باشد. براساس مرجع [۱۹]، شرایط حاکم بر انجام آزمایش‌ها در نتایج تجربی بسیار تأثیرگذار می‌باشد. به نظر می‌رسد که عواملی چون زبری سطح (که در ابعاد میکرو اهمیت بیشتری دارد)، فرض جریان آرام و همچنین وجود ساختارهای ناشناخته جریان در بعد سوم، که در شبیه‌سازی‌های دوبعدی مشاهده نمی‌شود، در اختلاف نتایج مؤثر باشد.

این نتایج نشان می‌دهد که در تمام چیدمان‌ها، با افزایش افت فشار، یکسوکندگی افزایش می‌یابد که با افزایش افت فشار این تغییرات کندتر می‌شود. همچنین با افزایش تعداد طبقات یکسوکندگی افزایش می‌یابد و در افت فشارهای بالاتر نسبت این افزایش بیشتر است. در محدوده افت فشار مورد بررسی، حالت سه طبقه نسبت به دو طبقه $11/4$ درصد و حالت چهار طبقه نسبت به سه طبقه تنها $6/3$ درصد بیشتر، افزایش یکسوکندگی را موجب شده‌اند. بدیهی است که با افزودن تعداد طبقات بیشتر این میزان افزایش کاهش خواهد یافت. همچنین افزایش میانگین یکسوکندگی برای حالات سه و چهار طبقه نسبت به تعداد طبقه قبل از خودشان به ترتیب $8/6$ درصد و $4/4$ درصد بوده است؛ به عبارتی افزایش میانگین یکسوکندگی از حالت تک طبقه به دو طبقه $3/74$ برابر حالت دو طبقه به سه طبقه و $7/31$ برابر حالت سه طبقه به چهار طبقه می‌باشد. همچنین این افزایش از حالت دو طبقه به سه طبقه $1/95$ برابر حالت سه طبقه به چهار طبقه می‌باشد.

باید توجه داشت که در طراحی برای افزایش کارایی میکروپمپ می‌بایست پارامترهایی چون پیچیدگی ساخت، بزرگ‌شدن هندسه و توجیه اقتصادی نیز منظور شود. سادگی در ساخت یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های یک میکروپمپ است، زیرا با توجه به ویژگی کوچک‌سازی، مراقبت و نگهداری از میکروپمپ با مشکل کم‌تری مواجه خواهد شد. چیدمان دو طبقه از میکروشر تسلا باعث می‌شود تا مسیر جریان در ورودی و خروجی شیر به صورت موازی نسبت به هم قرار گرفته و فرآیند ساخت ساده‌تر و استفاده از میکروپمپ مورد نظر در شرایط و کارکردهای متفاوت عملی‌تر گردد. افزایش بیشتر تعداد طبقات شیر، باعث بروز مشکلات ساخت شده و یک سری محدودیت‌ها و قیدها برای طراحی ایجاد می‌کند و همچنین هد مطلق میکروپمپ را در یک سیکل کاهش

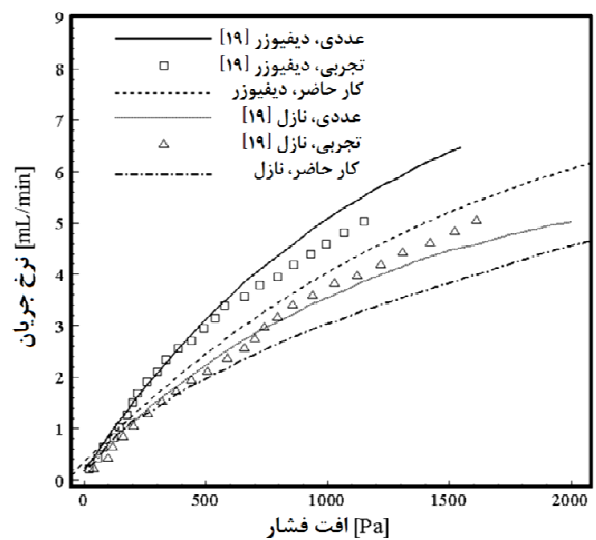


شکل ۱۱ هندسه میکرو شیرهای تسلا با عرض میکروکانال ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ μm (الف) جهت پیشرو، (ب) جهت برگشت

با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ موارد زیر قابل ملاحظه است:
 ۱- در تمام محدوده نرخ جریان مورد بررسی، با کاهش عرض کانال میکرو شیر تسلا، افت فشار در میکرو شیر بزرگ‌تر می‌شود. همچنین در یک افت فشار مشخص، نرخ جریان گذرنده از میکرو شیر با افزایش عرض میکروکانال شیر بیشتر می‌شود. در واقع با افزایش عرض میکروکانال‌ها، افت فشار کاهش یافته و در نتیجه نرخ جریان افزایش می‌یابد. اما آنچه که کارایی یک میکرو شیر را مشخص می‌کند، پارامتر یکسوکنندگی است که در ادامه بررسی خواهد شد.

۲- در تمام محدوده نرخ جریان مورد بررسی، میکرو شیر تسلا ۱۰۰ میکرونی نسبت به نمونه نازل-دیفیوزری متحمل افت فشار بیشتری می‌شود. همچنین در یک افت فشار مشخص، میکرو شیر نازل-دیفیوزری نرخ جریان بیشتری را از خود عبور می‌دهد. اما هنوز هم قضاوت در مورد عملکرد میکرو شیرها بدون محاسبه پارامتر یکسوکنندگی کار دشواری است.

۳- میکرو شیر نازل-دیفیوزری برخلاف میکرو شیر تسلا ۱۰۰ میکرونی، نسبت به میکرو شیرهای تسلا ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی در تمام محدوده نرخ جریان مورد بررسی متحمل افت فشار بیشتری می‌شود. همچنین در یک افت فشار مشخص، میکرو شیر تسلا ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی نرخ جریان بیشتری را از خود عبور می‌دهند. به علاوه، با افزایش بیشتر عرض میکرو کانال شیر تسلا از ۳۰۰ میکرون به ۵۰۰ میکرون، اختلاف بین

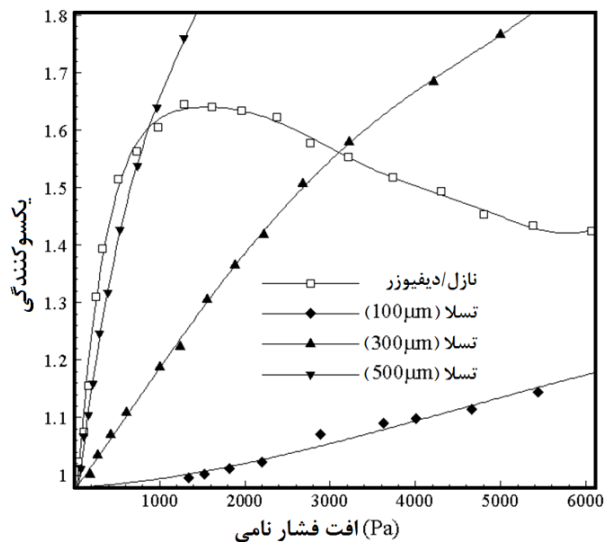


شکل ۱۰ مشخصه نرخ جریان-افت فشار در دو جهت نازل و دیفیوزر و مقایسه با نتایج عددی [۱۹]

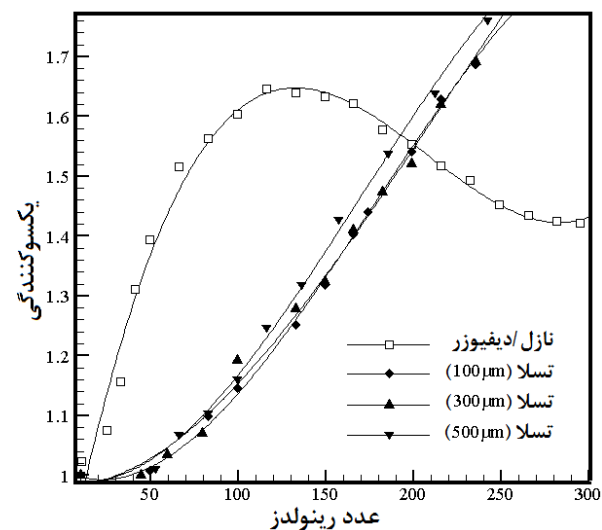
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، روند تغییرات در مورد نتایج عددی مشابه نتایج آزمایشگاهی می‌باشد که حاکی از صحت روند شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. به طور مشخص با استفاده از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی می‌توان به جواب‌های دقیق‌تری دست یافت.

جهت مقایسه عملکرد میکرو شیر تسلا مورد بررسی با میکرو شیر نازل-دیفیوزری مزبور، ابتدا عرض میکروکانال تسلا برابر عرض گلوگاه نازل-دیفیوزر یعنی ۱۰۰ μm در نظر گرفته شد و سپس مقدار آن به قطر متوسط و قطر بزرگ نازل-دیفیوزر یعنی ۳۰۰ μm و ۵۰۰ μm تغییر داده شد. سایر شرایط هندسی و همچنین شرایط شبیه‌سازی دقیقاً مشابه شرایط بررسی میکرو شیر نازل-دیفیوزری در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ هندسه میکرو شیرهای تسلا مورد بررسی را نشان می‌دهد. پس از بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی برای هر میکرو شیر، در نهایت از شبکه‌هایی با ۸۶۸۷۹، ۳۹۱۴۰ و ۲۸۸۷۸ عدد سلول به ترتیب برای هندسه شیرهای تسلا ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی استفاده شد. پس از حل جریان در میکرو شیرهای تسلا با هندسه‌های مزبور (شکل ۱۱)، ابتدا مشخصه نرخ جریان-افت فشار محاسبه و با هم مقایسه می‌شود. شکل ۱۲ و شکل ۱۳ مشخصه نرخ جریان-افت فشار را برای میکرو شیرهای مورد بررسی به ترتیب در جهت رفت یا مطلوب و در جهت برگشت یا نامطلوب نشان می‌دهد.

استخراج کرد و عملکرد این میکروشیپرها را با یکدیگر مقایسه نمود. شکل ۱۴ و شکل ۱۵ به ترتیب نمودار یکسوکنندگی بر حسب افت فشار نامی و نمودار یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز میکروشیپر تسلا را در سه اندازه مختلف در مقایسه با میکروشیپر نازل-دیفیوزری نشان می‌دهند.

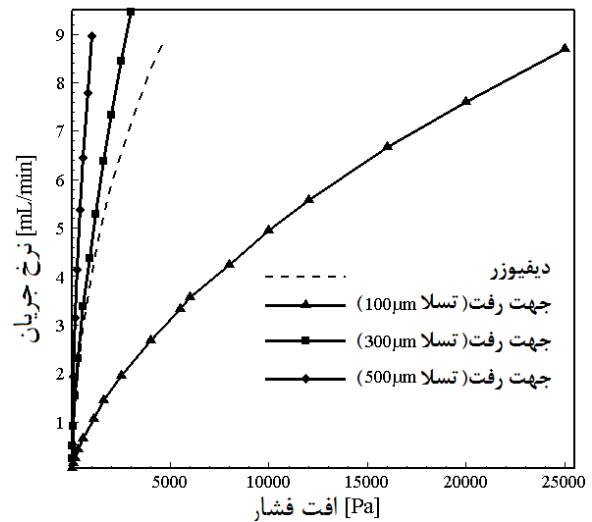


شکل ۱۴ نمودار یکسوکنندگی بر حسب افت فشار نامی برای سه میکروشیپر تسلا ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی و میکروشیپر نازل-دیفیوزری

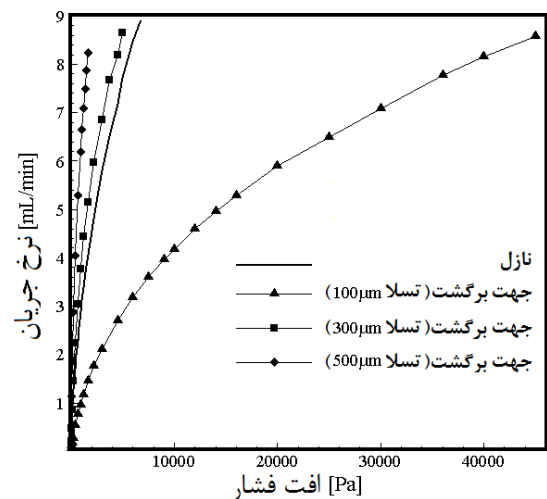


شکل ۱۵ نمودار یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز برای سه میکروشیپر تسلا ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی و میکروشیپر نازل-دیفیوزری

نمودارها بیشتر می‌شود. با توجه به نزدیکی مشخصه نرخ جریان-افت فشار شیر تسلا ۳۰۰ میکرونی و شیر نازل-دیفیوزری، احساس می‌شود که دو شیر عملکرد مشابهی داشته باشند. اما همان‌طور که ذکر شد، مقایسه میکروشیپرها تنها با منحنی مشخصه نرخ جریان-افت فشار آنها امکان‌پذیر نمی‌باشد.



شکل ۱۲ مشخصه نرخ جریان-افت فشار میکروشیپهای مورد بررسی در جهت رفت



شکل ۱۳ مشخصه نرخ جریان-افت فشار میکروشیپهای مورد بررسی در جهت برگشت

در نهایت پس از محاسبه و رسم مشخصه‌های نرخ جریان-افت فشار میکروشیپرها، می‌توان به راحتی توسط رابطه (۱) پارامتر یکسوکنندگی را برای هر چهار میکروشیپر مورد بررسی

افزایش عدد رینولدز، میزان یکسوکنندگی افزایش می‌یابد و پس از آن، مقدار یکسوکنندگی با کاهش همراه است. این امر ناشی از جدایش جریان در جهت دیفیوزر می‌باشد. بنابراین، سایر زاویه‌های دیفیوزر می‌تواند تا حد زیادی بر نتایج تأثیر بگذارد. با این وجود، واضح است که طراحی یک شیر نازل-دیفیوزری برای محدوده وسیعی از اعداد رینولدز مشکل خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی عددی جریان برای انواع چیدمان‌های میکروشیر تسلا، که از نظر هندسه با نمونه‌های مرسوم نازل-دیفیوزری متفاوت می‌باشد، پرداخته شده است. از تطابق نزدیک نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج عددی دیگران به عنوان اعتبار تحقیق حاضر استفاده شد. منحنی عملکردی، منحنی پارامتر یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز، برای این میکروشیر در چهار چیدمان مختلف از نظر تعداد طبقات استخراج گردید. بررسی نتایج عددی به دست آمده نشان داد که انتخاب یک مجموعه دوطبقه از میکروشیر تسلا، از نظر درصد افزایش یکسوکنندگی، حالت قابل قبولی دارد. این چیدمان، ضمن فشردگی و اندازه کوچک، قابلیت سازگاری در کارکردهای گوناگون را دارد. در ادامه عملکرد این میکروشیر در سه اندازه متفاوت با یک نمونه میکروشیر نازل-دیفیوزری مقایسه شد و مقادیر مربوط به شاخص یکسوکنندگی در این حالات با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه‌ها که در گستره کاربردی از عدد رینولدز انجام شد، حاکی از برتری شیر تسلا در اعداد رینولدز بالاتر و ضعف این نوع شیر در اعداد رینولدز پایین‌تر بود. نتایج وجود یک نقطه اکسترمم در نمودار میکروشیر نازل-دیفیوزری را نشان داد در حالی که برای نمونه تسلا نمودار روندی صعودی داشت. مشاهده شد که در تمام محدوده افت فشار مورد بررسی، با افزایش عرض میکروکانال شیر تسلا، یکسوکنندگی در میکروشیر بزرگ‌تر می‌شود. همچنین مشاهده شد که یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز مستقل از اندازه شیر می‌باشد. مسلماً این نتایج قابل تعمیم به میکرو شیرهای تسلا با هندسه‌های متفاوت با میکروشیر مزبور نیز خواهند بود. این نتایج نشان می‌دهد که بررسی عملکرد شیرها به این طریق یک روش ارزشمند برای طراحی صحیح

برای میکروشیر نازل-دیفیوزری، عدد رینولدز توسط رابطه (۵) برحسب عرض گلوگاه، W_1 ، محاسبه شده است. نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش عرض میکروکانال شیر تسلا، یکسوکنندگی شیر در یک افت فشار مشخص افزایش می‌یابد و با افزایش افت فشار، این تغییرات کندتر می‌شود.

در نمودار شکل ۱۵، بیشترین اختلاف بین منحنی‌ها در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی مربوط به میکروشیر تسلا ۵۰۰ میکرونی با دو میکروشیر دیگر می‌باشد که این مقدار کمتر از ۳ درصد است. با توجه به تطابق خوب دو منحنی مربوط به میکروشیرهای تسلا ۱۰۰ و ۳۰۰ میکرونی، این گونه می‌توان نتیجه گرفت که خطای محاسبات عددی علت اختلاف اندک بین این منحنی‌هاست. همان‌طور که ذکر شد، با افزایش عرض میکروکانال شیر تسلا مشخصه نرخ جریان-افت فشار و همچنین یکسوکنندگی-افت فشار آن بالا می‌رود، اما همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در تمامی اعداد رینولدز مورد بررسی، هر سه میکروشیر دارای عملکردی مشابه می‌باشند و در واقع یکسوکنندگی در شکل فشار بدون بعد به عنوان تابعی از عدد رینولدز مستقل از اندازه شیر می‌باشد.

با چشم‌پوشی از خطای محاسباتی به وجود آمده در نمودار شکل ۱۵، منحنی مربوط به میکروشیر نازل-دیفیوزری مورد بررسی به طور تقریبی در عدد رینولدز ۲۰۰ با منحنی‌های مربوط به میکروشیر تسلا تلاقی دارد و در این نقطه عملکرد سه میکروشیر تسلا و نازل-دیفیوزری یکسان می‌باشد که مقدار یکسوکنندگی در این نقطه به طور تقریبی برابر ۱/۵۵ می‌باشد. اما در اعداد رینولدز کمتر از این مقدار، میکروشیر نازل-دیفیوزری میکروشیری کارا تر است. با توجه به روند صعودی نمودار پارامتر یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز برای میکروشیر تسلا، در اعداد رینولدز بیشتر از ۲۰۰ میکروشیر تسلا میکروشیری کارا تر نسبت به میکروشیر نازل-دیفیوزری خواهد بود.

در هر دو شکل ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود که منحنی‌های مربوط به میکروشیر تسلا هیچ نقطه اکسترممی ندارند و نمودارها روند صعودی دارند. اما در مورد میکروشیر نازل-دیفیوزری منحنی دارای نقطه اکسترمم بوده و این شیر در حوالی عدد رینولدز ۱۳۰ دارای بیشترین یکسوکنندگی و در نتیجه بهترین کارایی می‌باشد. تا قبل از این عدد رینولدز، با

- [10] Reed J. L., Fla O., "Fluidic Rectifier", *U. S. Patent*, No. 5265636, 1993.
- [11] Forster F. K., Bardell R. L., Blanchard A. P., Afromowitz M. A., Sharma N. R., "Micropumps with Fixed Valves", *U. S. Patent*, No. 5876187, 1999.
- [12] Stemme E., Stemme G., "Valve-Less Fluid Pump", *Swedish Patent Application*, No. 9300604-7, 1993.
- [13] Forster F., Williams B., "Parametric Design of Fixed-Geometry Microvalves-the Tesser Valve", *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, New Orleans, Louisiana, USA, 2002, pp. 431-437.
- [14] Gamboa A. R., Morris C. J., Forster F. K., "Improvement in Fixed-Valve Micropump Performance through Shape Optimization of Valves", *J. Fluid Engineering*, Vol. 127, 2005, pp. 339-346.
- [15] Liao P. F., *A Study on No-Moving-Part Valves for Flows in Microchannels*, Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, MS Thesis, 2004.
- [۱۶] کلاهدوز محمدابراهیم، بهینه‌سازی و طراحی میکروپمپ پیزوالکتریک با به‌کارگیری میکروشیرهای تسلا اصلاح‌یافته، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۸.
- [17] Deshpande M., Gilbert J., Bardell R., Forster F., "Design Analysis of No-Moving-Parts Valves for Micropumps", *J. Microelectromech. Syst.* Vol. 66, 1998, pp. 153-158.
- [18] Bardell R., *The Diodicity Mechanism of Tesla-Type-No-Moving-Part Valves*, Mechanical Engineering Department, University of Washington, PhD Thesis, 2000.
- [19] Yamahata C., *Magnetically Actuated Micropumps*, PhD Thesis, Laboratory for Microsystems, Institute of Microelectronics and Microsystems, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, EPFL., 2005.

شیر می‌باشد. مشاهدات نتایج دوبعدی این تحقیق می‌تواند آشکارکننده روند تغییراتی باشد که به طور دقیق با شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی و بررسی‌های آزمایشگاهی قابل تعیین خواهد بود.

۶- مراجع

- [1] Laser D. J., Santiago J. G., "A Review of Micropumps", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, 2004, pp. 35-64.
- [2] Woias P., "Micropumps-Past, Progress and Future Prospects", *Sensors and Actuators B*, Vol. 105, 2005, pp. 28-38.
- [3] Nisar A., Afzulpurkar N., Mahaisavariya B., Tuantranont A., "MEMS-Based Micropumps in Drug Delivery and Biomedical Applications", *Sensors and Actuators B*, Vol. 130, 2008, pp. 917-942.
- [4] Iverson B. D., Garimella S. V., "Recent Advances in Microscale Pumping Technologies: a Review and Evaluation", *Microfluid Nanofluid*, Vol. 5, 2008, pp. 145-174.
- [5] Nabavi M., "Steady and Unsteady Flow Analysis in Microdiffusers and Micropumps: a Critical Review", *Microfluid Nanofluid*, Vol. 7, 2009, pp. 599-619.
- [6] Amirouche F., Zhou Y. and Johnson T., "Current Micropump Technologies and Their Biomedical Applications", *Microsyst. Technol.*, Vol. 15, 2009, pp. 647-666.
- [7] Stemme E., Stemme G., "A Valveless Diffuser Nozzle-Based Fluid Pumps", *Sens. Actuators A: Phys.*, Vol. 39, 1993, pp. 159-167.
- [8] Forster F., Bardell R., Afromowitz M., Sharma N., Blanchard A., "Design, Fabrication and Testing of fixed-Valve Micropumps", *Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, CA, New York, (ASME), 1995.
- [9] Tesla N., "Valvular Conduit", *U. S. Patent*, No.1329559, 1920.