http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۲ شماره ۶، اسفند ۱۳۹۱ ص ص ۱۲۴-۱۳۵

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۱/۲/۲۳
پذیرش ۹۱/۶/۲۵
ارائه در سایت ۹۱/۹/۳۰

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

کاظم محمدزاده[۱]، محمدابراهیم کلاهدوز[۲]، ابراهیم شیرانی[۳*]، محمدبهشاد شفیعی[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
* اصفهان، صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، eshirani@cc.iut.ac.ir

چکیده- در این مطالعه، اثر تعداد طبقات بر روی عملکرد میکروشیر تسلا بررسی شده است. بدین منظور، چیدمان‌های مختلف شامل میکروشیرهای یک تا چهارطبقه 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 میکروشیر دوطبقه تقریبا ۱/۳۲ برابر حالت تک‌طبقه 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 میکروشیر دوطبقه در سه اندازه متفاوت با یک نمونه میکروشیر نازل-دیفیوزری مقایسه شد. مقایسه‌ها، که براساس محاسبه مقدار یکسوکنندگی در گستره قابل کاربردی‌ای 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، میکروشیر 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. Mohammadzadeh[1], M. E. Kolahdouz[2], E. Shirani[3*], M. B. Shafii[4]

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

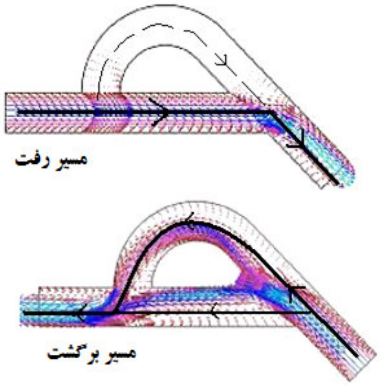
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

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 یکسوکنندگی 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 یکسوکنندگی

مطالعات عددی و تجربی زیادی بر روی میکروپمپ‌های بدون دریچه انجام گرفته است[۱-۶]. ایده استفاده از میکروشیرهای فاقد اجزای متحرک اولین‌بار 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 حالی‌که 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 نه‌تنها 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 یکسوکنندگی 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 برطرف‌کردن 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

که افزایش تعداد شیرها از یک به دو یکسوکنندگی را تقریبا 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 به‌تدریج با افزایش طبقات کاهش می‌یابد.

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

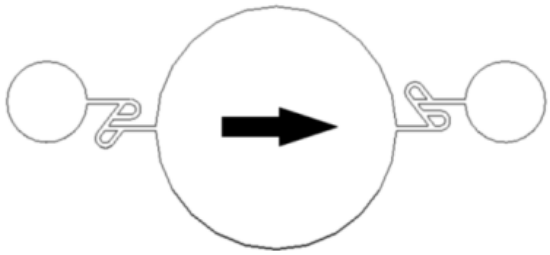
فورستر و ویلیامز[۱۳]، با استفاده از یک طراحی پارامتریک، شیر تسر[1] را که از ترکیب هندسه شیرهای تسلا و نازل-دیفیوزری به‌وجود آمده بود پیشنهاد کردند و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، با حل دوبعدی و پایای جریان، عملکرد این شیر را با شیرهای نازل-دیفیوزری و تسلا ارائه‌شده تا آن زمان مقایسه کردند. با این حال 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<۱۰۰) و شیر تسلا در اعداد رینولدز بالا (Re>۱۰۰) 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 گامبوا و همکاران[۱۴]، با به‌کارگیری روش‌های عددی و مدل‌های دینامیکی موجود، مقادیر جدیدی برای پارامترهای بهینه هندسی میکروشیر 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] میکروشیر 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

به عنوان جدیدترین و جامع‌ترین این مطالعات می‌توان به کار کلاهدوز[۱۶] اشاره کرد. وی در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود، با مبنا قراردادن میکروشیر ارائه‌شده توسط لیا، با بررسی عددی جریان در شیر تسلا، میکروشیر با کارکرد بهتری را از نظر نسبت یکسوکنندگی نسبت به طرح‌های پیشین پیشنهاد کرد و نمونه دوطبقه آن را در ساخت یک نمونه میکروپمپ پیزوالکتریک به‌کار برد (شکل ۲). نتایج حل عددی نشان داد که میکروپمپ با چیدمان شامل میکروشیر 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 میکروشیر 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[۱۷،۱۶،۸،۱۳]. بنابراین، در این تحقیق، اثر تعداد طبقات بر عملکرد شیر تسلا بررسی و میکروشیر با بهترین تعداد طبقه انتخاب می‌شود. همچنین، تأثیر اندازه عرض کانال میکروشیر تسلا بر عملکرد آن نیز بررسی خواهد شد. در ادامه عملکرد میکروشیر تسلای منتخب در اندازه‌های مختلف با یک نمونه میکروشیر نازل-دیفیوزری مقایسه می‌شود. درنهایت 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

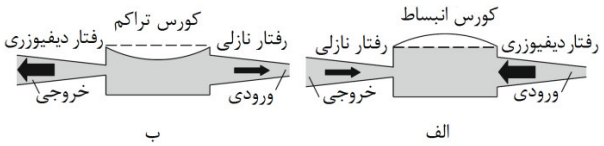
معادلات حاکم بر مسئله، تئوری‌های مربوطه و حل عددی جریان در میکروشیرها پرداخته می‌شود. درنهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده ارائه می‌شود.

۲- شرح مسئله

۲-۱- اصول عملکرد میکروپمپ بدون دریچه

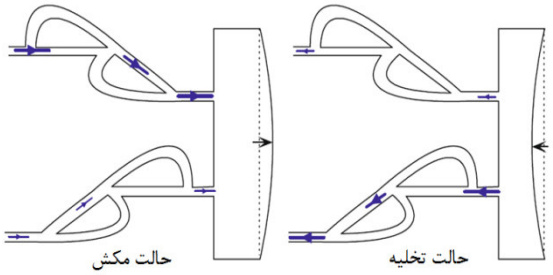
در اینجا به نوع کاربرد شیرهای نازل-دیفیوزری در ساختار میکروپمپ بدون دریچه اشاره می‌شود. بدیهی است که شیوه کارکرد در شیر تسلا از جهاتی مشابه همین شیرهاست. عملکرد این میکروپمپ‌ها می‌تواند به دو نیم‌سیکل مکش و تخلیه تقسیم شود. نحوه کار در شکل ۳ به طور شماتیک نشان داده شده است.

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 میکروشیر تسلا نیز صورت می‌گیرد.



شکل ۳ عملکرد چرخه‌ای میکروشیر 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 دوسمت 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 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 منتجه از کانال ورودی به سمت کانال خروجی برقرار می‌گردد و پمپ سیال را به گردش در می‌آورد. شکل ۴ میکروشیرهای تسلا را همراه با میکروپمپ دیافراگمی نشان می‌دهد.



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

۲-۲- فرمول‌بندی و معادلات حاکم

یک میکروشیر، 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 می باشد نسبت یکسوکنندگی[1] نام دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود[۸]:

$$\mathrm{Di} = \left(\Delta P_{\mathrm{Backward}} / \Delta P_{\mathrm{Forward}}\right)_Q \qquad (۱)$$

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

1. Diodicity

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

در این نوع میکروشیر، نسبت یکسوکنندگی به شکل رابطه (۲) در می‌آید:

$$\mathrm{Di} = \left(\Delta P_{\mathrm{Nozzle}} / \Delta P_{\mathrm{Diffuser}}\right)_Q \quad (۲)$$

افت فشار تولیدکننده نسبت یکسوکنندگی 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 میکروشیرهای مورد بررسی (اعم از نازل-دیفیوزری و تسلا)، 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 پدیدآمدن سرعت‌های بالا در سیال، پیش‌بینی می‌شود که عدد رینولدز جریان در شرایط اختلاف فشار اعمالی با درنظر 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 نسبتا کم‌هزینه هستند به جای شبیه‌سازی‌های گذرا، که پرهزینه هستند، استفاده کرد. لذا، جهت مطالعه سازوکار یکسوکنندگی، از شبیه‌سازی‌های حالت پایا استفاده شده است[۱۸]. بنابراین، جهت حل عددی جریان در میکروشیرهای 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 صرف‌نظر از نیروهای حجمی، معادله پیوستگی و مومنتوم به‌ترتیب به شکل روابط (۳) و (۴) در آمده است.

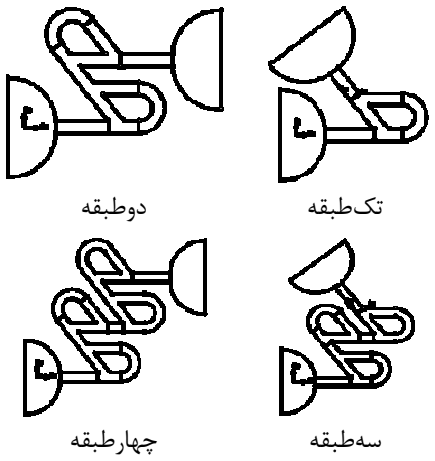
$$\partial U_j / \partial x_j = 0 \quad (۳)$$

$$\rho U_j \, \partial U_i / \partial x_j = -\partial P / \partial x_i + \mu \left(\partial^2 U_i / \partial x_j \partial x_i\right) \quad (۴)$$

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

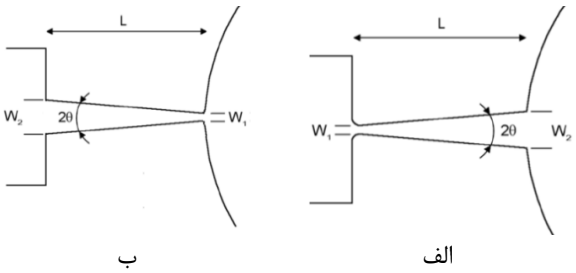
۳-۲- هندسه میکروشیرها

شکل ۵ هندسه میکروشیرهای تسلای مورد بررسی را با مبنا قراردادن هندسه ارائه‌شده توسط مرجع [۱۶] نشان می‌دهد. در میکروشیرهای تسلای مورد بررسی، عرض همه کانال‌ها ۱۲۰ میکرون و برابر مقادیری است که مرجع [۱۶] برای طراحی میکروشیر خود به‌کار برده است.



شکل ۵ شکل هندسی میکروشیرهای تسلای مورد بررسی

جهت مقایسه عملکرد میکروشیر تسلای دوطبقه با نمونه مرسوم نازل-دیفیوزری، هندسه میکروشیرهای ساخته‌شده توسط یاماهاتا[۱۹] مد نظر قرار گرفت (شکل ۶). وی در یک وسیله جدا مشخصه نرخ جریان-افت فشار میکروشیر نازل-دیفیوزری را استخراج کرد و با نتایج عددی خود مقایسه کرد. پارامترهای هندسی این میکروشیرها در جدول ۱ آمده است.



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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

جدول ۱ پارامترهای هندسی میکروشیر نازل- دیفیوزری مورد بررسی[۱۹]

عمق	2Θ	L	W_1	W_2
۵۰۰ μm	۹/۵^0	۲/۳ mm	۱۰۰ μm	۵۰۰ μm

۳- روش حل

حل عددی معادلات حاکم به کمک نرم‌افزار فلوئنت 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 گرادیان‌های سرعت بزرگ هستند و با کاهش چگالی مش در مناطق غیرحساس صورت گرفته است. علاوه بر این روش مش‌بندی، از وفق‌سازی شبکه[1] توسط خود حلگر در مناطق با گرادیان‌های شدید سرعت و فشار استفاده گردیده است.

مبنای گسسته‌سازی بر اساس فرمول‌بندی حجم محدود بوده و کوپلینگ به‌کار رفته برای سرعت و فشار از نوع الگوریتم سیمپل (روش نیمه‌ضمنی برای معادلات متصل‌شده فشار)[2] می‌باشد. همچنین از طرح بالادستی[3] مرتبه اول برای گسسته سازی معادلات مومنتوم استفاده شده است. تنظیمات مربوط به حلگر بر اساس مرجع [۱۶] صورت گرفته است. در تمامی میکروشیرهای مورد بررسی در این تحقیق، پس از همگرایی حل، بررسی استقلال شبکه از طریق تصحیح مکرر گرادیان متغیرهای سرعت و فشار و نیز مناطق حساس شبکه انجام شده است. از نرخ جریان محاسبه‌شده 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 به‌دست آمده برای بدترین حالت برای سایر حالات مورد بررسی نیز معتبر خواهد بود. در نهایت به‌ترتیب از شبکه‌های محاسباتی با ۵۳۰۲۰، ۹۳۳۶۲، ۱۱۳۴۹۳ و ۲۲۴۱۴۸ 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 ۰/۳ تا ۱ استفاده شد.

برای محاسبه یکسوکنندگی 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 درنظر گرفتن اختلاف فشار به‌دست آمده از این مرحله و اختلاف فشار مطلوب اولیه به عنوان اختلاف فشار مربوط به حالت برگشت، نسبت یکسوکنندگی در شرایط دبی یکسان طبق رابطه (۱) محاسبه می شود.

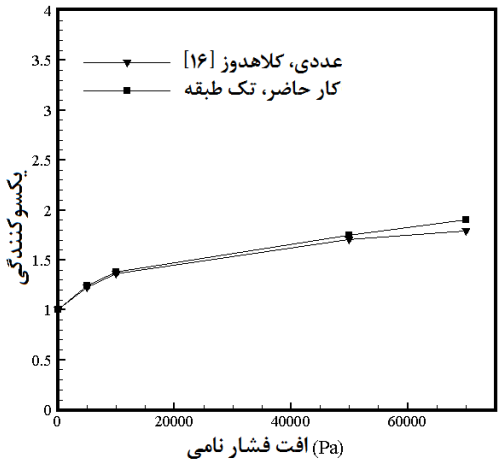
۴- تفسیر و تحلیل نتایج

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

در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از حل عددی دوبعدی در حالت پایا برای میکروشیر تسلای تک‌طبقه ارائه‌شده 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 به‌دست آمده برای میکروشیر تسلا با هندسه ارائه‌شده توسط فورستر[۸] را با نتایج مربوط به مدل دوبعدی به‌کار 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 تسلای مرجع [۱۶] برای حالات دوطبقه، سه‌طبقه و چهارطبقه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

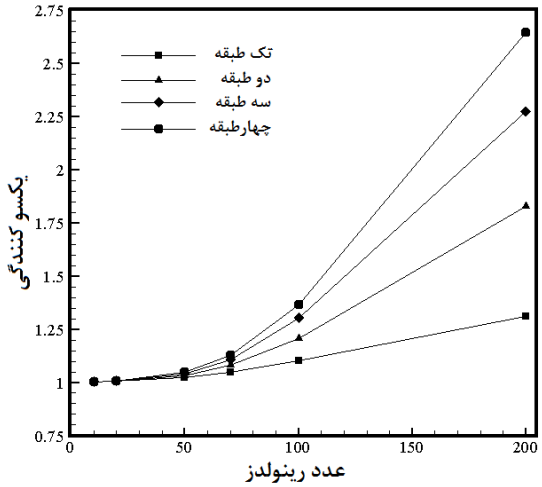


شکل ۷ اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده با نتایج مرجع [۱۶]

با حل عددی جریان در میکروشیرهای تسلا با تعداد طبقات متفاوت و محاسبه یکسوکنندگی به طریق گفته‌شده در بخش ۳ نمودارهای عملکردی میکروشیر رسم گردید. شکل ۸ تغییرات پارامتر یکسوکنندگی برحسب عدد رینولدز را برای میکروشیر 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.

$$\mathrm{Re} = \rho W \bar{U} / \mu = \dot{m} / \mu \qquad (۵)$$

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



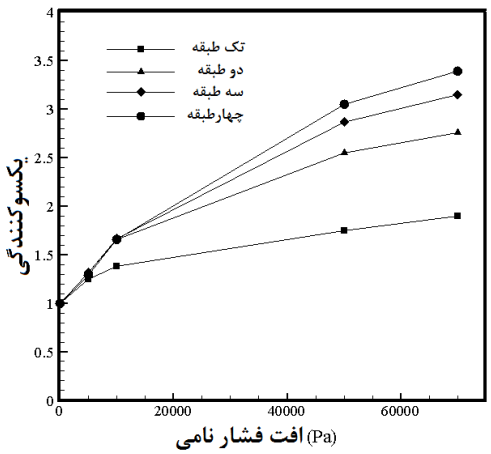
شکل ۸ تغییرات پارامتر یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز برای شیر میکروتسلا با تعداد طبقات مختلف

جدول ۲ نتایج عددی مربوط به نمودار شکل ۸

نام مدل	میانگین یکسوکنندگی	درصد افزایش یکسوکنندگی
تک‌طبقه	۱/۰۹۹	-
دوطبقه	۱/۲۳۰	۱۱/۹
سه‌طبقه	۱/۳۴۶	۲۲/۵
چهارطبقه	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 شیر 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<۵۰) 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 برحسب افت فشار نامی برای میکروشیر تسلا با تعداد طبقات مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

جدول ۳ نتایج عددی مربوط به نمودار شکل ۹

نام مدل	میانگین یکسوکنندگی	درصد افزایش یکسوکنندگی
تک‌طبقه	۱/۵۶۶	-
دوطبقه	۲/۰۷۰	۳۲/۲
سه‌طبقه	۲/۲۴۸	۴۳/۶
چهارطبقه	۲/۳۴۷	۴۹/۹

این نتایج نشان می‌دهد که در تمام چیدمان‌ها، با افزایش افت فشار، یکسوکنندگی افزایش می‌یابد که با افزایش افت فشار این تغییرات کندتر می‌شود. همچنین با افزایش تعداد طبقات یکسوکنندگی افزایش می‌یابد و در افت فشارهای بالاتر نسبت این افزایش بیشتر است. در محدوده افت فشار مورد بررسی، حالت سه‌طبقه نسبت به دوطبقه ۱۱/۴ درصد و حالت چهارطبقه نسبت به سه‌طبقه تنها ۶/۳ درصد بیشتر، افزایش یکسوکنندگی را موجب شده‌اند. بدیهی است که با افزودن تعداد طبقات بیشتر این میزان افزایش کاهش خواهد یافت. همچنین افزایش میانگین یکسوکنندگی برای حالات سه و چهارطبقه نسبت به تعداد طبقه قبل از خودشان به ترتیب ۸/۶ درصد و ۴/۴ درصد بوده است؛ به عبارتی افزایش میانگین یکسوکنندگی از حالت تک‌طبقه به دوطبقه ۳/۷۴ برابر حالت دوطبقه به سه‌طبقه و ۷/۳۱ برابر حالت سه‌طبقه به چهار طبقه می‌باشد. همچنین این افزایش از حالت دوطبقه به سه‌طبقه ۱/۹۵ برابر حالت سه‌طبقه به چهارطبقه می‌باشد.

باید توجه داشت که در طراحی برای افزایش کارآیی 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 میکروشیر 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 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 یکسوکنندگی ندارد[۱۰]. بنابراین انتخاب یک مجموعه دوطبقه از میکروشیر تسلا، با توجه به مزیت‌های بیان شده، حالت قابل قبولی خواهد بود.

۲-۴- مقایسه عملکرد میکروشیر تسلا با میکروشیر نازل-دیفیوزری

به منظور مقایسه و انتخاب کارآمدترین میکروشیر در شرایط جریانی مختلف از پارامتر یکسوکنندگی استفاده شده است. مقایسه با میکروشیر 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.

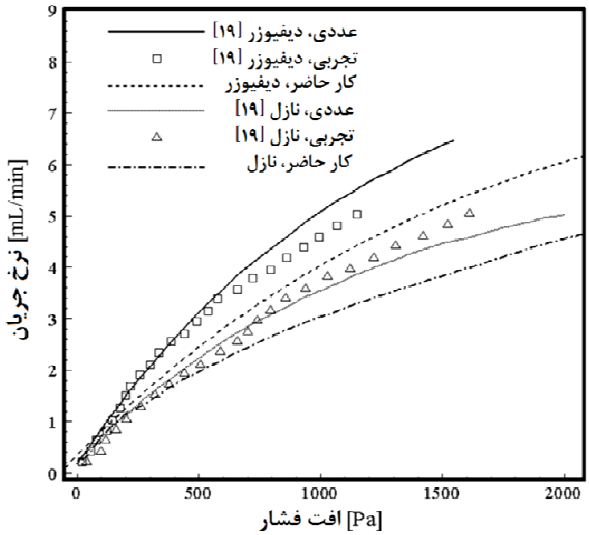
در این بخش، با استفاده از حل عددی جریان برای میکروشیر نازل-دیفیوزری ساخته‌شده توسط یاماهاتا[۱۹] (شکل ۶)، اعتبار روش عددی مورد استفاده بررسی خواهد شد. برای شبیه‌سازی جریان در هر دو جهت نازل و دیفیوزر، در ورودی شیر از شرط مرزی فشار مشخص و در خروجی آن از شرط فشار اتمسفریک و برای سیال در تماس با دیواره‌ها از شرط عدم لغزش استفاده شده است. در اینجا پس از بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، در نهایت از یک شبکه با ۵۲۷۵۰ عدد سلول برای هندسه دیفیوزر و از یک شبکه با ۱۷۲۳۹ 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.

یاماهاتا[۱۹] از نرم‌افزار فملب ۲/۲[1] جهت شبیه‌سازی میکروشیر 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. به‌نظر 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.

1. Femlab® 2.2.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

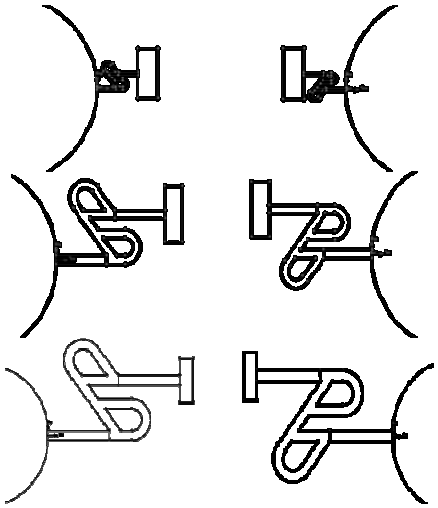
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]



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 میکروشیر تسلا مورد بررسی با میکروشیر نازل-دیفیوزری مزبور، ابتدا عرض میکروکانال تسلا برابر عرض گلوگاه نازل-دیفیوزر یعنی ۱۰۰μm درنظر گرفته شد و سپس مقدار آن به قطر متوسط و قطر بزرگ نازل-دیفیوزر یعنی ۳۰۰μm و ۵۰۰μm تغییر داده شد. سایر شرایط هندسی و همچنین شرایط شبیه‌سازی دقیقا مشابه شرایط بررسی میکروشیر نازل-دیفیوزری درنظر گرفته شد. شکل ۱۱ هندسه میکروشیرهای تسلای مورد بررسی را نشان می‌دهد. پس از بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی برای هر میکروشیر، در نهایت از شبکه‌هایی با ۸۶۸۷۹، ۳۹۱۴۰ و ۲۸۸۷۸ عدد سلول به‌ترتیب برای هندسه شیرهای تسلای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی استفاده شد. پس از حل جریان در میکروشیرهای 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 میکروشیرهای مورد بررسی به‌ترتیب در جهت رفت یا مطلوب و در جهت برگشت یا نامطلوب نشان می‌دهد.



ب الف

شکل ۱۱ هندسه میکروشیرهای تسلا با عرض میکروکانال ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰μm؛ الف) جهت پیشرو، ب) جهت برگشت

با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ موارد زیر قابل ملاحظه است:

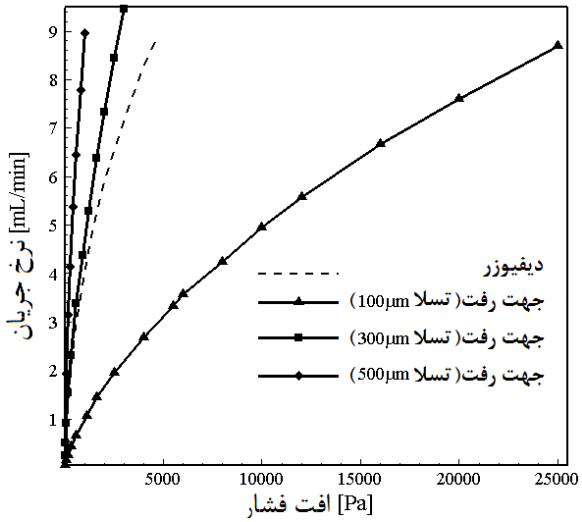
۱- در تمام محدوده نرخ جریان مورد بررسی، با کاهش عرض کانال میکروشیر تسلا، افت فشار در میکروشیر بزرگ‌تر می‌شود. همچنین در یک افت فشار مشخص، نرخ جریان گذرنده از میکروشیر با افزایش عرض میکروکانال شیر بیشتر می‌شود. در واقع با افزایش عرض میکروکانال‌ها، افت فشار کاهش یافته و در نتیجه نرخ جریان افزایش می‌یابد. اما آنچه که کارایی یک میکروشیر را مشخص می‌کند، پارامتر یکسوکنندگی است که در ادامه بررسی خواهد شد.

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

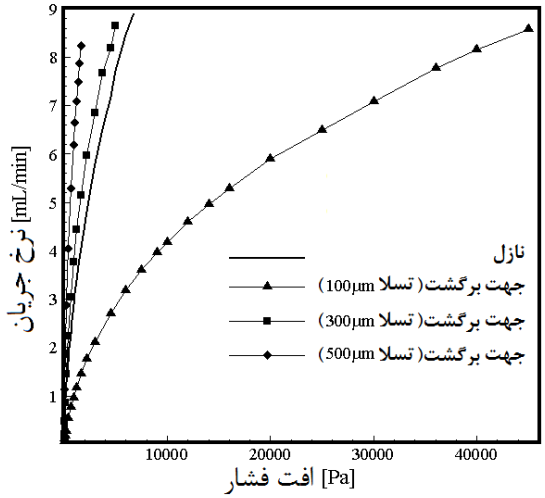
۳- میکروشیر نازل-دیفیوزری برخلاف میکروشیر تسلای ۱۰۰ میکرونی، نسبت به میکروشیرهای تسلای ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی در تمام محدوده نرخ جریان مورد بررسی متحمل افت فشار بیشتری می‌شود. همچنین در یک افت فشار مشخص، میکروشیر تسلای۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی نرخ جریان بیشتری را از خود عبور می‌دهند. به علاوه، با افزایش بیشتر عرض میکرو کانال شیر تسلا از ۳۰۰ میکرون به ۵۰۰ میکرون، اختلاف بین

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

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

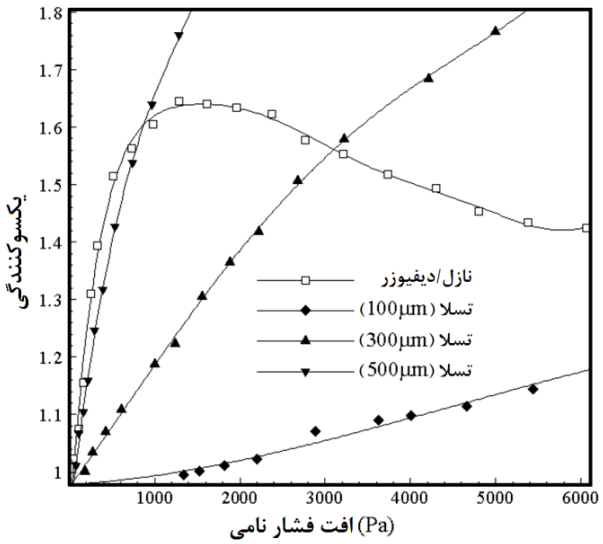


شکل ۱۲ مشخصه نرخ جریان-افت فشار میکروشیرهای مورد بررسی در جهت رفت

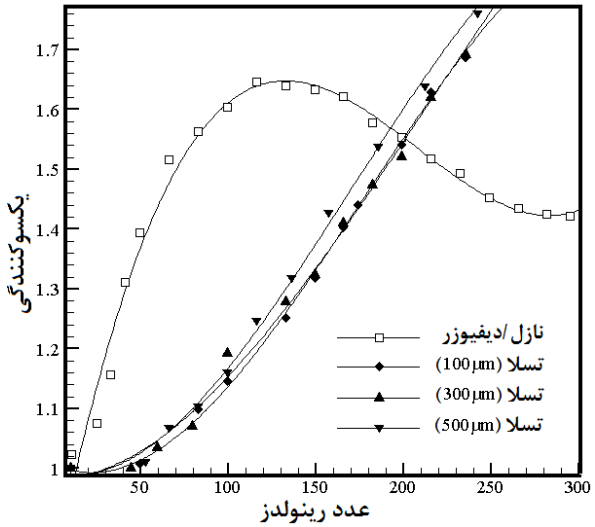


شکل ۱۳ مشخصه نرخ جریان-افت فشار میکروشیرهای مورد بررسی در جهت برگشت

در نهایت پس از محاسبه و رسم مشخصه‌های نرخ جریان-افت فشار میکروشیرها، می‌توان به‌راحتی توسط رابطه (۱) پارامتر یکسوکنندگی را برای هرچهار میکروشیر مورد بررسی استخراج کرد و عملکرد این میکروشیرها را با یکدیگر مقایسه نمود. شکل ۱۴ و شکل ۱۵ به‌ترتیب نمودار یکسوکنندگی بر حسب افت فشار نامی و نمودار یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز میکروشیر تسلا را در سه اندازه مختلف در مقایسه با میکروشیر نازل-دیفیوزری نشان می‌دهند.



شکل ۱۴ نمودار یکسوکنندگی بر حسب افت فشار نامی برای سه میکروشیر تسلای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی و میکرو شیر نازل-دیفیوزری



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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

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 تسلای 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 تسلای 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 به‌وجود 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 کاراتر 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 کاراتر 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 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 به‌دست 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. مسلما این نتایج قابل تعمیم به میکرو شیرهای تسلا با هندسه‌های متفاوت با میکرشیر مزبور نیز خواهند بود. این نتایج نشان می‌دهد که بررسی عملکرد شیرها به این طریق یک روش ارزشمند برای طراحی صحیح

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]

شیر می‌باشد. مشاهدات نتایج دوبعدی این تحقیق می‌تواند آشکارکننده روند تغییراتی باشد که به طور دقیق با شبیه-سازی‌های 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.

[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 تسلای 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.6.13.8]