مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1397، دوره 18، شماره 01، ص‌ص 199-210

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی جریان نوسانی درون یک میکروالو تسلا

کاظم محمدزاده[1]، محمدرضا قریب[2*]، مسعود عباسی[3]

1-دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه
3-کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه
* تربت حیدریه، صندوق پستی 9516168595، m.gharib@torbath.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 09 آبان 1396
پذیرش: 20 آذر 1396
ارائه در سایت: 15 دی 1396

کلید واژگان:
میکروالو تسلا
یکسوکنندگی
شبیه‌سازی سه‌بعدی
جریان غیردائم

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی عددی عملکرد میکروالو تسلا در شرایط جریان سه‌بعدی و غیردائم پرداخته می‌شود. از متوسط زمانی پارامتر یکسوکنندگی به‌عنوان معیار اصلی برای ارزیابی عملکرد والو استفاده می‌شود. با انجام شبیه‌سازی‌ها و به‌دست آوردن میدان‌های سرعت و فشار درون میکروشیر، تغییرات پارامترهای عملکردی میکروشیر تسلا شامل افت فشار و پارامتر یکسوکنندگی در محدوده فرکانس‌های مختلف تحت اعمال تحریک سینوسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان داد که شبیه‌سازی سه‌بعدی پایا با در نظر گرفتن افت فشار بعد سوم، در تمام محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی مقدار پارامتر یکسوکنندگی کمتری را نسبت به شبیه‌سازی دوبعدی پایا به نمایش می‌گذارد. اثرات گذرا بر عملکرد میکروالو در حالت سه بعدی نیز بررسی شد و مشاهده شد که افت فشار کل در پاسخ حالت غیردائم میکروالودر هر دو جهت رفت و برگشت از پاسخ حالت دائم آن بیشتر می‌باشد. این نتیجه مهم با نتایج سایر محققان در این زمینه که شبیه‌سازی خود را به صورت دوبعدی انجام داده بودند، هم‌خوانی کیفی داشت. بررسی اثر فرکانس اعمالی بر عملکرد میکروالو تسلا در اعداد رینولدز مختلف، بخش دیگری از پژوهش حاضر بود. نتایج نشان داد که که عملکرد میکرو والو تسلا در فرکانس‌های پایین‌تر از 100 هرتز مستقل از فرکانس اعمالی بوده در حالی که در فرکانس‌های بالاتر از 100 هرتز عملکرد آن با افزایش فرکانس بهبود می‌یابد. در تمامی فرکانس‌ها با افزایش عدد رینولدز، عملکرد میکروالو بهبود می‌یابد و مقدار یکسوکنندگی آن افزایش می‌یابد.

Numerical investigation of oscillatory fluid flow through a tesla microvalve

Kazem Mohammadzadeh[1], Mohammad Reza Gharib[2]*, Masoud Abbasi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, University of Torbat-e-Heydarieh, Torbat-e-Heydarieh, Iran
* P.O.B. 9516168595 Torbat-e-Heydarieh, Iran, m.gharib@torbath.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 October 2017
Accepted 11 December 2017
Available Online 05 January 2018

Keywords:
Tesla Microvalve
Diodicity
Three-dimensional simulation
Unsteady flow

ABSTRACT

In the present research, the performance of a Tesla microvalve has been studied under the unsteady three dimensional flow. The time averaged of diodicity is the main criteria for the evaluation of the performance of the valve. By simulation and obtaining the velocity and pressure fields within microvalve, changes in operating parameters of valve including total pressure drop and diodicity parameter in the range of various frequencies studied under sinusoidal excitation. The results showed that the amount of diodicity in steady three dimensional with consideration of third dimension is lower with respect to steady two dimensional flow at entire of studied range of Reynolds numbers. Transient effects on microvalve performance in three dimensional is also studied. It is observed that total pressure drop of unsteady case is greater than steady case at both of forward and backward directions. This important result is in a qualitative agreement with simulation results of other researchers which are obtained by two dimensional simulations. Investigation of effect of applied frequency on Tesla microvalve performance at different Reynolds number is another part of this study. The results showed that at the frequencies lower than 100Hz, the performance of the Tesla microvalve is independent of the frequency, however at higher frequencies greater than 100HZ, its performance is improved by increasing the frequency. Microvalve performance is improved and diodicity is increased by increasing of Reynolds number at all frequencies.

1- مقدمه

میکروپمپ‌ها یکی از شاخه‌های مهم سیستم‌های میکروالکترومکانیکی هستند که برای انتقال دقیق و کنترل‌شده حجم‌هایی از مرتبه میکرولیتر یا نانولیتر بکار می‌روند. در میان انواع مختلف میکروپمپ‌ها، نمونه بدون دریچه که از نوع رفت وبرگشتی 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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

K. Mohammadzadeh, M. R. Gharib, M. Abbasi, Numerical investigation of oscillatory fluid flow through a tesla microvalve, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 199-210, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

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 [1]. هندسه کانال میکروشیر تسلا موجب مقاومت‌های متفاوتی در جهت رفت و برگشت جریان می‌شود. خاصیت یکسوکنندگی این نوع شیر عمدتا ناشی از تفاوت زوایای برخورد کانال‌ها در دو قسمت شیر می‌باشد که باعث پدید آمدن مقاومت بیشتر جریان برگشت در مقایسه با جریان رفت می‌گردد (شکل 1). عملکرد شیر تسلا به خاطر اثر اینرسیایی سیال است. با این وجود بسته به این که شیر در چه بازه‌ی فرکانسی کار کند می‌تواند اثرات ویسکوز نیز مورد اهمیت واقع شوند.

مطالعات عددی و تجربی زیادی بر روی میکروشیر تسلا انجام گرفته است که در مقاله قبلی نویسنده به طور کامل به آن‌ها پرداخته شده است [2,1]. در سال 2013 محمدزاده و همکاران [2] به بررسی اثر تعداد طبقات و اندازه بر عملکرد میکروشیر تسلا ارائه شده توسط کلاهدوز [3] پرداختند و عملکرد آن را با میکروشیر نازل-دیفیوزری مقایسه کردند. آنها پاسخ حالت دائم و غیردائم شیر را در حالت تک طبقه با هم مقایسه کردند. شبیه‌سازی‌ها به صورت دوبعدی و تنها برای فرکانس 100 Hz انجام شده بود. برای شبیه‌سازی حالت غیردائم از شرط مرزی سرعت متغیر با زمان که به صورت تابعی سینوسی اعمال می‌شد، استفاده گردید. پاسخ حالت دائم و غیردائم شیر که به صورت نمودار یکسوکنندگی بر حسب رینولدز استخراج شد، مقداری تفاوت بین دو حالت را نشان می‌داد اما روند تغییرات مشابه بود. در نهایت برای سایر شبیه‌سازی‌ها از حل‌های دوبعدی و حالت پایا استفاده گردید. نتایج نشان داد که در شرایط جریان یکسان حداکثر یکسوکنندگی میکروشیر دوطبقه تقریباً 45% بیشتر از حالت تک‌طبقه است و حالت دوطبقه از شیر تسلا در بین چیدمان‌های مورد بررسی (یک تا چهار طبقه) از نظر افزایش یکسوکنندگی، میزان فشردگی و قابلیت سازگاری در کاربردهای مختلف بهترین گزینه است. همچنین، عملکرد میکروشیر دوطبقه در سه اندازه متفاوت با یک نمونه میکروشیر نازل-دیفیوزری مقایسه شد. مقایسه‌ها 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 نسبت به نمونه نازل-دیفیوزری نشان داده شد.

مطالعه کارهای انجام شده در زمینه بهینه‌سازی هندسه میکروشیر تسلا نشان می‌دهد که بررسی و مقایسه میکروشیرهای بدون اجزای متحرک (نازل-دیفیوزری و تسلا) برای جریان در حالت دوبعدی و پایا با استفاده از پارامتر یکسوکنندگی صورت گرفته است. همانطور که واضح است پمپاژ در میکروپمپ‌های بدون دریچه نوعاً به یک راه انداز مشخص نیاز دارد که سیستم را در یک وضعیت تناوبی متغیر با زمان راه اندازی می‌کند. این در حالی است که اکثر مطالعاتی که تاکنون بر روی میکروشیرهای تسلا انجام شده است، به‌سادگی پاسخ حالت پایا شیر را در نظر گرفتند. دلیلی که برای این امر در مطالعات قبلی ذکر شده است، پیچیدگی‌های تحلیل گذرا، کاهش

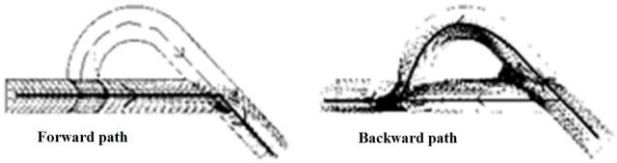


Fig. 1 The effect of difference between conjunction angles on the creation of diodicity property [1]

شکل 1 تاثیر تفاوت زوایای اتصال کانال در ایجاد خاصیت یکسوکنندگی [1]

هزینه های محاسباتی و روند مشابه نتایج مربوط به حالت دائم و غیر دائم می‌باشد.

در مطالعات [4-6] اثرات جریان غیردائم بر عملکرد میکروشیر نازل-دیفیوزری بررسی شده است. سان و هوانگ [4] رفتار گذرای میکروشیر دیفیوزری را در حالت سه‌بعدی بررسی کردند. اثر فرکانس تحریک و نیم‌زاویه دیفیوزر به عنوان دو پارامتر اصلی بر یکسوکنندگی شیر در نظر گرفته شدند. شرط مرزی فشار سینوسی وابسته به زمان با دامنه ثابت، در ورودی شیر و شرط مرزی فشار صفر در خروجی شیر اعمال شدند. وانگ و همکاران [5] به صورت عددی عملکرد یک میکروکانال دارای دیفیوزر با نیم‌زاویه 20 درجه را تحت هردو شرایط پایا و غیر پایا را در دوحالت دوبعدی و سه بعدی بررسی کردند و اثر ضریب منظری(نسبت عمق به عرض گلوگاه دیفیوزر) را نیز در نظر گرفتند. مشخص شد که نتایج برای ضریب منظری بزرگتر از 4 با نتایج حالت دوبعدی متناظر است. بعلاوه از تحلیل پایا دریافت شد که برای عدد رینولدز بزرگتر از 10 یکسوکنندگی بزرگتر از 1 خواهد بود و از تحلیل غیرپایا یک عدد استروهال بهینه 0.013 با بیشینه دبی خالص به دست آمد. همچنین رابطه خطی بین دامنه فشار راه‌انداز و دبی خالص بدست آمد. چانگ و همکاران [6] با تحلیل دینامیکی و سه بعدی یک میکروشیر جدید، اثر هندسه را روی دبی خالص در مقایسه با میکروشیر نازل-دیفیوزری بررسی کردند. رفتار جریان گذرا با اعمال یک تابع فشار سینوسی در مرز ورودی و فشار صفر در مرز خروجی در میکروشیر جدید با ساختارهای دندانه‌ای در زوایای مختلف بررسی شد. پارامترهای هندسی شامل نیم‌زاویه دیفیوزر، زاویه دندانه‌ها و فرکانس تحریک بودند. نتایج نشان داد که دبی به فرکانس تحریک وابسته است و میکروشیر جدید دبی بیشتری را می‌تواند تولید کند.

تامسون و همکاران [7] در سال 2014، اثرات استفاده از شیرهای تسلای چندگانه با شکل‌های یکسان و به صورت سری (شیر تسلای چندطبقه ای) را به صورت سه بعدی از نظر یکسوکنندگی در شرایط آرام را بررسی کردند. تعداد شیرهای تسلا تا حدود 20 عدد، فاصله شیر تا شیر تا حدود 3.375 برابر قطر هیدرولیکی و عدد رینولدز تا حدود 200 برای تعیین اثرات آن‌ها بر رو یکسوکنندگی شیر تسلای چندطبقه تغییر داده شد. نتایج نشان داد که یک شیر تسلای چندطبقه، یکسوکنندگی خیلی بیشتری از شیر تک طبقه ارائه می‌کند و اینکه این اختلاف با عدد رینولدز افزایش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفته شد که شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی به طور دقیق‌تری جریان درون شیر تسلا را در محدوه وسیع‌تری از اعداد رینولدز نسبت به شبیه‌سازی‌های دوبعدی، شبیه‌سازی می‌کنند.

دنایی و همکاران [8] در سال 2016 با تغییر طول‌های داخلی مینی‌والو تسلا (ابعاد از مرتبه میلی‌متر)، مینی‌والوی با کارایی بهتر ارائه کردند. شبیه‌سازی آن‌ها دوبعدی و پایا بود. نتایج آن‌ها نشان داد در حالتی که مسیر بای‌پس امتداد کانال ورودی را قطع کند، بیشترین کارایی بدست می‌آید.

ساتو و همکاران در سال [9] 2017 با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی دوهدفه با کمینه کردن افت فشار در جهت رفت و بیشینه کردن آن در جهت برگشت در حالت دائم طراحی بهینه‌ای برای والوهای فاقد اجزای متحرک نظیر والو تسلا پیشنهاد دادند و کارایی روش خود را با حل عددی نشان دادند.

در مطالعات قبلی نویسنده [2,1] شبیه‌سازی‌ها به صورت دوبعدی و دائم انجام شده بودند. با توجه به اینکه میکروپمپ‌های رفت و برگشتی در شرایط غیردائم کار می‌کنند، بررسی دقیق عملکرد میکرو والو تسلا به عنوان یکی از اجزای اصلی این نوع میکروپمپ‌ها، نیازمند شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

غیردائم می‌باشد که در مقاله حاضر برای اولین بار به آن پرداخته شده‌است و اثر فرکانس کاری بر عملکرد میکروالو تسلای دوطبقه مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا با اعمال شرایط مرزی متغیر با زمان که به حالت واقعی نزدیک تر است، عملکرد شیر با مبنا قرار دادن افت فشار تولیدی و نسبت یکسوکنندگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت پارامترهای عملکردی میکروشیر تسلا شامل افت فشار و پارامتر یکسوکنندگی در محدوده فرکانس‌های مختلف تحت اعمال تحریک سینوسی بررسی می‌شود.

2- فرمول‌بندی و معادلات حاکم

مشخصه مهمی که تعیین کننده توانایی شیر برای گذراندن جریان در مسیر پیشرو و جلوگیری از عبور جریان از مسیر برگشت می‌باشد نسبت یکسو کنندگی نام دارد که به صورت معادله (1) تعریف می‌شود [10]. انتظار می‌رود که یکسوکنندگی در شکل فشار بدون بعد، تابعی از عدد رینولدز باشد [11].

$$Di = \left(\frac{\Delta P_{\text{Backward}}}{\Delta P_{\text{Forward}}}\right)_Q \tag{1}$$

با توجه به ابعاد میکروشیر مورد بررسی می‌توان دریافت که اولا طول‌های مشخصه بسیار بزرگتر از پویش آزاد مولکول‌های آب هستند که گویای وجود شرایط پیوستگی در میکروکانال‌ها است و بنابراین می‌توان برای مدل‌سازی، معادلات ناویر-استوکس را به‌کار برد و شرایط مرزی عدم لغزش روی دیواره‌ها را نیز با اطمینان اعمال کرد. دوم اینکه که عدد رینولدز جریان در شرایط اختلاف فشار اعمالی در محدوده رژیم آرام می‌باشد (100<Re<400). فرض می‌شود که سیال آب و جریان تراکم ناپذیر و نیوتنی با خواص ثابت باشد. براساس این فرضیات و با صرف نظر از نیروهای حجمی معادله پیوستگی و سه بعدی مومنتوم در حالت غیردائم به ترتیب به شکل روابط (2) و (3) در خواهند آمد:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \tag{2}$$

$$\rho_f\left[\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_f\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{3}$$

3- روش حل عددی جریان در میکروشیر

شکل 2 هندسه میکروشیر مورد بررسی را نشان می‌دهد. عرض همه کانال‌های میکروشیر 120 میکرون، عمق آن 80 میکرون و عرض دهانه‌های ورودی و خروجی 960 میکرون می‌باشد. تمامی این مقادیر، مقادیری است که محمدزاده و همکاران [2] برای طراحی میکروشیر خود به کار بردند.

حل عددی معادلات حاکم به کمک نرم افزار فلوئنت 15 صورت می‌گیرد. این کد تجاری، مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی بوده و از روش حجم محدود استفاده می‌کند و شبکه‌های بی‌سازمان را نیز پشتیبانی می‌کند. از نرم افزار پیش پردازنده گمبیت 2.4 برای مدل‌سازی و تولید شبکه مورد نیاز حلگر استفاده می‌شود. مبنای گسسته‌سازی بر اساس فرمول بندی حجم محدود بوده و کوپلینگ به کار رفته در حل گذرا برای سرعت و فشار از نوع الگوریتم پیزو[1] (فشار ضمنی با تقسیم اپراتورها) می‌باشد. از طرح بالادستی مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و از روش ضمنی مرتبه دوم برای فرمول بندی گذرا استفاده می‌شود. همچنین از طرح تفاضل مرکزی برای گسسته‌سازی جملات دیفیوژن استفاده می‌شود. سیال کاری آب بوده و همانگونه که گفته شد یک محاسبه ساده شرایط رژیم آرام را در میکروکانال تایید می‌کند.

[1] PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)

در حل یک مسأله به طریق عددی می‌بایست پس از همگرایی حل، بررسی استقلال جواب بدست آمده از شبکه محاسباتی مورد استفاده مورد بررسی قرار گیرد. می‌توان از پارامتر یکسوکنندگی و افت فشار محاسبه شده در خروجی میکروشیر به عنوان پارامتر مناسب جهت مقایسه جواب در شبکه‌های مختلف استفاده کرد. به عنوان معیار همگرایی، لازم است که حلگر تکرارها را انجام دهد 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. توضیح بیشتر در رابطه با مطالعه شبکه و نتایج مربوط به آن در بخش بعدی ارائه خواهد شد.

به دلیل اهمیت اثرات گذرا در شیر که پیش‌تر به آن اشاره شد، جهت مطالعه سازوکار یکسوکنندگی از شبیه‌سازی‌های حالت ناپایا استفاده می‌شود. شرط مرزی عدم لغزش، روی تمامی دیواره‌ها فرض می‌شود. فرض می‌شود که فشار نسبی در خروجی همواره صفر است و جهت شبیه‌سازی شرایط غیردائمی که شیر آن را در ساختمان میکروپمپ تجربه می‌کند، از شرط مرزی سرعت نوسانی استفاده می‌شود. اگر سرعت متوسط حرکت توده در هر نیم سیکل، $\bar{V}$ باشد، برای مدل‌سازی حرکت رفت و برگشتی سیال در میکروشیر، از توابع سرعت هارمونیکی به صورت معادله (4)، به‌عنوان شرط مرزی استفاده می‌شود.

$$V(t) = \frac{\pi}{2}\times\bar{V}\times\sin(2\pi\times f\times t) \tag{4}$$

دامنه این تابع در هر فرکانس مقدار ثابتی فرض شده است، یعنی در مرز ورودی شیر، سرعت با مکان عرضی میکروکانال تغییر نمی‌کند.

حل مسأله برای مقادیر مختلف $\bar{V}$ متناظر با حل مسأله برای اعداد رینولدز مختلف است. عدد رینولدز براساس قطر هیدرولیکی میکروکانال توسط معادله (5) تعریف می‌شود که D و W عرض و عمق میکروکانال می‌باشند.

$$\text{Re} = \frac{\rho_f\bar{V}D_h}{\mu_f}, \qquad D_h = \frac{2WD}{W+D} \tag{5}$$

در هندسه مورد بررسی اعداد رینولدز مورد بررسی با توجه به مرجع [2]، تقریباً اعداد 52، 100، 152 و 213 می‌باشند که از D (عرض میکروکانال) در رابطه عدد رینولدز استفاده شده است. همانطور که مشخص است، قطر هیدرولیکی برای کانالی به قطر D در حالت دوبعدی (2-D) برابر $2D$ می‌باشد. در نتیجه جهت بیان دقیق‌تر عدد رینولدز، اعداد رینولدز فوق می‌بایست دو برابر شوند به عبارتی اعداد رینولدز جدید، 104، 200، 304 و 426 خواهند بود. جهت انجام محاسبات در حالت سه‌بعدی (3-D)، از همین اعداد رینولدز استفاده می‌شود. با برابر قرار دادن اعداد رینولدز در حالت 2-D و 3-D معادله (6) برای سرعت‌های اعمالی به‌عنوان شرط مرزی حاصل می‌شود.

$$\bar{V}_{3-\text{D}} = 1.0833\bar{V}_{2-\text{D}} \tag{6}$$

با توجه به مقادیر مختلف $\bar{V}$ در حالت 2-D (0.085، 0.165، 0.25 و 0.35 m/s) که از مرجع [2] استخراج شده است، مقادیر مختلف $\bar{V}$ در حالت3-D با توجه به معادله (6) به ترتیب عبارتند از (0.092، 0.179، 0.271 و 0.379 m/s). بنابراین مسأله در حالت سه‌بعدی با اعمال این $\bar{V}$ ها در معادله (4) به‌عنوان شرط مرزی حل خواهد شد. شایان ذکر است که از حل جریان پایا با ورودی $V_{\max}$– به‌عنوان شرط اولیه حل گذرا استفاده شده است که رابطه $V_{\max}$ برای تحریک سینوسی به صورت $\frac{\pi}{2}\bar{V}$ می‌باشد. لذا مقدار $V_{\max}$ برای اعداد رینولدز 104، 200، 304 و 426 به ترتیب برابر با 0.145، 0.281، 0.426 و 0.595 خواهد بود. پس از حل جریان پایا، شرط

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

مرزی به صورت معادله (7) اعمال می‌شود.

$$V(t) = V_{\max} \times \sin(2\pi \times f \times (\frac{\tau}{4} - t)) \quad (7)$$

براساس معادله (7) در فاصله صفر تا $\tau/4$، سرعت ورودی از مقدار بیشینه منفی (جریان در جهت برگشت) به سمت مقدار صفر تغییر کرده و باعث خروج سیال از ورودی می‌گردد. در فاصله $\tau/4$ تا $\tau/2$ سیال تغییر جهت داده و سرعت آن از صفر به مقدار بیشینه مثبت (جریان در جهت رفت) تغییر یافته است و در این حالت سیال وارد میکروشیر می‌گردد. در فاصله $\tau/2$ تا $3\tau/4$ سیال باز هم به مسیر قبلی خود ادامه می‌دهد تا سرعت آن به صفر برسد. از $3\tau/4$ تا τ سرعت سیال از صفر به مقدار بیشینه منفی تغییر می‌کند.

از متوسط زمانی یکسوکنندگی در میکروشیر می‌توان به‌عنوان معیارهایی جهت تعیین گام زمانی بهینه استفاده کرد. با توجه به مطالعات انجام شده، برای محاسبه متوسط زمانی یکسوکنندگی ($\overline{Di}$)، می‌بایست جریان در میکروشیر به شرایط شبه پایا همگرا شود، به عبارتی انتگرال منحنی دبی، فشار و سایر متغیرهای جریان بر حسب زمان در ورودی و خروجی شیر تغییر نکند. در نهایت $\overline{Di}$ با استفاده از آخرین سیکل، با تقسیم متوسط زمانی افت فشار کل در جریان برگشت (وقتی $v(t)<0$) بر متوسط زمانی افت فشار کل در جریان رفت (وقتی که $v(t)>0$) مطابق معادله (8) محاسبه می‌شود.

$$\overline{Di} = \left(\frac{\overline{\Delta P}_{\text{Backward}}}{\overline{\Delta P}_{\text{Forward}}}\right)_Q \quad (8)$$

الگوریتم حل غیردائم جریان در میکروواالو تسلا به طور خلاصه در شکل 2 نشان داده شده است.

4- مطالعه شبکه محاسباتی

با حل مسأله در حالت پایا برای بحرانی‌ترین حالت، یعنی سرعت بیشینه مثبت (حالت رفت) و سرعت بیشینه منفی (حالت برگشت) در ورودی شیر استقلال جواب از شبکه محاسباتی بررسی می‌شود. شبکه به دست آمده برای حل گذرا (ورودی نوسانی در شیر) نیز مناسب خواهد بود. از افت فشارهای

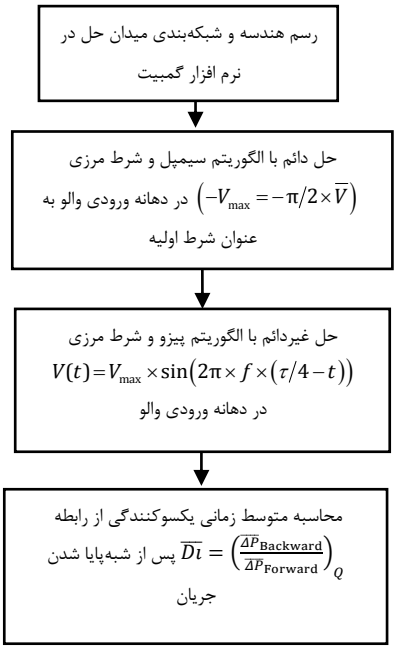


Fig. 2 The solution algorithm of unsteady flow in Tesla microvalve

شکل 2 الگوریتم حل جریان غیردائم در میکروواالو تسلا

محاسبه شده در دو جهت رفت و برگشت برای شرایط پایا، به‌عنوان پارامتر مناسب جهت مقایسه جواب در شبکه‌های مختلف استفاده می‌شود. این بررسی در بحرانی‌ترین شرایط مرزی ممکن (بیشترین عدد رینولدز یعنی 426) انجام می‌شود. در مقایسه حل شبکه درشت با شبکه ظریف‌تر خطای کم‌تر از 5% مقدار قابل قبولی فرض شده است. به‌طور قطع شبکه به دست آمده برای سایر حالات مورد بررسی (سایر اعداد رینولدز) نیز معتبر خواهد بود.

تصحیح شبکه با افزایش چگالی شبکه در مناطقی که گرادیان‌های سرعت و فشار بزرگ هستند و با کاهش چگالی مش در مناطق غیرحساس صورت گرفته است. علاوه بر این روش مش‌بندی، از وفق سازی شبکه[1] توسط خود حلگر در مناطق با گرادیان‌های شدید سرعت و فشار استفاده گردیده است. برای حل پایای میدان جریان در شرایط ورودی شیر با سرعت بیشینه ثابت، به‌عنوان شرط اولیه حل گذرا، از الگوریتم سیمپل و برای حل گذرا از الگوریتم پیزو (فشار ضمنی با تقسیم اپراتورها) برای اتصال سرعت-فشار استفاده شده است. برای اطمینان از همگرایی از تغییر ضرایب زیر تخفیف در طول حل بین 0.3 تا 1 استفاده شد. مقادیر باقیمانده برای معادلات ممنتم و پیوستگی برابر با 10^{-4} در نظر گرفته شده است.

شکل 3 مش بندی اولیه انجام شده را به همراه شرایط مرزی اعمال شده، جهت شبیه‌سازی سه بعدی جریان در میکروشیر نشان می‌دهد. عمق میکروشیر 80 µm در نظر گرفته شد. با فرض متقارن بودن جریان نسبت به صفحه مرکزی میکروشیر، عمق شبکه محاسباتی 40 µm در نظر گرفته شد و از شرط مرزی تقارن استفاده گردید. در شروع از مش‌های مختلفی برای تعیین اندازه شبکه بهینه و اطمینان از حل‌های مستقل از شبکه استفاده شد. هفت شبکه مختلف با اندازه‌های 45460، 61448، 81020، 108131، 144958، 161135، 254837 و 340468 مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه شبکه از طریق تعداد سلول‌های موجود در شبکه تعیین شد. از طریق محاسبه افت فشار کل در طول میکروشیر، از حل مستقل از شبکه اطمینان حاصل شد. افت فشار کل برابر با اختلاف فشار ورودی و خروجی میکروشیر می‌باشد.

شکل 4 افت فشار کل در طول میکروشیر را در دو جهت رفت و برگشت برای شبکه‌های مختلف روی یک نمودار، نشان می‌دهد. چون جریان رفت افت فشار کمتری را نسبت به جریان برگشت تجربه می‌کند، ابتدا جریان رفت و سپس جریان برگشت مطالعه می‌شوند و بنابراین، شبکه ریز به دست آمده

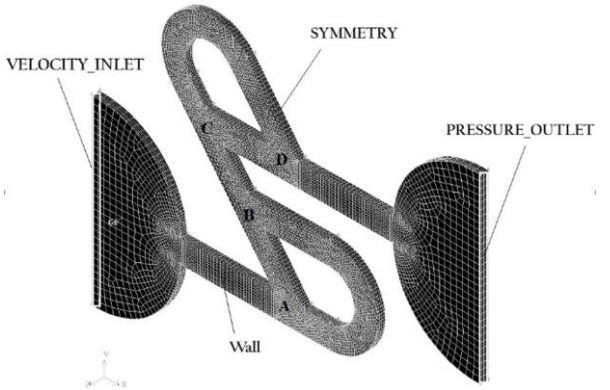


Fig. 3 3D Geometry and grid of Tesla microvalve and the naming of conjunctions

شکل 3 هندسه و مش‌بندی سه بعدی میکروشیر تسلای مورد بررسی و نام‌گذاری محل‌های اتصال کانال‌ها

[1] Grid adaptation

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

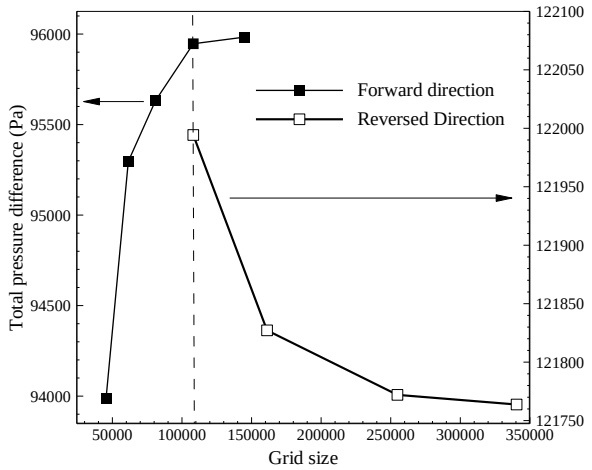


Fig. 4 Total pressure drop of forward and backward flow at various grids

شکل 4 افت فشار کل جریان رفت و برگشت برای شبکه‌های مختلف

برای حالت رفت به‌عنوان شبکه درشت برای حالت برگشت مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبکه یکسان در دو حالت، 108131 سلول دارد و با یک خط چین نمایش داده شده است. با توجه به نزدیکی نتایج برای دو شبکه آخر، در نهایت از شبکه با تعدادسلول 254837 جهت انجام محاسبات غیردائم استفاده می‌شود.

5- مطالعه گام زمانی

از متوسط زمانی یکسوکنندگی در میکروشیر (معادله (8))، به‌عنوان معیاری جهت تعیین گام زمانی بهینه استفاده می‌شود. اندازه گام زمانی بهینه در شرایط کاری مختلف میکروشیر، به عبارتی فرکانس‌های کاری مختلف تغییر می‌کند، چون عدد رینولدز در شرایط کاری مختلف متفاوت است. گام زمانی بهینه می‌بایست به گونه ای باشد که هنگام همراه شدن با فرکانس تحریک، با تغییرات کوچک در جابجایی سیال معادله داشته باشد (در واقع گام زمانی می‌بایست ضریبی از دوره تناوب باشد) به طوریکه هر تغییر متناظر در میدان جریان بتواند ذکر شود. بررسی استقلال جواب از گام زمانی، در بیشترین فرکانس مورد بررسی که منجر به کمترین پریود زمانی و در نتیجه کوچک‌ترین گام زمانی می‌شود، تعیین می‌گردد تا در سایر فرکانس‌ها بتوان با اطمینان از این گام زمانی استفاده کرد. گام‌های زمانی 0.005، 0.01، 0.02، 0.04 و 0.08 برابر پریود زمانی سرعت نوسانی در ورودی میکروشیر مورد بررسی قرار گرفتند. عملکرد میکروشیر بعد از حدود سه الی چهار سیکل به شرایط کارکرد پایدار (شرایط شبه پایا) می‌رسد و متغیرهای سیال به مقادیر ثابتی رسیده و اغتشاش‌های ناشی از شرایط اولیه به طور کامل از پاسخ عددی حذف می‌شود.

شکل 5 مقدار متوسط زمانی یکسوکنندگی را در هر سیکل برای گام‌های زمانی مختلف تحت تحریک هارمونیکی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود اندازه پارامتر یکسوکنندگی برای گام‌های زمانی 0.005τ، 0.01τ و 0.02τ یکسان شده است. اختلاف یکسوکنندگی در دو گام زمانی 0.01τ و 0.02τ حدود 7.4 درصد و اختلاف یکسوکنندگی در دو گام زمانی 0.005τ و 0.01τ حدود 5.7 درصد می‌باشد. بنابراین برای دقت بیشتر، گام زمانی 0.01τ مورد استفاده قرار گرفت. این گام زمانی به اندازه کافی کوچک است که تمام تغییرات در میدان جریان را در طول حل نمایش دهد و از طرفی به اندازه کافی بزرگ است که زمان محاسباتی قابل قبولی را به دست دهد.

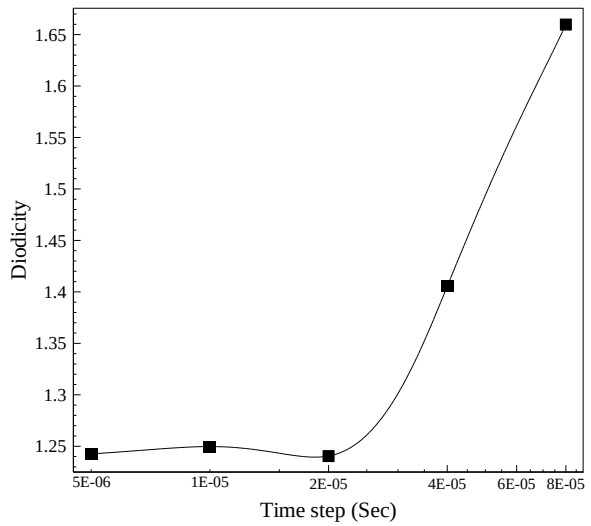


Fig. 5. Change of the diodicity parameter in terms of time step at a frequency of 1000Hz

شکل 5 تغییر پارامتر یکسوکنندگی میکروشیر برحسب گام زمانی در فرکانس 1000Hz

6- نتایج

اعتبارسنجی روند شبیه‌سازی در شبیه‌سازی دوبعدی قبلی نویسندگان [1,2] آمده است. برای اعتبارسنجی، میکروالو تسلای تک‌طبقه با همین هندسه بررسی شد و نمودار یکسوکنندگی بر حسب افت فشار نامی با کار عددی کلاهدوز [3] مقایسه گردید که از تطابق خوبی برخوردار بود.

6-1- مقایسه شبیه‌سازی دائم دوبعدی و سه بعدی

در این بخش با استفاده حل پایای جریان در دو جهت رفت و برگشت، پارامتر یکسوکنندگی براساس معادله 1 محاسبه می‌شود. منحنی پارامتر یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز در شکل 6 در مقایسه با حل دوبعدی [2] ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در هردو منحنی با افزایش عدد رینولدز، یکسوکنندگی افزایش می‌یابد ولی نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه‌بعدی در تمام محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی مقدار پارامتر یکسوکنندگی کمتری را به نمایش می‌گذارد. این موضوع که حل دوبعدی یکسوکنندگی را بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند توسط محققان بسیاری بیان شده است [13-10,7] ولی در نهایت برای بهینه‌سازی والو تسلا از شبیه‌سازی‌ها دوبعدی کمک گرفته شده‌است. در حالت سه بعدی به دلیل وجود دیواره در راستای عمق، اصطکاک و افت فشار بیشتری نسبت به حالت دو بعدی که از این افت فشار صرف نظر می‌شود، به خصوص در جهت برگشت، وجود دارد. چون در این مقاله هدف بررسی دقیق‌تر عملکرد میکروشیر تسلا می‌باشد، با توجه به تفاوت کمی نتایج شبیه‌سازی های دو بعدی و سه بعدی، می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل نتایج دو بعدی برای بررسی کافی نیست و نیاز به شبیه‌سازی‌های سه بعدی می‌باشد. لذا در این تحقیق تمام شبیه‌سازی‌های جریان در میکروشیرها به صورت سه بعدی و البته غیردائم انجام شده است.

6-2- میدان‌های سرعت و فشار

در این بخش نتایج مربوط به فرکانس 1000Hz و عدد رینولدز 426 ارائه می‌شود. نتایج شامل کانتورهای سرعت، بردارهای سرعت و نیز کانتورهای فشار در زمان‌های مختلف عملکرد میکروشیر تسلای مورد بررسی می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

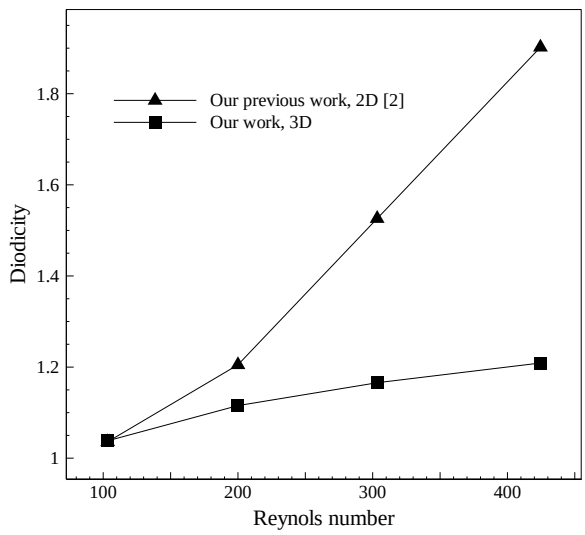


Fig. 6. Diodicity as Reynolds number in steady 2D and 3D simulations

شکل 6 نمودار یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز در شبیه‌سازی دائم دوبعدی و سه‌بعدی

نتایج برای چهار زمان کلیدی (ابتدای سیکل، یک چهارم سیکل، نیمه سیکل، سه چهارم سیکل) ارائه می‌شود. جهت دستیابی به این نتایج، از گام زمانی 0.01τ استفاده شده است. در نتیجه برای حالت مذکور، همانگونه که در شکل 7 نشان داده شده است، نتایج در زمان‌های 0.00275, 0.0025, 0.00225, 0.002 ثانیه گزارش می‌شود. با توجه به کارکرد شبه پایا میکروشیر و رفتار تکرارپذیر آن در طی سیکل‌های مختلف، بدیهی است که رفتار جریان در انتهای هر سیکل مشابه ابتدای آن سیکل می‌باشد. نتایج مربوط به سایر اعداد رینولدز و همچنین سایر فرکانس‌ها مشابه همین حالت بوده و تنها تفاوت در مقدار پارامترهای جریان می‌باشد. لذا از ذکر آنها خودداری می‌شود. شایان ذکر است که تامسون و همکاران [7] در حل سه‌بعدی خود به این کانتورها تنها در جهت‌های رفت و برگشت اشاره کرده بودند و تغییرات زمانی این کانتورها در مطالعه آن‌ها بررسی نشده بود.

کانتورهای سرعت در شکل 8 نشان داده شده است. برای جریان‌های رفت و برگشت، جدایش جریان و جت‌های آرام در محل تقاطع کانال‌ها و

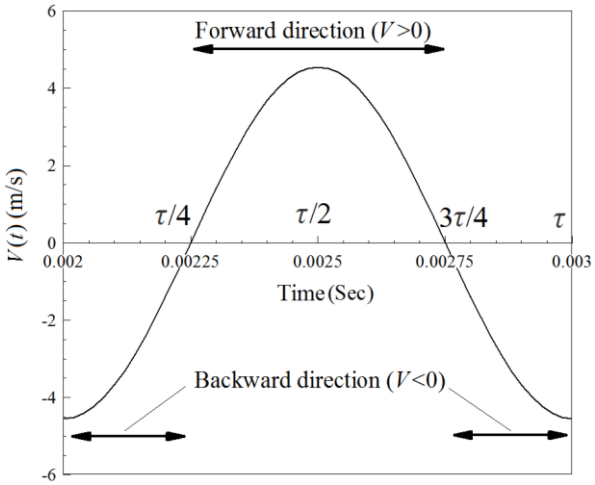


Fig. 7. Key times in the unsteady function of microvalve for a frequency of 1000Hz and Reynolds number 426

شکل 7 زمان‌های کلیدی در عملکرد غیر دائم میکروشیر برای فرکانس 1000Hz و عدد رینولدز 426

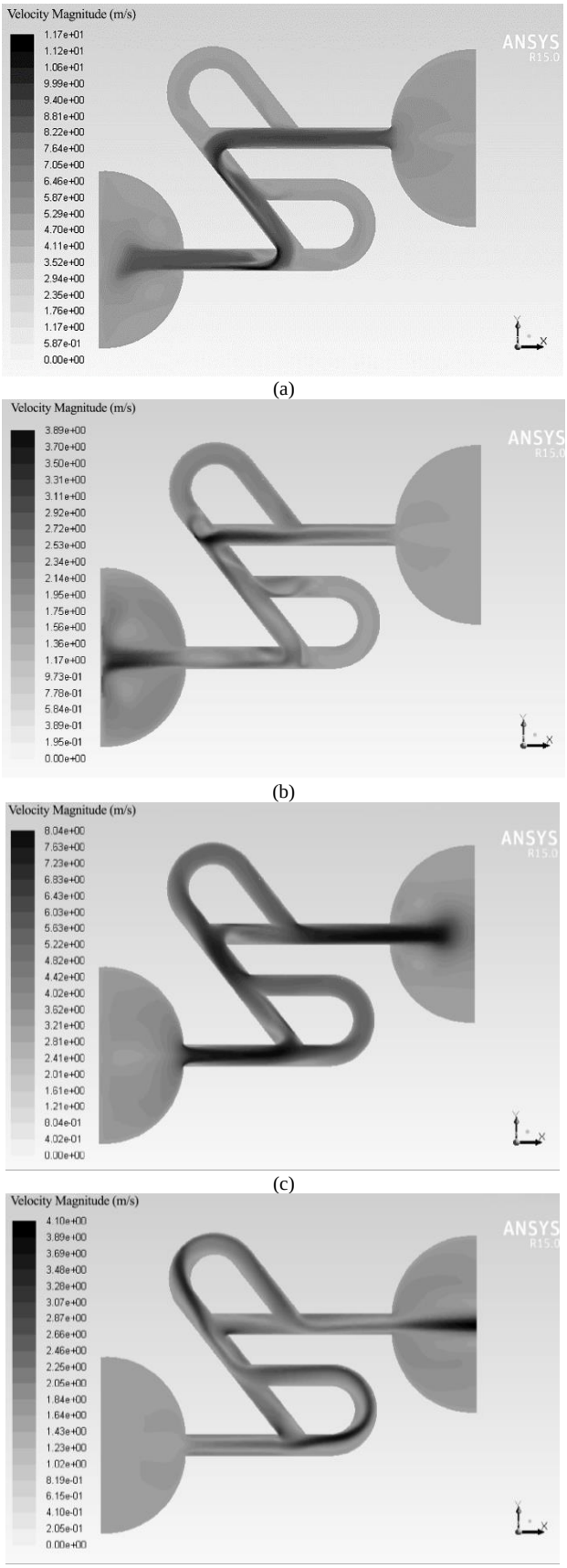


Fig. 8. Velocity contours at Re=426 and *f*=1000Hz at different times: a) *t*=0.002s, b) *t*=0.00225s, c) *t*=0.0025s, d) *t*=0.00275s

شکل 8 کانتورهای سرعت در Re=426 و *f*=1000Hz در زمان‌های مختلف: a) *t*=0.002s، b) *t*=0.00225s، c) *t*=0.0025s، d) *t*=0.00275s

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

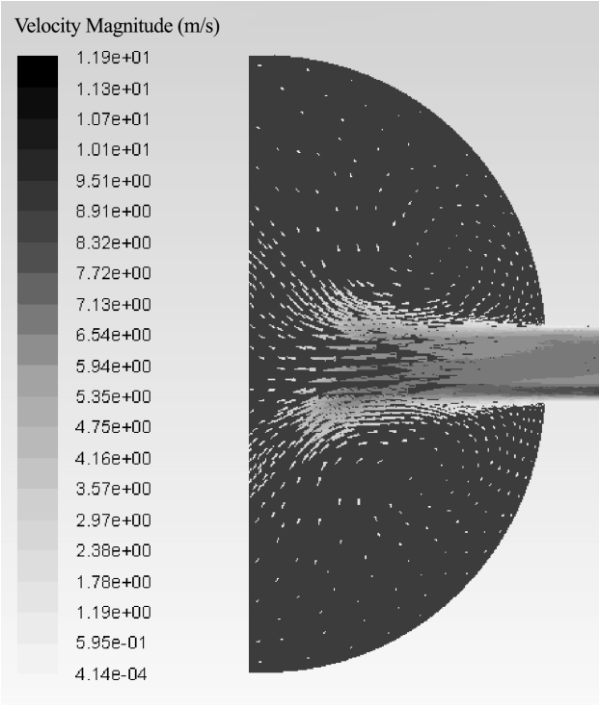
خروجی شیر اتفاق می‌افتد. این شکل‌ها بیان می‌کنند که با گذشت زمان و تغییر مقدار و جهت سرعت در ورودی شیر، بقیه میدان جریان درون میکروشیر نیز تحت تأثیر قرار گرفته و مقادیر سرعت در شیر تغییر می‌کند. خروج سیال به صورت جت در دو حالت a و c که به ترتیب مربوط به جریان برگشت و جریان رفت در شرایط حداکثر سرعت می‌باشند، مشهود می‌باشد. شکل واضح‌تر این جت‌ها در شکل 9 توسط بردارهای سرعت نشان داده شده است. همچنین، شکل سه‌بعدی بردارهای سرعت در لحظه t=0.002s و t=0.0025s در شکل 10 آمده است. در این شکل، مسیری که سیال در دو جهت رفت و برگشت طی می‌کند، قابل تشخیص است. در شکل 10-a که مسیر برگشت را نشان می‌دهد، سیال با برخورد شدید به دیواره های و تغییر مسیرهای ناگهانی افت فشار زیادی را تجربه می‌کند، در حالی که در شکل 10-b که مسیر رفت را نشان می‌دهد بخشی از سیال از مسیر بای‌پس عبور کرده و به این ترتیب متحمل افت فشار کمتری می‌شود.

برای شناسایی محل اتصال کانال‌های میکروشیر، این محل‌ها مطابق شکل 3 نام‌گذاری شده‌اند. بردارهای سرعت در محل‌های اتصال برای حالت رفت در حداکثر سرعت ممکن (زمان t=0.0025s) در شکل 11 نشان داده شده است. در این شکل‌ها حرکت عمده جریان در مسیر اصلی و تشکیل جت و ناحیه چرخشی در مسیرهای فرعی هنگام رسیدن به محل‌های تقاطع و نیز انحراف جریان اصلی هنگام اتصال دو جریان قابل مشاهده است. همانگونه که ذکر شد، عدم برخورد مستقیم سیال به دیواره در حالت رفت مانع افت فشار زیاد می‌شود. در شکل 11 در محل تقاطع‌های A و C ناحیه گردابه‌ای تشکیل می‌گردد. برای حذف این نواحی گردابه‌ای می‌توان زاویه محل تقاطع را تغییر داد ولی کارایی والو کاهش می‌یابد [8].

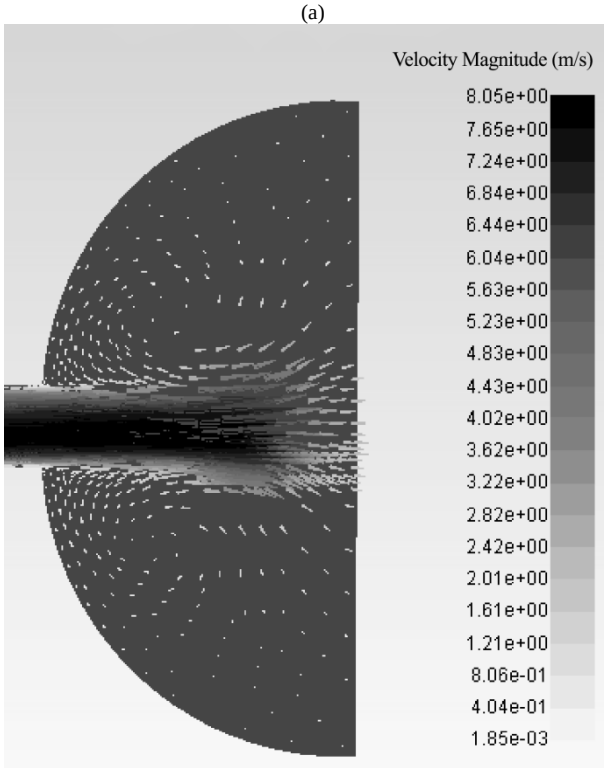
بردارهای سرعت در محل اتصال کانال‌ها برای حالت برگشت در حداکثر سرعت ممکن (زمان t=0.002s) در شکل 12 نشان داده شده است. آنچه در این شکل‌ها مشهود است، برخورد مستقیم سیال به دیواره‌ها در محل‌های A و C و تغییر مسیر ناگهانی آن است که در حالت برگشت، موجب افت فشار شدید می‌شود. در این حالت نیز تشکیل جت در کانال فرعی، جدایش جت در کانال‌های اصلی و نیز تشکیل ناحیه چرخشی در محل‌های A و C قابل مشاهده است.

کانتورهای فشار کل در شکل 13 نشان داده شده است. این شکل ها بیان می‌کنند که با تغییر مقدار و جهت سرعت در ورودی شیر با گذشت زمان، بقیه میدان جریان نیز تحت تأثیر قرار گرفته و مقادیر فشار در شیر تغییر می‌کند. کاهش فشار در جهت جریان در این شکل‌ها قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که افت فشار کل در جهت برگشت (زمان t=0.002s) نسبت به افت فشار کل در جهت رفت (زمان t=0.0025s) بیشتر بوده که منجر به ایجاد خاصیت یکسوکنندگی شیر می‌شود. میدان فشار جریان برگشت شکل 13-a نشان دهنده‌ی یک افت فشار بزرگ دقیقا بعد از تقاطع Y یا همان محل‌های C و A می‌باشد که چنین افت فشاری در جریان رفت مشاهده نمی‌شود. این افت فشار در حل غیر هم‌دما موجب افت دمای بیشتر سیال در جهت برگشت می‌شود [14].

شکل 14 الگوهای جریان را درون میکروشیر در صفحه میانی میکروشیر (صفحه تقارن) نشان می‌دهد که در سایر مطالعات مربوط به شبیه‌سازی جریان در میکروشیر تسلابه آن اشاره‌ای نشده است. کانتور نشان داده شده در زمینه این شکل‌ها مربوط به مؤلفه افقی سرعت است. در تمامی شکل‌ها در محل‌های تقاطع یک سری گردابه در اثر جدایش جریان ایجاد شده است. مشاهده می‌شود که در دو حالت a و b، دو گردابه بزرگ که خلاف جهت هم می‌چرخند، در محل ورودی شیر ایجاد شده است که در حالت ب یعنی لحظه ای که سیال در حال تغییر جهت است، این گردابه‌ها به سمت دهانه ورودی نزدیک‌تر هستند. همچنین، مشاهده می‌شود که جریان در خروجی هنوز به طرف چپ است و اثر تغییر جهت سرعت در ورودی شیر هنوز به بالادست جریان (خروجی شیر) منتقل نشده است مشاهده می‌شود که از شدت



(a)

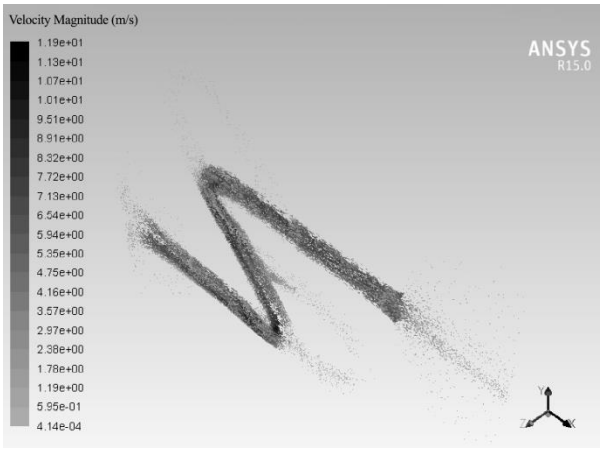


(b)

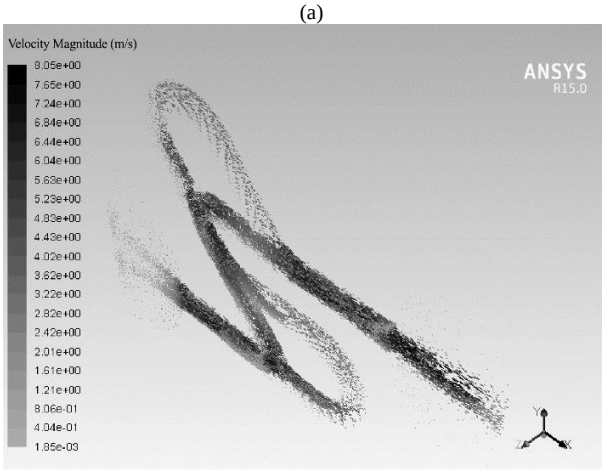
Fig. 9. Velocity vectors at the valve output at Re=426 and f=1000Hz at different times: a) the Backward (t=0.002s), b) Forward (t =0.0025s)

شکل 9 بردارهای سرعت در خروجی شیر در Re=426 و f=1000Hz در زمان‌های مختلف: a) برگشت(t=0.002s)، b) رفت (t=0.0025s)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]



(a)



(b)

Fig. 10. Three-dimensional velocity vectors at Re=426 and f =1000Hz at different times: a) backward (t=0.002s), b) forward (t=0.0025s)

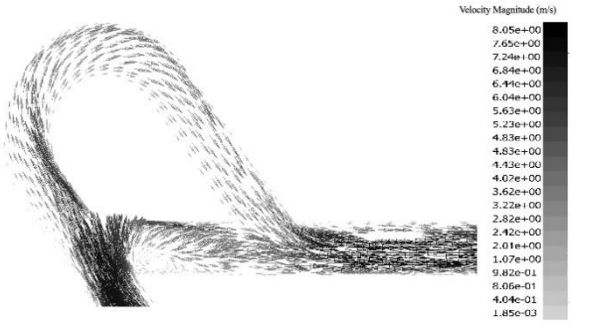
شکل 10 بردارهای سرعت سه‌بعدی در Re=426 و f=1000Hz در زمان‌های مختلف: a) برگشت(t=0.002s)، b) رفت (t=0.0025s)

گردابه‌های قبل تقاطع‌ها نیز با کاهش سرعت در ورودی کاسته شده است. شکل‌گیری دو گردابه کوچک در خروجی در لحظه t=0.00225s قابل مشاهده است. در دو حالت c و d نیز در خروجی شیر، می‌توان جریان‌های برگشتی را مشاهده کرد. شکل 14-d نیز کاهش شدت گردابه های قبل تقاطع‌ها را به علت کاهش سرعت در ورودی شیر نشان می‌دهد. جهت بردارهای سرعت در خروجی شیر در این لحظه بیانگر این مطلب است که اثر تغییر جهت بردارهای سرعت در ورودی، هنوز به خروجی شیر نرسیده است. شکل‌گیری دو گردابه کوچک در ورودی شیر در این لحظه قابل رؤیت است که با افزایش سرعت و رسیدن به حالت الف شدت خواهند گرفت.

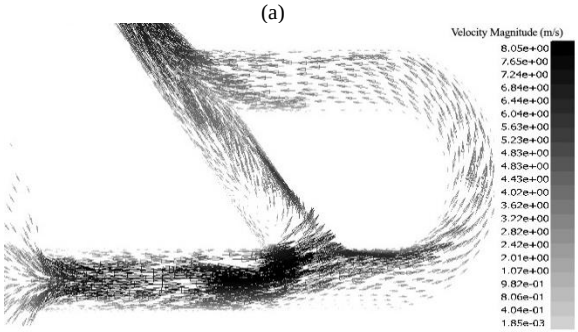
می‌توان پیش‌بینی کرد که با کاهش مقدار فرکانس تحریک و همچنین عدد رینولدز، با توجه به تغییر مومنتوم سیال و در نتیجه خاصیت اینرسیایی آن، از اندازه‌ی گردابه های تولیدی درون میکروشیر نیز کاسته شود. انتظار می‌رود که اندازه‌ی این گردابه ها بر خاصیت یکسوکنندگی شیر تأثیر بگذارد. کلاهدوز و همکاران [15] اثر فرکانس اعمالی را بر ساختار جریان درون یک میکروپمپ پیزوالکتریک با میکروشیرهای نازل-دیفیوزری بررسی کردند و نشان دادند با افزایش فرکانس، توانایی پمپاژ میکروپمپ بهبود می‌یابد.

3-6- نتایج مربوط به فرکانس‌های مختلف

با حل جریان سه‌بعدی و ناپایا در میکروشیر تسلا در اعداد رینولدز مختلف و همچنین در فرکانس‌های مختلف، پارامتر یکسوکنندگی قابل استخراج است. تغییرات پارامتر یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز تحت اعمال فرکانس‌های مختلف در شکل 15 قابل مشاهده است.



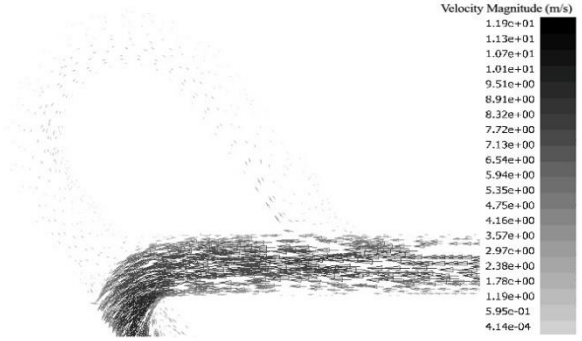
(a)



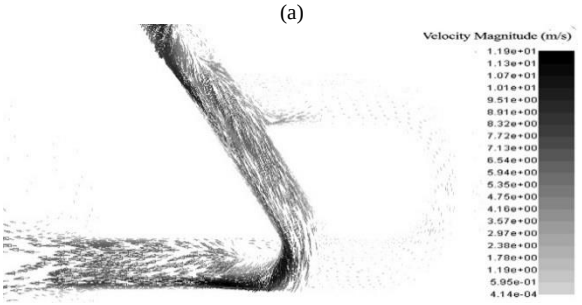
(b)

Fig. 11. The velocity vectors at the conjunctions at Re=426 and f=1000Hz in the transition state (t=0.0025 s): a) location C and D, b) location A and B

شکل 11 بردارهای سرعت در محل‌های اتصال در Re=426 و f=1000Hz در حالت رفت (t=0.0025s): a) محل C و D، b) محل A و B



(a)



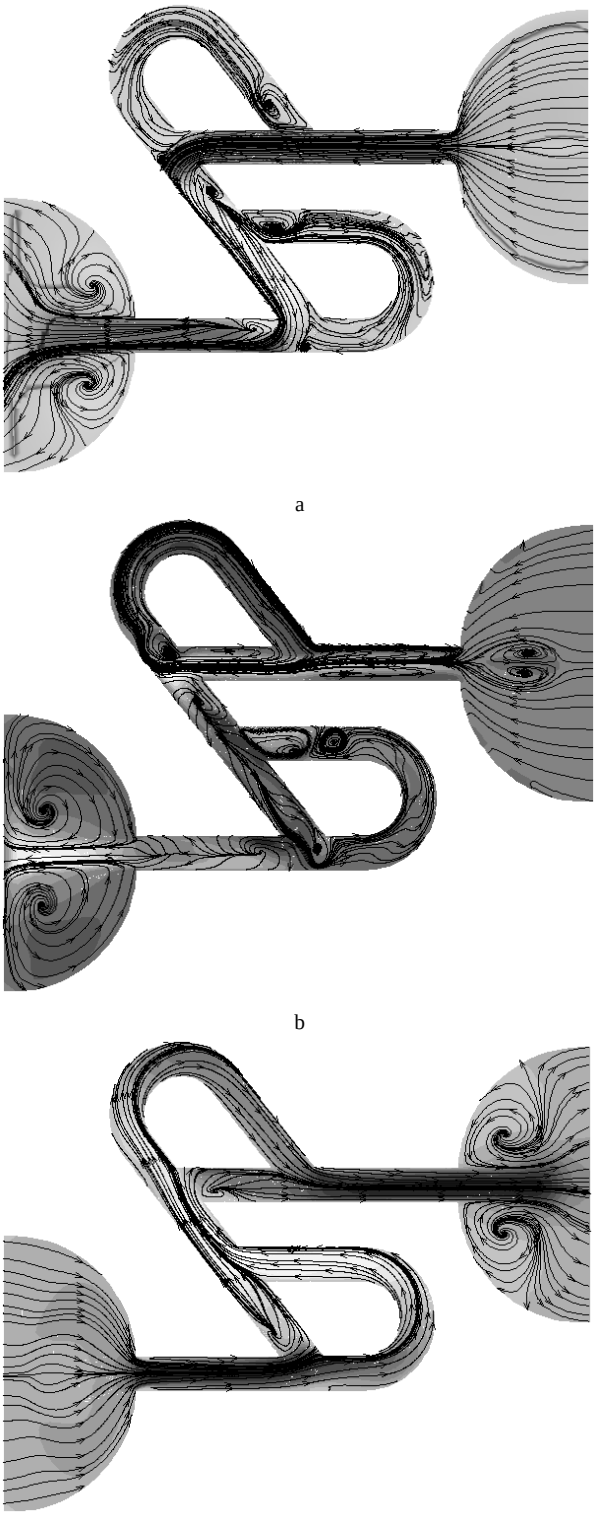
(b)

Fig. 12. The velocity vectors at the conjunctions at Re=426 and f=1000Hz in backward mode (t=0.002s): a) location C and D, b) location A and B

شکل 12 بردارهای سرعت در محل‌های اتصال در Re=426 و f=1000Hz در حالت برگشت (t=0.002s): a) محل C و D ، b) محل A و B

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

همان‌گونه که در شکل 15 مشاهده می‌شود با افـزایش عـدد رینولـدز، مقـدار یکسوکنندگی در تمام فرکانس‌ها افزایش یافته است. برای یک عـدد رینولـدز مشخص، با افزایش فرکانس، یکسوکنندگی افزایش اندکی داشته است که این افزایش در فرکانس‌های بالاتر مشهودتر می‌باشد. افت فشار در میکروالو ناشی از اتلافات ویسکوز و اتلافات دینامیکی یـا اینرسـیایی اسـت. در مسـیر رفـت، اتلافات ویسکوز و در مسیر برگشت اتلافات اینرسیایی غالب هستند [10]. بـا افزایش فرکانس تلفات اینرسیایی نسبت به تلفات ویسکوز شدت می‌گیرد کـه



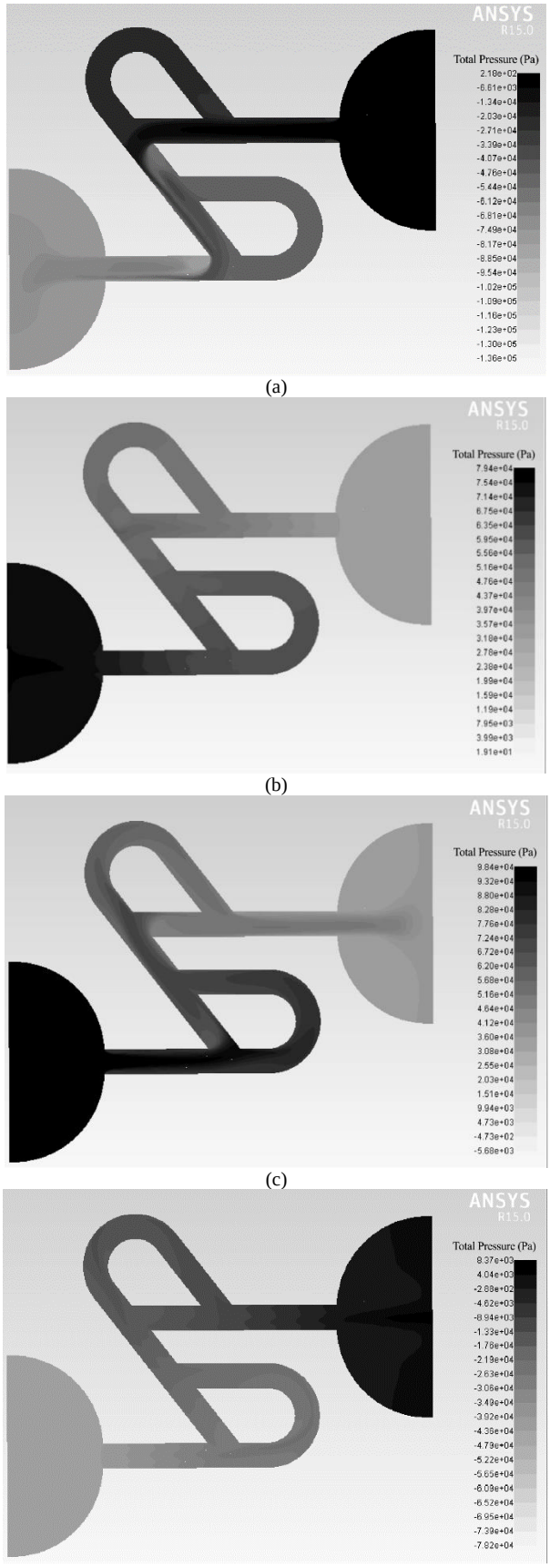
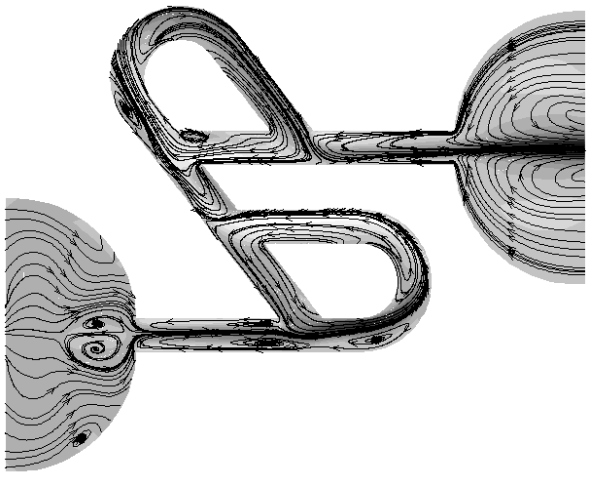


Fig. 13. Pressure contours at Re = 425 and *f*=1000Hz at different times: a) *t*=0.002s, b) *t*=0.00225s, c) *t*=0.0025s, d)*t*=0.00275s

شکل 13 کانتورهای فشار در Re=425 و *f*=1000Hz در زمان‌های مختلف: a) *t*=0.002s، b) *t*=0.00225s، c) *t*=0.0025s، d) *t*=0.00275s

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]



d

Fig. 14 Streamlines at Re=425 and *f*=1000Hz at different times: a) *t*=0.002s, b) *t*=0.00225s, c) *t*=0.0025s, and d) *t*= 0.00275s

شکل 14 خطوط جریان در Re=425 و *f*=1000Hz در زمان‌های مختلف: الف) *t*=0.002s، ب) *t*=0.00225s، ج) *t*=0.0025s و د) *t*=0.00275s

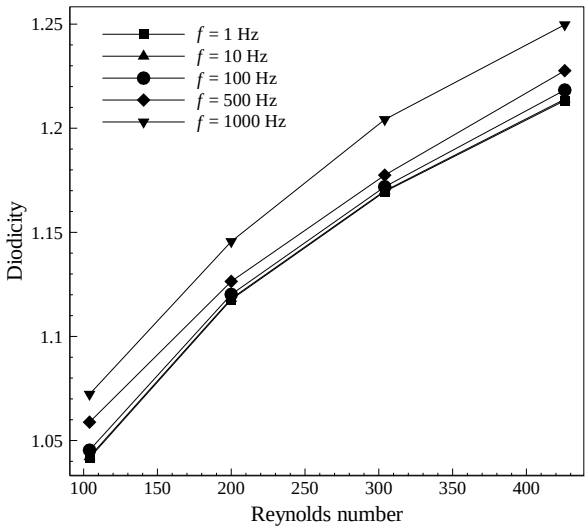


Fig. 15. Diodicity as Reynolds number at different frequencies

شکل 15 تغییرات یکسوکنندگی بر حسب عدد رینولدز در فرکانس‌های مختلف

در مسیر برگشت به دلیل برخورد جتهای سیال به دیواره‌ها یا اختلاط دو جت سیال و جدایش جریان مقدار این تلفات بیشتر است و در نتیجه یکسوکنندگی والو افزایش می‌یابد. این تغییرات اهمیت شبیه‌سازی غیردائم را نشان می‌دهد که با شبیه‌سازی‌های دائم قابل مشاهده نیست.

برای مشاهده بهتر اثر فرکانس تحریک بر عملکرد گذرای میکروشیر تسلای مورد بررسی، در شکل 16 تغییرات یکسوکنندگی بر حسب فرکانس تحریک در اعداد رینولدز مختلف ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های پایین ($f < 100$Hz) یکسوکنندگی میکروشیر برای تمامی اعداد رینولدز، تقریباً مستقل از مقدار فرکانس تحریک بوده و در فرکانس‌های بالا ($f > 100$Hz) مقدار آن با افزایش فرکانس تحریک افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به کمتر بودن تلفات اینرسیایی در فرکانس‌های پایین نسبت داد. در این نمودار نیز مشاهده می‌شود که در یک فرکانس تحریک مشخص با افزایش عدد رینولدز، مقدار یکسوکنندگی میکروشیر افزایش می‌یابد.

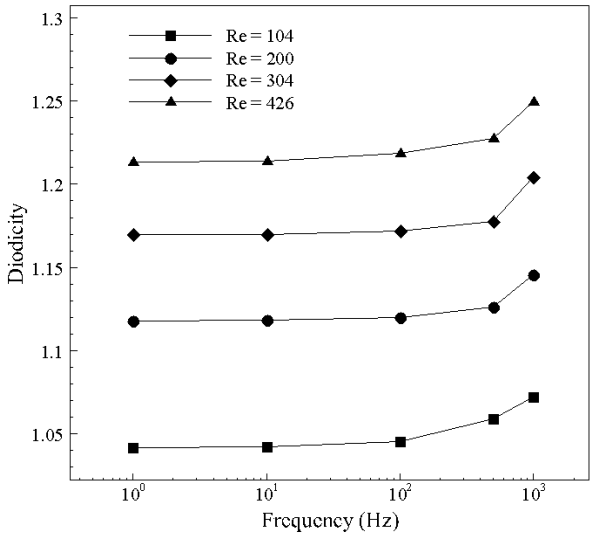


Fig. 16. Diodicity as actuation frequency in different Reynolds numbers

شکل 16 تغییرات یکسوکنندگی بر حسب فرکانس تحریک در اعداد رینولدز مختلف

4-6- مقایسه شبیه‌سازی های دائم و غیر دائم

در شکل 17 نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی و غیر دائم با نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی و دائم مقایسه شده است. برای حالت غیر دائم نتایج مربوط به تمامی فرکانس‌ها آورده شده است. حداکثر اختلاف نتایج حدود 3.27% و مربوط به فرکانس 1000Hz و عدد رینولدز 426 می‌باشد. حداکثر اختلاف نتایج حل دائم با فرکانس‌های 1Hz، 10Hz، 100Hz و 500Hz، به ترتیب حدود 0.36%، 0.42%، 0.78% و 1.95% است. لذا این‌گونه می‌توان نتیجه گرفت که اثرات گذرا در فرکانس‌های پایین ($f < 100$Hz) دارای اهمیت کمتری است و در فرکانس‌های بالا ($f > 100$Hz) بی‌اهمیت نیست. مشاهده می‌شود که روند تغییرات در دو حالت دائم و غیردائم مشابه هم بوده و شبیه‌سازی دائم، مقدار یکسوکنندگی کمتری را به دست داده است. این مقایسه اهمیت شبیه‌سازی های گذرا را آشکار می‌کند. این موضوع با نتایج مرجع [2] که از حل دوبعدی استفاده کرده بود، هم‌خوانی کیفی دارد. اما تنها روند نمودارها مشابه است و برای بررسی کمی نیاز به استفاده از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی می‌باشد.

برای درک بهتر اثرات گذرا بر عملکرد میکروشیر در حالت سه بعدی، نتایج به دست‌آمده شامل متوسط زمانی افت فشار کل در دو جهت رفت و برگشت برای شبیه‌سازی غیردائم (فرکانس 1000Hz) و نیز افت فشار کل در دو جهت رفت و برگشت برای شبیه‌سازی دائم، در جدول 1 گزارش شده است. همانگونه که انتظار می‌رود در پاسخ هر دو حالت، افت فشار کل در جهت برگشت از متناظر آن در جهت رفت بزرگتر می‌باشد که همین امر موجب عملکرد شیر در یک سیکل رفت و برگشت آن می‌شود. همانطور که می‌توان دید، افت فشار کل در پاسخ حالت غیردائم میکروشیردر هر دو جهت رفت و برگشت از پاسخ حالت دائم بیشتر است. این نتایج با نتایج مرجع [2] تطابق کیفی دارد. اما از نظر کمی، نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی انجام‌شده در این تحقیق قابل اعتمادتر می‌باشد.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد میکروشیر تسلا به عنوان یک نمونه شیر فاقد اجزای متحرک تحت شرایط شبه واقعی یعنی جریان سه‌بعدی و غیردائم به صورت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

جدول 1 افت فشار کل در دو جهت رفت و برگشت و پارامتر یکسوکنندگی برای شبیه‌سازی‌های دائم و غیر دائم در اعداد رینولدز مختلف

Table 1. Total pressure drop in both return directions and the one-way parameter for permanent and non-permanent simulations in different Reynolds numbers

عدد رینولدز	پاسخ حالت دائم میکروشیر			پاسخ حالت غیردائم میکروشیر (فرکانس 1000Hz)		
	Di	$\Delta P_{\text{Forward}}$(kPa)	$\Delta P_{\text{Backward}}$(kPa)	$\overline{Di}$	$\overline{\Delta P}_{\text{Forward}}$(kPa)	$\overline{\Delta P}_{\text{Backward}}$(kPa)
104	1.04	6.38	6.62	1.07	7.18	7.70
200	1.12	15.51	17.31	1.15	17.31	19.83
304	1.17	28.33	33.02	1.20	31.78	38.27
426	1.21	47.15	57.00	1.25	53.67	67.04

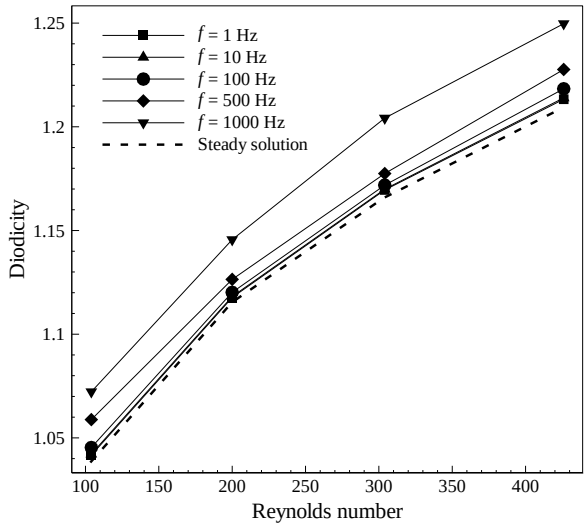


Fig. 17. Diodicity of Tesla microvalve in three-dimensional simulation for steady and unsteady conditions

شکل 17 یکسوکنندگی میکروشیر تسلا در حالت سه‌بعدی برای حالت دائم و غیر دائم

عددی مطالعه شد و نتایج مهم زیر به دست آمد:

- شبیه‌سازی سه‌بعدی در تمام محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی مقدار پارامتر یکسوکنندگی کمتری را نسبت به شبیه‌سازی دوبعدی به نمایش می‌گذارد. وجود بعد سوم موجب ایجاد افت فشار جدیدی می‌شود که در نهایت منجر به کاهش مقدار یکسوکنندگی نسبت به حالت دو بعدی می‌شود.
- افت فشار کل در پاسخ حالت غیردائم میکروشیر در هر دو جهت رفت و برگشت از پاسخ حالت دائم آن بیشتر می‌باشد. این نتیجه مهم با نتایج قبلی نویسندگان مقاله در این زمینه که شبیه‌سازی خود را به صورت دوبعدی انجام داده بودند، هم‌خوانی کیفی داشت. اما از نظر کمی، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی انجام‌شده در این تحقیق قابل اعتمادتر می‌باشد.
- بررسی اثر فرکانس اعمالی بر عملکرد میکروشیر تسلا در اعداد رینولدز مختلف نشان داد که که عملکرد میکرو شیر تسلا در فرکانس‌های پایین ($f < 100\text{Hz}$) مستقل از فرکانس اعمالی بوده در حالی که در فرکانس‌های بالاتر ($f > 100\text{Hz}$) عملکرد آن با افزایش فرکانس بهبود می‌یابد. روند تغییرات نمودار یکسوکنندگی بر حسب فرکانس کاری برای تمامی اعداد رینولدز یکسان بود. در تمامی فرکانس‌ها با افزایش عدد رینولدز، عملکرد میکروشیر بهبود می‌یابد و مقدار یکسوکنندگی آن افزایش می‌یابد.

مسلما نتایج به دست آمده از این تحقیق قابل تعمیم به میکرو شیرهای تسلا با هندسه‌های متفاوت با میکرشیر مورد بررسی در این مقاله می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که بررسی عملکرد شیرها به این طریق یک روش ارزشمند و دقیق برای طراحی صحیح شیر می‌باشد. مشاهدات نتایج سه‌بعدی و غیردائم این تحقیق می‌تواند آشکار کننده روند تغییراتی باشد که بطور دقیق با بررسی‌های آزمایشگاهی قابل تعیین خواهد بود.

8- فهرست علایم

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
D	قطر میکرو کانال
D_h	قطر هیدرولیکی میکرو کانال
f	فرکانس تحریک
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
u_i	سرعت (ms^{-1})
W	عرض میکرو کانال

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	زمان انجام یک پریود زمانی تحریک (s)

9- مراجع

[1] K. Mohammadzadeh, E. M. Kolahdouz, E. Shirani, M. B. Shafii, Numerical study on the effect of the number of stages on the performance of Tesla microvalve and comparison with nozzle/diffuser microvalve, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 124-135, . (in Persian فارسی)

[2] K. Mohammadzadeh, E. M. Kolahdouz, E. Shirani, M. B. Shafii, Numerical Investigation on the effect of the size and number of stages on the Tesla microvalve efficiency, *Journal of Mechanics*, Vol. 29, No. 3, September 2013, pp. 527 534, 2013.

[3] E. M. Kolahdouz, K. Mohammadzadeh, E. Shirani, Design, simulation and experimental validation of a piezoelectric micropump with modified tesla-type valves, *21st Annual International Conference on Mechanical Engineering*, School of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University, Tehran, Iran, 7-9 May, 2013.

[4] C. L. Sun, K. H. Huang, Numerical characterization of the flow rectification of dynamic microdiffusers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.16, No. 7, pp. 1331–1339, 2006.

[5] C. T. Wang, T. S. Leu, J. M. Sun, Unsteady analysis of microvalves with no moving parts, *Journal of Mechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 9-14, 2007.

[6] C. K. Chung, T. R. Shih, B. R. Wu, Simulation of the novel micro-valve using dynamic analysis, *Proceedings of the 2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Shenzhen, China, IEEE, January 5-8, 2009.

[7] S. M. Thompson, B. J. Paudel, T. Jamal, D. K. Walters, Numerical investigation of multistaged tesla valves, *ASME Journal of Fluids Engineering 136*, no. 8 /081102, pp. 1-9, 2014.

[8] B. Dennai, M. E. B. Belboukhari, T. Chekifi, R. Khelfaoui, Numerical investigation of flow dynamic in mini- channel: Case of a mini diode tesla, *Fluid Dynamics & Materials Processing*, Vol. 12, No. 1, pp. 102-110, 2016.

[9] Y. Sato, K. Yaji, K. Izui, T. Yamada, S. Nishiwaki, Topology optimization of a no-moving-part valve incorporating Pareto frontier exploration, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 56, Issue 4, 839–851, 2017.

[10] F. Forster, R. Bardell, M. Afromowitz, N. Sharma, A. Blanchard, Design, fabrication and testing of fixed-valve micropumps, *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition San*

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]

Francisco, CA, New York, USA, pp. 39-44, 1995.

[11] F. Forster, B. Williams, Parametric design of fixed-geometry microvalves – the tesser valve, *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, New Orleans, Louisiana, November 17-22, pp. 431–437, 2002.

[12] A. Gamboa, C. Morris, F. Forster, Improvements in fixed-valve micropump performance through shape optimization of valves, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127, Issue 2, pp. 339–346, 2005.

[13] S. F. de Vries, D. Florea, F. G. A. Homburg, A. J. H. Frijns, Design and operation of a Tesla-type valve for pulsating heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 105, pp. 1–11, 2017.

[14] B. J. Paudel, T. Jamal, S. M. Thompson, D. K. Walters, Thermal effects on micro-sized tesla valves, *Proceedings of the ASME, 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2014*, Chicago, Illinois, USA, pp. 1-8, August 3-7, 2014.

[15] E. M. Kolahdouz, K. Mohammadzadeh, E. Shirani, S. Ziaei-Rad, Performance of piezoelectrically actuated micropump with different driving voltage shapes and frequencies, *Journal of Scientia Iranica B*, Vol. 21, No. 5, pp. 1635 - 1642, 2014.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-16]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.18.5]