



## بررسی عددی جریان نوسانی درون یک میکرووالو تسلا

کاظم محمدزاده<sup>1</sup>، محمدرضا قریب<sup>2\*</sup>، مسعود عباسی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت حیدریه، تربیت حیدریه

3- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت حیدریه، تربیت حیدریه

\* تربیت 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:

میکرووالو تسلا  
یکسوکنندگی  
شبیه‌سازی سه‌بعدی  
جریان غیردائم

### چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی عددی عملکرد میکرووالو 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 میکرووالو در حالت سه‌بعدی نیز بررسی شد و مشاهده شد که افت فشار کل در پاسخ حالت غیردائم میکرووالو در 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 میکرووالو 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 میکرووالو بهبود می‌یابد و مقدار یکسوکنندگی آن افزایش می‌یابد.

## Numerical investigation of oscillatory fluid flow through a tesla microvalve

Kazem Mohammadzadeh<sup>1</sup>, Mohammad Reza Gharib<sup>2\*</sup>, Masoud Abbasi<sup>2</sup>

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

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

میکروپمپ‌ها یکی از شاخه‌های مهم سیستم‌های میکروالکترومکانیکی هستند که برای انتقال دقیق و کنترل‌شده حجم‌هایی از مرتبه میکرولیتر یا نانولیتتر بکار می‌روند. در میان انواع مختلف میکروپمپ‌ها، نمونه بدون دریچه که از نوع رفت و برگشتی می‌باشد، به دلیل مقیاس‌پذیری، ماندگاری و سادگی

### 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

در مطالعات [4-6] اثرات جریان غیردائم بر عملکرد میکروشر نازل-دیفیوزری بررسی شده است. سان و هوانگ [4] رفتار گذرای میکروشر دیفیوزری را در حالت سه بعدی بررسی کردند. اثر فرکانس تحریک و نیم زاویه 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 نیم زاویه 20 درجه را تحت هردو شرایط پایا و غیر پایا را در دو حالت دوبعدی و سه بعدی بررسی کردند و اثر ضریب منطری (نسبت عمق به عرض گلوگاه دیفیوزر) را نیز در نظر گرفتند. مشخص شد که نتایج برای ضریب منطری 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 غیر پایا یک عدد استروهل بهینه 0.013 با بیشینه دبی خالص به دست آمد. همچنین رابطه خطی بین دامنه فشار راه انداز و دبی خالص بدست آمد. چانگ و همکاران [6] با تحلیل دینامیکی و سه بعدی یک میکروشر جدید، اثر هندسه را روی دبی خالص در مقایسه با میکروشر نازل-دیفیوزری بررسی کردند. رفتار جریان گذرا با اعمال یک تابع فشار سینوسی در مرز ورودی و فشار صفر در مرز خروجی در میکروشر جدید با ساختارهای دندانه ای در زوایای مختلف بررسی شد. پارامترهای هندسی شامل نیم زاویه دیفیوزر، زاویه دندانه ها و فرکانس تحریک بودند. نتایج نشان داد که دبی به فرکانس تحریک وابسته است و میکروشر جدید دبی بیشتری را می تواند تولید کند.

تامسون و همکاران [7] در سال 2014، اثرات استفاده از شیرهای تسلاای چندگانه با شکل های یکسان و به صورت سری (شیر تسلاای 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 آن ها بر رو یکسوکنندگی شیر تسلاای چندطبقه تغییر داده شد. نتایج نشان داد که یک شیر تسلاای چندطبقه، یکسوکنندگی خیلی بیشتری از شیر تک طبقه ارائه می کند و اینکه این اختلاف با عدد رینولدز افزایش می یابد. همچنین نتیجه گرفته شد که شبیه سازی های دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی به طور دقیق تری جریان درون شیر تسلا را در محدوده وسیع تری از اعداد رینولدز نسبت به شبیه سازی های دوبعدی، شبیه سازی می کنند.

دنایی و همکاران [8] در سال 2016 با تغییر طول های داخلی مینی والو تسلا (ابعاد از مرتبه میلی متر)، مینی والوی با کارایی بهتر ارائه کردند. شبیه سازی آن ها دوبعدی و پایا بود. نتایج آن ها نشان داد در حالتی که مسیر بای پس امتداد کانال ورودی را قطع کند، بیشترین کارایی بدست می آید.

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

در مطالعات قبلی نویسنده [1,2] شبیه سازی ها به صورت دوبعدی و دائم انجام شده بودند. با توجه به اینکه میکروپمپ های رفت و برگشتی در شرایط غیردائم کار می کنند، بررسی دقیق عملکرد میکرو والو تسلا به عنوان یکی از اجزای اصلی این نوع میکروپمپ ها، نیازمند شبیه سازی های سه بعدی و

و آسان، نداشتن اجزای متحرک و عدم نیاز به کنترل بیرونی به کارگیری این نوع شیرها توصیه می شود. دو نوع اصلی این میکروشرهای ثابت، میکرودیفیوزرها و میکروشرهای تسلا هستند [1]. هندسه کانال میکروشر تسلا موجب مقاومت های متفاوتی در جهت رفت و برگشت جریان می شود. خاصیت یکسوکنندگی این نوع شیر عمدتاً ناشی از تفاوت زوایای برخورد کانال ها در دو قسمت شیر می باشد که باعث پدید آمدن مقاومت بیشتر جریان برگشت در مقایسه با جریان رفت می گردد (شکل 1). عملکرد شیر تسلا به خاطر اثر اینرسیایی سیال است. با این وجود بسته به این که شیر در چه بازه ی فرکانسی کار کند می تواند اثرات ویسکوز نیز مورد اهمیت واقع شوند.

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

مطالعه کارهای انجام شده در زمینه بهینه سازی هندسه میکروشر تسلا نشان می دهد که بررسی و مقایسه میکروشرهای 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 میکروپمپ های بدون دریچه نوعاً به یک راه انداز مشخص نیاز دارد که سیستم را در یک وضعیت تناوبی متغیر با زمان راه اندازی می کند. این در حالی است که اکثر مطالعاتی که تاکنون بر روی میکروشرهای تسلا انجام شده است، به سادگی پاسخ حالت پایا شیر را در نظر گرفتند. دلیلی که برای این امر در مطالعات قبلی ذکر شده است، پیچیدگی های تحلیل گذرا، کاهش

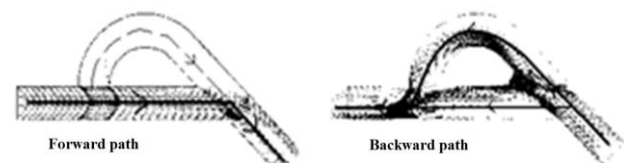


Fig. 1 The effect of difference between conjunction angles on the creation of diodic property [1]

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

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 یکسوکندگی و افت فشار محاسبه شده در خروجی میکروشیپ 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 یکسوکندگی 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 میکروشیپ، از توابع سرعت هارمونیک به صورت معادله (4)، به‌عنوان شرط مرزی استفاده می‌شود.

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

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.

$$Re = \frac{\rho_f \bar{V} D_h}{\mu_f}, \quad D_h = \frac{2WD}{W+D} \quad (5)$$

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.

$$\bar{V}_{3-D} = 1.0833\bar{V}_{2-D} \quad (6)$$

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 حالت  $3-D$  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

غیردائم می‌باشد که در مقاله حاضر برای اولین بار به آن پرداخته شده‌است و اثر فرکانس کاری بر عملکرد میکرووالو تسلا 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 یکسوکندگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت پارامترهای عملکردی میکروشیپ تسلا شامل افت فشار و پارامتر یکسوکندگی 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 کندگی نام دارد که به صورت معادله (1) تعریف می‌شود [10]. انتظار می‌رود که یکسوکندگی در شکل فشار بدون بعد، تابعی از عدد رینولدز باشد [11].

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

با توجه به ابعاد میکروشیپ مورد بررسی می‌توان دریافت که اولا طول‌های مشخصه بسیار بزرگتر از پوشش 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 مومنوم در حالت غیردائم به ترتیب به شکل روابط (2) و (3) در خواهند آمد:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

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

## 3- روش حل عددی جریان در میکروشیپ

شکل 2 هندسه میکروشیپ مورد بررسی را نشان می‌دهد. عرض همه کانال‌های میکروشیپ 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 میکروشیپ خود به کار بردند.

حل عددی معادلات حاکم به کمک نرم افزار فلونت 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<sup>1</sup> (فشار ضمنی با تقسیم اپراتورها) می‌باشد. از طرح بالادستی مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات مومنوم 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.

<sup>1</sup> PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)

مرزی به صورت معادله (7) اعمال می‌شود. 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<sup>1</sup> 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 میکرووشیر نشان می‌دهد. عمق میکرووشیر  $80 \mu\text{m}$  در نظر گرفته شد. با فرض متقارن بودن جریان نسبت به صفحه مرکزی میکرووشیر، عمق شبکه محاسباتی  $40 \mu\text{m}$  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 61448، 45460، 108131، 81020، 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 میکرووشیر، از حل مستقل از شبکه اطمینان حاصل شد. افت فشار کل برابر با اختلاف فشار ورودی و خروجی میکرووشیر می‌باشد. شکل 4 افت فشار کل در طول میکرووشیر 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

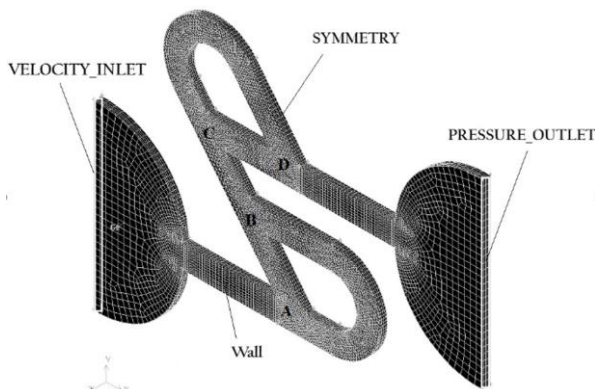


Fig. 3 3D Geometry and grid of Tesla microvalve and the naming of conjunctions

شکل 3 هندسه و مش‌بندی سه بعدی میکرووشیر تسلا مورد بررسی و نام‌گذاری محل‌های اتصال کانال‌ها

<sup>1</sup> Grid adaptation

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

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 میکرووشیر 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  $\tau$  سرعت سیال از صفر به مقدار بیشینه منفی تغییر می‌کند.

از متوسط زمانی یکسوکندگی در میکرووشیر می‌توان به‌عنوان معیارهایی جهت تعیین گام زمانی بهینه استفاده کرد. با توجه به مطالعات انجام شده، برای محاسبه متوسط زمانی یکسوکندگی ( $\overline{Dt}$ )، می‌بایست جریان در میکرووشیر 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  $\overline{Dt}$  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.

$$\overline{Dt} = \left( \frac{\Delta P_{\text{Backward}}}{\Delta P_{\text{Forward}}} \right)_Q \quad (8)$$

الگوریتم حل غیردائم جریان در میکرووالو تسلا به‌طور 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

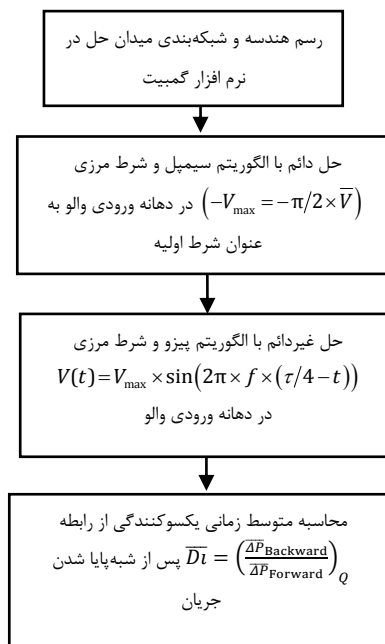


Fig. 2 The solution algorithm of unsteady flow in Tesla microvalve

شکل 2 الگوریتم حل جریان غیردائم در میکرووالو تسلا

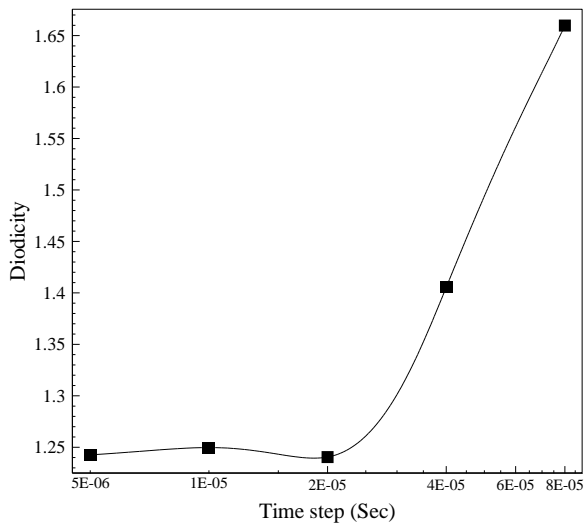


Fig. 5. Change of the diodicity parameter in terms of time step at a frequency of 1000Hz

شکل 5 تغییر پارامتر یکسوکنندگی میکروشیبر بر حسب گام زمانی در فرکانس 1000Hz

6- نتایج

اعتبارسنجی روند شبیه‌سازی در شبیه‌سازی دوبعدی قبلی نویسندگان [1,2] آمده است. برای اعتبارسنجی، میکرووالو تسلا 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.

1-6- مقایسه شبیه‌سازی دائم دوبعدی و سه بعدی

در این بخش با استفاده حل پایای جریان در دو جهت رفت و برگشت، پارامتر یکسوکنندگی بر اساس 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 هر دو 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 [7, 10-13] ولی در نهایت برای بهینه‌سازی والو تسلا از شبیه‌سازی‌ها دوبعدی کمک گرفته شده است. 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 میکروشیبر تسلا می‌باشد، با توجه به تفاوت کمی نتایج شبیه‌سازی‌های 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 میکروشیبرها به صورت سه بعدی و البته غیردائم انجام شده است.

2-6- 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 میکروشیبر تسلا مورد بررسی می‌باشد.

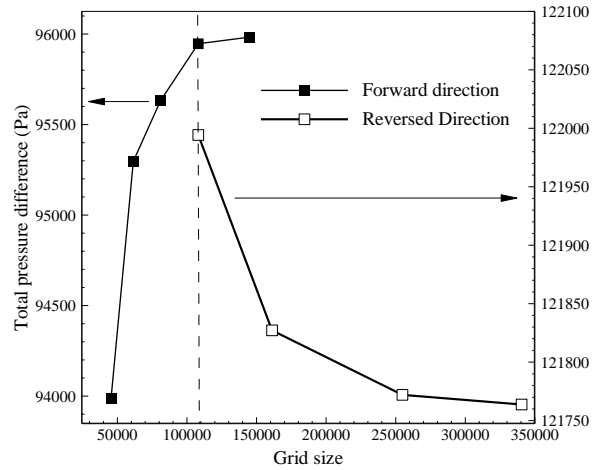


Fig. 4 Total pressure drop of forward and backward flow at various grids

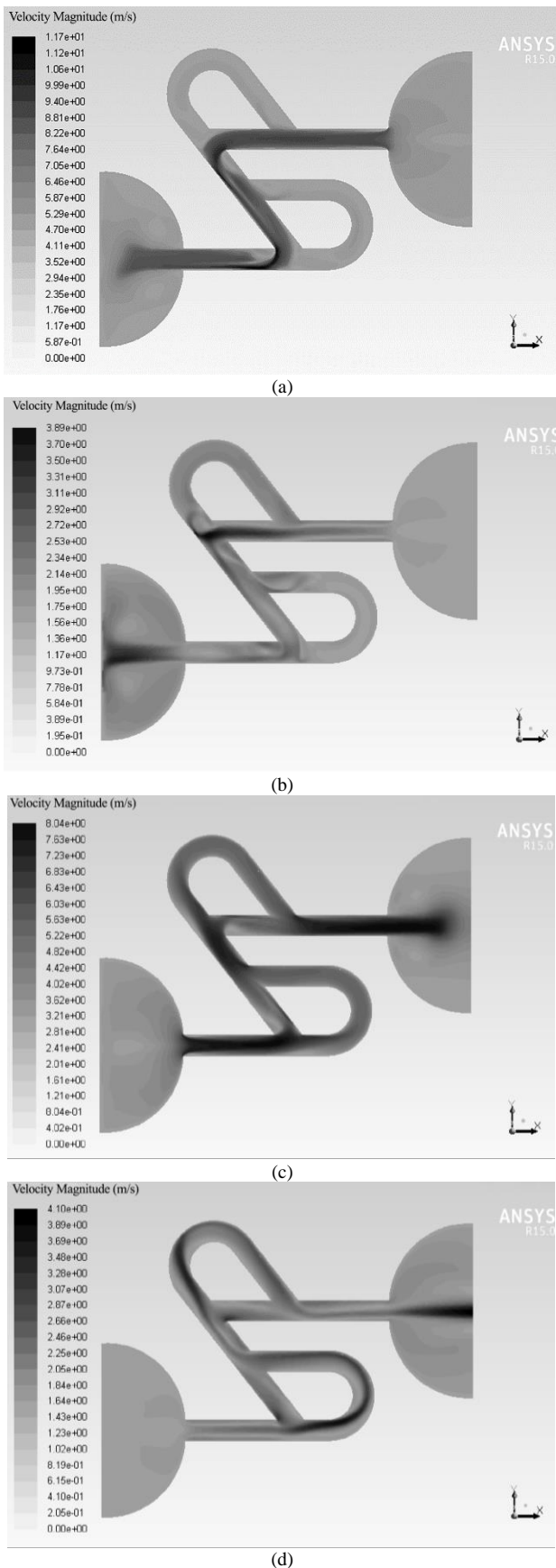
شکل 4 افت فشار کل جریان رفت و برگشت برای شبکه‌های مختلف

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 تعداد سلول 254837 جهت انجام محاسبات غیردائم استفاده می‌شود.

5- مطالعه گام زمانی

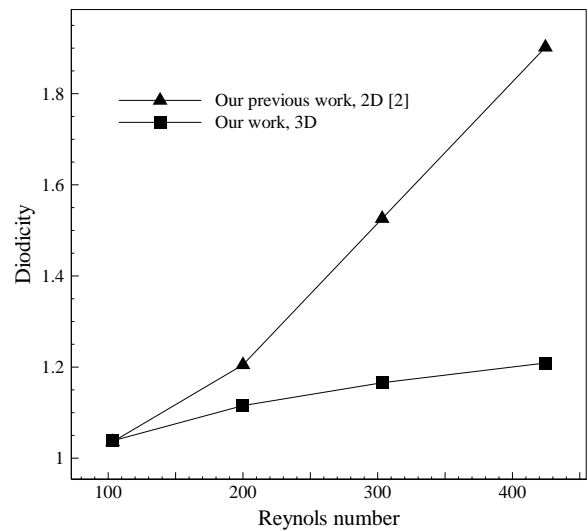
از متوسط زمانی یکسوکنندگی در میکروشیبر (معادله (8))، به‌عنوان معیاری جهت تعیین گام زمانی بهینه استفاده می‌شود. اندازه گام زمانی بهینه در شرایط کاری مختلف میکروشیبر، به عبارتی فرکانس‌های کاری مختلف تغییر می‌کند، چون عدد رینولدز در شرایط کاری مختلف متفاوت است. گام زمانی بهینه می‌بایست به گونه ای باشد که هنگام همراه شدن با فرکانس تحریک، با تغییرات کوچک در جابجایی سیال معادله داشته باشد (در واقع گام زمانی می‌بایست ضربی 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 پیروی 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 0.02، 0.01، 0.005، 0.04 و 0.08 برابر پیروی زمانی سرعت نوسانی در ورودی میکروشیبر مورد بررسی قرار گرفتند. عملکرد میکروشیبر 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 هارمونیک 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. 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)  $t=0.00275s$

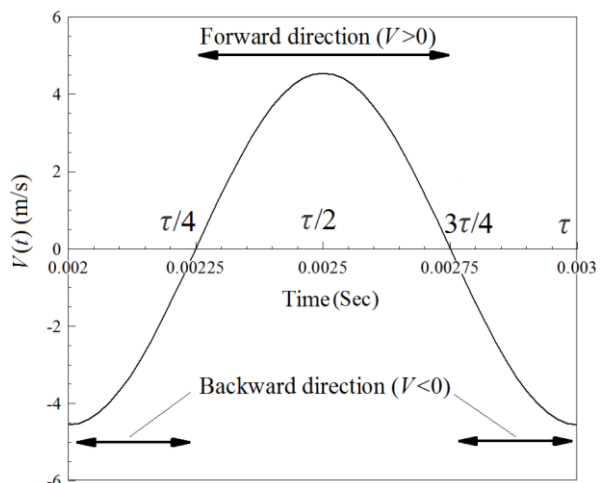
شکل 8 کانتورهای سرعت در  $Re=426$  و  $f=1000Hz$  در زمان‌های مختلف:  $t=0.00275s$  (d)  $t=0.0025s$  (c)  $t=0.00225s$  (b)  $t=0.002s$  (a)



**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  $0.01\tau$  استفاده شده است. در نتیجه برای حالت مذکور، همانگونه که در شکل 7 نشان داده شده است، نتایج در زمان‌های  $0.00275s$ ,  $0.0025s$ ,  $0.00225s$ ,  $0.002s$  ثانیه گزارش می‌شود. با توجه به کارکرد شبه پایا میکروشیبر 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.

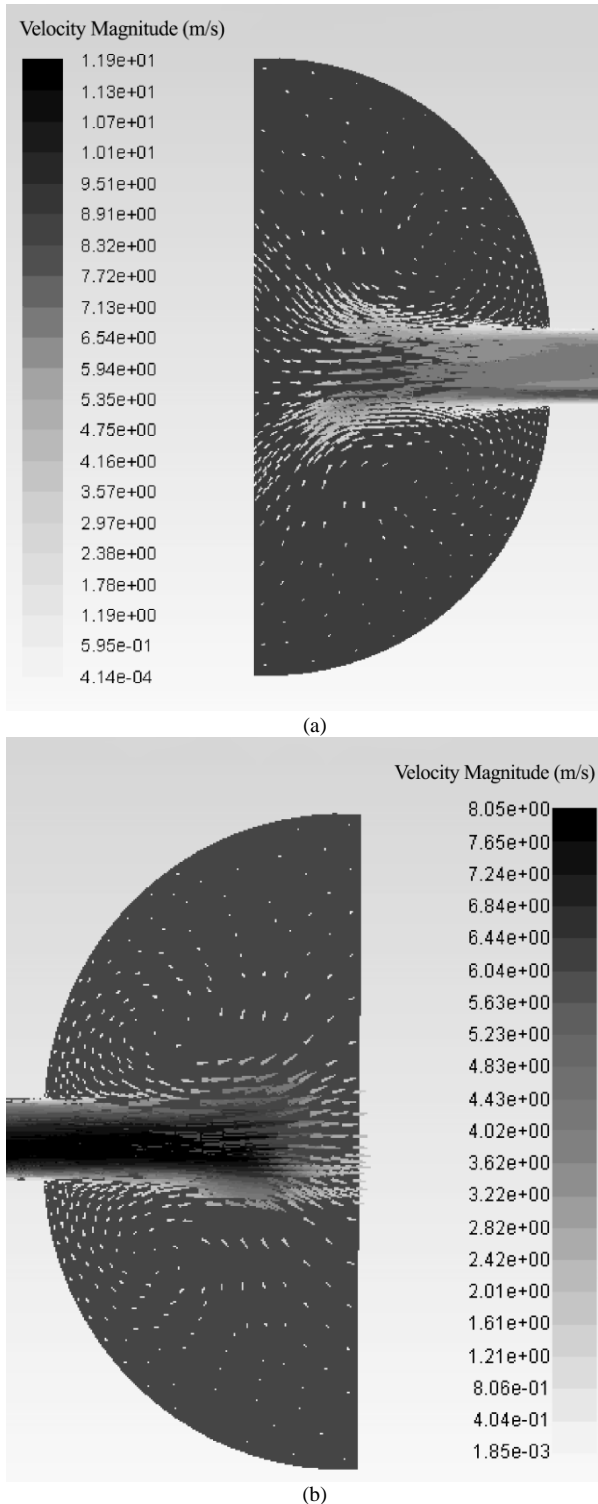
کانتورهای سرعت در شکل 8 نشان داده شده است. برای جریان‌های رفت و برگشت، جدایش جریان و جت‌های آرام در محل تقاطع کانال‌ها و



**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 میکروشیبر برای فرکانس  $1000Hz$  و عدد رینولدز  $426$

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



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

شکل 9 بردارهای سرعت در خروجی شیر در  $Re=426$  و  $f=1000\text{Hz}$  در زمان‌های مختلف: (a) برگشت ( $t=0.002\text{s}$ ), (b) رفت ( $t=0.0025\text{s}$ )

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. خروجی 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  $t=0.002\text{s}$  و  $t=0.0025\text{s}$  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 دیواره‌های 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.

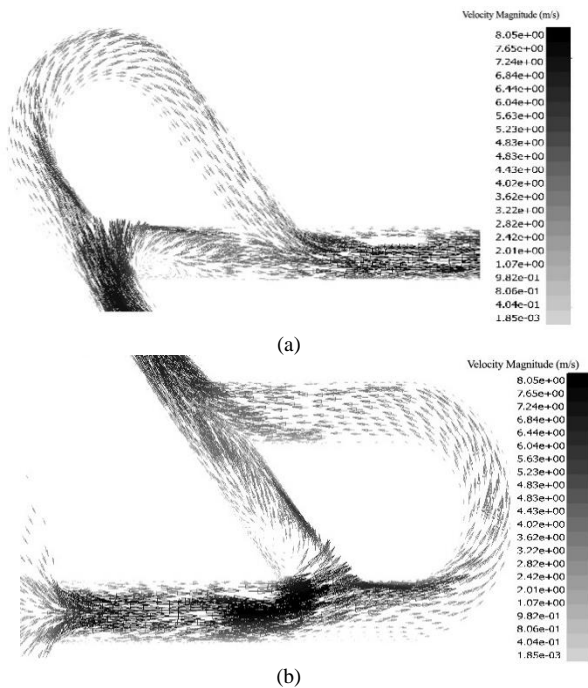
برای شناسایی محل اتصال کانال‌های میکروشیر، این محل‌ها مطابق شکل 3 نام‌گذاری شده‌اند. بردارهای سرعت در محل‌های اتصال برای حالت رفت در حداکثر سرعت ممکن (زمان  $t=0.0025\text{s}$ ) در شکل 11 نشان داده شده است. در این شکل‌ها حرکت عمده جریان در مسیر اصلی و تشکیل جت و ناحیه چرخشی در مسیرهای فرعی هنگام رسیدن 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  $t=0.002\text{s}$ ) 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 شکل‌ها 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  $t=0.002\text{s}$ ) نسبت به افت فشار کل در جهت رفت (زمان  $t=0.0025\text{s}$ ) بیشتر بوده که منجر به ایجاد خاصیت یکسوکنندگی شیر می‌شود. میدان فشار جریان برگشت شکل 13-a نشان دهنده‌ی یک افت فشار بزرگ دقیقاً 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 تسلا به 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

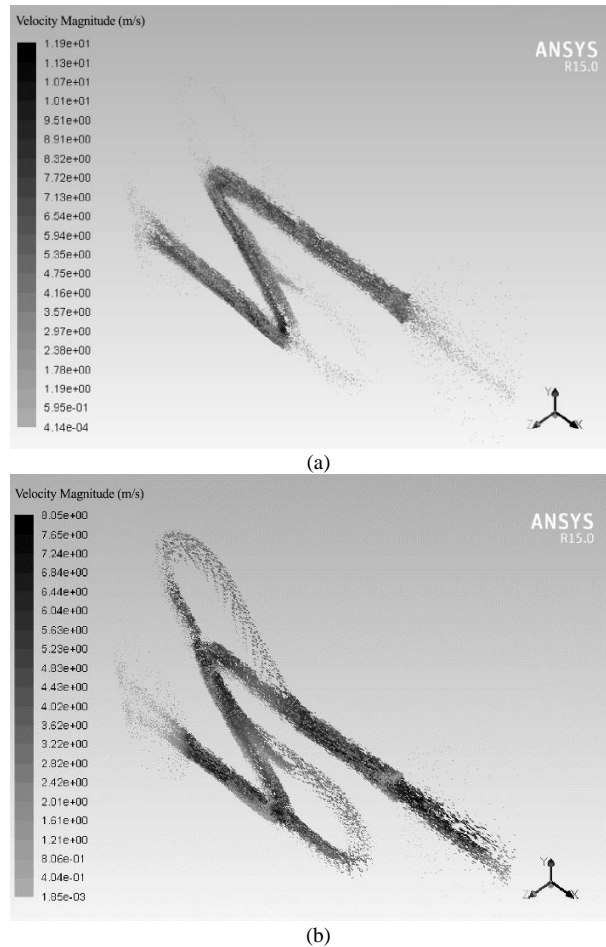
همچنین در فرکانس‌های مختلف، پارامتر یکسوکندگی قابل استخراج است. تغییرات پارامتر یکسوکندگی بر حسب عدد رینولدز تحت اعمال فرکانس‌های مختلف در شکل 15 قابل مشاهده است.



**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  $f=1000Hz$  و  $Re=426$  در حالت رفت ( $t=0.0025s$ ): محل C و D (a)، محل A و B (b)

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



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

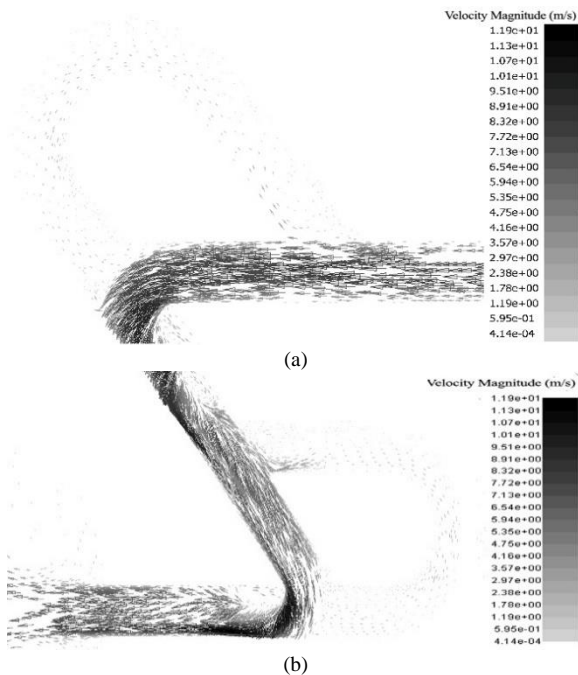
شکل 11 بردارهای سرعت سه‌بعدی در  $f=1000Hz$  و  $Re=426$  در زمان‌های مختلف: برگشت ( $t=0.002s$ ) (b)، رفت ( $t=0.0025s$ ) (a)

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 گردابه‌های 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 گردابه‌های تولیدی درون میکروشیر نیز کاسته شود. انتظار می‌رود که اندازه‌ی این گردابه‌ها بر خاصیت یکسوکندگی شیر تأثیر بگذارد. کلاهدوز و همکاران [15] اثر فرکانس اعمالی را بر ساختار جریان درون یک میکروپمپ پیژوالکتریک 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



**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  $f=1000Hz$  و  $Re=426$  در حالت برگشت ( $t=0.002s$ ): محل C و D (a)، محل A و B (b)



همان گونه که در شکل 15 مشاهده می شود با افزایش عدد رینولدز، مقدار یکسوکندگی در تمام فرکانس ها افزایش یافته است. برای یک عدد رینولدز مشخص، با افزایش فرکانس، یکسوکندگی افزایش اندکی داشته است که این افزایش در فرکانس های بالاتر مشهودتر می باشد. افت فشار در میکرووالو ناشی از اتلافات ویسکوز و اتلافات دینامیکی یا اینرسیایی است. در مسیر رفت، اتلافات ویسکوز و در مسیر برگشت اتلافات اینرسیایی غالب هستند [10]. با افزایش فرکانس تلفات اینرسیایی نسبت به تلفات ویسکوز شدت می گیرد که

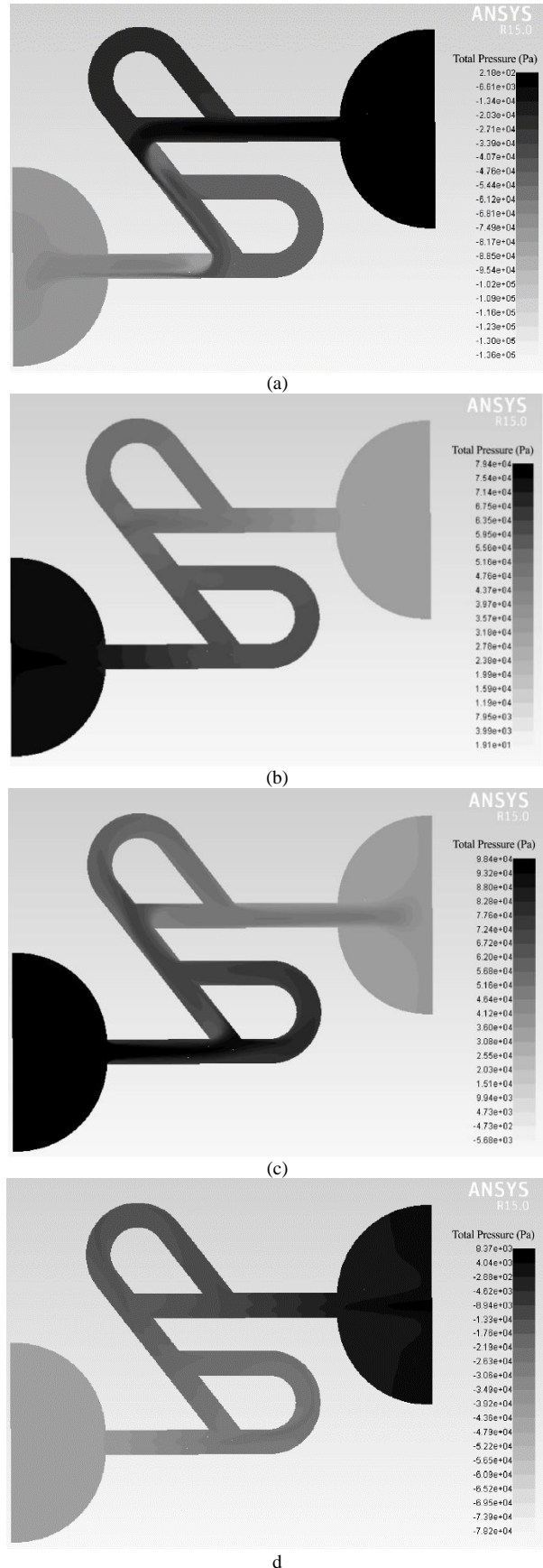
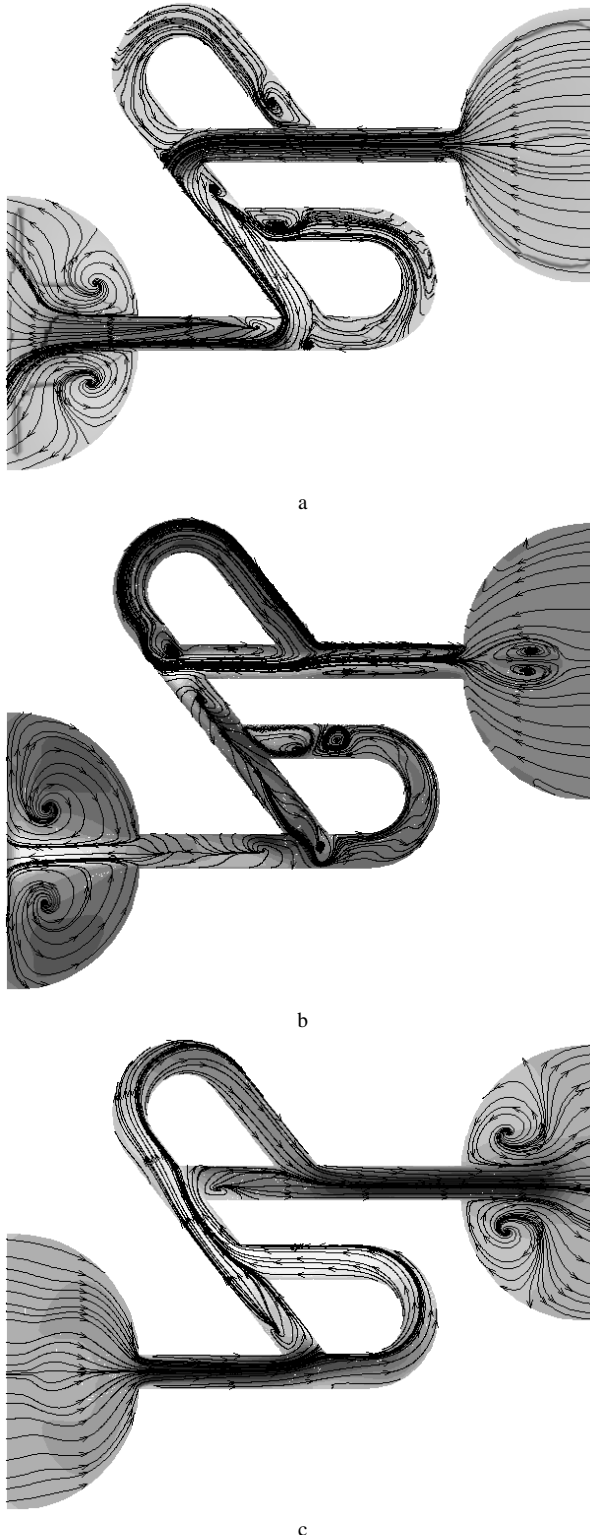
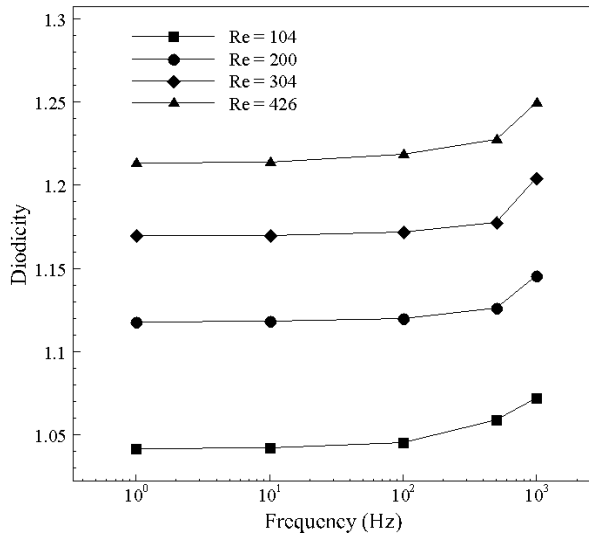


Fig. 13. Pressure contours at  $Re = 425$  and  $f=1000Hz$  at different times: a)  $t=0.002s$ , b)  $t=0.00225s$ , c)  $t=0.0025s$ , d)  $t=0.00275s$

شکل 13 کانتورهای فشار در  $f=1000Hz$  و  $Re=425$  در زمان های مختلف: (a)  $t=0.002s$  (b)  $t=0.00225s$  (c)  $t=0.0025s$  (d)  $t=0.00275s$



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

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

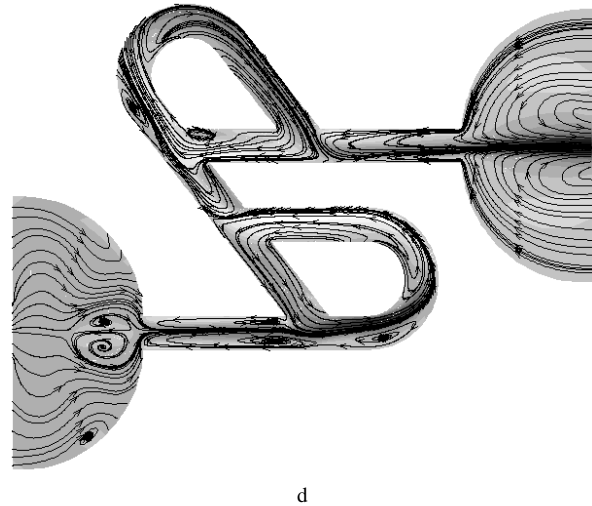
**4-6- مقایسه شبیه‌سازی های دائم و غیر دائم**

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 ( $f < 100\text{Hz}$ ) دارای اهمیت کمتری است و در فرکانس‌های بالا ( $f > 100\text{Hz}$ ) 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 شبیه‌سازی های سه‌بعدی می‌باشد.

برای درک بهتر اثرات گذرا بر عملکرد میکروشر در حالت سه بعدی، نتایج به دست آمده 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 میکروشر در 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 شبیه‌سازی های سه‌بعدی انجام شده در این تحقیق قابل اعتمادتر می‌باشد.

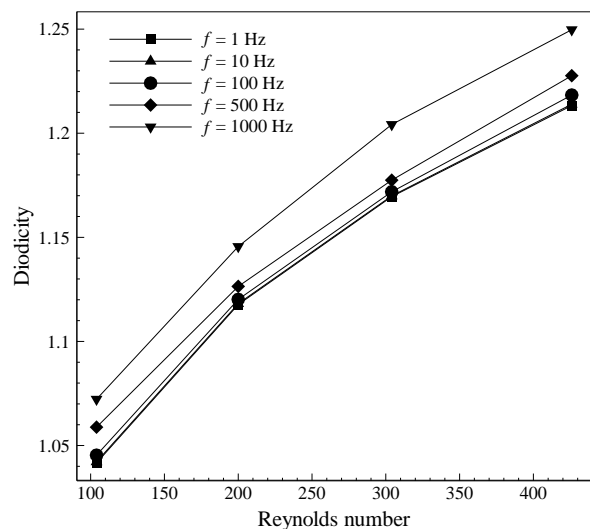
**7- نتیجه گیری**

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



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

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



**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 شبیه‌سازی های دائم قابل مشاهده نیست.

برای مشاهده بهتر اثر فرکانس تحریک بر عملکرد گذرای میکروشر تسلا مورد بررسی، در شکل 16 تغییرات یکسوکنندگی بر حسب فرکانس تحریک در اعداد رینولدز مختلف ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های پایین ( $f < 100\text{Hz}$ ) یکسوکنندگی میکروشر برای تمامی اعداد رینولدز، تقریباً مستقل از مقدار فرکانس تحریک بوده و در فرکانس‌های بالا ( $f > 100\text{Hz}$ ) 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 میکروشر افزایش می‌یابد.

جدول 1 افت فشار کل در دو جهت رفت و برگشت و پارامتر یکسوکندگی 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

پاسخ حالت غیردائم میکرو شیر (فرکانس 1000Hz)			پاسخ حالت دائم میکرو شیر			عدد رینولدز
$\Delta P_{Backward}$ (kPa)	$\Delta P_{Forward}$ (kPa)	$\bar{D}_t$	$\Delta P_{Backward}$ (kPa)	$\Delta P_{Forward}$ (kPa)	$D_i$	
7.70	7.18	1.07	6.62	6.38	1.04	104
19.83	17.31	1.15	17.31	15.51	1.12	200
38.27	31.78	1.20	33.02	28.33	1.17	304
67.04	53.67	1.25	57.00	47.15	1.21	426

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 علائم**

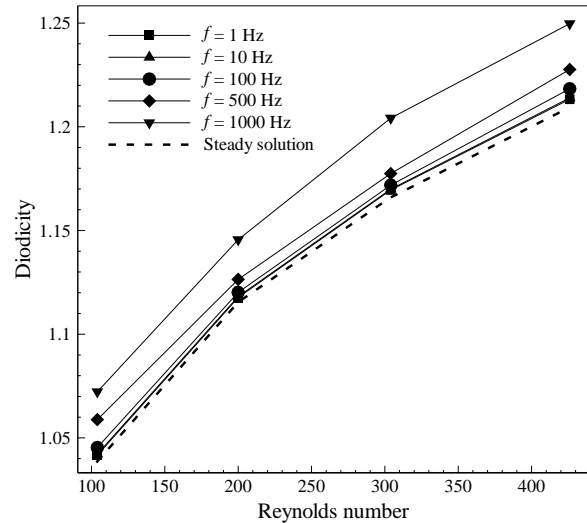
$P$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$D$	قطر میکرو کانال
$D_h$	قطر هیدرولیکی میکرو کانال
$f$	فرکانس تحریک
$Re$	عدد رینولدز
$t$	زمان (s)
$u_i$	سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$W$	عرض میکرو کانال

**علائم یونانی**

$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\tau$	زمان انجام یک پرید 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)
- [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 flow dynamic in mini-channel: Case of a mini diode tesla, *ASME Journal of Fluids Engineering* 136, no. 8 /081102, pp. 1-9, 2014.
- [8] B. Dennai, M. E. B. Belboukhari, T. Chekifi, R. Khelifaoui, 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*



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

شکل 17 یکسوکندگی میکرو شیر 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 یکسوکندگی 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 یکسوکندگی نسبت به حالت دو بعدی می‌شود.
- افت فشار کل در پاسخ حالت غیردائم میکرو شیر 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 انجام شده در این تحقیق قابل اعتمادتر می‌باشد.
- بررسی اثر فرکانس اعمالی بر عملکرد میکرو شیر تسلا در اعداد رینولدز مختلف نشان داد 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 یکسوکندگی بر حسب فرکانس کاری برای تمامی اعداد رینولدز یکسان بود. در تمامی فرکانس‌ها با افزایش عدد رینولدز، عملکرد میکرو شیر بهبود می‌یابد و مقدار یکسوکندگی آن افزایش می‌یابد.
- مسلماً نتایج به دست آمده از این تحقیق قابل تعمیم به میکرو شیرهای تسلا با هندسه‌های متفاوت با میکرو شیر مورد بررسی در این مقاله می‌باشد.

- 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.
- 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