



بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی یک میکروپمپ لزجی بر دبی خروجی و تولید آنتروپی

حجت خزیمه نژاد¹، حمید نیازمند^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 91775-1111، niazmand@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 شهریور 1393

پذیرش: 03 دی 1393

ارائه در سایت: 21 بهمن 1393

کلید واژگان:

میکروپمپ لزجی

پارامترهای هندسی

روتور دایروی

روش حجم محدود

تحلیل آنتروپی

چکیده

میکروپمپ‌های لزجی به دلیل طراحی و ساخت ساده و نیز کاربردهای فراوانشان در زمینه‌های مختلف صنعتی و پزشکی مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. به همین دلیل پژوهش‌های عددی و تجربی بسیاری به این سمت معطوف شده است. در همین راستا، در این مقاله یک مطالعه عددی برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی یک میکروپمپ لزجی بر دبی خروجی و تولید آنتروپی صورت گرفته است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل گردیده است. پژوهش حاضر برای سه پارامتر بی‌بعد هندسی میکروپمپ یعنی خارج از مرکزی (ϵ) و اندازه روتورها (S) و نیز فاصله آن‌ها از یکدیگر (L) به ترتیب در محدوده $0/1$ تا $0/9$ ، $1/5$ تا $3/5$ و $0/85$ تا $4/5$ صورت گرفته است. نتایج حاصل از این حل نشان می‌دهد با افزایش ϵ ، دبی خروجی از میکروپمپ نیز افزایش پیدا می‌کند. در بررسی تأثیر تغییرات S بر دبی خروجی مشاهده گردید در حالی که قطر روتور بالادست ثابت در نظر گرفته شده است با کاهش قطر روتور پایین‌دست، دبی خروجی نیز به صورت نمایی کاهش می‌یابد. با افزایش L ، در ابتدا یک افزایش شدیدی در دبی سپس با فاصله گرفتن روتورها از یکدیگر، مقدار آن تقریباً ثابت مشاهده گردید. در خصوص تحلیل آنتروپی، با افزایش ϵ ، نسبت RS نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین تغییرات پیچیده‌تری برای RS با تغییر دیگر پارامترهای هندسی مشاهده شد که علت آن ایجاد الگوهای جریان نسبتاً پیچیده در میکروپمپ می‌باشد. علاوه بر این مقاله برای دست‌یابی به بیشینه دبی خروجی در کمترین افت اصطکاکی ممکن، پارامترهای هندسی بهینه استخراج شدند. در همین راستا مقادیر $L = 2$ ، $\epsilon = 0/5$ ، $S_1 = 1/5$ و $S_2 = 2/5$ به عنوان پارامترهای هندسی بهینه میکروپمپ لزجی معرفی و انتخاب گردیدند. در انتها قابل ذکر است که از جمله نوآوری‌های این مقاله می‌توان به بررسی تأثیر همزمان تغییر قطر روتورها بر دبی و تولید آنتروپی و همچنین استخراج پارامترهای هندسی بهینه بر اساس تحلیل آنتروپی اشاره نمود.

Numerical Investigation of the Effects of Geometrical Parameters of a Viscous Micro-pump on the Flow Rate and Entropy Generation

Hojjat Khozaymeh Nezhad, Hamid Niazmand*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91775-1111 Mashhad, Iran. niazmand@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 02 September 2014

Accepted 24 December 2014

Available Online 10 February 2015

Keywords:

Viscous Micropump

Geometrical Parameters

Circular Rotor

Finite Volume Method

Entropy Analysis

ABSTRACT

Viscous micro-pumps have attracted researchers' attention due to their simple design and fabrication and many applications in various industrial and medical fields. Therefore, a wide range of numerical and experimental studies has focused on this topic. In the present paper, a numerical study has been performed to investigate the effect of geometrical parameters of a viscous micro-pump on the flow rate and entropy generation. The governing equations have been solved using the finite volume method. The present research has been carried out for three geometrical parameters of micro-pump including eccentricity (ϵ), sizes (S) of rotors and also their distance from each other (L) in the range of 0.1 to 0.9, 1.5 to 3.5 and 0.85 to 4.5, respectively. The results show that by increasing ϵ , the micro-pump flow rate also increases. On size variation effects, it is observed that decreasing the downstream rotor diameter while keeping constant the upstream rotor diameter, decreases the flow rate exponentially. By increasing L , a steep increase in flow rate is initially observed, which becomes almost constant when rotors are sufficiently far apart. With regard to entropy analysis, with increasing ϵ , the ratio of RS also increases. However, more complex variations of RS are observed for other examined geometrical parameters due to the relatively complex micro-pump flow patterns. Also in this paper, for obtaining the maximum flow rate at the minimum frictional dissipation, optimal geometrical parameters are extracted. In this regard, the values of $L = 2$, $\epsilon = 0.5$, $S_1 = 1.5$ and $S_2 = 2.5$ are selected as the optimum geometrical parameters of viscous micro-pump. Finally, it should be noted that the effect of simultaneous variations of the rotors diameters on the flow rate and entropy generation and, moreover, obtaining the optimal geometrical parameters based on the entropy analysis, are among the novelties of the present paper.

1- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در فناوری ساخت وسایل میکروسایلی باعث توسعه کاربردهای متنوع این گونه وسایل در زمینه‌های مختلفی از قبیل زیست-شناسی، شیمی و داروسازی شده است. میکروپمپ‌ها کاربردهای فراوانی دارند که از آن جمله می‌توان به مواردی همچون دستگاه‌های میکروکولینگ در تجهیزات الکترونیک و میکروتراشه‌ها، دستگاه‌های طیف‌سنجی جرمی و میکروپیش‌رانها در کاوش‌های فضایی و ... اشاره کرد. به همین دلیل، مطالعات تجربی و عددی بسیاری برای تحلیل این گونه وسایل صورت گرفته است.

اکثر وسایل میکروسایلی با یک ریزمجرا که داخل آن سیال منتقل، جدا و یا مخلوط می‌شود همراه هستند. سیال از میان این ریزمجرا تحت تأثیر یک نیروی رانش که می‌تواند به وسیله یک میکروپمپ ایجاد شود شروع به حرکت می‌نماید. در همین راستا دو دسته کلی از میکروپمپ‌ها مطرح می‌شوند. دسته اول، میکروپمپ‌های غیرمکانیکی شامل الکترواستمیک¹، الکترو هیدرودینامیک²، هیدرومغناطیس³ و ... بوده و دسته دوم، میکروپمپ‌های مکانیکی شامل جابه‌جایی مثبت، لزجی⁴ و ... می‌باشند.

چنانچه ذکر شد یکی از انواع میکروپمپ‌های مکانیکی، لزجی می‌باشد. در این نوع از میکروپمپ‌ها، از یک استوانه چرخان به عنوان روتور استفاده می‌شود که مرکز آن می‌تواند در بالا یا پایین خط افقی مار بر مرکز ریزمجرا قرار گیرد. زمانی که این روتور شروع به چرخش می‌کند یک نیروی خالص به سیال داخل ریزمجرا وارد شده و آن را وادار به حرکت می‌نماید. ایجاد این نیروی خالص وابسته به قرارگیری خارج از مرکز روتور می‌باشد. وقتی روتور در وضعیت خارج از مرکز قرار می‌گیرد مقدار تنش برشی در سطح بالا و پایین آن متفاوت بوده و همین اختلاف تنش باعث حرکت سیال درون ریزمجرا می‌گردد.

پژوهش‌ها و مطالعاتی به صورت عددی و تجربی برای تحلیل جریان درون ریزمجرای این نوع از میکروپمپ‌ها صورت گرفته است. به عنوان نمونه، شارچندرا و همکاران [1]، یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود برای میکروپمپ لزجی با یک روتور دایروی منفرد انجام دادند. در این کار به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف در رینولدزهای پایین بر عملکرد میکروپمپ پرداخته شد. نتایج نشان دادند که بالاترین مقدار سرعت در ریزمجرا، به ازای یک مقدار خارج از مرکزی ثابت، در کانالی با ارتفاع حدود 1/5 برابر قطر استوانه و برای یک ارتفاع ثابت، به ازای حداکثر میزان خارج از مرکزی به دست آمده است.

فاتهاوانگ و حسن [2]، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت تأثیر شکل‌های مختلف سطح مقطع روتور منفرد را بر عملکرد میکروپمپ لزجی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین تأثیر ارتفاع ریزمجرا، خارج از مرکزی روتور، عدد رینولدز و فشار بار روتور را بر عملکرد میکروپمپ مطالعه کردند. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع ریزمجرا زمان لازم برای رسیدن جریان به یک حالت پایا طولانی‌تر گردید. عبدالقواد و همکاران [3]، یک بررسی عددی بر عملکرد یک میکروپمپ لزجی در حضور چند روتور دایروی با قطر یکسان انجام دادند. در این کار روتورها در موقعیت‌های مکانی مختلفی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند در حالتی که روتورها به صورت عمودی در یک راستا قرار دارند بالاترین دبی خروجی از میکروپمپ حاصل می‌شود.

یانگ و همکاران [4]، با استفاده از روش لیتس بولتزمن عملکرد یک

میکروپمپ لزجی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در کار خود دو شکل متفاوت دایره و چهار پر را برای روتور میکروپمپ در نظر گرفتند. همچنین در این مطالعه یک ضریب مقیاس⁵ تعریف شد که مشخص گردید یک مقدار بحرانی برای آن وجود دارد که تا آن مقدار، تقارن جریان حفظ می‌شود و بعد از آن، تقارن مذکور از بین می‌رود. علاوه بر این نتایج نشان دادند که برای دستیابی به عملکرد بهتر، بایستی روتور دایروی و رینولدزهای پایین‌تر انتخاب شوند. داسیلوا و همکاران [5]، در پژوهش خود سه پیکربندی متفاوت 1، 2 و 3 شکل را برای ریزمجرای یک میکروپمپ لزجی با روتور منفرد دایروی در نظر گرفتند. آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلف هندسی را بر نرخ جریان عبوری و توان مصرفی روتور مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند برای میکروپمپ‌هایی با شکل 2 و 3 نرخ جریان عبوری نسبت به میکروپمپ 1 شکل بیشتر و توان مصرفی آنها نیز کمتر بود. ال-سعدی و همکاران [6]، یک شبیه‌سازی عددی برای تحلیل جریان یک سیال غیرنیوتنی حول روتور دایروی یک میکروپمپ لزجی انجام دادند. در این کار تأثیر پارامترهای هندسی مختلفی از جمله میزان خارج از مرکزی روتور، ارتفاع ریزمجرا و همچنین عدد رینولدز بر عملکرد میکروپمپ بررسی گردید. نتایج نشان دادند که عدد رینولدز یک پارامتر غالب روی تغییرات دبی خروجی می‌باشد. همچنین تنش سطح روتور و دبی خروجی از ریزمجرا با افزایش خارج از مرکزی روتور کاهش پیدا می‌کنند. باتینی و ال-نیمر [7]، مطالعه‌ای عددی برای بررسی تأثیر شرط لغزشی بر عملکرد یک میکروپمپ لزجی با تک روتور دایروی انجام دادند. همچنین تأثیر تغییر پارامترهای مختلفی مانند عدد رینولدز، خارج از مرکزی روتور و ضریب لغزش بر عملکرد میکروپمپ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش ضریب لغزش، هد میکروپمپ کاهش می‌یابد. جیانفنگ و جینگ [8]، به بررسی عددی ویژگی‌های جریان درون ریزمجرای یک میکروپمپ لزجی با دو روتور دایروی یکسان پرداختند. در این کار تأثیر پارامترهای هندسی مختلف از قبیل خارج از مرکزی روتورها، فاصله بین روتورها و همچنین عدد رینولدز بر میزان توان مصرفی و دبی خروجی از میکروپمپ بررسی گردید. نتایج نشان دادند که با افزایش رینولدز دبی خروجی از میکروپمپ کاهش و توان مصرفی آن افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش خارج از مرکزی روتورها دبی خروجی و توان مصرفی هر دو افزایش پیدا کردند. کانگ [9]، یک شبیه‌سازی عددی برای بررسی تأثیر میزان انحنای ریزمجرا بر عملکرد یک میکروپمپ لزجی با یک روتور دایروی منفرد انجام داد. نتایج نشان دادند در تمامی اعداد رینولدز بررسی شده، میکروپمپ‌هایی با ریزمجرای خمیده به مراتب دبی بیشتری نسبت به میکروپمپ‌هایی با ریزمجراهای مستقیم تولید می‌کنند. جیانفنگ و همکاران [10]، برای اولین بار تأثیر فرورفتگی زیر روتور را به صورت عددی بر عملکرد یک میکروپمپ لزجی با یک روتور دایروی منفرد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند هنگامی که ارتفاع فرورفتگی افزایش می‌یابد ابتدا دبی نیز افزایش و سپس کاهش می‌یابد به طوری که دبی در یک ارتفاع بهینه فرورفتگی مقدار بیشینه‌ای خواهد داشت.

مرور مختصر کارهای فوق نشان می‌دهد که اغلب کارهای انجام شده به بررسی تأثیر حضور یک روتور بر عملکرد میکروپمپ‌های لزجی پرداخته‌اند و در کارهای محدودی حضور دو روتور یا بیشتر مشاهده می‌شود. علاوه بر این در پژوهش‌هایی که دو روتور یا بیشتر حضور داشته‌اند نیز قطر روتورها یکسان بوده است و تأثیر همزمان قطر متفاوت روتورها بر عملکرد میکروپمپ لزجی که در این مقاله منظور دبی بی‌بعد خروجی از آن می‌باشد در هیچ یک

1- Electroosmotic (EO)
2- Electrohydrodynamics (EHD)
3- Magnetohydrodynamics (MHD)
4- viscous micropump

5- Scale coefficient

در این مقاله تأثیر تغییر پارامترهای هندسی بی بعد (1) تا (3) بر عملکرد میکروپمپ لزجی بررسی می‌شود. بدین منظور ε_1 و ε_2 در محدوده 0/1 تا 0/9، S_1 و S_2 در محدوده 1/5 تا 3/5 و نهایتاً L در محدوده 0/85 تا 4/5 تغییر می‌کنند.

بایستی ذکر گردد که در این شبیه‌سازی فرضیات ذیل در نظر گرفته شده است: 1- مساله آرام و پایا است، 2- سیال نیوتنی با خواص ثابت می‌باشد، 3- مساله به صورت دو بعدی در مختصات کارتزین x - y مدل شده است. در انتها قابل ذکر است که محدوده فیزیکی دبی خروجی در میکروپمپ‌های لزجی در حدود 10 تا 200 میلی‌متر مکعب بر ثانیه متغیر می‌باشد.

3- معادلات حاکم

قوانین حاکم بر این مساله به ترتیب بقای جرم، بقای اندازه حرکت در راستای x و بقای اندازه حرکت در راستای y بوده که به صورت معادلات دو بعدی (4)-(6) نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \quad (5)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \quad (6)$$

که در آن x و y به ترتیب مختصات کارتزین در جهت افقی و عمودی، u و v به ترتیب مولفه‌های سرعت در راستای x و y ، ρ چگالی سیال، p فشار و μ ضریب لزجت دینامیکی می‌باشند.

با توجه به اینکه در این مقاله تمامی محاسبات به صورت بی بعد گزارش می‌شود لذا برای این منظور ارتفاع ریزمجره (h) ، به عنوان مقیاس طولی و سرعت سطح روتور بزرگتر (U_s) ، به عنوان مقیاس سرعتی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این دو مقیاس، متغیرهای بی بعد حاکم بر این مساله مطابق رابطه (7) تعریف می‌شوند:

$$X = \frac{x}{h}, Y = \frac{y}{h}, U = \frac{u}{U_s}, V = \frac{v}{U_s}, P = \frac{p}{\rho U_s^2} \quad (7)$$

که در آن X و Y به ترتیب مختصات بی بعد در راستای افقی و عمودی، U و V به ترتیب سرعت‌های بی بعد در راستای X و Y و P فشار بی بعد هستند. اکنون با توجه به متغیرهای بی بعد تعریف شده در رابطه 7 معادلات (4-6) به صورت بی بعد (8-10) بازنویسی می‌شوند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (8)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (9)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (10)$$

که در آن عدد رینولدز (Re) براساس قطر روتور بزرگتر محاسبه می‌شود و در تمامی محاسبات برابر 1 در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی مربوط به این مساله به صورت شرط عدم لغزش برای سرعت روی دیواره‌های ریزمجره و فشار صفر در ورودی و خروجی آن، برای روتورها نیز سرعت معلوم به عنوان شرط مرزی سرعت و برای فشار سطح آن شرط مرزی نیومن لحاظ گردیده است. شرایط مرزی مذکور به صورت بی بعد، مطابق روابط (11)-(14) نوشته می‌شوند. بایستی ذکر گردد که شرایط مرزی بی بعد مربوط به سرعت روتورها یعنی روابط (13) و (14) برای هندسه نشان داده شده در شکل 1 ارائه شده است.

$$U = V = 0, \frac{\partial P}{\partial Y} = 0 \quad (11) \quad \text{دیواره‌های ریزمجره:}$$

از کارهای گذشته مورد مطالعه قرار نگرفته است. چنانچه واضح است حضور دو روتور تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای عملکردی میکروپمپ دارد. از جمله در این مقاله که هدف بررسی دبی خروجی است می‌توان این انتظار را داشت که با بکارگیری دو روتور، دبی نسبت به حالت تک روتوری افزایش بیشتری پیدا کند. همچنین در هیچ از یک پژوهش‌های قبل، میکروپمپ‌های لزجی از دیدگاه تولید آنتروپی تحلیل نشده‌اند. تحلیل آنتروپی در بسیاری از فرآیندهای مهندسی به دلیل دستیابی به حالت بهینه صورت می‌گیرد. در این مقاله نیز با استفاده از دیدگاه کمینه‌سازی تولید آنتروپی، حالت بهینه سیستم استخراج و پارامترهای هندسی بهینه آن معرفی شده‌اند.

چنانچه ذکر شد تأثیر همزمان تغییر قطر روتورها بر دبی خروجی و نیز بهینه‌سازی ساختار هندسی میکروپمپ لزجی از دیدگاه تولید آنتروپی در هیچ یک از کارهای پیشین مشاهده نشده است. در همین راستا برای مطالعه بیشتر اثرات تغییر قطر روتورها در میکروپمپ‌های لزجی، یک شبیه‌سازی عددی دو بعدی با استفاده از روش حجم محدود انجام شده است تا تأثیر پارامترهای هندسی مختلف را روی دبی خروجی از میکروپمپ و نیز تولید آنتروپی درون ریزمجرای آن مطالعه کند. در انتها نیز با استفاده از تحلیل کمینه‌سازی تولید آنتروپی پارامترهای هندسی بهینه استخراج و معرفی شدند.

2- فیزیک مساله و فرضیات

شماتیکی از فیزیک مساله حاضر و شرایط مرزی آن در شکل 1 نشان داده شده است. مساله مورد نظر شامل یک ریزمجرای تخت با ارتفاع (h) 3 میلی‌متر و طول (L_m) 50 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به شرایط جریان کاملاً توسعه یافته درون ریزمجره بایستی طول l_1 و l_2 که در شکل 1 نیز نشان داده شده است، حداقل هشت برابر قطر روتور بزرگتر باشند. بدین منظور طول l_1 برابر 20 میلی‌متر و طول l_2 نیز در تمامی محاسبات طوری انتخاب شده است که شرط توسعه یافتگی برقرار باشد.

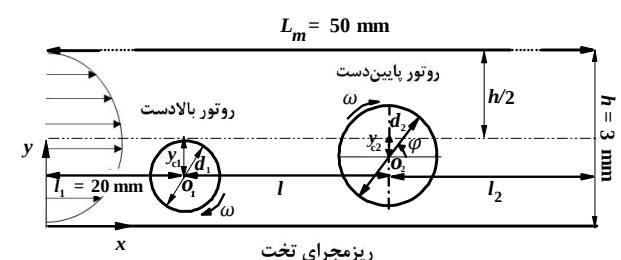
با توجه به شکل 1، درون ریزمجرای تخت نشان داده شده دو روتور دایروی با سرعت زاویه‌ای ω یکی با قطر d_1 و دیگری با قطر d_2 به صورت خارج از مرکز در نظر گرفته شده است. این دو روتور می‌توانند در فاصله‌های عمودی مختلفی از مرکز ریزمجره قرار گیرند. در همین راستا عدد بی بعد ε که نشان دهنده میزان خارج از مرکزی روتورها می‌باشد به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_1 = \frac{y_{c1}}{\frac{h}{2} - \frac{d_1}{2}}, \varepsilon_2 = \frac{y_{c2}}{\frac{h}{2} - \frac{d_2}{2}} \quad (1)$$

قابل ذکر است که برای تغییر قطر روتورها و نیز فاصله مرکز دو روتور از یکدیگر دو پارامتر بی بعد دیگر به ترتیب مطابق روابط (2) و (3) تعریف می‌شوند:

$$S_1 = \frac{h}{d_1}, S_2 = \frac{h}{d_2} \quad (2)$$

$$L = \frac{l}{h} \quad (3)$$



شکل 1 شماتیکی از فیزیک مساله حاضر

که در آن P نقطه مرکزی در هر حجم کنترل، Res_{ref} یک باقیمانده مرجع برای بی‌بعدسازی رابطه (20) و ε_r یک مقدار کوچک دلخواه می‌باشد. R_p نیز به صورت رابطه (21) تعریف می‌شود:

$$R_p = a_p \phi_p - \left(\sum a_{Nb} \phi_{Nb} + S_u \right) \quad (21)$$

چنانچه ذکر شد ε_r یک مقدار کوچک دلخواه بوده و معمولاً برابر دقت ماشین انتخاب می‌شود. در اینجا نیز آن برابر 10^{-8} لحاظ گردیده است. حل عددی هنگامی متوقف می‌شود که رابطه‌ی (20) برقرار گردد.

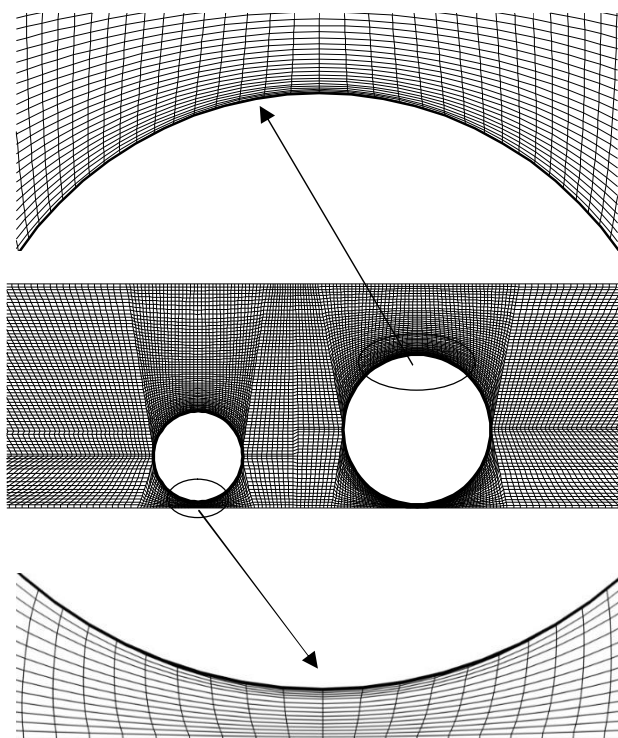
شایان ذکر است که در الگوریتم سیمیل این حل، ضریب زیرتخفیف $0/4$ برای متغیرهای تصحیح شده سرعت و $0/3$ برای متغیر تصحیح شده فشار در نظر گرفته شده است.

نمونه‌ای از شبکه ایجاد شده به روش جبری برای حالتی که $S_1 = 2/5$ ، $S_2 = 1/5$ ، $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ و $L = 1$ می‌باشد در شکل 2 ارائه گردیده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود به دلیل وضوح بیشتر، شبکه‌ی ایجاد شده اطراف استوانه‌ها به صورت مجزا و با بزرگ‌نمایی بیشتری نشان داده شده است.

برای اعتبارسنجی برنامه عددی نوشته شده، نتایج دبی خروجی از میکروپمپ در ε های مختلف به دست آمده در کار حاضر با نتایج شارچندرا [1] و عبدالقواد [3] مقایسه گردیده است. در این مقایسه یک میکروپمپ لزجی با یک روتور دایروی منفرد با وجود یک اختلاف فشار بین ورودی و خروجی ریزمجرای آن، در نظر گرفته شده است. این اختلاف فشار به صورت بی‌بعد ذیل تعریف و برابر 1 لحاظ گردیده است.

$$\Delta P^* = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho \theta^2 / d^2} \quad (22)$$

همچنین پارامترهای دیگر این مقایسه یعنی $Re = 1$ و $S_1 = S_2 = 2/5$ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مقایسه در جدول 1 و شکل 3 نشان داده شده است. چنان‌چه در این جدول و شکل مشاهده می‌شود تطابق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.



شکل 2 نمونه‌ای از شبکه جبری تولید شده با بزرگ‌نمایی اطراف استوانه‌ها

$$(12) \quad \text{ورودی و خروجی ریزمجرا:} \quad \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial V}{\partial X} = 0, P_{in} = P_{out} = 0$$

$$(13) \quad \text{روتور بالادست:} \quad U = \frac{d_1}{d_2} \sin \phi, V = \frac{d_1}{d_2} \cos \phi, \frac{\partial P}{\partial n} = 0$$

$$(14) \quad \text{روتور پایین‌دست:} \quad U = \sin \phi, V = \cos \phi, \frac{\partial P}{\partial n} = 0$$

لازم به ذکر است که در گزارش نتایج، دبی بدون بعد خروجی از ریزمجرا به صورت رابطه (15) محاسبه و استفاده شده است.

$$Q = \frac{q}{h U_s} \quad (q = \int_0^h u dy) \quad (15)$$

در مساله حاضر تولید آنتروپی فقط ناشی از اثرات اصطکاک جریان سیال می‌باشد که توسط رابطه (16) ارائه می‌شود [11].

$$S_f = \frac{\mu}{T_0} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (16)$$

که در آن T_0 دمای سیال درون ریزمجرا می‌باشد که برابر 300 کلوین در نظر گرفته شده است.

با توجه به متغیرهای بی‌بعد رابطه (7)، شکل بی‌بعد رابطه (16) به صورت ذیل بازنویسی می‌شود:

$$S_F = \phi_F \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] \quad (17)$$

که در آن ϕ_F به صورت رابطه بی‌بعد (18) تعریف و در این مقاله برابر 10^{-2} لحاظ شده است.

$$\phi_F = \frac{\mu U_s^2}{T_0 k} \quad (18)$$

که در آن k ضریب رسانندگی گرمایی سیال عامل می‌باشد.

4- روش حل عددی

دستگاه معادلات دوبعدی (4)-(6) با استفاده از روش حجم محدود¹ گسسته-سازی شده‌اند. در این روش معادلات روی یک حجم کنترل اختیاری انتگرال-گیری شده تا یک دستگاه معادلات جبری خطی به صورت رابطه (19) به دست آید.

$$a_p \phi_p = \sum a_{Nb} \phi_{Nb} + S_u \quad (19)$$

که در آن a_p و a_{Nb} ضرایب معادله انفصال، ϕ متغیر وابسته و S_u جمله چشمه می‌باشند.

در این حل برای برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمیل² استفاده شده است. با این وجود برای جلوگیری از اثر احتمالی شطرنجی شدن میدان فشار به دلیل استفاده از شبکه هم‌مکان، از میان‌بایی رای-چو [12] برای محاسبه مقادیر سرعت روی وجوه بهره گرفته شده است. جملات پخش با طرح تفاضل مرکزی³ گسسته‌سازی شده‌اند. همچنین برای ارزیابی جملات جابجایی در محل وجوه طرح هیبرید⁴ لحاظ گردیده است. دستگاه معادلات جبری به دست آمده با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری⁵ به صورت ADI حل شده است. در این الگوریتم ابتدا محاسبات میدان جریان با یک فشار حدسی شروع می‌شود. سپس معادلات ممنتم برای به دست آوردن میدان سرعت حل می‌شوند. با استفاده از این میدان سرعت، معادله پیوستگی برای تصحیح میدان‌های فشار و سرعت مشابه آنچه که در کار دورمال و ریتبی [13] آمده است حل می‌گردد. این حل تا رسیدن به معیار همگرایی ادامه پیدا می‌کند. معیار همگرایی حل عددی برای هر معادله به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$Res = \sum |R_p| / Res_{ref} < \varepsilon_r \quad (20)$$

1- Finite Volume Method (FVM)

2- SIMPLE algorithm

3- Central Differencing Scheme

4- Hybrid Scheme

5- Tridiagonal Matrix Algorithm (TDMA)

5- نتایج و بحث

5-1- بررسی تأثیر خروج از مرکزی روتورها (ε) بر دبی خروجی از میکروپمپ

یکی از پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر عملکرد میکروپمپ‌های لزجی فاصله مرکز روتور تا خط میانی ریزمجرای می‌باشد. همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز ذکر شد شکل بی‌بعد این پارامتر با عدد خارج مرکزی ε نشان داده شده است. در این کار هر چه ε بزرگتر باشد روتور به دیواره پایینی ریزمجرای نزدیکتر است. برای بررسی تأثیر ε بر دبی خروجی سه وضعیت متفاوت برای قطر روتورها در نظر گرفته شده است. در ادامه برای درک بهتر روند تغییرات دبی با ε، ابتدا الگوهای جریان حاصل درون ریزمجرای میکروپمپ تشریح و تفسیر می‌گردد سپس نمودار روند تغییرات دبی آورده می‌شود. بایستی ذکر گردد که به دلیل حجم بالای اشکال و نیز جذابیت بیشتر الگوهای جریان به دست آمده در میکروپمپی که روتور بالادست بزرگتر از روتور پایین‌دست می‌باشد فقط الگوهای این حالت مورد بحث قرار گرفته است.

شکل 4 خطوط جریان را اطراف روتورهای دایروی با $S_1 = 1/5$ و $S_2 = 2/5$ در εهای مختلف و وضعیت $L = 2$ نشان می‌دهد. چنانچه در شکل 4 (الف) نیز مشاهده می‌شود دو گردابه بزرگ اطراف روتور بالادست و یک گردابه کوچکتر بعد از روتور پایین‌دست نزدیک به دیواره بالایی ریزمجرای تشکیل شده است. وقتی عدد خارج از مرکزی روتورها کوچک است مقدار اندکی از سیال می‌تواند توسط روتورها به سمت خروجی ریزمجرای هدایت شود و بیشتر سیال پیرامون خود روتورها شروع به چرخش می‌کند. با چرخش روتور بالادست بایستی مقداری از سیال از فضای بین روتور و دیواره بالایی ریزمجرای عبور نماید. با توجه به اینکه سیال ممنتم کافی برای عبور از این فضا را ندارد مقداری از آن به دلیل غلبه فشار دچار برگشت می‌شود و یک گردابه بزرگ را قبل از روتور، نزدیک به دیواره بالایی ریزمجرای به وجود می‌آورد. سیال با عبور از فضای بین روتور بالادست و دیواره بالایی ریزمجرای، با یک انبساط ناگهانی مواجه می‌شود. طی این انبساط، سیال توانایی غلبه بر فشار مقابل را نداشته و با توجه به این عدم بازیابی فشار دچار یک جدایش بزرگ در عبور از روتور بالادست می‌شود. شبیه این مورد، هنگام عبور سیال از روتور پایین‌دست اتفاق می‌افتد. سیال با عبور از فضای بین روتور پایین‌دست و دیواره بالایی ریزمجرای، با یک انبساط ناگهانی روبرو می‌شود. به دلیل عدم توانایی سیال در غلبه بر فشار پیش رو، دچار جدایش می‌شود. همان‌طور که در شکل 4 (الف) نیز مشهود است، گردابه حاصل از این جدایش کوچکتر از گردابه‌های قبل است. این اختلاف در اندازه گردابه‌ها بدین دلیل است که سیال بعد از عبور از روتور پایین‌دست انبساط ناگهانی کوچکتری را تجربه می‌کند. همچنین سیال با عبور از روتور بالادست دارای ممنتم بیشتری می‌گردد. در نتیجه مقاومت بیشتری در مقابل جدایش نشان می‌دهد. لذا گردابه حاصل نیز کوچکتر ظاهر می‌شود.

شکل 4 (ب) خطوط جریان را اطراف روتورها در حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/2$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود گردابه بالادست نسبت به نظیرش در حالت قبل کوچکتر شده است. با افزایش عدد خارج از مرکزی، فضای بین روتور و دیواره بالایی ریزمجرای افزایش می‌یابد. در نتیجه از فشار این ناحیه کم شده و مقدار کمتری از سیال دچار برگشت می‌شود. گردابه بین دو روتور نیز نسبت به حالت قبل کوچکتر ظاهر شده است. با افزایش فضای عبور جریان، شیب انبساط کاهش می‌یابد. در نتیجه فشار روبروی سیال نیز کاهش یافته و بازیابی فشار در این ناحیه بهتر صورت می‌گیرد. لذا سیال، کمتر از روی دیواره جدا خواهد شد. گردابه پایین‌دست نیز

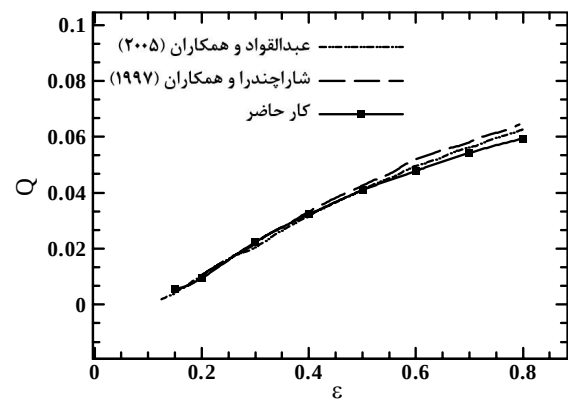
برای مطالعه استقلال حل از تعداد گره‌های شبکه، مساله مورد نظر در حالتی که $Re = 1$ ، $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/8$ و $S_1 = S_2 = 2$ می‌باشد در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول 2 نیز نشان داده شده است پنج شبکه با تعداد گره 90×30 ، 150×40 ، 200×50 ، 280×60 و 340×70 لحاظ گردیده است. چنانچه نتایج دبی خروجی از میکروپمپ نشان می‌دهد شبکه‌ای با تعداد گره 280×60 برای انجام محاسبات موردنظر کافی است.

جدول 1 مقایسه دبی خروجی در کار حاضر با نتایج شاراچندرا [1] و عبدالقواد [3]

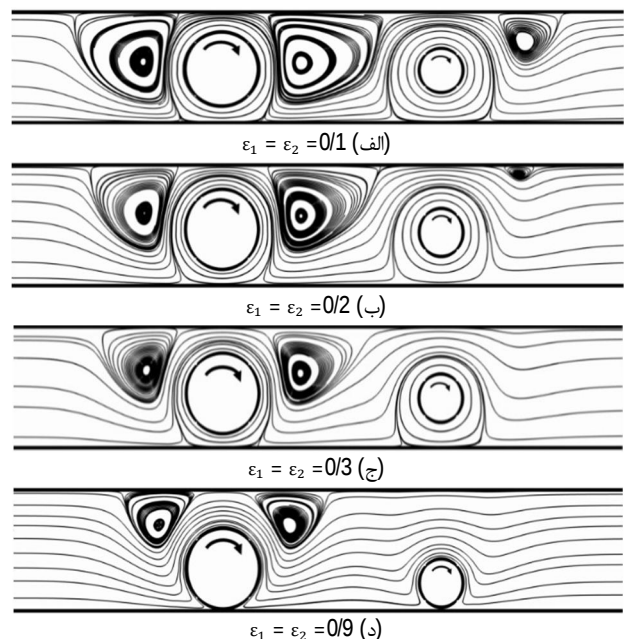
ε	شاراچندرا $\left(\frac{Q_1 - Q_{\text{کار حاضر}}}{Q_1} \right) \times 100$	عبدالقواد $\left(\frac{Q_1 - Q_{\text{کار حاضر}}}{Q_1} \right) \times 100$
0/3	0/76	3/89
0/4	-3/29	1/99
0/7	-6/19	-2/68
0/8	-8/18	-5/66

جدول 2 دبی خروجی به دست آمده در تعداد گره‌های مختلف

تعداد گره	340×70	280×60	200×50	150×40	90×30
Q	0/126	0/128	0/132	0/136	0/146



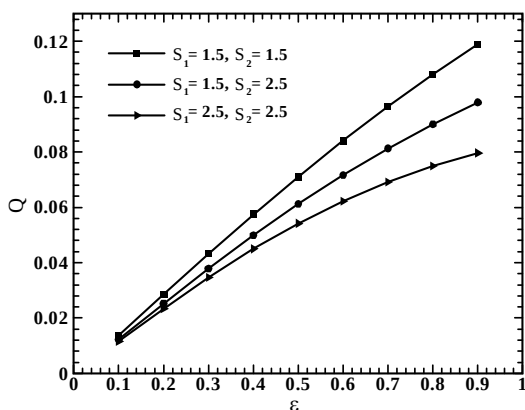
شکل 3 مقایسه نتایج دبی خروجی از میکروپمپی با تک روتور دایروی در کار حاضر با نتایج دیگران



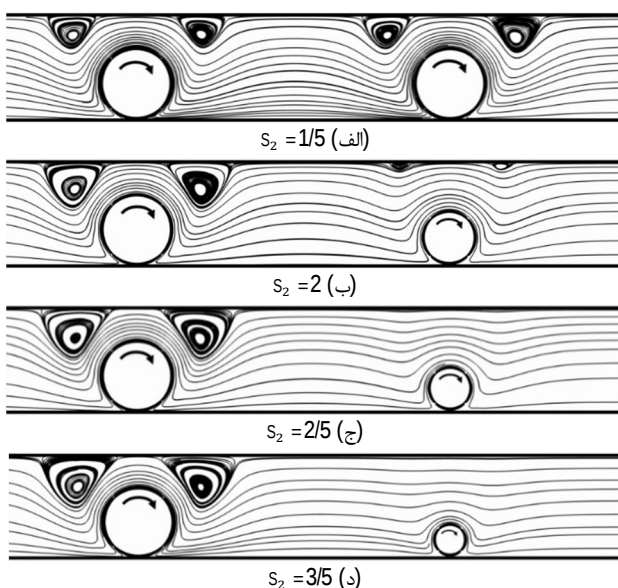
شکل 4 خطوط جریان اطراف روتورهای دایروی با $S_1 = 1/5$ و $S_2 = 2/5$ برای εهای مختلف و حالت $L = 2$

مربوطه کوچکتر خواهد بود. برای بررسی تأثیر S بر دبی، قطر روتور بالادست و پایین‌دست به ترتیب ثابت و متغیر لحاظ گردیده است. در ادامه الگوهای جریان و سپس نمودار روند تغییرات دبی ارائه شده است.

شکل 6 خطوط جریان را اطراف روتورهای دایروی با $S_1 = 1/5$ و S_2 های مختلف در حالت $L = 3$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ نشان می‌دهد. چنانچه در شکل 6 (الف) مشاهده می‌شود دو گردابه قبل و بعد از روتور بالادست و شبیه آن‌ها نیز اطراف روتور پایین‌دست ایجاد شده است. برای تفسیر پیدایش این گردابه‌ها می‌توان همان مطالب بیان شده در قسمت قبل را ارائه نمود. همان‌طور که در الگوی جریان شکل 6 (ب) نیز نمایش داده شده است دو گردابه مربوط به روتور بالادست تقریباً شبیه به حالت قبل می‌باشند. اما دو گردابه دیگر نسبت به نظیرشان در حالت قبل کوچکتر و ضعیف‌تر ظاهر شده‌اند. وقتی قطر روتور پایین‌دست کاهش می‌یابد در واقع فضای بیشتری برای عبور سیال از ناحیه فوقانی آن ایجاد می‌گردد. بنابراین از فشار و نیز شیب انبساطی فضای عبوری کاسته می‌شود. در نتیجه جدایش جریان از روی سطح دیواره کمتر شده و گردابه‌های حاصل نیز کوچکتر خواهند بود. با توجه به شکل 6 (ج)، دو گردابه اطراف روتور پایین‌دست به‌طور کامل ناپدید شده است.



شکل 5 تغییرات دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ در ε های مختلف و $L = 2$ در $S (= h/d)$ های مختلف (S متناسب با معکوس نسبت قطر روتورها است)



شکل 6 خطوط جریان درون ریزمچرا برای S_2 های مختلف و $S_1 = 1/5$ در حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ و $L = 3$

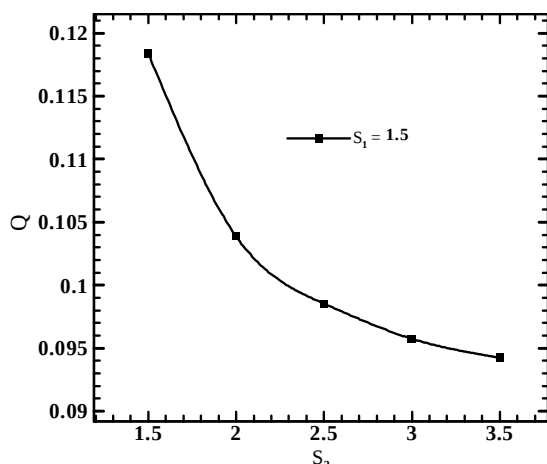
مشابه دو گردابه دیگر از نظیرش در حالت قبل کوچکتر و ضعیف‌تر شده است. در این مورد نیز با افزایش فضای عبور جریان بین روتور پایین‌دست و دیواره بالایی ریزمچرا، شیب انبساط کاهش می‌یابد. از طرف دیگر سیال دارای ممتنم بیشتری در عبور از روتور بالادست می‌شود. در نتیجه جدایش سیال کمتر شده و گردابه مربوطه نیز کوچکتر خواهد شد.

شکل 4 (ج) الگوهای جریان را در حالتی که $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/3$ است نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود دو گردابه اطراف روتور بالادست نسبت به نظیرشان در حالت‌های قبل کوچکتر و ضعیف‌تر شده‌اند. در این حالت نیز با افزایش عدد خارج از مرکزی، فضای عبور جریان افزایش یافته و از فشار آن کاسته می‌شود. در نتیجه جدایش سیال کمتر شده و گردابه حاصل کوچکتر خواهد بود. همان‌طور که شکل 4 (ج) نیز نشان می‌دهد گردابه پایین‌دست به‌طور کامل از بین رفته است. با افزایش فضای عبور جریان سیال انبساط کمتری را تجربه کرده لذا ممتنم کافی برای غلبه بر فشار ایجاد شده از انبساط فضای عبور جریان را دارد. به‌طوری که سیال از روی دیواره جدا نشده و گردابه‌ای در آن ناحیه ایجاد نشود. از این حالت به بعد با افزایش عدد خارج از مرکزی، الگوهای جریان حاصل تغییر قابل توجهی ندارند. چنانچه در شکل 4 (د) نیز مشاهده می‌شود برای حالت $\varepsilon_1 = 0/9$ و $\varepsilon_2 =$ ، الگوهای جریان به وجود آمده شبیه به شکل (ج) بوده و تفاوت محسوسی بین آن‌ها وجود ندارد.

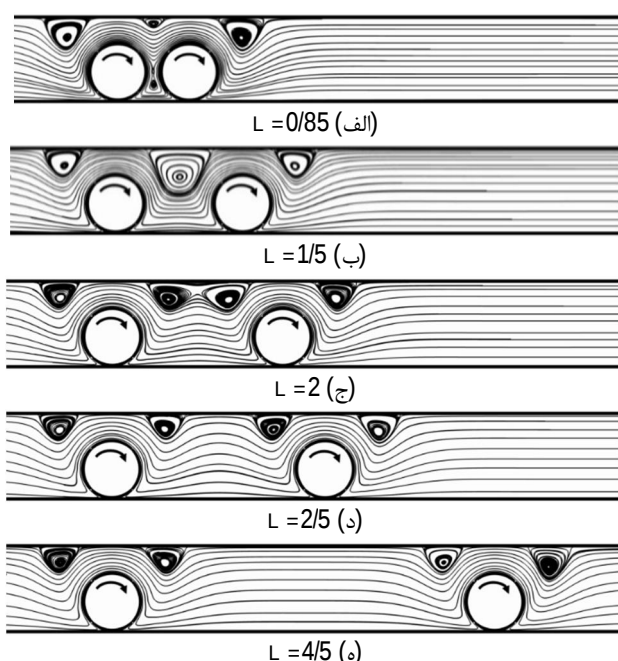
شکل 5 تغییرات دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ را در ε های مختلف و سه قطر متفاوت روتورها در حالت $L = 2$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود در ε های کم تغییر قطر روتورها تأثیر چندانی بر دبی خروجی ندارد. هنگامی که عدد خارج از مرکزی خیلی کم است بیشتر سیال پیرامون خود روتورها شروع به چرخش می‌کند. در نتیجه اختلاف محسوسی در دبی به وجود آمده از روتورهایی با قطر متفاوت وجود ندارد. با افزایش ε ، دبی نیز افزایش می‌یابد. وقتی روتورها به دیواره پایینی ریزمچرا نزدیک می‌شوند چنانچه در قبل نیز ذکر شد فضای بین روتورها و دیواره بالایی ریزمچرا افزایش پیدا می‌کند. لذا فشار و شیب انبساطی آن کاهش می‌یابد. در نتیجه سیال بیشتری می‌تواند به سمت خروجی ریزمچرا حرکت نماید و دبی حاصل افزایش خواهد یافت. چنانچه در این شکل نیز مشهود است روند افزایش دبی در سه حالت بررسی شده با یکدیگر تفاوت دارد. برای حالتی که $S_1 = S_2 = 1/5$ می‌باشد افزایش دبی به صورت تقریباً خطی و مقدار این افزایش نیز از دو حالت دیگر بیشتر است. در این حالت قطر روتورهای میکروپمپ از دو حالت دیگر بزرگتر می‌باشد و این امری کاملاً منطقی است که مقدار دبی خروجی نیز بیشتر باشد. در دو حالت دیگر روند افزایش دبی با عدد خارج از مرکزی به صورت نمایی صورت می‌گیرد. با توجه به این موضوع بیشترین اختلاف دبی‌ها در حالتی است که ε در بزرگترین مقدار خود یعنی $0/9$ باشد. بنابراین بیشترین دبی در میکروپمپ زمانی حاصل می‌شود که دارای روتورهایی با قطر و عدد خارج از مرکزی بیشینه باشد.

5-2- بررسی تأثیر نسبت معکوس قطر روتورها (S) بر دبی خروجی از میکروپمپ

یکی از عوامل موثر بر عملکرد میکروپمپ‌های لزجی اندازه روتورها می‌باشد. در این‌جا نیز تأثیر پارامتر هندسی مربوط به آن بر دبی خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه قبلاً نیز ذکر گردید پارامتر بی‌بعد مربوط به تغییر قطر روتورها با عدد بی‌بعد S نشان داده شده است. به دلیل این‌که S متناسب با معکوس قطر روتورها است بنابراین هرچه S بزرگ‌تر باشد قطر روتور



شکل 7 تغییرات دبی بی بعد خروجی در S_2 های مختلف برای حالت $S_1 = 1/5$, $L = 3$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$



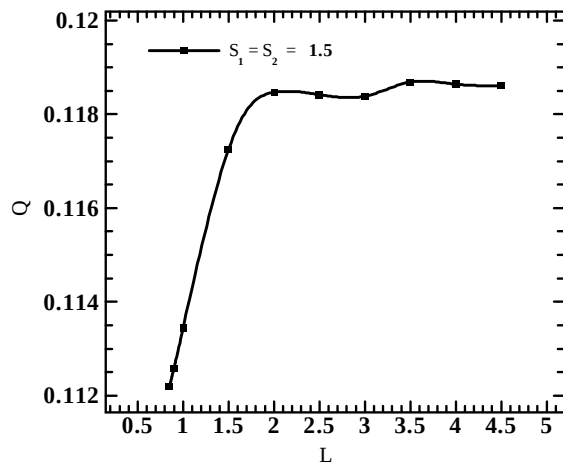
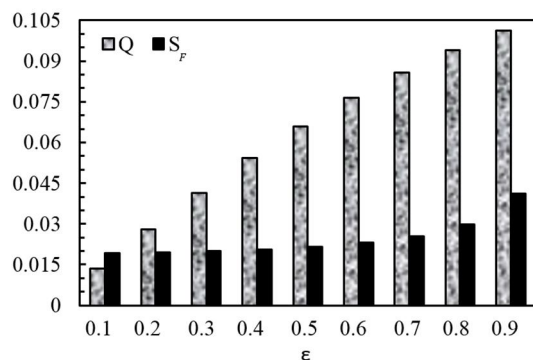
شکل 8 خطوط جریان اطراف روتورهایی با $S_1 = S_2 = 1/5$ در L های مختلف و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$

شکل 8 (ب) الگوهای جریان را برای حالتی که $L = 1/5$ می باشد نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود گردابه های قبل از روتور بالادست و بعد از روتور پایین دست مشابه نظیرشان در حالت قبل می باشند. اما گردابه بین دو روتور در این حالت از بین رفته است و گردابه دیگر روی دیواره بالایی ریزمجرا به طور قابل توجهی بزرگتر شده است. هنگامی که فاصله بین دو روتور افزایش می یابد کانال عبور سیال دیگر مفهومی نخواهد داشت. لذا جدایش سیال و تشکیل گردابه نیز در این مورد بی معنا می باشد. ولی گردابه روی دیواره بالایی ریزمجرا از نظیرش در حالت قبل بسیار بزرگتر ظاهر شده است. با افزایش L ، سیال با عبور از روتور بالادست انبساط بیشتری را تجربه می کند لذا مقدار بیشتری از سیال دچار جدایش می شود. در نتیجه گردابه حاصل بزرگتر می گردد. با افزایش بیشتر L همانند شکل (ج) گردابه بین دو روتور تبدیل به دو گردابه کوچکتر می شود. ولی چنانچه در این شکل نیز مشاهده می شود این دو گردابه به هم پیوسته می باشند. هنگامی که سیال به دلیل انبساط در عبور از روتور بالادست دچار جدایش می شود

با کاهش بیشتر قطر روتور در این حالت، ممنتم سیال برای غلبه فشار پیش رو کافی می باشد. بنابراین سیال در این مورد دچار جدایش نشده است و در نتیجه گردابه ای تشکیل نخواهد شد. با افزایش بیشتر قطر روتور پایین دست، تفاوت چندانی در الگوهای جریان به وجود آمده ایجاد نمی شود. مویید این مطلب الگوهای جریان شکل 6 (د) می باشد. همان طور که در این شکل مشهود است تفاوت محسوسی بین این حالت و حالت قبل مشاهده نمی شود. شکل 7 تغییرات دبی خروجی را برای S_2 های مختلف در حالت $S_1 = 1/5$, $L = 3$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود هنگامی که قطر روتور پایین دست کاهش پیدا می کند دبی خروجی نیز به صورت نمایی کاهش می یابد. در میکروپمپ های لزجی، روتورهای مربوطه علاوه بر اینکه عامل حرکت سیال هستند به صورت یک مقاومت هم در برابر جریان عمل می کنند. بنابراین با کاهش قطر روتور پایین دست نقش مقاومتی این روتور نسبت به عامل حرکت بودن آن افزایش بیشتری پیدا می کند. لذا با کاهش قطر این روتور از میزان دبی خروجی از میکروپمپ کاسته می شود. با توجه به شکل 7 می توان ادعا نمود که شیب تغییرات دبی در بازه های ابتدایی بسیار سریع تر از انتهای آن است. هنگامی که قطر یک روتور کاهش چشم گیری پیدا می کند نقش حرکتی آن در برابر روتور دیگر بسیار کمتر می شود. بنابراین می توان گفت که میزان دبی خروجی به شدت متأثر از روتور بالادست خواهد بود و روتور پایین دست تأثیر چندانی در تغییرات دبی نخواهد داشت.

3-5- بررسی تأثیر فاصله روتورها از یکدیگر (L) بر دبی خروجی از میکروپمپ

از جمله عوامل هندسی تأثیرگذار بر عملکرد میکروپمپ های لزجی فاصله بین روتورها می باشد. چنانچه بدیهی است بررسی این مورد فقط در مطالعاتی امکان پذیر است که دارای دو یا بیش از دو روتور باشند. در همین راستا، در این مطالعه نیز تأثیر پارامتر هندسی مربوط به فاصله بین دو روتور بر دبی خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به قسمت های قبل، پارامتر مربوطه با عدد بی بعد L نشان داده می شود. هر چه L بزرگتر باشد فاصله دو روتور از یکدیگر نیز بیشتر خواهد بود. همانند روند قبل ابتدا الگوهای جریان و سپس نمودار روند تغییرات دبی برحسب L آورده می شود. شکل 8 خطوط جریان را اطراف روتورهای دایروی با $S_1 = S_2 = 1/5$ در حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ برای L های مختلف نشان می دهد. شکل 8 (الف) خطوط جریان مربوط به $L = 0/85$ را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود چهار گردابه در این الگوی جریان ایجاد شده است. گردابه قبل از روتور بالادست به دلیل کافی نبودن انرژی در دسترس سیال در عبور از ناحیه فوقانی روتور و گردابه بعد از روتور پایین دست به دلیل انبساط ناگهانی سیال در عبور از این روتور تشکیل شده اند. هنگامی که سیال از روتور بالادست عبور می کند با یک انبساط ناگهانی مواجه می شود. در نتیجه سیال ممنتم کافی برای غلبه بر فشار مذکور را نداشته و از روی سطح بالایی ریزمجرا جدا می شود. بدین ترتیب یک گردابه بین دو روتور نزدیک به سطح بالایی ریزمجرا ایجاد می شود. با توجه به اینکه در این حالت L کوچک می باشد لذا فاصله دو روتور از یکدیگر بسیار کم است. بنابراین می توان فضای بین دو روتور را شبیه به یک کانال برای عبور سیال تصور نمود. اما چون سیال ممنتم کافی برای غلبه بر فشار را ندارد لذا مقداری از سیال قادر به عبور از آن نبوده و دچار برگشت می شود. سیال برگشتی تشکیل یک گردابه بین دو روتور نزدیک به دیواره پایینی ریزمجرا را خواهد داد.


 شکل 9 تغییرات دبی خروجی در L های مختلف در حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$


شکل 10 تغییرات تولید آنتروپی و دبی خروجی از میکروپمپ برای ε های مختلف در

 حالت $L = 2$ و $S_1 = S_2 = 2$

وقتی ε افزایش پیدا می‌کند تغییرات سرعت شدیدی در اطراف روتورها و به ویژه در ناحیه پایینی محصور بین آنها و دیواره پایینی ریزمجرای ایجاد می‌شود. همین موضوع سبب می‌گردد تا تولید آنتروپی با نزدیکی روتورها به سطح دیواره پایینی ریزمجرای افزایش یابد.

برای تحلیل بهتر نتایج حاصل از تولید آنتروپی، رابطه (23) که نشان دهنده نسبت شیب تغییرات تولید آنتروپی به دبی مربوطه در هر بازه تغییر پارامتر هندسی میکروپمپ می‌باشد به صورت ذیل تعریف می‌شود.

$$RS = \frac{S_{F|2} - S_{F|1}}{Q|2 - Q|1} \quad (23)$$

در رابطه (23) در هر بازه تغییرات پارامترهای هندسی به کار رفته، اعداد 1 و 2 به ترتیب به ابتدا و انتهای بازه اشاره دارند. به عنوان مثال در بازه تغییرات عدد خارج از مرکزی از 0/3 به 0/4، زیرنویس 1 مربوط به 0/3 و زیرنویس 2 مربوط به 0/4 می‌باشد. به عبارت دیگر $S_{F|1}$ و $Q|1$ به ترتیب تولید آنتروپی و دبی بی‌بعد مربوط به خروج از مرکزی 0/3 و $S_{F|2}$ و $Q|2$ مربوط به خروج از مرکزی 0/4 می‌باشند.

جدول 3 تغییرات RS را در بازه‌های مختلف تغییر پارامتر هندسی ε نشان می‌دهد. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود مقدار RS در بازه‌های ابتدایی بسیار کوچک است که این نشان می‌دهد شیب تغییرات تولید آنتروپی نسبت به دبی خروجی بسیار کم است. ولی با افزایش ε مقدار RS نیز افزایش می‌یابد به طوری که در بازه آخر جدول نیز مشاهده می‌شود این مقدار از یک هم فراتر رفته است. بنابراین می‌توان گفت تولید آنتروپی نسبت به افزایش دبی خروجی در تغییر مقادیر بزرگ ε حساسیت بیشتری نشان می‌دهد ولی در مقادیر کوچک آن نتیجه عکس می‌باشد.

بایستی بر فشار ناحیه فوقانی روتور پایین‌دست نیز غلبه کند. از طرفی چون هنوز فاصله بین دو روتور به اندازه‌ای بزرگ نیست که سیال پس از جدایش اول بتواند به مسیر خود ادامه دهد. لذا بلافاصله با جدایش دوم مواجه می‌شود. بنابراین دو گردابه به هم پیوسته در این ناحیه به وجود می‌آید. ولی با ادامه روند افزایشی L همانند شکل (د)، بدلیل فاصله در دسترس بیشتر، سیال فرصت دارد تا بعد از جدایش اول به مسیر خود ادامه دهد. سپس در مواجه با روتور پایین‌دست پایین‌دست دچار جدایش دوم گردد. لذا در این حالت دو گردابه حاصل از هم جدا می‌باشند. با افزایش بیشتر L تغییر محسوسی در الگوهای جریان مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که در شکل (ه) نیز نشان داده می‌شود الگوی جریان و تشکیل گردابه‌ها همانند شکل (د) می‌باشد.

شکل 9 روند تغییرات دبی را در L های مختلف در حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ و $S_1 = S_2 = 1/5$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در ابتدا با افزایش L دبی خروجی نیز با شیب تندی افزایش پیدا می‌کند. سپس روند تغییرات دبی کند و می‌توان گفت تقریباً ثابت شده است. با توجه به الگوهای جریان ارائه شده در قبل می‌توان مشاهده نمود بعد از $L = 2$ طرح گردابه‌های به وجود آمده یکسان می‌باشد. وقتی گردابه‌های اطراف روتور بالادست مستقل از گردابه‌های حاصل پیرامون روتور پایین‌دست می‌شوند می‌توان گفت که هر یک از روتورها به طور مستقل عمل می‌کنند. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که دبی خروجی بعد از یک L خاص که در این جا مقدار 2 می‌باشد مستقل از افزایش آن گردد.

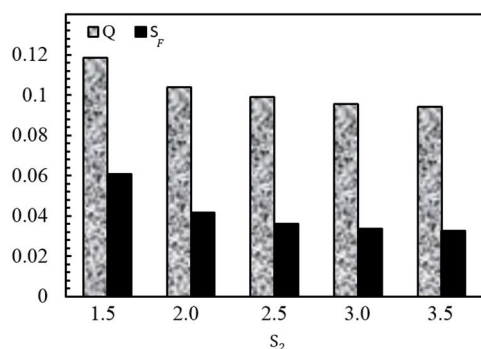
4-5- تحلیل آنتروپی

اکثر فرآیندهای مهندسی در معرض افت‌های اجتناب‌ناپذیری نظیر اصطکاک و حرارتی می‌باشند. با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک می‌توان میزان تولید آنتروپی و این افت‌های اجتناب‌ناپذیر را کمینه کرد. کمینه‌سازی تولید آنتروپی¹ یک نگرش ترمودینامیکی جدید برای بهینه‌سازی سیستم‌های مهندسی به منظور دستیابی به بالاترین بازده ممکن می‌باشد. در موضوع میکروپمپ‌های لزجی، همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره گردید تاکنون تحقیقی با استفاده از مفهوم کمینه‌سازی تولید آنتروپی مشاهده نشده است. لذا در این کار با توجه به این مفهوم ترمودینامیکی، تولید آنتروپی به‌ازای تغییر پارامترهای هندسی مختلف در میکروپمپ لزجی محاسبه گردید. در ادامه با تغییر هر کدام از پارامترهای هندسی قبل یعنی ε ، S و L تولید آنتروپی محاسبه و با دبی خروجی مربوطه در یک نمودار میله‌ای مقایسه شده است.

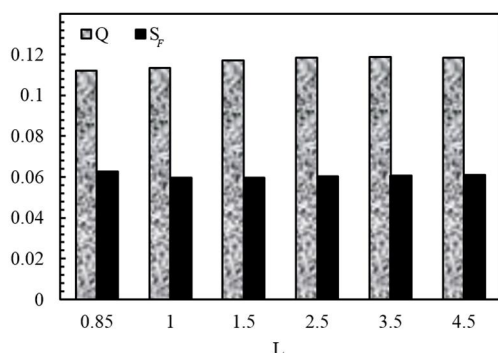
4-5-1- بررسی تأثیر خروج از مرکزی روتورها (ε) بر تولید آنتروپی درون

میکروپمپ

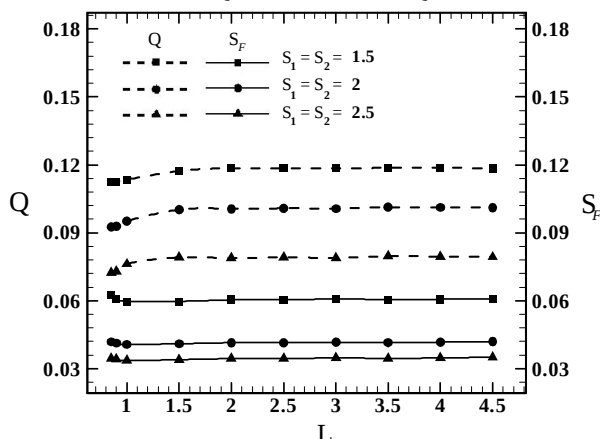
شکل 10 روند تغییر تولید آنتروپی و نیز دبی خروجی از میکروپمپ را در ε های مختلف در حالت $L = 2$ و $S_1 = S_2 = 2$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در قبل نیز نشان داده شد با افزایش ε ، دبی خروجی از میکروپمپ نیز افزایش پیدا می‌کند. شکل 10 نیز تایید کننده دوباره همین موضوع است. اما روند تغییر تولید آنتروپی با افزایش ε متفاوت با روند تغییر دبی مربوطه می‌باشد. چنانچه در شکل 10 مشاهده می‌شود در ابتدا با افزایش ε تا حدود 0/5، روند افزایش تولید آنتروپی بسیار کند است. با افزایش ε بعد از این مقدار، افزایش تولید آنتروپی قابل توجه شده به طوری که با تغییر ε از 0/8 به 0/9 حدود 38 درصد افزایش در تولید آنتروپی مشاهده می‌شود.



شکل 11 تغییرات تولید آنتروپی و دبی خروجی از میکروپمپ در S_2 های مختلف و حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ و $L = 3$ ، $S_1 = 1/5$



شکل 12 تغییرات تولید آنتروپی و دبی خروجی از میکروپمپ در L های مختلف و حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ و $S_1 = S_2 = 1/5$



شکل 13 روند تغییر دبی و تولید آنتروپی در L و S های مختلف و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$

نکته قابل توجه در همین بازه این است که کاهش تولید آنتروپی تقریباً برابر افزایش دبی می‌باشد که این موضوع نشان از حساسیت شدید تولید آنتروپی به تغییر L در مقادیر پایین آن دارد، اما در بازه‌های بعدی جدول 5 تقریباً تولید آنتروپی وجود نداشته و ثابت می‌شود.

5-5- انتخاب پارامترهای هندسی بهینه

بعد از ارائه نتایج مربوط به دبی و نیز تحلیل آنتروپی بایستی پارامترهای هندسی بهینه برای میکروپمپ موردنظر معرفی گردد. در این قسمت هدف یافتن یک میکروپمپ لزجی با کمترین افت اصطکاکی ممکن در عین دارا بودن یک دبی خروجی بیشینه می‌باشد.

با توجه به شکل 13 مشاهده می‌شود بعد از $L = 1$ تقریباً روند تغییر تولید آنتروپی برای هر سه مقدار مختلف S_1 و S_2 ثابت شده است، بنابراین می‌توان

جدول 3 RS در بازه‌های مختلف تغییر ε

ε	0/1-0/2	0/3-0/4	0/5-0/6	0/7-0/8	0/8-0/9
RS	0/016	0/053	0/14	0/53	1/58

جدول 4 RS در بازه‌های مختلف تغییر S_2

S_2	1/5-2	2-2/5	2/5-3	3-3/5
RS	1/31	1/16	0/68	0/8

جدول 5 RS در بازه‌های مختلف تغییر L

L	0/85-1	1-1/5	1/5-2/5	2/5-3/5
RS	-2/25	-0/003	0/63	0/32

5-4-2- بررسی تأثیر نسبت معکوس قطر روتورها (S) بر تولید

آنتروپی درون میکروپمپ

شکل 11 روند تغییر تولید آنتروپی و دبی خروجی از میکروپمپ را در S_2 های مختلف و حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ و $L = 3$ ، $S_1 = 1/5$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش S_2 دبی خروجی کاهش می‌یابد که دلیل آن در قبل ذکر گردید. روند تغییر تولید آنتروپی نیز همانند دبی حالت نزولی دارد. هر چه قطر روتور پایین دست کوچکتر می‌شود از گرادیان‌های سرعت نیز کاسته می‌گردد. این نیز باعث کاهش تولید آنتروپی درون میکروپمپ می‌شود.

جدول 4 تغییرات RS را در بازه‌های مختلف تغییر پارامتر هندسی S_2 نشان می‌دهد. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود مقدار RS در بازه‌های اولیه بیشتر از یک است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات تولید آنتروپی نسبت به تغییرات دبی خروجی از حساسیت بیشتری برخوردار است. ولی با افزایش S_2 مقدار RS از یک کمتر می‌شود. یعنی شیب تغییرات دبی خروجی از تولید آنتروپی بیشتر می‌گردد.

5-4-3- بررسی تأثیر فاصله روتورها از یکدیگر (L) بر تولید آنتروپی

درون میکروپمپ

شکل 12 تغییرات تولید آنتروپی و دبی را برای مقادیر مختلف L در حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/9$ و $S_1 = S_2 = 1/5$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش L دبی خروجی نیز افزایش پیدا می‌کند. اما این افزایش محدود بوده به‌طوری که بعد از $L = 1/5$ تقریباً دبی ثابت می‌شود و به افزایش آن حساسیت نشان نمی‌دهد. با توجه به شکل 12 ممکن است به نظر آید که تولید آنتروپی نیز نسبت به تغییر L حساس نمی‌باشد. اما با کمی دقت می‌توان متوجه تغییر تولید آنتروپی در هنگام افزایش L شد. هنگامی که فاصله بین دو روتور کم است گرادیان‌های سرعت اطراف روتورها و به ویژه بین دو روتور به شدت افزایش پیدا می‌کند که این موضوع باعث افزایش تولید آنتروپی می‌گردد. اما هنگامی که L افزایش می‌یابد از شدت گرادیان‌های به وجود آمده به ویژه در ناحیه بین دو روتور کاسته می‌شود و این موضوع به طور طبیعی باعث کاهش تولید آنتروپی خواهد شد.

جدول 5 تغییرات RS را در L های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر این جدول، می‌توان به جذابیت بیشتر تغییرات آن نسبت به دو جدول قبل پی برد. همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌شود روند تغییر تولید آنتروپی با دبی مربوطه در بعضی موارد متفاوت است. در همان بازه ابتدایی جدول 5 که مقدار RS منفی است نشان می‌دهد که روند تغییر تولید آنتروپی و دبی معکوس می‌باشد. یعنی با افزایش L در بازه مذکور میزان تولید آنتروپی کاهش ولی میزان دبی خروجی افزایش می‌یابد.

پس برای داشتن کمترین افت اصطکاکی بهتر است مقدار S_2 از 2/5 به بعد انتخاب گردد. البته عدد مشخص آن با توجه به نمودار دبی معین خواهد شد. همان‌طور که در شکل 15 نیز مشاهده می‌شود روند تغییرات دبی با S_2 به صورت نزولی است. بنابراین عدد 2/5 می‌تواند به عنوان مقدار بهینه برای S_2 لحاظ گردد. البته بایستی ذکر گردد اگر میزان دبی کمتری موردنظر باشد می‌توان مقادیر کمتری را هم به عنوان مقدار بهینه انتخاب نمود. از طرف دیگر اگر دبی مطلوب، بیشتر از دبی به دست آمده در مقدار بهینه این مقاله باشد بایستی مقادیر بزرگتری از S_2 در نظر گرفته شود.

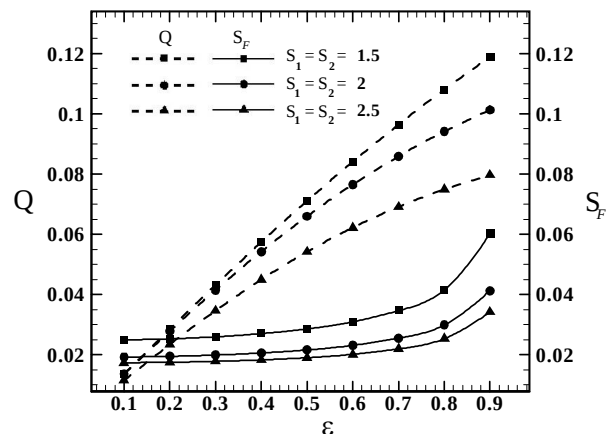
6- نتیجه گیری

در این مقاله یک شبیه‌سازی عددی برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی یک میکروپمپ لزجی بر دبی خروجی و تولید آنتروپی صورت گرفته است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل گردیده است. در این حل جملات پخش با طرح تفاضل مرکزی گسسته‌سازی شده‌اند. همچنین برای ارزیابی جملات جابه‌جایی در محل وجوه از طرح هیبرید و برای برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. محاسبات برای سه پارامتر بی‌بعد هندسی میکروپمپ یعنی خارج از مرکزی (ε) و اندازه روتورها (S) و نیز فاصله آنها از یکدیگر (L) به ترتیب در محدوده 0/1 تا 0/9، 1/5 تا 3/5 و 0/85 تا 4/5 انجام شده است. نتایج حاصل از این حل نشان می‌دهد الگوهای خطوط جریان به شدت به سه پارامتر هندسی مذکور وابسته هستند به‌طوری که اندازه و تعداد گردابه‌های به وجود آمده درون ریزمجا در غالب موارد با یکدیگر متفاوت ظاهر شده‌اند. با افزایش ε ، دبی خروجی از میکروپمپ نیز افزایش پیدا می‌کند. البته روند این افزایش در میکروپمپ‌های بررسی شده با یکدیگر تفاوت دارد. برای میکروپمپی با روتورهای بزرگتر دبی به‌صورت تقریباً خطی ولی در دو حالت دیگر به صورت نمایی افزایش پیدا می‌نماید. همچنین قابل ذکر است در ε های کم تغییر قطر روتورها تأثیر چندانی بر دبی خروجی ندارد ولی با افزایش ε اختلاف بین دبی‌ها قابل توجه می‌گردد. بنابراین بیشترین دبی در میکروپمپ زمانی حاصل می‌شود که دارای روتورهایی با قطر و عدد خارج از مرکزی بیشینه باشد. در بررسی تأثیر تغییرات S بر دبی خروجی مشاهده گردید در حالی که قطر روتور بالادست ثابت در نظر گرفته شده است با کاهش قطر روتور پایین‌دست، دبی خروجی نیز به صورت نمایی کاهش می‌یابد. اما میزان تغییرات دبی در بازه‌های ابتدایی تغییر S بسیار سریع‌تر از انتهای آن می‌باشد. آخرین پارامتر هندسی مورد بررسی فاصله بین دو روتور می‌باشد. هنگامی که L افزایش می‌یابد در ابتدا دبی خروجی نیز با شیب تندی افزایش پیدا می‌کند سپس روند تغییرات دبی کند و می‌توان گفت تقریباً ثابت شده است. در تحلیل آنتروپی نیز تأثیر پارامترهای هندسی فوق بر تولید آنتروپی بررسی گردید. برای تحلیل بهتر نتایج این قسمت، نسبتی با نماد RS که نشان دهنده شیب تغییرات تولید آنتروپی به دبی مربوطه در هر بازه تغییر پارامتر هندسی میکروپمپ می‌باشد تعریف گردید. نتایج به دست آمده نشان داد با افزایش ε تا حدود 0/5، روند افزایش تولید آنتروپی بسیار کند است. با افزایش ε بعد از این مقدار، افزایش تولید آنتروپی قابل توجه شده به‌طوری که با تغییر ε از 0/8 به 0/9 حدود 38 درصد افزایش در تولید آنتروپی مشاهده شد. محاسبات RS برای این پارامتر نشان می‌دهد که تولید آنتروپی نسبت به افزایش دبی در تغییرات مقادیر بزرگ ε حساس‌تر ولی در مقادیر کوچک آن برعکس می‌باشد. در بررسی تأثیر پارامتر S بر تولید آنتروپی، مشاهده شد با کاهش قطر روتور پایین‌دست در حین ثابت نگهداشتن قطر روتور بالادست تولید آنتروپی نیز

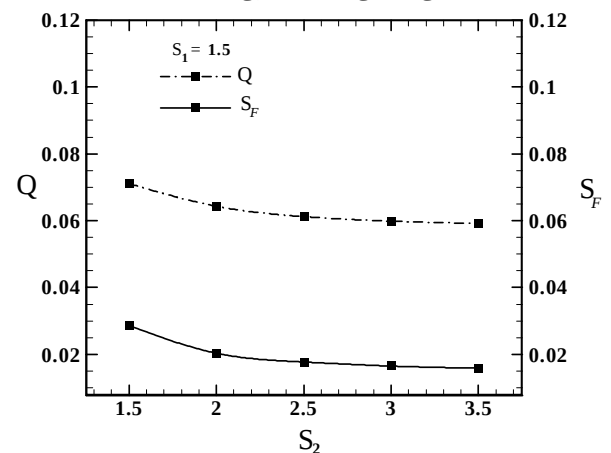
نتیجه گرفت برای هر میکروپمپی با روتورهای مختلف بعد از $L=1$ تولید آنتروپی به حداقل رسیده است. اکنون بایستی تغییرات دبی نسبت به L نیز بررسی گردد تا بتوان دبی بیشینه را پیدا نمود. با توجه به شکل 13، دبی بعد از $L=1/5$ تغییر چندانی در مقدار خود نشان نمی‌دهد. بنابراین می‌توان $L=2$ را به عنوان پارامتر هندسی بهینه برای فاصله بین دو روتور در میکروپمپ‌های لزجی معرفی نمود.

اکنون بایستی مقدار بهینه ε نیز معرفی شود. برای دستیابی به این هدف، همانند شکل 14، تغییرات دبی خروجی و تولید آنتروپی در ε های مختلف و مقدار بهینه L بررسی شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود تولید آنتروپی قبل از خروج از مرکزی 0/5 تقریباً ثابت بوده و به میزان کمی افزایش یافته است. بعد از میزان مذکور با افزایش قابل توجهی در میزان تولید آنتروپی مواجه خواهیم شد. اکنون برای معرفی پارامتر بهینه ε بایستی روند تغییرات دبی نیز در ε های مختلف در نظر گرفته شود. با توجه به شکل 14، روند تغییر دبی بر حسب ε به صورت تقریباً یکنواخت می‌باشد. بنابراین عامل تعیین کننده در انتخاب ε بهینه تغییرات تولید آنتروپی خواهد بود. در همین راستا $\varepsilon=0/5$ به عنوان پارامتر بهینه خارج از مرکزی میکروپمپ لحاظ گردیده است.

برای انتخاب آخرین پارامتر هندسی بهینه یعنی S ، حالتی را که $S_1=1/5$ و دو پارامتر هندسی دیگر در مقادیر بهینه خود قرار داشتند در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل 15 نیز نشان داده شده است تغییرات تولید آنتروپی قبل از $S_2=2/5$ نسبت به بعد از آن از شدت بیشتری برخوردار است.



شکل 14 روند تغییر دبی خروجی و تولید آنتروپی در ε و S های مختلف و $L=2$



شکل 15 روند دبی و تولید آنتروپی در S_2 های مختلف و $L=2$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0/5$

کاهش پیدا می‌کند. جدول RS نشان می‌دهد در بازه‌های اولیه آن، تغییرات تولید آنتروپی نسبت به تغییرات دبی خروجی از حساسیت بیشتری برخوردار است ولی در بازه‌های انتهایی نتیجه عکس گردید. نتایج تولید آنتروپی آخرین پارامتر مورد بررسی یعنی L نشان داد که در مقادیر کوچک آن تولید آنتروپی نیز دارای مقدار بیشتری است ولی با افزایش L تولید آنتروپی کاهش می‌یابد و از مقدار 2 به بعد تقریباً ثابت می‌گردد. جدول RS نشان می‌دهد در بازه‌ی اولیه با توجه به مقدار منفی RS روند تغییر تولید آنتروپی و دبی معکوس می‌باشد. نکته قابل توجه در همین بازه این است که کاهش تولید آنتروپی حدود 4 برابر بیشتر از افزایش دبی می‌باشد که این موضوع نشان از حساسیت شدید تولید آنتروپی به تغییر L در مقادیر پایین آن دارد. اما در بازه‌های بعدی جدول تقریباً تولید آنتروپی وجود نداشته و ثابت می‌شود. در بخشی از این مقاله با توجه به نتایج حاصل، پارامترهای هندسی بهینه نیز برای میکروپمپ مورد مطالعه استخراج گردید. در این مقاله مقادیر $L = 2$ ، $\varepsilon = 0/5$ ، $S_1 = 1/5$ و $S_2 = 2/5$ به عنوان پارامترهای هندسی بهینه میکروپمپ لزجی معرفی و انتخاب شده‌اند.

7- فهرست علائم

a	ضریب معادله انفصال
d	قطر روتور دایروی (m)
h	ارتفاع ریز مجرای میکروپمپ (m)
k	ضریب رسانندگی سیال عامل ($W/m^{\circ}C$)
l	فاصله بین دو روتور (m)
L	پارامتر بی‌بعد مربوط به فاصله دو روتور
L_m	طول ریزمجرای میکروپمپ (m)
n	جهت بردار عمود بر دیواره
p	فشار (Nm^{-2})
P	فشار بی‌بعد
q	دبی خروجی از میکروپمپ (m^3s^{-1})
Q	دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ
Re	عدد بی‌بعد رینولدز
Res	باقیمانده حل عددی
RS	نسبت شیب تغییرات تولید آنتروپی به دبی ($kgm^{-4}s^{-2}K$)
S	پارامتر بی‌بعد مربوط به تغییر قطر روتورها
S_f	نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی ($kgm^{-1}s^{-3}K$)
S_F	نرخ بی‌بعد تولید آنتروپی اصطکاکی
S_u	جمله چشمه در معادله انفصال
T	دما (K)
u	سرعت در راستای x (ms^{-1})
U	سرعت بی‌بعد در راستای X
U_s	سرعت سطح روتور بزرگتر (ms^{-1})
v	سرعت در راستای y (ms^{-1})
V	سرعت بی‌بعد در راستای Y
x	مختصه طولی کارتزین در راستای افق (m)
X	مختصه بی‌بعد در راستای افق
y	مختصه طولی کارتزین در راستای عمود (m)
Y	مختصه بی‌بعد در راستای عمود
y_c	فاصله مرکز روتور تا خط افقی مار بر مرکز میکروپمپ (m)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
θ	ضریب لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ω	سرعت زوایای روتورها ($rads^{-1}$)
ε	پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها
ε_r	کمترین خطای حل عددی
φ	زاویه روتور دایروی (rad)
φ_F	پارامتر بی‌بعد در معادله تولید آنتروپی
$\emptyset$	متغیر وابسته در معادله انفصال

بالانویس‌ها

* مقدار بی‌بعد

زیرنویس‌ها

1	روتور بالادست
2	روتور پایین‌دست
F	اصطکاکی
in	ورودی
out	خروجی
ref	مرجع

8- مراجع

- [1] M.C. Sharatchandra, M. Sen, and M. Gad-el-Hak, Navier-Stokes Simulations of a Novel Micropump, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp 372-382, 1997.
- [2] P. Phutthavong and I. Hassan, Transient performance of flow over a rotating object placed eccentrically inside a microchannel-numerical study, *Journal of Microfluid Nanofluid*, pp. 71-85, 2004.
- [3] M. Abdelgawad, I. Hassan, N. Esmail and P. Phutthavong, Numerical Investigation of Multistage Viscous Micropump Configurations, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127, pp. 734-742, 2005.
- [4] F. Yang, S.-H. Liu, X.-L. Tang, Y.-L. Wu, Numerical Study on Transverse Axis Rotary Viscous Pump and Hydropulser Mechanism, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, Vol. 7, pp. 263-268, 2006.
- [5] A.K. da Silva, M.H. Kobayashi, C.F.M. Coimbra, Optimal theoretical design of 2-D microscale viscous pumps for maximum mass flow rate and minimum power consumption, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, PP. 526-536, 2007.
- [6] H. El.Sadi, N. Esmail and I. Hassan, Numerical Modeling of Non-Newtonian Flow in Viscous Micropump, *Journal of the Society of Rheology*, Vol. 36, pp. 51-58, 2008.
- [7] K. M. Bataineh, M. A. Al-Nimr, 2D Navier-Stokes Simulations of Microscale Viscous Pump With Slip Flow, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 131, pp. 51105-51106, 2009.
- [8] L. Jianfeng, D. Jing, Flow dynamical behaviors and characteristics of aligned and staggered viscous pumps, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2092-2099, 2010.
- [9] D. J. Kang, Effects of channel curvature on the performance of viscous micro-pumps, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, pp. 3733-3740, 2014.
- [10] L. Jianfeng, D. Jing, Y. Jianping, Y. Xiaoxi, Steady dynamical behaviors of novel viscous pump with groove under the rotor, *International Journal of heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 170-176, 2014.

[13] J. P. Van Doormaal and G. D. Raithby, Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, *Numer. Heat Transfer*, Vol.7, pp. 147–163, 1984.

[11] A. Bejan, *Entropy generation through heat and fluid flow*, John Wiley & Sons, 1994.

[12] C. M. Rhie and W. L. Chow, Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil With Trailing Edge Separation, *AIAA J.*, Vol.21, pp. 1525–1532, 1983.