



تحلیل اثرات پارامترهای هندسی و عملکردی یک میکروپمپ لزجی با رویکرد کمینه‌سازی تولید آنتروپی به روش لئیس-بولتزمن

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: 02 آذر 1394

پذیرش: 12 بهمن 1394

ارائه در سایت: 08 اسفند 1394

کلید واژگان:

میکروپمپ لزجی

پارامترهای هندسی و عملکردی

روتور دایروی

کمینه‌سازی تولید آنتروپی

روش لئیس-بولتزمن

چکیده

در مقاله حاضر یک مطالعه عددی برای تحلیل اثرات پارامترهای هندسی و عملکردی یک میکروپمپ لزجی با رویکرد کمینه‌سازی تولید آنتروپی به روش لئیس-بولتزمن انجام شده است. در بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی L و عملکردی ΔP^* مشخص شد که در تمامی ΔP^* های بررسی شده، دو محدوده $1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ به عنوان محدوده‌های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و از طرف دیگر محدوده‌های $1.1 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.9$ نیز از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها به عنوان محدوده‌های بهینه مطرح شدند. با توجه به هم‌پوشانی کامل محدوده‌های بهینه‌ی کمینه تولید آنتروپی با دیدگاه کمینه توان مصرفی، می‌توان همان محدوده‌های ذکر شده از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی را به عنوان بهینه‌ترین محدوده‌ها انتخاب نمود. نتایج تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی L و عملکردی Re نشان داد که در تمامی Re های بررسی شده، دو محدوده $1.1 < L < 1.5$ و $4.5 < L < 4.9$ به عنوان محدوده‌های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و محدوده‌های $1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ نیز از دیدگاه کمینه توان مصرفی به عنوان محدوده‌های بهینه مطرح می‌باشند. بنابراین محدوده مشترک این دو دیدگاه یعنی $1.2 < L < 1.5$ و $4.5 < L < 4.8$ می‌تواند به عنوان بهینه‌ترین محدوده انتخاب شود. در رابطه با تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی ε و پارامترهای عملکردی ΔP^* و Re معین شد که در تمامی Re ها و ΔP^* های بررسی شده، محدوده $0.1 < \varepsilon < 0.5$ به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی و نیز توان مصرفی روتورها انتخاب می‌شود.

Analysis of effects of geometrical and operational parameters of viscous micropump with the approach to entropy generation minimization by LBM

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 23 November 2015

Accepted 01 February 2016

Available Online 27 February 2016

Keywords:

Viscous Micropump

Geometrical and Operational Parameters

Circular Rotor

Entropy Generation Minimization

Lattice Boltzmann Method

ABSTRACT

In the present paper, a numerical study is performed to analyze the geometrical effects and operational parameters of viscous micropump based on the Entropy Generation Minimization by Lattice Boltzmann Method. Simultaneous examinations of the geometrical parameter L , and operational parameter ΔP^* , showed that in all applied ΔP^* , two ranges of $1.2 < L < 1.6$ and $4.4 < L < 4.8$ based on the entropy generation minimization and two ranges of $1.1 < L < 1.6$ and $4.4 < L < 4.9$ according to the minimum required power of rotors are identified as the optimum geometrical length scales. Due to the complete overlap of optimum ranges of the EGM minimization with that of the minimum power of rotors, the range associated with the EGM viewpoint is selected as the optimal range. Results of the effect of change in the geometric parameter L and operational parameters Re showed that in all considered Re , two ranges of $1.1 < L < 1.5$ and $4.5 < L < 4.9$ according to the EGM viewpoint and two ranges of $1.2 < L < 1.6$ and $4.4 < L < 4.8$ based on the minimum power of rotors viewpoint are introduced as the optimum ranges. Therefore, the common range of both viewpoints, namely $1.2 < L < 1.5$ and $4.5 < L < 4.8$ can be selected as the most optimal range. Regarding the effect of the geometrical variations of the parameter ε with operational parameters of Re and ΔP^* it is determined that in all considered Re and ΔP^* , the range of $0.1 < \varepsilon < 0.5$ is selected as the optimum range according to the viewpoints of both the EGM and minimum power of rotors.

1- مقدمه

جابه‌جایی سیال در ابعاد میکرو به عنوان یک موضوع تحقیقاتی چالش‌برانگیزی در جوامع علمی به سرعت دنبال می‌شود. در همین راستا انواع مکانیزم‌های پمپاژ از جمله استفاده از نیروهای الکترواستاتیکی،

در سال‌های اخیر با پیشرفت ساخت و توسعه وسایل میکروسیالی، مسأله انتقال سیال در آنها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. به همین دلیل انتقال و

Please cite this article using:

H. Khozaymeh-Nezhad, H. Niazmand, Analysis of effects of geometrical and operational parameters of viscous micropump with the approach to entropy generation minimization by LBM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 67-78, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

میکروپمپ‌هایی با شکل U و L نرخ جریان عبوری نسبت به میکروپمپ I شکل بیشتر و توان مصرفی آنها نیز کمتر بود. ال-سعدی و همکاران [7]، یک شبیه‌سازی عددی برای تحلیل جریان یک سیال غیرنیوتنی حول روتور دایروی یک میکروپمپ لزوجی انجام دادند. در این کار تأثیر پارامترهای هندسی مختلفی از جمله میزان خارج از مرکزی روتور، ارتفاع ریزمجا 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 ریزمجا با افزایش خارج از مرکزی روتور کاهش پیدا می‌کنند.

باتینیه و ال-نیمر [8]، مطالعه‌ای عددی برای بررسی تأثیر شرط لغزشی بر عملکرد یک میکروپمپ لزوجی 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 [9]، به بررسی عددی ویژگی‌های جریان درون ریزمجرای یک میکروپمپ لزوجی 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 [10]، یک شبیه‌سازی عددی برای بررسی تأثیر میزان انحنا ریزمجا بر عملکرد یک میکروپمپ لزوجی 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 [11]، برای اولین بار تأثیر فرورفتگی زیر روتور را به صورت عددی بر عملکرد یک میکروپمپ لزوجی 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. در کاری جدید، خزیمه نژاد و نیازمند [12]، با استفاده از روش حجم محدود به بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد یک میکروپمپ لزوجی با دو روتور دایروی پرداختند. آنها همچنین در قسمتی از کار خود با استفاده از تحلیل آنتروپی و تنها با تغییر پارامترهای هندسی و در پارامترهای عملکردی ثابت یعنی $\Delta P^* = 0$, $Re = 1$ پارامترهای هندسی بهینه را برای میکروپمپ مذکور مورد مطالعه قرار دادند.

مرور مختصر کارهای فوق نشان می‌دهد که اغلب کارهای انجام شده به بررسی تأثیر حضور یک روتور بر عملکرد میکروپمپ‌های لزوجی پرداخته‌اند و در کارهای محدودی حضور دو روتور یا بیشتر مشاهده می‌شود. همچنین در هیچ از یک پژوهش‌های قبل به جزء کار خزیمه نژاد و نیازمند [12]، میکروپمپ‌های لزوجی از دیدگاه تولید آنتروپی تحلیل نشده‌اند. در این کار نیز چنانچه ذکر شد انتخاب پارامترهای بهینه به صورت محدود و تنها با تغییر پارامترهای هندسی و در حضور دو روتور صورت گرفته است. قابل ذکر است که تغییر پارامترهای عملکردی به ویژه در مقادیر بالا تأثیر قابل توجهی در انتخاب پارامترهای بهینه داشته است. در همین راستا، در کار حاضر تحلیل بسیار جامع‌تری با توجه به در نظر گرفتن اثرات همزمان پارامترهای

الکتروهیدرودینامیکی و اجزاء مکانیکی به عنوان عامل انتقال سیال ارائه شده اند. در سیستم‌های میکروسیالی نیروهای اینرسی و گریز از مرکز به طور قابل توجهی محدود بوده ولی نیروهای لزوجی می‌توانند به عنوان نیروی غالب رانش سیال معرفی شوند. با توجه به این موضوع، مبحث میکروپمپ‌های لزوجی مطرح شده است. این نوع از میکروپمپ‌ها می‌توانند با استفاده از یک استوانه چرخان، دیسک چرخان، چرخ‌دنده باعث انتقال سیال شوند. از میان انواع میکروپمپ‌های لزوجی، آن دسته که عامل رانش سیال در آنها استوانه چرخان می‌باشد، به دلیل ساخت آسان‌تر و کاربرد فراوان‌تر مورد توجه بیشتری از سوی محققان قرار گرفته است. 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 ریزمجا قرار گیرد. زمانی که این روتور شروع به چرخش می‌کند یک نیروی خالص به سیال داخل ریزمجا وارد شده و آن را وادار به حرکت می‌کند. 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 ریزمجا می‌شود.

میکروپمپ‌های لزوجی با استوانه چرخان برای اولین بار توسط سن و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [1]. آنها با انجام یک کار آزمایشگاهی، تأثیر عوامل مختلف از جمله ارتفاع ریزمجا، خارج از مرکزی روتور و سرعت زاویه‌ای را بر دبی خروجی و عملکرد میکروپمپ به طور محدود مورد مطالعه قرار دادند. بعد از این کار، شارچندرا و همکاران [2] یک شبیه‌سازی عددی برای تحلیل میکروپمپ‌های لزوجی انجام دادند. آنها در کار خود از یک روتور منفرد و به شکل دایروی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بیشینه سرعت در ریزمجا، به ازای یک مقدار خارج از مرکزی ثابت، در ریزمجرای با 1.5 برابر قطر روتور و برای یک ارتفاع ثابت، به ازای حداکثر میزان خارج از مرکزی به دست می‌آید.

عبدالقواد و همکاران [3]، مطالعه‌ای عددی بر عملکرد گذرای یک میکروپمپ لزوجی با تک روتور دایروی انجام دادند. در این کار تأثیر پارامترهایی مانند ارتفاع میکروپمپ، خارج از مرکزی روتور و عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفت. از جمله نتایج این مقاله می‌توان به تأثیر عمیق پارامتر خارج از مرکزی روتور بر عملکرد گذرای میکروپمپ و نیز تأثیر شدید عدد رینولدز بر زمان پایا شدن جریان درون ریزمجا اشاره نمود. فاتهاوانگ و حسن [4]، با استفاده از نرم‌افزار فلونت تأثیر شکل‌های مختلف سطح مقطع روتور منفرد را بر عملکرد میکروپمپ لزوجی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین تأثیر ارتفاع ریزمجا، خارج از مرکزی روتور، عدد رینولدز و فشار بار روتور را بر عملکرد میکروپمپ مطالعه کردند. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع ریزمجا زمان لازم برای رسیدن جریان به یک حالت پایا طولانی‌تر گردید. یانگ و همکاران [5]، با استفاده از روش لئیس-بولتزمن عملکرد یک میکروپمپ لزوجی 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. نتایج نشان دادند که برای دستیابی به عملکرد بهتر، بایستی روتور دایروی و در رینولدزهای پایین‌تر انتخاب شود.

داسیلوا و همکاران [6]، در پژوهش خود سه پیکربندی متفاوت U، I و L شکل را برای ریزمجرای یک میکروپمپ لزوجی 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

(1) تا (4) با رویکرد کمیته‌سازی تولید آنتروپی بر عملکرد میکروپمپ لژی بررسی می‌شوند. محدوده تغییرات پارامترهای معرفی شده در این مطالعه در جدول 1 ذکر شده است.

3- معادلات حاکم

قوانین حاکم بر این مسأله به ترتیب بقای جرم، بقای اندازه حرکت در راستای x و بقای اندازه حرکت در راستای y بوده که به صورت معادلات دو بعدی (7-5) نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

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

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \quad (7)$$

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 بی‌بعد گزارش می‌شود لذا برای این منظور ارتفاع ریزمجرا (h)، به عنوان مقیاس طولی و سرعت سطح روتورها (U_{ref})، به عنوان مقیاس سرعتی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این دو مقیاس، متغیرهای بی‌بعد حاکم بر این مسأله مطابق رابطه (8) تعریف می‌شوند:

$$X = \frac{x}{h}, \quad Y = \frac{y}{h}, \quad U = \frac{u}{U_{ref}}, \quad V = \frac{v}{U_{ref}}, \quad P = \frac{p}{\rho U_{ref}^2} \quad (8)$$

که در آن X و Y به ترتیب مختصات بی‌بعد در راستای افقی و عمودی، U و V به ترتیب سرعت‌های بی‌بعد در راستای X و Y و P فشار بی‌بعد هستند. اکنون با توجه به متغیرهای بی‌بعد تعریف شده در رابطه (8) معادلات (5-7) به صورت بی‌بعد (9-11) بازنویسی می‌شوند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (9)$$

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

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re}(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}) \quad (11)$$

لازم به ذکر است که در گزارش نتایج، دبی بی‌بعد و توان مصرفی بی‌بعد روتورها به ترتیب به صورت روابط (12) و (13) محاسبه و استفاده شده است.

$$Q = \frac{q}{hU_{ref}} \quad (q = \int_0^h u dy) \quad (12)$$

$$P_r = \frac{p_r Re}{\rho U_{ref}^3 d} \quad (p_r = \int_{rotor} \tau u_{rotor} ds) \quad (13)$$

برای ساده‌سازی، مسأله موردنظر به صورت هم‌دما بررسی می‌شود. از این

جدول 1 محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد معرفی شده در این مطالعه

Table 1 Variations range of dimensionless parameters introduced in this study

پارامتر معرفی شده	محدوده تغییرات
عدد بی‌بعد فاصله روتورها (L)	0.8-5.2
عدد بی‌بعد خارج از مرکزی (ϵ)	0.1-0.9
عدد بی‌بعد رینولدز (Re)	1-200
عدد بی‌بعد اختلاف فشار (ΔP^*)	-10 - 25

هندسی و عملکردی با حضور سه روتور دایروی به روش لیتیس-بولتزمن انجام شده است.

2- فیزیک مسأله و فرضیات

شماتیکی از فیزیک مسأله حاضر و شرایط مرزی آن در شکل 1 نشان داده شده است. مسأله 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 کاملا توسعه یافته درون ریزمجرا بایستی طول‌های l_1 و l_3 که در شکل 1 نیز نشان داده شده است، حداقل هشت برابر قطر بزرگترین روتور لحاظ شوند [13]. بدین منظور در تمامی محاسبات طول‌های l_1 برابر 16 میلی‌متر و l_3 برابر 34 میلی‌متر به طور ثابت انتخاب شده‌اند. همان‌طور که در شکل 1 نیز مشاهده می‌شود l_2 یعنی فاصله بین استوانه دوم و استوانه بالادست آن می‌تواند در محدوده 18.4 تا 31.6 میلی‌متر تغییر کند. در همین راستا، عدد بی‌بعد L که نشان دهنده تغییرات مکانی روتور دوم نسبت به روتور اول می‌باشد به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$L = \frac{l_2}{h} \quad (1)$$

با توجه به شکل 1، درون ریزمجرای تخت نشان داده شده سه روتور دایروی با قطرهای مساوی ($d = 2 \text{ mm}$) و سرعت زاویه‌ای ω به صورت خارج از مرکز در نظر گرفته شده است. این سه روتور می‌توانند در فاصله‌های عمودی مختلفی از مرکز ریزمجرا قرار گیرند. در همین راستا عدد بی‌بعد ϵ که نشان دهنده میزان خارج از مرکزی روتورها می‌باشد برای هر یک از روتورها به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود:

$$\epsilon_1 = \frac{y_{c1}}{\frac{h}{2} - \frac{d_1}{2}}, \quad \epsilon_2 = \frac{y_{c2}}{\frac{h}{2} - \frac{d_2}{2}}, \quad \epsilon_3 = \frac{y_{c3}}{\frac{h}{2} - \frac{d_3}{2}} \quad (2)$$

در این مقاله اعداد بی‌بعد Re و ΔP^* به عنوان پارامترهای عملکردی به ترتیب مطابق روابط (3) و (4) معرفی می‌شوند:

$$Re = \frac{U_{ref} d}{\nu} \quad (U_{ref} = \frac{d}{2} \omega) \quad (3)$$

$$\Delta P^* = \frac{P_{out} - P_{in}}{\frac{\rho \theta^2}{d^2}} \quad (4)$$

در رابطه (3) U_{ref} و d به ترتیب سرعت سطح و قطر روتورها و در رابطه (4) P_{in} و P_{out} به ترتیب فشار در ورودی و خروجی میکروپمپ، ρ چگالی و θ ضریب لزجت سینماتیکی سیال می‌باشند. در خصوص بی‌بعدسازی رابطه (4) بایستی ذکر گردد با توجه به اینکه افزایش فشار در میکروپمپ از بیرون اعمال می‌شود بنابراین بهتر است آن را با کمیتی که مستقل از سرعت روتورها باشد بی‌بعد کرد. از این رو عبارت $\rho \theta^2 / d^2$ به جای ρU_{ref}^2 برای بی‌بعدسازی پارامتر موردنظر استفاده شده است [2].

در پژوهش حاضر، تأثیر تغییر پارامترهای هندسی و عملکردی بی‌بعد

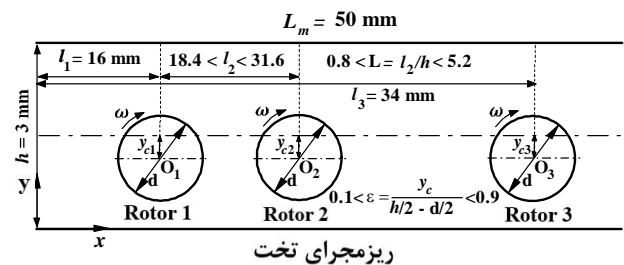


Fig. 1 A schematic of the present problem

شکل 1 شماتیکی از فیزیک مسأله حاضر

$$\Omega_\alpha = \frac{1}{\tau} (f_\alpha^{eq}(r, t) - f_\alpha(r, t)) \quad (19)$$

در رابطه (19)، τ ثابت تخفیف زمانی و f_α^{eq} تابع توزیع تعادلی می باشد که از بسط برش خورده توزیع ماکسول-بولتزمن قابل محاسبه است:

$$f_\alpha^{eq} = w_\alpha \rho \left[1 + \frac{e_\alpha \cdot U}{c_s^2} + \frac{(e_\alpha \cdot U)^2}{2c_s^4} - \frac{U^2}{2c_s^2} \right]$$

$$\begin{cases} w_\alpha = \frac{4}{9} & \alpha = 0 \\ w_\alpha = \frac{1}{9} & \alpha = 1, 2, 3, 4 \\ w_\alpha = \frac{1}{36} & \alpha = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (20)$$

در رابطه (20)، $U = ui + vj$ بردار سرعت ماکروسکوپی، ρ چگالی سیال و $c_s = C/\sqrt{3}$ سرعت صوت مدل می باشد.

حل عددی معادله لتیس-بولتزمن در دو مرحله برخورد و انتشار صورت می گیرد. در مرحله برخورد، توابع توزیع در هر نقطه با یکدیگر برخورد می کنند و سپس در مرحله انتشار، این توابع با نقاط مجاور خود در شبکه بولتزمن و در راستای شبکه e_α سرعت مبادله می شوند. تکرار توالی این دو مرحله، حل معادله لتیس-بولتزمن را در زمان به پیش می برد. کمیت های ماکروسکوپی جریان از قبیل چگالی و سرعت را می توان از روابط ذیل بر اساس توابع توزیع محاسبه کرد:

$$\rho = \sum_\alpha f_\alpha \quad (21)$$

$$U = \frac{1}{\rho} \sum_\alpha e_\alpha f_\alpha \quad (22)$$

در شبیه سازی جریان سیال تراکم ناپذیر در رینولدزهای پایین، فشار از معادله حالت گاز ایده آل، $p = \rho c_s^2$ بدست می آید. همچنین با کمک بسط چابم-انسکاگ می توان نشان داد که ویسکوزیته سینماتیکی سیال تابعی است از ثابت تخفیف زمانی و به صورت رابطه (23) تعریف می شود:

$$\nu = (\tau - 0.5)c_s^2 \delta t \quad (23)$$

2-4- شرایط مرزی

در روش لتیس-بولتزمن شرایط مرزی به ویژه مرزهای منحنی به عنوان عامل بسیار مهمی در پایداری و دقت شبیه سازی ها مطرح می باشند. به طوری که مدل های مختلفی برای اعمال شرایط مرزی در روش لتیس-بولتزمن ارائه شده است. شکل 2 بخشی از مرز منحنی را در شبکه دکارتی نشان می دهد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است نقاط دایروی سیاه رنگ به عنوان نماینده مرز منحنی (x_w) ، نقاط دایروی توخالی به عنوان نماینده نقاط مرزی در محدوده سیال (x_f) و نقاط دایروی خاکستری به عنوان نماینده نقاط مرزی در محدوده جامد (x_b) (در نظر گرفته شده اند. چنانچه ذکر شد روش لتیس-بولتزمن شامل یک الگوریتم دو مرحله ای برخورد و انتشار می باشد. در مرحله برخورد توابع توزیع محاسبه می شوند و در مرحله انتشار در جهت سرعت های مدل منتشر می شوند. با توجه به این موضوع تابع توزیع $f_\alpha(x_f, t + \delta t)$ در x_f بعد از انتشار مجهول می باشد. برای محاسبه این مجهول از مدل یک رابطه ای یو و همکارانش [15] (رابطه 24) استفاده شده است.

$$f_\alpha(x_f, t + \delta t) = \frac{1}{1 + \Delta} \cdot [(1 - \Delta) \cdot f_\alpha(x_f, t + \delta t) + \Delta \cdot f_\alpha(x_b, t + \delta t) + \Delta \cdot f_\alpha(x_{ff}, t + \delta t) + 2w_\alpha \rho w \frac{C}{2} e_\alpha \cdot u_w] \quad (24)$$

رو تولید آنتروپی فقط ناشی از اثرات اصطکاک جریان سیال می باشد که توسط رابطه (14) ارائه می شود [14]:

$$S_f = \frac{\mu}{T_0} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (14)$$

که در آن T_0 دمای سیال درون ریزمچرا می باشد که برابر 300 کلوین در نظر گرفته شده است.

با توجه به متغیرهای بی بعد رابطه (8)، شکل بی بعد رابطه (15) به صورت ذیل بازنویسی می شود:

$$S_F = \Phi_F \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] \quad (15)$$

که در آن Φ_F به صورت رابطه بی بعد (16) تعریف و در این مقاله برابر 0.01 لحاظ شده است.

$$\Phi_F = \frac{\mu U_{ref}^2}{T_0 k} \quad (16)$$

که در آن k ضریب رسانندگی گرمایی سیال عامل می باشد.

4- روش حل عددی

1-1- روش لتیس-بولتزمن

در دو دهه اخیر یک روش عددی جدید و موثر به نام لتیس-بولتزمن در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی ظهور یافته به طوری که موفقیت های چشم گیری در شبیه سازی جریان های سیالی و انتقال حرارت بدست آورده است. روش لتیس-بولتزمن برخلاف روش های عددی مرسوم همانند حجم محدود، اختلاف محدود و غیره با استفاده از نگرش موزوسکوپییک قادر به شبیه سازی های پیچیده ای می باشد. این روش با مدل سازی حرکت ذرات سیال می تواند مقادیر ماکروسکوپی خواص مختلف سیال را به دست آورد. در این دیدگاه میدان محاسباتی با یک شبکه دکارتی یکنواخت مدل می شود. هر کدام از سلول های این شبکه حاوی تعدادی از ذرات سیال هستند که می توانند در مسیرهای جداگانه ای حرکت کنند. بنابراین با توجه به تعداد مسیریایی که ذرات سیال قادر به حرکت می باشند مدل های مختلفی برای روش لتیس-بولتزمن ارائه شده است. با توجه به اینکه در مسائل دوبعدی مدل ارائه شده با 9 سرعت مجزا (D2Q9) از سایر مدل ها دقت و کارایی بهتری از خود نشان داده است در شبیه سازی حاضر نیز از این مدل استفاده شده است. بردارهای سرعت هر کدام از مسیرهای مدل D2Q9 به صورت رابطه (17) ارائه می شود.

$$\begin{cases} e_\alpha = (0, 0), & \alpha = 0 \\ e_\alpha = (\cos\theta_\alpha, \sin\theta_\alpha)C, & \alpha = 1 - 4, \\ \theta_\alpha = \frac{(\alpha - 1)\pi}{2} \\ e_\alpha = \sqrt{2}(\cos\theta_\alpha, \sin\theta_\alpha)C, & \alpha = 5 - 8, \\ \theta_\alpha = \frac{(\alpha - 1)\pi}{2} + \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (17)$$

در رابطه (17)، $C = \delta x / \delta t$ اندازه سرعت میکروسکوپیکی ذرات، δx فاصله شبکه و δt گام زمانی حل می باشند که در این حل هر دو برابر 1 در نظر گرفته شده اند. برای هر یک از بردارهای سرعت یک تابع توزیع f که در واقع معرف احتمال وجود ذرات سیال در آن جهت هستند به صورت رابطه (18) تعریف می شود:

$$\frac{\partial f_\alpha(r, t)}{\partial t} + e_\alpha \cdot \nabla f_\alpha(r, t) = \Omega_\alpha \quad \alpha = 0, 1, \dots, 8 \quad (18)$$

که Ω اپراتور برخورد می باشد و با استفاده از مدل BGK به صورت رابطه (19) نوشته می شود:

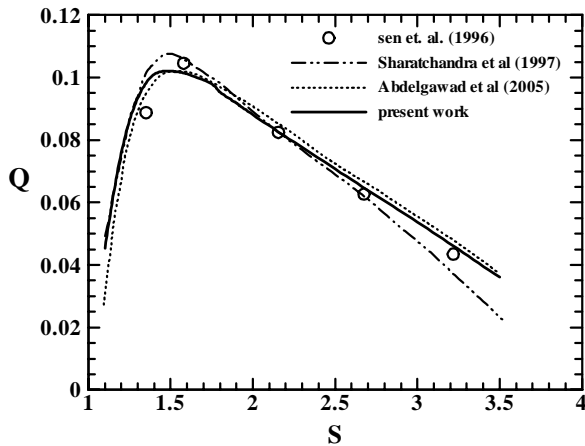


Fig. 3 Comparison of dimensionless flow flux vs. parameter of rotor size in the present work with experimental and numerical work of others in condition of $Re = 0.5$, $\Delta P^* = 0.5$ and $\varepsilon = 0.9$
 شکل 3 مقایسه دبی بی بعد (Q) در برابر پارامتر بی بعد اندازه روتور (S) در کار حاضر با کارهای تجربی و عددی دیگران در شرایط $Re = 0.5$ و $\Delta P^* = 0.5$ و $\varepsilon = 0.9$

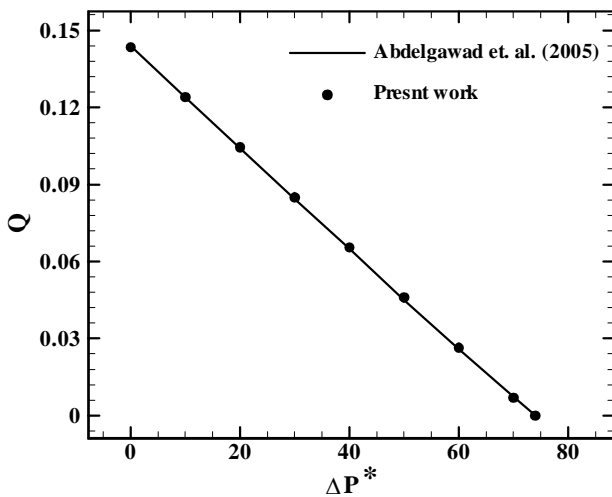


Fig. 4 Comparison of dimensionless flow flux vs. parameter of dimensionless pressure difference at the present work with Ref. [13] in condition of $Re = 1$, $\varepsilon = 0.95$ and $S = 1.5$
 شکل 4 مقایسه دبی بی بعد (Q) در برابر پارامتر بی بعد اختلاف فشار (ΔP^*) در کار حاضر با کار مرجع [13] در شرایط $Re = 1$ و $\varepsilon = 0.95$ و $S = 1.5$

است. لذا در این کار با توجه به این مفهوم ترمودینامیکی، تأثیر پارامترهای هندسی و عملکردی در یک محدوده وسیعی از تغییرات بر عملکرد میکروپمپهای لزجی در نظر گرفته شده است. در ادامه به بررسی تحلیل اثرات هر کدام از پارامترهای مذکور بر عملکرد میکروپمپ پرداخته شده است.

1-5- بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی L و پارامتر عملکردی ΔP^*

چنانچه ذکر شد تولید آنتروپی در میکروپمپ بررسی شده فقط ناشی از اصطکاک بوده و پارامتر بی بعد آن با S_p نمایش داده می شود. همان طور که در شکل 5 نشان داده شده است تولید آنتروپی در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور (L) در ΔP^* های مختلف و در شرایط $Re = 1$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$ بررسی شده است. با توجه به این شکل، در یک ΔP^* ثابت با افزایش L تولید آنتروپی به شدت کاهش پیدا می کند به طوری که این روند کاهشی تا میزان $L = 1.3$ ادامه می یابد. بعد از این میزان دوباره تولید آنتروپی افزایش

که در رابطه (24)، $\Delta = \frac{|x_f - x_w|}{|x_f - x_b|}$ ، $0 \leq \Delta \leq 1$ ، و ρ_w و u_w نیز به ترتیب چگالی و سرعت روی مرز منحنی می باشند.

3-4- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی اولیه کار حاضر، میکروپمپی لزجی با یک روتور دایروی منفرد در شرایطی که رینولدز (Re) و اختلاف فشار بی بعد (ΔP^*) هر دو 0.5 و عدد بی بعد خارج از مرکزی $\varepsilon = 0.9$ می باشند در نظر گرفته شده است. شکل 3 مقایسه ای بین نتایج دبی بی بعد خروجی (Q) در مقابل پارامتر بی بعد اندازه روتور ($S = h/d$) کار حاضر با نتایج تجربی سن و همکاران [1]، عددی شراچندرا و همکاران [2] و عبدالقواد و همکاران [13] را نشان می دهد. همان طور که در این شکل نیز مشاهده می شود تطابق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد. قابل ذکر است در کار حاضر پارامترهای اندازه قطر روتور و ضریب زیرتخفیف زمانی به ترتیب $d = 30$ و $\tau = 0.809$ می باشند.

اعتبارسنجی دیگری برای اطمینان کامل از صحت برنامه عددی نوشته شده با توجه به کار عبدالقواد و همکاران [13] صورت گرفته است. در این کار میکروپمپی لزجی شامل سه روتور با قطرهای مساوی d که فاصله مراکز آنها از ورودی میکروکانال به ترتیب $8d$ ، $11.5d$ و $15d$ و سایر شرایط نیز $Re = 1$ ، $\varepsilon = 0.95$ و $S = 1.5$ می باشند در نظر گرفته شده است. شکل 4 مقایسه ای بین نتایج دبی بی بعد خروجی (Q) در مقابل پارامتر بی بعد اختلاف فشار (ΔP^*) کار حاضر را با مرجع [13] نشان می دهد. همان طور که در این شکل نیز مشاهده می شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد. همچنین در شبیه سازی لئیس-بولتزمن این مقایسه، پارامترهای اندازه قطر روتور و ضریب زیرتخفیف زمانی به ترتیب $d = 38$ و $\tau = 0.809$ لحاظ گردیده اند.

5- نتایج و بحث

بیشتر فرایندهای مهندسی در معرض افتهای اجتناب ناپذیری نظیر اصطکاک و حرارتی می باشند. با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک می توان میزان تولید آنتروپی و این افتهای اجتناب ناپذیر را کمینه کرد. کمیته سازی تولید آنتروپی یک نگرش ترمودینامیکی جدید برای بهینه سازی سیستم های مهندسی به منظور دستیابی به بالاترین بازده ممکن می باشد. در موضوع میکروپمپهای لزجی، همان طور که در مقدمه نیز اشاره گردید تاکنون تحقیقی جامع با استفاده از مفهوم کمیته سازی تولید آنتروپی مشاهده نشده

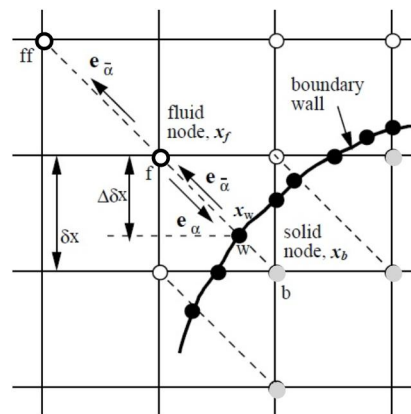


Fig. 2 Schematic of Cartesian grid and boundary points in LBM
 شکل 2 شماتیکی از شبکه دکارتی و نقاط مرزی در روش لئیس-بولتزمن

است و با افزایش ΔP^* ، توان مصرفی آنها نیز افزایش یافته است. شکل 7 میزان دبی بی بعد خروجی از میکروپمپ (Q) در مقابل پارامتر هندسی بی بعد فاصله روتور (L) را در ΔP^* های مختلف و در شرایط $Re = 1$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$ نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود روند تغییرات دبی در تمامی ΔP^* های بررسی شده تقریباً یکسان بوده است. به طوری که در تمامی موارد تا $L = 1.8$ دبی افزایش و از $L = 4.2$ تا انتها کاهش یافته و بین این دو L دبی روند نسبتاً ثابتی را طی کرده است. همچنین بیشترین دبی در $\Delta P^* = -10$ حاصل شده و با افزایش آن، دبی کاهش یافته است.

با توجه به توضیحات داده شده، بایستی محدوده و مقادیر بهینه پارامتر هندسی L بر اساس تغییر پارامتر عملکردی ΔP^* معرفی و انتخاب گردد. چنانچه ذکر شد در تمامی ΔP^* های بررسی شده، دو محدوده $1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه

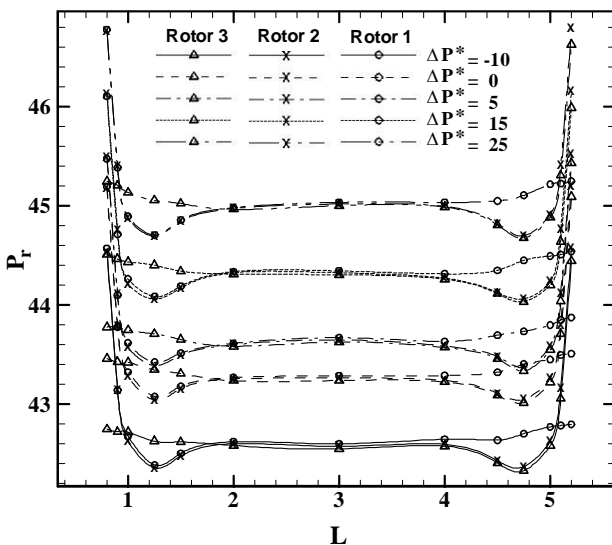


Fig. 6 Power (P_T) vs. dimensionless parameter of distance rotor (L) in various ΔP^* s in condition of $Re = 1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

شکل 6 توان مصرفی (P_T) در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور (L) در ΔP^* های مختلف برای شرایط $Re = 1$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

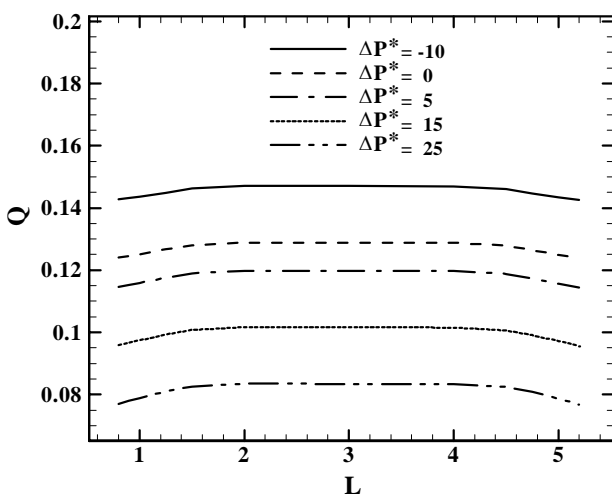


Fig. 7 Dimensionless flow flux (Q) vs. dimensionless parameter of distance rotor (L) in various ΔP^* s in condition of $Re = 1$ and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

شکل 7 دبی بی بعد (Q) در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور (L) در ΔP^* های مختلف برای شرایط $Re = 1$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

پیدا می کند که این افزایش تا $L = 2$ ادامه داشته و بعد از آن تقریباً ثابت می شود. از $L = 4$ تا حدود $L = 4.7$ دوباره تولید آنتروپی کاهش داشته و بعد از این L به شدت یک روند افزایشی را طی می کند. زمانی که روتور 2 به دو روتور دیگر بسیار نزدیک است باعث ایجاد گردایان های شدید سرعت در حد فاصل بین دو روتور می شود. همین موضوع موجب افزایش تولید آنتروپی در این ناحیه خواهد شد. بعد از اینکه روتور 2 کمی از دو روتور دیگر فاصله می گیرد فضای بین آنها افزایش می یابد. به دنبال آن، به دلیل کاهش گردایان های سرعت، تولید آنتروپی نیز کاهش پیدا می کند. در حالی که L بین مقادیر 2 تا 4 متغیر است گردایان های سرعت مستقل از فاصله روتورها می شوند. بدین ترتیب تولید آنتروپی نیز تقریباً ثابت خواهد شد.

در ادامه با توجه به شکل 5 می توان اظهار نمود در تمامی ΔP^* های بررسی شده دو محدوده $1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ می توانند به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی معرفی شوند. قابل ذکر است دو مقدار 1.3 و 4.7 که در آنها کمترین تولید آنتروپی وجود داشته است به عنوان بهینه ترین L در محدوده های مذکور انتخاب می شوند. علاوه بر موارد فوق، با دقت در روند تغییرات ΔP^* می توان مشاهده نمود که کمترین تولید آنتروپی در $\Delta P^* = 5$ اتفاق افتاده است. بنابراین این ΔP^* می تواند به عنوان بهینه از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی معرفی و انتخاب گردد.

برای ارائه یک تحلیل جامع در کار حاضر، پارامتر بی بعد توان مصرفی روتورها (P_T) در برابر L و ΔP^* های مختلف و در شرایط $Re = 1$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$ نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 6 که گویای همین موضوع می باشد نشان می دهد در یک ΔP^* ثابت، زمانی که روتور 2 به دو روتور دیگر بسیار نزدیک است توان مصرفی روتور 2 و روتور مجاور آن به شدت افزایش یافته است. بعد از اینکه فاصله دو روتور مجاور کمی افزایش می یابد توان مصرفی آنها به سرعت کم شده است به طوری که در حدود 4.8 و $L = 1.2$ به کمترین میزان ممکن می رسد. همچنین در تمامی ΔP^* های بررسی شده می توان دو محدوده $1.1 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.9$ را به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه کمیته توان مصرفی روتورها معرفی کرد. قابل ذکر است که حداقل توان مصرفی روتورها در $\Delta P^* = -10$ حاصل شده

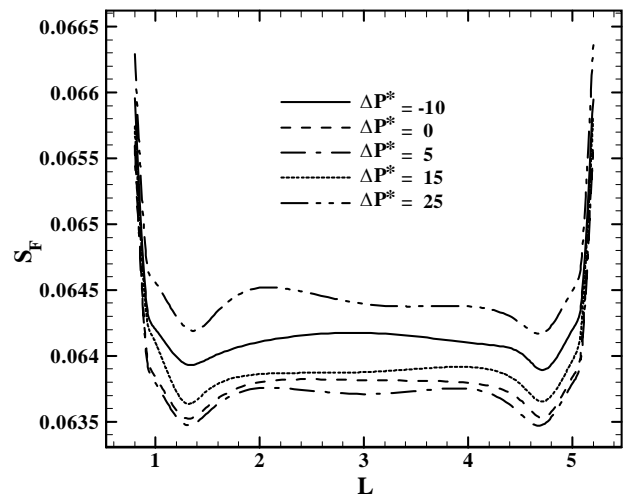


Fig. 5 Entropy generation (S_T) vs. dimensionless parameter of distance rotor (L) in various ΔP^* s in condition of $Re = 1$ and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

شکل 5 تولید آنتروپی (S_T) در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور (L) در ΔP^* های مختلف برای شرایط $Re = 1$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

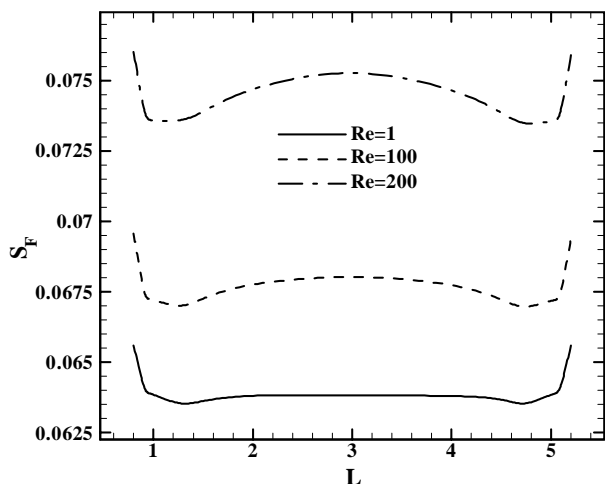


Fig. 8 Entropy generation (S_F) vs. dimensionless parameter of distance rotor (L) in various Re s in condition of $\Delta P^* = 0$ and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

شکل 8 تولید آنتروپی (S_F) در برابر پارامتر بی‌بعد فاصله روتور (L) در Re های مختلف برای شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

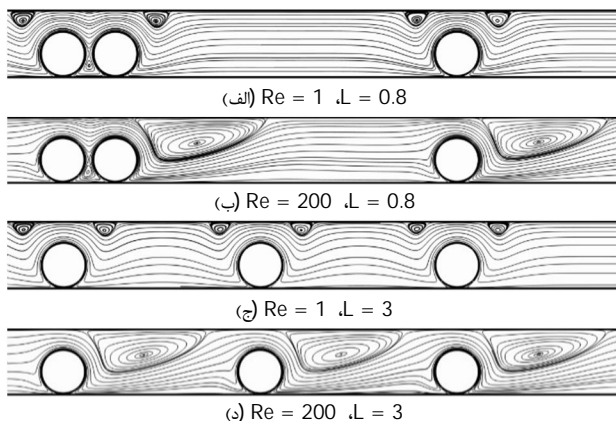


Fig. 9 Streamlines around the rotors in two Reynolds of 1 and 200 for $L = 0.8$ and 3 in condition of $\Delta P^* = 0$ and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

شکل 9 خطوط جریان اطراف روتورها در دو رینولدز 1 و 200 برای $L = 0.8$ و 3 و شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

به طور کلی محدوده‌های $1.1 < L < 1.5$ و $4.5 < L < 4.9$ را می‌توان به عنوان محدوده‌های بهینه از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی معرفی و انتخاب نمود. همچنین مقادیر 4.9 و $L = 1.1$ برای رینولدز 200 و 4.7 و $L = 1.3$ برای رینولدزهای 1 و 100 دارای کمترین تولید آنتروپی بوده و از این دیدگاه بهینه‌ترین نقاط می‌باشند. رینولدز 1 نیز به دلیل داشتن کمترین تولید آنتروپی به عنوان رینولدز بهینه معرفی می‌شود.

شکل 10 توان مصرفی روتورها را در L و Re های مختلف در شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در تمامی Re ها با افزایش L توان مصرفی روتورها کاهش می‌یابد. به طوری که روتور 1 برای رینولدز 1 در $L = 1.2$ و برای سایر رینولدزها در $L = 1.5$ به کمترین مقدار ممکن می‌رسد و بعد از این مقدار یک روند تقریباً ثابتی را تا انتها طی می‌کند. روتور 2 نیز برای رینولدز 1 در $L = 1.2$ و برای دو رینولدز دیگر در $L = 1$ به حداقل مقدار خود می‌رسد. سپس یک روند افزایشی را تا $L = 3$ ادامه و بعد از آن تا $L = 4.7$ تقریباً ثابت می‌ماند. در انتها نیز یک جهش افزایشی خواهد داشت. روتور 3 تا

تولید آنتروپی و از طرف دیگر محدوده‌های $1.1 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.9$ نیز از دیدگاه کمیته توان مصرفی روتورها به عنوان محدوده‌های بهینه مطرح شدند. با توجه به هم‌پوشانی کامل محدوده‌های بهینه کمیته تولید آنتروپی با دیدگاه کمیته توان مصرفی، می‌توان اظهار داشت بهینه‌ترین محدوده‌ها، همان محدوده‌های ذکر شده از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی می‌باشند. اکنون بایستی بر اساس تغییرات دبی، مقادیر بهینه‌ی L نیز معرفی گردند. همان‌طور که ذکر شد دبی تا $L = 1.8$ افزایش و از $L = 4.2$ تا انتها کاهش یافته و بین این دو L روند نسبتاً ثابتی را طی کرده است. بنابراین اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی 4.4 و $L = 1.6$ به عنوان بهینه‌ترین نقاط و در غیر این صورت 4.7 و $L = 1.3$ از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی و 4.8 و $L = 1.2$ از دیدگاه کمیته توان مصرفی روتورها به عنوان بهینه‌ترین نقاط معرفی می‌شوند. قابل ذکر است از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی $\Delta P^* = 5$ به عنوان میزان بهینه ولی از دیدگاه تولید بیشینه دبی و کمیته توان مصرفی روتورها $\Delta P^* = -10$ به عنوان بهینه‌ترین اختلاف فشار معرفی می‌شود.

2-5- بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی L و پارامتر عملکردی Re

در این قسمت با تغییر پارامتر عملکردی Re در محدوده 1 تا 200، پارامتر بهینه L معرفی می‌شود. شکل 8 تولید آنتروپی را در L و Re های مختلف در شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است تولید آنتروپی در تمامی Re ها، با افزایش L کاهش، به طوری که در رینولدز 200 در $L = 1.1$ و در سایر رینولدزها در $L = 1.3$ به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. بعد از این مقدار کمیته، در رینولدزهای 100 و 200 با افزایش قابل توجه تولید آنتروپی تا $L = 3$ و روبرو می‌شویم. در انتها نیز یک جهش افزایشی در تولید آنتروپی برای همه Re ها مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش Re تولید آنتروپی نیز افزایش یافته است.

برای تشریح تغییرات تولید آنتروپی با عدد رینولدز شکل 9 ارائه شده است. این شکل خطوط جریان را برای دو رینولدز 1 و 200 در $L = 0.8$ و 3 و شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$ نشان می‌دهد. مطابق شکل 9 (الف) زمانی که روتورهای 1 و 2 در نزدیک‌ترین فاصله قرار دارند گردایان‌های سرعت بین این دو روتور باعث افزایش شدید تولید آنتروپی می‌شود. با افزایش رینولدز تا 200 همانند شکل 9 (ب) گردابه‌های تولید شده در پایین‌دست روتورهای 2 و 3 بسیار بزرگ‌تر شده‌اند. این موضوع باعث افزایش شدیدتر گردایان‌های سرعت در این نواحی می‌شود. در نتیجه تولید آنتروپی نیز افزایش بیشتری خواهد داشت. بعد از اینکه دو روتور از هم فاصله می‌گیرند (تا حدود $L = 1.1$) از گردایان سرعت بین آنها کاسته می‌شود. بنابراین تولید آنتروپی نیز کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر L تا مقدار 3، در رینولدز 1 تغییر چندانی در تولید آنتروپی مشاهده نمی‌شود ولی در رینولدزهای بالاتر به ویژه 200 تولید آنتروپی با افزایش قابل توجهی همراه خواهد بود. این موضوع می‌تواند با توجه به شکل 9 (ج) و (د) تشریح گردد. در رینولدز 1 گردابه‌های ایجاد شده در اطراف روتورها کوچک بوده و تأثیر زیادی در تولید آنتروپی نخواهند داشت. ولی در رینولدزهای بالاتر با فاصله گرفتن روتور 1 از 2، گردابه پایین‌دست روتور 1 به شدت بزرگ شده است و همین موضوع باعث افزایش تولید آنتروپی خواهد شد.

در ادامه بایستی محدوده‌ها و مقادیر بهینه برای پارامتر L انتخاب شوند.

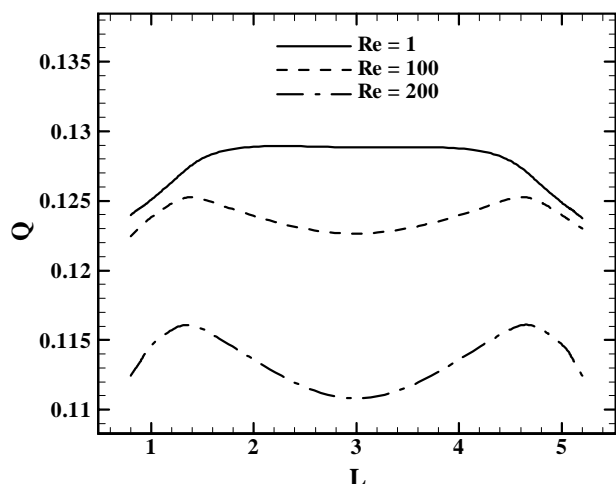


Fig. 11 Dimensionless flow flux (Q) vs. dimensionless parameter of distance rotor (L) in various Re s in condition of $\Delta P^* = 0$ and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

شکل 11 دبی بی‌بعد (Q) در برابر پارامتر بی‌بعد فاصله روتور (L) در Re های مختلف برای شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

میزان دبی افزایش خواهد داشت. در انتها نیز در همه‌ی رینولدزها به دلیل افزایش اصطکاک بین روتورهای 2 و 3 از دبی میکروپمپ کاسته می‌شود. با توجه به توضیحات داده شده، بایستی محدوده و مقادیر بهینه پارامتر هندسی L بر اساس تغییر پارامتر عملکردی Re معرفی و انتخاب گردند. چنانچه ذکر شد در تمامی Re های بررسی شده، دو محدوده $1.1 < L < 1.5$ و $4.5 < L < 4.9$ به عنوان محدوده‌های بهینه از دیدگاه آنتروپی و از طرف دیگر محدوده‌های $1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ نیز از دیدگاه کمینه توان مصرفی به عنوان محدوده‌های بهینه مطرح شدند. بنابراین محدوده مشترک این دو دیدگاه یعنی $1.2 < L < 1.5$ و $4.4 < L < 4.8$ می‌تواند به عنوان بهینه‌ترین محدوده انتخاب گردد. اکنون بایستی بر اساس تغییرات دبی، مقادیر بهینه‌ی L نیز معرفی گردند. اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی 4.7 و $L = 1.3$ برای رینولدز 100 و 200 و 4.5 و $L = 1.5$ برای رینولدز 1 به عنوان بهینه‌ترین نقاط و در غیر این صورت 4.7 و $L = 1.3$ برای رینولدز 1 و 100 و 4.9 و $L = 1.1$ برای رینولدز 200 از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی به عنوان بهینه‌ترین نقاط معرفی می‌شوند. قابل ذکر است در تمامی دیدگاه‌ها $Re = 1$ به عنوان بهینه‌ترین رینولدز معرفی خواهد شد.

3-5- بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی ε و پارامتر عملکردی ΔP^*

یکی دیگر از پارامترهای هندسی اثرگذار بر عملکرد میکروپمپ‌های لرزجی فاصله روتورها از دیواره‌های آن می‌باشد. در همین راستا تغییرات پارامتر خارج از مرکزی روتورها در محدوده 0.1-0.9 بر عملکرد میکروپمپ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به دو قسمت قبل، $L = 1.3$ در تمام موارد بررسی شده در محدوده‌های بهینه معرفی شده قرار داشته و از طرف دیگر نیز در تغییرات ΔP^* و Re به عنوان بهینه‌ترین پارامتر L از دیدگاه تولید آنتروپی انتخاب شده است. بنابراین در ادامه کار این L به عنوان فاصله بین روتورها استفاده خواهد شد.

شکل 12 تولید آنتروپی را در ε های مختلف در شرایط $Re = 1$ و $L = 1.3$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود در تمامی

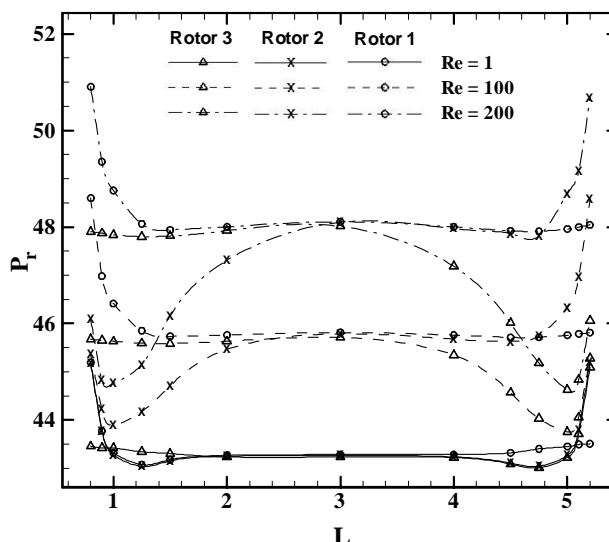


Fig. 10 Power (P_r) vs. dimensionless parameter of distance rotor (L) in various Re s in condition of $\Delta P^* = 0$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

شکل 10 توان مصرفی (P_r) در برابر پارامتر بی‌بعد فاصله روتور (L) در Re های مختلف برای شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$

حدود $L = 3$ روند تقریباً ثابتی داشته است ولی بعد از این مقدار به ویژه در رینولدزهای بالا دچار افت شدیدی می‌شود. البته در انتها نیز یک روند صعودی را طی خواهد نمود. با توجه به تشریح فوق، می‌توان محدوده‌های $1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ را به عنوان محدوده‌های بهینه از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها معرفی و انتخاب نمود. بایستی ذکر گردد معرفی یک مقدار بهینه L برای این حالت امکان‌پذیر نیست. همچنین کمترین توان مصرفی روتورها در $Re = 1$ بوده است. بنابراین رینولدز 1 به عنوان رینولدز بهینه از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها معرفی می‌شود.

شکل 11 دبی میکروپمپ را در L و Re های مختلف در شرایط $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.9$ همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله روتور 1 از 2، دبی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش برای رینولدز 100 و 200 تا $L = 1.3$ و برای رینولدز 1 تا $L = 1.7$ ادامه داشته است. سپس دبی در رینولدز 1 تا حدود $L = 4.3$ تقریباً ثابت می‌ماند و در انتها نیز یک روند کاهشی خواهد داشت. برای دو رینولدز دیگر دبی تا حدود $L = 3$ یک روند نزولی و سپس تا $L = 4.7$ یک روند صعودی را طی خواهد نمود و بعد از این مقدار تا انتها کاهش خواهد داشت. تشریح روندهای فوق با توجه به شکل 9 امکان‌پذیر است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در رینولدز 1 گردابه‌های ایجاد شده در میکروپمپ به مراتب از گردابه‌های ایجاد شده در رینولدز 200 کوچکتر هستند. گردابه‌های ایجاد شده می‌توانند نقش یک مانع را برای عبور جریان ایفا کنند و باعث کاهش دبی در میکروپمپ شوند. زمانی که $L = 0.8$ می‌باشد اصطکاک بین دو روتور 1 و 2 بسیار زیاد است. اما با افزایش L از این اصطکاک کاسته می‌شود و به دنبال آن دبی نیز افزایش می‌یابد. در رینولدز 1 چون گردابه‌ها کوچک هستند در محدوده $1.7 < L < 4.3$ تأثیری در روند دبی نخواهند داشت. ولی در رینولدزهای بالاتر چون گردابه‌ی پایین‌دست روتور 1 با افزایش L نیز بزرگتر می‌شود به همین دلیل نقش مقاومتی آن نیز پررنگ‌تر خواهد شد. بنابراین دبی تا $L = 3$ یک روند کاهشی را طی خواهد نمود. بعد از این L چون گردابه پایین‌دست روتور 2 در حال کوچکتر شدن می‌باشد جریان می‌تواند با مقاومت کمتری از آن مقطع عبور کند. از این رو

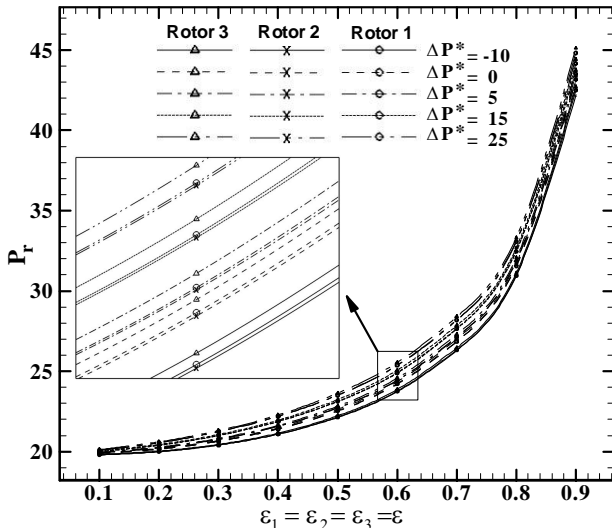


Fig. 13 Power (P_T) vs. dimensionless parameter of eccentricity (ϵ) in various ΔP^* 's in condition of $Re = 1$ and $L = 1.3$

شکل 13 توان مصرفی روتورها (P_T) در برابر پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها (ϵ) در ΔP^* های مختلف برای شرایط $Re = 1$ و $L = 1.3$

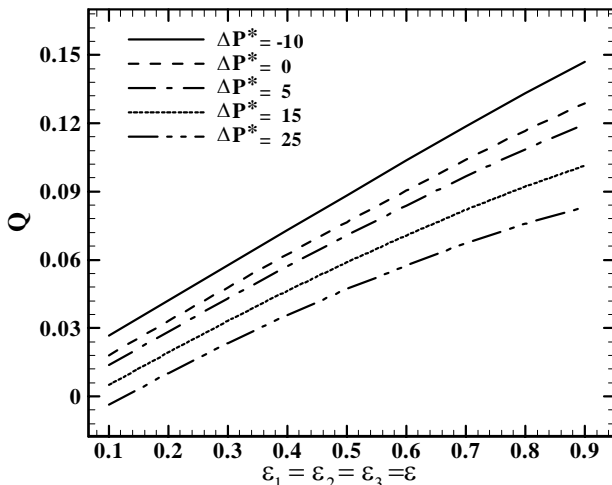


Fig. 14 Dimensionless flow flux (Q) vs. dimensionless parameter of eccentricity (ϵ) in various ΔP^* 's in condition of $Re = 1$ and $L = 1.3$

شکل 14 دبی بی‌بعد (Q) در برابر پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها (ϵ) در ΔP^* های مختلف برای شرایط $Re = 1$ و $L = 1.3$

چنانچه ذکر شد در تمامی ΔP^* های بررسی شده، محدوده $0.1 < \epsilon < 0.5$ به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و نیز کمینه توان مصرفی روتورها انتخاب گردید. اکنون بایستی بر اساس تغییرات دبی، مقادیر بهینه‌ی ϵ نیز معرفی گردند. اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی $\epsilon = 0.5$ و در غیر این صورت $\epsilon = 0.1$ به عنوان بهینه‌ترین نقاط معرفی می‌شوند. قابل ذکر است از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی $\Delta P^* = 5$ به عنوان میزان بهینه ولی از دیدگاه تولید بیشینه دبی و کمینه توان مصرفی $\Delta P^* = -10$ به عنوان بهینه‌ترین اختلاف فشار معرفی می‌شود.

4-5- بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی ϵ و پارامتر عملکردی Re

در این قسمت با تغییر پارامتر عملکردی Re در محدوده 1-200، پارامتر

ΔP^* ها با افزایش ϵ تولید آنتروپی نیز افزایش می‌یابد. البته این روند افزایشی از $\epsilon > 0.5$ نسبت به مقادیر کوچکتر از آن از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد. دلیل این روند افزایشی، با توجه به افزایش اصطکاک در ϵ های بزرگتر کاملاً منطقی می‌باشد. زمانی که روتورها به دیواره پایینی نزدیک می‌شوند اصطکاک بین آنها و دیواره افزایش می‌یابد. بنابراین تولید آنتروپی نیز افزایش خواهد یافت. در انتها برای انتخاب محدوده بهینه، می‌توان محدوده $0.1 < \epsilon < 0.5$ را به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی انتخاب نمود. همچنین $\Delta P^* = 5$ می‌تواند به عنوان ΔP^* بهینه انتخاب گردد.

شکل 13 توان مصرفی روتورها را در ϵ های مختلف در شرایط $Re = 1$ و $L = 1.3$ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در تمامی ΔP^* ها با افزایش ϵ توان مصرفی روتورها نیز افزایش می‌یابد. به طوری که روند افزایشی آن در محدوده $\epsilon > 0.5$ سریع‌تر از ϵ های کوچکتر از آن است. دلیل این موضوع، افزایش اصطکاک با افزایش عدد خارج از مرکزی روتورها می‌باشد. بنابراین نیروی بیشتری برای حرکت دورانی روتورها لازم می‌شود. در انتها برای انتخاب محدوده بهینه، می‌توان محدوده $0.1 < \epsilon < 0.5$ را با توجه به اینکه توان مصرفی روتورها در این ناحیه کمتر از سایر نواحی است به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها انتخاب نمود. قابل ذکر است $\Delta P^* = -10$ به عنوان ΔP^* بهینه از دیدگاه کمترین توان مصرفی انتخاب و معرفی می‌گردد.

شکل 14 دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ را در ϵ های مختلف در شرایط $Re = 1$ و $L = 1.3$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش ϵ دبی نیز به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد. البته در ΔP^* های بالاتر و به ویژه در ϵ های بزرگتر، روند افزایش دبی کمی از حالت خطی فاصله می‌گیرد. در رابطه با ذکر دلیل این روند صعودی می‌توان گفت زمانی که روتورها در فاصله بیشتری از دیواره‌ی پایینی میکروپمپ قرار دارند بیشتر سیال، اطراف خود روتورها می‌چرخد. ولی زمانی که این فاصله کم می‌شود سیال بیشتری می‌تواند از فضای بین روتورها و دیواره بالایی عبور کند. بدین ترتیب با افزایش ϵ دبی نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به توضیحات داده شده، بایستی محدوده و مقادیر بهینه پارامتر هندسی ϵ بر اساس تغییر پارامتر عملکردی ΔP^* معرفی و انتخاب گردند.

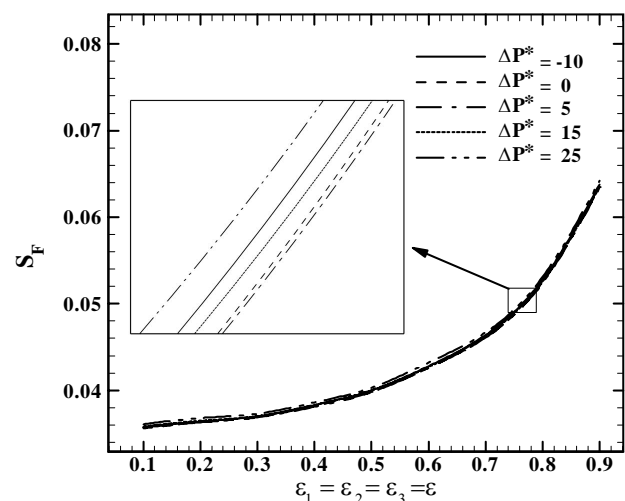


Fig. 12 Entropy generation (S_T) vs. dimensionless parameter of eccentricity (ϵ) in various ΔP^* 's in condition of $Re = 1, L = 1.3$

شکل 12 تولید آنتروپی (S_T) در برابر پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها (ϵ) در ΔP^* های مختلف برای شرایط $Re = 1$ و $L = 1.3$

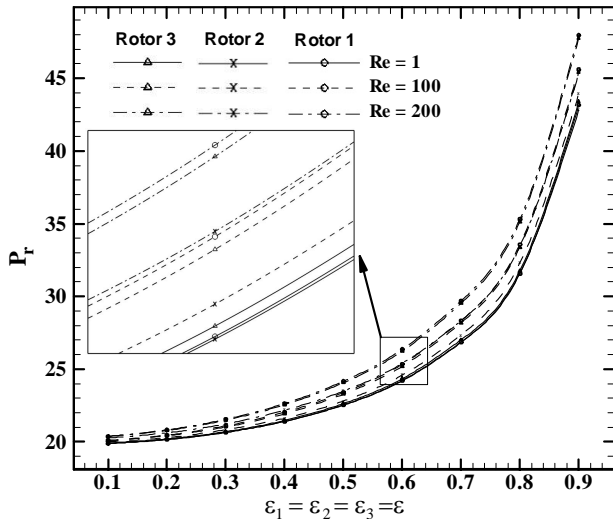


Fig. 16 Power (P_r) vs. dimensionless parameter of eccentricity (ϵ) in various Res in condition of $\Delta P^* = 0$ and $L = 1.3$

شکل 16 توان مصرفی روتورها (P_r) در برابر پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها (ϵ) در Re های مختلف برای شرایط $L = 1.3$ و $\Delta P^* = 0$

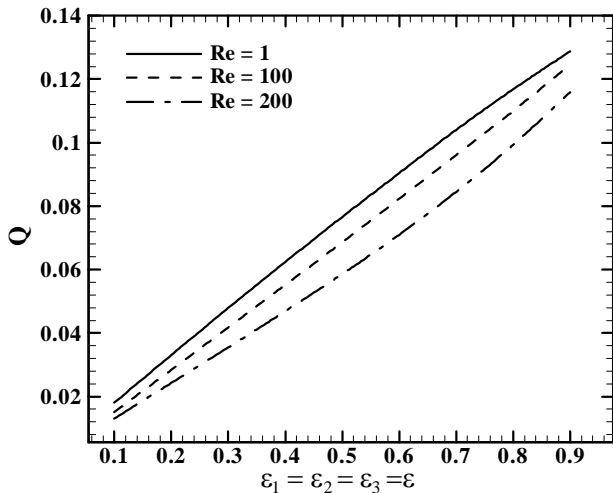


Fig. 17 Dimensionless flow flux (Q) vs. dimensionless parameter of eccentricity (ϵ) in various Res in condition of $\Delta P^* = 0$ and $L = 1.3$

شکل 17 دبی بی‌بعد (Q) در برابر پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها (ϵ) در Re های مختلف برای شرایط $L = 1.3$ و $\Delta P^* = 0$

عملکردی یک میکروپمپ لزوجی با رویکرد کمیته‌سازی تولید آنتروپی به روش لیتیس-بولتزمن انجام شده است. در پژوهش حاضر، تأثیر تغییر پارامترهای هندسی بی‌بعد فاصله روتور از 1 (L) و خارج از مرکزی روتورها (ϵ) و نیز پارامترهای عملکردی بی‌بعد اختلاف فشار ابتدا و انتهای میکروپمپ (ΔP^*) و رینولدز (Re) بر عملکرد میکروپمپ بررسی شده است. در بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی L و عملکردی ΔP^* مشخص شد که در تمامی ΔP^* های بررسی شده، دو محدوده $1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ به عنوان محدوده‌های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و از طرف دیگر محدوده‌های $1.1 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.9$ نیز از دیدگاه کمیته‌سازی مصرفی روتورها به عنوان محدوده‌های بهینه مطرح شدند. با توجه به هم-پوشانی کامل محدوده‌های بهینه‌ی کمیته‌سازی تولید آنتروپی با دیدگاه کمیته‌سازی مصرفی، می‌توان گفت بهینه‌ترین محدوده‌ها، همان محدوده‌های ذکر شده از دیدگاه کمیته‌سازی تولید آنتروپی می‌باشند. همچنین بر اساس تغییرات

بهینه ϵ معرفی می‌شود. شکل 15 تولید آنتروپی را در ϵ های مختلف در شرایط $\Delta P^* = 0$ و $L = 1.3$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود در تمامی Re ها با افزایش ϵ تولید آنتروپی نیز افزایش می‌یابد ولی این روند صعودی در $\epsilon > 5$ دارای شدت بیشتری می‌باشد. در انتها برای انتخاب محدوده بهینه، می‌توان محدوده $0.1 < \epsilon < 0.5$ را به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی انتخاب نمود. همچنین $Re = 1$ می‌تواند به عنوان Re بهینه انتخاب گردد.

شکل 16 توان مصرفی روتورها را در ϵ های مختلف در شرایط $\Delta P^* = 0$ و $L = 1.3$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود توان مصرفی روتورها با افزایش ϵ افزایش می‌یابد به طوری که از $\epsilon > 5$ این روند افزایشی شدیدتر می‌شود. بنابراین می‌توان محدوده $0.1 < \epsilon < 0.5$ را به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه کمیته‌سازی مصرفی روتورها معرفی و انتخاب نمود. همچنین $Re = 1$ می‌تواند به عنوان Re بهینه انتخاب گردد.

شکل 17 دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ را در ϵ های مختلف در شرایط $\Delta P^* = 0$ و $L = 1.3$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش ϵ دبی نیز به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش رینولدز دبی کاهش پیدا می‌کند. این موضوع به دلیل بزرگتر شدن گردابه‌ها در رینولدزهای بالاتر می‌باشد که قبلاً ذکر گردید.

با توجه به توضیحات داده شده، بایستی محدوده و مقادیر بهینه پارامتر هندسی ϵ بر اساس تغییر پارامتر عملکردی Re معرفی و انتخاب گردند. چنانچه ذکر شد در تمامی Re های بررسی شده، محدوده $0.1 < \epsilon < 0.5$ به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و نیز کمیته‌سازی مصرفی روتورها انتخاب گردید. اکنون بایستی بر اساس تغییرات دبی، مقادیر بهینه‌ی ϵ نیز معرفی گردند. اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی $\epsilon = 0.5$ و در غیر این صورت $\epsilon = 0.1$ به عنوان بهینه‌ترین نقاط معرفی می‌شوند. قابل ذکر است در تمامی دیدگاه‌ها $Re = 1$ به عنوان بهینه‌ترین رینولدز معرفی می‌گردد.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک شبیه‌سازی عددی برای تحلیل اثرات پارامترهای هندسی و

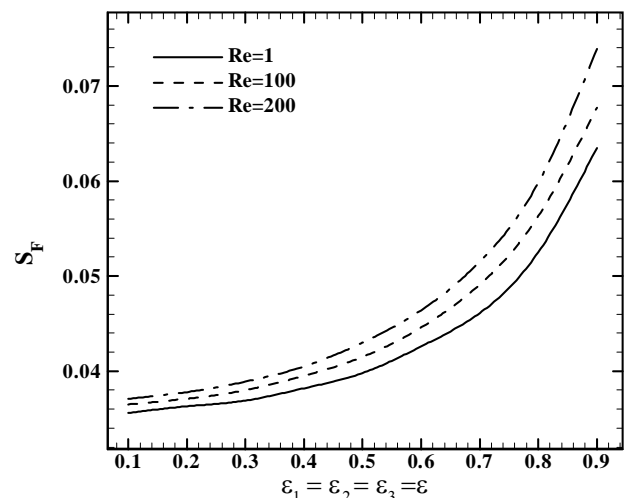


Fig. 15 Entropy generation (S_F) vs. dimensionless parameter of eccentricity (ϵ) in various Res in condition of $\Delta P^* = 0$, $L = 1.3$

شکل 15 تولید آنتروپی (S_F) در برابر پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها (ϵ) در Re های مختلف برای شرایط $L = 1.3$ و $\Delta P^* = 0$

P	دبی معین گردید اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد
P_T	بایستی 4.4 و $L = 1.6$ به عنوان بهینه‌ترین نقاط و در غیر این صورت 4.7 و
q	$L = 1.3$ از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی و 4.8 و $L = 1.2$ از دیدگاه کمیته
Q	توان مصرفی روتورها به عنوان بهینه‌ترین نقاط معرفی می‌شوند. در مورد
Re	اختلاف فشار نیز بایستی ذکر گردد از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی $\Delta P^* = 5$
S	به عنوان میزان بهینه ولی از دیدگاه تولید بیشینه دبی و کمیته توان مصرفی
S_F	روتورها $\Delta P^* = -10$ به عنوان بهینه‌ترین اختلاف فشار معرفی می‌شوند.
S_{Ff}	نتایج تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی L و عملکردی Re نشان داد که در
T	تمامی Reهای بررسی شده، دو محدوده $1.1 < L < 1.5$ و $4.5 < L < 4.9$
u	به عنوان محدوده‌های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و محدوده‌های
U	$1.2 < L < 1.6$ و $4.4 < L < 4.8$ نیز از دیدگاه کمیته توان مصرفی به
v	عنوان محدوده‌های بهینه مطرح شدند. بنابراین محدوده مشترک این دو
V	دیدگاه یعنی $1.2 < L < 1.5$ و $4.5 < L < 4.8$ می‌تواند به عنوان بهینه-
w	ترین محدوده انتخاب گردد. بر اساس تغییرات دبی معین شد اگر در طراحی
x	میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی 4.7 و $L = 1.3$ برای
X	رینولدز 100 و 200 و $L = 4.5$ و $L = 1.5$ برای رینولدز 1 و در غیر این صورت
y	4.7 و $L = 1.3$ برای رینولدز 1 و 100 و $L = 4.9$ و $L = 1.1$ برای رینولدز 200
Y	از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی به عنوان بهینه‌ترین نقاط معرفی شوند. قابل
Y_c	ذکر است در تمامی دیدگاه‌ها $Re = 1$ به عنوان بهینه‌ترین رینولدز معرفی
	خواهد شد. در خصوص تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی ε و عملکردی
	ΔP^* معین شد که در تمامی ΔP^* های بررسی شده، محدوده $0.1 < \varepsilon < 0.5$
	به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و نیز کمیته توان
	مصرفی روتورها می‌باشد. همچنین بر اساس تغییرات دبی تعیین گردید اگر
	در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی $\varepsilon = 0.5$ و
	در غیر این صورت $\varepsilon = 0.1$ به عنوان بهینه‌ترین نقاط معرفی می‌شوند. قابل
	ذکر است از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی $\Delta P^* = 5$ به عنوان میزان بهینه
	ولی از دیدگاه تولید بیشینه دبی و کمیته توان مصرفی $\Delta P^* = -10$ به
	عنوان بهینه‌ترین اختلاف فشار معرفی می‌شود. در رابطه با تأثیر تغییر
	همزمان پارامتر هندسی ε و عملکردی Re معین گردید که در تمامی Reهای
	بررسی شده، محدوده $0.1 < \varepsilon < 0.5$ به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه
	تولید آنتروپی و نیز کمیته توان مصرفی روتورها انتخاب گردید. همچنین بر
	اساس تغییرات دبی معین شد اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه
	موردنظر باشد بایستی $\varepsilon = 0.5$ و در غیر این صورت $\varepsilon = 0.1$ به عنوان
	بهینه‌ترین نقاط معرفی می‌شوند. در تمامی دیدگاه‌ها $Re = 1$ نیز به عنوان
	بهینه‌ترین رینولدز معرفی شد.

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
θ	ضریب لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ω	سرعت زوایه‌ای روتورها (rads^{-1})
E	پارامتر بی‌بعد خارج از مرکزی روتورها
Ω	اِپراتور برخورد
τ	ثابت تخفیف زمانی
φ_F	پارامتر بی‌بعد در معادله تولید آنتروپی

بالانویس‌ها

eq	تعادلی
*	مقدار بی‌بعد

زیرنویس‌ها

b	گره مرزی در قسمت جامد
f	گره مرزی در قسمت سیال
F	اصطکاکی
in	ورودی
out	خروجی
ref	مرجع
1	روتور اول
2	روتور دوم
3	روتور سوم

8- مراجع

- [1] M. Sen, D. Wajerski, M. Gad-el-Hak, A novel pump for MEMS applications, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, No. 3, pp. 624-627, 1996 .
- [2] M. C. Sharatchandra, M. Sen, M. Gad-el-Hak, Navier-Stokes simulations of a novel viscous pump, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 372-382, 1997 .
- [3] M. Abdelgawad, I. Hassan, N. Esmail, Transient behavior of the viscous micropump, *Journal of Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 18,

7- فهرست علائم

C	اندازه سرعت میکروسکوپیکی ذرات (ms^{-1})
d	قطر روتور دایروی (m)
e	سرعت‌های میکروسکوپی (ms^{-1})
f	تابع توزیع ذرات
h	ارتفاع ریز مجرای میکروپمپ (m)
k	ضریب رسانندگی سیال عامل ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
l	فاصله بین دو روتور (m)
L	پارامتر بی‌بعد مربوط به فاصله روتور 2 از 1
L_m	طول ریزمجرای میکروپمپ (m)
p	فشار (Nm^{-2})

- and staggered viscous pumps, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 9-10, pp. 2092-2099, 2010 .
- [10] D. J. Kang, Effects of channel curvature on the performance of viscous micro-pumps, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 9, pp. 3733-3740, 2014 .
- [11] 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 .
- [12] H. Khozaymeh-Nezhad, H. Niazmand, Numerical investigation of the effects of geometrical parameters of viscous micro-pump on the flow rate and entropy generation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 291-302, 2015. (in Persian فارسی)
- [13] M. Abdelgawad, I. Hassan, N. Esmail, P. Phutthavong, Numerical investigation of multistage viscous micropump configurations *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127, No. 4, pp. 724-734, 2005.
- [14] A. Bejan, *Entropy generation through heat and fluid flow*, pp. 192-196, New York: Wiley, 1994.
- [15] D. Yu, R. Mei, W. Shyy, A unified boundary treatment in lattice boltzmann method, *AIAA 41st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, pp. 953-964, 2003.
- No. 4, pp. 361-381, 2004 .
- [4] P. Phutthavong, I. Hassan, Transient performance of flow over a rotating object placed eccentrically inside a microchannel-numerical study, *Journal of Microfluid Nanofluid*, Vol. 1, No. 1, pp. 71-85, 2004 .
- [5] 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, No. 3, pp. 263-268, 2006 .
- [6] 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, No. 3, pp. 526-536, 2007 (a).
- [7] H. El.Sadi, N. Esmail, I. Hassan, Numerical modeling of non-newtonian flow in viscous micropump, *Journal of the Society of Rheology*, Vol. 36, No. 1, pp. 51-58, 2008 .
- [8] K. M. Bataineh, M. A. Al-Nimr, 2D Navier-Stokes simulations of microscale viscous pump with slip flow, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 131, No. 5, pp. 51105-7, 2009 .
- [9] L. Jianfeng, D. Jing, Flow dynamical behaviors and characteristics of aligned