



تحلیل اثرات پارامترهای هندسی و عملکردی یک میکروپمپ لزجی با رویکرد کمینه سازی 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

کمینه سازی تولید آنتروپی

روش لئیس-بولتزمن

چکیده

در مقاله حاضر یک مطالعه عددی برای تحلیل اثرات پارامترهای هندسی و عملکردی یک میکروپمپ لزجی با رویکرد کمینه سازی تولید آنتروپی به روش لئیس-بولتزمن انجام شده است. در بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی و عملکردی Δ مشخص شد که در تمامی Δ های بررسی شده، دو محدوده و به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و از طرف دیگر محدوده های و نیز از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها به عنوان محدوده های بهینه مطرح شدند. با توجه به هم پوشانی کامل محدوده های بهینه ی کمینه تولید آنتروپی با دیدگاه کمینه توان مصرفی، می توان همان محدوده های ذکر شده از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی را به عنوان بهینه ترین محدوده ها انتخاب نمود. نتایج تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی و عملکردی نشان داد که در تمامی های بررسی شده، دو محدوده و به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و محدوده های و نیز از دیدگاه کمینه توان مصرفی به عنوان محدوده های بهینه مطرح می باشند. بنابراین محدوده مشترک این دو دیدگاه یعنی و می تواند به عنوان بهینه ترین محدوده انتخاب شود. در رابطه با تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی ε و پارامترهای عملکردی Δ و معین شد که در تمامی ها و Δ های بررسی شده، محدوده به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی و نیز توان مصرفی روتورها انتخاب می شود.

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

جابه جایی سیال در ابعاد میکرو به عنوان یک موضوع تحقیقاتی چالش برانگیزی در جوامع علمی به سرعت دنبال می شود. در همین راستا انواع مکانیزم های پمپاژ از جمله استفاده از نیروهای الکترواستاتیکی،

در سال های اخیر با پیشرفت ساخت و توسعه وسایل میکروسایلی، مسأله انتقال سیال در آنها اهمیت ویژه ای 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 لزجی 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 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 [9]، 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 [10]، یک شبیه‌سازی عددی برای بررسی تأثیر میزان انحنای ریزمجا بر عملکرد یک میکروپمپ لزجی با یک روتور دایروی منفرد انجام داد. نتایج نشان دادند در تمامی اعداد رینولدز بررسی شده، میکروپمپ-هایی با ریزمجرای خمیده به مراتب دبی بیشتری نسبت به میکروپمپ‌هایی با ریزمجرای مستقیم تولید می‌کنند. جیانفنگ و همکاران [11]، 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. در کاری جدید، خزیمه نژاد و نیازمند [12]، با استفاده از روش حجم محدود به بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد یک میکروپمپ لزجی 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 Δ^* ،

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 لزجی 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 لزجی 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

الکترو هیدرودینامیکی و اجزاء مکانیکی به عنوان عامل انتقال سیال ارائه شده اند. در سیستم‌های میکروسایالی نیروهای اینرسی و گریز از مرکز به طور قابل توجهی محدود بوده ولی نیروهای لزجی می‌توانند به عنوان نیروی غالب رانش سیال معرفی شوند. با توجه به این موضوع، مبحث میکروپمپ‌های لزجی 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 لزجی، آن دسته که عامل رانش سیال در آنها استوانه چرخان می‌باشد، به دلیل ساخت آسان تر و کاربرد فراوان تر 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 لزجی 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 لزجی 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 لزجی 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 فلوئنت تأثیر شکل‌های مختلف سطح مقطع روتور منفرد را بر عملکرد میکروپمپ لزجی 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 لیتیس-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. 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 I، U و L 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

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

3- معادلات حاکم

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

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

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

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

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

با توجه به اینکه در این مقاله تمامی محاسبات به صورت بی بعد گزارش می شود لذا برای این منظور ارتفاع ریزمچرا h ، به عنوان مقیاس طولی و سرعت سطح روتورها U ، به عنوان مقیاس سرعتی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این دو مقیاس، متغیرهای بی بعد حاکم بر این مسئله مطابق رابطه (8) تعریف می شوند:

$$\frac{x}{h}, \frac{y}{h}, \frac{u}{U_{ref}}, \frac{v}{U_{ref}}, \frac{p}{\rho U_{ref}^2} \quad (8)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} = - \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} = - \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

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

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

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

برای ساده سازی، مسئله موردنظر به صورت همدمای بررسی می شود. از این

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

2- فیزیک مسئله و فرضیات

شماتیکی از فیزیک مسئله حاضر و شرایط مرزی آن در شکل 1 نشان داده شده است. مسئله مورد نظر شامل یک ریزمچرای تخت با ارتفاع h 3 میلی متر و طول m 50 میلی متر در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به شرایط جریان کاملاً توسعه یافته درون ریزمچرا بایستی طول های 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 طول های l_1 برابر 16 میلی متر و l_3 برابر 34 میلی متر به طور ثابت انتخاب شده اند. همان طور که در شکل 1 نیز مشاهده می شود l_2 یعنی فاصله بین استوانه دوم و استوانه بالادست آن می تواند در محدوده 18.4 تا 31.6 میلی متر تغییر کند. در همین راستا، عدد بی بعد که نشان دهنده تغییرات مکانی روتور دوم نسبت به روتور اول می باشد به صورت رابطه (1) تعریف می شود:

$$\frac{l}{h} \quad (1)$$

با توجه به شکل 1، درون ریزمچرای تخت نشان داده شده سه روتور دایروی با قطرهای مساوی d و سرعت زاویه ای ω به صورت خارج از مرکز در نظر گرفته شده است. این سه روتور می توانند در فاصله های عمودی مختلفی از مرکز ریزمچرا قرار گیرند. در همین راستا عدد بی بعد ε که نشان دهنده میزان خارج از مرکزی روتورها می باشد برای هر یک از روتورها به صورت رابطه (2) تعریف می شود:

$$\varepsilon_1 = \frac{y_{c1}}{\frac{h}{2} - \frac{d_1}{2}}, \quad \varepsilon_2 = \frac{y_{c2}}{\frac{h}{2} - \frac{d_2}{2}}, \quad \varepsilon_3 = \frac{y_{c3}}{\frac{h}{2} - \frac{d_3}{2}} \quad (2)$$

در این مقاله اعداد بی بعد Δ^* به عنوان پارامترهای عملکردی به ترتیب مطابق روابط (3) و (4) معرفی می شوند:

$$\frac{U_{ref} d}{\theta} = U_{ref} \frac{d}{\omega} \quad (3)$$

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

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 می باشند. در خصوص بی بعد سازی رابطه (4) بایستی ذکر گردد با توجه به اینکه افزایش فشار در میکروپمپ از بیرون اعمال می شود بنابراین بهتر است آن را با کمیتی که مستقل از سرعت روتورها باشد بی بعد کرد. از این رو عبارت $\rho \theta^2 / d^2$ به جای ρU_{ref}^2 برای بی بعد سازی پارامتر موردنظر استفاده شده است [2].

در پژوهش حاضر، تأثیر تغییر پارامترهای هندسی و عملکردی بی بعد

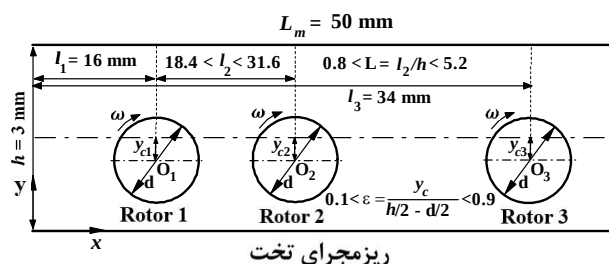


Fig. 1 A schematic of the present problem

شکل 1 شماتیکی از فیزیک مسئله حاضر

جدول 1 محدوده تغییرات پارامترهای بی بعد معرفی شده در این مطالعه

Table 1 Variations range of dimensionless parameters introduced in this study

پارامتر معرفی شده	محدوده تغییرات
عدد بی بعد فاصله روتورها	0.8-5.2
عدد بی بعد خارج از مرکزی ε	0.1-0.9
عدد بی بعد رینولدز	1-200
عدد بی بعد اختلاف فشار Δ^*	-10 - 25

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

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:

$$f_{\alpha}^{eq} = w_{\alpha} \rho \left[\frac{e_{\alpha} \cdot U}{c_s^2} - \frac{e_{\alpha} \cdot U^2}{c_s^4} - \frac{U^2}{c_s^2} \right] \quad (20)$$

$$\begin{cases} w_{\alpha} = \alpha \\ w_{\alpha} = \alpha \\ w_{\alpha} = \alpha \end{cases}$$

در رابطه (20)، U بردار سرعت ماکروسکوپی، ρ چگالی سیال و $C = \sqrt{c_s}$ 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 چابن-انسکاگ می توان نشان داد که ویسکوزیته سینماتیکی سیال تابعی است از ثابت تخفیف زمانی و به صورت رابطه (23) تعریف می شود:

$$\eta = \tau c_s \quad (23)$$

2-2- 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.

$$f_{\alpha}(x_f, t + \delta t) = \frac{1}{\Delta} \cdot \left[-\Delta \cdot f_{\alpha}(x_f, t + \delta t) + \Delta \cdot f_{\alpha}(x_b, t + \delta t) + \Delta \cdot f_{\alpha}(x_{ff}, t + \delta t) \right] \quad (24)$$

$$w_{\alpha} \rho_w \frac{e_{\alpha} \cdot u_w}{C^2}$$

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

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

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:

$$F = \Phi_F \left[\left(\frac{\partial}{\partial} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial} + \frac{\partial}{\partial} \right)^2 \right] \quad (15)$$

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

1-4- 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 موزسکوویک 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.

$$\begin{cases} e_{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \theta_{\alpha} C \\ \alpha - \pi \end{pmatrix} \\ e_{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \theta_{\alpha} C \\ \alpha - \pi \end{pmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

در رابطه (17)، C 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:

$$\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} = e_{\alpha} \cdot \nabla f_{\alpha} - \Omega_{\alpha} \quad (18)$$

که Ω اپراتور برخورد می باشد و با استفاده از مدل

(19) نوشته می شود:

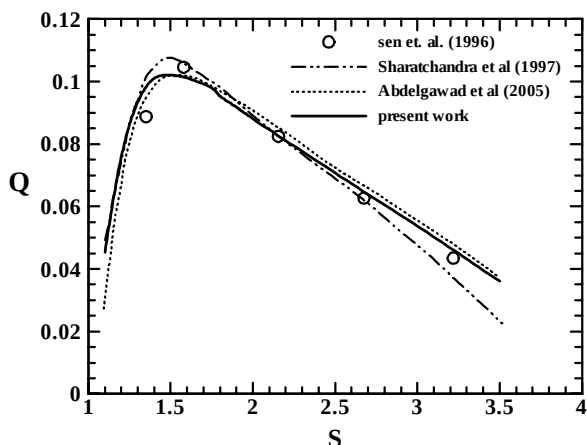


Fig. 3 Comparison of dimensionless flow flux vs. parameter of rotor size in the present work with experimental and numerical work of others in condition of Δ^* and ε

شکل 3 مقایسه دبی بی بعد در برابر پارامتر بی بعد اندازه روتور در کار حاضر با کارهای تجربی و عددی دیگران در شرایط Δ^* و ε

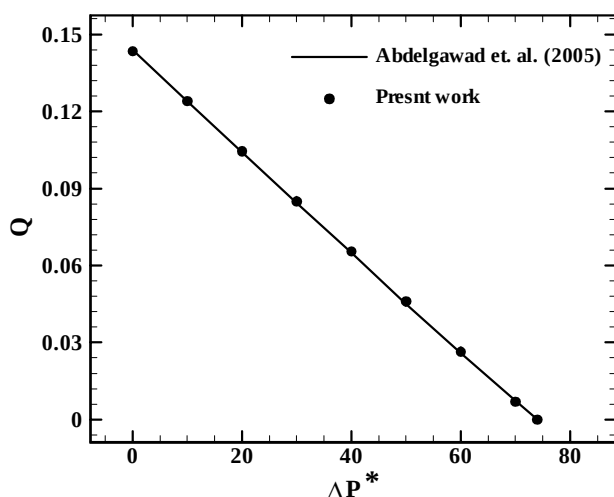


Fig. 4 Comparison of dimensionless flow flux vs. parameter of dimensionless pressure difference at the present work with Ref. [13] in condition of ε and Δ^*

شکل 4 مقایسه دبی بی بعد در برابر پارامتر بی بعد اختلاف فشار Δ^* در کار حاضر با کار مرجع [13] در شرایط ε و Δ^*

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 P نمایش داده می شود. همان طور که در شکل 5 نشان داده شده است تولید آنتروپی در برابر پارامتر بی بعد فاصله ی روتور در Δ^* های مختلف و در شرایط $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ و Δ^* ثابت با افزایش تولید آنتروپی به شدت کاهش پیدا می کند به طوری که این روند کاهشی تا میزان ادامه می یابد. بعد از این میزان دوباره تولید آنتروپی افزایش

که در رابطه (24)، $0 \leq \Delta \leq \frac{|x_f - x_w|}{|x_f - x_b|}$ ، 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 و اختلاف فشار بی بعد Δ^* هر دو 0.5 و عدد بی بعد خارج از مرکزی ε می باشند در نظر گرفته شده است. شکل 3 مقایسه ای بین نتایج دبی بی بعد خروجی در مقابل پارامتر بی بعد اندازه روتور h/d کار حاضر با نتایج تجربی سن و همکاران [1]، عددی شارجندرا 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 و τ 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 d ، $8d$ و d و سایر شرایط نیز ε می باشند در نظر گرفته شده است. شکل 4 مقایسه ای بین نتایج دبی بی بعد خروجی در مقابل پارامتر بی بعد اختلاف فشار Δ^* 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 و τ 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

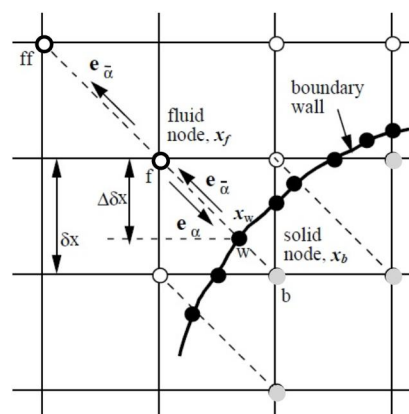


Fig. 2 Schematic of Cartesian grid and boundary points in LBM

شکل 2 شماتیکی از شبکه دکارتی و نقاط مرزی در روش لئیس-بولتزمن

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

با توجه به توضیحات داده شده، بایستی محدوده و مقادیر بهینه پارامتر هندسی بر اساس تغییر پارامتر عملکردی Δ^* معرفی و انتخاب گردد. چنانچه ذکر شد در تمامی Δ^* های بررسی شده، دو محدوده و به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه

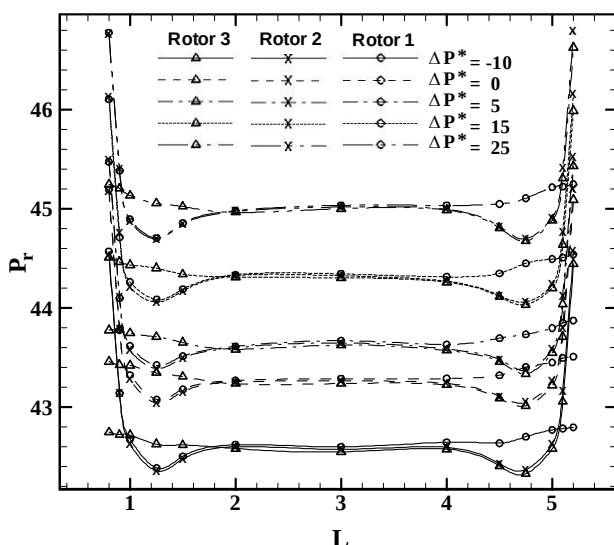


Fig. 6 Power P_r vs. dimensionless parameter of distance rotor L in various Δ^* s in condition of $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$. شکل 6 توان مصرفی P_r در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور در Δ^* های مختلف برای شرایط و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$

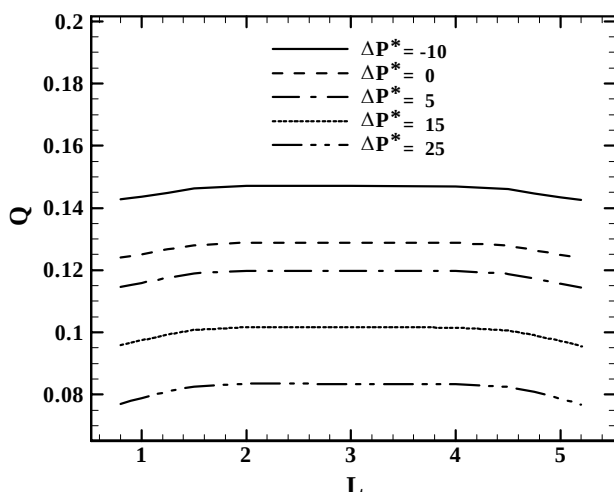


Fig. 7 Dimensionless flow flux Q vs. dimensionless parameter of distance rotor L in various Δ^* s in condition of $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$. شکل 7 دبی بی بعد در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور در Δ^* های مختلف برای شرایط و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$

پیدا می کند که این افزایش تا ادامه داشته و بعد از آن تقریباً ثابت می شود. از تا حدود دوباره تولید آنتروپی کاهش داشته و بعد از این 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 حالتی که 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 Δ^* های بررسی شده دو محدوده و می توانند به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه کمینه 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 در محدوده های مذکور انتخاب می شوند. علاوه بر موارد فوق، با دقت در روند تغییرات Δ^* می توان مشاهده نمود که کمترین تولید آنتروپی در Δ^* اتفاق افتاده است. بنابراین این Δ^* می تواند به عنوان Δ^* بهینه از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی معرفی و انتخاب گردد.

برای ارائه یک تحلیل جامع در کار حاضر، پارامتر بی بعد توان مصرفی روتورها P_r در برابر Δ^* های مختلف و در شرایط و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 6 که گویای همین موضوع می باشد نشان می دهد در یک Δ^* 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 به کمترین میزان ممکن می رسد. همچنین در تمامی Δ^* های بررسی شده می توان دو محدوده و را به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها معرفی کرد. قابل ذکر است که حداقل توان مصرفی روتورها در $\Delta^* = -$ حاصل شده

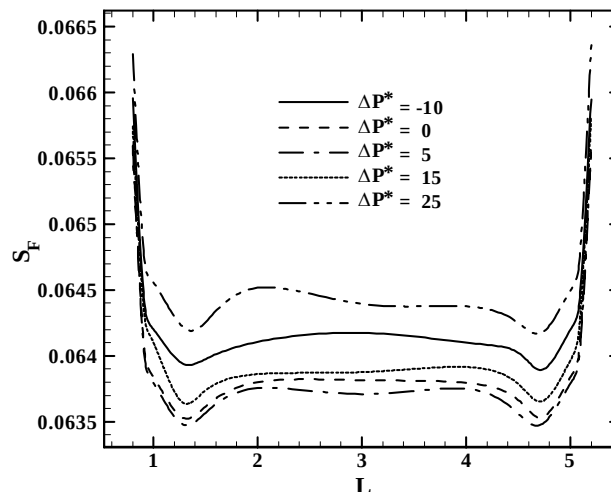


Fig. 5 Entropy generation F vs. dimensionless parameter of distance rotor L in various Δ^* s in condition of $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$. شکل 5 تولید آنتروپی F در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور در Δ^* های مختلف برای شرایط و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$

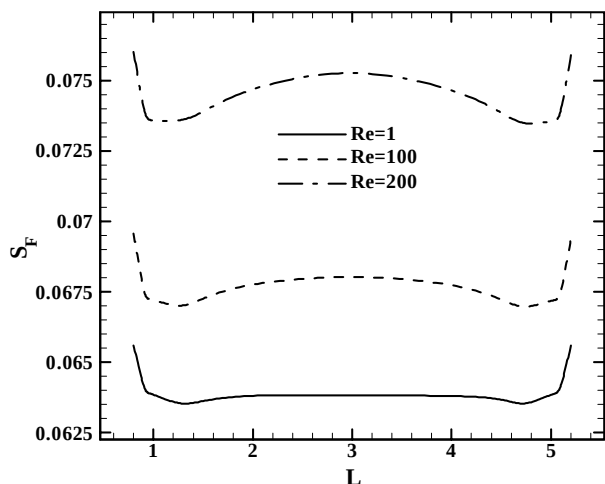


Fig. 8 Entropy generation S_F vs. dimensionless parameter of distance rotor in various $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ in condition of Δ^*

شکل 8 تولید آنتروپی S_F در برابر پارامتر بی بعد فاصله روتور در شرایط مختلف برای شرایط Δ^* و $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

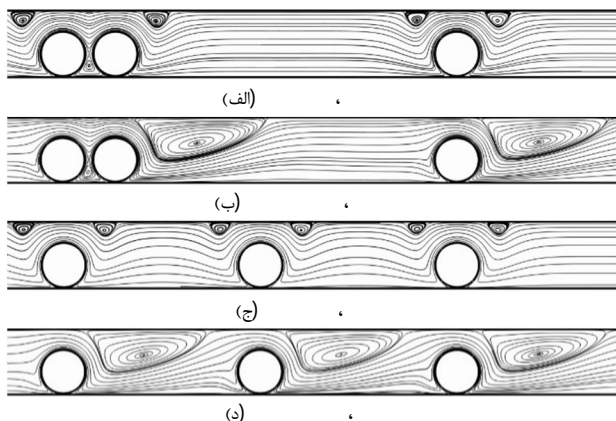


Fig. 9 Streamlines around the rotors in two Reynolds of 1 and 200 for in condition of Δ^* and $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

شکل 9 خطوط جریان اطراف روتورها در دو رینولدز 1 و 200 برای 0.8 و 3 و شرایط Δ^* و $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

به طور کلی محدوده های Δ^* و $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ را می توان به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی معرفی و انتخاب نمود. همچنین مقادیر 4.9 و 4.7 برای رینولدز 200 و 4.7 و 4.9 برای رینولدزهای 1 و 100 دارای کمترین تولید آنتروپی بوده و از این دیدگاه بهینه ترین نقاط می باشند. رینولدز 1 نیز به دلیل داشتن کمترین تولید آنتروپی به عنوان رینولدز بهینه معرفی می شود.

شکل 10 توان مصرفی روتورها را در $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ و Δ^* های مختلف در شرایط مختلف مشاهده می شود در تمامی ها با افزایش توان مصرفی روتورها کاهش می یابد. به طوری که روتور 1 برای رینولدز 1 در $\Delta^* = 0.8$ و روتور 2 برای رینولدز 2 در $\Delta^* = 0.8$ و روتور 3 برای رینولدز 3 در $\Delta^* = 0.8$ به کمترین مقدار ممکن می رسد و بعد از این مقدار یک روند تقریباً ثابتی را تا انتها طی می کند. روتور 2 نیز برای رینولدز 1 در $\Delta^* = 0.8$ و روتور 3 برای رینولدز 3 در $\Delta^* = 0.8$ به کمترین مقدار خود می رسد. سپس یک روند افزایشی را تا $\Delta^* = 0.8$ ادامه و بعد از آن تا تقریباً ثابت می ماند. در انتها نیز یک جهش افزایشی خواهد داشت. روتور 3 تا

تولید آنتروپی و از طرف دیگر محدوده های Δ^* و $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

نیز از دیدگاه کمیته توان مصرفی روتورها به عنوان محدوده های بهینه مطرح شدند. با توجه به هم پوشانی کامل محدوده های بهینه کمیته تولید آنتروپی با دیدگاه کمیته توان مصرفی، می توان اظهار داشت بهینه ترین محدوده ها، همان محدوده های ذکر شده از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی می باشند. اکنون بایستی بر اساس تغییرات دبی، مقادیر بهینه Δ^* نیز معرفی گردند. همان طور که ذکر شد دبی تا افزایش و از کاهش یافته و بین این دو روند نسبتاً ثابتی را طی کرده است. بنابراین اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه مورد نظر باشد بایستی 4.4 و 4.7 به عنوان بهینه ترین نقاط و در غیر این صورت 4.7 و 4.8 از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی و 4.8 و 4.7 از دیدگاه کمیته توان مصرفی می شوند. قابل ذکر است از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی $\Delta^* = 0.8$ به عنوان میزان بهینه ولی از دیدگاه تولید بیشینه دبی و کمیته توان مصرفی روتورها $\Delta^* = 0.8$ به عنوان بهینه ترین اختلاف فشار معرفی می شود.

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

در این قسمت با تغییر پارامتر عملکردی در محدوده 1 تا 200، پارامتر بهینه معرفی می شود. شکل 8 تولید آنتروپی را در $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ و $\Delta^* = 0.8$ شرایط Δ^* و $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ نشان می دهد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است تولید آنتروپی در تمامی ها، با افزایش کاهش، به طوری که در رینولدز 200 در $\Delta^* = 0.8$ و در سایر رینولدزها در $\Delta^* = 0.8$ به حداقل مقدار ممکن می رسد. بعد از این مقدار کمیته، در رینولدزهای 100 و 200 با افزایش قابل توجه تولید آنتروپی تا روبرو می شویم. در انتها نیز یک جهش افزایشی در تولید آنتروپی برای همه ها مشاهده می شود. همچنین با افزایش 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 و 3 و شرایط $\Delta^* = 0.8$ و $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ نشان می دهد. مطابق شکل 9 (الف) زمانی که روتورهای 1 و 2 در نزدیک ترین فاصله قرار دارند گردایان های سرعت بین این دو روتور باعث افزایش شدید تولید آنتروپی می شود. با افزایش رینولدز تا 200 همانند شکل 9 (ب) گردابه های تولید شده در پایین دست روتورهای 2 و 3 بسیار بزرگ تر شده اند. این موضوع باعث افزایش شدیدتر گردایان های سرعت در این نواحی می شود. در نتیجه تولید آنتروپی نیز افزایش بیشتری خواهد داشت. بعد از اینکه دو روتور از هم فاصله می گیرند (تا حدود $\Delta^* = 0.8$) از گردایان سرعت بین آنها کاسته می شود. بنابراین تولید آنتروپی نیز کاهش می یابد. با افزایش بیشتر تا مقدار 3، در رینولدز 1 تغییر چندانی در تولید آنتروپی مشاهده نمی شود ولی در رینولدزهای بالاتر به ویژه 200 تولید آنتروپی با افزایش قابل توجهی همراه خواهد بود. این موضوع می تواند با توجه به شکل 9 (ج) و (د) تشریح گردد. در رینولدز 1 گردابه های 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 پایین دست روتور 1 به شدت بزرگ شده است و همین موضوع باعث افزایش تولید آنتروپی خواهد شد. در ادامه بایستی محدوده ها و مقادیر بهینه برای پارامتر انتخاب شوند.

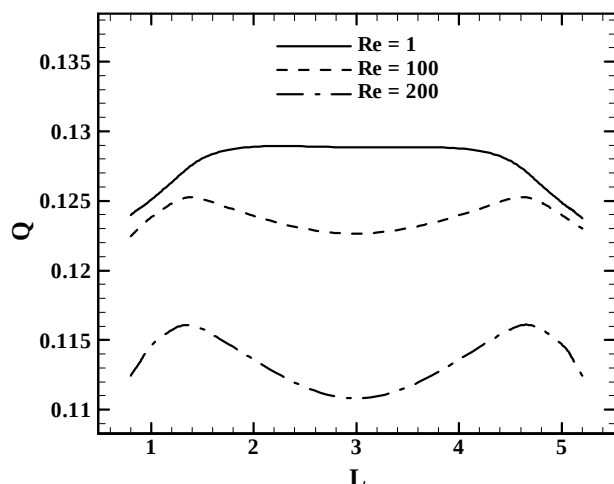


Fig. 11 Dimensionless flow flux vs. dimensionless parameter of distance rotor in various ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 and Δ^*

شکل 11 دبی بی بعد در برابر پارامتری بی بعد فاصله روتور در شرایط مختلف ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 و Δ^*

میزان دبی افزایش خواهد داشت. در انتها نیز در همه رینولدزها به دلیل افزایش اصطکاک بین روتورهای 2 و 3 از دبی میکروپمپ کاسته می شود. با توجه به توضیحات داده شده، بایستی محدوده و مقادیر بهینه پارامترهای هندسی بر اساس تغییر پارامتر عملکردی معرفی و انتخاب گردند. چنانچه ذکر شد در تمامی های بررسی شده، دو محدوده و به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و از طرف دیگر محدوده های و نیز از دیدگاه کمینه توان مصرفی به عنوان محدوده های بهینه مطرح شدند. بنابراین محدوده مشترک این دو دیدگاه یعنی و می تواند به عنوان بهینه ترین محدوده انتخاب گردد. اکنون بایستی بر اساس تغییرات دبی، مقادیر بهینه نیز معرفی گردند. اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه مورد نظر باشد بایستی 4.7 و برای رینولدز 100 و 200 و 4.5 و برای رینولدز 1 به عنوان بهینه ترین نقاط و در غیر این صورت 4.7 و برای رینولدز 1 و 100 و 4.9 و برای رینولدز 200 از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی به عنوان بهینه ترین نقاط معرفی می شوند. قابل ذکر است در تمامی دیدگاه ها به عنوان بهینه ترین رینولدز معرفی خواهد شد.

3-5- بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامترهای هندسی ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 و پارامتر عملکردی Δ^*

یکی دیگر از پارامترهای هندسی اثرگذار بر عملکرد میکروپمپ های لرزجی فاصله روتورها از دیواره های آن می باشد. 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، در تمام موارد بررسی شده در محدوده های بهینه معرفی شده قرار داشته و از طرف دیگر نیز در تغییرات Δ^* و به عنوان بهینه ترین پارامتر از دیدگاه تولید آنتروپی انتخاب شده است. بنابراین در ادامه کار این به عنوان فاصله بین روتورها استفاده خواهد شد.

شکل 12 تولید آنتروپی را در ϵ_1 های مختلف در شرایط و نشان می دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می شود در تمامی

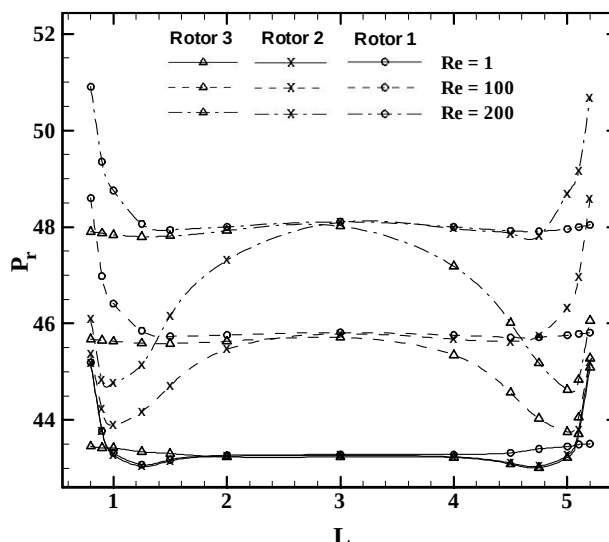


Fig. 10 Power vs. dimensionless parameter of distance rotor in various ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 and Δ^*

شکل 10 توان مصرفی P در برابر پارامتری بی بعد فاصله روتور در شرایط مختلف برای شرایط ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 و Δ^*

حدود روند تقریباً ثابتی داشته است ولی بعد از این مقدار به ویژه در رینولدزهای بالا دچار افت شدیدی می شود. البته در انتها نیز یک روند صعودی را طی خواهد نمود. با توجه به تشریح فوق، می توان محدوده های و را به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها معرفی و انتخاب نمود. بایستی ذکر گردد معرفی یک مقدار بهینه برای این حالت امکان پذیر نیست. همچنین کمترین توان مصرفی روتورها در بوده است. بنابراین رینولدز 1 به عنوان رینولدز بهینه از دیدگاه کمینه توان مصرفی روتورها معرفی می شود. شکل 11 دبی میکروپمپ را در و های مختلف در شرایط Δ^* و $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش فاصله روتور 1 از 2، دبی نیز افزایش می یابد. این افزایش برای رینولدز 100 و 200 تا و برای رینولدز 1 تا ادامه داشته است. سپس دبی در رینولدز 1 تا حدود

تقریباً ثابت می ماند و در انتها نیز یک روند کاهشی خواهد داشت. برای دو رینولدز دیگر دبی تا حدود یک روند نزولی و سپس تا 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 امکان پذیر است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود در رینولدز 1 گردابه های ایجاد شده در میکروپمپ به مراتب از گردابه های ایجاد شده در رینولدز 200 کوچکتر هستند. گردابه های ایجاد شده می توانند نقش یک مانع را برای عبور جریان ایفا کنند و باعث کاهش دبی در میکروپمپ شوند. زمانی که

می باشد اصطکاک بین دو روتور 1 و 2 بسیار زیاد است. اما با افزایش از این اصطکاک کاسته می شود و به دنبال آن دبی نیز افزایش می یابد. در رینولدز 1 چون گردابه ها کوچک هستند در محدوده تأثیری در روند دبی نخواهند داشت. ولی در رینولدزهای بالاتر چون گردابه های پایین دست روتور 1 با افزایش نیز بزرگتر می شود به همین دلیل نقش مقاومتی آن نیز پررنگ تر خواهد شد. بنابراین دبی تا یک روند کاهشی را طی خواهد نمود. بعد از این چون گردابه پایین دست روتور 2 در حال کوچکتر شدن می باشد جریان می تواند با مقاومت کمتری از آن مقطع عبور کند. از این رو

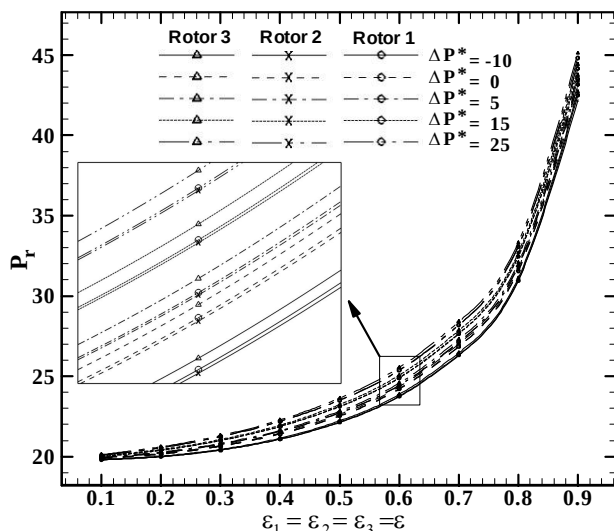


Fig. 13 Power P_r vs. dimensionless parameter of eccentricity ε in various ΔP^* s in condition of and

شکل 13 توان مصرفی روتورها P_r در برابر پارامتر بی بعد خارج از مرکزی روتورها ε در ΔP^* های مختلف برای شرایط و

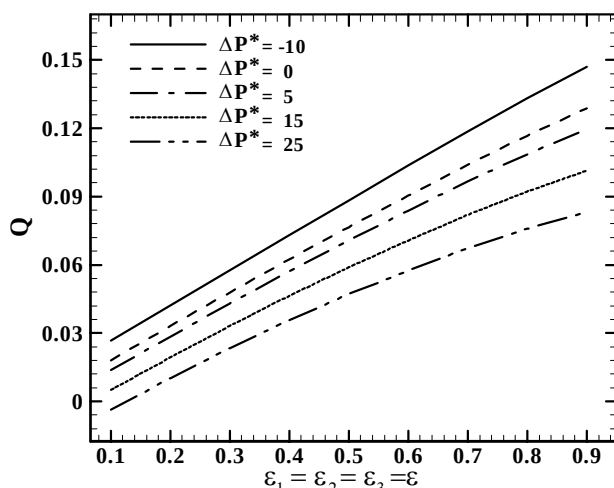


Fig. 14 Dimensionless flow flux Q vs. dimensionless parameter of eccentricity ε in various ΔP^* s in condition of and

شکل 14 دبی بی بعد در برابر پارامتر بی بعد خارج از مرکزی روتورها ε در ΔP^* های مختلف برای شرایط و

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

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

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

ΔP^* ها با افزایش ε تولید آنتروپی نیز افزایش می یابد. البته این روند افزایشی از ε نسبت به مقادیر کوچکتر از آن از شدت بیشتری برخوردار می باشد. دلیل این روند افزایشی، با توجه به افزایش اصطکاک در ε های بزرگتر کاملاً منطقی می باشد. زمانی که روتورها به دیواره پایینی نزدیک می شوند اصطکاک بین آنها و دیواره افزایش می یابد. بنابراین تولید آنتروپی نیز افزایش خواهد یافت. در انتها برای انتخاب محدوده بهینه، می توان محدوده ε را به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی انتخاب نمود. همچنین ΔP^* می تواند به عنوان ΔP^* بهینه انتخاب گردد.

شکل 13 توان مصرفی روتورها را در ε های مختلف در شرایط و نشان می دهد. با توجه به این شکل، در تمامی ΔP^* ها با افزایش ε توان مصرفی روتورها نیز افزایش می یابد. به طوری که روند افزایشی آن در محدوده ε سریع تر از ε های کوچکتر از آن است. دلیل این موضوع، افزایش اصطکاک با افزایش عدد خارج از مرکزی روتورها می باشد. بنابراین نیروی بیشتری برای حرکت دورانی روتورها لازم می شود. در انتها برای انتخاب محدوده بهینه، می توان محدوده ε 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 $\Delta P^* = -$ به عنوان ΔP^* بهینه از دیدگاه کمترین توان مصرفی انتخاب و معرفی می گردد.

شکل 14 دبی بی بعد خروجی از میکروپمپ را در ε های مختلف در شرایط و نشان می دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می شود با افزایش ε دبی نیز به طور تقریباً خطی افزایش می یابد. البته در ΔP^* های بالاتر و به ویژه در ε های بزرگتر، روند افزایش دبی کمی از حالت خطی فاصله می گیرد. در رابطه با ذکر دلیل این روند صعودی می توان گفت زمانی که روتورها در فاصله بیشتری از دیواره پایینی میکروپمپ قرار دارند بیشتر سیال، اطراف خود روتورها می چرخد. ولی زمانی که این فاصله کم می شود سیال بیشتری می تواند از فضای بین روتورها و دیواره بالایی عبور کند. بدین ترتیب با افزایش ε دبی نیز افزایش می یابد.

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

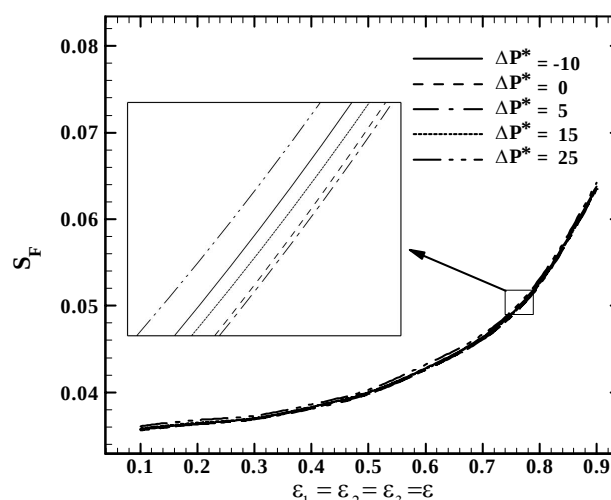


Fig. 12 Entropy generation F vs. dimensionless parameter of eccentricity ε in various ΔP^* s in condition of

شکل 12 تولید آنتروپی F در برابر پارامتر بی بعد خارج از مرکزی روتورها ε در ΔP^* های مختلف برای شرایط و

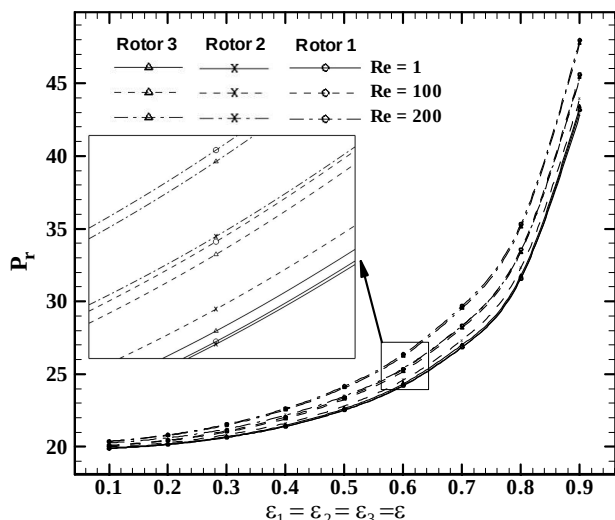


Fig. 16 Power P_r vs. dimensionless parameter of eccentricity ε in various Res in condition of Δ^* and

شکل 16 توان مصرفی روتورها P_r در برابر پارامتر بی بعد خارج از مرکزی روتورها ε در Δ^* برای شرایط مختلف

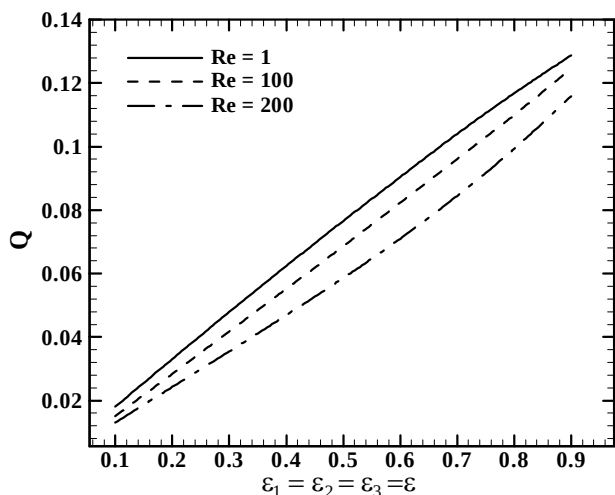


Fig. 17 Dimensionless flow flux Q vs. dimensionless parameter of eccentricity ε in various Res in condition of Δ^* and

شکل 17 دبی بی بعد در برابر پارامتر بی بعد خارج از مرکزی روتورها ε در Δ^* برای شرایط مختلف

عملکردی یک میکروپمپ لرجتی با رویکرد کمیته سازی تولید آنتروپی به روش لیتیس-بولتزمن انجام شده است. در پژوهش حاضر، تأثیر تغییر پارامترهای هندسی بی بعد فاصله روتور 2 از 1 و خارج از مرکزی روتورها ε و نیز پارامترهای عملکردی بی بعد اختلاف فشار ابتدا و انتهای میکروپمپ Δ^* و رینولدز بر عملکرد میکروپمپ بررسی شده است. در بررسی تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی و عملکردی Δ^* مشخص شد که در تمامی Δ^* های بررسی شده، دو محدوده و محدوده های به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و از طرف دیگر مصرفی روتورها به عنوان محدوده های بهینه مطرح شدند. با توجه به هم پوشانی کامل محدوده های بهینه کمیته تولید آنتروپی با دیدگاه کمیته توان مصرفی، می توان گفت بهینه ترین محدوده ها، همان محدوده های ذکر شده از دیدگاه کمیته تولید آنتروپی می باشند، همچنین بر اساس تغییرات

بهینه ε معرفی می شود. شکل 15 تولید آنتروپی را در ε های مختلف در شرایط Δ^* و نشان می دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می شود در تمامی ε ها با افزایش ε تولید آنتروپی نیز افزایش می یابد ولی این روند صعودی در ε دارای شدت بیشتری می باشد. در انتها برای انتخاب محدوده بهینه، می توان محدوده ε را به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی انتخاب نمود. همچنین می تواند به عنوان بهینه انتخاب گردد.

شکل 16 توان مصرفی روتورها را در ε های مختلف در شرایط Δ^* و نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود توان مصرفی روتورها با افزایش ε افزایش می یابد به طوری که از ε این روند افزایشی شدیدتر می شود. بنابراین می توان محدوده ε را به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه کمیته توان مصرفی روتورها معرفی و انتخاب نمود. همچنین می تواند به عنوان بهینه انتخاب گردد.

شکل 17 دبی بی بعد خروجی از میکروپمپ را در ε های مختلف در شرایط Δ^* و نشان می دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می شود با افزایش ε دبی نیز به طور تقریباً خطی افزایش می یابد. همچنین با افزایش رینولدز دبی کاهش پیدا می کند. این موضوع به دلیل بزرگتر شدن گردابه ها در رینولدزهای بالاتر می باشد که قبلاً ذکر گردید.

با توجه به توضیحات داده شده، بایستی محدوده و مقادیر بهینه پارامتر هندسی ε بر اساس تغییر پارامتر عملکردی معرفی و انتخاب گردند. چنانچه ذکر شد در تمامی ε های بررسی شده، محدوده ε به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و نیز کمیته توان مصرفی روتورها انتخاب گردید. اکنون بایستی بر اساس تغییرات دبی، مقادیر بهینه ε نیز معرفی گردند. اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی ε و در غیر این صورت ε به عنوان بهینه ترین نقاط معرفی می شوند. قابل ذکر است در تمامی دیدگاه ها به عنوان بهینه ترین رینولدز معرفی می گردد.

6- نتیجه گیری

در این مقاله یک شبیه سازی عددی برای تحلیل اثرات پارامترهای هندسی و

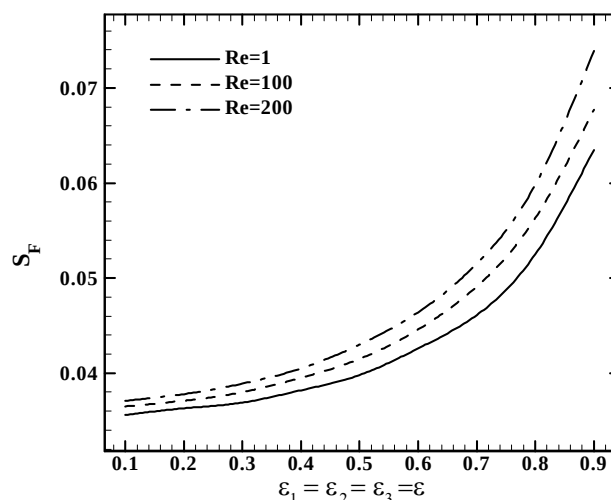


Fig. 15 Entropy generation F vs. dimensionless parameter of eccentricity ε in various Res in condition of Δ^* and

شکل 15 تولید آنتروپی F در برابر پارامتر بی بعد خارج از مرکزی روتورها ε در Δ^* برای شرایط مختلف

دبی معین گردید اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد		فشار بی بعد
بایستی 4.4 و به عنوان بهینه ترین نقاط و در غیر این صورت 4.7 و	r	عدد بی بعد توان مصرفی روتور
از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی و 4.8 و از دیدگاه کمینه	q	دبی خروجی از میکروپمپ 3^{-1}
توان مصرفی روتورها به عنوان بهینه ترین نقاط معرفی می شوند. در مورد		دبی بی بعد خروجی از میکروپمپ
اختلاف فشار نیز بایستی ذکر گردد از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی Δ^*		عدد بی بعد رینولدز
به عنوان میزان بهینه ولی از دیدگاه تولید بیشینه دبی و کمینه توان مصرفی	S_f	عدد بی بعد اندازه روتور
روتورها $\Delta^* = -$ به عنوان بهینه ترین اختلاف فشار معرفی می شوند.	F	نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی 3^{-1}
نتایج تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی و عملکردی نشان داد که در	T	نرخ بی بعد تولید آنتروپی اصطکاکی
تمامی های بررسی شده، دو محدوده و	u	دما
به عنوان محدوده های بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و محدوده های	v	سرعت در راستای 1^{-1}
و نیز از دیدگاه کمینه توان مصرفی به	w	سرعت بی بعد در راستای
عنوان محدوده های بهینه مطرح شدند. بنابراین محدوده مشترک این دو	x	سرعت در راستای 1^{-1}
دیدگاه یعنی و می تواند به عنوان بهینه-	y	ضریب وزنی
ترین محدوده انتخاب گردد. بر اساس تغییرات دبی معین شد اگر در طراحی	y_c	مختصه طولی کارترین در راستای افق
میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی 4.7 و برای		مختصه بی بعد در راستای افق
رینولدز 100 و 200 و 4.5 و برای رینولدز 1 و در غیر این صورت		مختصه طولی کارترین در راستای عمود
4.7 و برای رینولدز 1 و 100 و 4.9 و برای رینولدز 200		مختصه بی بعد در راستای عمود
از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی به عنوان بهینه ترین نقاط معرفی شوند. قابل		فاصله مرکز روتور تا خط افقی مار بر مرکز میکروپمپ
ذکر است در تمامی دیدگاه ها به عنوان بهینه ترین رینولدز معرفی		
خواهد شد. در خصوص تأثیر تغییر همزمان پارامتر هندسی E و عملکردی		
Δ^* معین شد که در تمامی Δ^* های بررسی شده، محدوده E		
به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه تولید آنتروپی و نیز کمینه توان		
مصرفی روتورها می باشد. همچنین بر اساس تغییرات دبی تعیین گردید اگر		
در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه موردنظر باشد بایستی E و		
در غیر این صورت E به عنوان بهینه ترین نقاط معرفی می شوند. قابل		
ذکر است از دیدگاه کمینه تولید آنتروپی Δ^* به عنوان میزان بهینه		
ولی از دیدگاه تولید بیشینه دبی و کمینه توان مصرفی $\Delta^* = -$ به		
عنوان بهینه ترین اختلاف فشار معرفی می شود. در رابطه با تأثیر تغییر		
همزمان پارامتر هندسی E و عملکردی معین گردید که در تمامی های		
بررسی شده، محدوده E به عنوان محدوده بهینه از دیدگاه		
تولید آنتروپی و نیز کمینه توان مصرفی روتورها انتخاب گردید. همچنین بر		
اساس تغییرات دبی معین شد اگر در طراحی میکروپمپ مقدار دبی بیشینه		
موردنظر باشد بایستی E و در غیر این صورت E به عنوان		
بهینه ترین نقاط معرفی می شوند. در تمامی دیدگاه ها نیز به عنوان		
بهینه ترین رینولدز معرفی شد.		

علائم یونانی

ρ	چگالی 3^{-1}
μ	لزجت دینامیکی 1^{-1}
θ	ضریب لزجت سینماتیکی 2^{-1}
ω	سرعت زوایای روتورها 1^{-1}
E	پارامتر بی بعد خارج از مرکزی روتورها
Ω	اثرات برخورد
τ	ثابت تخفیف زمانی
φ_F	پارامتر بی بعد در معادله تولید آنتروپی

بالانویس ها

eq	تعدادی
*	مقدار بی بعد

زیرنویس ها

b	گره مرزی در قسمت جامد
f	گره مرزی در قسمت سیال
	اصطکاکی

ورودی

خروجی

مرجع

روتور اول

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 1^{-1}
d	قطر روتور دایروی
e	سرعت های میکروسکوپی 1^{-1}
f	تابع توزیع ذرات
h	ارتفاع ریز مجرای میکروپمپ
k	ضریب رسانندگی سیال عامل
l	فاصله بین دو روتور
	پارامتر بی بعد مربوط به فاصله روتور 2 از 1
m	طول ریز مجرای میکروپمپ
p	فشار 2^{-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, *Motors 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