

بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی یک میکروپمپ لزجتی با دو روتور دایروی

مختلف القطر بر دبی خروجی

حمید نیازمند

استاد مکانیک، عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد
niazmand@um.ac.ir

حجت خزیمه نژاد

دانشجوی دکتری مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
khozaymehnezhad_hojjat@stu.um.ac.ir

سید علی میربزرگی

استادیار مکانیک، عضو هیات علمی دانشگاه بیرجند
samirbozorgi@birjand.ac.ir

چکیده

در این کار یک شبیه‌سازی عددی برای مطالعه پارامتری تاثیر ویژگی‌های هندسی یک میکروپمپ لزجتی بر دبی خروجی از آن صورت گرفته است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل گردیده است به طوری که در این حل برای ارزیابی توام جملات پخش و جابه‌جایی در محل وجوه از طرح هیبرید و برای برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. محاسبات برای سه پارامتر بی‌بعد هندسی میکروپمپ یعنی خارج از مرکزی (ε) و اندازه روتورها (s) و نیز فاصله آنها از یکدیگر (L) انجام شده است. نتایج حاصل از این حل نشان می‌دهد الگوهای خطوط جریان به شدت به سه پارامتر هندسی مذکور وابسته هستند به طوری که اندازه و تعداد گردابه‌های به وجود آمده درون ریز مجرا در غالب موارد با یکدیگر متفاوت بودند. در تمامی حالات، با افزایش ε ، دبی خروجی از میکروپمپ نیز به صورت تقریباً خطی افزایش پیدا نمود. همچنین با کاهش قطر روتورهای پایین دست و بالادست، دبی خروجی نیز به صورت نمایی کاهش پیدا کرد. در مورد تغییرات دبی با فاصله بین روتورها مشاهده شد در حالتی که $s_1 = s_2 = 1.5$ است در ابتدا با افزایش L ، دبی خروجی نیز افزایش پیدا می‌کند. در $L = 2$ ، دبی خروجی دارای یک مقدار بیشینه می‌شود و سپس با افزایش L ، دبی دچار کاهش می‌گردد. شبیه همین روند نیز برای حالتی که $s_1 = s_2 = 2.5$ است مشاهده می‌شود با این تفاوت که در این مورد دبی خروجی بیشینه در $L = 1.5$ به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: میکروپمپ لزجتی، پارامترهای هندسی، روتور دایروی، گردابه، روش حجم محدود

علائم یونانی	فهرست علائم
μ ضریب لزجت دینامیکی	d قطر روتور
ε عدد بی‌بعد خارج از مرکزی روتور	h ارتفاع میکروپمپ
ω سرعت زوایه‌ای	l فاصله بین دو روتور
زیر نویس	Q دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ
۱ روتور بالادست	Re عدد رینولدز
۲ روتور پایین دست	S نسبت ارتفاع میکروپمپ به قطر روتور

۱. مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در فناوری ساخت وسایل میکروسیالی باعث توسعه کاربردهای متنوع این گونه وسایل در زمینه‌های مختلفی از قبیل زیست‌شناسی، شیمی و داروسازی شده است [۱-۳]. اکثر وسایل میکروسیالی با یک ریز مجرا که داخل آن سیال منتقل، جدا و یا مخلوط می‌شود همراه هستند. سیال از میان این ریز مجرا تحت تاثیر یک نیروی رانش که می‌تواند به

وسیله یک میکروپمپ ایجاد شود شروع به حرکت می‌نماید که در همین راستا دو دسته کلی از میکروپمپ‌ها مطرح می‌شوند. دسته اول، میکروپمپ‌های غیرمکانیکی شامل الکترواسمتیک، الکتروهیدرودینامیک، هیدرومغناطیس و ... بوده و دسته دوم، میکروپمپ‌های مکانیکی شامل جابه‌جایی مثبت، لزجتی^۱ و .. می‌باشند.

در نوع اول از میکروپمپ‌ها یعنی میکروپمپ‌های غیرمکانیکی، پژوهش‌های فراوانی برای تحلیل بهبود عملکرد آنها صورت گرفته است. به عنوان نمونه‌ای از میکروپمپ‌های الکترواسمتیکی، میربزرگی و همکاران [۴]، به بررسی تاثیر زتا پتانسیل غیر یکنواخت روی دیواره‌های یک ریز مجرای تخت و در حضور دو مخزن ابتدا و انتهای این ریز مجرا بر جریان الکترواسمتیک درون آن پرداختند. همین نویسندگان در کاری دیگر [۵]، به بررسی عددی و تحلیلی تاثیر اثرات متقابل حرکت الکترولیت با جریان الکتریکی مربوطه درون یک ریز مجرای تخت با حضور مخزن و همچنین بدون آن پرداختند.

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

پژوهش‌ها و کارهای معدودی برای تحلیل جریان درون ریز مجرای این نوع از میکروپمپ‌ها برای بهبود عملکرد آنها صورت گرفته است. به عنوان نمونه سن و همکاران [۶]، یک میکروپمپ لزجتی را بر مبنای چرخش یک روتور که به طور نامتقارنی درون یک مجرای باریک قرار گرفته بود برای استفاده در رینولدزهای بسیار پایین طراحی کردند. این طراحی بر اساس آزمایشاتی با استفاده از گلیسرین به عنوان سیال کاری و بلورهای مختلفی برای روتور با ابعاد سانتی‌متر که سطح مقطع‌هایی از قبیل دایره، مربع و مستطیل داشتند صورت گرفت. آنها نشان دادند که جریان به وجود آمده به پارامترهای هندسی وابسته می‌باشد به طوری که آن با سرعت زوایه‌ای روتور متناسب است. دی‌کورتای و همکاران [۷]، در یک کار عددی سه بعدی، اثرات دیواره‌های جانبی ریز مجرا را بر عملکرد یک میکروپمپ لزجتی با یک روتور منفرد دایروی مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند هنگامی که دو دیواره جانبی به هم نزدیک‌تر می‌شوند عملکرد پمپ به تدریج کاهش پیدا می‌کند. همچنین یک رابطه سهموی بین کارایی پمپ و گرادیان فشار اعمال شده به دست آوردند. پاتروانگ و حسن [۸]، با استفاده از نرم‌افزار فلونتت به بررسی عددی تاثیر انواع شکل سطح مقطع یک روتور منفرد یعنی دایره، مربع و مستطیل روی عملکرد میکروپمپ لزجتی در حالت ناپایا پرداختند. آنها تاثیر ارتفاع ریز مجرا، خارج از مرکزی روتور، عدد رینولدز و همچنین فشار بار روتور را بر عملکرد میکروپمپ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع ریز مجرا زمان لازم برای رسیدن جریان به یک حالت پایا طولانی‌تر گردید. جیانفنگ و جینگ [۹]، به بررسی ویژگی‌های جریان درون ریز مجرای یک میکروپمپ لزجتی در حضور دو روتور دایروی با شعاع یکسان پرداختند. در این کار تاثیر پارامترهای هندسی مختلف از قبیل خارج از مرکزی روتورها، فاصله بین روتورها و همچنین عدد رینولدز روی 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 نمودند. همچنین فاصله بین روتورها تاثیر عمیقی بر عملکرد میکروپمپ داشت به طوری که با افزایش این فاصله برای میکروپمپی که مرکز دو روتور مار بر یک خط مستقیم بودند غالباً دبی افزایش و توان مصرفی کاهش پیدا نمود. این در حالی است که در میکروپمپی که مرکز دو روتور در یک راستا واقع نبودند نتیجه عکس مورد قبل بود.

ال-سعدی و همکاران [۱۰]، یک شبیه‌سازی عددی برای تحلیل جریان یک سیال غیرنیوتنی حول روتور دایروی یک میکروپمپ لزجتی انجام دادند. در این کار تاثیر پارامترهای هندسی مختلفی از جمله میزان خارج از مرکزی روتور، ارتفاع ریز مجرا و همچنین عدد رینولدز بر عملکرد میکروپمپ بررسی گردید. نتایج نشان دادند که عدد رینولدز یک پارامتر غالب روی

¹ . viscous micropump

تغییرات دبی خروجی می‌باشد. همچنین تنش روی سطح روتور و دبی خروجی از ریز مجرا با افزایش خارج از مرکزی روتور کاهش پیدا می‌کنند. علاوه بر این عملکرد میکروپمپ برای سیال غیر نیوتنی با افزایش گردایان فشار افزایش می‌یابد. عبدالقائد و همکاران [۱۱]، یک بررسی عددی روی عملکرد یک میکروپمپ لزجی در حضور چند روتور دایروی با قطرهای یکسان انجام دادند. در این کار روتورها در موقعیت‌های مکانی مختلفی قرار گرفتند که نتایج نشان دادند در حالتی که روتورها به صورت عمودی در یک راستا قرار دارند بالاترین دبی خروجی از میکروپمپ حاصل می‌شود.

مرور مختصر کارهای فوق نشان می‌دهد که اغلب کارهای انجام شده به بررسی تاثیر حضور یک روتور بر عملکرد میکروپمپ‌های لزجی پرداخته‌اند و در کارهای محدودی حضور دو روتور یا بیشتر مشاهده می‌شود. علاوه بر این در پژوهش‌هایی که دو روتور یا بیشتر حضور داشته‌اند نیز قطر روتورها یکسان بوده است و تاثیر همزمان قطر متفاوت روتورها بر عملکرد میکروپمپ لزجی در هیچ یک از کارهای پیشین مورد مطالعه قرار نگرفته است. در همین راستا برای مطالعه بیشتر اثرات تغییر قطر روتورها در یک میکروپمپ لزجی شبیه‌سازی‌ای عددی صورت گرفته است تا به طور همزمان پارامترهای هندسی مختلف را روی دبی خروجی از میکروپمپ مطالعه کند. در انتها قابل ذکر است که برخلاف تمامی کارهای قبل، حل معادلات و به ویژه تولید شبکه به طور کامل توسط برنامه عددی نوشته شده توسط نویسندگان صورت گرفته است که تاکنون در هیچ یک از کارهای صورت گرفته در این حوزه چنین موردی مشاهده نشده است.

۲. فیزیک مساله و فرضیات

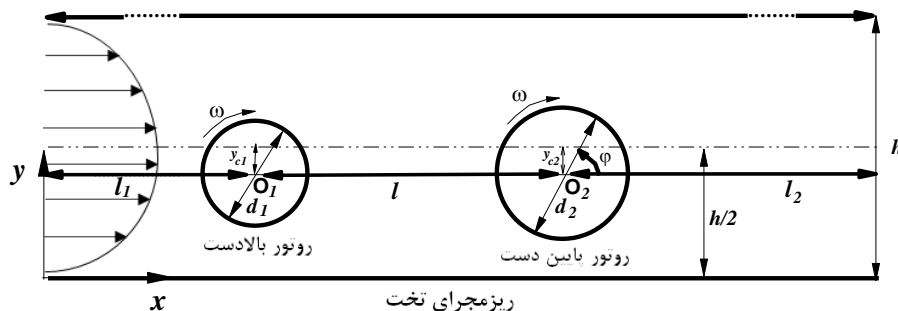
شماتیکی از فیزیک مساله حاضر و شرایط مرزی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مساله مورد نظر شامل یک ریز مجرای تخت با ارتفاع h و دو روتور دایروی مختلف قطر درون آن می‌باشد. طول این ریز مجرا نیز بایستی طوری در نظر گرفته شود که شرایط جریان کاملا توسعه یافته درون ریز مجرا برقرار گردد. برای این منظور باید طول l_1 و l_2 که در شکل ۱. نیز نشان داده شده است به ترتیب هشت برابر قطر روتور بزرگتر باشند تا اطمینان حاصل شود که شرایط جریان کاملا توسعه یافته درون ریز مجرا برقرار خواهد شد [۱۲]. با توجه به شکل ۱، درون ریز مجرای تخت نشان داده شده دو روتور دایروی یکی با قطر d_1 و دیگری با قطر d_2 به صورت خارج از مرکز با سرعت زوایه‌ای ω در جهت ساعت‌گرد در نظر گرفته شده است. این دو روتور می‌توانند در فاصله‌های عمودی مختلفی از مرکز ریز مجرا قرار گیرند. در همین راستا عدد بی‌بعد ε که نشان دهنده خارج از مرکزی روتورها می‌باشد به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

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

قابل ذکر است که برای تغییر قطر روتورها و نیز فاصله مرکز دو روتور از یکدیگر دو پارامتر بی‌بعد دیگر به ترتیب مطابق روابط (۲) و (۳) تعریف می‌شوند:

$$s_1 = \frac{h}{d_1}, \quad s_2 = \frac{h}{d_2} \quad (2)$$

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



شکل ۱. شماتیکی از فیزیک مساله مورد مطالعه و شرایط مرزی آن

در این مقاله تاثیر تغییر پارامترهای هندسی بی‌بعد (۱) تا (۳) روی عملکرد میکروپمپ لزجی بررسی می‌شود. به طوری که ε_1 و ε_2 در محدوده ۰/۱ تا ۰/۹، S_1 و S_2 در محدوده ۱/۵ تا ۳/۵ و نهایتاً L در محدوده ۰/۸ تا ۳ تغییر می‌کنند. همچنین فرضیات ذیل در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است: ۱- مساله آرام و پایدار است. ۲- سیال نیوتنی با خواص ثابت می‌باشد. ۳- مساله به صورت دو بعدی در مختصات کارتزین $x-y$ مدل شده است. ۴- عمق (عمود بر سطح محفظه) واحد است.

۳. معادلات حاکم

قوانین حاکم بر این مساله به ترتیب بقای جرم، ممنتوم در راستای x ، ممنتوم در راستای y می‌باشند که به صورت معادلات دو بعدی (۴)-(۶) نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۴)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \quad (۵)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \quad (۶)$$

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 میکروکانال (h) به عنوان مقیاس طولی و سرعت سطح روتور بزرگتر (U_s) به عنوان مقیاس سرعتی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این دو مقیاس، متغیرهای بی‌بعد حاکم بر این مساله مطابق رابطه (۷) تعریف می‌شوند:

$$X = \frac{x}{h}, \quad Y = \frac{y}{h}, \quad U = \frac{u}{U_s}, \quad V = \frac{v}{U_s}, \quad P = \frac{p}{\rho U_s^2} \quad (۷)$$

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 ۷ معادلات (۴)-(۶) به صورت بی‌بعد (۸)-(۱۰) بازنویسی می‌شوند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۸)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (۹)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (۱۰)$$

که در آن Re بر اساس قطر روتور بزرگتر محاسبه می‌شود و در این مقاله در تمامی محاسبات عدد رینولدز برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی مربوط به این مساله به صورت شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت روی دیواره‌های ریز مجرا و فشار صفر در ورودی و خروجی آن در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مذکور به صورت بی‌بعد، مطابق روابط (۱۱)-(۱۳) نوشته می‌شوند:

$$U = V = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad \text{روی دیواره‌های ریز مجرا:} \quad (۱۱)$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \quad P_{in} = P_{out} = 0 \quad \text{ورودی و خروجی ریز مجرا:} \quad (۱۲)$$

$$U = \sin\varphi, V = \cos\varphi, \quad \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad \text{روی سطح روتور دایروی:} \quad (۱۳)$$

لازم به ذکر است که در گزارش نتایج، دبی بدون بعد خروجی از ریز مجرا و نیز فشار بی‌بعد به ترتیب به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه و استفاده شده است.

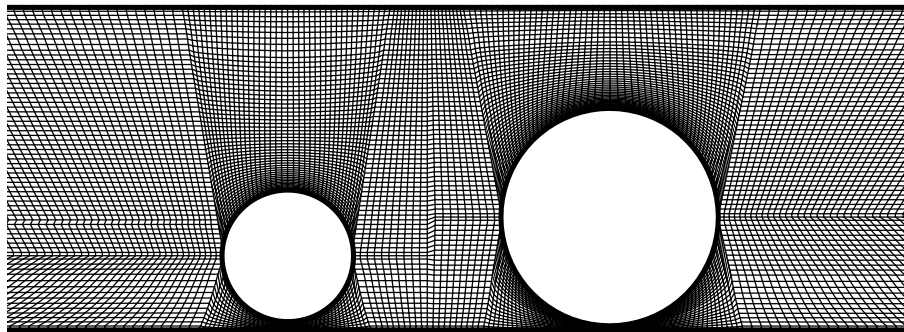
$$Q = \frac{q}{hU_s} \quad (q = \int_0^h u dy) \quad (14)$$

$$\Delta P^* = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho \vartheta^2 / d^2} \quad (15)$$

۴. فرآیند حل عددی

۴.۱. تولید شبکه:

برای تولید شبکه‌ی مورد نیاز در حل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی روش‌های متعددی وجود دارد. هر یک از این روش‌ها با توجه به راه‌کاری که برای تولید نقاط استفاده می‌کنند دارای مزایا و محدودیت‌های خاص هستند. یکی از روش‌های مرسوم در تولید شبکه‌ی محاسباتی روش جبری می‌باشد. در این روش از یک سری روابط جبری برای تولید نقاط شبکه مورد نظر استفاده می‌شود. به همین دلیل این روش دارای سرعت بالاتری نسبت به سایر روش‌های تولید شبکه می‌باشد. در روش‌های دیگر معمولاً به کمک حل دستگاه معادلات خطوط متعامد، نقاط شبکه مورد نظر بدست می‌آید و نیاز به هزینه‌ی محاسباتی بالاتری نسبت به روش‌های جبری است. در مطالعه حاضر از روش جبری برای تولید شبکه استفاده گردیده است. نمونه‌ای از شبکه ایجاد شده به روش جبری برای حالتی که $s_1 = 2.5$ ، $s_2 = 1.5$ ، $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ و $L = 1$ می‌باشد در شکل ۲ ارائه گردیده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود به دلیل وضوح بیشتر، فقط شبکه اطراف روتورها نشان داده شده است.



شکل ۲. نمونه‌ای از شبکه جبری تولید شده اطراف روتورهای دایروی با قطر متفاوت

۴.۲. روش حل عددی:

برای حل معادلات حاکم، دستگاه معادلات (۴)-(۶) با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی شده است. در این روش، از معادلات در یک حجم کنترل اختیاری به منظور به دست آوردن دستگاه معادلات جبری خطی مطابق ذیل انتگرال-گیری می‌شود.

$$a_p \phi_p = \sum a_{Nb} \phi_{Nb} + S \quad (16)$$

با استفاده از یک میدان فشار حدسی، محاسبات میدان جریان شروع می‌شود. سپس معادلات ممتنم به منظور به دست آوردن میدان سرعت حل می‌شوند. با استفاده از میدان سرعت، معادله پیوستگی برای تصحیح میدان‌های سرعت و فشار همانند آنچه که توسط دورمال و ریسبای توضیح داده شده است حل می‌گردند [۱۳]. سپس دما از حل معادله انرژی به دست می‌آید. این حل تکراری تا رسیدن به معیار همگرایی مطابق تعریف (۱۷) ادامه پیدا می‌کند.

$$R_p = a_p \phi_p - \left(\sum a_{Nb} \phi_{Nb} + S \right) \quad (17)$$

معیار همگرایی برای هر یک از معادلات به صورت فرمول (۱۸) تعریف می‌شود:

$$Res = \sum_P |R_p| \quad (18)$$

P نقطه مرکزی در هر یک از حجم کنترل‌های اختیاری ذکر شده می‌باشد.

در حل مذکور برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است [۱۳]. به دلیل استفاده از شبکه هم‌مکان احتمال شطرنجی شدن جواب در میدان فشار وجود دارد. لذا برای جلوگیری از این اثرات احتمالی، در محاسبه شارها از میان‌یابی رای‌چو بهره گرفته شده است [۱۴]. همچنین برای ارزیابی توام جملات پخش و جابجایی در محل وجوه از طرح هیبرید استفاده گردیده است. دستگاه معادلات جبری به دست آمده با استفاده حلگر ماتریس سه قطری (TDMA) حل شده است [۱۵].

این نکته بایستی ذکر گردد که در حل این معادلات، ضرایب زیرتخفیف برای متغیرهای سرعت ۰/۴ و برای متغیر فشار ۰/۳ در نظر گرفته شده است. همچنین معیار همگرایی برای تمامی متغیرها تقلیل خطای حل معادلات تا مرتبه 10^{-8} لحاظ گردیده است.

۳.۴. مطالعه استقلال از شبکه:

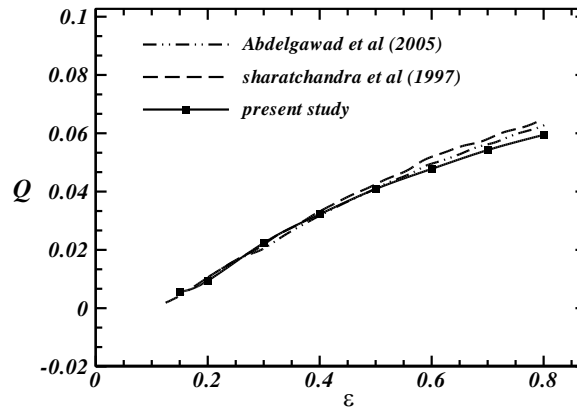
پس از همگرایی حل بایستی استقلال نتایج مربوط به کمیات مهم میدان جریان از ابعاد شبکه به کار گرفته شده اثبات گردد. با توجه به غیر خطی بودن معادلات حاکم این کار برای اثبات همگرایی حل ضروری است. برای مطالعه استقلال نتایج مهم جریان از تعداد گره‌های شبکه، مساله مورد نظر در حالتی که $Re = 1$ ، $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.8$ ، $s_1 = s_2 = 2$ و $\Delta P^* = 0$ بود در نظر گرفته شد. پنج شبکه با تعداد گره ۹۰×۳۰، ۱۵۰×۴۰، ۲۰۰×۵۰، ۲۸۰×۶۰ و ۳۴۰×۷۰ لحاظ گردید و چنانچه نتایج دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ نشان می‌دهد شبکه‌ای با تعداد گره ۲۸۰×۶۰ برای انجام محاسبات مورد نظر کافی است. لازم به ذکر است که چنانچه موقعیت یا شعاع روتور تغییر یابد، یافتن ابعاد شبکه‌ای که حل همگرا شده‌ای داشته باشد همواره بایستی جستجو گردد.

جدول ۱. دبی خروجی به دست آمده در تعداد گره‌های مختلف

تعداد گره	۹۰×۳۰	۱۵۰×۴۰	۲۰۰×۵۰	۲۸۰×۶۰	۳۴۰×۷۰
Q	۰/۱۴۶	۰/۱۳۶	۰/۱۳۲	۰/۱۲۸	۰/۱۲۶

۴.۴. اعتبارسنجی برنامه عددی:

اکنون بعد از مطالعه استقلال نتایج از نوع شبکه بایستی اعتبار برنامه عددی نوشته شده برای فیزیک مورد ادعا سنجیده شود. برای اعتبارسنجی برنامه عددی نوشته شده، یک میکروپمپ لزجی با یک روتور دایروی در حالت $Re = 1$ ، $s_1 = s_2 = 2.5$ و $\Delta P^* = 1$ در نظر گرفته شده است. نتایج دبی خروجی از میکروپمپ در ϵ های مختلف با نتایج عبدالقائد [۱۱] و شارچندرا [۱۲] مقایسه گردیده است. چنانچه در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود.

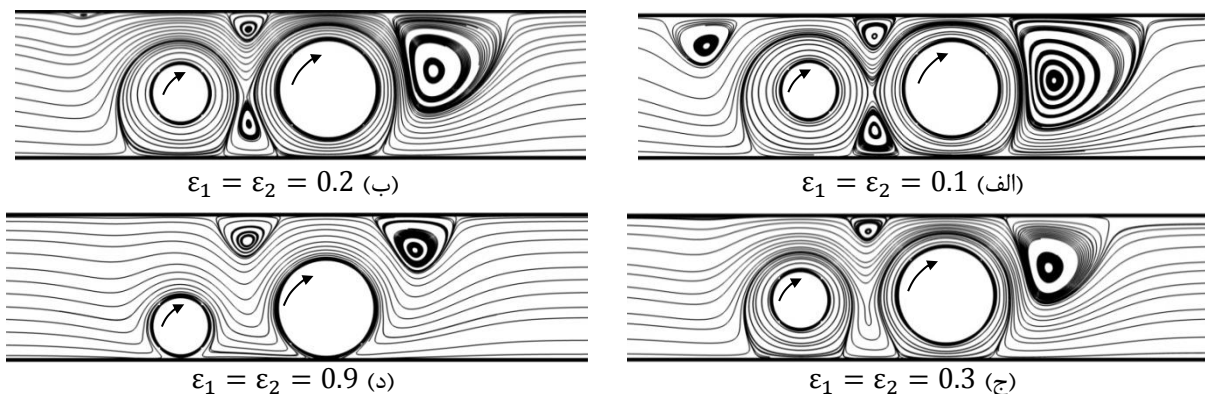


شکل ۳. مقایسه نتایج دبی خروجی در کار حاضر با نتایج دیگران

۵. نتایج و بحث

۵.۱. بررسی تاثیر ε بر دبی خروجی از میکروپمپ:

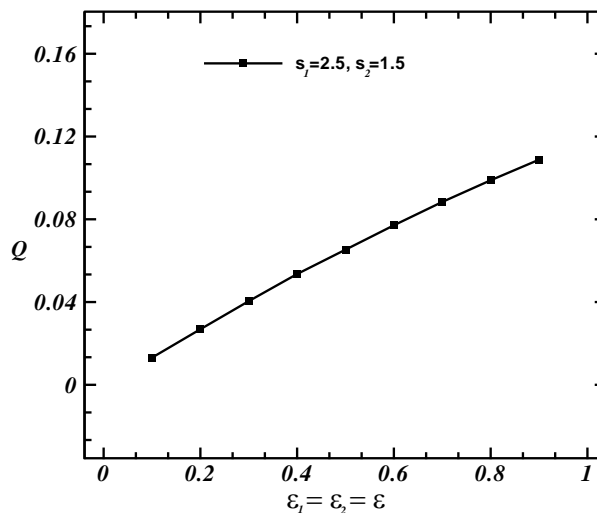
شکل ۴ الگوهای جریان را اطراف دو روتور دایروی با مشخصات $s_1 = 2.5$ و $s_2 = 1.5$ در $Re = 1$ و $L = 1$ و $\Delta P^* = 0$ برای ε های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ (الف) مشاهده می‌شود یک گردابه بزرگ در مقابل روتور پایین‌دست ایجاد شده است. همچنین دو گردابه کوچکتر بین دو روتور و یک گردابه کوچک دیگر نیز در قسمت بالادست جریان روی دیواره بالایی ریز مجرا تشکیل شده است. وقتی عدد خارج از مرکزی روتورها کوچک است بیشتر سیال، دور خود روتورها شروع به چرخش می‌کند و مقدار اندکی از آن می‌تواند به سمت خروجی ریز مجرا حرکت نماید. با چرخش روتور بالادست بایستی مقداری از سیال درون ریز مجرا از کانال فرضی اصطکاکی به وجود آمده بین روتور و دیواره بالایی ریز مجرا عبور کند. اما با توجه به اینکه هنوز سیال انرژی کافی برای عبور از این کانال را ندارد لذا مقداری از آن دچار برگشت می‌شود و یک گردابه کوچک روی دیواره بالایی ریز مجرا به وجود می‌آید. روتور پایین‌دست نیز بایستی سیال عبوری از روتور بالادست را به طرف خروجی میکروپمپ هدایت کند. اما با توجه به اینکه سیال انرژی لازم را برای عبور از کانال‌های فرضی اصطکاکی بین روتور پایین‌دست و دیواره‌های ریز مجرا ندارد لذا مقداری از آن دچار انحراف شده و ایجاد دو گردابه در دیواره‌های بالایی و پایینی ریز مجرا خواهد نمود. سیال با عبور از کانال تنگ اصطکاکی بین روتور پایین‌دست و دیواره بالایی ریز مجرا، با یک انبساط ناگهانی مواجه می‌شود و قادر به غلبه بر فشار مقابل خود نبوده و با توجه به این عدم بازیابی فشار دچار یک جدایش بزرگ بعد از عبور از روتور پایین‌دست می‌شود. شکل ۴ (ب) الگوهای جریان را اطراف روتورها در $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.2$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود گردابه کوچک بالادست جریان روی دیواره بالایی ریز مجرا تقریباً ناپدید شده است. با افزایش خارج از مرکزی روتورها، فضای بین روتور بالادست و دیواره بالایی ریز مجرا نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر نیز سیال



شکل ۴. خطوط جریان اطراف روتورهای دایروی با $s_1 = 2.5$ و $s_2 = 1.5$ در $Re = 1$ و $L = 1$ و $\Delta P^* = 0$ برای ε های مختلف

انرژی بیشتری پیدا می‌کند. با توجه به این دو مورد، ناپدید شدن این گردابه امری منطقی است. همچنین گردابه بزرگ پایین- دست جریان نیز نسبت به نظیرش در حالت قبل کوچکتر می‌شود. این نیز با افزایش فضای بین روتور پایین‌دست و دیواره بالایی ریز مجرا قابل توجیه است. هر چه شیب این کانال فرضی ملایم‌تر گردد بازبایی فشار در این ناحیه نیز بهتر صورت می‌گیرد. شکل ۴ (ج) الگوهای جریان را در حالتی نشان می‌دهد که $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.3$ است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود گردابه بالادست جریان به طور کامل از بین رفته است. علاوه بر این، گردابه کوچک روی دیواره پایینی ریز مجرا و بین دو روتور نیز به طور کامل ناپدید شده است. وقتی دو روتور به دیواره پایینی ریز مجرا نزدیک می‌شوند طبیعتاً فضای بین روتورها و دیواره پایینی ریز مجرا کاهش می‌یابد. از طرف دیگر نیز سیال انرژی بیشتری در این حالت پیدا کرده است، در نتیجه می‌تواند به طور کامل از فضای بین دو روتور عبور نماید. همچنین گردابه پایین‌دست جریان نیز نسبت به نظیرش در حالت قبل کوچکتر شده است. شکل ۴ (د) خطوط جریان را اطراف روتورها در $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود تنها گردابه بین دو روتور و گردابه پایین‌دست جریان باقی‌مانده است.

شکل ۵ تغییرات دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ را در ε های مختلف و $Re = 1$ ، $L = 1$ و $\Delta P^* = 0$ برای حالت بررسی شده قبل نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود هر چه روتورها به دیواره پایینی ریز مجرا نزدیکتر می‌شوند دبی خروجی از میکروپمپ به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. وقتی روتورها در ε های کمتری قرار گرفته‌اند مقدار بیشتری از سیال پیرامون خود روتورها شروع به چرخش می‌کند و مقدار کمتری از آن به سمت خروجی ریز مجرا هدایت می‌شود. اما با افزایش خارج از مرکزی روتورها، فضای بین روتورها و دیواره بالایی ریز مجرا افزایش می‌یابد و با کاهش اصطکاک در این ناحیه، سیال بیشتری از ریز مجرا خارج می‌شود.

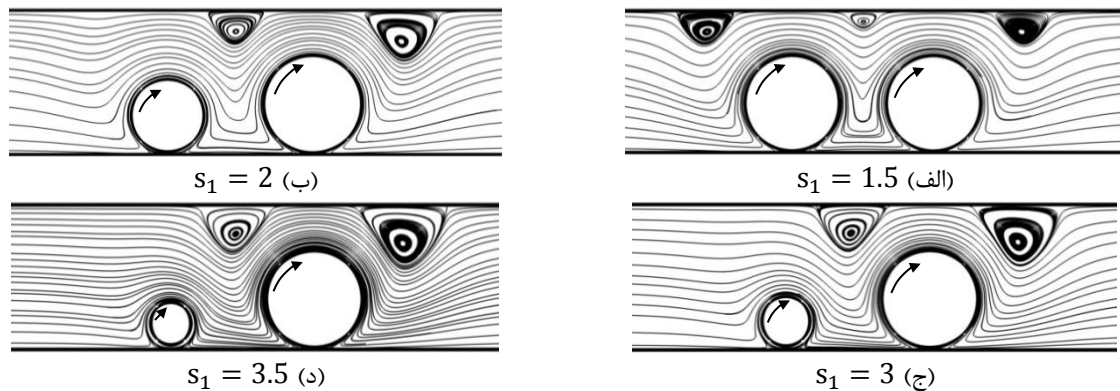


شکل ۵. تغییرات دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ در ε های مختلف و $Re = 1$ ، $L = 1$ و $\Delta P^* = 0$ در حالت $s_1 = 2.5$ و $s_2 = 1.5$

۲.۵. بررسی تاثیر S بر دبی خروجی از میکروپمپ:

شکل ۶ خطوط جریان را درون ریز مجرای میکروپمپ لزجی برای s_1 های مختلف و $s_2 = 1.5$ در حالت $Re = 1$ ، $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود دو گردابه در پایین- دست و بالادست جریان و نیز یک گردابه کوچکتر بین دو روتور ایجاد شده است. به دلیل اصطکاک در کانال فرضی بین روتور بالادست و دیواره بالایی ریز مجرا تمام سیال قادر به عبور از این کانال نبوده و در نتیجه به دلیل برگشت مقداری از سیال این گردابه به وجود می‌آید. همچنین گردابه پایین‌دست جریان به دلیل انبساط کانال واگرای فرضی بین روتور پایین‌دست و دیواره بالایی ریز مجرا تشکیل می‌شود. با دقت در شکل (ب) می‌توان مشاهده نمود که گردابه بالادست جریان به طور کامل ناپدید شده است و گردابه پایین‌دست جریان و نیز گردابه بین دو روتور نسبت به حالت قبل بزرگتر و قوی‌تر شده‌اند. همین روند در شکل (ج) و (د) نیز مشاهده می‌شود. در حالتی که موقعیت مکانی دو روتور عوض می‌شود یعنی $s_1 = 1.5$ و s_2 در محدوده

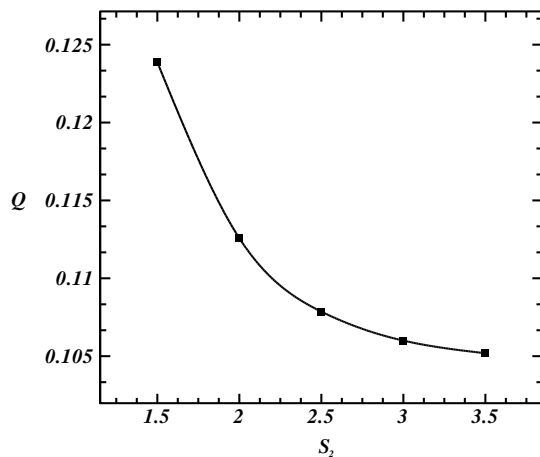
۱/۵ تا ۳/۵ تغییر می‌کند الگوهای جریانی به دست آمده به صورت معکوس شبیه به شکل ۶ می‌باشد. لذا از آوردن آنها خودداری شده است.



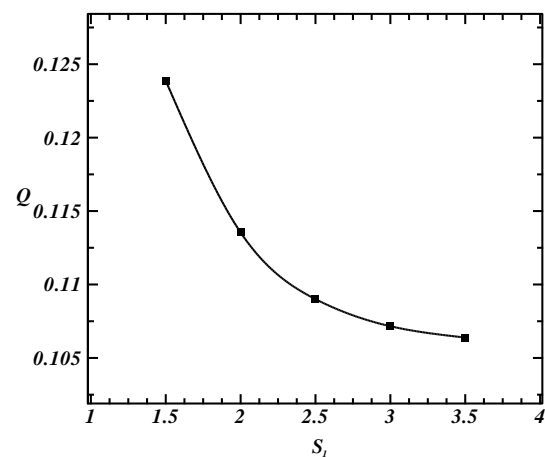
شکل ۶. خطوط جریان درون ریز مجرا برای s_1 های مختلف و $s_2 = 1.5$ در $Re = 1, L = 1, \Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$

شکل ۷ تغییرات دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ را در مقابل s_1 برای حالت $s_2 = 1.5, Re = 1, L = 1, \Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود با کاهش قطر روتور بالادست میزان دبی خروجی به صورت نمایی کاهش می‌یابد. همان‌طور که واضح است روتورها علاوه بر اینکه عامل حرکت سیال درون ریز مجرای میکروپمپ هستند به صورت یک مقاومت هم در برابر جریان عمل می‌کنند. در نتیجه هنگامی که روتور بالادست کوچکتر می‌شود نقش مقاومتی این روتور نسبت به عامل حرکت بودن آن افزایش بیشتری پیدا می‌کند. لذا با کاهش قطر روتور بالادست از میزان دبی خروجی از میکروپمپ کاسته می‌شود.

شکل ۸ تغییرات دبی بی‌بعد خروجی از میکروپمپ را در مقابل s_2 برای حالت $s_1 = 1.5, Re = 1, L = 1, \Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که روند کلی تغییرات آن شبیه به شکل ۷ می‌باشد. یعنی هر چه قطر روتور پایین دست کاهش می‌یابد دبی خروجی از میکروپمپ نیز به طور نمایی کاهش پیدا می‌کند به طوری که در تغییر قطرهای کوچکتر مقدار آن تقریباً بدون تغییر می‌ماند. توجیه این مورد نیز شبیه به حالت قبل است.



شکل ۸. تغییرات دبی بی‌بعد خروجی در مقابل s_2 برای حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ و $\Delta P^* = 0, L = 1, Re = 1, s_1 = 1.5$



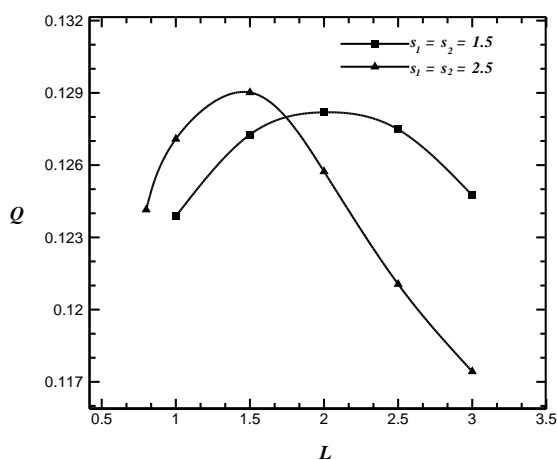
شکل ۷. تغییرات دبی بی‌بعد خروجی در مقابل s_1 برای حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ و $\Delta P^* = 0, L = 1, Re = 1, s_2 = 1.5$

۳.۵. بررسی تاثیر L بر دبی خروجی از میکروپمپ:

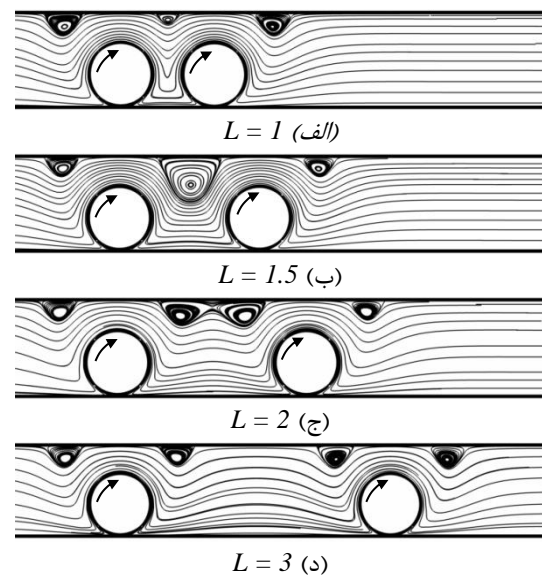
شکل ۹ خطوط جریان را اطراف روتورهایی با $s_1 = s_2 = 1.5$ در L های مختلف و $Re = 1, \Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ نشان می‌دهد. همان‌طور در شکل ۹ (الف) مشاهده می‌شود سه گردابه درون ریز مجرا ایجاد شده است.

چنانچه L افزایش پیدا می‌کند گردابه بین دو روتور بزرگتر می‌شود و دو گردابه دیگر تقریباً بدون تغییر می‌ماند (شکل (ب)). با افزایش بیشتر L مطابق شکل ۹ (ج)، گردابه بین دو روتور تبدیل به دو گردابه کوچکتر می‌شود و نهایتاً در شکل (د) این دو گردابه از هم جدا می‌شوند.

شکل ۱۰ تغییرات دبی خروجی از میکروپمپ را در برابر L های مختلف در حالت $Re = 1$ ، $\Delta P^* = 0$ و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در حالتی که $s_1 = s_2 = 1.5$ است در ابتدا با افزایش L ، دبی خروجی نیز افزایش پیدا می‌کند. در $L = 2$ دبی خروجی دارای یک مقدار بیشینه می‌شود و سپس با افزایش L ، دبی دچار یک کاهش می‌گردد. شبیه همین روند نیز برای حالتی که $s_1 = s_2 = 2.5$ است مشاهده می‌شود با این تفاوت که در این مورد دبی خروجی بیشینه در $L = 1.5$ به دست می‌آید. از این L به بعد نیز شیب کاهش دبی نسبت به مورد دیگر شدیدتر می‌شود.



شکل ۱۰. تغییرات دبی خروجی در برابر L های مختلف در حالت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ و $\Delta P^* = 0$ ، $Re = 1$



شکل ۹. خطوط جریان اطراف روتورهایی با $s_1 = s_2 = 1.5$ در L های مختلف و $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ و $\Delta P^* = 0$ ، $Re = 1$

۶. نتیجه‌گیری

در این کار یک شبیه‌سازی عددی برای مطالعه پارامتری تاثیر ویژگی‌های هندسی یک میکروپمپ لزجی بر دبی خروجی از آن صورت گرفته است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل گردیده است به طوری که در این حل برای ارزیابی توام جملات پخش و جابه‌جایی در محل وجوه از طرح هیبرید و برای برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. محاسبات برای سه پارامتر بی‌بعد هندسی میکروپمپ یعنی خارج از مرکزی (ε) و اندازه روتورها (s) و نیز فاصله آنها از یکدیگر (L) به ترتیب در محدوده 0.1 تا 0.9 ، $1/5$ تا $3/5$ و 0.8 تا 3 انجام شده است. نتایج حاصل از این حل نشان می‌دهد الگوهای خطوط جریان به شدت به سه پارامتر هندسی مذکور وابسته هستند به طوری که اندازه و تعداد گردابه‌های به وجود آمده درون ریز مجرا در غالب موارد با یکدیگر متفاوت بودند. در تمامی حالات، با افزایش ε ، دبی خروجی نیز به صورت تقریباً خطی افزایش پیدا نمود. همچنین با کاهش قطر روتورهای پایین‌دست و بالادست دبی خروجی از میکروپمپ نیز به صورت نمایی کاهش پیدا کرد. در مورد تغییرات دبی با فاصله بین روتورها مشاهده شد در حالتی که $s_1 = s_2 = 1.5$ است در ابتدا با افزایش L ، دبی خروجی نیز افزایش پیدا می‌کند. در $L = 2$ ، دبی خروجی دارای یک مقدار بیشینه می‌شود و سپس با افزایش L ، دبی دچار یک کاهش می‌گردد. شبیه همین روند نیز برای حالتی که $s_1 = s_2 = 2.5$ است مشاهده می‌شود با این تفاوت که در این مورد دبی خروجی بیشینه در $L = 1.5$ به دست می‌آید. از این L به بعد نیز شیب کاهش دبی نسبت به مورد دیگر شدیدتر می‌باشد.

مراجع

- [1]- Manz A., Effenhauser C. S., Burggraf N., Harrison D. J., Seiler K. and Fluri K., 1994, Electroosmotic pumping and electrophoretic separations for miniaturized chemical analysis systems, *Journal of Micromech. Microeng.*, Vol. 4, pp. 257–265.
- [2]- Fu L. M., Yang R. J. and Lee G. B., 2002, Analysis of geometry effects on band spreading of microchip electrophoresis, *Electrophoresis*, Vol. 23, pp. 602–612.
- [3]- Laser D. J. and Santiago J. G., 2004, A review of Micropumps, *Journal of Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 35–64.
- [4]- Mirbozorgi, S.A., Niazmand, H., Renksizbulut, M., 2006, Electro-Osmotic Flow in Reservoir-connected Flat Microchannels With Non-Uniform Zeta Potential, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, pp. 1133–1143.
- [5]- Mirbozorgi, S.A., Niazmand, H., Renksizbulut, M., 2007, Streaming Electric Potential in Pressure-Driven Flows Through Reservoir-Connected Microchannels , *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 129, pp. 1346-1357.
- [6]-Sen M., Wajerski D. and Gad-el-Hak M., 1996, A novel pump for MEMS applications, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp 624–627.
- [7]-Decourtye D., Sen M. and Gad-el-hak M., 1998, Analysis of viscous micropumps and microturbines, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol.10, pp13–25.
- [8]- Phutthavong P. and Hassan I., 2004, Transient performance of flow over a rotating object placed eccentrically inside a microchannel—numerical study, *Journal of Microfluid Nanofluid*, pp. 71-85.
- [9]- Lu J., and Ding J., 2010, Flow dynamical behaviors and characteristics of aligned and staggered viscous pumps, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2092–2099.
- [10]-El.Sadi H., Esmail N. and Hassan I., 2008, Numerical Modeling of Non-Newtonian Flow in Viscous Micropump, *Journal of the Society of Rheology*, Vol. 36, pp. 51-58.
- [11]-Abdelgawad M., Hassan I., Esmail N. and Phutthavong P., 2005, Numerical Investigation of Multistage Viscous Micropump Configurations, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127, pp. 734-742.
- [12]- Sharatchandra M.C., Sen M., and Gad-el-Hak M., 1997, Navier-Stokes Simulations of a Novel Micropump, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp 372-382.
- [13] Van Doormaal J. P. and Raithby G. D., 1984, Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, *Numer. Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 147–163.
- [14] Rhie C. M. and Chow W. L., 1983, Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil With Trailing Edge Separation, *AIAA J.* Vol. 21, pp.1525–1532.
- [15] Patankar S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 1980, pp. 52–54.