

# بررسی تاثیر سطح مقطعهای مختلف روتور بر جریان دوبعدی نادرهم در میکروپمپهای جریان لزج

عباس نصرآزادانی<sup>\*</sup>، محمد رضایی علم<sup>\*\*</sup>، محمدسعید سعیدی<sup>\*\*\*</sup> و محسن ثقفیان<sup>\*\*\*\*</sup>  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۶/۳۱)

چکیده -

واژگان کلیدی :

## Investigation of effect of different cross-sections of rotor on two-dimensional transient flow in viscous micropumps

A. Nasr Azadani, M. Rezaei-Alam, M. S. Saidi and M. Saghafian

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

**Abstract:** In this paper, the effect of rotor cross-section geometry in viscous micropumps is studied for optimizing the flow and maximizing the exit flow rate using the Overset Grid method. The main construction of viscous micropumps consists of a

\*\*\*\* - استادیار

\*\*\* - استاد

\*\* - کارشناس ارشد

\* - کارشناس

rectangular channel and a rotor with circular cross-section which rotates eccentrically and perpendicular to the channel axis. In this paper, the effects of channel height, rotor eccentricity and channel pressure difference on the average velocity at the outlet of microchannel in the presence of circular, square, rectangular and elliptic rotor cross-sections are investigated. The flow equations are solved two-dimensionally, using incompressible finite volume method. The obtained results show that the maximum value of the exit average velocity is obtained at a microchannel of 1.5 times of the rotor diameter. However, increasing the rotor eccentricity and the angular velocity of the rotor causes the exit velocity magnitude in the micropump to increase. The obtained results show very good agreement with existing experimental and numerical results.

**Keywords:** Micropump, Transient flow, Viscous flow, Overset grid, Rotor.

|              |                           |               |                                       |
|--------------|---------------------------|---------------|---------------------------------------|
| $C_m$        | ضریب مومتم روتور          | $t^*$         | زمان بدون بعد                         |
| $d$          | قطر روتور (m)             | $\Delta t$    | اندازه گام زمانی (s)                  |
| $h$          | ارتفاع کانال (m)          | $\bar{u}$     | سرعت متوسط درون میکروپمپ (m/s)        |
| $M$          | مومتم وارد بر روتور (N.m) | $u^*$         | سرعت متوسط بدون بعد                   |
| $P_{in}$     | فشار ورودی پمپ (Pa)       | $U$           | سرعت سطح روتور (m/s)                  |
| $P_{out}$    | فشار خروجی پمپ (Pa)       | $y_c$         | فاصله بین محور کانال و مرکز روتور (m) |
| $P^*$        | فشار بدون بعد             |               |                                       |
| $\Delta P$   | افزایش فشار پمپ (Pa)      |               |                                       |
| $\Delta P^*$ | افزایش فشار بدون بعد      | $\varepsilon$ | خارج از مرکزی روتور                   |
| $Q$          | دبی حجمی بدون بعد         | $\eta$        | راندمان پمپ                           |
| $Re$         | عدد رینولدز               | $\nu$         | لزجت سینماتیکی سیال ( $m^2/s$ )       |
| $S$          | ارتفاع بدون بعد کانال     | $\omega$      | سرعت زاویه ای استوانه                 |
| $t$          | زمان (s)                  | $\rho$        | چگالی سیال ( $kg/m^3$ )               |

## ۱- مقدمه

در سالهای اخیر، با توجه خاص صنایع به وسایل و سیستمهای مقیاس کوچک، طراحی و ساخت وسایل مهندسی در ابعاد میکرو و نانو، سرعت و پیشرفت چشمگیری یافته است. از این رو، محققان و پژوهشگران بسیاری در زمینه طراحی و بهینه سازی وسایل مهندسی در مقیاسهای کوچک، شروع به فعالیت کرده اند. میکروپمپها، یکی از انواع پرکاربرد وسایلی است که در سالهای اخیر، تحقیقات فراوانی بر روی انواع آن انجام گرفته است. میکروپمپها که عمدتاً به دستگاههای با ابعاد کوچکتر از ۱ mm اطلاق می شود، موارد کاربرد زیادی در عرصه های مختلف دارند که از آن میان، می توان به مواردی

همچون دستگاههای میکروکولینگ در تجهیزات الکترونیک و میکروتراشه ها، دستگاههای طیف سنجی جرمی و میکروپیشراشه ها در کاوشهای فضایی و نیز عرصه های مختلف پزشکی و داروسازی اشاره کرد. به همین دلیل، طیف گسترده ای از مطالعات تجربی و تحلیلی، به این دستگاهها اختصاص یافته است.

در سال ۱۹۹۶، سن و همکارانش [۱]، با طراحی و معرفی گونه جدیدی از میکروپمپهای جریان لزج، روند تازه ای از پژوهشها را پیرامون این میکروپمپ جدید به راه انداختند. میکروپمپ جریان لزج جدید، از یک کانال مستطیلی با یک روتور تشکیل شده که در آن، روتور دایره ای، عمود بر محور

کانال و به صورت خارج از مرکز، با سرعت ثابت دوران می‌کند. دوران روتور که توسط یک موتور خارجی صورت می‌گیرد، باعث ایجاد یک نیروی خالص برای پمپ کردن سیال به سمت خروجی کانال می‌شود. سن و همکارانش [۱]، در یک بررسی آزمایشگاهی، تاثیر پارامترهای هندسی مانند اثر ارتفاع کانال، خارج از مرکزی روتور و سرعت دوران آن را بر مقدار جریان دائم در کانال بررسی کردند. این بررسی نشان داد که این میکروپمپ، علاوه بر سهولت ساخت بسیار زیاد، کارایی و انعطاف پذیری بسیار بالایی نیز در کاربردهای متنوع دارد، به گونه‌ای که می‌توان از آن، هم به منظور پمپ کردن سیالهای معمولی مانند آب، در ابعاد بسیار ریز و هم برای پمپ کردن سیالهای بسیار لزج مانند پلیمرهای سنگین، در مقیاسهای بزرگ و همچنین، به صورت معکوس، برای تولید نیرو در نبود نیروی راننده روتور استفاده کرد.

پس از آن، شارات چاندرا و همکارانش [۲]، طی یک شبیه‌سازی عددی، حالت‌های مختلف دیگری از این جریان که در آزمایش چندان قابل بررسی نبود را مورد بررسی قرار دادند. آنان در این بررسی، با مطالعه عددی بر روی تاثیر پارامترهای هندسی در میکروکانال، نشان دادند که بالاترین مقدار سرعت در کانال، به ازای یک مقدار خارج از مرکزی ثابت، در کانالی با ارتفاع حدود ۱/۵ برابر قطر استوانه و برای یک ارتفاع ثابت، به ازای حداکثر میزان خارج از مرکزی به دست می‌آید. این گروه، اثر جریان لغزشی در مقادیر عدد نودسن بزرگتر از ۰/۱ را نیز مورد مطالعه قرار دادند.

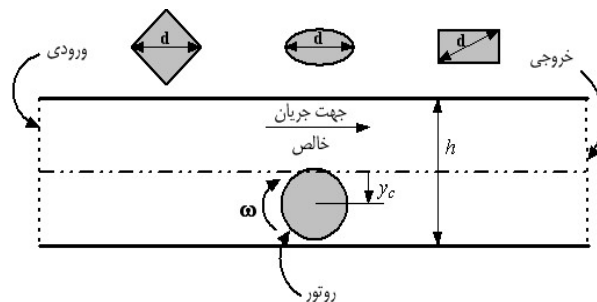
دی‌کورتیه و همکارانش [۳] در سال ۱۹۹۸، با در نظر گرفتن اثر حضور دیواره‌های کناری کانال، جریان دائم سیال در یک کانال سه‌بعدی را بررسی کردند. مطالعات این گروه نشان داد که شرایط جریان با در نظر گرفتن حالت سه‌بعدی، برای عمق‌های بزرگتر از قطر روتور، تفاوت چندانی با حالت دوبعدی ندارد. آنها علاوه بر این شرایط، عملکرد دستگاه به صورت معکوس را نیز مورد مطالعه قرار داده و نحوه عملکرد سیستم به عنوان یک میکروتوربین و ابعاد مختلف جریان در این شرایط را بررسی کردند.

بررسی رفتار گذرای جریان در میکروپمپهای جریان لزج، نخستین بار توسط عبدالجواد و همکارانش [۴]، طی یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت در سال ۲۰۰۴ صورت گرفت. آنان تاثیر پارامترهای هندسی مانند ارتفاع کانال، خارج از مرکزی روتور و سرعت دوران روتور را بر مقدار سرعت خروجی سیال و زمان رسیدن به حالت دائم بررسی کردند. این بررسی نشان داد که زمان رسیدن به حالت دائم جریان، با افزایش ارتفاع کانال، افزایش و با افزایش سرعت دوران روتور، کاهش می‌یابد.

در ادامه مطالعه عبدالجواد و همکارانش، پوت‌هاونگ و حسن [۵] نیز به بررسی عددی جریان دوبعدی نادائم در میکروپمپهای جریان لزج با روتورهایی با سطح مقطع مربعی و مستطیلی، با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت پرداختند. نتایج این بررسی، روند مشابهی را برای روتورهای مربعی و مستطیلی، با نتایج مربوط به روتور دایره‌ای نشان داد، با این تفاوت که مقادیر سرعت متوسط در روتور دایره‌ای، از مقادیر متناظر در روتورهای مربعی و مستطیلی، بیشتر است.

داسیلوا و همکارانش [۶ و ۷] نیز طی دو بررسی جداگانه، با هدف طراحی بهینه میکروپمپ جریان لزج، مقدار جریان خروجی و میزان توان مصرفی میکروپمپ را در حالت دائم و به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنان، به معرفی دو نوع جدید میکروپمپهای جریان لزج (با کانالهای L- شکل و U- شکل) پرداخته و سپس، با هدف استفاده از این میکروپمپها در کاربردهای پزشکی، شرایط جریان سیالهای غیرنیوتنی را نیز در شرایط مشابه بررسی کردند.

در کار حاضر، با هدف تکمیل و تصحیح مطالعات پوت‌هاونگ و حسن [۵]، به بررسی تاثیر شکل سطح مقطع روتور و مقایسه جریان در اطراف روتورهای دایره‌ای، مربعی و مستطیلی و نیز تعمیم آن به حالت بیضوی که در تحقیق پوت‌هاونگ و حسن [۵] مورد توجه قرار نگرفته، با استفاده از یک روش عددی متفاوت پرداخته شده است. با تکیه بر کد عددی توسعه‌یافته روش برهم‌نهادن شبکه‌ها، علاوه بر دستیابی



شکل ۱ - نمایی از هندسه میکروپمپ جریان لزج جدید

به نتایج مطمئن تر و با تطابق بهتر با نتایج تجربی، امکان تغییر شرایط مسئله از جمله تعمیم هندسه مسئله به حالت‌های مختلف به سادگی فراهم می‌شود. با این رویکرد، تاثیر پارامترهای مختلف مانند ارتفاع کانال، خارج از مرکزی روتور و بار پمپ بر روی رفتار نادائم جریان سیال در میکروپمپ جریان لزج، مورد بررسی قرار گرفته که در زیر، به ارائه نتایج مربوطه پرداخته شده است.

## ۲- تعریف مسئله

همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده، میکروپمپ جریان لزج، از یک کانال مستطیلی و یک روتور تشکیل شده که به صورت عمود بر محور قرار گرفته است. روتورهایی که در این مقاله بررسی می‌شوند، عبارت‌اند از روتورهای دایره‌ای، مربعی، مستطیلی و بیضوی. قطر روتورهای مختلف، در همه حالت‌ها، برابر  $d$  در نظر گرفته شده به گونه‌ای که سطح جاروب‌شده توسط همه روتورها یکسان است. همچنین، قطر کوچکتر روتور بیضوی، برابر  $0.5d$  و ضلع کوچکتر روتور مستطیلی نیز  $\frac{1}{4}$  ضلع بزرگتر آن در نظر گرفته شده است.

روتورها در داخل کانالی به ارتفاع  $h$  قرار دارند، به گونه‌ای که فاصله مرکز روتور تا محور کانال برابر  $y_c$  است. روتور، در لحظه  $t = 0$ ، از حالت سکون، با سرعت ثابت  $\omega$  به صورت ساعتگرد شروع به دوران می‌کند. در اینجا، تنها به منظور مقایسه با نتایج موجود [۵]، موقعیت اولیه روتورها بدین گونه در نظر گرفته شده که روتور مربعی، از حالت عمودی (شبه لوزی)

شروع به دوران می‌کند؛ موقعیت اولیه روتورهای مستطیلی و بیضوی نیز به صورتی است که به ترتیب، ضلع بزرگتر و قطر بزرگتر این روتورها، به صورت افقی و در راستای محور کانال قرار دارد. حالت قرارگیری اولیه روتور در آغاز چرخش، تاثیری در نتایج نهایی ندارد؛ بلکه تنها در زمان رسیدن به حالت نهایی (زمانی که روند تغییرات به ثبات نسبی می‌رسد) و نیز در مقدار نیروی موتور لازم به منظور راه‌اندازی پمپ تاثیرگذار خواهد بود. همان طور که در مطالعات عبدالجواد و همکارانش [۴] و

پوت‌هاونگ و حسن [۵] در نظر گرفته شده، مهمترین پارامترهای هندسی بی‌بعد مسئله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$(۱) \quad \text{ارتفاع کانال} \quad S = \frac{h}{d}$$

$$(۲) \quad \text{خارج از مرکزی روتور} \quad \varepsilon = \frac{y_c}{\frac{h}{2} - \frac{d}{2}}$$

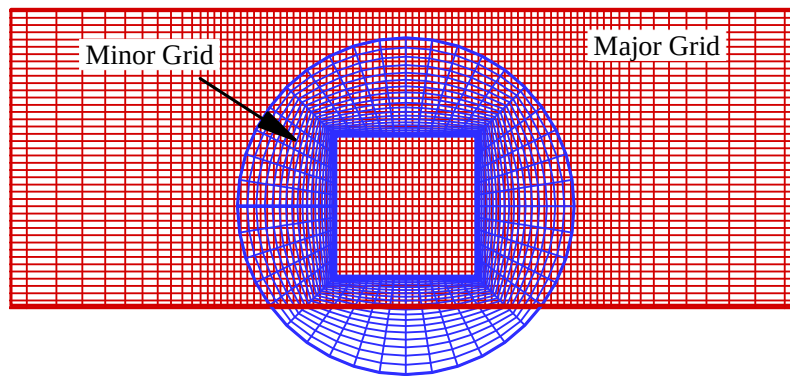
بر طبق این تعریف،  $\varepsilon$  نشان‌دهنده میزان خارج از مرکزی روتور در کانال است، به گونه‌ای که  $\varepsilon = 0$ ، مربوط به حالتی است که مرکز روتور بر روی محور کانال قرار گرفته و  $\varepsilon = 1$  نیز مربوط به حالتی است که روتور، به دیواره پایینی کانال چسبیده باشد [۴ و ۵]. تاثیر  $\varepsilon$  بدین صورت است که با اختلاف تنشهای برشی اعمال‌شده روی سطوح بالا و پایین روتور، باعث ایجاد نیروی خالص وارد به سیال می‌شود.

در این مسئله، با توجه به این که سرعت جریان جزو مجهولات مسئله است، عدد رینولدز که بیانگر سرعت دوران روتور است، بر مبنای سرعت سطح روتور (در حالت دایره‌ای) تعریف می‌شود:

$$(۳) \quad Re = \frac{Ud}{\nu} = \frac{\omega d^2}{2\nu}$$

که در آن،  $U = \omega d/2$ ، سرعت سطح برای روتور دایره‌ای و سرعت گوشه‌ها برای روتورهای غیردایره‌ای است. به همین ترتیب، سرعت متوسط بی‌بعد جریان در داخل کانال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(۴) \quad u^* = \frac{\frac{1}{h} \int_0^h u dy}{\frac{\omega d}{2}}$$



شکل ۲ - شبکه‌های اصلی و فرعی به صورت برهم‌نهاد

میکرون برای ارتفاع کانال  $S$ ، چند صد میکرون برای پهنای آن، چند ده  $N/m^2$  برای اختلاف فشار  $\Delta P$  در دو سر کانال و در حدود چند ده  $rad/s$  برای سرعت زاویه‌ای روتور  $\omega$  است [۱ و ۳]. با این حال، همان طور که اشاره شد، در این مقاله، تمامی پارامترها به صورت کاملاً بی‌بعد بررسی می‌شود. در ادامه، با توضیح روش حل به کار رفته، معادلات حاکم و شرایط مرزی مورد استفاده در حل مسئله نیز تشریح خواهد شد.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

در این مقاله، به منظور بررسی جریان در اطراف اشکال هندسی مختلف، از توسعه کد روش عددی موسوم به روش برهم‌نهادن شبکه‌ها<sup>۲</sup> استفاده شده است. در این روش، از دو شبکه سازمان‌یافته<sup>۳</sup> مجزا استفاده می‌شود که کار را برای تغییر شکل هندسی روتور، به ساده‌ترین صورت و کمترین تغییر در کل مسئله، میسر می‌سازد و این موضوع، مزیت مهمی در روش مورد استفاده در این تحقیق به شمار می‌رود.

در روش برهم‌نهادن شبکه‌ها، همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده، از دو شبکه برهم‌نهاد شده برای بررسی جریان حول اجسام متحرک استفاده می‌شود. با این کار، علاوه بر اجتناب از تولید شبکه در هر گام زمانی، می‌توان شبکه‌هایی را به صورت مستقل، منطبق به بدنه و سازمان‌یافته تولید کرد که امکان بررسی جریان حول اجسام پیچیده را نیز فراهم می‌سازد [۸]. در این روش، برای حل این نوع مسئله، از یک

در نتیجه، دبی خروجی کانال نیز به صورت بی‌بعد زیر خواهد بود:

$$Q = u^* S \quad (5)$$

در اینجا، فشار در مقاطع ورودی و خروجی کانال، مشخص فرض شده است؛ بدین گونه که در ورودی، فشار صفر در نظر گرفته شده و فشار در خروجی، با توجه به مقدار اختلاف فشار بی‌بعد  $\Delta P^*$  که به عنوان ورودی مسئله داده می‌شود، از معادله زیر محاسبه می‌شود:

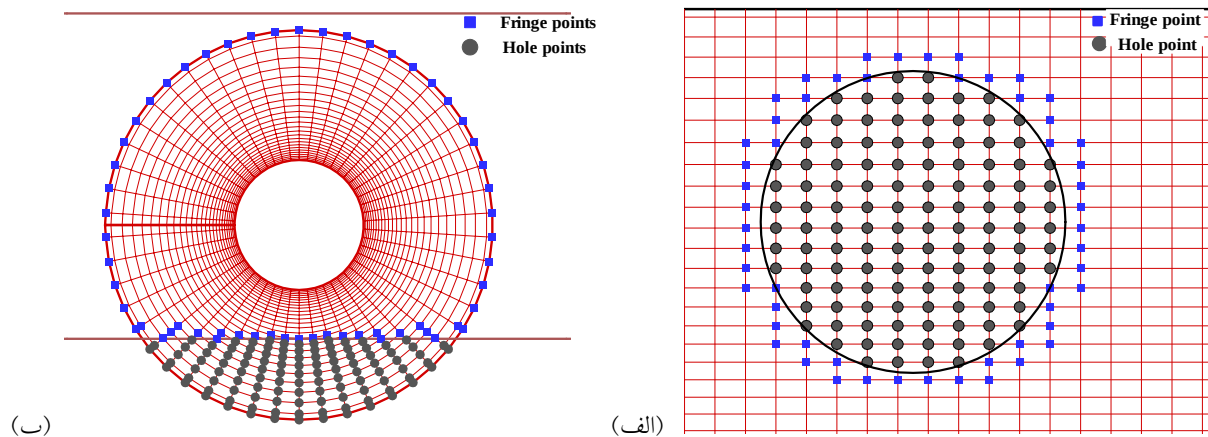
$$\Delta P^* = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho \frac{v^2}{d^2}} \quad (6)$$

که در آن،  $p$  و  $v$  به ترتیب، چگالی و لزجت سینماتیکی سیال است. فشار در خروجی  $P_{out}$ ، همواره بزرگتر از فشار در ورودی است. زمان بدون بعد  $t^*$  در این مسئله، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t^* = \frac{t\omega}{2\pi} \quad (7)$$

با توجه به این تعریف، دنبال کردن موقعیت زاویه‌ای روتورها در زمانهای مختلف ساده‌تر است؛ به عنوان مثال،  $t^* = 1.5$  نشان می‌دهد که تا این لحظه، روتور  $1/5$  دور چرخیده است.

در اینجا، مقادیر  $S$ ،  $Re$  و  $\Delta P^*$ ، به عنوان پارامترهای ورودی مسئله و سایر مقادیر، خروجیهای مسئله‌اند. محدوده مقادیر این پارامترها، از نظر کمی، با توجه به کاربرد عمده که معمولاً برای این نوع میکروپمپ وجود دارد، در حدود چند ده



شکل ۳ - نقاط پر و خالی در (الف) شبکه اصلی و (ب) شبکه فرعی

می‌شوند. گره‌های موجود بر روی مرز بیرونی شبکه فرعی که در محدوده میکروکانال قرار دارند و همچنین، نقاط واقع بین نقاط خالی و سایر گره‌های درون شبکه فرعی، جزو نقاط پر در شبکه فرعی‌اند.

به منظور دریافت اطلاعات در نقاط پر از شبکه دیگر، ابتدا باید از طریق یک الگوریتم سریع، مکان نقاط پر در شبکه مبدأ (شبکه‌ای که اطلاعات از آن دریافت می‌شود)، مشخص شود. به عنوان مثال، برای پیدا کردن نقاط (سلول) احاطه‌کننده نقطه  $P$  در شکل (۴)، ابتدا از یک نقطه دلخواه مانند  $G_{i,j}$  که در شکل، با دایره توپر نشان داده شده، شروع می‌کنیم. برای بررسی وجود نقطه  $P$  درون سلول پیرامون نقطه  $G_{i,j}$ ، چهار مثلث متشکل از نقاط  $G_{i,j}$  و  $G_{i\pm1,j}$  و  $G_{i,j\pm1}$  را در نظر می‌گیریم. مختصات هر نقطه داخل هر یک از این مثلث‌ها را می‌توان برحسب مختصات سه رأس آن به صورت زیر نوشت:

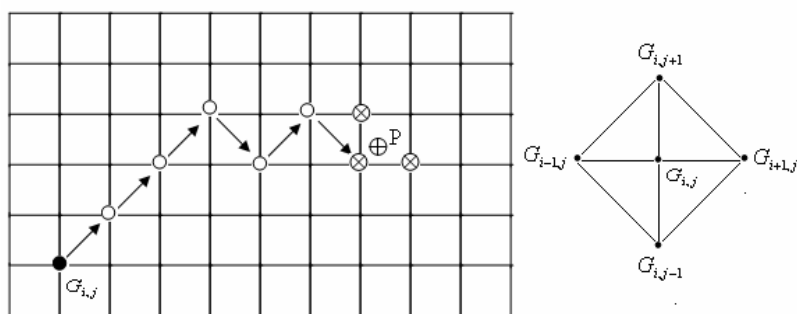
$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,j} & x_{i\pm1,j} & x_{i,j\pm1} \\ y_{i,j} & y_{i\pm1,j} & y_{i,j\pm1} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

که با حل دستگاه معادلات فوق،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به دست می‌آیند. چنانچه این مقادیر، مثبت و کوچکتر از یک باشند، نقطه  $P$  درون مثلث مورد نظر قرار دارد و در نتیجه، گره‌های احاطه‌کننده آن نقطه نیز مشخص می‌شود. اما در غیر این صورت، همانند شکل (۴) با توجه به وضعیت خط واصل بین

شبکه ساده مستطیلی از نوع  $H$  موسوم به شبکه اصلی<sup>۴</sup> استفاده می‌شود که کل محدوده محاسباتی (فضای داخلی کانال) را می‌پوشاند. تعدادی شبکه منطبق به بدنه (بسته به تعداد اجسام متحرک)، به نام شبکه‌های فرعی<sup>۵</sup> نیز حول اجسام ایجاد می‌شود. شبکه‌های فرعی، قابلیت حرکت نسبت به یکدیگر و نسبت به شبکه اصلی را دارا هستند. معادلات جریان، در هر یک از این شبکه‌ها به طور مستقل و با شرایط مرزی خاص خود حل می‌شوند که اطلاعات، بین دو شبکه، در نقاط خاصی مبادله می‌شود [۸].

در این روش، همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده، به جز نقاطی که معادلات جریان در آنها حل می‌شود، نقاط خاصی وجود دارد که به آن، نقاط خالی<sup>۶</sup> و نقاط پر<sup>۷</sup> می‌گویند. نقاطی از شبکه اصلی (یا شبکه‌های فرعی دیگر) که در زیر جسم قرار می‌گیرند، جزو نقاط خالی در نظر گرفته شده و از محدوده محاسباتی خارج می‌شوند. نقاطی از شبکه فرعی که خارج از محدوده میکروکانال قرار می‌گیرند نیز جزو نقاط خالی محسوب می‌شوند.

از آنجا که در روش مورد استفاده در کار حاضر، معادلات در هر شبکه به طور مستقل حل می‌شود، اطلاعات بایستی با روش مناسبی بین شبکه‌ها انتقال یابد. این کار، در گره‌های موسوم به نقاط پر صورت می‌گیرد که همانند شکل (۳-الف)، در شبکه اصلی، گره‌های اطراف نقاط خالی شبکه را شامل



شکل ۴ - مسیر گام‌برداری برای تعیین مرکز سلول احاطه‌کننده نقاط پر

طریق الگوریتم جستجو، گره‌های احاطه‌کننده نقاط پر مربوط به شبکه اصلی در شبکه فرعی و بالعکس، مشخص شده و با میانبایی اطلاعات از شبکه فرعی و تکمیل شرایط مرزی برای شبکه اصلی، معادلات جریان در شبکه اصلی به طور کامل حل می‌شود. پس از آن، با میانبایی از شبکه اصلی و تکمیل شرایط مرزی برای شبکه فرعی، مجدداً معادلات جریان در شبکه فرعی حل می‌شود. این روند، در یک گام زمانی، در شبکه‌های اصلی و فرعی، آنقدر تکرار می‌شود تا شرط همگرایی برآورده شود. برای گام زمانی جدید، همین روند، با تعیین موقعیت جدید مرکز روتور، عیناً تکرار می‌شود [۸].

### ۳-۱- معادلات حاکم

در این مسئله، معادلات جریان آرام، به صورت دوبعدی، تراکم‌ناپذیر و بر مبنای روش حجم محدود حل می‌شود. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، علاوه بر استناد به نتایج مطالعات دی‌کورتیه و همکارانش [۳] در خصوص اختلاف شرایط جریان در حالت سه‌بعدی، با در نظر گرفتن ابعاد هندسی مسئله نیز می‌توان گفت که چون نسبت طول کانال به عمق آن، از مرتبه ۱۰ بوده و با توجه به این که جریان اصلی در طول کانال است، جریان عرضی به دلیل نسبت منظر فوق، ناچیز است و می‌توان رفتار جریان سه‌بعدی را با دقت خوبی، به صورت مدل جریان دوبعدی که یک مقطع طولی را در بر می‌گیرد، مطالعه و بررسی کرد.

معادله کلی انتقال جریان آرام برای متغیر عمومی  $\phi$  در دستگاه مختصات کارتزین، به صورت زیر است:

نقطه  $P$  و  $G_{i,j}$ ، گره جدیدی به جای  $G_{i,j}$  در نظر گرفته شده و مجدداً بررسی می‌شود که آیا نقطه  $P$  داخل یکی از چهار مثلث ایجادشده به وسیله نقاط  $G_{i,j}$  و  $G_{i+1,j}$  و  $G_{i,j+1}$  جدید قرار دارد یا خیر. این پروسه آنقدر تکرار می‌شود تا سلول احاطه‌کننده نقطه پر مورد نظر مشخص شود. سپس، به منظور انتقال اطلاعات به این نقطه پر، بایستی از یک روش میانبایی مناسب استفاده شود.

در کار حاضر، از یک روش میانبایی مبتنی بر مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  که از جایابی نقطه  $P$  در بالا به دست آمده، موسوم به میانبایی مثلثی<sup>۸</sup> استفاده می‌شود [۸]. معادله مورد استفاده برای میانبایی به صورت زیر است:

$$\phi_p = \alpha\phi_{i,j} + \beta\phi_{i+1,j} + \gamma\phi_{i,j+1} \quad (9)$$

که در آن،  $\phi$  کمیت مورد نظر برای میانبایی در شبکه مبدا یا مقصد است. بایستی اشاره نمود که در میانبایی مولفه‌های سرعت از یک شبکه به شبکه دیگر، باید دقت شود که مقدار سرعت، نسبت به دستگاه مختصات شبکه مقصد محاسبه شود. برای مثال، چنانچه مقدار سرعت در یک نقطه پر از شبکه فرعی که از طریق میانبایی از شبکه اصلی به دست آمده، برابر  $u_1$  و سرعت جسم نیز برابر  $u_2$  باشد، با توجه به این که دستگاه مختصات، با سرعت جسم حرکت می‌کند، سرعت گره مورد نظر برابر  $u_1 - u_2$  خواهد بود.

روند کلی حل مسئله با استفاده از روش برهم‌نهادن شبکه‌ها، بدین ترتیب است که ابتدا با معلوم بودن موقعیت روتور، نقاط پر و خالی شبکه‌های اصلی و فرعی مشخص می‌شود. سپس، از

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial X_i} \right) + S \quad (10)$$

که برای مثال، در معادله مومتم،  $\Gamma_\phi$  همان ضریب لزجت  $\mu$  و متغیر  $\phi$  بیانگر مولفه‌های سرعت است. جمله  $S$  نیز جمله چشمه است که در معادله مومتم، گرادیان فشار را شامل می‌شود؛ در این مسئله، چون شبکه فرعی، با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌چرخد، بایستی برای شبکه فرعی علاوه بر گرادیان فشار، نیروی گریز از مرکز و نیروی ناشی از شتاب کریولیس را نیز اضافه کرد.

همچنین، در اینجا، برای گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل از روش حجم محدود، برای حل میدان جریان از الگوریتم سیمپل-سی، برای محاسبه جملات جابه‌جایی از روش کوئیک و برای محاسبه تغییرات زمانی از روش کرانک-نیکلسون استفاده شده است. به منظور جلوگیری از نوسانات عددی نیز روش رای-چو به کار گرفته شده است. شرط همگرایی در مسئله، به گونه‌ای است که باقیمانده‌ها در هر دو شبکه اصلی و فرعی، کمتر از  $10^{-5}$  شود.

#### ۴- نتایج

شبکه، مولفه‌های سرعت را از طریق میانبایی، از شبکه اصلی دریافت می‌کنند. مقادیر فشار نیز همانند شبکه اصلی، از طریق شرط مرزی نیومن مشخص می‌شود. نکته قابل توجه در اینجا، این است که با در نظر گرفتن حالتی مانند زمانی که عمق میکروکانال ۲۰ میکرون و  $\varepsilon = 0.95$  باشد، در این حالت، فاصله روتور از دیواره پایینی کانال، در حدود ۲۵۰ نانومتر خواهد بود. بنابراین، از آنجا که سیال عامل در این نوع میکروپمپ، مایع بوده و در مورد مایعات نیز ملاک در نظر گرفتن سیال به عنوان محیط پیوسته و در نتیجه، استفاده از معادلات ناویر-استوکس و شرط عدم لغزش، طول مشخصه مسئله نسبت به فاصله بین مولکولی است، می‌توان با استفاده از دینامیک مولکولی بیان کرد که چون طول مشخصه، یا به عبارت بهتر، عرض فضای بین روتور و جداره میکروپمپ، بسیار بزرگتر از مقدار بحرانی ۱۰ نانومتر است، شرایط استفاده از معادلات ناویر-استوکس و شرط عدم لغزش فراهم است.

#### ۳-۲- شرایط مرزی

با توجه به اینکه در روش برهم‌نهادن شبکه‌ها، معادلات در شبکه‌های مختلف، به صورت مستقل حل می‌شوند، بایستی برای هر یک از شبکه‌ها، شرایط مرزی خاص خود را تعریف کرد. در این مسئله، در شبکه اصلی، از شرط مرزی دیواره برای مرزهای بالا و پایین کانال استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، فشار در ورودی و خروجی مشخص بوده و در خروجی بیشتر از ورودی است. طول کانال، ۱۶ برابر قطر روتور در نظر گرفته شده تا بتوان از شرط مرزی توسعه‌یافتگی ( $V = 0$  و  $\partial u / \partial x = 0$ ) در مرزهای ورودی و خروجی کانال استفاده کرد. علاوه بر این، نقاط پر در شبکه اصلی، مولفه‌های سرعت را از طریق میانبایی از شبکه فرعی دریافت می‌کنند و فشار نیز با استفاده از شرط مرزی نیومن به دست می‌آید که به عنوان شرط مرزی در شبکه اصلی به کار می‌روند.

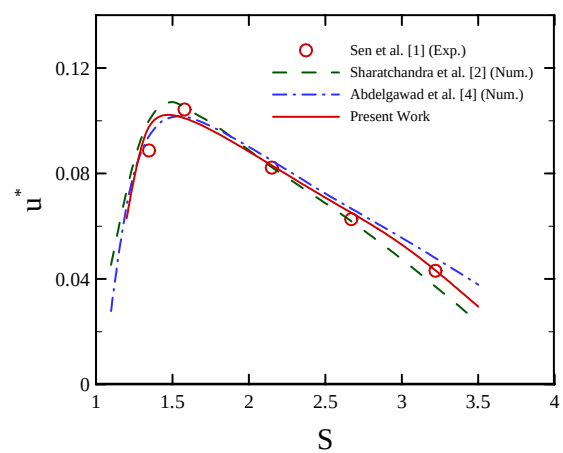
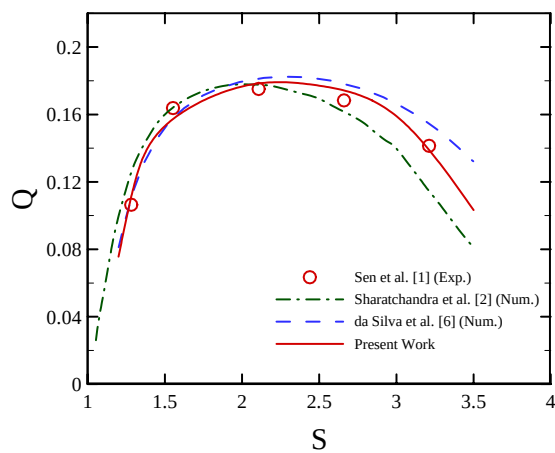
در شبکه فرعی نیز از شرط عدم لغزش بر روی سطح روتور استفاده شده و گره‌های واقع بر مرز خارجی (نقاط پر) در این

در ابتدا، پیش از شروع بررسی تاثیر پارامترهای مختلف، به منظور بررسی اثر اندازه شبکه‌ها و حجم معیارها در دقت نتایج و نیز اطمینان از بی‌اثر بودن تغییرات اندازه شبکه‌ها در همگرایی و دقت نتایج به دست آمده، چند ترکیب از شبکه‌ها با اندازه‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که جریان در نواحی اطراف استوانه، از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و عمده تغییرات شرایط جریان در این نواحی صورت می‌گیرد، شبکه‌های مورد استفاده به گونه‌ای ساخته شده که در اطراف استوانه و نقاط حساس تراکم بیشتری داشته و در قسمتهایی مانند ورودی و خروجی کانال که شرایط جریان، به صورت کاملاً توسعه‌یافته در می‌آید، از حجم معیارهای بزرگتری استفاده می‌شود. شبکه فرعی اطراف استوانه که از نوع O است نیز به صورتی است که در اطراف سطح استوانه ریزتر بوده و به مرور، با حرکت در امتداد شعاع استوانه از تراکم آن کاسته می‌شود. چهار ترکیب مختلف از شبکه‌های اصلی و فرعی برای شرایط  $S = 1.5$ ،  $\varepsilon = 0.4$ ،  $Re = 1$  و  $\Delta P^* = 1$  بررسی شده که



جدول ۱ - تاثیر اندازه شبکه‌های اصلی و فرعی و گام زمانی مورد استفاده و مقایسه مقادیر حاصل  
( $\Delta P^* = 1$  و  $Re = 1$ ،  $\varepsilon = 0.4$ ،  $S = 1.5$ )

| بررسی تأثیر اندازه شبکه‌های اصلی و فرعی |                  |         | بررسی تأثیر گام زمانی برای شبکه‌هایی با اندازه $250 \times 50$ و $80 \times 30$ |         |                                           |
|-----------------------------------------|------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|
| اندازه شبکه اصلی                        | اندازه شبکه فرعی | $u^*$   | $\Delta t^*$                                                                    | $u^*$   | زمان رسیدن به ۹۹٪ مقدار سرعت در حالت دائم |
| $150 \times 20$                         | $40 \times 10$   | ۰.۰۷۷۸۰ | ۰.۰۰۰۱                                                                          | ۰.۰۴۹۳۴ | ۰.۴۰۵۱۲                                   |
| $200 \times 30$                         | $60 \times 20$   | ۰.۰۵۱۷۸ | ۰.۰۰۰۵                                                                          | ۰.۰۴۹۴۹ | ۰.۱۳۶۰۲                                   |
| $250 \times 50$                         | $80 \times 30$   | ۰.۰۴۹۴۹ | ۰.۰۰۱                                                                           | ۰.۰۴۹۵۱ | ۰.۱۳۵۹۶                                   |
| $300 \times 60$                         | $100 \times 40$  | ۰.۰۴۹۵۶ | ۰.۰۰۵                                                                           | ۰.۰۴۹۵۷ | ۰.۱۳۲۵۳                                   |



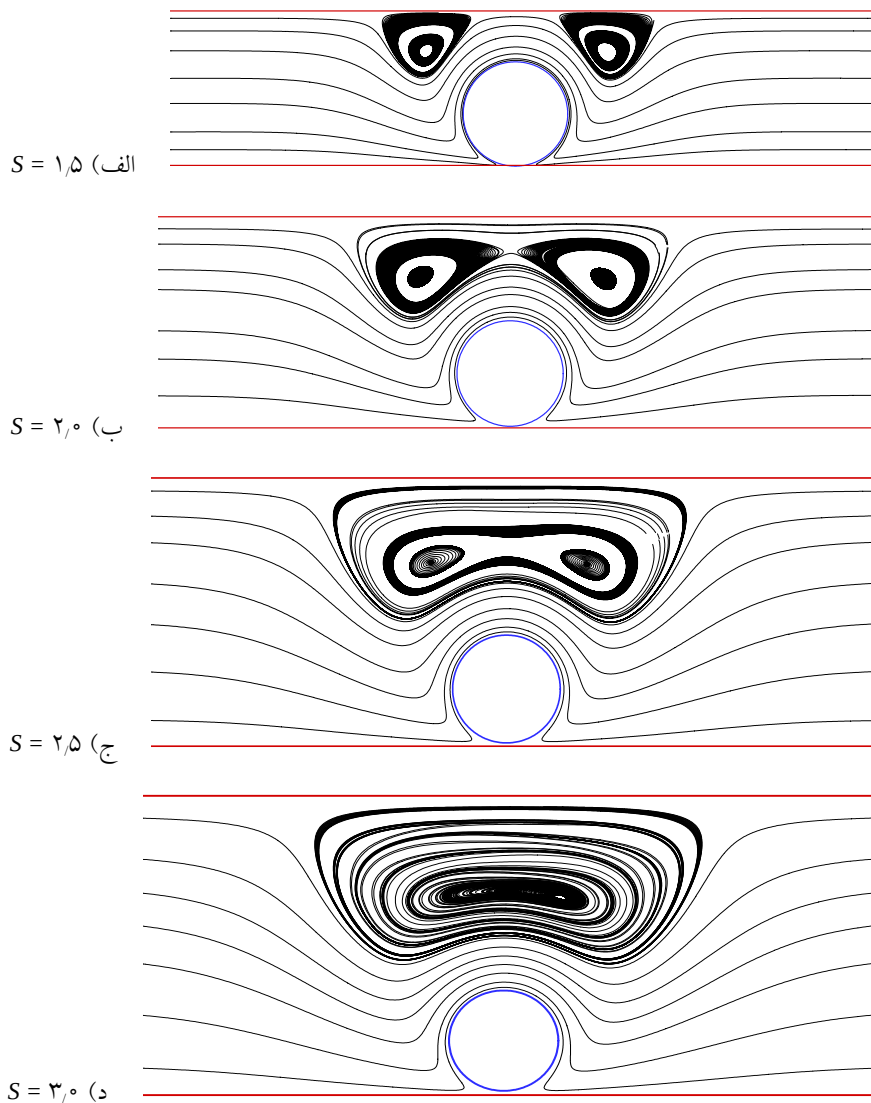
شکل ۵ - مقایسه نتایج سرعت متوسط و دبی جریان در حالت دائم برای روتور دایره‌ای بر حسب ارتفاع کانال  
( $\varepsilon = 0.4$ ،  $\Delta P^* = 0.5$ ،  $Re = 0.5$ )

در نظر گرفته شده است.

همان طور که گفته شد، اکثر مطالعات انجام شده بر روی میکروپمپهای جریان لزج، به جز کار عبدالجواد و همکارانش [۴] و پوت‌هاونگ و حسن [۵] که رفتار گذرای جریان درون کانال را بررسی کردند، عمدتاً بر روی جریان حالت دائم در حضور روتور دایره‌ای صورت گرفته است [۱ و ۲]. به همین دلیل، به منظور برآورد صحت نتایج، مقدار نهایی برخی حالتها برای روتور دایره‌ای (پس از رسیدن به حالت دائم) را با نتایج تجربی و عددی موجود مقایسه کرده و سپس، به ارائه نتایج حاصل از بررسی رفتار گذرای جریان در حضور روتورهای مختلف خواهیم پرداخت.

در شکل (۵)، تاثیر ارتفاع کانال  $S$  بر میزان سرعت متوسط و دبی خروجی میکروپمپ با روتور دایره‌ای، در حالت دائم نشان داده شده است. این نتایج که از بررسی ۱۰ حالت مختلف

نتایج حاصل از به کارگیری این شبکه‌ها به منظور محاسبه سرعت متوسط جریان، در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به این مقادیر، به منظور بررسی عددی، از شبکه‌های حالت سوم استفاده شده است؛ یعنی شبکه اصلی به ابعاد  $250 \times 50$  و شبکه فرعی با اندازه  $80 \times 30$  تا علاوه برداشتن دقت کافی در برآورد مقادیر پارامترهای مورد نظر، هزینه‌های محاسباتی را نیز تا حد ممکن کاهش داده و به حداقل برساند. به همین ترتیب، در مورد گام زمانی نیز تحلیل مشابهی صورت گرفته که نتایج حاصل از آن در جدول (۱) برای شبکه‌ای با ابعاد فوق آورده شده است. از آنجا که گام زمانی بایستی به اندازه کافی کوچک باشد تا بتواند کوچکترین تغییرات (از نظر زمانی) را در شرایط جریان پوشش داده و با استفاده از آن بتوان رفتار جریان را نیز به درستی مشاهده کرد، مقدار  $\Delta t = 5 \times 10^{-4} s$  برای گام زمانی



شکل ۶ - خطوط جریان در حالت دائم برای ارتفاعهای مختلف کانال با روتور دایره‌ای ( $\epsilon = 0.95$ ,  $Re = 1$  و  $\Delta P^* = 0$ )

بسیار کم  $S$ ، یا به عبارت دیگر، در کانالهای با ارتفاع کم، چون سیال بین استوانه و دیواره بالایی کانال محبوس شده (گیر می‌افتد) و قادر به حرکت نیست، دبی خروجی و سرعت جریان، بسیار کم می‌شود که با افزایش ارتفاع کانال، این مشکل برطرف شده و مقدار دبی افزایش می‌یابد. اما به مرور، با افزایش حجم سیال بالای روتور، افزایش ارتفاع کانال منجر به افت شدید سرعت و دبی جریان می‌شود.

شکل (۶)، رفتار حالت دائم جریان را در کانالهایی با ارتفاعهای مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در ارتفاعهای کم، دو گردابه، به صورت کاملاً مجزا و متقارن، در

از  $S = 1.2$  تا  $S = 3.5$  به دست آمده، با نتایج تجربی سن و همکارانش [۱] و نیز نتایج عددی شارات‌چاندرا و همکارانش [۲]، عبدالجواد و همکارانش [۴] و داسیلوا و همکارانش [۶] مقایسه شده که از تطابق خوب و دقت قابل قبولی برخوردار است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار سرعت متوسط خروجی، در میکروکانالی با ارتفاع تقریباً  $1.5d$  به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد؛ در حالی که مقدار دبی ماکزیمم، مربوط به کانالی با ارتفاع حدود  $2.3d$  است. با افزایش و کاهش ارتفاع کانال از این مقادیر، سرعت متوسط و در نتیجه، دبی خروجی میکروپمپ کاهش می‌یابد. در واقع، در مقادیر

کانالی با ارتفاع حدود ۱/۵ برابر قطر استوانه، به مقدار حداکثر خود می‌رسد [۹].

نمودار تغییرات دبی حجمی پمپ بر حسب فشار بدون بعد اعمالی به دو سر میکروکانال یا همان بار پمپ  $(Q - P^*)$ ، در شکل (۸-الف) برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این که انرژی جنبشی در ورودی و خروجی کانال یکسان است، انرژی خالص اضافه شده به جریان، تنها به صورت افزایش فشار بوده و در نتیجه، می‌توان بازده میکروپمپ را به صورت نسبت افزایش انرژی جریان به انرژی مکانیکی اعمال شده به میکروپمپ تعریف کرد. بدین ترتیب، خواهیم داشت:

$$\eta = \frac{\frac{m \Delta P}{\rho}}{M \omega} \quad (11)$$

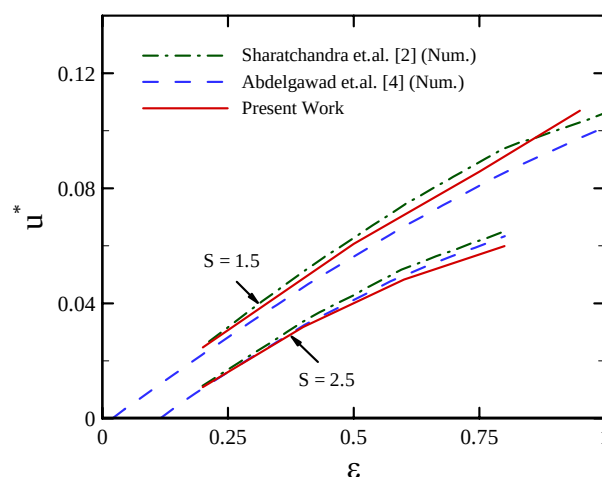
که می‌توان به صورت بدون بعد زیر نیز نوشت:

$$\eta = \frac{\Delta P^* u^* S}{C_m Re^2} \quad (12)$$

که در آن:

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 d^2} \quad (13)$$

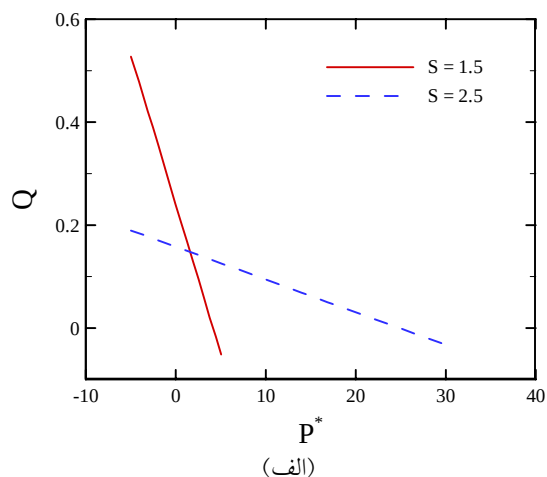
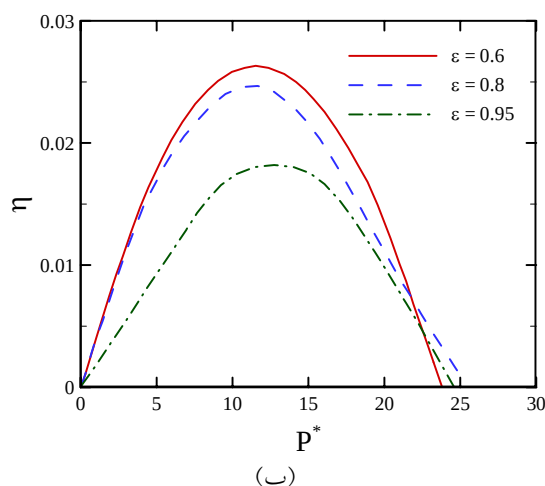
روند تغییرات راندمان پمپ با فشار، برای حالت‌های مختلف در شکل (۸-ب) نشان داده شده است. با توجه به معادله (۱۲) و با در نظر گرفتن اینکه راندمان پمپ با مقدار سرعت متناسب است، انتظار داریم راندمان برای  $\varepsilon$  ماکزیمم، حداکثر مقدار را داشته باشد؛ اما همان طور که ملاحظه می‌شود، راندمان با ضریب مومتم روتور نسبت عکس دارد. بنابراین، اگرچه در  $\varepsilon$  های کم، مقدار سرعت کم است، اما باید به مقدار کم ضریب مومتم  $C_m$  در این حالت که ناشی از گرادیان سرعت ناچیز بر روی سطح استوانه است نیز دقت کرد که این خود باعث افزایش مقدار بازده میکروپمپ می‌شود. به همین ترتیب، زمانی که سرعت خروجی پمپ زیاد است، مقدار ضریب مومتم نیز بالا بوده و باعث کاهش مقدار بازده پمپ می‌شود. در نتیجه، حداکثر بازده میکروپمپ جریان لزج، در حالت  $\varepsilon$  های تقریباً



شکل ۷ - مقایسه نتایج سرعت جریان در حالت دائم برای روتور دایره‌ای بر حسب خارج از مرکزی روتور ( $\Delta P^* = 1$ ,  $Re = 1$ )

بالای استوانه و در دو سمت آن تشکیل می‌شود. این گردابه‌ها، با افزایش ارتفاع کانال با یکدیگر ادغام شده و یک گردابه بزرگ را به وجود می‌آورند. هر یک از این گردابه‌ها، به صورت پادساعتگرد و در خلاف جهت جریان حرکت می‌کنند. وجود همین گردابه‌ها، باعث کاهش جریان و کم شدن میزان سرعت و دبی خروجی می‌شود. مقدار ماکزیمم دبی سیال در میکروپمپ جریان لزج که در شکل (۵) دیده می‌شود، مربوط به حالتی است که دو گردابه، در نزدیکی یکدیگر قرار گرفته و تمایل به تشکیل یک گردابه واحد دارند. این حالت، با یک گردابه بزرگ که دو گردابه کوچک را در بر می‌گیرد، مشخص می‌شود.

تاثیر میزان خارج از مرکزی روتور  $\varepsilon$  بر روی سرعت متوسط سیال در حالت دائم، در شکل (۷) نشان داده شده است. این نتایج، مربوط به روتور دایره‌ای، در کانلهایی با دو ارتفاع مختلف می‌باشد که مقدار نهایی سرعت (پس از رسیدن به حالت دائم) در آن، با نتایج عددی شارات چاندرا و همکارانش [۲] و عبدالجواد و همکارانش [۴] مقایسه شده که تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. با توجه به روند افزایش تقریباً خطی سرعت با خارج از مرکزی روتور، می‌توان چنین گفت که سرعت جریان، در یک کانال مشخص ( $S$  ثابت)، در مقدار  $\varepsilon$  ماکزیمم و در یک موقعیت ثابت روتور ( $\varepsilon$  ثابت)، برای



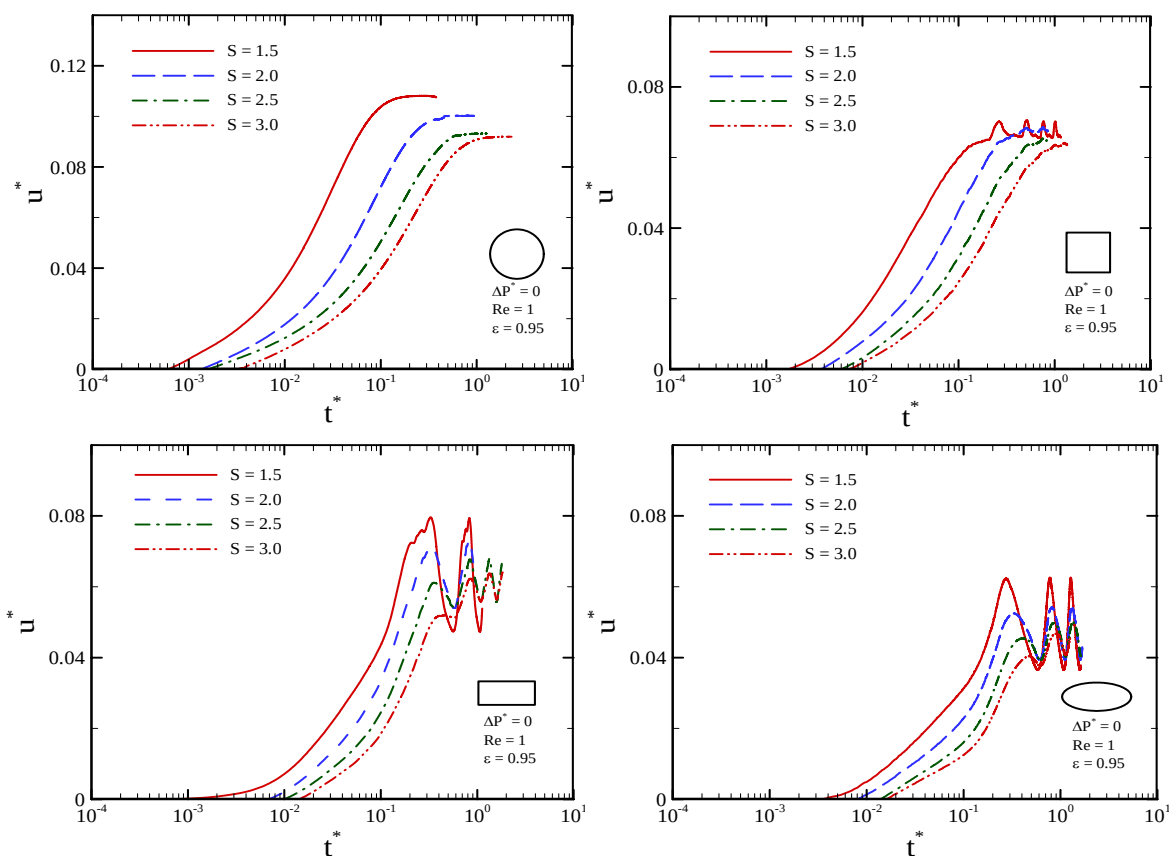
شکل ۸ - الف) منحنی تغییرات دبی حجمی پمپ برحسب تغییرات بار پمپ به صورت بدون بعد ( $\varepsilon = 0.6, 0.8, 0.95$ )  
 ب) منحنی راندمان عملکرد میکروپمپ برای حالت‌های مختلف برای روتور دایره‌ای ( $Re = 1, S = 1.5, 2.5$ )

بدین دلیل رخ می‌دهد که در لحظه‌های مختلف، ناحیه‌های مختلفی از روتور در مجاورت دیواره بالایی کانال قرار می‌گیرد. زمانی که گوشه‌های روتور در مجاورت دیواره کانال قرار می‌گیرد، به دلیل افزایش تنش برشی اعمال شده به سیال، سرعت خروجی در میکروکانال افزایش می‌یابد. اما پس از آن، چون فاصله بین دیواره کانال و سطح روتور مجدداً افزایش می‌یابد، سرعت سیال تا زمانی که سطح تخت روتور، موازی محور کانال قرار گیرد که در این حالت، مقدار سرعت جریان مینیمم خواهد بود، کم می‌شود. این نوسانات، در طول زمان، به طور متناوب تکرار می‌شود. در مورد روتور مربعی، از آنجا که دارای هندسه تقریباً یکنواختی است، دامنه نوسانات، کمتر و جریان آرامتر است. اما هرچه از یکنواختی هندسی سطح مقطع روتور کاسته شود، دامنه نوسانات، افزایش بیشتری یافته و در نتیجه، جریان خروجی نیز از یکنواختی کمتری برخوردار خواهد بود. در واقع، هنگامی که گوشه‌های روتورهای غیردایره‌ای، در نزدیکی دیواره بالایی قرار می‌گیرد، سطوح تخت بزرگتر در روتور مستطیلی و سطح هموار روتور بیضوی می‌توانند حجم سیال بیشتری را نسبت به ضلع کوچکتر مستطیل و یا روتور مربعی به سمت خروجی کانال هل بدهند. به همین دلیل، زمانی که ضلع بزرگتر روتور

متوسط که هم سرعت خروجی پمپ زیاد بوده و هم ضریب مومنتم نسبتاً پایین است، رخ خواهد داد [۴].

اما به منظور بررسی رفتار گذرای جریان در میکروپمپ جریان لزج، ابتدا تغییرات سرعت جریان با زمان، در کانالی با ارتفاع‌های مختلف، برای هر چهار روتور دایره‌ای، مربعی، مستطیلی و بیضوی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، تقریباً در هر چهار حالت، با افزایش ارتفاع کانال، مقدار سرعت متوسط خروجی میکروکانال کاهش می‌یابد. این، بدین خاطر است که با افزایش ارتفاع کانال، فاصله سطح بالایی روتور و دیواره بالایی کانال افزایش یافته و در نتیجه، تنش برشی اعمال شده به سیال در سطح بالایی روتور کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، با زیاد شدن فاصله از دیواره بالایی کانال، زمان لازم برای انتقال مومنتم سطح روتور به سیال مجاور دیواره بالایی و در نتیجه، زمان لازم برای رسیدن به حالت دائم جریان افزایش می‌یابد [۴].

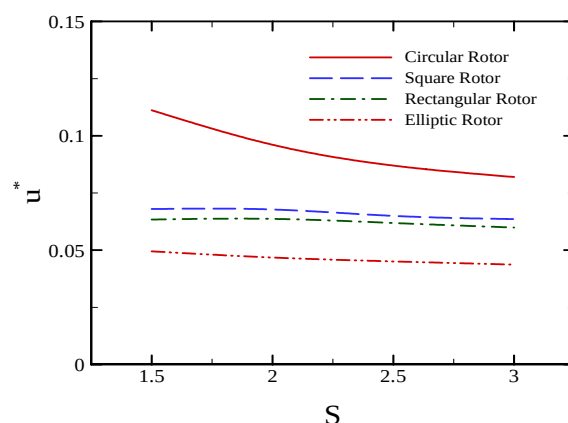
همان طور که ملاحظه می‌شود، برای روتورهای غیردایره‌ای، جریان پس از طی زمان اولیه، به یک حالت تقریباً پایدار (شبه‌دائم)<sup>۹</sup> می‌رسد که در این حالت، جریان بنا به شکل هندسی روتور، حالت نوسانی دارد [۵]. این نوسانات،



شکل ۹ - تغییرات زمانی سرعت بر حسب ارتفاعهای مختلف کانال ( $\varepsilon = 0.95$ ,  $\Delta P^* = 0$ ,  $Re = 1$ )

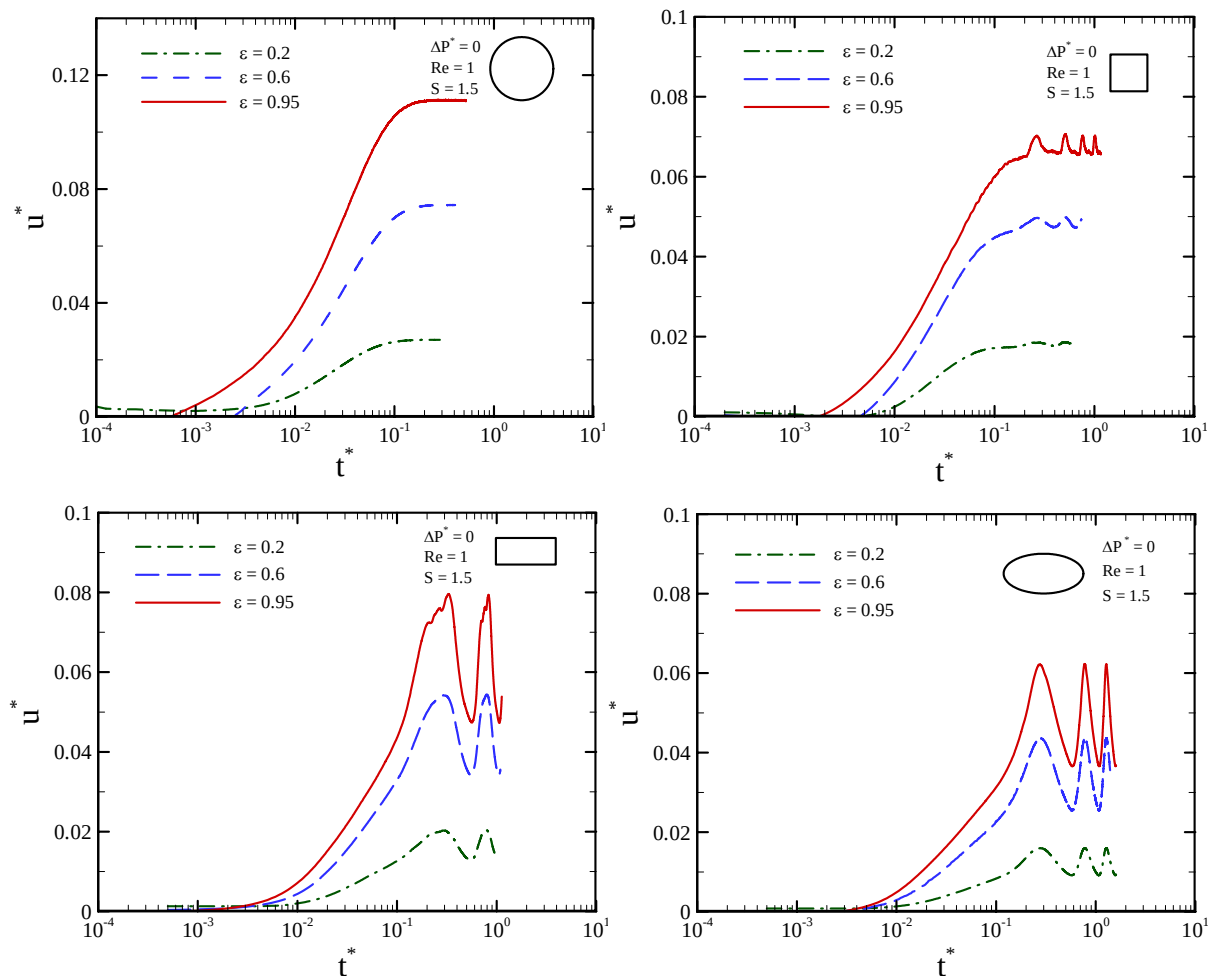
با این حال، همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده، مقدار متوسط جریان برای روتور دایره‌ای بیشتر از روتورهای مربعی، مستطیلی و بیضی است. مقادیر متوسط برای روتورهای غیردایره‌ای، از مقدار میانگین بین ماکزیمم و مینیمم سرعت خروجی به دست آمده است.

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، خارج از مرکز بودن روتور، باعث ایجاد یک نیروی برشی نامساوی در سطوح بالا و پایین روتور و در نتیجه، اعمال نیروی محرکه به سیال می‌شود. در شکل (۱۱)، تغییرات زمانی  $u^*$  بر حسب خارج از مرکزی روتور  $\varepsilon$  نشان داده شده است. برای هر چهار حالت، با افزایش مقدار  $\varepsilon$ ، مقدار  $u^*$  افزایش می‌یابد، در حالی که زمان رسیدن به حالت پایدار، چندان دستخوش تغییر قرار نمی‌گیرد. هرچه از میزان خارج از مرکزی روتور کاسته می‌شود، به دلیل تقارن بیشتر جریان در داخل کانال، از مقدار خالص جریان و نیز



شکل ۱۰ - تغییرات متوسط سرعت خروجی در ارتفاعهای مختلف کانال، برای روتورهای مختلف ( $\varepsilon = 0.95$ ,  $\Delta P^* = 0$ ,  $Re = 1$ )

مستطیلی در حالت تقریباً عمودی قرار می‌گیرد، با هل دادن حجم سیال بیشتر به سمت دهانه خروجی، باعث افزایش بیشتری در سرعت و دبی خروجی می‌شود [۵].

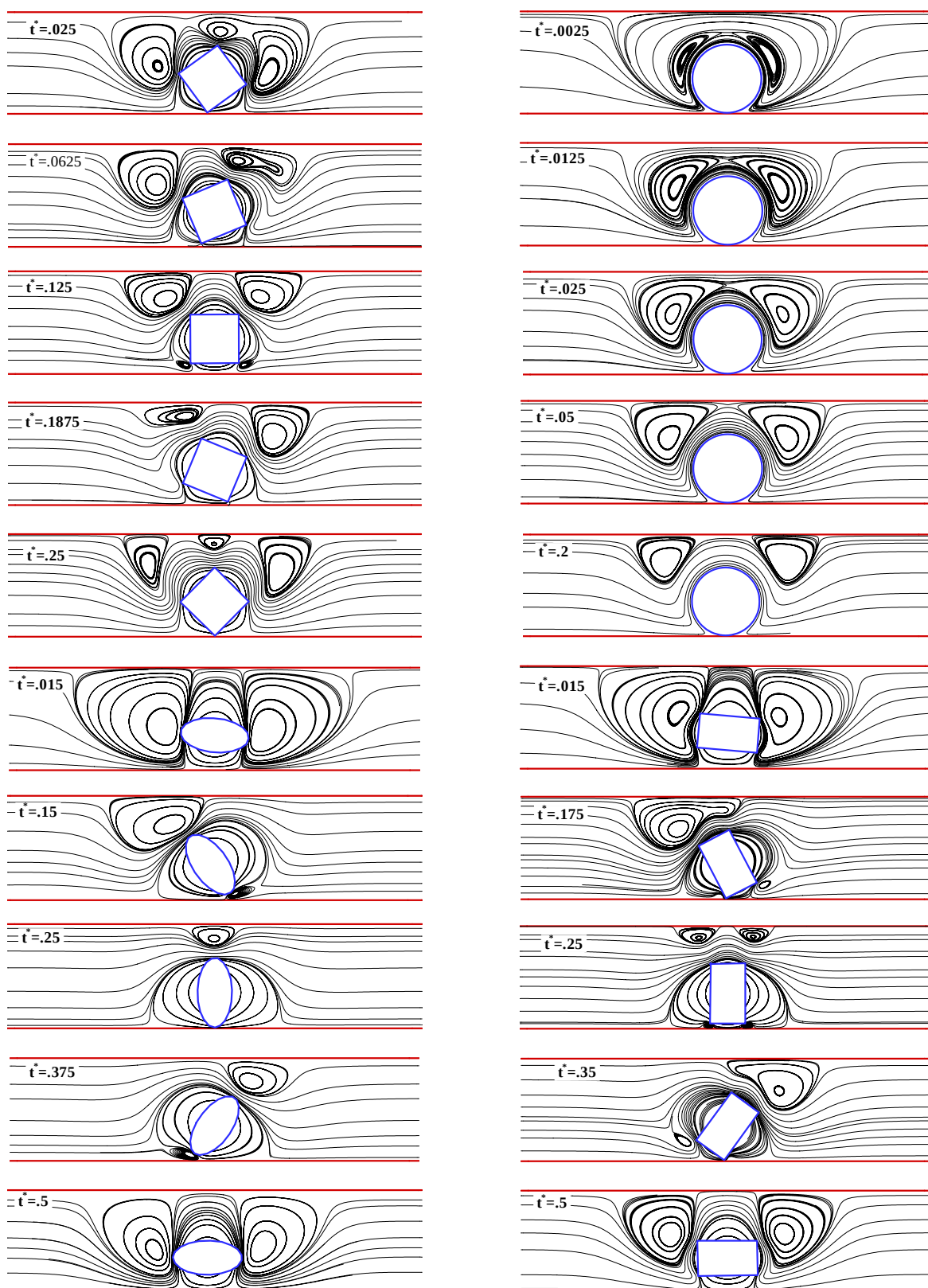


شکل ۱۱ - تاثیر خارج از مرکزی روتور بر سرعت متوسط در میکروپمپ ( $\Delta P^* = 0$ ,  $Re = 1$ ,  $S = 1.5$ )

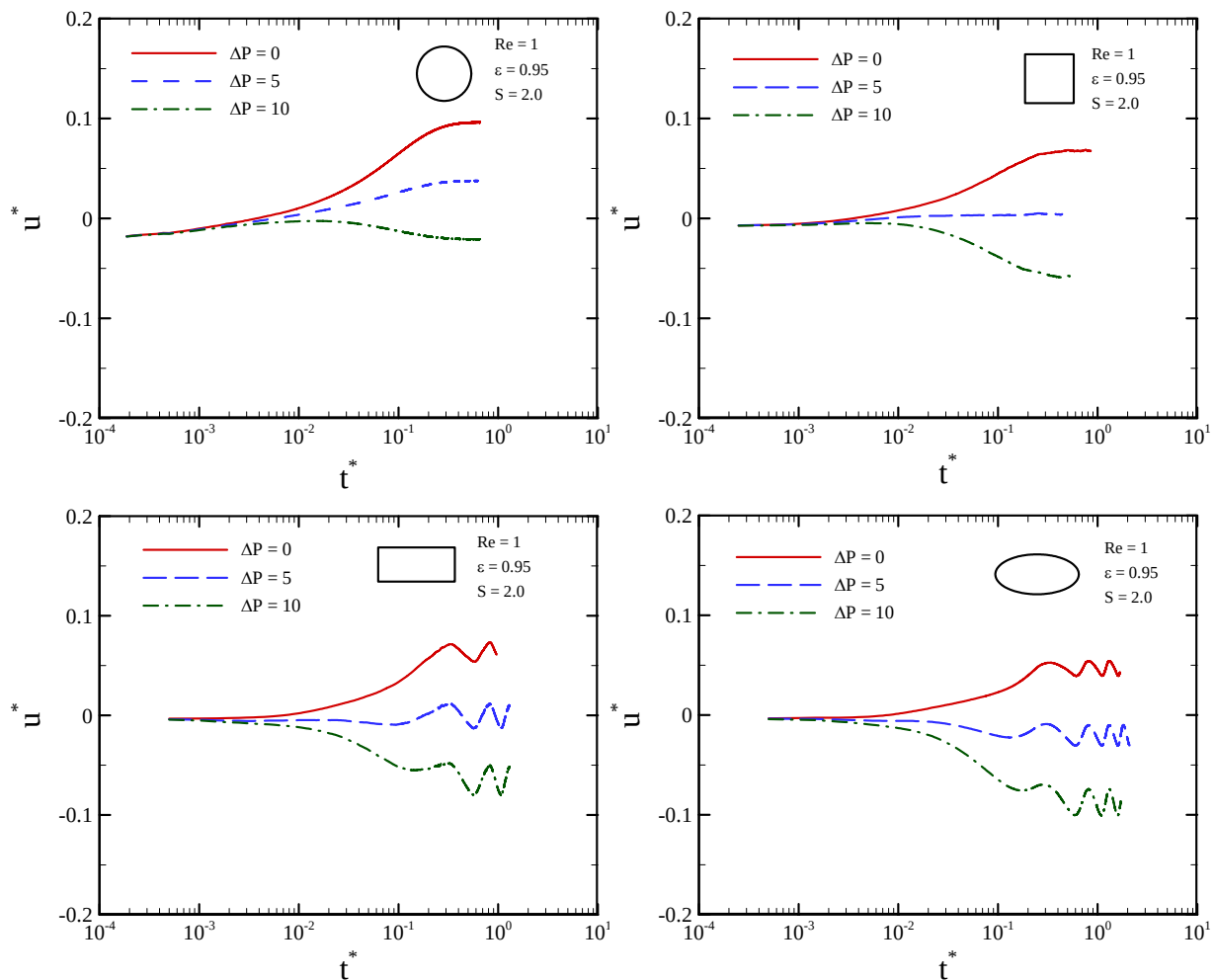
پادساعتگرد متقارن در بالای استوانه تشکیل می‌شود. اما برای روتورهای غیردایره‌ای، شرایط به گونه دیگری است. برای روتور مربعی، با آغاز چرخش روتور از حالت اولیه (وضعیت لوزی‌مانند)، دو گردابه در سمت راست و چپ روتور و یک گردابه کوچک نیز در بالای آن به وجود می‌آید. با ادامه چرخش روتور، گردابه سمت راست، ناپدید شده و گردابه بالای روتور، ضمن حرکت به سمت راست، بزرگتر می‌شود. زمانی که روتور در حالت مربعی قرار می‌گیرد (ضلع روتور موازی دیواره کانال باشد)، دو گردابه متقارن در بالای روتور و دو گردابه کوچک نیز در زیر روتور به وجود می‌آید که باعث کاهش سرعت و دبی خروجی می‌گردد. مجدداً در حالتی که گوشه دیگر روتور، در مجاورت دیواره کانال قرار گیرد، سه گردابه در بالای روتور تشکیل شده و شرایط مجدداً تکرار

نیروی محرکه آن کاسته می‌شود. در واقع، در حالت  $\varepsilon = 0$ ، در اثر تقارن جریان در بالا و پایین روتور، تنشهای برشی روی سطوح بالا و پایین یکسان بوده و مقدار نیروی خالص وارده و در نتیجه، میزان سیال پمپ‌شده به سمت خروجی کانال صفر خواهد بود. در مقابل، با افزایش  $\varepsilon$ ، به دلیل فواصل نامساوی بین روتور و دیواره‌های کانال، تنشهای برشی نامساوی بر روی سطوح بالا و پایین به وجود آمده و جریان خالص افزایش می‌یابد.

تغییرات خطوط جریان در اطراف روتورها، در زمانهای مختلف، در شکل (۱۲) آورده شده است. برای روتور دایره‌ای، در لحظه‌های اولیه، دو گردابه کوچک بر روی سطح استوانه به وجود می‌آید که با گذشت زمان، از سطح استوانه جدا شده و به سمت دیواره بالایی حرکت می‌کنند. در حالت نهایی (دائم)، دو گردابه



شکل ۱۲ - میدان جریان در زمانهای مختلف در میکروبمپهای مختلف ( $\varepsilon = 0/95$  و  $Re = 1$ ،  $\Delta P^* = 0$ )



شکل ۱۳ - تاثیر میزان بار پمپ بر سرعت متوسط در میکروپمپ ( $\varepsilon = 0.95$ ,  $Re = 1$ ,  $S = 2$ )

زیر روتور تشکیل می‌دهند. مجدداً در حالتی که روتور به وضعیت افقی برگردد، این دو گردابه، هم‌اندازه شده و به صورت متقارن در دو طرف روتور قرار می‌گیرند.

در شکل (۱۳) نیز تاثیر افزایش اختلاف فشار دو سر کانال، یا به عبارت دیگر، تاثیر بار پمپ بر میزان سرعت خروجی میکروپمپ برای روتورهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه موارد، افزایش بار پمپ، باعث کاهش مقدار سرعت و دبی خروجی می‌شود. این کاهش سرعت، تا حدی ادامه می‌یابد که با رسیدن بار پمپ به مقدار مشخصی، درون کانال جریان برگشتی ایجاد شد و در نتیجه، مقدار متوسط سرعت در خروجی، منفی می‌شود.

می‌شود. در مورد روتورهای مستطیلی و بیضوی که از حالت افقی شروع به حرکت می‌کنند، ابتدا دو گردابه بزرگ در دو طرف روتور تشکیل می‌گردد که به تدریج، با چرخش روتور، گردابه سمت راست ناپدید شده و گردابه سمت چپ، به سمت بالای روتور حرکت می‌کند. یک گردابه کوچک نیز زیر روتور تشکیل می‌شود. وقتی روتور در حالت عمودی قرار گرفت، برای روتور بیضوی، یک گردابه واحد در بالای روتور به وجود می‌آید؛ در حالی که برای روتور مستطیلی، دو گردابه کوچک در بالا و دو گردابه کوچکتر نیز در زیر آن به وجود می‌آید. این گردابه‌ها با ادامه چرخش روتور، با یکدیگر ترکیب شده و گردابه بزرگتری را در سمت راست، در بالای روتور و یک گردابه نیز در سمت چپ و



## ۵- جمع بندی

در این مقاله، با استفاده از روش برهم نهادن شبکه‌ها، جریان دوبعدی نادائم در میکروپمپهای جریان لزج، در حضور روتورهای با سطح مقطعهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شرایط جریان و تغییرات سرعت و دبی خروجی میکروپمپ در اثر تغییر پارامترهای مختلف، برای روتورهای گوناگون بررسی شد. ابتدا با مقایسه نتایج حاصل با نتایج حالت دائم موجود، نشان داده شد که سرعت خروجی ماکزیمم، در ارتفاعی در حدود  $1/5d$  و دبی خروجی ماکزیمم نیز در ارتفاعی در حدود  $2/3d$  به دست می‌آید. از آنجا که اختلاف تنشهای برشی در بالا و پایین روتور باعث افزایش نیروی خالص اعمال شده به سیال برای حرکت به سمت دهانه خروجی میکروکانال می‌شود، مقدار خارج از مرکزی روتور در اکثر حالت‌های مورد بررسی، برابر مقدار ماکزیمم ( $\varepsilon = 0/95$ ) در نظر گرفته شده است. حداکثر بازده میکروپمپ جریان لزج، در حالت  $\varepsilon$  های تقریباً متوسط که هم سرعت خروجی پمپ زیاد بوده و هم ضریب مومنتم نسبتاً پایین است، رخ می‌دهد.

تاثیر افزایش ارتفاع کانال  $S$  بر تغییرات زمانی سرعت متوسط خروجی میکروپمپ بررسی شد. با افزایش ارتفاع کانال، سرعت متوسط در خروجی میکروکانال  $u^*$  کاهش یافته و در مقابل، زمان رسیدن به حالت دائم افزایش می‌یابد. جریان برای

## واژه نامه

- |                        |               |                             |
|------------------------|---------------|-----------------------------|
| 1. eccentricity        | 4. major grid | 7. fringe point             |
| 2. overset-grid method | 5. minor grid | 8. triangular interpolation |
| 3. structured grid     | 6. hole point | 9. quasi-steady state       |

## مراجع

1. Sen, M., Wajerski, D., and Gad-el-Hak, M., "A Novel Pump for MEMS Applications," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, No. 3, pp. 624–627, 1996.
2. Sharatchandra, M. C., Sen, M., and Gad-el-Hak, M., "Navier-Stokes Simulation of a Novel Viscous Pump," *Transaction of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 372–382, 1997.
3. Decourtye, D., Sen, M., and Gad-el-Hak, M., "Analysis of Viscous Micropumps and Microturbines", *International Journal of CFD*, Vol. 10, pp. 13–25, 1998.
4. Abdelgawad, M., Hassan, I., Esmail, N., "Transient Behavior of the Viscous Micropump", *Microscale Thermophysical Engineering* Vol. 8, pp. 361– 381, 2004.
5. Phutthavong P. and Hassan I., 2004, "Transient performance of flow over a rotating object placed

روتورهای غیردایره‌ای به صورت نوسانی و متناوب است که نوعی حالت شبه‌دائم را برای آنها به وجود می‌آورد. مقایسه مقدار متوسط سرعت خروجی میکروپمپ با روتورهای با سطح مقطعهای مختلف نشان می‌دهد که روتور دایره‌ای، مقدار سرعت خروجی بالاتری نسبت به سایر روتورها فراهم می‌کند. روتورهای مربعی، مستطیلی و بیضوی، به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

تاثیر میزان خارج از مرکزی روتور درون کانال نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان می‌دهد با افزایش  $\varepsilon$ ، مقدار سرعت متوسط در خروجی میکروکانال افزایش یافته و زمان لازم برای رسیدن به حالت دائم چندان دستخوش تغییر قرار نمی‌گیرد.

بررسی رفتار گذرای جریان و نحوه تغییرات خطوط جریان با زمان، برای روتورهای مختلف نیز نشان می‌دهد که برخلاف روتور دایره‌ای که شرایط دائم و مقارنی دارد، روتورهای غیردایره‌ای بسته به موقعیت و شکل روتور، شرایط بسیار متفاوت و تقریباً متناوبی را در زمانهای مختلف تجربه می‌کنند. همچنین، نشان داده شد که با افزایش اختلاف فشار دو سر کانال، یعنی افزایش بار پمپ، سرعت و دبی خروجی در همه موارد کاهش یافته، تا حدی که از یک مقدار مشخص به بعد، منجر به پیدایش یک جریان برگشتی در میکروکانال می‌شود.

- eccentrically inside a microchannel—numerical study”, *Microfluid Nanofluid* Vol. 1, pp. 71–85, 2004.
6. Da Silva, A.K., Kobayashi, M. H., Coimbra, C. F. M., “Optimal Design of Viscous Microscale Pumps for Maximal Mass Flow Rate and Minimum Power Consumption,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 526–536, 2006.
  7. Da Silva, A. K., Kobayashi, M. H., Coimbra, C. F. M., “Optimal Design of Non-Newtonian, Microscale Viscous Pumps for Biomedical Devices,” *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 96, No. 1, pp. 37-47, 2007.
  8. Tuncer, H., “Two-Dimensional Unsteady Navier-Stokes Solution Method with Moving Overset Grid,” *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 3, pp. 471-476, 1997.
  ۹. نصرآزادانی، ع.، رضایی علم، م.، سعیدی، م.س.، ثقفیان، م.،  
 ”بررسی جریان غیردائم در میکروپمپهای جریان لزوج با  
 استفاده از روش برهم نهادن شبکه ها،” مجموعه مقالات  
 یازدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، FD2008\_1495،  
 تهران، خرداد ۱۳۸۷.