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

عباس نصر آزادانی*، محمد رضایی علم**، محمدسعید سعیدی*** و محسن ثقفیان**** دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

چکیدہ –

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

روشهای عددی در مهندسی ، سال ۲۹، شمارهٔ ۲، زمستان ۱۳۸۹ (استقلال)

1

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.

| زمان بدونبعد | t^* | ضريب مومنتم روتور | C_m |
|--|----------------|----------------------------|--------------|
| اندازه گام زمانی (s) | Δt | قطر روتور (m) | d |
| س. ع.ت متع برط دروان مرکز ورم بر (m/s) | \overline{u} | ارتفاع كانال (m) | h |
| سر يت موست دروه مي ترويميې (۵۵۵۰ | <i>u</i> * | مومنتم وارد بر روتور (N.m) | М |
| سرعت متوسط بدونبعد | u | فشار ورودی پمپ (Pa) | P_{in} |
| سرعت سطح روتور (m/s) | U | فشار خروجی پمپ (Pa) | Pout |
| فاصله بین محور کانال و مرکز روتور (m) | y_c | فشار بدونبعد | P^{*} |
| | | افزایش فشار پمپ (Pa) | ΔP |
| خارج از مرکزی روتور | Э | افزايش فشار بدونبعد | ΔP^* |
| راندمان پمپ | η | دبى حجمي بدونبعد | Q |
| لزجت سینماتیکی سیال (m ُ/s) | v | عدد رينولدز | Re |
| سرعت زاویهای استوانه | ω | ارتفاع بدونبعد كانال | S |
| چگالی سیال (^k g/m ^r) | ρ | زمان (٤) | t |

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 پژوه شگران 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 عمدتا به دستگاههای با ابعاد کوچکتر از mm ۱ اطلاق می شود، موارد کاربرد زیادی در عرصههای مختلف دارند که از آن میان، می توان به مواردی

همچون دستگاههای میکروکولینگ در تجهیزات الکترونیک و میکروتراشهها، دستگاههای طیفسنجی جرمی و میکروپیشرانهها در کاوشهای فضایی و نیز عرصههای مختلف پزشکی و داروسازی اشاره کرد. به همین دلیل، طیف گستردهای 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 تازهای 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 دایرهای، عمود بر محور

کانال و به صورت خارج از مرکز، با سرعت ثابت دوران می کند. دوران روتور که توسط یک موتور خارجی صورت می گیرد، باعث ایجاد یک نیروی خالص برای پمپ کردن سیال به سمت خروجی کانال می شود. 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 انعطاف پذیری بسیار بالایی نیز در کاربردهای متنوع دارد، به گونهای که می توان 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 شبیه سازی 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 ۱/۰ را نیز مورد مطالعه قرار دادند.

دی کورتیه و همکارانش [۳] در سال ۱۹۹۸، با در نظر گرفتن اثر حضور دیواره های 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 ادامهٔ 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 جریان لزج (با کانالهای ا- 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



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 می شود. 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 جاروب شده توسط همه روتورها یکسان است. همچنین، قطر کوچکتر روتور بیضوی، برابر D^0 و ضلع کوچکتر روتور مستطیلی نیز $\frac{1}{2}$ ضلع بزرگتر آن در نظر گرفته شده است.

رو تورها در داخل کانالی به ارتفاع h قرار دارند، به گونهای که فاصله مرکز رو تور تا محور کانال براب y است. رو تور، در لحظه • = t، از حالت سکون، با سرعت ثابت 0 به صورت ساعتگرد شروع به دوران می کند. در اینجا، تنها به منظور مقایسه با نتایج موجود [۵]، موقعیت اولیه رو تورها بدین گونه در نظر گرفته شده که رو تور مربعی، از حالت عمودی (شبیه لوزی)

شروع به دوران می کند؛ 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 کـه در مطالعـات عبـدالجواد و همکـارانش [۴] و پوتهاونگ و حسن [۵] در نظر گرفته شده، مهمترین پارامترهای هندسی بیبعد مسئله به صورت زیر تعریف می شوند:

| $S = \frac{h}{d}$ | ارتفاع كانال | (۱) |
|---|---------------------|-----|
| $\varepsilon = \frac{y_c}{\frac{h}{2} - \frac{d}{2}}$ | خارج از مرکزی روتور | (7) |

بر طبق این تعریف، ٤ نشاندهنده میزان خارج از مرکزی (ووتور در کانال است، به گونهای که • = ٤، مربوط به حالتی است که مرکز روتور بر روی محور کانال قرار گرفته و ۱ = ٤ نیز مربوط به حالتی است که روتور، به دیواره پایینی کانال چسبیده باشد [۴ و ۵]. تاثیر ٤ بدین صورت است که با اختلاف تنشهای برشی اعمال شده روی سطوح بالا و پایین روتور، باعث ایجاد نیروی خالص وارد به سیال می شود.

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 می شود:

 $Re = \frac{Ud}{v} = \frac{\omega d^2}{2v}$ (۳) که در آن، ۷/۲ $U = \omega d/7$ ، سرعت سطح برای روتور دایرهای و سرعت گوشهها برای روتورهای غیردایرهای است. به همین ترتیب، سرعت متوسط بی بعد جریان در داخل کانال به صورت زیر تعریف می شود:

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

روشهای عددی در مهندسی ، سال ۲۹، شمارهٔ ۲، زمستان ۱۳۸۹ (استقلال)

| | | | | | | | | | _ | _ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | _ | | | | | | _ |
|---|-------|---------|----------|----|----|---|-----|-----|----|-----------|---|-----|-----|-----|------|-------------|------|-----|----|-----|-----|----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|-----------|------|-----|------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|----|----|---|---|---|----------|----------|-----|----------|-----|-----|---|-----|---|---|---|
| | | | | | | | | п | п | л | | п | п | | | | | | | | | | | | | п | Т | | Т | | | п | | | п | | | п | | т | п | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | п | п | | п | п | | | | | | | | | | | | | п | | | | | | п | | | п | | | п | | | п | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | п | п | | | | | | | | | | | | | | П | | п | - | | | | | п | | | | | | п | | | | г | | | | | | | - | | - | | | | | | |
| | | | | | | | | ц | ш | | | ш | ш | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ш | | | ш | | | ш | | | ш | т. | • | | | ٠ | | | | - | | ٠ | 1 | | | | |
| _ | - | | | | ~ | | | - E | п | л | | п | п | | | | | | | | | | | | | | | | - | | | п | | | п | | | п | | | п | г. | • | / | 0 | 1 | 0 | r | . (| Ι. | - r | 1. | 1 | | | | |
| _ | - N / | ~ ~ | | • | ۰. | | А | - E | п | п | | п | п | | | | | | 1 | 1.1 | | | | 11 | | - 1 | | | | T/I | | | | | п | | | п | | | п | т. | 13 | 1 | а | | U | 1 | | U | 11 | 19 | | | | | |
| _ | IV | 10 |) [| ۰. | т | | (| - E | п | п | | п | п | п | Т | | F7. | | | 11 | | | | | | | - | | Т | 11 | | ы | | п | п | Т | | п | п | Т | п | т. | | - | - | J | ~ | - | | - | - | _ | | | | | |
| | ÷ | | | _ | | | ~ | · E | п | | | п | п | | | 2 | | | | | | | | | | | - | | | ы | | L1 | | | ш | | | ш | | | ш | | | | | | | | | | | | | | _ | | |
| | | | | | | | | | п | л | | п | п | | Т. | | | Ŀт | | | ιT. | | | | | | | | | ы | | 11 | | | <u>т</u> 1 | | | п | | | п | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | БĽ | п | п | п | | п | п | | | | | ы | | | E. | | | | | | | | 1 | | | 8 | | | 5.1 | | | п | | | п | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | п | п | | п | п | 14 | | 20 | Э | Б | | | | | | | 86 | | 36 | | лC | ы | | П | С | 1 | 11 | 2.5 | | п | | т | п | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | ы | п | | | ш | | | 1. | | | ю | | ю | | - | | 10 | | ш | 12 | - | 4 | | | | | | 11 | 5.0 | 5 | ш | | | ш | | | | | | | | | _ | | | | | _ | | |
| | | | | | | | | п | п | т | | п | U | | 5.5 | | | 1 | | | | | | | | - | T. | | | | | 1.1 | | | 1. | 515 | | ч | | | п | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | п | | | | 14 | | 10 | 72 | | | - | 17 | | 23 | | | | в | | Ξ. | | | | | | | . 44 | | L. | Ы. | | - | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| _ | | | | | | | LΕ | 1 T | ш | ш | | | 0 | J | 10 | 1.5 | - | 1 | | | | | | - | - | 8 | | | 1 | 23 | | 2.2 | - 2 | 1 | 12 | 303 | 1 | 11 | U | | LT | ш | | _ | | | | | _ | _ | 1 | _ | _ | | _ | _ | |
| | | | | | | | LE | LТ | ш | л | | | | 11 | 70 | π. | | | | | | | | | 50 | | 2 | | | | Ξ. | | | n t | л | | 6.6 | LT | ы | 1 | LT | ш | | _ | | | 1 | | -1 | _ | | _ | _ | | _ | _ | |
| | | | | | | | LГ | IT | п | л | | | | 11 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | D) | 10 | 10 | | | 11 | Т | LT | п | | | | | | | | | | | _ | | | _ | |
| | | | | | | | П | TT. | п | ш | | 1.0 | 1 | 2 | 10 | 211 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ĿΤ | T. | | LΤ | П | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | ГГ | IT | п | T | | | Гĩ | 71 | 11 | 111 | | -1 | | П | | п | | П | | п | | П | | П | | Г | | ы | | 101 | 10 | τT | П | ΥC. | IT | П | | | | | | | | | | - 1 | _ | | _ | _ | |
| | | | T - | | | | гГ | T | п | T | 1 | ГГ | | T1 | 5.1 | | | -1 | | П | | П | | Г | | П | | П | | П | | | | M | | | | | TŇ | х | T | П | | | | | T | - | | _ | | - | _ | T - | _ | _ | |
| | | | | | | | п | п | п | J | | 1.1 | CC | | | 811 | | - 1 | | | | | | п | | п | т | п | т | п | | | | | | 10 | | Т | ъ | Т | п | п | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | _ | | | | п | п | п | 777 | | П | 1.1 | 7.1 | 11 | 010 | | - 1 | | П | | п | | п | т | п | т | П | т | п | | Т. | | | nnr | 111 | 2.1 | ΠĒ | п | Т | П | П | т | т | | | | т | т | | | | | | | | |
| | | | | | | | П | п | п | 77 | 1 | | п | 10 | 16 | 100 | 00 | 10 | | | | | | п | | п | т | | т | п | | I I | 111 | 00 | 23 | 101 | ΠD | | п | т | п | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | п | п | п | 18 | | | п | п | 101 | 10 | 66 | 11 | | п | | п | | п | | п | т | п | т | п | | I I | | ПĽ | ю | | ПΓ | | 17 | | т | п | п | т | | | | г | Т | | | | | | | | |
| | | | | | | | п | п | п | | Т | П | | - | | 10 | | 10 | | п | | п | | п | | п | т | п | т | п | | ТI | 100 | m | 103 | 83 | 86 | П | ш | Т | ш | п | | т | | | | т | т | | | | | | | | |
| | | | _ | | | | п | п | П | ID | П | ΠГ | m | n | m | ПĽ | | 11 | | п | | п | | п | т | п | т | п | т | п | | Т. 1 | | | 101 | nn | nr | п | тп | Т | ш | п | п | т | | | | г | т | | | | | | | | |
| | | | | | | | п | п | П | | - | ПΓ | - | | 10 | 10 | | 10 | | П | | п | | п | Т | п | т | П | т | П | | ΤI | 1111 | 11 | TOT | 17 | nr. | 17 | ТП | т | ш | П | Т | т | | | | Т | т | | | | | | | | |
| | | _ | _ | | | | п | п | П | ίπ. | | | | | | | | - 1 | | П | | п | | п | | п | т | п | т | п | | Ť I | 111 | | | 11 | | I II | TH | т | ΠT | п | | | | | - | | т | | | | | | | | |
| | | | | | | | H | н | п | I | | TT- | m | п | 1111 | 111 | | 1 | | П | | п | | п | | п | T | п | T | п | | t I | | 11 | 111 | 11 | | m | 111 | т | 11 | п | | | | | - | | - | - | | | | | _ | | |
| | | | _ | | | | п | п | п | ID | т | ПΕ | | - | 100 | îΠ | n li | 10 | | П | | п | | п | т | п | т | п | т | п | | ТĽ | 1111 | n. | 111 | 83 | | п | тп | | IT | п | т | т | | | | Т | т | | | | | | | | |
| | | | | | | | п | п | п | IB. | | TT. | п | n | 101 | nn | | 10 | | П | | п | | п | т | п | т | П | т | П | | T i | | m | 101 | | пο | | 11 | 15 | т | П | т | т | | | | Т | т | | | | | | | | |
| | | _ | _ | | | | п | п | п | T | | n | 17 | 17 | 1.1 | 11 | 000 | 11 | | П | | п | | п | | п | т | п | т | п | | T I | 1111 | 017 | | | пп | nr | 11 | 71 | т | п | | т | | | | | т | | | | | | | | |
| | | | — | | | | ПT | T | П | 11 | | | П. | 11 | | | | - 1 | | П | | Т | | Г | | П | | П | | П | | Т | | | 170 | 117 | | | | T | TT. | П | | | | | - | - | - | _ | | - | _ | T | _ | _ | |
| | | | — | | | T | ПŤ | TT | πŤ | TIT | | 11 | гΤ | ГŤ | ΠĽ | | | - 1 | | П | | П | | П | | П | | П | | П | | Т | | | | | | VT | 5 | T | T | П | | | | | — | T | - | - | | - | - | T | - | - | |
| | | | — | | | T | T | ΠŤ | πt | T | | ПŤ | n | п | 10 | F 10 | | - 1 | | П | | т | | П | | П | | П | | П | | Т | | 71 | 1 | 97 | | 11 | T/I | 7 | ΠŤ | П | Т | | | | | Т | - | | | | | | | | |
| | | | | | | | п | п | п | т | т | | 17 | 11 | | 111 | | - 1 | | | | | | п | | п | т | п | т | п | | Ť. | | m | 17 | 107 | 20 | - | 71 | 70 | п | п | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | _ | T | | | | ПT | П | П | T | | | īΤ | TT | ШŬ | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | τt | | | П | П | | | | | - | - | | _ | | - | _ | T | _ | _ | |
| | | | — | | | T | ПŤ | TT | πŤ | T | | 11 | TÎ | | 1 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | 11 | 17 | | 17 | Ē | т | TT | П | | | | | — | T | - | _ | | - | _ | T | _ | _ | |
| | | | — | | | T | T | ПŤ | πt | T | | | M | T, | 10 | 10 | | | Ξ. | | | | | | 88 | | | | | | - | | | ПÌ | 171 | 111 | 77 | 17 | 71 | T | ΠŤ | П | Т | | | | | Т | - | | | | | T | | | |
| | | | - | | | | rt- | T | T | πt | | πŤ | D) | 1 | | 10 | | | | 1 | | | E. | | | E Î | ÷ | | - | F i | | 11 | | | 11 | 717 | nt. | 11 | П | + | T | П | | + | | | - | - | - | | | - | | - | | | |
| _ | | | | | | | | | - | - | | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 22 | | 22 | | + | - | | | - | | | | | - | | | _ | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 | | | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

شکل ۲ – شبکههای اصلی و فرعی به صورت برهمنهاده

در نتیجه، دبی خروجی کانال نیز به صورت بی بعد زیر خواهـد بود:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{u}^* \mathbf{S} \tag{(a)}$$

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 بی بعد *ΔP که به عنوان ورودی مسئله داده می شود، از معادله زیر محاسبه می شود:

$$\Delta P^* = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho \frac{v^2}{d^2}} \tag{(5)}$$

که در آن، p و v به ترتیب، چگالی و لزجت سینماتیکی سیال است. فشار در خروجی *P_{out} ه*مواره بزرگتر از فشار در ورودی است. زمان بدونبعد ^{*}t در این مـسئله، بـه صـورت زیـر تعریـف

مىشود:

$$t^* = \frac{t\omega}{2\pi} \tag{V}$$

با توجه به این تعریف، دنبال کردن موقعیت زاویـهای روتورهـا در زمانهای مختلف سادهتر است؛ به عنوان مثال، 1.5= *t نشان میدهد که تا این لحظه، روتور ۱٫۵ دور چرخیده است.

در اینجا، مقادیر S، ع، Re و ^{*}ΔP، به عنوان پارامترهای ورودی مسئله و سایر مقادیر، خروجیهای مسئلهاند. محدوده مقادیر این پارامترها، از نظر کمی، با توجه به کاربرد عمده که معمولا برای این نوع میکروپمپ وجود دارد، در حدود چند ده

میکرون برای ارتفاع کانال ۵ چند صد میکرون برای پهنای آن، چند ده *N/m^۲* برای اختلاف فشار *Δ* در دو سر کانال و در حدود چند ده *rad/s* برای سرعت زاویه ای روتور ۵ است [۱ و ۳]. با این حال، همان طور که اشاره شد، در این مقاله، تمامی پارامترها به صورت کاملا بی بعد بررسی می شود.

در ادامه، با توضیح روش حل به کار رفته، معادلات حـاکم 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^۲ استفاده شده است. در این روش، از دو شبکه سازمانیافته^۳ 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 برهم نهادن شبکهها، همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده، از دو شبکه برهم نهاده شده برای بررسی جریان حول اجسام متحرک استفاده می شود. با این کار، علاوه بر اجتناب از تولید شبکه در هر گام زمانی، می توان شبکههایی را به صورت مستقل، منطبق به بدنه و سازمان یافته تولید کرد که امکان بررسی جریان حول اجسام پیچیده را نیز فراهم می سازد [۸]. در این روش، برای حل این نوع مسئله، از یک



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

شبکه ساده مستطیلی از نوع H موسوم به شبکه اصلی[†] استفاده می شود که کل محدوده محاسباتی (فضای داخلی کانال) را می پوشاند. تعدادی شبکه منطبق به بدنه (بسته به تعداد اجسام متحرک)، به نام شبکه های فرعی⁶ نیز حول اجسام ایجاد می شود. شبکه های فرعی، قابلیت حرکت نسبت به یکدیگر و نسبت به شبکه اصلی را دارا هستند. معادلات جریان، در هر یک از این شبکه ها به طور مستقل و با شرایط مرزی خاص خود حل می شوند که اطلاعات، بین دو شبکه، در نقاط خاصی مبادله می شود [۸].

در این روش، همان طور که در شکل (۳) نـشان داده شـده، به جز نقاطی که معادلات جریان در آنها حـل مـیشـود، نقـاط خاصی وجود دارد که به آن، نقاط خالی² و نقاط پر^۷ می گوینـد. نقاطی از شبکه اصلی (یا شبکههای فرعـی دیگـر) کـه در زیـر جسم قرار می گیرند، جزو نقاط خالی در نظر گرفتـه شـده و از محدوده محاسباتی خارج می شوند. نقاطی از شـبکه فرعـی کـه خارج از محدوده میکروکانال قرار می گیرند نیز جزو نقاط خالی محسوب می شوند.

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

می شوند. 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 فرعی اند.

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 می شود)، مشخص شود. به عنوان مثال، برای پیدا کردن نقاط (سلول) احاطه کننده نقطه Pدر شکل (۴)، ابتدا از یک نقطه دلخواه مانند $G_{i,j}$ که در شکل، با دایره توپر نشان داده شده، شروع می کنیم. برای بررسی وجود نقطه P درون سلول پیرامون نقطه $G_{i,j}$ ، چهار مثلث متشکل از نقاط $G_{i,j}$ و $G_{i,j\pm 1}$ و $G_{i,j\pm 1}$ را در نظر می گیریم. مختصات هر نقطه داخل هر یک از این مثلثها را می توان برحسب مختصات سه رأس آن به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{p} \\ \mathbf{y}_{p} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{i,j} & \mathbf{x}_{i\pm 1,j} & \mathbf{x}_{i,j+1} \\ \mathbf{y}_{i,j} & \mathbf{y}_{i\pm 1,j} & \mathbf{y}_{i,j+1} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$
(A)

که با حل دستگاه معادلات فوق، α، β و γ به دست می آیند. 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 می شود. اما در غیر این صورت، همانند شکل (۴) با توجه به وضعیت خط واصل بین



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

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

در کار حاضر، از یک روش میانیابی مبتنی بر مقادیر α، β و γ که از جایابی نقطه P در بالا به دست آمده، موسوم به میانیابی مثلثی[^] استفاده می شود [۸]. معادله مورد استفاده برای میانیابی به صورت زیر است:

 $\phi_p = \alpha \phi_{i,j} + \beta \phi_{i\pm 1j} + \lambda \phi_{i,j\pm 1} \tag{9}$

که در آن، ϕ کمیت مورد نظر برای میانیابی در شبکه مبدا یا مقصد است. بایستی اشاره نمود که در میانیابی مولفه های 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 میانیابی از شبکه اصلی به دست آمده، برابر \mathbf{u} و سرعت جسم نیز برابر \mathbf{u} باشد، با توجه به این که دستگاه مختصات، با سرعت جسم حرکت می کند، سرعت گره مورد نظر برابر $\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2$

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 می شود. سپس، از

طریق الگوریتم جستجو، گرههای احاطه کننده نقاط پر مربوط به شبکه اصلی در شبکه فرعی و بالعکس، مشخص شده و با میانیابی 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 میانیابی 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 براورده شود. برای گام زمانی جدید، همین روند، با تعیین موقعیت جدید مرکز روتور، عینا تکرار میشود [۸].

۳-۱- معادلات حاكم

در این مسئله، معادلات جریان آرام، به صورت دوبعدی، تراکمناپذیر و بر مبنای روش حجم محدود حل می شود. همان طور که قبلا نیز اشاره شد، علاوه بر استناد به نتایج مطالعات دی کورتیه و همکارانش [۳] در خصوص اختلاف شرایط جریان در حالت سهبعدی، با در نظر گرفتن ابعاد هندسی مسئله نیز می توان 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 می توان رفتار جریان سهبعدی را با دقت خوبی، به صورت مدل جریان دوبعدی که یک مقطع طولی را در بر می گیرد، مطالعه و بررسی کرد.

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

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

که برای مثال، در معادله مومنتم، Γ_{ϕ} همان ضریب لزجت µ و متغیر \$ بیانگر مولفه های سرعت است. جمله S نیز جمله چـ شمه است که در معادله مومنتم، گرادیان فشار را شامل می شود؛ در ایـن مسئله، چون شبکه فرعی، با سـرعت زاویـهای ثابـت مـیچرخـد، بایستی برای شبکه فرعی علاوه بر گرادیان فشار، نیـروی گریـز از مرکز و نیروی ناشی از شتاب کریولیس را نیز اضافه کرد.

همچنین، در اینجا، برای گسسته سازی معادلات دیفرانسیل از روش حجم محدود، برای حل میدان جریان از الگوریتم سیمپل- سی، برای محاسبه جملات جابه جایی 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 گونه ای است که باقیمانده ها در هر دو شبکه اصلی و فرعی، کمتر از ^{۵-} ۱ شود.

۳- ۲- شرایط مرزی

با توجه به اینکه در روش برهم نهادن شبکهها، معادلات در شبکههای مختلف، به صورت مستقل حل می شوند، 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. همان طور که قبلا 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 ($\circ = V$ و $0 = x \delta / u \delta$) در مرزهای ورودی و خروجی کانال استفاده را از طریق میانیابی از شبکه فرعی دریافت می کنند و فشار نیز با استفاده از شرط مرزی نیومن به دست می آید که به عنوان شرط مرزی در شبکه اصلی به کار می روند.

در شبکه فرعی نیز از شرط عدم لغزش بر روی سطح روتـور استفاده شده و گرههای واقع بر مرز خـارجی (نقـاط پـر) در ایـن

شبکه، مولفه های سرعت را از طریق میانیابی، از شبکه اصلی دریافت می کنند. مقادیر فشار نیز همانند شبکه اصلی، از طریق شرط مرزی نیومن مشخص می شود. نکته قابل توجه در اینجا، این است که با در نظر گرفتن حالتی مانند زمانی که عمق میکروکانال ۲۰ میکرون و ۹۵٫۰ = ٤ 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، 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 نوان با

۴- نتايج

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 کـه جریـان در نواحی اطراف استوانه، از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و عمده تغییرات شرایط جریان در این نواحی صورت می گیرد، شبکههای مورد استفاده به گونهای ساخته شده که در اطراف استوانه و نقاط حساس تـراکم بیـشتری داشـته و در قـسمتهایی مانند ورودی و خروجی کانال که شرایط جریان، به صورت کاملا توسعهیافته در میآید، از حجم معیارهای بزرگتری استفاده میشود. شبکه فرعی اطراف استوانه که از نوع 0 است نیـز بـه صورتی است که در اطراف سطح استوانه ریزتر بوده و به مرور، با حرکت در امتداد شعاع استوانه از تراکم آن کاسته می شود. چهار ترکیب مختلف از شبکههای اصلی و فرعی بـرای شـرایط و ۲ = $\Delta P^* = 1$ و Re = ۱، $\varepsilon = \circ/4$ بررسے شدہ کے Re = ۱، ε

| | | | • | , | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------|------------------------|--|----------------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| اصلی و فرعی | تأثير اندازه شبكههاى | بررسى | بررسی تأثیر گام زمانی برای شبکههایی با اندازه ۵۰ × ۲۵۰ و ۳۰ × ۸۰ | | | | | | | | | | | | |
| اندازه شبکه اصلی | اندازه شبکه فرعی | u [*] | Δt^* | u [*] | زمان رسیدن به ۹۹٪ مقدار سرعت در حالت دائم | | | | | | | | | | |
| 10° × 7° | 40 × 10 | • _/ • VVA • | ٥٫٥٥٥١ | °,° 4974 | 0/40017 | | | | | | | | | | |
| ۲۰۰ × ۳۰ | 9° × 7° | ۰٬۰۵۱۷۸ | ٥٬٠٠٠۵ | •,•4449 | ۰/ <i>۱۳۶</i> ۰۲ | | | | | | | | | | |
| ۲۵۰ × ۵۰ | $\wedge \circ \times "$ ° | •,•۴٩۴٩ | ۰٬۰۰۱ | °/°4901 | ۰/۱۳۵۹۶ | | | | | | | | | | |
| ۳۰۰ × ۶۰ | 100 × 40 | ۰/۰۴۹۵۶ | •,••۵ | •,•F90V | •/1770m | | | | | | | | | | |

جدول ۱ – تاثیر اندازه شبکههای اصلی و فرعی و گام زمانی مورد استفاده و مقایسه مقادیر حاصل



.($\Delta P^* = 1$ و Re = 1 , $\varepsilon = \circ/4$, $S = 1/\Delta$).

 $(\varepsilon = \circ / \mathfrak{q}, \Delta P^* = \circ / \mathfrak{d}, Re = \circ / \mathfrak{d})$

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، عمدتا بر روی جریان حالت دائم در حضور روتور دایرهای صورت گرفته است [۱ و ۲]. به همین دلیل، به منظور براورد 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 روتـور دایـرهای، در حالـت دائـم نشان داده شده است. این نتایج که از بررسی ۱۰ حالت مختلف نتایج حاصل از به کارگیری ایس 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 ۵۰ × ۲۵۰ و شبکه فرعی با اندازه ۳۰ × ۸۰ تا علاوه برداشتن دقت کافی در براورد مقادیر پارامترهای مورد نظر، هزینههای محاسباتی را نیبز 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 به درستی مشاهده کرد، مقدار x^{3-} ۰۱ × ۵ = t برای گام زمانی

روشهای عددی در مهندسی ، سال ۲۹، شمارهٔ ۲، زمستان ۱۳۸۹ (استقلال)



شکل ۶ – خطوط جریان در حالت دائم برای ارتفاعهای مختلف کانال با روتور دایرهای (۹۵٪ = E = ۱، ۳ = ۳ و ۲ ه (*ΔP** = ۰)

بسیار کم که 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 می دهد. همان طور که مشاهده می شود، در ارتفاعهای کم، دو گردابه، به صورت کاملا مجزا و متقارن، در از ۱٫۲ = ۵ تا ۳٫۵ = ۵ به دست آمده، با نتایج تجربی سن و همکارانش [۱] و نیز نتایج عددی شارات چاندرا 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 می شود، مقدار سرعت متوسط خروجی، در میکروکانالی با ارتفاع تقریبا ۱٫۵۵ به ماکزیمم مقدار خود می رسد؛ در حالی که مقدار دبی ماکزیمم، مربوط به کانالی با ارتفاع حدود ۲٫۳۵ است. با افزایش و کاهش ارتفاع کانال از این مقادیر، سرعت متوسط و در نتیجه، دبی خروجی میکروپمپ کاهش می یابد. در واقع، در مقادیر



بالای استوانه و در دو سمت آن تشکیل می شود. این گردابه ها، با افزایش ارتفاع کانال با یکدیگر ادغام شده و یک گردابه بزرگ را به وجود می آورند. هر یک از این گردابهها، به صورت پادساعتگرد و در خلاف جهت جریان حرکت می کنند. وجود همین گردابهها، باعث کاهش جریان و کم شدن میزان سرعت و دبی خروجی می شود. مقدار ماکزیمم دبی سیال در میکروپمپ جریان لزج که در شکل (۵) دیده می شود، 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 می گیرد، مشخص می شود.

تاثیر میزان خارج از مرکزی روتور 3 بر روی سرعت متوسط سیال در حالت دائم، در شکل (۷) نشان داده شده است. این نتایج، مربوط به روتور دایرهای، در کانالهایی با دو ارتفاع مختلف میباشد که مقدار نهایی سرعت (پس از رسیدن به حالت دائم) در آن، با نتایج عددی شاراتچاندرا و همکارانش [۲] و عبدالجواد و همکارانش [۴] مقایسه شده که تطابق بسیار خوبی را نشان میدهد. با توجه به روند افزایش تقریبا خطی سرعت با خارج از مرکزی روتور، میتوان چنین گفت که سرعت جریان، در یک کانال مشخص (۶ ثابت)، در مقدار ٤ ماکزیمم و در یک موقعیت ثابت روتور (٤ ثابت)، برای

کانالی با ارتفاع حدود ۱/۵ برابر قطر استوانه، به مقدار حداکثر خود می رسد [۹]. نمودار تغییرات دبی حجمی پمپ بر حسب فشار بدون بعد اعمالی به دو سر میکروکانال یا همان بار پمپ (*P – Q)، 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، می توان بازده میکروپمپ را به صورت نسبت افزایش انرژی جریان به انرژی مکانیکی اعمال شده به میکروپمپ تعریف کرد. بدین ترتیب، خواهیم داشت:

$$n = \frac{\frac{m \Delta P}{\rho}}{\rho} \tag{11}$$

Μω

که می توان به صورت بدون بعد زیر نیز نوشت:

$$\eta = \frac{\Delta P^* u^* S}{C_m R e^2}$$
(17)

که در آن:

$$C_{\rm m} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 d^2} \tag{17}$$

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 ٤ ماکزیمم، حداکثر مقدار را داشته باشد؛ اما همان طور که ملاحظه می شود، راندمان با ضریب مومنتم روتور نسبت عکس دارد. بنابراین، اگرچه در 3 های کم، مقدار سرعت کم است، اما باید به مقدار کم ضریب مومنتم *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 می شود. به همین ترتیب، زمانی بالا بوده و باعث کاهش مقدار بازده پمپ می شود. در نتیجه، حداکثر بازده میکروپمپ جریان لزج، در حالت ٤ های تقریبا



شکل ۸ – الف) منحنی تغییرات دبی حجمی پمپ برحسب تغییرات بار پمپ به صورت بدونبعد (۵ / ۰ = e ، ۵ ، ۳۰ = ۶) ب) منحنی راندمان عملکرد میکروپمپ برای حالتهای مختلف برای روتور دایرهای (۵ / ۱ = S ، ۱ = ۱)

متوسط که هم سرعت خروجی پمپ زیاد بوده و هم ضریب مومنتم نسبتا 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، تقریبا 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 بالای کانال افزایش یافته و در نتیجه، تنش برشی اعمالشده به سیال در سطح بالایی روتور کاهش مییابد. به همین ترتیب، با زیاد شدن فاصله از دیواره بالای 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 تقریبا پایدار (شبهدائم)^۹ میرسد که در این حالت، جریان بنا به شکل هندسی روتور، حالت نوسانی دارد [۵]. این نوسانات،

بدین دلیل رخ می دهد که در لحظه های مختلف، ناحیه های مختلفی از روتور در مجاورت دیواره بالایی کانال قرار می گیرد. زمانی که گوشههای روتور در مجاورت دیواره کانال قرار می گیرد، به دلیل افزایش تنش برشی اعمال شده به سیال، سرعت خروجی در میکروکانال افزایش می یابد. اما پس از آن، چون فاصله بین دیواره کانال و سطح روتـور مجـدداً افـزایش می یابد، سرعت سیال تا زمانی که سطح تخت روتور، موازی محور کانال قرار گیرد که در این حالت، مقدار سرعت جریان مینیمم خواهد بود، کم می شود. این نوسانات، در طول زمان، به طور متناوب تکرار می شود. در مورد روتور مربعی، از آنجا که دارای هندسه تقریبا یکنواختی است، دامنه نوسانات، کمتـر و جریان آرامتر است. اما هرچه از یکنواختی هندسی سطح مقطع روتور كاسته 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 می گیرد، سطوح تخت بزرگتر در روتور مستطیلی و سطح هموار روتور بیضوی می توانند حجم سیال بیشتری را نسبت به ضلع کوچکتر مستطیل و یا روتور مربعی به سمت خروجی کانال هل بدهند. به همین دلیـل، زمـانی کـه ضـلع بزرگتـر روتـور



شکل ۹ – تغییرات زمانی سرعت برحسب ارتفاعهای مختلف کانال (۹ – $Re^* = 0$ ، $\Delta P^* = 0$ ، $\Delta P^* = 0$



شکل ۱۰ – تغییرات متوسط سرعت خروجی در ارتفاعهای مختلف کانال، برای روتورهای مختلف (Re = ۱، ۹۰ = ۵۲، ۵۴/۰۰ = ۵)

مستطیلی در حالت تقریبا عمودی قرار میگیرد، با هل دادن حجم سیال بیشتر به سـمت دهانـه خروجی، باعـث افـزایش بیشتری در سرعت و دبی خروجی میشود [۵].

با این حال، همان طور که در شکل (۱۰) نـشان داده شـده، مقدار متوسط جریان برای روتور دایرهای بیـشتر از روتورهای مربعی، مـستطیلی و بیـضوی است. مقادیر متوسط بـرای روتورهای غیردایرهای، از مقدار میانگین بین ماکزیمم و مینیمم سرعت خروجی به دست آمده است.

همان طور که قبلا 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 می شود. در شکل (۱۱)، تغییرات زمانی *u برحسب خارج از مرکزی روتور ٤ نشان داده شده است. برای هر چهار حالت، با افزایش مقدار ٤، مقدار *u افزایش مییابد، در حالی که زمان رسیدن به حالت پایدار، چندان دستخوش تغییر قرار نمی گیرد. هرچه از میزان خارج از مرکزی روتور کاسته می شود، به دلیل تقارن بیشتر جریان در داخل کانال، از مقدار خالص جریان و نیز

روشهای عددی در مهندسی ، سال ۲۹، شمارهٔ ۲، زمستان ۱۳۸۹ (استقلال)



شکل ۱۱ – تاثیر خارج از مرکزی روتور بر سرعت متوسط در میکروپمپ ($R = 1, \Delta$ = $s = 1, \Delta$) شکل ۱۱ – تاثیر خارج از مرکزی روتور بر سرعت متوسط در میکروپمپ

نیروی محرکه آن کاسته می شود. در واقع، در حالت • = ٤، 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 ٤، به دلیل فواصل نامساوی بین روتور و دیواره های کانال، تنشهای برشی نامساوی بر روی سطوح بالا و پایین به وجود آمده و جریان خالص افزایش می یابد.

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 می آید که با گذشت زمان، از سطح استوانه جدا شده و به سمت دیواره بالایی حرکت می کنند. در حالت نهایی (دائم)، دو گردابه

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، ناپدید شده و گردابه بالای روتور، ضمن حرکت به سمت 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



شکل ۱۲ – میدان جریان در زمانهای مختلف در میکروپمپهای مختلف (۹۰ = ${^{\rm Re}}$ ، ۱۱ – د ${^{\rm Re}}$ = ۹، ($\Delta P^* = 3$)



شکل ۱۳ – تاثیر میزان بار پمپ بر سرعت متوسط در میکروپمپ (۲/۰ = ۶، Re = ۱، ۵) (ε = ۰/۹۵)

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. همان طور که مشاهده می شود، در همه موارد، افزایش بار پمپ، باعث کاهش مقدار سرعت و دبی خروجی می شود. این کاهش سرعت، تا حدی ادامه می یابد که با رسیدن بار پمپ به مقدار مشخصی، درون کانال جریان برگشتی ایجاد شد و در نتیجه، مقدار متوسط سرعت در خروجی، منفی می شود. می شود. در مورد روتورهای مستطیلی و بیضوی که از حالت افقی شروع به حرکت میکنند، ابتدا دو گردابه بزرگ در دو طرف روتور تشکیل می گردد که به تدریج، با چرخش روتور، گرداب هسمت راست ناپدید شده و گردابه سمت چپ، به سمت بالای روتور حرکت میکند. یک گردابه کوچک نیز زیر روتور تشکیل می شود. وقتی روتور در حالت عمودی قرار گرفت، برای روتور بیضوی، یک گردابه واحد در بالای روتور به وجود می آید؛ در حالی که برای روتور مستطیلی، دو گرداب کوچک در بالا و دو گرداب کوچکتر نیز در زیر آن به وجود می آید. این گرداب ها با ادام چرخش روتور، با یکدیگر ترکیب شده و گرداب بزرگتری را در

۵- جمعبندی

در این مقاله، با استفاده از روش برهمنهادن شبکهها، جریان دوبعدی نادائم در میکروپمپهای جریان لزج، در حضور روتورهایی 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 ۱٬۵d و دبی خروجی ماکزیمم نیز در ارتفاعی در حدود ۲٬۳۵ به دست می آید. از آنجا که اختلاف تنشهای برشی در بالا و پایین روتور باعث افزایش نیروی خالص اعمالشده به سیال برای حرکت به سمت دهانـه خروجـی میکروکانـال مـیشـود، مقدار خارج از مرکزی روتور در اکثر حالتهای مورد بررسی، برابر مقدار ماکزیمم (۹۵/۰=ع) در نظر گرفته شده است. حداکثر بازده میکرویمپ جریان لزج، در حالت ٤ های تقریبا متوسط که هم سرعت خروجی پمپ زیاد بوده و هم ضریب مومنتم نسبتا پايين است، رخ ميدهد.

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 می یابد. جریان برای

واژه نامه

- 7. fringe point
- 8. triangular interpolation
- 9. quasi-steady state
- مراجع

روتورهای غیردایرهای به صورت نوسانی و متناوب است که نوعی حالت شبهدائم را برای آنها به وجود می آورد. مقایسه مقدار متوسط سرعت خروجی میکروپمپ با روتورهای با سطح مقطعهای مختلف نشان می دهد که روتور دایرهای، مقدار سرعت خروجی بالاتری نسبت به سایر روتورها فراهم می کند. 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 می دهد با افزایش ٤، مقدار سرعت متوسط در خروجی میکروکانال افزایش یافته و زمان لازم برای رسیدن به حالت دائم چندان دستخوش تغییر قرار نمی گیرد.

بررسی رفتار گذرای جریان و نحوه تغییرات خطوط جریان با زمان، برای روتورهای مختلف نیز نشان می دهد که برخلاف روتور دایرهای که شرایط دائم و متقارنی دارد، روتورهای غیردایرهای بسته به موقعیت و شکل روتور، شرایط بسیار متفاوت و تقریبا متناوبی را در زمانهای مختلف تجربه می کنند. 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 می شود.

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,

4. major grid

5. minor grid

6. hole point

- pp. 624–627, 1996.
 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

1. eccentricity

3. structured grid

2. overset-grid method

eccentrically inside a microchannel—numerical study", *Microfluid Nanofluid* Vol. 1, pp. 71–85, 2004.

- 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.
- 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.
- 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 لزج با استفاده از روش برهمنهادن شبکهها،" مجموعه مقالات یازدهمین کنفرانس دینامیک شارهها، FD2008_1495، تهران، خرداد ۱۳۸۷.