ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

مدلسازی عددی میکروپمپ فروهیدرودینامیکی(FHD) توسط میدان آهن ربای دائم

2 صابر بکانی مطلق 1* ، محمد مهدیزاده بوشانلوئی

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه 2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه * اروميه، صندوق پستى 17165 – s.yekani@uut.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
امروزه نانو سیالات مغناطیسی به دلیل کاربردهای متنوع در زمینههای مختلف، از جمله پزشکی و صنعت، توجه بیشتری را به خود جلب کردهاند. در این مقاله، برای اولین بار طرح برای رمی کردن فروسیالات و نازه سیالات و ناطیس توسط نیروی کاوین ناش از مدان و ناطیس غیر	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 11 آبان 1396
در بی شانه، برای توسی بر عرضی برای پنچ کری کروسید کو خو سید کا معامیسی کوست بیروی صوری کسی از میدان معامیسی میر یکنواخت داخل میکروکانالها ارائه و با عنوان میکروپمپ فروهیدرودینامیکی (FHD) نام گذاری شد. سپس به بررسی عددی جریان نانوسیال 	پذیرش: 01 اسفند 1396 ارائه در سایت: 19 فروردین 1397
مغناطیسی درون میکرو کانال با سطح مقطع چهارگوش در حضور میدان مغناطیسی ناشی از أهنربای دائم پرداخته شد. در کار حاضر، نانوسیال	کلید واژگان:
مغناطیسی متشکل از نانو ذرات اکسید اهن که به طور کاملا همگن درون سیال پایه اب مخلوط شده است، استفاده شده است. معادلات حاکم از	نانوسیال مغناطیسی
اضافه کردن ترم نیروی حجمی کلوین به معادلات ناویر-استوکس حاصل شده که به روش حجم محدود و توسط الگوریتم پیزو گسسته شده ·	فروهيدروديناميک
است. برای مطالعه پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد میکرو پمپ FHD، بازهای منتخب از قطر نانوذرات، کسر حجمی نانوذرات، مغناطیس شندگ اثر این مال بر عرف آهندیا مید در بر قال گفتهاند نتایج نژان دادهاند که افنایش هر یک از بالیات های مذکر منج به افنایش	میکروپمپ فروهیدرودینامیکی اَهنربای دائم
سوندی اسباع، طول و عرض اهل به مورد بررسی قرار ترفیهاند. تعییم نسان درماند به امراییس طریف از پارامیرسای مدیور عدیر به اعراییس سرعت در کانال میشوند که ناشی از افزایش نیروی کلوین در طول کانال می باشد. تأثیر قطر نانوذرات مغناطیسی بر سرعت ایجاد شده در کانال	

Numerical simulation of FHD micro pump using magnetic field of permanent magnet

Saber Yekani Motlagh^{*}, Mohammad Mehdizadeh Youshanloei

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology (UUT), Urmia, Iran * P.O.B. 57166-17165, Urmia, Iran, s.yekani@uut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT

Nowadays, magnetic nanofluids have drawn a lot of attention toward themselves due to various Original Research Paper Received 02 November 2017 applications in different fields such as medicine and industry. In this paper, for the first time new Accepted 20 February 2018 pumping method for magnetic nanofluids and ferro-fluids is presented. Moreover, magnetic nanofluid Available Online 08 April 2018 flow inside a rectangular channel under the effect of nonuniform magnetic field of permanent magnet is investigated. Iron oxide nanoparticles which lie completely homogeneous inside the based fluid of water are used. The governing equations obtained by adding the Kelvin body force term to the Navier-Stokes Ferrohydrodynamics (FHD) equations, and the equations are discretized using finite volume method and PISO algorithm. In order to study the effective parameters in the function of the FHD micro pump, a selected ranges of nanoparticles size, volume fraction of nanoparticles, saturated magnetization, and the length and width of the magnet are studied. The results demonstrate the increase in any of the mentioned parameters leads to rise in velocity magnitude inside the channel. Change in the diameter of magnetic nanoparticles has greatest effect on the velocity magnitude inside the channel. Furthermore, vertical magnet has better performance than horizontal one in FHD micro pump.

1- مقدمه

مىدهند نيز به عنوان فروسيال بيولوژيكى شناخته مىشوند. رفتار اين دسته از سیالها در حضور میدان مغناطیسی امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده و تحقیقات قابل توجهی روی آنها صورت گرفته است [1-4]. نانو ذرات دارای ویژگیهای متفاوتی از قبیل جنس، قطر و شکل ظاهری هستند که هر کدام نیز رفتارها و تأثیرهای متفاوتی از خود نشان میدهند [5]. با افزایش کاربردهای نانوذرات در صنایع مختلف یزشکی، خنککاری و مبدلهای حرارتی نیاز به تجهیزاتی جهت ذخیره و انتقال آنها را نیز افزایش داده است. میکروپمپهای مغناطیسی، یکی از ابزارهایی می باشند که قادر به پمپاژ

نانوسیالات بخشی از علم مکانیک سیالات است که در آن به بررسی ویژگی سیالاتی که حاوی نانوذرات هستند، پرداخته می شود. این قبیل سیالات به دلیل ویژگیهای خاصی که دارا هستند، کابردهای بسیار متنوعی دارند. نانوسیال مغناطیسی یا فروسیالات حاوی ذرات در ابعاد نانو، دستهای از نانوسیالات هستند که در آن نانوذرات مغناطیس همانند اکسید آهن در داخل سیال پایه مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این، سیالاتی مانند خون که دارای گلبولهای قرمز حاوی آهن می باشند و رفتار مغناطیسی از خود نشان

Keywords:

Magnetic nanofluid

FHD micro pump

permanent magnet

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.24.7



سیالات مغناطیسی و ایجاد جریانی پیوسته از سیال بدون ارتباط مستقیم با آن هستند. نوع متداول این نوع پمپها، پمپهای مگنتوهیدرودینامیکی (MHD) مىباشند. در اين نوع پمپها از خاصيت هدايت الكتريكى سيال استفاده شده و توسط نیروی لورنس ناشی از میدان مغناطیسی که به صورت حجمی به سیال وارد می شود، سیال در داخل کانال حرکت داده می شود. مسلما عملكرد این نوع پمپها به ویژگیهای گذردهی الكتریكی سیال وابسته است و برای سیالاتی کاربرد دارد که دارای گذردهی الکتریکی بالایی هستند. تحقیقات بسیاری در رابطه با پارامترهای تأثیر گذار بر عملکرد سیالها و میکروپمپهای مگنتوهیدرودینامیکی یا MHD صورت گرفته است. به طور مثال كارايي ميكروپمپ MHD توسط هو [6] با استفاده از مدل پايا، غير قابل تراکم، توسعه یافته و آرام مورد بررسی قرار گرفته شده است. ایدهی ایجاد جریانی از سیال، هدف اصلی تحقیقات آنها بوده که نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی داشتهاند. همچنین، تأثیرات مشخصات نانو سیال بر عملکرد پمپ MHD توسط شهیدیان و همکاران [7] مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج آنها نشان داد که دما همیشه با تغییرات میدان مغناطیسی ثابت میماند. همچنین نتایج نشان دادهاند که، با افزایش چگالی شار میدان مغناطیسی حد اکثر دما ثابت میماند ولی با تغییر ضریب هدایت گرمایی، حداکثر دما دچار تغییر میشود. شهیدیان و همکاران [8] به بررسی عددی جریان خون غیر نیوتونی در پمپ MHD پرداخته اند و نتایج حاصل از کار آنها نشان داد که سرعت جریان خون با افزایش چگالی میدان مغناطیسی و شدت جریان الکتریکی افزایش می یابد. کیاست فر و همکاران [9] به بررسی جریان حاصل از میکرو پمپ MHD در کانال با سطح مقطع چهارگوش پرداختهاند. تحقیقات آنها روی تأثیرات چگالی شار مغناطیسی، ابعاد کانال و جریان الکتریکی بر پروفیل سرعت و همچنین رفتار دمایی سیال متمرکز بود. نتایج آن ها نشان داد که افزایش عددهارتمن منجر به افزایش سرعت و دمای سیال میشود. کسوکه و همکاران [10] به مطالعه اثر ابعاد کانال بر روی رفتار سیال در میکرو پمپ MHD پرداختند.

در سالیان اخیر، فروسیال یا نانو سیال مغناطیسی که غالبا دارای خواص هدایت الکتریکی ضعیف ولی اشباعشوندگی مغناطیسی^۲ قوی هستند، به دلیل ویژگیهای خاص در کاربردهای بسیار متنوعی از جمله خنک کاری، جذب صدا در اسپیکرها، در جت پرینترها [14-11]، مبدلهای حرارتی [15] و ... مورد توجه قرار گرفتهاند. همچنین تحقیقات اخیر، کاربردهایی از این دسته سیالات را در علم پزشکی [16] و کاربردهایی مثل هدایت و انتقال دارو [17] مورد بررسی قرار دادهاند. در چند سال اخیر، کاربرد و تحقیقات بر روی نانوسیالات مغناطیسی بسیار افزایش یافته است [26-18]، که برای اطلاعات بیشتر به مقاله مروری [27] ارجاع داده میشود.

همان طور که قابل ملاحظه است، تحقیقات بسیار متنوع و کاربردی در زمینه پمپهای MHD صورت گرفته است ولی در زمینه میکرو پمپهای FHD تحقیقات مطلوبی انجام نشده است، لذا با توجه به افزایش کاربرد این کلاس از نانوسیالات، در کار حاضر برای اولین بار طرحی برای پمپاژ نانوسیالات مغناطیسی یا فروسیالات بیولوژیکی با استفاده از میدان ناشی از آهنربای دائم داخل میکروکانالها ارائه میشود. ایده این طرح استفاده از نیروی حجمی کلوین ناشی از میدان غیریکنواخت مغناطیسی و خاصیت مغناطیسشوندگی نانوسیال مغناطیسی است. در نتیجه، وجه تمایل اصلی پمپ FHD با پمپ MHD استفاده از نیروی حجمی کلوین به حای نیروی لورنس میباشد. در این

مقاله، بر اساس قوانین حاکم بر فروهیدرودینامیک یا FHD مسأله اثر پمپاژ ناشی از نیروی کلوین در میکروکانال و پارامترهای موثر بر آن مانند شکل منبع مغناطیسی، قطر نانوذرات و ... مورد بررسی قرار می گیرد. اسم این پمپ را می توان میکروپمپ FHD نامگذاری کرد. میکروپمپ FHD میتواند در زمینههای پزشکی و صنعتی همانند پمپاژ خون یا نانوسیالات مغناطیسی که در سیستم خنک کاری، مبدل ها و ... استفاده می شوند، بسیار کاربردی باشد.

2- هندسه مسئله، معادلات حاکم و شرایط مرزی

1–2– هندسه مسئله

مطالعات حاضر بر روی میکرو کانال دوبعدی با سطح مقطع چهارگوش صورت گرفته است. هدف بررسی رفتار نانو سیال در میکرو کانال میباشد. ابعاد کانال 0.5 در 5 میلی متر بوده که ابعاد مذکور در محدوده میکرو قرار میگیرند و مبداء مختصات روی دیواره سمت راست کانال و در فاصلهی 0.25 میلی متری از دیواره بالایی قرار دارد که شماتیکی از آن در شکلهای 1 به تصویر کشیده شده است. آهنربا در دو حالت افقی شکل 1- الف و عمودی شکل 1- ب قرار گرفته و مرکز هندسی آهنربا در هر دوحالت در فاصلهی عرضی 0 و فاصلهی طولی 1.5 میلی متر از مبداء مختصات قرار دارد.

2-2- معادلات حاکم و شرایط مرزی

2-2-1- محاسبه خواص موثر نانوسيال مغناطيسى

با توجه به فیزیک مسأله، ترمهای ترمو فروسس، مگنتوفروسس و اثرات براونین^۳ قابل صرفنظر است، به همین دلیل مدل تکفازی همگن در نظر گرفته شده است. برای محاسبه چگالی نانوسیالات مغناطیسی از روابط متداول در مورد مخلوطها استفاده میشود.



(الف)



 Fig. 1 Schematic picture of FHD Pump-(a) Horizontal magnet with respect to x axis

 respect to x axis, (b) Vertical magnet with respect to x axis

 شكل 1 شماتيك پمپ FHD الف- آهنربای افقی نسبت به محور x ب-آهنربای

 عمودی نسبت به محور x

¹ Hartman number

² Saturated magnetization

³ Brownian

 $\rho_{\rm ff}(V \cdot \nabla V) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{\rm ff} \nabla V) + \mu_o M \cdot \nabla H$

چگالی نانو سیال مغناطیسی: (1)

 $\rho_{\rm ff} = \varphi \rho_{\rm p} + (1 - \varphi) \rho_{\rm f}$ که در رابطه (1) اندیسهای f , ff و p به ترتیب مربوط به فروسیال (نانوسیال مغناطیسی)، سیال پایه و نانوذره بوده و ϕ نشاندهنده کسر حجمی نانوذرات میباشد. در کار حاضر برای محاسبه لزجت فروسیال از رابطه برینکمن به صورت رابطه (2) استفاده شده است[28]:

$$\mu_{\rm ff} = \mu_{\rm f} / (1 - \varphi)^{2.5} \tag{2}$$

رابطه (2) به صورت مكرر در تحقیقات مربوط به فروسیال ها استفاده شده است [28]. در حال حاضر مدل های زیادی در حال توسعه میباشند که بررسی دقت آنها خارج از بحث موضوع میباشد.خواص ترموفیزیکی سیال یایه و نانوذرات در جدول 1 آورده شده است.

2-2-2 مدل لانژوئن برای تحلیل مغناطیس شدگی گاز پارامغناطیس

نانوذرات موجود در یک نانوسیال مغناطیسی، همانند مولکولهای یک گاز پارامغناطیس رفتار میکنند [22-28]. قانون مغناطیس شدگی برای یک گاز M_s پارامغناطیس بوسیله تابع لانژوئن ٔ بهصورت رابطه (6) میباشد. که در آن مغناطیس شوندگی اشباع نانوسیال مغناطیسی، L تابع لانژوئن، ξ پارانتر لانژوئن، arphi کسر حجمی نانو ذرات، $d_{
m p}$ قطر نانو درات، m_p گشتاور مغناطیسی، μ_o ثابت تراوایی خلا، H بردار میدان مغناطیسی، k_B ثابت $k_B = 1.3806503 imes 10^{-23} \, \mathrm{J/K}$ بولتزمن^۲ بوده و مقدار آن معادل با بوده و T دمای مطلق بوده که به صورت روابط (3-6) تعریف می شوند.

$$M = M_s L(\xi) \tag{3}$$

$$M_s = \frac{1}{\pi d_p^3} m_p \tag{4}$$

$$L(\xi) = \coth(\xi) - \frac{1}{\xi}$$

$$(5)$$

$$\xi = \frac{\mu_o m_{\rm p} n}{k_B T} \tag{6}$$

گشتاور مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن (Fe₃O₄) به صورت معادله (7) مىباشد [28].

$$m_p = \frac{4\mu_B \pi d_p^3}{6 \times 91.25 \times 10^{-30}} \tag{7}$$

- می $\mu_B = 9.27 imes 10^{-24} {
m Am}^2$ می $\mu_B = 9.27 imes 10^{-24} {
m Am}^2$ باشد. تابع لانژوئن را مي توان به صورت رابطه (8) نيز تقريب زد [28].

$$L(\xi) = \coth(\xi) - \frac{1}{\xi} = \frac{\xi}{3}$$
(8)

L با توجه به روابط فوق می توان نتیجه گرفت که مغناطیس شدگی نانوسیال را مى توان بەصورت معادلە (9) بر حسب H نوشت:

 $M = \chi(\varphi, T)H$ که در رابطه (9)، $\chi(arphi,T)$ از معادله $\chi(arphi,T)$ از معادله $\chi(arphi,T)$ که در رابطه (9) ميآيد [28].

3-2-2 معادلات حاكم

با فرض جریان آرام، غیرقابل تراکم، پایا و بدون واکنش شیمیایی معادلات حاكم به صورت معادلات (10-11) خواهد بود. معادله ييوستگى:

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{10}$$

² Boltzmann constant

در معادله (11) ترم منبع يعنى $F_{Kelvin} = \mu_o M \nabla H$ نيروى كلوين ناميده

می شود که ناشی از منبع مغناطیسی به نانوسیال مغناطیسی (یا فروسیال)

وارد می شود. همان طور که قبلاً اشاره شد، در کار حاضر میدان آهن بای دائم

که در آن V بردار سرعت نانوسیال میباشد.

معادله مومنتم:

(11)

$$H_{x} = \frac{m_{S}}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{\left(x - x_{m} + \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(y - y_{m} - \frac{1}{2}h\right)^{2}}{\left(x - x_{m} + \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(y - y_{m} + \frac{1}{2}h\right)^{2}} - \ln \left(\frac{\left(x - x_{m} - \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(y - y_{m} - \frac{1}{2}h\right)^{2}}{\left(x - x_{m} - \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(y - y_{m} + \frac{1}{2}h\right)^{2}} \right) \right]$$
(12)

$$H_{y} = \frac{m_{S}}{4\pi} \left[\arctan\left(\frac{\left(\frac{h}{2}\right)\left(x - x_{m} + \frac{1}{2}W\right)}{\left(x - x_{m} + \frac{1}{2}W\right)^{2} + (y - y_{m})^{2} - \frac{1}{4}h^{2}}\right) - \arctan\left(\frac{(h/2)\left(x - x_{m} - \frac{1}{2}W\right)}{\left(x - x_{m} - \frac{1}{2}W\right)^{2} + (y - y_{m})^{2} - \frac{1}{4}h^{2}}\right) \right]$$
(13)

که در این روابط (x_m , y_m) مختصات مرکز سطح آهنربا و w و h به ترتیب عرض و ارتفاع آهنربا میباشند. ms نیز مغناطیس شوندگی اشباع آهنربای دائم است و برای آهن ربای افقی معادله مؤلفههای میدان مغناطیسی به صورت معادلات (14) و (15) می باشند.

$$H_{x} = \frac{m_{s}}{4\pi} \left[\arctan\left(\frac{\left(\frac{h}{2}\right)\left(y - y_{m} + \frac{1}{2}W\right)}{\left(y - y_{m} + \frac{1}{2}W\right)^{2} + (x - x_{m})^{2} - \frac{1}{4}h^{2}}\right) - \arctan\left(\frac{(h/2)\left(y - y_{m} - \frac{1}{2}W\right)^{2} + (x - x_{m})^{2} - \frac{1}{4}h^{2}}{\left(y - y_{m} - \frac{1}{2}W\right)^{2} + (x - x_{m})^{2} - \frac{1}{4}h^{2}}\right) \right]$$
(14)
$$H_{y} = \frac{m_{s}}{4\pi} \left[\ln\left(\frac{\left(y - y_{m} + \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(x - x_{m} - \frac{1}{2}h\right)^{2}}{\left(y - y_{m} + \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(x - x_{m} - \frac{1}{2}h\right)^{2}}\right) - \ln\left(\frac{\left(y - y_{m} - \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(x - x_{m} - \frac{1}{2}h\right)^{2}}{\left(y - y_{m} - \frac{1}{2}W\right)^{2} + \left(x - x_{m} - \frac{1}{2}h\right)^{2}}\right) \right]$$
(15)

مسأله حاضر تحت شرایط دما ثابت حل می شود و اثرات دمایی در نظر گرفته نمی شود. دیواره چپ ورودی و دیواره سمت راست خروجی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مسأله با توجه به طبیعی بودن دیواره بالایی و پایینی و با نامگذاری مذکور به شرح زیر است: در ورودی کانال برای پارامتر فشار شرط مرزی مقدار معلوم و برابر با صفر و برای سرعت شرط مرزی گرادیان صفر در نظر گرفته شده است. در دیوارههای بالایی و پایینی پارامتر فشار، گرادیان صفر و سرعت مقدار معلوم و برابر با صفر (شرط مرزی عدم لغزش) در نظر گرفته شده است. برای خروجی نیز مشابه ورودی عمل شده و

T=315K جدول 1 خواص سیال آب و نانو ذره (Fe_3O_4) در دمای Fe_30_4

Table 1 The water and (Fe_3O_4) hanomulae properties in $T=315K$			
$d_p(nm)$	$\mu(kg/ms)$	$\rho(\text{kg/m}^3)$	فاز
10	-	5200	نانوذرات (Fe ₃ O ₄)
-	0.6×10^{-3}	992	سیال پایه آب

¹ Langevin function

منبع میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده است. مؤلفههای بردار میدان مغناطیسی آهن ربای دائم عمودی به صورت روابط (12) و (13) تعریف

شرط مرزی مقدار مشخص و برابر صفر برای فشار و شرط مرزی گرادیان صفر برای سرعت استفاده شده است. باتوجه به این که نیروی گرانش در جهت بینهایت مسأله یعنی در جهت z قرار میگیرد، تأثیری در مسأله نخواهد داشت. بدین طریق تنها عامل جریان در داخل کانال نیروی کلوین ناشی از میدان مغناطیسی غیریکنواخت آهنربای دائم خواهد بود.

3- تنظیمات عددی، مطالعات شبکه و اعتبارسنجی کد

در کار حاضر، کد با زبان ++C شی گرا به منظور بررسی مسئله پمپ FHD توسعه داده شده است. برای گسستهسازی معادلات پیوستگی، مومنتم از روش حجم محدود استفاده شده است. از روش مرتبه دو بالادستی بهمنظور درونیابی ترمهای جابجایی و از روش مرتبه دو اختلاف مرکزی بهمنظور گسستهسازی ترهای نفوذ استفاده شده است. ترمهای زمانی به روش ضمنی مرتبه دو گسسته شدهاند که دلیل آن این میباشد که: در گسسته سازی ترمهای معادلات حاکم با توجه به گرادیان شدید نیروی کلوین، روشهای مرتبه یک روش اتلافی میباشند و گرادیان شدید را دمپ میکنند. از طرفی روشهای مرتبه بااتر باوجود دقت بالاتر، دارای پایداری کمتری میباشند. لذا در این مسأله خاص با توجه به گرادیانهای شدید به خصوص در نزدیکی منبع مغناطیسی، روش مرتبه دو که دارای دقت نسبتا مناسبی است، استفاده شده است. برای کوپل سرعت-فشار الگوریتم پیزو مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم پیزو نسبت به سیمپل و سیمپل ار و سیمپل سی پایدارتر هست، چرا که حل معادله پواسون فشار در آن دوبار صورت میگیرد. عدد كورانت يا گام زمانى بىبعد 0.5 در نظر گرفته شده است.در مطالعه حاضر، شبکه بندی هندسه به صورت یکنواخت بوده و از مشهای مربعی شکل استفاده شده است. دلیل استفاده از شبکه یکنواخت اسن است که، بهدلیل وجود نيروى كلوين كه به تمامى قسمتها وارد مى شود، لازم است كه كل شبکهبندی مسأله ریز شود. مطالعه مش، جهت بررسی تأثیر مش روی نتایج مسأله و حذف این تأثیر صورت گرفته است. برای بررسی این تأثیر، مسأله در تعداد مش،های 250، 1000، 4000، 1000 و 25000 حل شده است. مطالعه مذکور در بحرانی ترین حالت مسأله که معادل حالتی با بیشترین سرعت میانگین در کانال است، صورت گرفته است که در آن کسر حجمی نانوذرات 0.02، قطر نانوذرات 20 نانو متر است و از آهنربا در ابعاد 1 در 1 میلیمتر استفاده شده که مرکز سطح آن، در فاصله 1.5 میلیمتری مبداء مختصات قرار دارد و مغناطیس شوندگی اشباع آن 4000 آمیر بر متر است. پارامتر مورد بررسی جهت پایش تأثیر مش، میانگین سرعت در راستای مثبت x برای سطح مقطع عمودی از کانال و در فاصله 2.5- میلیمتری از مبداء مختصات است. شکلهای 2– الف و 3– الف به ترتیب تأثیر تعداد مش بر روی میانگین سرعت در وسط کانال و شکل های 2- ب و 3- ب تأثیر تعداد مش بر روی پروفیل سرعت در عرض کانال را برای آهنربای افقی و عمودی نمایش میدهند. همان طور که از هر چهار شکل مشخص است، نمودار میانگین سرعت در تعداد مش 11000 تقریباً ثابت می شود در نتیجه همین تعداد مش برای انجام بررسیهای مورد نظر انتخاب میشود.

برای اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده در حل جریان نانوسیال، نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران [29] و نتایج عددی شیخ زاده [30]، در جریان پایه جابجایی طبیعی نانوسیال در داخل محفظه مقایسه شده است. در شکل 4– الف نتایج تغییرات عدد نوسلت برحسب عدد رایلی برای کار حاضر، نتایج آزمایشگاهی و عددی مذکور نشان داده شده است. نتایج نشانگر همخوانی نسبتاً خوب کار حاضر با نتایج

آزمایشگاهی و سایر تحقیات عددی است و خطای تقریبی 3 درصد را نشان می دهند. برای جزئیات بیشتر در مورد اعتبار سنجی کد حاضر به مراجع [31] و [32] ارجاع داده می شود. به علاوه برای اعتبار سنجی روش حل عددی مورد استفاده برای جریان فروسیال در حضور میدان مغناطیسی، ضریب اصطکاک Cf حاصل از مطالعه عددی حاضر با نتایج به دست آمده توسط تیزیر تزیلا سکیس [33] در داخل رگ آئورت شکمی دارای گشادی در عدد رینولدز 100 (در حضور میدان مغناطیسی یک تک سیم) مقایسه شده است، (شکل 4- ب). در این مورد نیز ساز گاری نسبتاً خوبی مابین نتایج مشاهده شد.

4- نتايج

در این مقاله، نتایج حاصل از مطالعه عددی روی پارامترهای مربوط به میکروپمپ FHD ارائه میشود. در مطالعه حاضر، از آهنربای دائم جهت



Fig. 2 Grid independency study- Horizontal magnet with respect to x axis (a) average velocity, (b) velocity profile شکل 2 مطالعه استقلال از شبکه بندی-آهن,بای افقی نسبت به محور x، الف- میانگین سرعت، ب- پروفیل سرعت

مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1397، دورہ 18 شمارہ 04

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.24.7



Fig. 3 Grid independency study- Vertical magnet with respect to x axis, (a) average velocity, (b) velocity profile. شکل 3 مطالعه استقلال از شبکهبندی-آهنربای عمودی نسبت به محور x، الف- میانگین سرعت، ب- پروفیل سرعت

ایجاد میدان مغناطیسی استفاده میشود. پارامترهای مورد بررسی در عبارتاند از: جهت قرارگیری آهنربا، قطر نانوذرات، کسر حجمی نانوذرات، چگالی میدان مغناطیسی آهنربا، طول و عرض آهنربا که تمامی پارامترهای مذکور برای آهنربای افقی و عمودی به صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفتهاند. توزیع نانوذرات درون سیال پایه کاملاً همگن در نظر گرفته شده است. تمامی نتایج ارائه شده در ادامه اطلاعات مربوط به سطح مقطع عمودی از کانال به فاصله 2.5- میلی متری از مبداء مختصات می باشد.

4-1- بررسی تأثیر جهت جانمایی افقی یا عمودی آهنربا بر سرعت متوسط جریان

برای بررسی تفاوت اثر آهنربای افقی و عمودی بر عملکرد پمپ FHD، در شرایط کاملاً یکسان برای هر دو حالت در نظر گرفته شده است. به طوری که در هر دو مورد از نانوسیال با کسر حجمی 0.02 استفاده شده و قطر نانوذرات مغناطیسی 20 نانومترمیباشد. همچنین هر دو آهنربا دارای مغناطیس



Fig. 4 The results of current numerical method in comparison with (a) the experimental results of Ho et al [29] and numerical result of Sheikhzadeh [30] for benchmark free canvection of nanofluid inside the cavity, and (b) the results of Tizirtzilaskis [33] insaide anourismal. شکل 4 نتایج روش عددی حاضر در مقایسه با الف- نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران [29] و نتایج عددی شیخ زاده [30] برای مسأله پایه جابجایی آزاد نانوسیال داخل محفظه، و ب- نتایج تیزیرتزیلاسکیس [33] برای جریان فروسیال داخل آئورت شکمی دارای گشادی در حضور سیم حامل جریان

شوندگی اشباع 4000 آمپر بر متر هستند و ابعاد آنها 1 در 1 میلیمتر است. پروفیل سرعت ایجاد شده ناشی از میدان در هر دو حالت در شکل 7- الف به تصویر کشیده شدهاند. در مقایسه مذکور همان طور که از شکل 5-الف کاملاً مشخص است، سرعت ایجاد شده ناشی از میدان آهنربای عمودی بیشتر از آهنربای افقی است و دلیل آن نیز بیشتر بودن نیروی کلوین در راستای محور کانال برای آهنربای عمودی است. برای درک هرچه بهتر این موضوع، مؤلفه x نیروی کلوین ناشی از هر دو آهنربا در طول محور افقی کانال در شکل 5-ب رسم شده است. مشاهده می شود که مقدار نیروی کلوین ناشی از آهنربای عمودی در راستای محور کانال در شرایط یکسان از آهنربای افقی بیشتر می باشد که این موضوع به الگوی میدان مغناطیسی آهن ربا (H) و گرادیان این میدان در دو حالت افقی و عمودی برمی گردد.



Fig. 5 (a) Comparison of vlocity profile for horizontal and vertical magnet with respect to x axis in same conditions, (b) Variation of Kelvin force with channel length

شکل 5 الف– مقایسه پروفیل سرعت برای آهنرباهای افقی و عمودی نسبت به محور x در شرایط یکسان، ب- نمودار تغییرات نیروی کلوین در طول کانال

4-2- بررسى تأثير قطر نانوذرات بر سرعت متوسط جريان

در کار حاضر، از نانوذرات اکسید آهن (Fe₃O₄) کروی شکل در سیال پایه آب استفاده شده است. برای تحلیل تأثیر قطر نانوذرات از ذرات با قطرهای 0.5، 10، 15 و 20 نانومتر استفاده شده و درتمامی موارد مربوط به این بخش کسر حجمی نانوذرات برابر با 0.02 بوده و از آهنربای دائم در ابعاد 1 در 1 میلیمتر و با مغناطیس شوندگی اشباع 4000 آمپر بر متر که مرکز سطح آن در فاصلهی 1.5 میلیمتری از مبداء مختصات قرار دارد استفاده شده است. شکل 6، نحوه تغییرات سرعت میانگین در کانال نسبت به قطر نانوذره مغناطیسی برای آهنربای دائم افقی و عمودی را نمایش میدهد. همان طور که از شکل مذکور مشخص است، با افزایش قطر نانوذره، میانگین سرعت در كانال افزایش می یابد. نتایج نشان می دهند با 4 برابر شدن قطر نانو ذرات، به

ترتیب در آهنربای عمودی و افقی سرعت 70 و 180 برابر میشود. باتوجه به رابطه گشتاور مغناطیسی mp (رابطه7) و نیروی کلوین Fkelvin، نیروی کلوین با توان سوم قطر نانوذره رابطه مستقيم دارد به همين دليل، افزايش قطر تأثير بسزایی در عملکرد پمپ مغناطیسی داشته و سرعت میانگین در کانال را شدیدا افزایش میدهد. تغییرات پروفیل سرعت در عرض کانال نسبت به قطر نانوذرات مغناطیسی برای آهنربای افقی و عمودی به ترتیب در شکلهای 7 نمایش داده شدهاند. همان طور که از شکلهای 7- الف و ب قابل مشاهده است، تحت اثر نیروی حجمی کلوین و شرط عدم لغزش سیال روی دیواره، سرعت در مرکز لوله ماکزیمم بوده و در نزدیک دیواره به صفر میل میکند. همچنین، با افزایش قطر به دلایل ارائه شده قبلی سرعت جریان افزایش زیادی دارد. نکته جالب توجه این است که در صورتی که جانمایی آهنربا به صورت عمودی باشد عملکرد پمپ FHD در مقایسه با آهنربای افقی بهتر می باشد. همچنین با توجه به شکل، اثر جهت آهنربا در قطرهای بزرگتر مشهودتر است. به گونهای که سرعت القایی توسط آهنربای عمودی تقریباً دو برابر آهنربای افقی در قطر 20 نانومتر میباشد.

4-3- بررسی تأثیر کسر حجمی نانوذرات بر سرعت متوسط جریان

برای بررسی تأثیر کسر حجمی نانوذرات بر عملکرد میکرو پمپ FHD، نانو سيالهايي با كسرهاي حجمي 0.005، 0.01 و 0.02 و 0.02 مورد تحليل قرار گرفتهاند. تمامی موارد مربوط به این بخش تحت میدان مغناطیسی ناشی از آهنربای دائم با ابعاد 1 در1 میلیمتر که فاصله مرکز سطح آن از مبداء مختصات 1.5 میلیمتر است، قرار دارند. آهنربای مذکور دارای مغناطیس شوندگی اشباع 4000 آمپر بر متر بوده و در دو حالت افقی و عمودی مورد استفاده قرار گرفته است. شکل 8، نحوه تغییرات میانگین سرعت در کانال نسبت به کسر حجمی نانوذرات را برای آهنربای افقی و عمودی نمایش میدهد. با توجه به نمودارهای ترسیم شده در شکل 8، برای هر دو آهنربای افقی و عمودی با افزایش کسر حجمی نانوذرات، میانگین سرعت در کانال به صورت خطی افزایش مییابد، که قابل پیشبینی بود. علت این پدید این مىتواند باشد كه طبق رابطه (3) و رابطه (4) و معادله نيروى كلوين



Fig. 6 The variation of average velocity in channel with nanoparticle dimension

شكل 6 نمودار تغييرات ميانگين سرعت در كانال نسبت به قطر نانوذرات



Fig. 8 variation of average velocity in channel with volume fraction of nanoparticles

شکل 8 نمودار تغییرات میانگین سرعت در کانال نسبت به کسر حجمی نانوذرات

مغناطیس شوندگی اشباع 4000 آمپر بر متر است و برای تحلیل تأثیر ارتفاع، از آهرباهایی با ارتفاعهای 25.0، 5.0، 0.5 و 1 میلیمتری استفاده شده که در همگی عرض یکسان و برابر با 1 میلیمتر است. فاصلهی مرکز سطح آهنربا از مبداء مختصات 1.5 میلیمتر میباشد و تحلیل مذکور برای آهنربا در دو حالت افقی و عمودی در شرایط کاملاً یکسان انجام شده است. نمایش نحوه تغییرات میانگین سرعت در عرض کانال نسبت به تغییرات ارتفاع آهنربا برای آهنربای افقی و عمودی شکل 9 صورت گرفته است. همانطور که دیده میشود، عملکرد پمپ FHD با افزایش ارتفاع آهنربا بهبود می ابد، چرا که با توجه به معادلات مربوط به مؤلفههای میدان مغناطیسی (روابط 12 و 13) و معادله نیروی کلوین با افزایش ارتفاع آهنربا به دلیل افزایش غیرخطی نیروی کلوین، سرعت در کانال به طور غیر خطی افزایش می یابد. نتایج نشان میدهند با 4 برابر شدن ارتفاع آهنربا، به ترتیب در آهنربای عمودی و افقی



Fig. 9 Variation of average velocity in channel with magnet height شکل 9 نمودار تغییرات میانگین سرعت در کانال نسبت به ارتفاع آهنربا



 Fig. 7 Velocity profile in channel, (a) Horizontal magnet with respect to x axis

 to x axis, (b) Vertical magnet with respect to x axis

 -- ب ، x پروفیل سرعت در کانال الف آهنربای افقی نسبت به محور x، ب

 آهنربای عمودی نسبت به محور x

مغناطیس شوندگی اشباع M_s ، مغناطیس شدگی M و نیروی کلوین با کسر حجمی نانو ذره رابطه خطی دارد و در محدوده کسر حجمی بررسی شده، اثر تغییر خطی نیرو حجمی سبب تغییرات خطی میانگین سرعت داخل کانال شده است. نتایج نشان میدهند با 4 برابر شدن کسر حجمی نانوذرات، به ترتیب در آهنربای عمودی و افقی سرعت میانگین/3.97 و 4.3 برابر می شود (افزایش تقریباً 300 درصدی سرعت میانگین). به علاوه، از مقایسه کلی شکلهای 6 و 9 تأثیر بیشتر قطر نانوذره نسبت به کسر حجمی، بر عملکرد پمپ مغناطیسی مشهود می باشد.

4–4- بررسی تأثیر ابعاد آهنربا بر سرعت متوسط جریان 4–4–– بررسی تأثیر ارتفاع آهنربا بر سرعت متوسط جریان

برای بررسی تأثیر ارتفاع آهنربا بر مقدار میانگین سرعت و همچنین پروفیل سرعت، نانو سیال با کسر حجمی 0.02 که قطر نانوذرات در آن 20 نانومتر است، مورد استفاده قرار گرفته شده است. آهنربای مسأله حاضر دارای

سرعت میانگین 23 و 38 برابر میشود. همچنین، به دلیل بیشتر بودن نیروی کلوین مربوط به آهنربای عمودی نسبت به افقی در امتداد محور کانال، در شرایط یکسان سرعت القایی آعنربای عمودی بیشتر از افقی میباشد.

4-4-2- بررسی تأثیر عرض آهنربا بر سرعت متوسط جریان

تحلیل و بررسی تأثیر تغییرات عرض آهنربا در میانگین سرعت و پروفیل سرعت در کانال در شرایط کاملاً مشابه با تحلیل تأثیر ارتفاع کانال صورت گرفته است، تنها با این تقاوت که در بررسی حاضر ارتفاع آهنرباها مقدار ثابت 1 میلیمتر می باشد و در عرضهای 25.0، 20.5 و 1 میلیمتری مورد استفاده قرار گرفته شدهاند. شکل 10، تأثیر تغییرات عرض آهنربا بر میانگین سرعت در کانال را برای آهنربای افقی و عمودی نمایش میدهد. با افزایش عرض آهنربا به دلیل افزایش نیروی کلوبن در طول کانال، میانگین سرعت در کانال افزایش می عدد. نتایج نشان میدهند با 4 برابر شدن عرض آهنربا، به ترتیب آهنربای عمودی و افقی سرعت میانگین 36.6 و 17 برابر میشود.

5-4- بررسی تأثیر مغناطیس شوندگی اشباع آهنربای دائم بر سرعت متوسط جریان

در این بخش از آهنرباهایی با ابعاد 1 در 1 میلیمتر که مرکز سطح آنها در فاصله 1.5 میلیمتری از مبداء مختصات قرار دارد استفاده شده است. در مطالعه حاضر، از نانوسیال با کسر حجمی 0.02 که در آن قطر نانوذرات 20 نانومتر میباشد استفاده شده است. آهنرباها دارای مغناطیس شوندگی اشباع مغناطیس شوندگی اشباع بر میانگین سرعت در شکل 11 برای آهنربای افقی و عمودی به تصویر کشیده شده است. همان طور که از اشکال مذکور مشخص است، با افزایش مغناطیس شوندگی اشباع آهنربا میانگین سرعت مقدار مؤلفههای میدان مغناطیسی و به طبع آن مقدار نیروی حجمی کلوین در داخل کانال می باشد. نتایج نشان میدهند با 4 برابر شدن مغناطیس شوندگی اشباع، به ترتیب در آهنربای عمودی و افقی سرعت میانگین 16 و 23 برابر میشود.



Fig. 10 Variation of average velocity in channel with magnet width شکل 10 نمودار تغییرات میانگین سرعت در کانال نسبت به عرض آهنربا



Fig. 11 Variation of average velocity in channel with saturated magnetization

شکل 11 نمودار تغییرات میانگین سرعت در کانال نسبت معناطیس شوندگی اشباع

5- نتیجه گیری نهایی

در مقاله حاضر، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مربوط به میکرو پمپ FHD بر سرعت ایجاد شده در میکرو کانال پرداخته شد. از میدان مغناطیسی غیریکنواخت ناشی از آهنربای دائم برای ایجاد نیروی کلوین استفاده شده است. نانوسیال مورد استفاده متشکل از نانوذرات اکسید آهن میباشد که در سیال پایه آب به طور کامل همگن قرار گرفتهاند. معادله حاکم از اضافه شدن ترم نیروی کلوین به معادله ناویر استوکس به دست آمده و به روش حجم محدود و الگوریتم پیزو حل شده است. با توجه به نتایج ارائه شده میتوان به موارد ذیل اشاره کرد:

- با افزایش کسر حجمی نانو ذرات به دلیل افزایش نیروی کلوین، سرعت در کانال به صورت کاملاً خطی افزایش مییابد.
- با افزایش طول یا ارتفاع آهنربا، سرعت در کانال افزایش پیدا میکند که افزایش ارتفاع منجر به نرخ بیشتری از افزایش سرعت نسبت به افزایش طول میشود.
- با افزایش قطر نانوذرات مغناطیسی، به دلیل افزایش نیروی کلوین در طول کانال سرعت در کانال به صورت کاملاً غیر خطی افزایش می ابد.
- به ترتیب قطر نانوذرات مغناطیسی، عرض آهنربا، ارتفاع آهنربا، مغناطیس شوندگی اشباع و کسر حجمی نانو ذرات، بیشترین تأثیر را در بهبود عملکرد پمپ FHD دارند.

در این مقاله، برای اولین بار نشان داده شد که میتوان از نیروی کلوین ناشی از میدان مغناطیسی غیر یکنواخت به عنوان ابزاری برای پمپ کردن نانوسیالات مغناطیسی در میکروکانالها که کاربردهای مختلفی در صنایعی مانند پزشکی، انتقال دارو و مبدلهای حرارتی دارند و همچنین پمپ کردن فروسیالات بیولوژیکی مثل خون استفاده نمود.

6- **فهرست علایم** طر نانوذره d_p

- [10] K. Ito, T. Takahashi, T. Fujino, M. Ishikawa, Influences of channel size and operating conditions on fluid behavior in a MHD micro pump for micro total analysis system, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 220-226, 2014.
- [11] R. E. Rosenweeig, Ferrofluids, Magnetically Controllable Fluids and Their Applications, pp. 50-85, Cambridge, Ferrohydrodynamics Cambridge University Press, 1997.
- [12] B. M. Berkovsky, V. E. Medvedev, M. S. Krakov, *Magnetic Fluids, Engineering Applications*, pp. 90-112, Oxford, Oxford University Press, 1993.
- [13] B. M. Berkovsky, V. G. Bashtovoy, Magnetic Fluids and Applications Handbook, pp. 40-65, New York, Begell House, 1996.
- [14] I. Sharifi, H. Shokrollahi, S. Amir, Ferrite-based magnetic nanofluids used in hydrothermia applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 6, pp. 903-915, 2012.
- [15] M. Bahiraei, M. Hangi, Investigating the efficacy of magnetic nanofluid as a coolant in double-pipe heat exchanger in the presence of magnetic field, *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 1125-1133, 2013.
- [16] Q. A. Pankhurst, J. Connoly, S. K. Jones, J. Dobston, Applications of magnetic nanoparticle in biomedicine, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, No. 13, pp. R167, 2003.
- [17] S. Yekani Motlagh, S. Deyhim, Numerical simulation of magnetic nanoparticle delivery at location f abdominal aortic bifurcation using single wire magnetic source, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 56-47, 2017. (in Persian فارسی)
- [18] C. C. Cho, Influence of magnetic field on natural convection and entropy generation in Cu-water nanofluid-filled cavity with wavy surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 101, pp. 637-647, 2016.
- [19] C. S. K. Raju, N. Sandeep, Unsteady Casson nanofluid flow over a rotating cone in a rotating frame filled with ferrous nanoparticles: A numerical study, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 421, pp. 216-224, 2016.
- [19] A. Malvandi, Film boiling of magnetic nanofluids (MNFs) over a vertical plate in presence of a uniform variable-directional magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 406, pp. 95-102, 2016.
- [20] C. S. K. Raju, N. Sandeep, V. Sugunamma, Unsteady magneto-nanofluid flowcaused by a rotating cone with temperature dependent viscosity: A surgical implant application, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 222, pp. 1183-1191, 2016.
- [21] A. Muneer, M. A. Ismael, A. J. Chamkha, A. M. Rashad, Mixed convection in a nanofluid filled-cavity with partial slip subjected to constant heat flux and inclined magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 416, pp. 25-36, 2016).
- [22] M. Sheikholeslami, M. Shamlooei, Magnetic source influence on nanofluid flow in porous medium considering shape factor effect, *Physics Letters A*, Vol. 381, No. 36, pp. 3071-3078, 2017.
- [23] M. Sheikholeslami, H. B. Rokni, Magnetic nanofluid natural convection in the presence of thermal radiation considering variable viscosity, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 132, No. 5, pp. P238, 2017.
- [24] M. Sheikholeslami, Influence of magnetic field on nanofluid free convection in an open porous cavity by means of Lattice Boltzmann method, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 234, pp. 364-374, 2017.
- [25] M. Sheikholeslami, D. D. Ganji, Numerical analysis of nanofluid transportation in porous media under the influence of external magnetic source, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 233, pp. 499-507, 2017.
- [26] M. Sheikholeslami, H. B. Rokni, Melting heat transfer influence on nanofluid flow inside a cavity in existence of magnetic field, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 114, pp. 517-526, 2017.
- [27] M. Sheikholeslami, H. B. Rokni, Simulation of nanofluid heat transfer in presence of magnetic field: A review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, pp. 1203-1233, 2017.
- [28] A. Aminfar, M. Mohammadpourfard, Y. Narmani Kahnamouei, A 3D numerical simulation of mixed convection of a magnetic nanofluid in the presence of non-uniform magnetic field in a vertical tube using two phase mixture model, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, pp. 1963-1972, 2011.
- [29] C. J. Ho, W. K. Liu, Y. S. Chang, C. C. Lin, Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 8, pp. 1345-1353, 2010.
- [30] G. A. Sheikhzadeh, M. Dastmalchi, H. Khorasanizadeh, Effects of nanoparticles transport mechanisms on Al₂O₃-water nanofluid natural convection in a square enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 66, pp. 51-62, 2013.
- [31] S. Y. Motlagh, H. Soltanipour, Natural convection of Al₂O₃-water nanofluid in an inclined cavity using Buongiorno's two-phase model, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 111, pp. 310-320, 2017.
- [32] S. Y. Motlagh, S. Taghizadeh, H. Soltanipour, Natural convection heat transfer in an inclined square enclosure filled with a porous medium saturated by nanofluid using Buongiorno's mathematical model, *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 2526-2540, 2016.
- [33] E. Tzirtzilakis, Biomagnetic fluid flow in an aneurysm using ferrohydrodynamics principles, *Physics of Fluids*, Vol. 27, No. 6, pp. 061902, 2015.

- H بردار میدان مغناطیسی
- I شدت جریان گذرنده از سیم
 - بردار شار نانو ذره $J_{
 m p}$
 - ثابت بولتزمن k_B
- ضریب رسانندگی سیال پایه $k_{
 m f}$
- ضریب رسانندگی فرو سیال $k_{\rm ff}$
- ضریب رسانندگی نانو ذرات k_p
 - L تابع لانژوئن
 - M بردار مغناطیس شدگی
- M_s مغناطیس شدگی اشباع نانوسیال مغناطیسی
 - m_p گشتاور مغناطیسی
 - Re عدد رينولدز
 - T دمای مطلق

۷ بردار سرعت نانو سیال

علايم يوناني

- φ کسر حجمی
- لزجت سيال $\mu_{
 m f}$
- لزجت فروسيال $\mu_{
 m ff}$
- ξ پارانتر لانژوئن
- مگنتون بوهر μ_B
- ثابت تراوایی خلا μ_{0}
- چگالی ذرہ مغناطیسی $ho_{
 m p}$
- چگالی فرو سیال $ho_{
 m ff}$

X قابلیت مغناطیس پذیری

زيرنويسها

- f سيال پايه
- ff فروسيال
- p نانوذره

7- مراجع

- L. P. Aoki, H. E. Schulz, M. G. Maunsell, An MHD study of the behavior of an electrolyte solution using 3D numerical simulation and experimental results, *Comsol Conference in* Boston, University of São Paulo, 2013.
- [2] M. Afrand, A. Karimipour, A. A. Nadooshan, M. Akbari, The variation of heat transfer and slip velocity of FMWNT-water nano-fluid along the microchannel in the lack and presence of a magnetic field, *Physica E: Lowdimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 84, No. 1, pp. 748-481, 2016.
- [3] S. Debamoy, K. M. Isaac, L. Nick, F. Ingrid, Simulation of electrochemical MHD induced flow in a microfluidic cell without channel, AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference, pp. 3392, 2011.
- [4] A. Karimipour, A. H. Nezhad, A. D'Orazio, M. H. Esfe, M. R. Safaei, E. Shirani, Simulation of copper-water nanofluid in a microchannel in slip flow regime using the lattice Boltzmann method, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 49, pp. 89-99, 2015.
- [5] S. Darling, S. Bader, A materials chemistry perspective on nanomagnetism, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 15, No. 39, pp. 4189-4195, 2005.
- [6] Je. He. Ho, Characteristic study of MHD pump with channel in rectangular ducts, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 315-321, 2007.
- [7] A. Shahidian, M. Ghassemi, R. Mohammadi, Effect of Nanofluid properties on Magnetohydrodynamic pump (MHD), *Advanced Materials Research*, Vol. 403, pp. 663-669, 2012.
- [8] A. Shahidian, M. Ghassemi, S. Khorasanizade, G. Ahmadi, Flow analysis of non-newtonian blood in a magnetohydrodynamic pump, *IEEE Transactions* on Magnetics, Vol. 45, No. 6, pp. 2667-2670, 2009.
- [9] M. Kiyasatfar, N. Pourmahmoud, M. Golzan, I. Mirzaee, investigation of thermal behavior and fluid motion in direct current magnetohydrodynamic pumps, *Thermal Science*, Vol. 18, pp. 551-562, 2014.

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.24.7