



مدل سازی عددی به حرکت درآوردن جریان نانوسیال مغناطیسی در یک سیکل خنک کاری بسته با به کارگیری میدان مغناطیسی و اثر ترمومغناطیسی

سجاد آهنگرزنوزی¹، حبیب اله صفرزاده²، حبیب امین فر^{3*}، موسی محمدپورفرد⁴

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

4- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5166614766، hh_aminfar@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 مرداد 1396

پذیرش: 24 مهر 1396

ارائه در سایت: 19 آبان 1396

کلید واژگان:

نانوسیال

جریان

میدان مغناطیسی

اثر ترمومغناطیسی

سیکل خنک کاری

در این مقاله به مدل سازی عددی جریان فروسیال جاری در یک سیکل خنک کاری بسته پرداخته شده است که فاقد هرگونه پمپ مکانیکی می باشد. جریان فروسیال از طریق اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت و با استفاده از خاصیت ترمومغناطیسی در سیکل بسته شارش خواهد یافت. فروسیال مربوطه شامل آب و اکسید آهن با کسره های حجمی مختلف نانوذرات می باشد. برای مدل سازی جریان از مدل دوفازی مخلوط و روش حجم کنترل استفاده شده است. برای اعمال میدان مغناطیسی از یک سیملوله الکترومغناطیسی استفاده شده است و به مدل سازی پایا و همچنین گذرای جریان ایجاد شده در سیکل خنک کاری از لحظه صفر (فروسیال به صورت ساکن در داخل سیکل) پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که با اعمال میدان مغناطیسی و همچنین بهره گیری از ویژگی وابسته بودن مغناطیس پذیری به دما (اثر ترمومغناطیسی) می توان باعث به وجود آمدن جریان در سیکل خنک کاری شد به طوری که با افزایش توان منبع ایجاد کننده گرما (گرمکن) در سیکل، مقدار دبی جریان در داخل سیکل افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد که برای منبع سرد (منبع دفع کننده گرما) با دمای ثابت بالاتر، دبی جریان بیشتری در سیکل خنک کاری خواهیم داشت. علاوه بر این، برای فروسیال با کسر حجمی نانوذرات بالاتر، دبی جریان به وجود آمده در سیکل خنک کاری بیشتر خواهد بود. در مساله حاضر، هدف ایجاد جریان در یک سیکل خنک کاری به صورت القائی (میدان مغناطیسی) می باشد، هر چند ایجاد کردن جریان در داخل سیکل خنک کاری مورد نظر از طریق یک پمپ مکانیکی با توان بسیار کمتری امکان پذیر است.

Numerical modeling of magnetic nanofluid pumping in a closed cooling loop by using magnetic field and thermomagnetic effect

Sajjad Ahangar Zonouzi¹, Habibollah Safarzadeh¹, Habib Aminfar^{2*}, Mousa Mohammadpourfard³

1- Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

3- Department of Chemical Engineering, Tabriz University, Iran

* P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran, hh_aminfar@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 August 2017

Accepted 16 October 2017

Available Online 10 November 2017

Keywords:

Nanofluid, Flow

Magnetic Field

Thermomagnetic Effect

Cooling Loop

ABSTRACT

In this paper, ferrofluid flow in a closed cooling loop without any mechanical pump has been simulated. The flow of the ferrofluid in the closed loop is resulted from applying a non-uniform magnetic field and the thermo-magnetic effect of the ferrofluids. The ferrofluid consist water and different volume fractions of iron oxide nanoparticles. The two phase mixture model and the control volume technique have been used in the present study. The applied non-uniform magnetic field is resulted from an electromagnetic solenoid and the steady and also the transient modeling of the flow in the cooling loop from start point (stagnant ferrofluid in loop) have been carried out. The obtained results show that by applying magnetic field and also by taking advantage of temperature dependent property of the magnetic susceptibility, a flow of ferrofluid is created in the loop and by increasing the heat input (heater power) in the loop, the flow rate in the loop is increased. Moreover, the results show that by having a cold source (for rejection of produced heat) with higher constant temperature, the flow rate in the loop increases. Furthermore, the flow rate in the cooling loop is increased as the volume fraction of the nanoparticles in the base fluid increases. In the present study, our goal is to induce flow inside the cooling loop by magnetic field although this is possible using a mechanical pump using much lower power.

1- مقدمه

الکترونیکی استفاده می گردد که به عنوان نمونه می توان به سیستم های

خنک کاری میکروجت و یا اسپری ها اشاره نمود که البته در این نوع سیستم ها

خنک کاری به وسیله سیال مایع به صورت گسترده ای در سیستم های

Please cite this article using:

S. Ahangar Zonouzi, H. Safarzadeh, H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, Numerical modeling of magnetic nanofluid pumping in a closed cooling loop by using magnetic field and thermomagnetic effect, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 109-117, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نیاز به وجود یک پمپ مکانیکی می باشد که احتمالا منجر به به وجود آمدن مشکلاتی نظیر ارتعاش، نویز و نشتی می شود و یا این که هزینه مصرف انرژی و نگهداری قابل توجهی را خواهد داشت. لذا در دهه اخیر، ایده سیستم های انتقال مایع بدون نیاز به پمپ های مکانیکی مطرح شده است. با توجه به اهمیت و کاربردهای فراوان سیستم های خنک کاری با مایع که از پمپ مکانیکی استفاده نمی کنند، نحوه ایجاد جریان سیال به صورت القائی توسط میدان های خارجی می تواند به صورت قابل توجهی جالب باشد. یکی از میدان های القائی که می تواند سبب به وجود آمدن جریان در داخل نوع خاصی از سیال مایع شود میدان مغناطیسی می باشد.

فروهرودینامیک یکی از زمینه های مهم مغناطیس می باشد. در فروهرودینامیک نیروی بدنی حاصله، ناشی از مغناطیس پذیری سیال جاری در حضور گرادیان میدان مغناطیسی می باشد. یکی دیگر از ویژگی های نانوسیالات مغناطیسی یا فروسیال ها، خاصیت کانوکسیون ترمومغناطیسی آن ها می باشد که نشان دهنده حساسیت فروسیال ها به دما می باشد [1]. نانوسیال های مغناطیسی یا فروسیال ها¹ در واقع گونه ای خاصی از نانوسیال ها هستند که در آن ها نانو ذرات مغناطیسی با ابعادی در حدود 3 تا 15 نانومتر به طور پایدار در یک سیال پایه نظیر آب و یا نفت پراکنده شده اند. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت و شدت های مختلف می توان تا حدودی بر رفتار هیدرو دینامیکی و گرمایی این سیال ها کنترل داشت که این یک مزیت مهم برای این گونه از نانوسیال ها به شمار می آید. توانایی کنترل هیدرو دینامیکی و یا گرمایی سیال های خنک کننده اخیرا مورد توجه دانشمندان و مهندسان قرار گرفته است. یکی از روش های مناسب برای این کار استفاده از سیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی است.

ایوموتو و همکاران [2] به صورت آزمایشگاهی از یک سیال مغناطیسی با حساسیت بالا به دما و با دمای جوش پایین برای ساخت یک سیستم با قابلیت انتقال بیشتر گرما استفاده نمودند. یاماگوچی و همکاران [3] سکوی آزمایشگاهی را جهت اندازه گیری میزان گرمای انتقال یافته در یک سیکل خنک کاری با سیال مغناطیسی حساس به دما و با دمای جوش پایین تحت میدان مغناطیسی طراحی نمودند. آن ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از این نوع سیال میزان انتقال حرارت و دبی جریان را در سیکل خنک کاری افزایش می دهد. اورساند و همکاران [4] در یک سیکل خنک کاری توسط جابجایی طبیعی، امکان استفاده از فروسیالی که بتواند به صورت ترمومغناطیسی در سیکل پمپ شود را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که نیروی محرکه ترمومغناطیسی در بعضی شرایط می تواند حتی خیلی بیشتر از نیروی محرکه ناشی از جابجایی طبیعی باشد.

گانگولی و همکاران [5] جریان و انتقال گرمای یک سیال مغناطیسی را بین دو صفحه موازی تحت اثر یک دوقطبی مغناطیسی با استفاده از روش های عددی بررسی کرده اند. آن ها به این نتیجه رسیدند که میدان مغناطیسی اعمالی روی جریان سیال مغناطیسی موثر نخواهد بود مگر این که میدان مغناطیسی از قدرت کافی برای غلبه بر نیروی لزجت برخوردار باشد. آپهارا و همکاران [6] جریان دوبعدی سیال مغناطیسی با 50% جرمی ذرات مغناطیسی Mn-Zn را در لوله افقی به صورت عددی بررسی کردند. آن ها از مدل تک فازی برای شبیه سازی جریان استفاده کردند و قابلیت کنترل جریان را به وسیله میدان مغناطیسی غیریکنواخت نشان دادند. امین فر و همکاران [7] رفتار گرمایی و هیدرو دینامیکی یک نانوسیال مغناطیسی را در یک کانال

مستطیلی عمودی و در حضور میدان های مغناطیسی مختلف شامل میدان محوری غیریکنواخت به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که میدان محوری با گرادیان منفی و میدان متقاطع حاصل از سیم حامل جریان الکتریکی اثرات مشابهی بر افزایش عدد نوسلت و ضریب اصطکاک دارند. زابلوسکی و همکاران [8] در یک کار عددی و تجربی انتقال گرمای جابجائی ترمومغناطیس یک فروسیال با خواص متغیر با دما را در حضور میدان های مغناطیسی غیریکنواخت بررسی کردند. آزمایش روی یک سلول مستطیلی انجام یافته و آهنرباهای دائمی روی دیواره های آن نصب شده بود. هنگامی که سلول از پائین گرم می شود میزان انتقال گرما نسبت به حالت بدون میدان به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. کریمی مقدم و همکاران [9] جریان فروسیال تک فاز در یک سیکل ترمومغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. آن ها یک مدل خطی برای مغناطیس پذیری فروسیال در نظر گرفتند و رابطه ای برای انتقال حرارت آن ارائه نمودند. کامیاما و همکاران [10] به صورت آزمایشگاهی جریان دوفازی ناشی از جوشش را در حضور میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. آن ها نشان دادند که حباب های گازی به وجود آمده ناشی از جوشش می تواند به طور موثری نیروی محرکه مغناطیسی که به نانوسیال مغناطیسی وارد می شود را افزایش دهد. لیان و همکاران [11] به صورت آزمایشگاهی عملکرد یک حلقه خنک کاری جهت انتقال اتوماتیک گرما با استفاده از اثر ترمومغناطیس را بررسی نموده و تاثیرات عواملی نظیر شدت میدان مغناطیسی، توان منبع تولید گرما و موقعیت قرارگیری آهنربا و گرمکن بر روی سرعت جریان در داخل حلقه خنک کاری را مطالعه نمودند.

2- هندسه و مدل مساله

هدف این تحقیق، شبیه سازی عددی پایا و گذرای جریان ایجاد شده در یک سیکل خنک کاری بسته می باشد که فاقد هرگونه پمپ مکانیکی می باشد و جریان فروسیال از طریق اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت و با استفاده از خاصیت ترمومغناطیسی فروسیال ها در سیکل بسته شارش خواهد یافت. تاثیرات توان منبع ایجاد کننده گرما و همچنین دمای منبع سرد (منبع دفع کننده گرما) بر روی میزان دبی جریان شکل گرفته در داخل سیکل خنک کاری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. علاوه بر این، تغییرات دبی جریان در داخل سیکل و همچنین پارامترهای دیگر نظیر دما در داخل سیکل با زمان از لحظه شروع اعمال میدان مغناطیسی که فروسیال در داخل سیکل به صورت ساکن می باشد، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

¹ Ferrofluids

جدول 1 خواص نانوسیال های مغناطیسی مورد استفاده [12]

Table 1 Properties of the magnetic nanofluid [12]			
خاصیت	دما (°C)	کسر حجمی (%)	
		2%	1%
چگالی (kgm ⁻³)	20	1094.7	1070.6
	40	1088.4	1064.3
	60	1079.8	1055.7
ضریب رسانش (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	20	0.7525	0.7378
	40	0.8697	0.8567
	60	0.9657	0.9358
ویسکوزیته (mPa.s)	20	1.65	1.56
	40	1.12	1.06
	60	0.89	0.83
ظرفیت گرمایی (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	20	4111.7	4129.3
	40	4107.8	4125.3
	60	4112.7	4130.3

از نوآوری های این مقاله آن است که جریان ایجاد شده در داخل سیکل خنک کاری علاوه بر این که در حالت پایا مدل می شود، به صورت گذرا یا وابسته به زمان نیز شبیه سازی خواهد گردید. از دیگر نوآوری های این مقاله بررسی تاثیرات پارامترهای جدیدی نظیر میزان دمای منبع سرد، توان های مختلف منبع ایجاد کننده گرما و درصدهای حجمی مختلف نانوذرات در داخل سیال پایه بر روی میران دبی جریان ایجاد شده در سیکل خنک کاری خواهد بود. خواص فیزیکی فروسیال به کار رفته نیز وابسته به دما در نظر گرفته خواهد شد که منجر به بالا رفتن دقت مساله خواهد شد.

3- معادلات حاکم برای مدل دو فازي مخلوط و شرایط مرزی

می توان با استفاده از مدل دو فازي مخلوط، دو فاز از سیال یا ذرات را با حل معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و کسر حجمی فاز دوم و با در نظر گرفتن سرعت نسبی صفر یا غیر صفر بین دو فاز مدل نمود. در این مدل فرض می شود که فازهای موجود در محیط های پیوسته هستند و هر فاز دارای بردار سرعت مربوط به خود بوده و درون هر حجم کنترل یک مقدار کسر حجمی از فاز اولیه و یک مقدار کسر حجمی از فاز ثانویه وجود دارد. معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی برای کل مخلوط حل می شوند و یک معادله اضافی برای کسر حجمی که در واقع معادله پیوستگی برای فاز دوم است نیز باید حل گردد.

معادلات حاکم به صورت زیر می باشند:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot (\mu_m \nabla \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr.p} \vec{v}_{dr.p}) + \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} \quad (2)$$

در روابط بالا، β_m ، k_m ، μ_m ، ρ_m به ترتیب چگالی، لزجت مخلوط، ضریب رسانش گرمایی مخلوط و ضریب انبساط گرمایی مخلوط هستند و α_m کسر حجمی ذرات نانو است. همچنین $\beta_m \rho_m \alpha_m \vec{q} \cdot (T - T_0)$ مربوط به نیروی شناوری بوده و در آن T_0 دمای منبع خنک کن یا سرد می باشد.

لازم به ذکر است که سیال مورد نظر در این مطالعه دارای خاصیت الکتریکی نبوده و لذا از نیروی لورنتس در این مطالعه در مقابل نیروی مغناطیسی (نیروی کلون) صرف نظر شده است [13].

فروسیال در داخل سیکل نداشته باشد و تنها نیروی محرکه فروسیال در داخل سیکل، نیروی مغناطیسی حاصل از اعمال میدان مغناطیسی ناشی از سیملوله باشد.

نانوسیال مغناطیسی شامل آب و نانوذرات اکسید آهن با درصدهای حجمی مختلف 1%، 1.5% و 2% می باشد. قطر نانوذرات اکسید آهن برابر 13nm در نظر گرفته شده است. در جدول 1 خواص فیزیکی فروسیال با درصدهای حجمی مختلف نانوذرات برای دماهای مختلف آورده شده است که برگرفته از کار تجربی ساندرو و همکاران [12] می باشد و در این مطالعه از این داده ها جهت شبیه سازی مساله استفاده می شود. همچنین در این مطالعه عددی، خواص فیزیکی نانوسیال وابسته به دما در نظر گرفته شده است تا نتایج خروجی از دقت بالاتری برخوردار باشند.

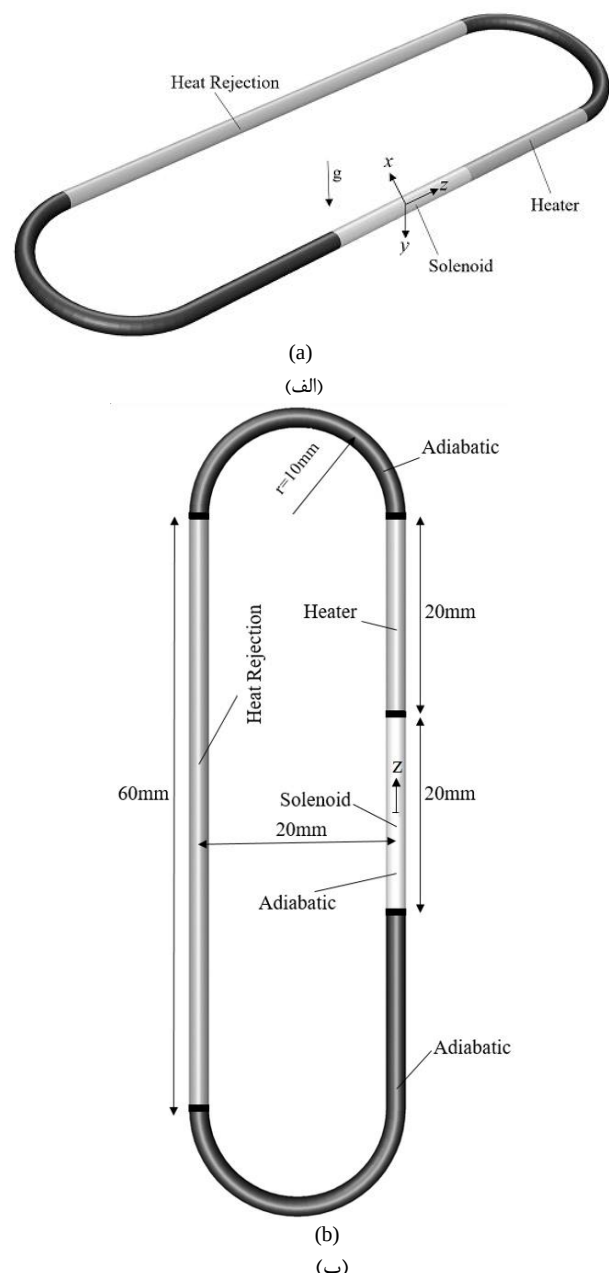


Fig.1 schematics of physical model: (a) 3D model, (b) top view and dimensions

شکل 1 طرحواره هندسه: (الف) شکل سه بعدی، (ب) نمای بالا و ابعاد هندسه

در این رابطه $\vec{v}_{pf}$ سرعت نسبی بین ذره و سیال است. برای محاسبه این سرعت ابتدا باید نیروی درگ ناشی از حرکت ذره نسبت به سیال پایه را محاسبه کنیم. برای این کار ابتدا عدد رینولدز نانوذره را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$Re_p = \frac{\rho_f d_f \vec{v}_{pf}}{\mu_f} \quad (17)$$

از رابطه فوق و با توجه به قطر کوچک نانوذرات و محدوده سرعت های مورد مطالعه، می توان انتظار داشت که عدد رینولدز کوچکتر از یک بوده و ضریب درگ استوکس قابل استفاده باشد [16]:

$$C_{D,S} = \frac{24}{Re_p} \quad (18)$$

با استفاده از رابطه فوق نیروی درگ روی یک نانوذره به صورت زیر به دست می آید:

$$F_{D,S} = C_{D,S} \frac{\rho_f v_{pf}^2}{2} A_{proj} = 3\pi\mu_f d_p v_{pf} \quad (19)$$

با توجه به این که نیروی اعمالی از طرف میدان مغناطیسی روی یک نانوذره مغناطیسی برابر با $\mu_0 m_p L(\xi) \nabla \vec{H}$ است، با نوشتن برآیند نیروهای اعمالی روی یک نانوذره، سرعت نسبی بین ذره و سیال به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\sum \vec{F}_p = 0 \rightarrow \mu_0 m_p L(\xi) \nabla \vec{H} + (\rho_p - \rho_f) v_p \vec{a} - 3\pi\mu_f d_p v_{pf} = 0 \quad (20)$$

$$\vec{v}_{pf} = \vec{v}_p - \vec{v}_f = \frac{\rho_p d_p^2 \rho_p - \rho_f}{18\mu_f} \vec{a} + \frac{\mu_0 m_p L(\xi)}{3\pi\mu_f d_p} \nabla \vec{H} \quad (21)$$

در رابطه فوق $\vec{a}$ بردار شتاب بوده و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla) \vec{v}_m \quad (22)$$

همچنین شرط مرزی دما ثابت بر روی دیواره ی لوله در محل قرار گیری منبع سرد اعمال شده است و شرط مرزی شار حرارتی ثابت بر روی دیواره لوله در محل قرارگیری گرمکن (منبع ایجاد کننده گرما) اعمال گردیده است. دیواره ی لوله سیکل خنک کاری در نواحی دیگر، تحت شرط مرزی آدیاباتیک می باشد. شرط مرزی عدم لغزش نیز بر روی کل دیواره ی لوله سیکل خنک کاری در نظر گرفته شده است.

4- حل عددی، شبکه بندی مساله و اعتبارسنجی

مجموعه معادلات دیفرانسیل غیرخطی همبسته حاکم بر مساله شامل معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و کسر حجمی با روش حجم کنترل گسسته سازی می شوند. جهت شبیه سازی مساله از نرم افزار تجاری انسیس-فلوئنت 16 استفاده شده است. با توجه به عدم پشتیبانی این نرم افزار از مسائل فروهیدرودینامیک، روابط مربوط به اعمال میدان مغناطیسی و نیروی مغناطیسی (نیروی کلون) در مقاله حاضر با نوشتن سابروتین هایی به زبان C++ به این نرم افزار اضافه شده است. با استفاده از روش حجم محدود، در ابتدا میدان فیزیکی مربوط به مسئله حاضر به حجم کنترل های گسسته ای تقسیم می شود و سپس معادلات حاکم بر روی هر حجم کنترل انتگرال گیری می شود تا معادلات جبری و گسسته به دست آیند. جهت حل مساله از حل کننده فشار محور و برای ارتباط فشار و سرعت به یکدیگر از اسکیم سیمپل استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات مومنتم و انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شده است و برای معادله ی کسر حجمی از طرح کوئیک استفاده شده است. معیار همگرایی برای معادلات انرژی، مومنتم، انرژی و کسر حجمی نانوذرات برابر با 10^{-7} می باشد. شبکه بندی هندسه مورد مطالعه به صورت "شکل 2" می باشد که به صورت ساخت یافته می باشد. تعداد

$\vec{H}$ و $\vec{M}$ نیز با رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می شوند:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3)$$

آخرین جمله سمت راست رابطه ی (2) مربوط به نیروی کلون است. همچنین M در این رابطه مغناطیس پذیری می باشد که مطابق فرمول (4) وابسته به دما می باشد [2].

$$M = M_s L(\xi) \left(1 - \frac{T - T_0}{T_c - T_0}\right) \quad (4)$$

که در آن M_s اشباع مغناطیسی نانوسیال مغناطیسی و $L(\xi)$ تابع لانژوئن به صورت فرمول (5) می باشد [15,14] که در آن m_p گشتاور مغناطیسی هر یک از نانوذرات، μ_0 ثابت گذردهی مغناطیسی خلا، k_B ثابت بولتزمن و H شدت میدان مغناطیسی خارجی در محل حضور ذره می باشد.

$$L(\xi) = \left(\coth(\xi) - \frac{1}{\xi}\right) = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 m_p H}{k_B T_0} \quad (5)$$

در مطالعه حاضر برای نانوسیال مغناطیسی از ذرات اکسید آهن استفاده شده است. گشتاور مغناطیسی هر مولکول از اکسید آهن از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$m_M = 4\mu_B, \mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2 \quad (6)$$

که در آن μ_B مگنتون بوهر است. حجم هر سلول از ساختار بلوری اکسید آهن نیز برابر با مقدار زیر است:

$$V_{\text{cell}} = 730 \times 10^{-30} \text{ m}^3 \quad (7)$$

و با توجه به این که هر سلول از ساختار بلوری اکسید آهن شامل هشت مولکول است، حجم هر مولکول برابر با مقدار زیر خواهد بود:

$$V_M = \frac{V_{\text{cell}}}{8} = 91.25 \times 10^{-30} \text{ m}^3 \quad (8)$$

بنابراین تعداد مولکول اکسید آهن در هر ذره از آن، از نسبت حجم ذره به حجم مولکول محاسبه می شود:

$$N_M = \frac{V_p}{V_M} \quad (9)$$

و در نتیجه گشتاور مغناطیسی هر ذره از اکسید آهن به صورت زیر بدست می آید:

$$m_p = N_M m_M = \frac{4\mu_B \pi d_p^3}{6 \times 91.25 \times 10^{-30}} \quad (10)$$

برای محاسبه اشباع مغناطیسی M_s نیز از فرمول زیر استفاده می شود:

$$M_s = \alpha_p N_p m_p = \frac{6\alpha_p m_p}{\pi d_p^3} \quad (11)$$

که در نهایت به رابطه ی زیر برای مغناطیس پذیری نانوسیال مغناطیسی می رسیم:

$$M = \frac{6\alpha_p m_p}{\pi d_p^3} \frac{1}{3} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_c - T_0}\right) \frac{\mu_0 m_p H}{k_B T_0} = \chi H \quad (12)$$

که در آن χ ضریب مغناطیس پذیری فروسیال می باشد.

معادله انرژی:

$$\nabla \cdot [(\alpha_p \rho_p c_{p,p} \vec{v}_p + (1 - \alpha_p) \rho_f c_{p,f} \vec{v}_f) T] = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (13)$$

معادله کسر حجمی:

$$\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (14)$$

معادله کسر حجمی در حقیقت برگرفته از معادله ی پیوستگی برای فاز دوم می باشد. همچنین در روابط بالا $\vec{v}_m$ سرعت مخلوط و $\vec{v}_{dr,p}$ سرعت نفوذ ذرات است که از روابط زیر محاسبه می شوند.

$$\vec{v}_m = \frac{\alpha_p \rho_p \vec{v}_p + (1 - \alpha_p) \rho_f \vec{v}_f}{\rho_{m,0}} \quad (15)$$

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_p - \vec{v}_m = \vec{v}_{pf} - \frac{\alpha_p \rho_p}{\rho_m} (\vec{v}_f - \vec{v}_p) \quad (16)$$

5- نتایج

فروسیال جاری در سیکل بسته شامل آب و نانوذرات اکسید آهن می باشد. در مطالعه حاضر، سیال موردنظر در سیکل خنک کاری فاقد خاصیت الکتریکی در نظر گرفته شده است و لذا نیروی لورنتس حاصل از میدان مغناطیسی نخواهیم داشت. نیروی لورنتس در صورتی وجود خواهد داشت که سیال دارای خاصیت الکتریکی باشد. در صورتی که سیال دارای خاصیت الکتریکی می بود، در این صورت یک ترم اضافی به معادله انرژی اضافه می شد که به گرمایش ژولی¹ موسوم است و ناشی از مگنتوهیدرودینامیک (وجود خاصیت الکتریکی سیال) می باشد. زمینه مطالعاتی در مساله حاضر فروهیدرودینامیک می باشد که در نهایت باعث به وجود نیروی مغناطیسی (نیروی کلونین) در فروسیال می شود و اثر خود را در معادله مومنتم می گذارد و منجر به به وجود آمدن ترم اضافی دیگر در معادله انرژی نمی شود [19].

لازم به ذکر است که نقطه کوری² فروسیال در این مطالعه برابر 738K در نظر گرفته شده است [20]. میدان مغناطیسی موردنظر در مطالعه حاضر جهت به حرکت درآوردن فروسیال در سیکل خنک کاری، میدان حاصل از یک سیملوله الکترومغناطیسی می باشد که این میدان مغناطیسی به صورت تجربی توسط پال و همکاران [21] مورد استفاده قرار گرفته است. سیملوله مورد استفاده پال و همکاران، شامل 754 دور با جریان الکتریکی گذرنده برابر 2.03A می باشد. این محققین، توزیع میدان حاصل از این سیملوله را هم به صورت تجربی به وسیله گوس متر و هم توسط نرم افزار کامسول به دست آورده اند که این توزیع میدان به صورت "شکل 5" می باشد و در این مقاله نیز از همین توزیع میدان مغناطیسی جهت اعمال میدان مغناطیسی به فروسیال موجود در سیکل خنک کاری استفاده خواهد شد. همان طور که مشاهده می شود میدان مغناطیسی اعمالی به صورت غیریکنواخت در راستای محور z می باشد.

با توجه به غیریکنواخت بودن میدان و وجود گرادیان میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی به فروسیال اعمال خواهد شد. به علاوه، با توجه به فرمول (4) مشاهده می شود که با افزایش دمای فروسیال، مغناطیس پذیری آن کاهش یافته و در نتیجه مقدار نیروی مغناطیسی کاهش می یابد. با توجه به توزیع میدان مغناطیسی سیملوله، جهت نیروهای مغناطیسی به وجود آمده

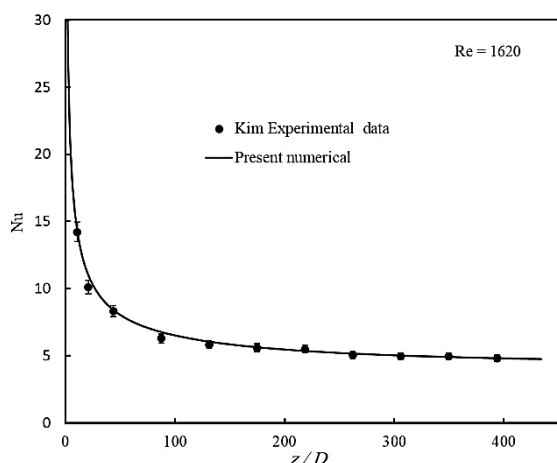


Fig. 3 Comparison of the Nusselt Number in a long horizontal tube with experimental results

شکل 3 مقایسه عدد نوسلت در یک لوله افقی بلند با نتایج تجربی

مش های به کار رفته در هندسه مورد مطالعه 240000 می باشد. نتایج حاصل از آزمون استقلال از شبکه برای هندسه مورد مطالعه به صورت جدول 2 می باشد. نتایج این جدول نشان می دهد که افزایش در تعداد مش ها به بیشتر از تعداد مذکور تنها باعث تغییرات بسیار ناچیزی بر روی دبی حجمی ایجاد شده در داخل سیکل خنک کاری برای توان های مختلف گرمکن و منبع سرد (خنک کن) با دمای ثابت 300K می شود. برای نشان دادن صحت و دقت مدل حاضر و حل عددی، مقایسه ای با مطالعه تجربی منتشر شده ای انجام شده است. در غیاب میدان مغناطیسی و با استفاده از نانوسیال آب - اکسید آلومنیوم، نتایج حل عددی حاضر با نتایج تجربی کیم و همکاران [17] در یک لوله افقی مقایسه شده است. "شکل 3" نتایج این مقایسه را نشان می دهد. همان طور که مشخص است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و حل عددی حاضر، با استفاده از مدل دوفازی مخلوط، مشاهده می شود.

همچنین، به منظور اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده در حضور میدان مغناطیسی، توزیع سرعت بدست آمده در این مطالعه با توزیع سرعت به دست آمده توسط بحیرائی و همکاران [18] در قسمت لوله داخلی یک مبدل حرارتی دو لوله ای که از آن فروسیال با کسر حجمی 4% عبور کرده و تحت میدان مغناطیسی شعاعی حاصل از یک چهار قطبی با شدت ماکزیم B_0 قرار دارد، مقایسه شده است و همان طور که در "شکل 4" نیز مشاهده می شود، نتایج تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

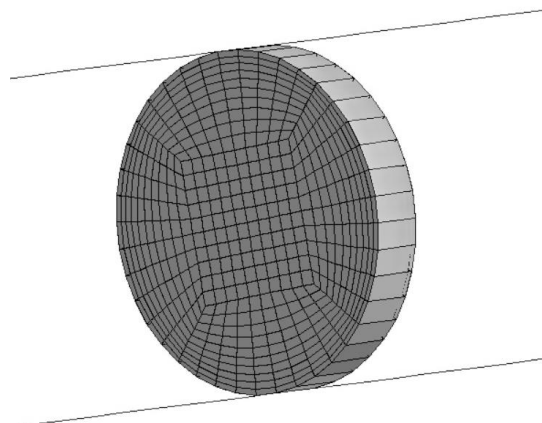


Fig. 2 Used mesh

شکل 2 مش به کار رفته

جدول 2 آزمون استقلال از شبکه برای دبی حجمی ایجاد شده در داخل سیکل خنک کاری (برحسب ml/s) برای سه توان مختلف گرمکن و برای خنک کن با دمای ثابت 300K

Table 2 Grid independency test for the flow rate created in the cooling loop (in terms of ml/s) for three different heat inputs and for the cooling source with constant temperature of 300K

$\dot{v}$ (ml/s)	تعداد مش های بکار رفته	توان گرمکن (W)
0.0161248	160000	2.5W
0.0163341	240000	2.5W
0.0163621	320000	2.5W
0.0198158	160000	3.75W
0.0199017	240000	3.75W
0.0199084	320000	3.75W
0.0221456	160000	5W
0.0228873	240000	5W
0.0229123	320000	5W

¹ Joule Heating

² curie temperature

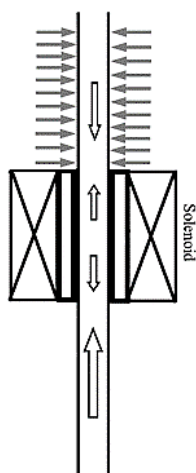


Fig.6 direction of the magnetic force around the solenoid

شکل 6 جهت نیروی مغناطیسی بوجود آمده در فروسیال پیرامون سیملوله

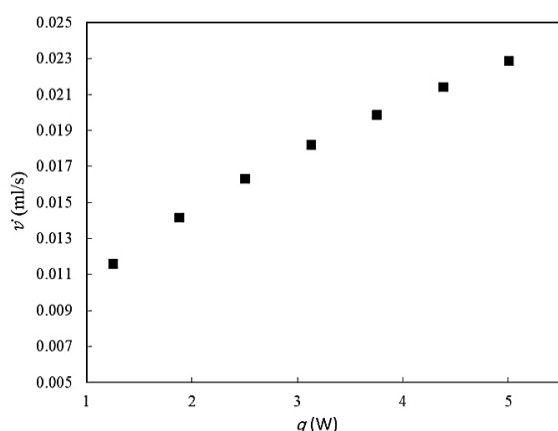


Fig. 7 Values of the obtained flow rates in the cooling loop for different heat inputs

شکل 7 مقادیر دبی حجمی به وجود آمده در داخل سیکل خنک کاری بسته برای توان های مختلف گرم کن

منجر به کاهش نیروی کلین در جهت مخالف جریان فروسیال در ناحیه ای که شار گرمایی اعمال شده می گردد و در نتیجه مقدار برآیند نیروهای حاصل از اعمال میدان مغناطیسی در جهت جریان فروسیال افزایش خواهد یافت که نهایتاً منجر به افزایش دبی جریان خواهد شد.

"شکل 8"، تأثیرات دمای منبع سرد جهت خنک کاری فروسیال جاری در سیکل خنک کاری با کسر حجمی 2% را بر روی میزان دبی حجمی بوجود آمده در داخل سیکل خنک کاری را نشان می دهد. سه دمای مختلف منبع سرد شامل $T_0=300^{\circ}\text{C}$, 320°C , 330°C مورد بررسی قرار گرفته اند و همان طوری که در شکل مشاهده می شود با افزایش دمای منبع سرد، دبی حجمی فروسیال در داخل سیکل خنک کاری افزایش می یابد. برای منبع سرد با دمای بالاتر، اختلاف دما با نقطه کوری سیال کم تر بوده و در نتیجه مغناطیس پذیری فروسیال، حساسیت بیشتری به دما خواهد داشت. علاوه بر این با افزایش دمای کارکردی سیال، ویسکوزیته سیال جاری در سیکل خنک کاری کاهش یافته که منجر به کاهش اتلافات اصطکاکی در داخل سیکل خنک کاری و در نتیجه افزایش دبی جریان در داخل سیکل خواهد شد. همچنین با دقت بیشتر مشاهده می شود اثرات میزان دمای منبع سرد بر روی دبی ایجاد شده در داخل سیکل خنک کاری در شارهای حرارتی بالاتر، بیشتر است.

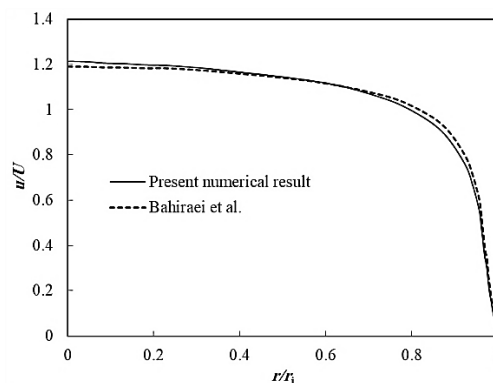


Fig. 4 The results of current numerical method in comparison with the results of Bahiraei et al

شکل 4 مقایسه نتایج حاصل از روش عددی حاضر با نتایج بحیرائی و همکاران

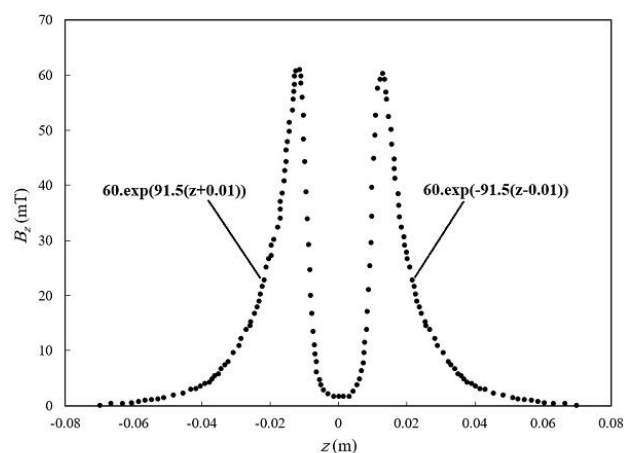


Fig. 5 distribution of the magnetic field created by solenoid

شکل 5 توزیع میدان مغناطیسی حاصل از سیملوله الکترومغناطیسی

پیرامون سیملوله به صورت "شکل 6" خواهد بود. در داخل سیملوله نیز همان طوری که در این شکل مشاهده می شود جهت و اندازه نیروی های مغناطیسی به وجود آمده به شکلی می باشد که همدیگر را خنثی می کنند. همچنین جهت نیروی کلین در سمت راست سیملوله به سمت چپ بوده و جهت این نیرو در سمت چپ سیملوله به سمت راست می باشد. ولی با توجه به قرار گرفتن یک گرم کن بلافاصله بعد از سیملوله، دمای فروسیال در این قسمت به شدت افزایش یافته و در نتیجه مقدار نیروی کلین در این ناحیه کاهش پیدا می کند و در نتیجه مقادیر نیروهای مغناطیسی اعمالی به فروسیال در قسمت پایین دست سیملوله بیشتر از مقادیر آن در قسمت بالادست سیملوله خواهد بود.

لازم به ذکر است که برآیند نیروهای مغناطیسی فروسیال نهایتاً به سمت بالادست سیملوله خواهد بود و منجر به حرکت در آورده شدن فروسیال در سیکل بسته مربوطه خواهد شد. در این مطالعه، توان های مختلف ورودی گرم کن مورد بررسی قرار گرفته اند و جریان گذرنده از سیملوله برای ایجاد میدان تنها برابر 2.03A می باشد. "شکل 7"، مقادیر دبی حجمی بوجود آمده در داخل سیکل خنک کاری بسته را برحسب توان های مختلف گرم کن برای فروسیال با کسر حجمی 2% نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش توان گرم کن (منبع تولید کننده گرما)، مقدار دبی جرمی جریان در داخل سیکل افزایش یافته است. با افزایش شار گرمای اعمالی در قسمت مربوطه، مقدار مغناطیس پذیری فروسیال در آن قسمت کاهش می یابد که

"شکل 10"، تغییرات دبی جریان فروسیال با کسر حجمی 2% را برحسب زمان برای سه توان مختلف گرم کن برابر با $q=2.5W, 3.75W, 5W$ و دمای منبع سرد برابر با $T_0=300K$ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در لحظه شروع، فروسیال در داخل سیکل خنک کاری در حالت ساکن بوده و با گذشت زمان رفته رفته دبی جریان فروسیال افزایش یافته و در نهایت به یک مقدار مشخص می‌رسد. لازم به ذکر است مدت زمان لازم جهت رسیدن به حالت پایا¹ برای گرم کن با توان بالاتر، بیشتر می‌باشد.

"شکل 11"، نمایه دمای فروسیال با کسر حجمی 2% را بر روی صفحه طولی $y=0$ در لحظات مختلف برابر با $t=0.6s, 1.2s, 3s, 4.8s$ برای حالتی که توان گرم کن برابر $q=3.75W$ است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای فروسیال با گذشت زمان در ناحیه اعمال گرما رفته رفته افزایش یافته و در نتیجه مغناطیسی‌پذیری فروسیال در آن ناحیه کاهش می‌یابد که در نهایت منجر به حرکت فروسیال در داخل سیکل خنک کاری با توجه به برآیند نیروهای مغناطیسی اعمال شده به فروسیال می‌شود. "شکل 12" نیز نمایه دمای فروسیال با کسر حجمی 2% را بر روی صفحه طولی $y=0$ در حالت پایا و برای حالتی که توان گرم کن برابر $q=3.75W$ است، نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای ایجاد جریان فروسیال در سیکل مربوطه از هیچ‌گونه پمپ مکانیکی استفاده نشده است و تنها ابزار جهت رانش

جدول 3 آزمون استقلال از گام زمانی برای دبی حجمی ایجاد شده در داخل سیکل خنک کاری (برحسب ml/s) برای سه توان مختلف گرم کن و برای خنک کن با دمای ثابت 300K

توان گرم کن (W)	گام زمانی (s)	$\dot{v}$ (ml/s)
2.5W	0.04	0.01300516
2.5W	0.02	0.01307120
2.5W	0.005	0.01308564
3.75W	0.04	0.0150145
3.75W	0.02	0.0151252
3.75W	0.005	0.0151425
5W	0.04	0.0200256
5W	0.02	0.0207779
5W	0.005	0.0207959

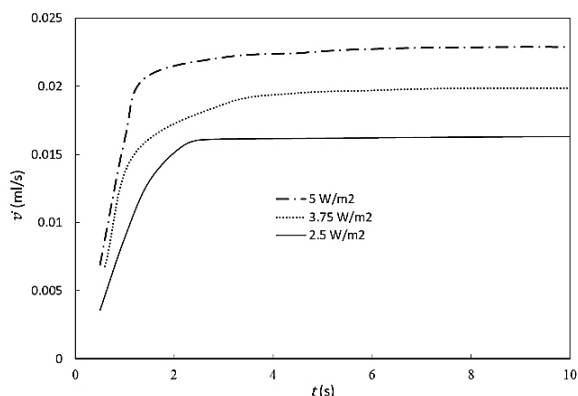


Fig. 10 variations of the flow rate created in the cooling loop with time for three different heat inputs

شکل 10 تغییرات دبی جریان فروسیال با کسر حجمی 2% برحسب زمان برای سه توان مختلف گرم کن.

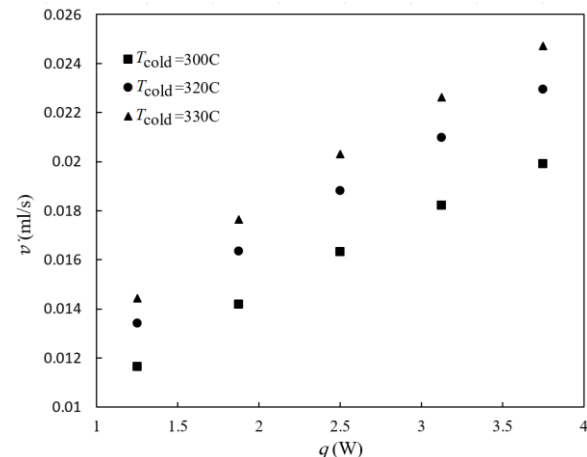


Fig. 8 The effects of the temperature of the cold source on the flow rate created in the cooling loop

شکل 8 اثرات دمای منبع سرد بر روی دبی بوجود آمده در سیکل خنک کاری

"شکل 9"، دبی به وجود آمده در داخل سیکل خنک کاری را برای فروسیال‌های با درصد‌های مختلف کسر حجمی نانوذرات شامل 1%، 1.5% و 2% در توان‌های مختلف گرم کن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش یافتن کسر حجمی نانوذرات، دبی به وجود آمده در داخل سیکل خنک کاری بیشتر می‌شود. با افزایش کسر حجمی نانوذرات مغناطیسی در داخل سیکل خنک کاری، مغناطیسی‌پذیری فروسیال افزایش یافته که منجر به افزایش نیروی مغناطیسی حاصل از اعمال میدان مغناطیسی به فروسیال موجود در سیکل خنک کاری می‌شود.

در ادامه مقاله به شبیه‌سازی گذرای مساله پرداخته شده است. در زمان آغازین مطالعه، فروسیال در داخل سیکل خنک کاری به صورت ساکن در نظر گرفته شده است و دمای اولیه فروسیال در داخل سیکل برابر دمای منبع سرد در نظر گرفته شده است. جهت بررسی استقلال از گام زمانی، دبی ایجاد شده در سیکل خنک کاری در توان‌های مختلف گرم کن برای سه گام زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در جدول 3 هم مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده برای کمیت مورد نظر نشان می‌دهد که انتخاب گام زمانی 0.02s، دقت قابل قبولی برای انجام محاسبات ارائه می‌دهد و کوچکتر کردن گام های زمانی تاثیر چندانی بر دقت محاسبات نخواهد داشت.

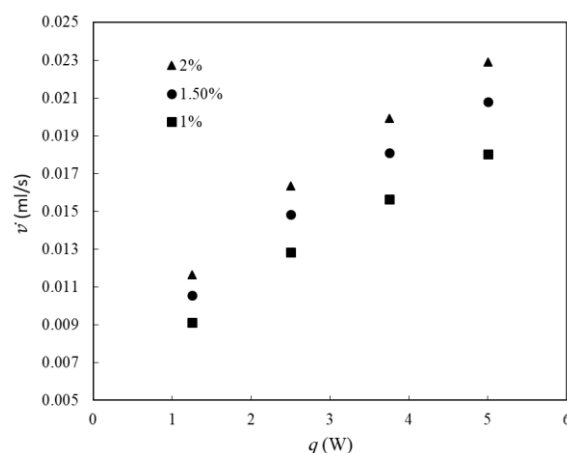


Fig. 9 Effects of different volume fraction of the nanoparticles on the flow rate created in the cooling loop for different values of heat inputs

شکل 9 اثرات کسر حجمی مختلف نانوذرات بر روی دبی جریان به وجود آمده در داخل سیکل خنک کاری برای توان‌های مختلف گرم کن

¹ steady state

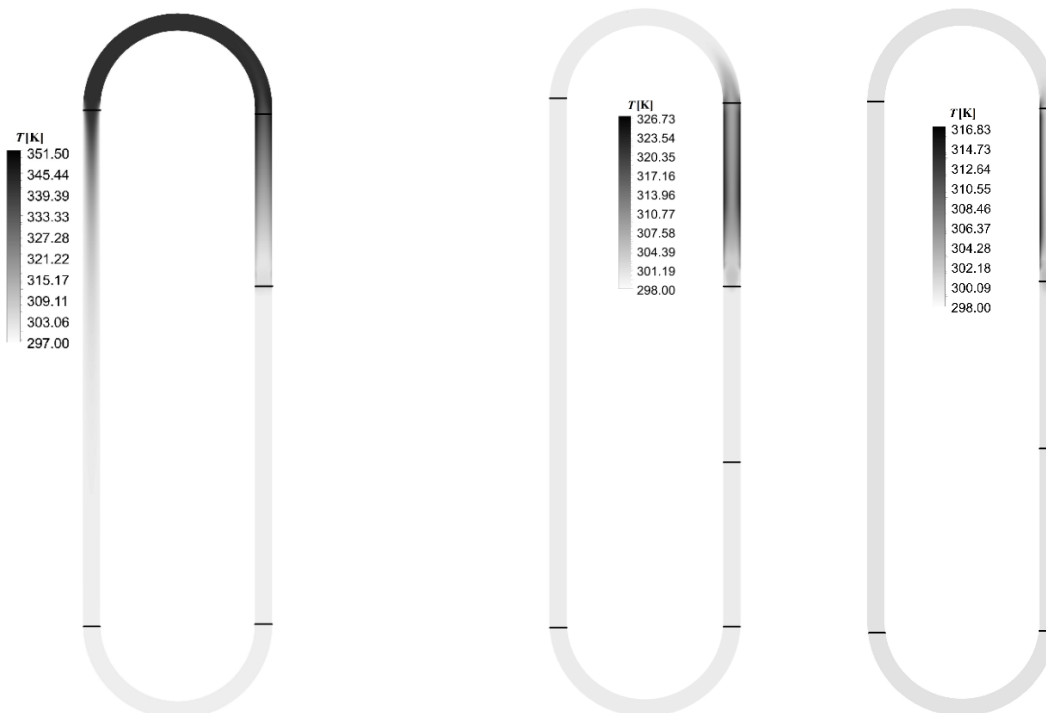


Fig. 12 contour of the ferrofluid temperature in the steady state over the longitudinal plane of $y=0$ and for the heat input of $q=3.75W$

شکل 12 نمایه دمای فروسیال در حالت پایا بر روی صفحه طولی $y=0$ و برای توان گرمکن برابر $q=3.75W$

مقرون به صرفه می باشد. همچنین می توان از سیکل مربوطه برای خنک کاری سیستم های الکترونیکی و ... استفاده نمود. بدین ترتیب که در حقیقت به جای گرمکن موجود در این سیکل، جزء تولید کننده گرما قرار خواهد گرفت که نیاز به خنک کاری دارد.

6- نتیجه گیری

در این مطالعه اثرات اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت حاصل از یک سیملوله بر روی فروسیال داخل یک سیکل خنک کاری بسته به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی عددی با استفاده از مدل دوفازی مخلوط و روش حجم کنترل صورت پذیرفت. نتایج حاصله نشان می دهد که می توان با اعمال میدان مغناطیسی مربوطه و به کارگیری اثر ترمومغناطیسی جریانی از فروسیال در داخل سیکل بسته ایجاد کرد. همچنین با افزایش توان گرمکن یا افزایش شار گرمای اعمالی بر فروسیال در محل نصب گرمکن می توان مقدار دبی جرمی جریان در داخل سیکل را افزایش داد، به طوری که مقدار دبی جریان به وجود آمده در سیکل خنک کاری حاضر برای توان های گرمکن 2.5W، 3.75W و 5W به ترتیب برابر 0.0163341ml/s، 0.0199017ml/s و 0.0228873ml/s می باشد. در مساله حاضر، هدف ایجاد جریان در یک سیکل خنک کاری به صورت القایی (میدان مغناطیسی) و بدون استفاده از پمپ های مکانیکی بوده است. لازم به ذکر است که برای ایجاد دبی جریان به صورت القایی در سیکل خنک کاری نیاز به توان خیلی بیشتری نسبت به یک پمپ مکانیکی می باشد. در مساله حاضر، افت فشار ایجاد شده در داخل سیکل خنک کاری مورد مطالعه ناشی از اصطکاک سیال با دیواره لوله سیکل خنک کاری می باشد که به صورت تقریبی برابر 18Pa می باشد که این افت فشار با استفاده از یک پمپ مکانیکی با توان بسیار کم قابل تامین است و در کار

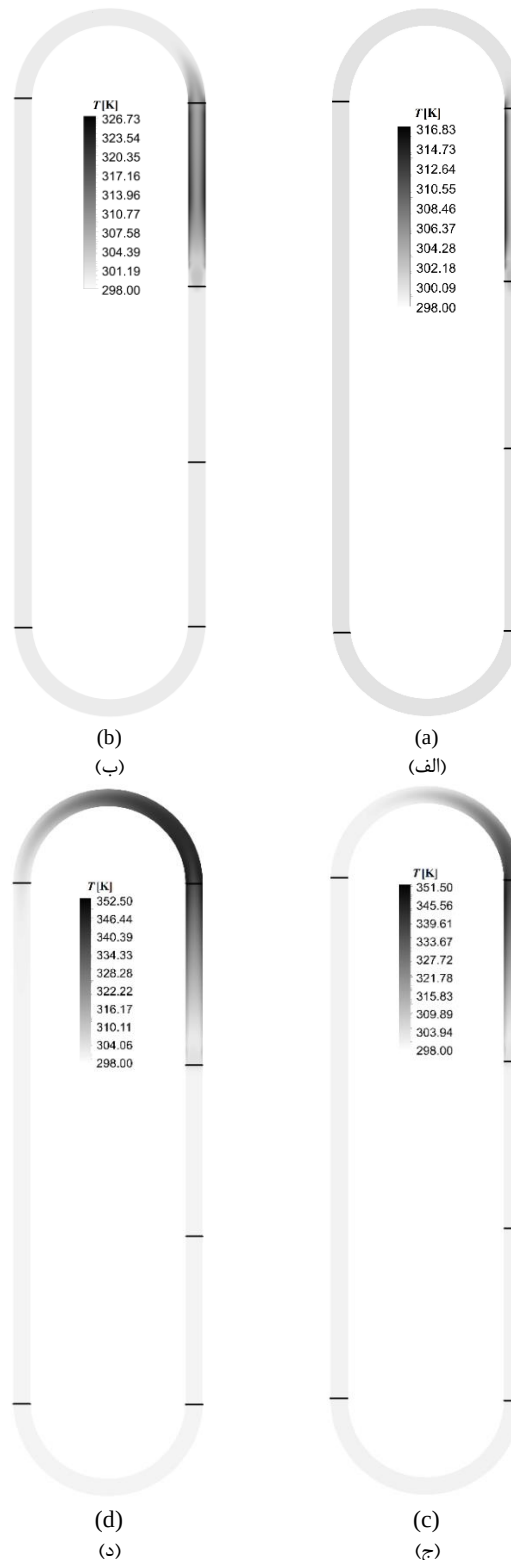


Fig. 11 The contour of the ferrofluid temperature over the longitudinal plane of $y=0$ and for the heat input of $q=3.75W$ at: a) $t=0.6s$, b) $t=1.2s$, c) $t=3s$, d) $t=4.8s$

شکل 11 نمایه دمای فروسیال بر روی صفحه طولی $y=0$ برای توان گرمکن برابر با $q=3.75W$ در لحظات: الف) $t=0.6s$ ب) $t=1.2s$ ج) $t=3s$ د) $t=4.8s$

فروسیال در داخل سیکل فقط میدان مغناطیسی حاصل از یک سیملوله ای است که تنها 2.03A جریان از آن عبور می کند. لذا از نظر اقتصادی نیز بسیار

8- مراجع

- [1] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, pp. 40-65, London: Cambridge University Press, 1985.
- [2] Y. Iwamoto, H. Yamaguchi, X. D. Niu, Magnetically driven heat transport device using a binary temperature-sensitive magnetic fluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 10, pp. 1378-1383, 2011.
- [3] H. Yamaguchi, Y. Iwamoto, Energy transport in cooling device by magnetic fluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 431, No. 1, pp. 229-236, 2017.
- [4] E. Aursand, M. Gjennestad, K. Y. Lervag, H. Lund, Potential of enhancing a natural convection loop with a thermomagnetically pumped ferrofluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 417, No. 1, pp. 148-159, 2016.
- [5] R. Ganguly, S. Sen, I. K. Puri, Thermomagnetic convection in a square enclosure using a line-dipole, *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 7, pp. 2228-2236, 2004.
- [6] T. Aihara, J. Kim, K. Okuyama, Controllability of convective heat transfer of magnetic fluid in a circular tube, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 122, No. 1, pp. 297-300, 1993.
- [7] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, S. Ahangar Zonouzi, Numerical study of the ferrofluid flow and heat transfer through a rectangular duct in the presence of a non-uniform transverse magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 327, No. 1, pp. 31-42, 2013.
- [8] D. Zablotsky, A. Mezulis, E. Blums, Surface cooling based on the thermomagnetic convection: Numerical simulation and experiment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23, pp. 5302-5308, 2009.
- [9] G. Karimi-Moghaddam, R. D. Gould, S. Bhattacharya, A Nondimensional analysis to characterize thermomagnetic convection of a temperature sensitive magnetic fluid in a flow loop, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 136, No. 9, pp. 1-8, 2014.
- [10] S. Kamiyama, J. Ishimoto, Boiling two-phase flows of magnetic fluid in a non-uniform magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 149, No. 1, pp. 125-131, 1995.
- [11] W. Lian, Y. Xuan, Q. Li, Characterization of miniature automatic energy transport devices based on the thermomagnetic effect, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 1, pp. 35-42, 2009.
- [12] L. S. Sunder, M. K. Singh, A. C. M. Sousa, Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 1, pp. 7-14, 2013.
- [13] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, F. Mohseni, Two-phase mixture model simulation of the hydro-thermal behavior of an electrical conductive ferrofluid in the presence of magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 5, pp. 830-842, 2012.
- [14] H. Yamaguchi, *Engineering Fluid Mechanics*, pp. 521-522, Netherlands: Springer Science, 2008.
- [15] Ch. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, pp. 417-419, New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [16] K. H. J. Buschow, *Handbook of Magnetic Materials*, pp. 428-429, Amsterdam: Elsevier Science Press, 2006.
- [17] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Current Applied Physics*, Vol. 9, No. 2, pp. 119-123, 2009.
- [18] 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, No. 1, pp. 1125-1133, 2013.
- [19] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, F. Mohseni, Two-phase mixture model simulation of the hydro-thermal behavior of an electrical conductive ferrofluid in the presence of magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 5, pp. 830-842, 2012.
- [20] B. Lee, Magnetite (Fe_3O_4): Properties, Synthesis, and Applications, *Lehigh Preserve*, Vol. 15, No. 5, pp. 33-81, 2007.
- [21] S. Pal, A. Datta, S. Sen, A. Mukhopdhyay, K. Bandopadhyay, R. Ganguly, Characterization of a ferrofluid-based thermomagnetic pump for microfluidic applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 21, pp. 2701-2709, 2011.

حاضر نیز از یک سیملوله با شدت جریان گذرنده 2.03A برای القای دبی جریان در داخل سیکل خنک کاری استفاده گردیده بود.

به علاوه، اثرات میزان دمای منبع سرد (منبع دفع کننده گرما) در سیکل خنک کاری بر روی دبی حجمی به وجود آمده در داخل سیکل خنک کاری بررسی گردید و نتایج نشان داد که با افزایش دمای منبع سرد، دبی حجمی فروسیال در داخل سیکل خنک کاری افزایش می یابد. در نهایت، تغییرات دبی جریان و دما در داخل سیکل خنک کاری بر حسب زمان ارائه گردید.

7- فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه (kg/m^3)
d_p	قطر ذره مغناطیسی (m)
g	شتاب جاذبه ($= -9.81 \text{ m/s}^2$)
$\vec{H}$	بردار میدان شدت مغناطیسی (A/m)
K	رسانش گرمایی (J/kg K)
k_B	ثابت بولتزمن ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
L	تابع لانژوئن
M	مغناطیس پذیری (A/m)
M_s	اشباع مغناطیسی (A/m)
m_p	ممان مغناطیسی ذره (A/m^2)
q	توان گرم کن (W)
T	دما (K)
$\vec{v}$	سرعت (m/s)
$\vec{v}_{dr}$	سرعت نفوذ ذرات (m/s)
$\vec{v}_{pf}$	سرعت نسبی سیال و ذرات (m/s)
x, y, z	محورهای دستگاه مختصات دکارتی

علائم یونانی

α_p	کسر حجمی
α_m	نفوذ حرارتی
β	ضریب انبساط گرمایی (K^{-1})
ξ	پارامتر لانژوئن
μ	لزجت دینامیکی (kg/ms)
μ_B	مگنتون بوهر ($9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$)
μ_0	نفوذپذیری مغناطیسی خلأ ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$)
ρ	چگالی (kg/m^3)
χ	ضریب مغناطیس پذیری

زیرنویس ها

f	سیال پایه
m	مخلوط
p	ذرات مغناطیسی