



بررسی عددی تأثیر نانوسیال بر راندمان چاه حرارتی میکرو کانالی با استفاده از روش تاگوچی

مهران خاکی جامعی^{۱*} و مرتضی عباسی^۱

^۱ استادیار، مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، ساری

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۱

چکیده

در این مقاله، عملکرد یک چاه حرارتی میکروکانالی با دو جنس مختلف آلومینیم و مس و با نانوسیالات مختلف و سیال پایه آب و اتیلن-گلیکول، مورد مطالعه قرار گرفته است. چاه حرارتی میکروکانالی شامل، تعدادی میکروکانال موازی است که برای کنترل دما روی یک منبع گرم مانند سی‌پی‌یو کامپیوتر قرار می‌گیرد. جریان درون کانال‌ها آرام، دائمی و سیال تراکم ناپذیر است. نانوسیالات مورد استفاده همگن در نظر گرفته شده‌اند. معادلات حاکم به‌صورت سه‌بعدی و به‌روش عددی حجم محدود حل شدند. برای بررسی تأثیر هم‌زمان تمامی پارامترهای اثرگذار، از روش آماری تاگوچی استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در شرایط یکسان ترکیبات مختلف نانوذرات با سیال پایه اتیلن‌گلیکول در مقایسه با نانوسیالات آب بیش از ده برابر افت فشار ایجاد کرده و همچنین، دمای منبع گرم در این حالت، تقریباً ده درجه سانتی‌گراد بالاتر است؛ بنابراین استفاده از نانوسیالات با سیال پایه اتیلن‌گلیکول توجیه‌پذیر نیست. از دیگر یافته‌های تحقیق، این است که نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم ۰/۵ درصد و کانال مسی از میان وضعیت‌های در نظر گرفته شده، بهترین راندمان را برای چاه حرارتی داشته، اما نانوسیال آب-اکسید آلومینیم ۸ درصد و کانال مسی، بهترین کاهش دما را برای منبع گرم دارد.

کلمات کلیدی: چاه حرارتی میکروکانالی؛ نانوسیال؛ تاگوچی؛ راندمان حرارتی.

Numerical Investigation of Nano-Fluid Flow on Micro Channel Heat Sink Efficiency using the Taguchi Method

M. Khaki Jamei^{1,*}, M. Abbasi¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Sari, Iran.

Abstract

In this article we have studied a micro-channel heat sink with different kinds of nanofluid flow using water and ethylene-glycol as base fluids. The heat sink discussed contains a number of parallel micro channels which are placed on a thermal source (exp. computer CPU) for controlling its temperature. The flows in micro-channels are considered, incompressible, steady state and homogenous. A Finite volume three dimensional numerical scheme is used to solve the governing differential equations. The channel is made aluminum or copper and aluminum oxide, copper, titanium oxide, mercury and gold used as nanoparticles inside the base fluid, water and ethylene-glycol. Taguchi statistical method is used for to investigate all the cases. Studies show that different combinations of nanoparticles create a 10 times higher pressure lost with ethylene-glycol as the base fluid rather than water. The heat source's temperature correspondingly leads for over 10°C the ethylene-glycol version. Therefore it doesn't seem sufficient to use ethylene glycol as the base fluid for nano particles. Other findings suggest that the titanium dioxide-water Nano-fluid of 5 vol. % on the copper channels has the best thermal efficiency, but the aluminum-oxide-water Nano-fluid of vol. % on the copper channels has the best minimum temperature of the heat source.

Keywords: Micro-Channel Heat Sink; Nano-Fluid; Taguchi Method; Heat Efficiency.

۱- مقدمه

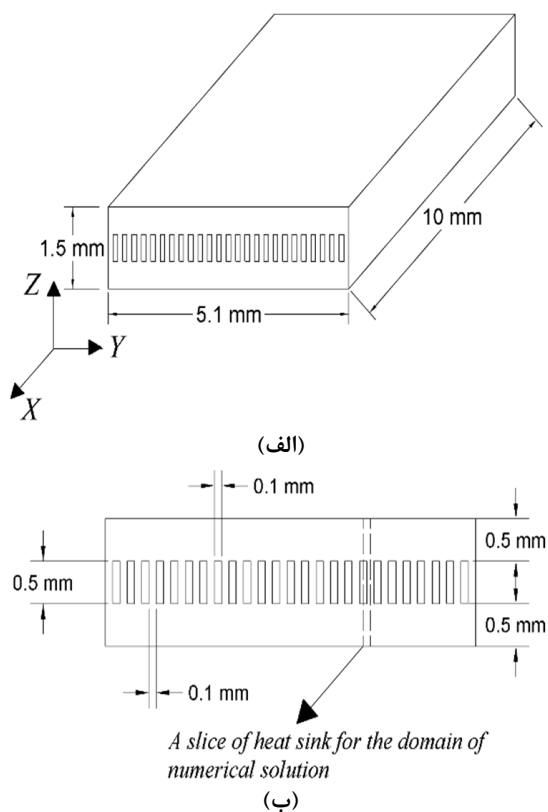
کاربرد مبدل‌های حرارتی در صنعت بسیار گسترده بوده، به همین علت مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال جمارانی و همکارانش [۱]، یک مبدل حرارتی دولوله در محیط متخلخل را در یک جریان آشفته به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر شکیبیا و گرچی [۲]، انتقال حرارت فروسیال را در مبدل حرارتی دولوله بررسی کردند. همگام با پیشرفت صنعت الکترونیک نیاز به خنک‌کاری سامانه‌های الکترونیکی مانند مدارهای مجتمع به‌عنوان یک ضرورت مطرح شد. در این راستا، طرح مبدل‌های کوچک به‌عنوان چاه حرارتی شکل گرفت.

چاه حرارتی میکروکانالی، اولین بار توسط تاكرمن و پیس [۳] پیشنهاد گردید. از مزایای استفاده از چاه حرارتی میکروکانالی، می‌توان به افزایش انتقال حرارت در اندازه هندسه کوچک‌تر و هزینه عملیاتی کمتر نسبت به چاه‌های حرارتی معمولی نام برد. چاه حرارتی میکروکانالی را می‌توان برای خنک‌کاری در مکانیسم‌هایی از قبیل، مدارهای مجتمع در مقیاس بزرگ و میکرو الکترونیک و غیره بکار برد. چاه حرارتی مذکور شامل، تعدادی میکروکانال موازی است که درون آن سیال خنک‌کننده جریان دارد. حرارت دستگاه توسط دیواره‌های کانال جذب و توسط سیال خنک‌کننده دفع می‌شود. هوا، آب اتیلن‌گلیکول و روغن‌موتور، معمولاً در این نوع، چاه حرارتی به‌عنوان خنک‌کننده بکار می‌روند. جهت بهبود عملکرد چاه حرارتی می‌توان از سیالی با مشخصات فیزیکی مناسب‌تری استفاده نمود و یا مشخصات فیزیکی سیال را اصلاح کرد. برای این منظور مقداری نانوذرات جامد که هدایت حرارتی بالایی دارند، به سیال پایه به‌عنوان یک سیال خنک‌کننده اضافه می‌شود. در قرن حاضر، مطالعات قابل‌توجهی انجام پذیرفته که در آن از نانوسیال به‌عنوان سیال خنک‌کننده در میکروکانال استفاده شده است. به‌عنوان مثال هو و همکاران [۴]، عملکرد حرارتی یک میکروکانال مسی با جابجایی اجباری را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، به‌عنوان خنک‌کننده استفاده کردند. به گزارش آن‌ها، نانوسیال در چاه حرارتی میکروکانالی به‌طور چشم‌گیری ضریب انتقال حرارت کلی را افزایش می‌دهد. سلیمی و همکاران [۵] نیز، با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم و آب در یک مبدل حرارتی

میکروکانالی، تأثیر غلظت نانوذرات را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. طی گزارش آن‌ها افزودن یک درصد نانوذرات آلومینا می‌تواند سبب افزایش ۴۷.۷ درصد ضریب انتقال حرارت کلی شود. ژان و لی [۶] با ارائه یک مدل تئوری، جریان حرارتی نانوسیال را در یک لوله مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین توزیع نانوذرات جامد را در جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم تحت انتقال حرارت اجباری در یک لوله دایروی با دیواره‌های دما ثابت، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق دیده شد، افزایش کسر حجمی نانوسیال، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. لی و موادور [۷]، نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در کسر حجمی‌های متفاوت را با دو مدل، تک‌فاز و دو‌فاز تحت توان پمپاژ متفاوت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دیدند که افزایش نانوذرات در سیال پایه، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت در جریان آرام توسعه یافته شده، در صورتی که این افزایش در جریان آشفته به‌مراتب کمتر است. چین و هیوانگ [۸]، با به‌کارگیری آب و نانوسیال مس-آب در کسر حجمی‌های متفاوت با فرض تک‌فاز بودن نانوسیال در دو هندسه مختلف از میکروکانال سیلیکونی دریافتند که عملکرد چاه حرارتی توسط نانوسیال به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد و وجود نانوذرات به دلیل کوچک بودن ذرات و پایین بودن کسر حجمی، افت فشار را به مقدار زیادی افزایش نمی‌دهد. ون و دینگ [۹]، جریان آرام را در یک لوله مسی حامل نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها افزایش قابل‌ملاحظه انتقال حرارت توسط نانوسیال را گزارش دادند. آن‌ها علاوه بر افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، تحرک نانوذرات داخل سیال پایه و اختلال ناشی از آن در لایه مرزی را از دلایل اصلی این افزایش دانستند. لی و کلنستر [۱۰]، نانوسیال آب - اکسید مس را با دو کسر حجمی متفاوت در یک میکروکانال دوزنقه‌ای، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند، با افزایش ناچیز در توان پمپ به میزان قابل‌توجهی انتقال حرارت در میکروکانال افزایش می‌یابد. تسا و چین [۱۱]، عملکرد یک چاه حرارتی با استفاده از نانوسیال آب-مس و آب-نانولوله کربنی در یک محیط متخلخل را مورد مطالعه قرار داده، نشان دادند که اختلاف دمای بین دیواره میکروکانال و دمای کپه‌ای سیال، با استفاده از نانوسیال کاهش می‌یابد. چن و دینگ [۱۲]، عملکرد انتقال حرارت در یک میکروکانال با نانوسیال آب-

۲- بیان مسئله

شکل ۱، یک چاه حرارتی میکروکانالی را نشان می‌دهد که از تعدادی کانال موازی تشکیل شده است.



شکل ۱- شماتیکی از مسئله، (الف) نمای سه‌بعدی چاه حرارتی و (ب) نمای روبرو به همراه برش استفاده شده در محاسبات [۲۲]

دیواره پایینی چاه حرارتی تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد و دیواره بالایی عایق است. هر کانال دارای ارتفاع و عرض مشخصی بوده، ضخامت دیواره‌های چپ و راست با یکدیگر و همچنین ضخامت دیواره پایینی و بالایی آن با یکدیگر برابر هستند و طول تمامی میکروکانال‌های موازی که نانوسیال در آن جریان دارد، مساوی در نظر گرفته می‌شود. دمای سیال ورودی ثابت و برابر ۲۹۳ کلوین در نظر گرفته شده است. حرارت به‌صورت هدایتی از دیواره گذر کرده، با جابجایی به سیال منتقل می‌شود. محاسبات برای یک میکروکانال انجام و نتایج آن به کل چاه حرارتی گسترش می‌یابد.

اکسید آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده، طی آن مشاهده کردند، تغییرات توزیع دما و مقاومت حرارتی نسبت به اینرسی حرارتی، به میزان چشمگیری بیشتر است. محمد و همکاران [۱۳]، انتقال حرارت در یک کانال ذوزنقه‌ای را مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها گزارش دادند، عملکرد انتقال حرارت توسط نانوسیال آب-استیل به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. با مطالعه بررسی‌های انجام‌شده دیده می‌شود، تحقیقی وجود ندارد که تأثیر چندین پارامتر مختلف را شامل شود؛ از این‌رو برای بررسی جنبه‌های مختلف بران شدیم اثر پارامترهایی مانند جنس کانال، نوع سیال عامل، نوع و همچنین درصد حجمی نانوذرات را توأمان مورد مطالعه قرار دهیم. با توجه به وسعت پارامترهای اثرگذار، نیاز به یک روش بهینه‌سازی مشهود است. برای بهینه‌سازی از روش‌های بسیاری می‌توان استفاده کرد که یکی از این روش‌ها، تاگوچی^۱ نام دارد. این روش در مسائل مهندسی ابتدا توسط سالمون^۲ و تاگوچی مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. روش تاگوچی در ابتدا برای بهینه‌سازی در تحقیقات تجربی به کار گرفته شد، اما پس‌از آن در بسیاری از مسائل مهندسی به‌صورت تجربی و یا محاسباتی راه پیدا کرد [۱۵-۱۹]. در ایران نیز پژوهش‌گرانی روی تعدادی از مسائل تئوری و آزمایشگاهی از روش تاگوچی استفاده کرده‌اند [۲۰، ۲۱]. پژوهش‌های انجام‌شده در این خصوص، عموماً فقط یکی از پارامترهای تأثیرگذار را مورد توجه قرار دادند؛ حال آنکه در این پژوهش به تأثیر پارامترهای گوناگون شامل، نوع و درصد حجمی نانوذرات، جنس سیال پایه و همچنین جنس کانال بر راندمان حرارتی چاه حرارتی پرداخته شده است. با توجه به تعداد زیاد و همچنین ماهیت متغیرهای اثرگذار در مبدل میکروکانالی، برای بهینه‌سازی از روش تاگوچی استفاده شده است. با توجه به روش بهینه‌سازی مورد استفاده، از نتایج این تحقیق می‌توان برای انتخاب چاه حرارتی مناسب در سامانه‌های خنک‌کاری پردازنده‌های رایانه با بالاترین راندمان استفاده کرد.

¹ Taguchi

² Salmon

که در این روابط اندیس‌های nf و s به ترتیب، مربوط به نانوسیال و جسم جامد می‌باشند.

شرایط حاکم بر مرزهای جریان روی مرزهای جامد، ورودی، خروجی و محور تقارن باید تعریف شود. در مورد مرز جامد شرط عدم لغزش اعمال می‌شود، به گونه‌ای که سرعت روی این مرز باید صفر باشد؛ همچنین انتقال حرارت سیال و جامد در این مرزها با هم برابر است، یعنی:

$$u = v = w = 0 \text{ and } -k_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial n} = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (7)$$

دیواره بالای مبدل حرارتی، عایق است. در ورودی جریان سیال، سرعت در راستای X یکنواخت و برابر با 1 متر بر ثانیه و دمای ورودی برابر ۲۹۳ کلوین در نظر گرفته شد.

$$u = u_{in}, v = 0, w = 0, T = T_{in} \quad (8)$$

برای مرز خروجی شرط کاملاً توسعه یافته برای جریان هیدرولیک و حرارتی اعمال شده، به عبارتی گرادیان سرعت و دمای بی بعد صفر است ($\partial\theta/\partial x = 0$). برای محور تقارن شرط صفر بودن گرادیان همه کمیت‌ها عمود بر سطح، ($\partial\theta/\partial n = 0$) اعمال می‌شود. در این حالت مقدار کمیت‌های روی محور تقارن برابر مقدار نقطه بالایی است.

۳-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

در این مقاله، سیال آب و اتیلن گلیکول به همراه نانوذرات Au ، Ag ، Cu ، TiO_3 ، Al_2O_3 خواص ترموفیزیکی و پایداری نانوسیال ثابت فرض شده است. چگالی نانوسیال از رابطه چوی [۲۳]، ویسکوزیته آن از رابطه درو و پاسمن [۲۴]، ظرفیت گرمایی ویژه از رابطه ژوان و روتزل [۲۵] و همچنین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه یو و چوی [۲۶] طبق فرمول‌های (۹-۱۲) به دست می‌آیند:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_p \quad (9)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi) \quad (10)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_{bf} + \varphi(\rho c_p)_p \quad (11)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})(1 + \beta)^3\varphi}{k_p + 2k_{bf} - (k_p - k_{bf})(1 + \beta)^3\varphi} \quad (12)$$

فرضیات حاکم بر مسئله چنان انتخاب شدند که با فیزیک مسئله مطابقت داشته باشند. این فرضیات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- جریان آرام دائمی و در یک‌فاز است
- سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم است
- نانوذرات دارای اندازه و شکل یکسان هستند
- سیال پایه و ذرات از لحاظ دمایی در تعادل هستند
- از انتقال حرارت تابشی بین وجوه صرف نظر شده است.

۳- مدل سازی ریاضی

مدل سازی ریاضی شامل، معرفی معادلات حاکم، شرایط مرزی و معادلات تجربی برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال است.

۳-۱- معادلات حاکم و شرایط مرزی

معادلات حاکم شامل دو بخش، معادله انتقال حرارت هدایتی در دیواره جامد که به صورت سه بعدی بوده، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی داخل سیال هستند. معادله هدایت در دیواره جامد در معادله ۱ معرفی شده است.

$$k_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (1)$$

معادلات سیالی شامل، معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی هستند که به ترتیب در روابط ۲ تا ۶ آمده است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\rho_{nf} c_{pnf} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

۳-۳- ضريب بهره چاه حرارتي

چاه حرارتي مورد مطالعه براي کاهش دماي مدارهاي مجتمع رایانه مورد بهره برداري قرار مي گيرد. از اين رو يکي از معيارهاي بهينه سازي، حداکثر دماي سطح تماس چاه حرارتي با سطح سي پي يو بوده، از طرفي ميزان توان لازم براي به چرخش درآوردن سيال در مبدل نيز بايد به حداقل برسد. براي رسيدن به هر دو هدف به صورت هم زمان از تعاريف (۱۳-۱۷) استفاده شده است.

$$\theta_{bf} = T_{c,bf} - T_{in,bf} \quad (13)$$

$$\theta_{nf} = T_{c,nf} - T_{in,nf} \quad (14)$$

$$\theta_r = \frac{\theta_{bf} - \theta_{nf}}{\theta_{bf}} \quad (15)$$

$$W_r = \frac{W_{nf} - W_{bf}}{W_{bf}} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{\theta_r}{W_r} \quad (17)$$

که در روابط ۱۳ تا ۱۷، T_c دماي سطح تماس سي پي يو، T_{in} دماي ورودی سيال، اندیس bf سيال پایه، اندیس nf نانوسيال، W توان مورد نیاز پمپ برای برقراری جریان سيال و η ضريب بهره هستند.

۳-۴- روش بهينه سازي

برای بررسی دقیق تر انتقال حرارت در چاه حرارتي مورد مطالعه، حالت های مختلفی از جنس کانال، جنس سيال پایه، جنس نانو ذرات و درصد حجمی نانو ذرات در نظر گرفته شده است که انتخاب حالت بهينه از میان تمام حالت های ممکن را مشکل می سازد. به این منظور باید یکی از روش های بهينه سازي را به کار گرفت. در این پژوهش، روش تاگوچی انتخاب شده است.

۳-۴-۱- روش تاگوچی

روش تاگوچی، یک روش بهينه سازي است که در آن از آرایه های استاندارد متعامد برای تنظیم ماتريس تعداد آزمایش ها، بر اساس تعداد متغیرهای اثرگذار و سطح تغییر آن ها استفاده می شود. با استفاده از این ماتريس، می توان بیشترین اطلاعات را با حداقل تعداد آزمایش ها و یا محاسبات به دست آورد؛ به گونه ای که تأثیر تمامی متغیرها به همراه

سطح تغییراتشان در این راستا لحاظ شود [۲۷]. برای بررسی داده ها در این روش، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می شود. در این نوع بررسی سه حالت ممکن است مورد نظر باشد، مقدار کمتر بهتر است (LB)^۱، مقدار بیشتر بهتر است (HB)^۲ و یا مقادیر نامی بهتر است (NB)^۳ که هر کدام از سه مورد بر اساس تأثیر متغیرهای مورد مطالعه می تواند مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال در مبدل های حرارتي هدف افزایش انتقال حرارت به همراه کاهش افت فشار است. پس برای متغیر اول (HB) و برای متغیر دوم (LB) انتخاب می شود.

۳-۴-۲- طراحی ماتريس تاگوچی

هدف اصلی در استفاده از روش تاگوچی، به دست آوردن بهترین اطلاعات از میان داده های موجود، برای رسيدن به شرایط بهينه است. دو ابزار مهم در این راستا، ایجاد ماتريس متعامد تاگوچی برای دستیابی به تعداد آزمایش های مورد نیاز با در نظر گرفتن کلیه متغیرها و سطح تغییرشان و همچنین محاسبه نسبت سیگنال به نویز برای ارزیابی تأثیر پارامترها و انتخاب نقطه بهينه می باشند [۲۸-۳۰]. پارامتر سیگنال در حقیقت همان پارامتر قابل کنترل و نویز پارامتر غیر قابل کنترل هستند. جدول ۱، متغیرهای اثرگذار و سطح تغییرات آن را نشان می دهد.

در این تحقیق، دو پارامتر برای بهينه سازي، ضريب انتقال حرارت به صورت HB و افت فشار به صورت LB در نظر گرفته شده است. برای بررسی دقیق تر تأثیر سيال عامل پایه، آب و اتیلن گلیکول را به صورت مستقل مورد بررسی قرار داده، در نهایت این دو با هم مقایسه می شود. با توجه به تعداد پارامترهای اثرگذار و سطح تغییرات آن تعداد اجزای برنامه با سيال عامل آب در جدول ۲ و سيال عامل اتیلن گلیکول در جدول ۳ تعیین می شود.

در جداول ۲، ضريب بهره براساس رابطه ۱۷ بدست آمده که در آن سيال پایه آب بوده، اما برای محاسبه ضريب بهره در جدول ۳ از مشخصات سيال اتیلن گلیکول به عنوان سيال پایه استفاده شده است.

¹ Lower the Better

² Higher the Better

³ Nominal the Better

جدول ۱- متغیرهای اثرگذار و سطح تغییرات آنها

نوع متغیر	علامت اختصاری	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
جنس نانوذره	A	نقره	اکسید آلومینیوم	مس	اکسید تیتانیوم
درصد حجمی نانوذره	B	۰/۵	۲	۵	۸
جنس کانال	C	آلومینیوم	مس	---	---
سیال پایه	D	آب	اتیلن گلیکول	---	---

جدول ۳- طراحی تعداد آزمایش‌ها براساس ماتریس پیشنهادی L₁₆ و نتایج ضریب بهره برای نانوسیال اتیلن گلیکول

ضریب بهره	متغیرهای اثرگذار			شماره آزمایش
	A	B	C	
۰/۶۵۳۸	۱	۱	۱	۱
۴/۱۶۱۴	۱	۲	۱	۲
۱/۲۴۶۶	۱	۳	۲	۳
۰/۹۶۲۹	۱	۴	۲	۴
۰/۶۷۹۲	۲	۱	۱	۵
۰/۶۶۱۶	۲	۲	۱	۶
۱/۲۷۴۰	۲	۳	۲	۷
۰/۹۹۰۹	۲	۴	۲	۸
۷/۳۳۷۵	۳	۱	۲	۹
۲/۳۳۶۳	۳	۲	۲	۱۰
۰/۶۵۶۵	۳	۳	۱	۱۱
۰/۶۲۲۰	۳	۴	۱	۱۲
۳/۰۴۳۶	۴	۱	۲	۱۳
۱/۲۲۳۴	۴	۲	۲	۱۴
۰/۵۸۷۷	۴	۳	۱	۱۵
۰/۵۵۶۱	۴	۴	۱	۱۶

جدول ۲- طراحی تعداد آزمایش‌ها براساس ماتریس پیشنهادی L₁₆ و نتایج ضریب بهره برای نانوسیال آب

ضریب بهره	متغیرهای اثرگذار			شماره آزمایش
	A	B	C	
۱/۰۱۳۷	۱	۱	۱	۱
۰/۵۵۰۶	۱	۲	۱	۲
۱/۲۵۹۴	۱	۳	۲	۳
۰/۸۹۸۰	۱	۴	۲	۴
۰/۹۷۸۳	۲	۱	۱	۵
۰/۵۶۶۶	۲	۲	۱	۶
۱/۳۶۶۵	۲	۳	۲	۷
۰/۹۷۱۰	۲	۴	۲	۸
۹/۶۷۶۵	۳	۱	۲	۹
۲/۷۴۱۱	۳	۲	۲	۱۰
۰/۴۵۹۴	۳	۳	۱	۱۱
۰/۴۱۴۳	۳	۴	۱	۱۲
۱۰/۱۱۵۹	۴	۱	۲	۱۳
۲/۷۹۱۶	۴	۲	۲	۱۴
۰/۴۰۰۷	۴	۳	۱	۱۵
۰/۳۵۴۹	۴	۴	۱	۱۶

۴- نتایج

نتایج حاصل از این تحقیق، با استفاده از روش عددی بدست آمده است. برای حل عددی از روش حجم محدود با الگوریتم سیمپل استفاده شده، همچنین برای گسسته‌سازی مومنتم طرح آپویند مرتبه دو به کار گرفته شده است.

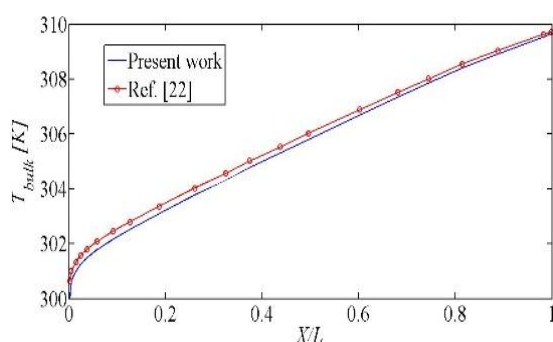
۴-۱- استقلال شبکه و صحت سنجی

در این پژوهش، انتقال حرارت چاه حرارتی میکروکانالی با استفاده از نانوسیالات مختلف، با درصد حجمی مختلف و همچنین در دو نوع کانال از جنس مس و آلومینیوم، به روش

عددی و سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به اینکه چاه حرارتی از کانال‌های موازی هم تشکیل شده است، فقط نیمی از یک کانال با ابعاد ارائه شده در شکل ۱ بررسی شده است. به علت اینکه شکل کانال مستطیلی است، از شبکه منظم چهار وجهی استفاده شده است که در کناره دیواره‌ها و همچنین ورودی جریان متراکم‌تر هستند. شکل ۲، یک نمونه از شبکه ایجاد شده را نشان می‌دهد.

دامنه حل شامل، دو قسمت سیال و جامد است که شرایط مرزی آن در بخش ۳ ارائه شده است. برای بررسی استقلال شبکه از ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۶۰۰۰۰

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، نمودار دما در شبکه‌های ۳۰۰۰۰، ۶۰۰۰۰ و ۱۲۰۰۰۰ تقریباً روی هم منطبق شده است؛ بنابراین شبکه با ۳۰۰۰۰ گره برای محاسبات انتخاب شد. جهت صحت سنجی در شکل ۴، دمای کپه‌ای آب در کانال آلومینیومی تحت شرایط مشابه با نتایج صباح و همکاران [۲۲] مقایسه شد. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف دما در بیشترین حالت حدود ۰.۳ درجه سانتی‌گراد بوده که خطای نسبی کمتر از ۰.۱ درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه دمای کپه‌ای آب در کانال آلومینیومی کار حاضر و مرجع [۲۲]

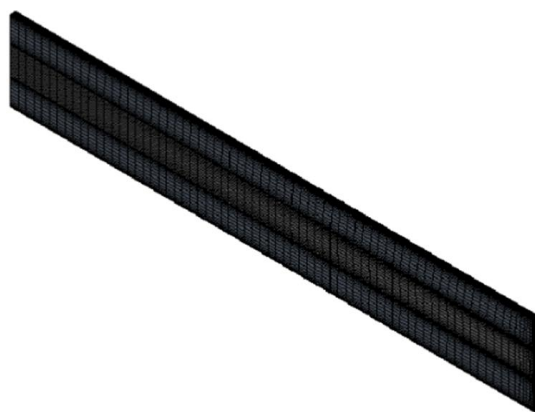
۴-۲- نتایج عددی

همان‌طور که در بخش ۴ مطرح شد، برای بهینه‌سازی چاه حرارتی مذکور از روش تاگوچی استفاده شده است. به دلیل اینکه خواص سیال پایه، آب و اتیلن‌گلیکول باهم تفاوت زیادی دارند، نانوسیال آب و اتیلن‌گلیکول به صورت مستقل از هم مورد مطالعه قرار گرفته، در انتها با هم مقایسه شدند. در جدول ۴، مقدار سیگنال به نویز برای آزمایش‌های مختلف در سیال پایه آب دیده می‌شود.

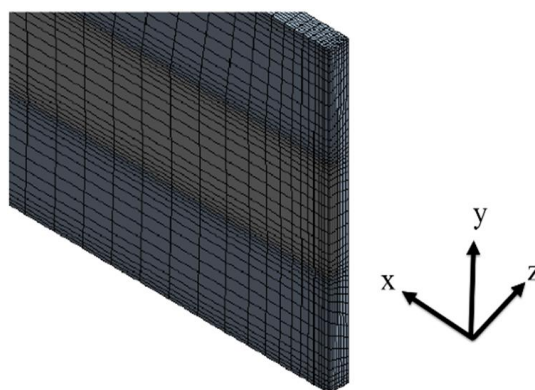
بیشترین مقدار سیگنال به نویز بهترین حالت را نشان می‌دهد که مطابق جدول ۴ مربوط به آزمایش شماره ۱۳، یعنی نانوسیال آب اکسید تیتانیوم، با درصد حجمی نیم درصد و جنس کانال مس است. در این حالت، راندمان حرارتی ۱۰.۱۱۵۹ است.

شکل ۵، مقادیر سیگنال به نویز مربوط به راندمان حرارتی را در نانوسیال آب را به تفکیک پارامترهای اثرگذار نشان می‌دهد.

و ۱۲۰۰۰۰ گره استفاده شده است و نمودار تغییرات دمای کپه‌ای آب برحسب طول کانال ترسیم و در شکل ۳ با هم مقایسه شده است.

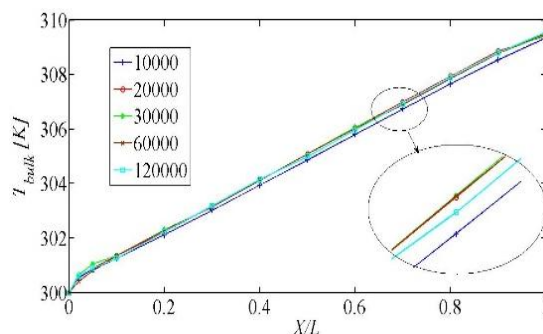


(الف)

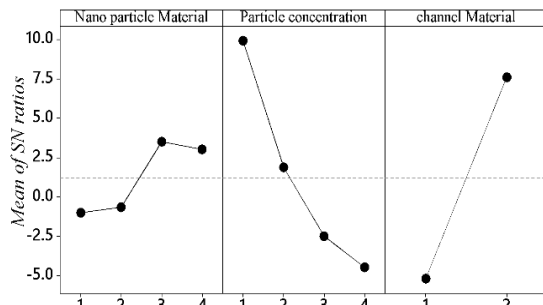


(ب)

شکل ۲- نمونه شبکه تولیدشده مورداستفاده در حل عدد (الف) نمای کلی سه‌بعدی و (ب) ناحیه ورودی



شکل ۳- تغییرات دمای کپه‌ای برحسب طول بی‌بعد چاه حرارتی برای تعداد گره‌های مختلف شبکه



شکل ۵- نمودار تغییرات سیگنال به نویز به تفکیک پارامترهای اثرگذار برای راندمان بهینه و سیال پایه آب

همان طور که ملاحظه می شود، بیشترین تأثیر را درصد حجمی نانوذرات داشته، پس از آن جنس کانال از اهمیت دوم برخوردار بوده و در نهایت جنس نانوذرات در پایین ترین درجه اهمیت قرار دارند. مقادیر محاسبه شده سیگنال به نویز برای نانوسیال اتیلن گلیکول در جدول ۵ دیده می شود. همان طور که در جدول قابل مشاهده است، بهترین راندمان در زمان استفاده از نانوسیال اتیلن گلیکول متعلق به سطر ۹ بوده که نشان می دهد، بهترین ترکیب شامل، نانوسیال، اتیلن گلیکول- مس نیم درصد به همراه کانال مسی است.

جدول ۵- نتایج سیگنال به نویز مربوط به راندمان حرارتی بر اساس ماتریس پیشنهادی L_{16} برای نانوسیال اتیلن گلیکول

سیگنال به نویز (SN)	متغیرهای اثرگذار			شماره آزمایش
	A	B	C	
-۳/۶۹۱۰	۱	۱	۱	۱
۱۲/۳۸۴۸	۱	۲	۱	۲
۱/۹۱۴۳	۱	۳	۲	۳
-۰/۳۲۸۶	۱	۴	۲	۴
-۳/۳۵۹۸	۲	۱	۱	۵
-۳/۵۸۸۲	۲	۲	۱	۶
۲/۱۰۳۲	۲	۳	۲	۷
-۰/۰۷۹۴	۲	۴	۲	۸
۱۷/۳۱۱۰	۳	۱	۲	۹
۷/۳۷۰۸	۳	۲	۲	۱۰
-۳/۶۵۵۴	۳	۳	۱	۱۱
-۴/۱۲۴۳	۳	۴	۱	۱۲
۹/۶۶۷۸	۴	۱	۲	۱۳
۱/۷۵۱۵	۴	۲	۲	۱۴
-۴/۶۱۶۶	۴	۳	۱	۱۵
-۵/۰۹۶۸	۴	۴	۱	۱۶

جدول ۴- نتایج سیگنال به نویز مربوط به راندمان حرارتی بر اساس ماتریس پیشنهادی L_{16} برای نانوسیال آب

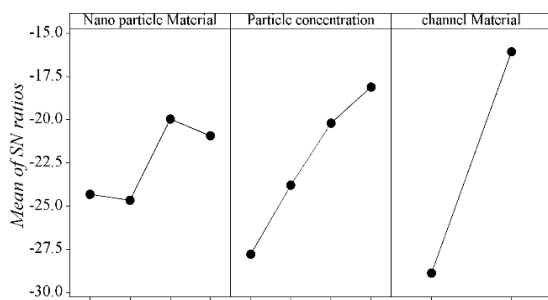
سیگنال به نویز (SN)	متغیرهای اثرگذار			شماره آزمایش
	A	B	C	
۰/۱۱۷۹	۱	۱	۱	۱
-۵/۱۸۳۰	۱	۲	۱	۲
۲/۰۰۳۵	۱	۳	۲	۳
-۱/۰۰۴۷	۱	۴	۲	۴
-۰/۱۹۴۵	۲	۱	۱	۵
-۴/۹۳۴۵	۲	۲	۱	۶
۲/۷۱۲۰	۲	۳	۲	۷
-۰/۲۵۶۰	۲	۴	۲	۸
۱۹/۷۱۴۴	۳	۱	۲	۹
۸/۷۵۸۴	۳	۲	۲	۱۰
-۶/۷۵۶۰	۳	۳	۱	۱۱
-۷/۶۷۳۵	۳	۴	۱	۱۲
۲۰/۱۰۰۱	۴	۱	۲	۱۳
۸/۹۱۷۱	۴	۲	۲	۱۴
-۷/۹۴۲۶	۴	۳	۱	۱۵
-۸/۹۹۸۸	۴	۴	۱	۱۶

شکل ۶، تغییرات سیگنال به نویز را به تفکیک هر یک از پارامترها نشان می دهد. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود، اهمیت هر سه پارامتر، جنس کانال، درصد حجمی و جنس نانوذرات همانند هم می باشند. در هر دو نمودار ۵ و ۶ مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی نانوذرات، سبب کاهش راندمان می شود که می توان علت آن را در تأثیر بیشتر

غلظت نانوسیال بر افت فشار نسبت به بهبود انتقال حرارت دانست. از آنجاکه یکی از اهداف استفاده از چاه حرارتی پایین نگه داشتن دمای سی پی یو است و توان پمپ در این گونه وسایل به علت کوچکی پایین بوده و انرژی مصرفی از اهمیت بالایی برخوردار نیست، لذا می توان مستقل از توان پمپاژ موردنیاز، به تحلیل نتایج بر اساس پایین ترین دمای سطح

می‌دهد و همچنین با افزایش درصد حجمی نانوذرات نیز، میزان کاهش دمای سطح مناسب‌تر خواهد بود.

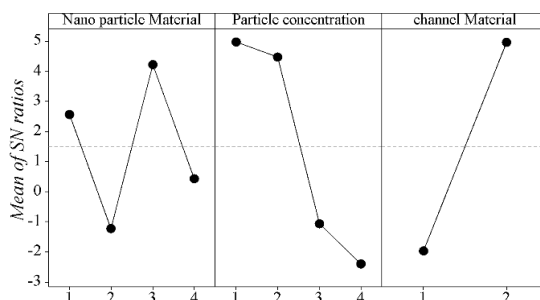
جدول ۷، بیشینه سیگنال به نویز را در سیال پایه اتیلن-گلیکول، ردیف ۲ معرفی می‌کند که مفهوم آن، نانوسیال اتیلن‌گلیکول-نقره ۲ درصد با کانال آلومینیمی است. با مراجعه به شکل ۸ دیده می‌شود، در این سیال پایه نیز همانند آب با افزایش درصد حجمی نانوذرات انتقال حرارت مناسب‌تر خواهد بود.



شکل ۷- نمودار تغییرات سیگنال به نویز به تفکیک پارامترهای اثرگذار برای دمای بهینه و سیال پایه آب

تماس سی‌پی‌یو و یا به عبارتی بیشترین مقدار نسبت دمای تفاضلی بی‌بعد به دمای بی‌بعد سیال پایه پرداخت.

جدول ۶ نشان می‌دهد که بیشینه سیگنال به نویز مربوط به آزمایش شماره ۸ بوده که در آن از نانوسیال آب-اکسید آلومینیم ۸ درصد و کانال از جنس مس استفاده شده است. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر هر یک از پارامترها به تفکیک نمودار ۷ ارائه شده است. بر اساس نمودارهای شکل مذکور، کانال مسی از کانال آلومینیمی انتقال حرارت بهتری را نشان



شکل ۶- نمودار تغییرات سیگنال به نویز به تفکیک پارامترهای اثرگذار برای راندمان بهینه و سیال پایه اتیلن‌گلیکول

جدول ۷- نتایج سیگنال به نویز مربوط به نسبت دمای بی‌بعد تفاضلی به دمای بی‌بعد سیال پایه (رابطه ۱۵) بر اساس ماتریس پیشنهادی I_{16} برای نانوسیال اتیلن‌گلیکول

شماره آزمایش	نسبت دمای بی‌بعد تفاضلی به دمای بی‌بعد سیال پایه (θ_p)	سیگنال به نویز (SN)
۱	۰/۰۰۸۱۹۷	-۴۱/۷۲۷۲
۲	۰/۲۰۸۷۲۴	-۱۳/۶۰۸۶
۳	۰/۱۵۶۳۳۲	-۱۶/۱۱۹۵
۴	۰/۱۹۳۲۰۸	-۱۴/۲۷۹۵
۵	۰/۰۰۸۴۸۹	-۴۱/۴۲۲۴
۶	۰/۰۳۳۰۸۰	-۲۹/۶۰۸۸
۷	۰/۱۵۹۲۵۱	-۱۵/۹۵۸۴
۸	۰/۱۹۸۱۸۵	-۱۴/۰۸۵۶
۹	۰/۰۹۱۹۲۰	-۲۰/۷۳۱۸
۱۰	۰/۱۱۷۰۹۶	-۱۸/۶۲۹۲
۱۱	۰/۰۸۲۲۶۰	-۲۱/۶۹۶۲
۱۲	۰/۱۲۴۷۰۷	-۱۸/۰۸۲۲
۱۳	۰/۰۳۸۰۵۶	-۲۸/۳۹۱۵
۱۴	۰/۰۶۱۱۸۳	-۲۴/۲۶۷۴
۱۵	۰/۰۷۳۴۷۸	-۲۲/۶۷۶۹
۱۶	۰/۱۱۱۲۴۱	-۱۹/۰۷۴۷

جدول ۶- نتایج سیگنال به نویز مربوط به نسبت دمای بی‌بعد تفاضلی به دمای بی‌بعد سیال پایه (رابطه ۱۵) بر اساس ماتریس پیشنهادی I_{16} برای نانوسیال آب

شماره آزمایش	نسبت دمای بی‌بعد تفاضلی به دمای بی‌بعد سیال پایه (θ_p)	سیگنال به نویز (SN)
۱	۰/۰۱۳۷۳۹	-۳۷/۲۴۰۹
۲	۰/۰۲۹۹۳۱	-۳۰/۴۷۷۵
۳	۰/۱۷۱۲۴۶	-۱۵/۳۲۷۶
۴	۰/۱۹۳۸۱۷	-۱۴/۲۵۲۱
۵	۰/۰۱۲۲۲۶۷	-۳۸/۲۲۵۳
۶	۰/۰۲۸۴۵۹	-۳۰/۹۱۵۵
۷	۰/۱۷۱۷۳۷	-۱۵/۳۰۲۷
۸	۰/۱۹۵۲۸۹	-۱۴/۱۸۶۴
۹	۰/۱۲۹۰۴۸	-۱۷/۷۸۵۰
۱۰	۰/۱۴۶۲۲۲	-۱۶/۶۹۹۸
۱۱	۰/۰۶۱۳۳۵	-۲۴/۲۴۵۹
۱۲	۰/۰۸۸۳۳۲	-۲۱/۰۷۸۶
۱۳	۰/۱۲۷۵۷۶	-۱۷/۸۸۴۶
۱۴	۰/۱۴۰۸۲۴	-۱۷/۰۲۶۴
۱۵	۰/۰۵۰۵۴	-۲۵/۹۲۷۳
۱۶	۰/۰۷۱۶۳۹	-۲۲/۸۹۷۰

دیواره پایین چاه حرارتی با منبع گرم با تولید حرارت ثابت ۱۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع در تماس است و همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، به دلیل این‌که آب نسبت به اتیلن‌گلیکول می‌تواند جذب حرارتی بیشتری داشته باشد، دمای سی‌پی‌یو در طول چاه حرارتی زمانی که از سیال آب استفاده می‌شود، حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به اتیلن‌گلیکول کمتر بوده، همچنین به علت این‌که لزج آب از اتیلن‌گلیکول کمتر است، مطابق شکل ۱۰، افت فشار اتیلن-گلیکول نیز حدوداً ۱۰ برابر بیشتر از آب است.

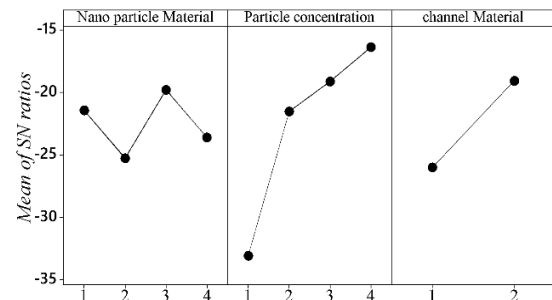
پس می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از آب نسبت به اتیلن‌گلیکول برتری قابل‌توجهی دارد. برای بررسی نهایی نتایج حاصل، کانتورهای دما و فشار در چهار حالت اتیلن-گلیکول خالص، آب خالص، نانوسیال آب-اکسید آلومینیم ۸ درصد و نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم ۵ درصد در شکل ۱۱ باهم مقایسه شدند. همان‌طور که دیده می‌شود، استفاده از اتیلن‌گلیکول سبب می‌شود تا دمای حداکثر کانال به بیش از ۳۳۱ کلوین برسد و همچنین اختلاف فشار مورد نیاز برای به جریان درآوردن سیال در این حالت نیز حدود ۲۱۵ کیلو پاسکال است؛ در صورتی‌که در آب خالص حداکثر دما ۳۱۸ کلوین و اختلاف فشار مورد نیاز تقریباً ۱۴ کیلو پاسکال است. افزودن ۸ درصد نانوذرات اکسید آلومینیم، سبب کاهش حداکثر دما به ۳۱۶.۴ کلوین شده، اما سبب افزایش اختلاف فشار به بیش از ۱۷ کیلو پاسکال می‌شود. نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم ۵ درصد می‌تواند دمای حداکثر را به ۳۱۷ کلوین برساند که نسبت به افزودن اکسید آلومینیم ۸ درصد تفاوت قابل‌توجهی ندارد، اما اختلاف فشار در این حالت تقریباً به ۱۶ کیلو پاسکال می‌رسد که در مقایسه با آب-اکسید آلومینیم شرایط بهتری دارد. این بررسی نیز نتایج خروجی از تاگوچی را تأیید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

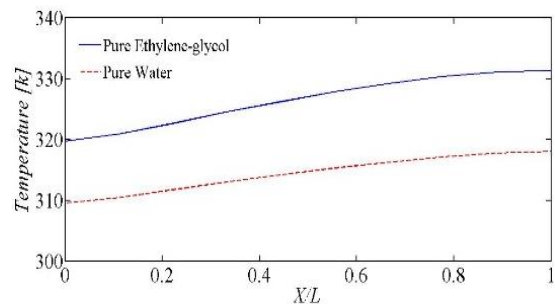
در این مقاله، عملکرد یک چاه حرارتی با نانوسیالات مختلف، با دو سیال پایه آب و اتیلن‌گلیکول به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این مقاله، یافتن بهترین راندمان برای چاه حرارتی با استفاده از روش تاگوچی به روش عددی حجم محدود در دو جنس کانال با نانوسیالات مختلف و با درصد حجمی متفاوت است. افزایش نانوذرات در سیال

با مراجعه به شکل ۸ دیده می‌شود، در این سیال پایه نیز همانند آب با افزایش درصد حجمی نانوذرات انتقال حرارت مناسب‌تر خواهد بود.

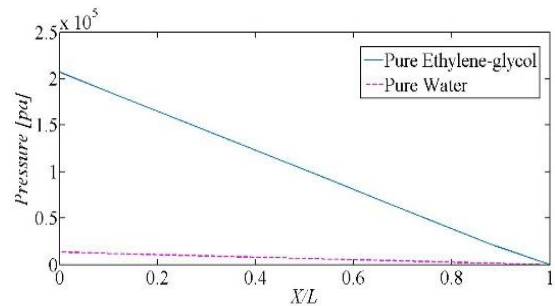
برای مقایسه دو سیال پایه آب و اتیلن‌گلیکول در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب، تغییرات دمای سطح سی‌پی‌یو و فشار سیال نسبت به طول چاه حرارتی ترسیم شده است.



شکل ۸- نمودار تغییرات سیگنال به نویز به تفکیک پارامترهای اثرگذار برای دمای بهینه و سیال پایه اتیلن‌گلیکول



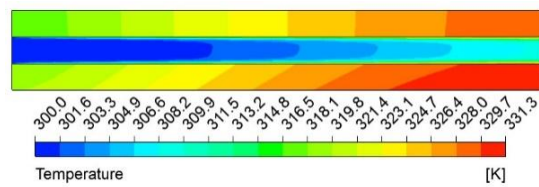
شکل ۹- مقایسه تغییرات دمای سطح منبع گرم (مانند سی‌پی‌یو) در دو سیال پایه اتیلن‌گلیکول و آب



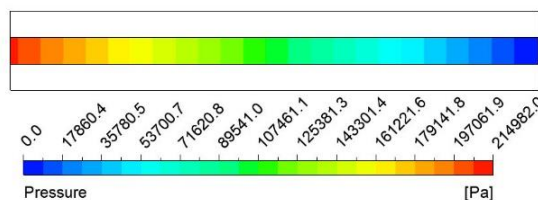
شکل ۱۰- مقایسه تغییرات فشار برای دو سیال پایه اتیلن-گلیکول و آب

تعریف جدیدی از راندمان ارائه شده است که طی آن تأثیر هر دو عامل افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار به عنوان عوامل بهینه مدنظر قرار گیرد.

پایه از یک طرف سبب افزایش انتقال حرارت شده، از طرف دیگر، سبب افزایش افت فشار و در نتیجه نیاز بیشتر به انرژی برای به گردش درآوردن سیال عامل می‌شود. به همین سبب

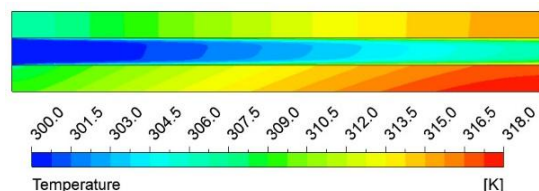


a1

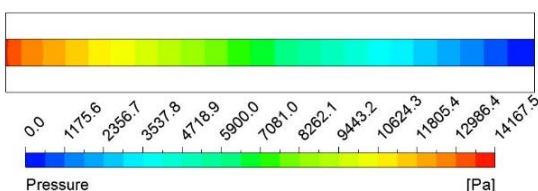


a2

(الف)

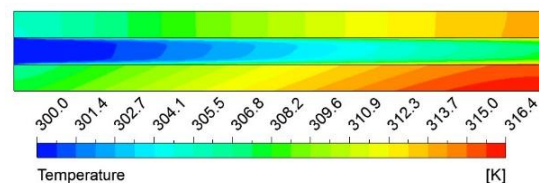


b1

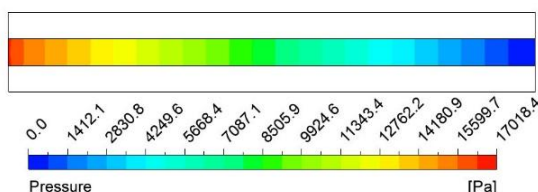


b2

(ب)

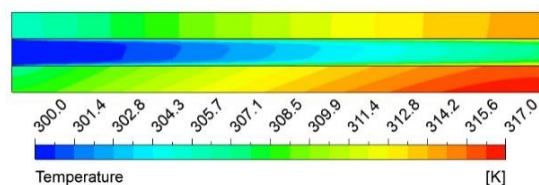


c1

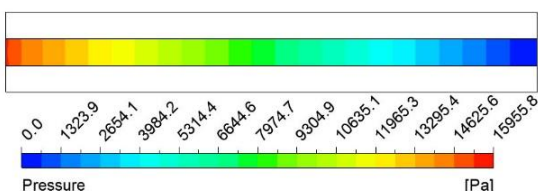


c2

(ج)



d1



d2

(د)

شکل ۱۱- کانتورهای فشار و سرعت برای الف) اتیلن گلیکول خالص، ب) آب خالص، ج) نانوسیال آب-اکسید آلومینیم ۸ درصد و د) نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم ۵ درصد در کانال مسی

افزایش درصد حجمی نانوسیال، سبب بهبود انتقال حرارت شده، اما با افزایش لزجت سیال و در نتیجه افت فشار بیشتر، سبب افزایش توان مورد نیاز برای به گردش درآوردن سیال و در نهایت، باعث کاهش راندمان چاه حرارتی می‌شود.

تحلیل خروجی عددی با استفاده از جداول تاگوچی نشان می‌دهد:

در هر دو سیال پایه آب و اتیلن گلیکول افزودن اکسید تیتانیوم، بیشترین تأثیر مثبت را در راندمان چاه حرارتی دارد.

- μ لزجت دینامیکی سیال (kg/m.s)
- ϕ یک متغیر عمومی
- φ نسبت حجمی نانوذرات به نانوسیال
- θ اختلاف دمای سطح منبع حرارتی به دمای ورودی سیال (K)
- θ_r نسبت دمای بی‌بعد
- η ضریب بهره
- زیر نویس‌ها**
- bf سیال پایه
- in ورودی
- nf نانوسیال
- p نانوذرات
- s جامد
- ۸- مراجع
- [1] Jamarani A, Maerefat M, Eshagh Nimvari (2016) Numerical study of heat transfer in double-tube heat exchanger filled with porous material in a turbulent fluid flow. Modares Mech Eng 16(3): 173-184. (In persian)
- [2] Shakiba A, Gorji M (2015) Numerical investigation of ferrofluid flow and heat transfer characteristics through a double pipe heat exchanger. Modares Mech Eng 15(2): 41-52. (In persian)
- [3] Tuckerman DB, Pease R (1981) High-performance heat sinking for VLSI. Electron Devic Lett 2(5): 126-129.
- [4] Ho CJ, Wei L, Li Z (2010) An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid. Appl Therm Eng 30(2): 96-103.
- [5] Salimi Gachuiee M, Peyghambarzadeh SM, Hashemabadi SH, Chabi A (2015) Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid through the micro heat exchanger. Modares Mech Eng 15(2): 270-280. (In persian).
- [6] Xuan Y, Li Q (2000) Heat transfer enhancement of nanofluids. Int J Heat Fluid Fl 21(1): 58-64.
- [7] Lee J, Mudawar I (2007) Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. Int J Heat Mass Tran 50(3): 452-463.
- [8] Chein R, Huang G (2005) Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. Appl Therm Eng 25(17): 3104-3114.
- استفاده از کانال از جنس مس نسبت به آلومینیوم سبب افزایش مؤثرتر هر دو عامل انتقال حرارت و راندمان می‌شود.
- ترکیبات مختلف نانوذرات با سیال پایه اتیلن‌گلیکول، در مقابل نانوسیالات آب بیش از ده برابر افت فشار ایجاد می‌کنند.
- استفاده از نانوسیال با پایه اتیلن‌گلیکول نسبت به آب تحت شرایط مشابه، باعث افزایش دمای سطح سی پی یو، بیش از ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود.
- بنابراین ضمن تحلیل جداول و نمودارهای خروجی ناگوچی می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از نانوسیالات با سیال پایه اتیلن‌گلیکول توجیه‌پذیر نیست؛ همچنین برای نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم ۰/۵ درصد و کانال مسی بهترین راندمان را برای چاه حرارتی دارد؛ اما چنانچه هدف صرفاً کاهش دمای سی‌پی‌یو باشد، نانوسیال آب-اکسید آلومینیم ۸ درصد در کانال مسی نتیجه بهتری را به همراه دارد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری به‌واسطه حمایت از این کار تحقیقاتی، اعلام می‌نمایند.

۷- فهرست علائم

- c_p ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
- k ضریب انتقال حرارت هدایتی (J/m.K)
- n مختصه بعد عمود به سطح (m)
- p فشار (pa)
- T دما (K)
- u مؤلفه سرعت در امتداد محور xها (m/s)
- v مؤلفه سرعت در امتداد محور yها (m/s)
- w مؤلفه سرعت در امتداد محور zها (m/s)
- W توان موردنیاز برای عبور سیال از چاه حرارتی (w)
- W_r توان بی‌بعد

علائم یونانی

- β ضریب ثابت
- ρ دانسیته سیال (kg/m³)

- exchangers by Taguchi method. *Appl Therm Eng* 85: 334-339.
- [20] Ghassabi G, Kahrom M (2014) Experimental Investigation of dissimilarity between heat transfer and momentum transfer in a distributed boundary layer using design of experiments method. *Modares Mech Eng* 15(1): 323-331. (In persian)
- [21] Milani Shirvan K, Mamourian M (2015) Numerical investigation and optimization of mixed convection and entropy generation in square cavity with lid-driven. *Modares Mech Eng* 15(8): 164-174. (In persian)
- [22] Sabbah R, Farid MM, Al-Hallaj S (2009) Micro-channel heat sink with slurry of water with micro-encapsulated phase change material: 3D-numerical study. *Appl Therm Eng* 29(2): 445-454.
- [23] Das SK, Choi SU, Patel HE (2006) Heat transfer in nanofluids—a review. *Heat Transfer Eng* 27(10): 3-19.
- [24] Drew DA, Passman SL (2006) *Theory of multicomponent fluids*. Springer Science & Business Media.
- [25] Xuan Y, Roetzel W (2000) Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int J Heat Mass Tran* 43(19): 3701-3707.
- [26] Yu W, Choi S (2003) The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *J Nanopart Res* 5(1-2): 167-171.
- [27] Taguchi G, Jugulum R (2002) *The Mahalanobis-Taguchi strategy: A pattern technology system*. John Wiley & Sons.
- [28] George P, Pillai N, Shah N (2004) Optimization of shot peening parameters using Taguchi technique. *J Mater Process Tech* 153: 925-930.
- [29] Montgomery DC (2008) *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- [30] Celik N, Turgut E (2012) Design analysis of an experimental jet impingement study by using Taguchi method. *Heat Transfer Eng* 48(8): 1407-1413.
- [9] Wen D, Ding Y (2004) Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *Int J Heat Mass Tran* 47(24): 5181-5188.
- [10] Li J, Kleinstreuer C (2008) Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. *Int J Heat Fluid FI* 29(4): 1221-1232.
- [11] Tsai TH, Chein R (2007) Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks. *Int J Heat Fluid FI* 28(5): 1013-1026.
- [12] Chen CH, Ding CY (2011) Study on the thermal behavior and cooling performance of a nanofluid-cooled microchannel heat sink. *Int J Therm Sci* 50(3): 378-384.
- [13] Mohammed H, Gunnasegaran P, Shuaib N (2011) Influence of various base nanofluids and substrate materials on heat transfer in trapezoidal microchannel heat sinks. *Int J Heat Mass Tran* 38(2): 194-201.
- [14] Jankrajang W (2003) *Design of Experiment Approach for Improving Rice Milling Quality*. Kasetsart University
- [15] Um JM, Kim KS, Yam BJ, Hwang H (1996) Determination of an optimal configuration of operating policies for direct-input-output manufacturing systems using the Taguchi method. *Comput Ind Eng* 31(3): 555-560.
- [16] Van Nostrand RC (2002) Design of experiments using the taguchi approach: 16 steps to product and process improvement. *Technometrics* 44(3): 289-289.
- [17] Sivasakthivel T, Murugesan K, Thomas H (2014) Optimization of operating parameters of ground source heat pump system for space heating and cooling by Taguchi method and utility concept. *Appl Energ* 116: 76-85.
- [18] Verma V, Murugesan K (2014) Optimization of solar assisted ground source heat pump system for space heating application by Taguchi method and utility concept. *Energ Buildings* 82: 296-309.
- [19] Du T, Du W, Che K, Cheng L (2015) Parametric optimization of overlapped helical baffled heat