

بررسی اثر جهت قرار گیری هیتر و کولر بر عملکرد یک مدار جابه‌جایی طبیعی مینیاتوری با نانو سیال آب-مس

سید مسعود سیدی^{۱*}، عبدالستار دوگونچی^۲، مهدی هاشمی تیله نوئی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران
^۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۴-۰۴
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۱۵
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۳۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۱۳

کلمات کلیدی:

مدار جابه‌جایی مینیاتوری
نرخ دبی جرمی
هیتر و کولر
نانو سیال

خلاصه: هدف اصلی این مقاله، بررسی اثرات جهت قرارگیری هیتر و کولر بر دبی جرمی مدار و توزیع دما در مدار جابه‌جایی طبیعی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، معادلات حاکم بر مدار جابه‌جایی طبیعی - بقاء جرم، مومنتم و انرژی - به صورت بدون بعد نوشته می‌شوند. نانو سیال آب - مس به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده و تأثیر درصد نانو ذرات بر دبی جرمی بررسی می‌گردد. همچنین، اثرات دیگر پارامترها مانند قطر لوله، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، و توان هیتر بر روی نرخ دبی جرمی مدار و توزیع دما بررسی می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ۲۰ درصدی قطر لوله‌های مدار برای تمام جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر، به طور متوسط باعث افزایش ۴۳ درصدی دبی جرمی مدار می‌گردد. در توان هیتر ۵۰ W، هنگامی که درصد نانو ذره از مقدار صفر به ۲٪ افزایش می‌یابد، دبی جرمی تقریباً ۱۲/۸٪ افزایش می‌یابد. هنگامی که توان هیتر از ۲۰ W به ۳۰ W افزایش می‌یابد (۵۰٪ افزایش) در همه حالت‌ها، دبی جرمی حالت پایا تقریباً ۲۲/۴٪ افزایش می‌یابد. در توان هیتر ۲۰ W و با ۲٪ نانو ذره، دما در انتهای هیتر برای حالت هیتر افقی - کولر افقی و برای حالت هیتر عمودی - کولر عمودی به ترتیب ۳۴ °C و ۹۷ °C است.

۱- مقدمه

در یک مدار جابه‌جایی طبیعی، حرارتی که در منبع حرارتی دما بالا (هیتر) تولید می‌شود توسط سیال عامل به سمت منبع حرارتی دما پائین (کولر) انتقال داده می‌شود. مدارهای جابه‌جایی طبیعی معمولاً در دو حالت ابعاد بزرگ و ابعاد کوچک (که در این جا به اختصار مینیاتوری نامیده می‌شوند) بررسی می‌گردند. یکی از کاربردهای اصلی مدار جابه‌جایی طبیعی در انواع راکتورهای شکافت هسته‌ای است. انواع راکتورهای شکافت هسته‌ای مانند راکتورهای آب سبک تحت فشار^۱، راکتورهای آب جوشان^۲، خنک کننده مذاب^۳ از کاربردهای اصلی مدار جابه‌جایی طبیعی با ابعاد بزرگ می‌باشند [۱]. به تازگی مدارهای جابه‌جایی طبیعی مینیاتوری به عنوان یک سیستم خنک کننده به دنیای الکترونیک و دیجیتال معرفی شده‌اند. این مدارها می‌توانند به

عنوان راه حلی مناسب در خنک کنندگی سلول‌های فتوولتائیک و ریزپردازنده‌ها به کار گرفته شوند. اختلاف دما بین منبع گرم (هیتر) و منبع سرد (کولر) محرک اصلی برای چرخش سیال عامل در یک مدار جابه‌جایی طبیعی می‌باشد، زیرا اختلاف دما باعث تغییر چگالی سیال عامل و به وجود آمدن نیروی شناوری می‌گردد. در حالت پایا، نیروی شناوری و نیروی اصطکاک در امتداد مدار با یکدیگر موازنه می‌شوند. هر چقدر دبی جرمی جریان بیشتر باشد، توانایی انتقال حرارت مدار جابه‌جایی طبیعی افزایش می‌یابد. یکی از عوامل اثر گذار بر دبی جرمی جریان، جهت قرار گیری هیتر و کولر در مدار جابه‌جایی طبیعی می‌باشد. در یک مدار طبیعی مستطیل شکل، چهار حالت قرارگیری هیتر و کولر عبارتند از: (الف) هیتر افقی - کولر افقی^۴، (ب) هیتر افقی - کولر عمودی^۵، (ج) هیتر عمودی - کولر افقی^۶ و (د) هیتر عمودی - کولر عمودی^۷. شکل ۱ شماتیک ساده مدار جابه‌جایی طبیعی را برای چهار

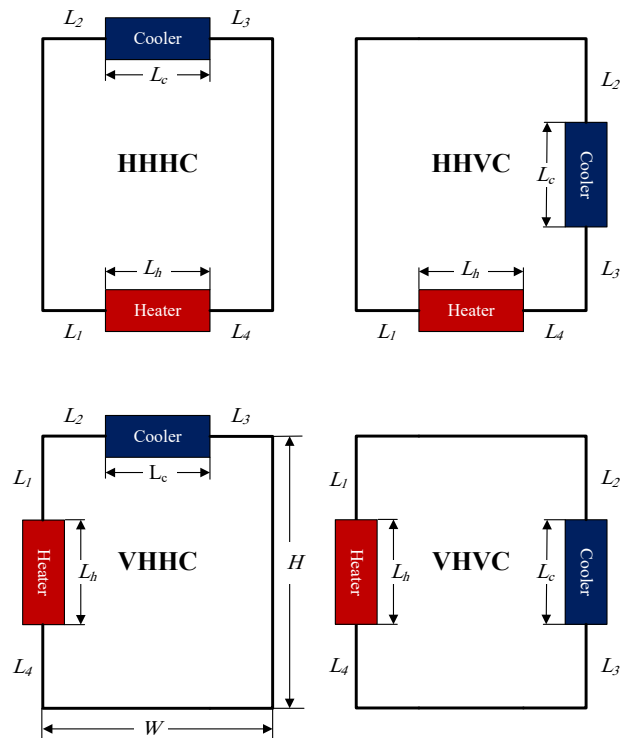
- 4 Horizontal Heater and Horizontal Cooler (HHHC)
- 5 Horizontal Heater and Vertical Cooler (HHVC)
- 6 Vertical Heater and Horizontal Cooler (VHHC)
- 7 Vertical Heater and Vertical Cooler (VHVC)

- 1 Pressurized Water Reactor (PWR)
- 2 Boiling Water Reactor (BWR)
- 3 Liquid Metal Reactor

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.masoud_sedy@aliabadiu.ac.ir



آلومینیوم در یک مدار جابه‌جایی طبیعی پرداختند. در همان سال، یک رابطه کلی برای ضریب اصطکاک که در هر سه ناحیه آرام، گذار و متلاطم برای مدارهای جابه‌جایی طبیعی تکفاز معتبر است، توسط سوپنالی و ویجایان [۹] ارائه گردید. در سال ۲۰۱۴، عملکرد حرارتی یک مدار جابه‌جایی طبیعی با نانوسیال اکسید آلومینیوم با چشمه و چاه حرارتی مینیاتوری توسط هو و همکاران [۱۰] به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از نانوسیال هر دو عدد ناسلت مربوط به سمت گرمایش و سرمایش مدار را افزایش می‌دهد. البته استفاده از نانوسیال روی عدد ناسلت مربوط به سمت گرمایش بیشتر از عدد ناسلت مربوط به سمت سرمایش مدار اثر دارد. در سال ۲۰۱۵، دوگانای و همکاران [۱۱] به بررسی اثر نانو سیالات مختلف در افزایش راندمان انتقال حرارت در یک مدار جابه‌جایی طبیعی مینیاتوری پرداختند. لیما و همکاران [۱۲]، به تحلیل پایداری یک مدار جابه‌جایی طبیعی سیستم خنک کننده کمکی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که حجم آب استخر تنها پارامتر مؤثر بر پایداری مدار نیست. در سال ۲۰۱۶، رفتار یک مدار جابه‌جایی طبیعی تکفاز با سیال عامل نمک مذاب^۱ بطور تئوری و آزمایشگاهی توسط سرواستاوا و همکاران [۱۳] مطالعه گردید. در سال ۲۰۱۶، مرادزاده و همکاران [۱۴] به تحلیل جریان جابه‌جایی همزمان آزاد و اجباری نانوسیال در یک محفظه باز مستطیلی به روش عددی پرداختند. آن‌ها معادلات بدون بعد حاکم برای جریان آرام دو بعدی در داخل محفظه را با فرض سیال نیوتنی غیر قابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسک حل نمودند. در سال ۲۰۱۷، حسینی آباد شاپوری و همکاران [۱۵] به تحلیل جابه‌جایی آزاد نانوسیال آب و اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی با مرزهای نیم دایره‌ای در بالا و پایین محفظه پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت متوسط جریان افزایش می‌یابد که بیان نمودند این موضوع ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. چنگ و همکاران [۱۶ و ۱۷] شبیه‌سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی را برای یک مدار جابه‌جایی طبیعی تکفاز ارائه کردند. آن‌ها از دو مبدل حرارتی به جای منبع گرم و سرد استفاده کردند، اما اثر نرخ دبی سیالات گرم و سرد را در بررسی آزمایشگاهی در نظر نگرفتند. در سال ۲۰۱۸، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در



شکل ۱: شماتیک مدار جابه‌جایی طبیعی مستطیل شکل برای جهت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر

Fig. 1. Schematic view of natural circulation loop with different orientation

حالت نشان می‌دهد.

در انواع راکتورهای هسته‌ای، محل قرارگیری هیتر و کولر متفاوت است. به عنوان مثال، در راکتورهای آب سبک نوع اروپایی مدار از نوع هیتر عمودی - کولر عمودی و در نوع روسی - به مانند راکتور بوشهر - از نوع هیتر عمودی - کولر افقی است. البته تحقیق بر روی به کارگیری ماهیت چرخش طبیعی در مواقع عملکرد عادی و اضطراری در راکتورهای تولید انرژی همجوشی و خصوصاً پوشش‌های جانبی مولد تریتیوم در حال گسترش است. در فاصله بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ میلادی، پژوهشگرانی چون جاپیک [۲]، زوبرین [۳]، جرینف [۴] معادلات حاکم بر مدارهای جابه‌جایی طبیعی را به دست آوردند. ویجایان و همکاران [۵] دبی جرمی در حالت پایا را به عنوان تابعی از یک گروه بدون بعد به دست آوردند. ویجایان [۶] پایداری یک مدار جابه‌جایی طبیعی را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد. نایاک و همکاران [۷] رفتار یک مدار جابه‌جایی طبیعی مینیاتوری حاوی نانو سیال اکسید آلومینیوم را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۱۲، میساله و همکاران [۸] به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر نانوسیال اکسید

بحث تعیین ثابت‌های ضریب اصطکاک پیش می‌آید، تعیین این ثوابت برای جریان آرام اهمیت می‌یابد. همچنین در بیشتر پژوهش‌ها جهت قرارگیری هیتر و کولر از نوع افقی بوده است و در مورد تأثیر جهت قرارگیری هیتر و کولر پژوهشی انجام نشده است، به ویژه زمانی که مدار مینیاتوری باشد و سیال عامل نیز نانو سیال انتخاب گردد. در پژوهش حاضر، با استفاده از معادلات بدون بعد حاکم بر مساله، اثرات قطر لوله‌های مدار، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، درصد نانو ذره و توان هیتر بر روی نرخ دبی جرمی و توزیع دما در مدار برای شرایط حالت پایا در یک مدار جابه‌جایی طبیعی بررسی می‌گردند. نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به تحقیقات پیشین به صورت خلاصه عبارتند از:

- الف- در پژوهش‌های گذشته مرتبط با مدارهای مینیاتوری، معمولاً مشخصات هندسی مدار مورد مطالعه، ثابت در نظر گرفته شده است. در صورتی که در پژوهش حاضر، اثر تغییر مشخصات هندسی (مانند قطر و ارتفاع مدار) مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- ب- در پژوهش حاضر اثر جهت قرارگیری هیتر و کولر بر دبی جرمی و دمای سیال بررسی می‌گردد در حالی که در مراجع [۱۹] و [۲۱] هیتر و کولر افقی در نظر گرفته شده‌اند.
- ج- در پژوهش حاضر، سیال عامل نانو سیال مس- آب است و اثر درصد نانو سیال بر رفتار مدار بررسی می‌شود ولی در مراجع [۱۹] و [۲۱] سیال عامل آب بوده است. بنابراین، معادلات مربوط به محاسبه خواص نانو سیال اضافه می‌گردند.
- د- در پژوهش حاضر اندازه ابعاد مدار کوچک است که در اصطلاح به آن مینی-لوپ (مدار مینیاتوری) گفته می‌شود، ولی در مراجع [۱۹] و [۲۱] اندازه ابعاد مدار بزرگ است.

۲- معادلات حاکم

معادلات بقاء جرم، مومنتم و انرژی برای یک مدار جابه‌جایی طبیعی تکفاز غیر قابل تراکم یک بعدی با در نظر گرفتن نانو سیال به عنوان سیال عامل به ترتیب در معادلات (۱) تا (۳) آمده است [۶] و [۱۹]:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{L_t}{A} \frac{dm}{dt} = g \oint \rho_{nf} dz - \frac{f (L_{eff})_t \dot{m}^2}{2D \rho_0 A^2} \quad (2)$$

جریان آشفته درون یک محفظه مربعی با منابع حرارتی گرم و سرد برجسته روی دیواره‌های عمودی آن به صورت عددی توسط شیخ زاده و همکاران [۱۸] بررسی شد. آن‌ها لزجت سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال را تابع دما و کسر حجمی نانو ذرات در نظر گرفتند. در سال ۲۰۱۸، سیدی و هاشمی [۱۹] به تحلیل رفتار یک مدار جابه‌جایی طبیعی در حالت پایا پرداختند. آن‌ها هیتر و کولر را افقی در نظر گرفتند و اثر پارامترهای تأثیر گذار بر دبی جرمی و دمای سیال را بررسی کردند. در سال ۲۰۱۹، مشخصه‌های انتقال حرارت یک مدار جابه‌جایی مستطیل شکل مینیاتوری توسط چنگ و همکاران [۲۰] به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آن‌ها آب مقطر را به عنوان سیال عامل در نظر گرفتند. آن‌ها همچنین نتایج شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی مدار را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آن‌ها بیان داشتند که مدار مینیاتوری تقریباً همیشه میل به پایداری دارد. مدار مورد مطالعه آن‌ها از نوع هیتر افقی و کولر افقی بود. در سال ۲۰۱۹، سیدی و همکاران [۲۱] به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی به تحلیل یک مدار جابه‌جایی طبیعی از نوع هیتر افقی و کولر افقی پرداختند. سیال عامل در پژوهش آن‌ها آب خالص در نظر گرفته شد و اثر بسیاری از پارامترهای مؤثر بر رفتار مدار از جمله نامتقارن بودن مکان هیتر و کولر را بررسی کردند. در سال ۲۰۱۹، هاشمی تیله نویی و همکاران [۲۲] به مدلسازی یک مدار جابه‌جایی طبیعی با هیتر نامتقارن به کمک کدهای ریلپ و فلوینت پرداختند. در مراجع [۱۹-۲۲] مروری بر پژوهش‌های گذشته به خوبی بیان شده است. بسیاری از محققین، تحقیقات خود را بر روی مدارهای جابه‌جایی طبیعی با ابعاد بزرگ معطوف کرده‌اند و از سیستم‌های با ابعاد کوچک (مینیاتوری) غافل شده‌اند. هنگامی که صحبت از مدار مینیاتوری می‌شود، ابعاد سیستم نسبت به مدار با ابعاد بزرگ، خیلی کوچک‌تر است. اولین مشخصه در یک مدار مینیاتوری کوچک بودن قطر لوله‌های مدار نسبت به سیستم‌های با ابعاد بزرگ است. مطابق آنچه در مراجع مشاهده می‌شود (مخصوصاً پژوهش‌های آزمایشگاهی) معمولاً اگر قطر مدار کمتر از ۷ میلیمتر باشد، آن مدار، یک مدار مینیاتوری محسوب می‌شود. مشخصه مدارهای مینیاتوری از لحاظ پارامترهای عملکردی و مشخصه‌های جریان، آرام بودن جریان در تمام مدار است. از نظر معادلات حاکم و فرضیات، در ظاهر تفاوتی بین مدار با ابعاد بزرگ و مدار مینیاتوری وجود ندارد، اما هنگامی که

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{L_t}{H} \omega \frac{\partial \theta}{\partial S} = \begin{cases} \frac{L_t}{L_h} \text{ for heater } (0 < S \leq S_h) \\ 0 \text{ for pipes } (S_h < S \leq S_{hl} \text{ and } S_c < S \leq S_t) \\ -St_m \theta \text{ for cooler } (S_{hl} < S \leq S_c) \end{cases} \quad (۶)$$

که در روابط (۵) و (۶) داریم [۱۹]:

$$Re = \frac{\dot{m}D}{\mu_{nf} A}; Pr = \frac{\mu_{nf} C_{pnf}}{k_{nf}}; Nu = \frac{UL_t}{k_{nf}}; St = \frac{UA}{C_{pnf} \dot{m}}; St_m = \frac{4Nu}{Re_{ss} Pr}; Gr_m = \frac{g \beta_{nf} D^3 \rho_0^2 \dot{Q}_h H \cos \alpha}{A \mu_{nf}^3 C_{pnf}} \quad (۷)$$

این نکته باید ذکر شود که در رابطه (۷) به جای شتاب جاذبه (g) از عبارت $g \cos \alpha$ استفاده گردیده تا امکان بررسی اثر زاویه شیب مدار فراهم گردد.

۳- محاسبه خواص نانو سیال

خواص نانو سیال که در روابط (۲) تا (۷) ظاهر گردیدند، به کمک روابط زیر قابل محاسبه هستند. چگالی نانو سیال توسط رابطه (۸)، محاسبه می‌شود:

$$\rho_{nf} = \rho_f (1 - \phi) + \rho_s \phi \quad (۸)$$

که در رابطه بالا، ϕ درصد نانو ذره است و ρ_f و ρ_s به ترتیب چگالی آب و چگالی نانو ذره (در اینجا مس) می‌باشند. چسبندگی دینامیکی نانو سیال توسط مدل برینکمن [۲۳] و ضریب هدایت حرارتی آن، توسط مدل همیلتون و کراسر [۲۴] قابل محاسبه هستند که به ترتیب در رابطه‌های (۹) و (۱۰) نشان داده می‌شوند:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (۹)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + (m - 1)k_f - (m - 1)\phi(k_f - k_s)}{k_s + (m - 1)k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، پارامتر m نشان دهنده اثر شکل نانو ذره است. ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب انبساط حجمی و ضریب پخش گرمایی نانو سیال به ترتیب توسط روابط (۱۱) تا (۱۳) محاسبه می‌گردند:

$$(\rho C_p)_{nf} = (\rho C_p)_f (1 - \phi) + (\rho C_p)_s \phi \quad (۱۱)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (\rho \beta)_f (1 - \phi) + (\rho \beta)_s \phi \quad (۱۲)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{A \rho_0} \frac{\partial T}{\partial s} = \begin{cases} \frac{4q''}{D \rho_0 C_{pnf}} \text{ for heater } (0 < s \leq s_h) \\ 0 \text{ for pipes } (s_h < s \leq s_{hl} \text{ and } s_c < s \leq L_t) \\ -\frac{4U}{D \rho_0 C_{pnf}} (T - T_s) \text{ for cooler } (s_{hl} < s \leq s_c) \end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه (۲)، $(L_{eff})_t$ طول موثرکل مدار است که اتلافات محلی را به حساب می‌آورد. اگر از اتلافات محلی صرفنظر شود، طول مؤثر برابر با طول (محیط) مدار جابه‌جایی طبیعی است. برای استخراج معادلات و حل مسأله فرضیات و شرایط عبارتند از:

- جریان غیرقابل تراکم فرض می‌شود.
- جریان یک بعدی و در راستای محور لوله فرض می‌شود.
- سطح مقطع لوله در مدار یکنواخت فرض می‌شود.
- تمام لوله‌ها به جز طول هیترو و کولر عایق فرض می‌شوند.
- دمای سیال خنک‌کن در کولر (T_s) ثابت فرض می‌شود.
- شار حرارتی در هیترو ثابت فرض می‌شود.
- در اعمال شرایط مرزی عدد استانتون اصلاح شده (شرط مرزی سمت کولر) و عدد گراش اصلاح شده (شرط مرزی سمت هیترو) باید انتخاب شوند

- در معادله انرژی رابطه (۶) از اثر هدایت محوری و اتلافات ویسکوز صرفنظر شده است.

(قابل ذکر است در پژوهش حاضر، به دلیل مینیاتوری بودن مدار جریان آرام است بنابراین می‌توان از اتلافات ویسکوز صرفنظر نمود. همچنین از هدایت محوری به دلیل پایین بودن عدد پکلت - حاصلضرب عدد رینولدز در عدد پرائتل - صرفنظر می‌شود).

معادلات مومنتم و انرژی با تعریف پارامترهای زیر بدون بعد می‌شوند.

$$\omega = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ss}}; \theta = \frac{T - T_s}{(\Delta T_h)_{ss}}; \tau = \frac{t}{t_r}; S = \frac{s}{H} \text{ and } Z = \frac{z}{H} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، $t_r = V \rho_0 / \dot{m}_{ss}$ می‌باشد. با استفاده از تقریب بوزینسک^۱ و پارامترهای بدون بعد ارائه شده در رابطه (۴)، شکل بدون بعد معادلات مومنتم و انرژی به صورت روابط (۵) و (۶) به دست می‌آیند:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{Gr_m}{Re_{ss}^3} \phi \theta dZ - \frac{pL_t \omega^{2-b}}{2DR e_{ss}^b} \quad (۵)$$

1 Boussinesq approximation

که در رابطه (۲۰) داریم:

$$I_{ss} = \oint \theta_{ss} dZ \quad (21)$$

جواب نهایی رابطه (۲۱) برای مدار جابه‌جایی طبیعی، بستگی به جهت قرارگیری هیتر و کولر دارد که می‌توان نشان داد مقدار I_{ss} برای حالت‌های مختلف از رابطه‌های (۲۲) تا (۲۵) به دست می‌آید: [۲۵]

(الف) برای هیتر افقی و کولر افقی، داریم:

$$I_{ss,HHHC} = 1 \quad (22)$$

(ب) برای هیتر افقی و کولر عمودی داریم:

$$I_{ss,HHVC} = \frac{L_c}{H} \left[\frac{1}{1 - e^{-\frac{St_m L_c}{L_t}}} \right] + \frac{L_3}{H} - \frac{L_t}{St_m H} \quad (23)$$

(ج) برای هیتر عمودی و کولر افقی داریم:

$$I_{ss,VHHC} = \frac{L_1 + 0.5L_h}{H} \quad (24)$$

(د) برای هیتر عمودی و کولر عمودی داریم:

$$I_{ss,VHVC} = \frac{L_c}{H} \left(e^{\frac{St_m L_c}{L_t}} - 1 \right)^{-1} + \frac{0.5L_h + L_1 - L_2 - L_t / St_m}{H} \quad (25)$$

بنابراین رابطه (۲۰) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$Re_{ss} = \left(\frac{2Gr_m - I_{ss}}{pN_G} \right)^{\frac{1}{3-b}} = C \left(\frac{Gr_m}{N_G} \right)^r \quad (26)$$

که در آن داریم [۶]:

$$N_G = \frac{L_t}{D}; C = \left(\frac{2}{p} I_{ss} \right)^r, r = \frac{1}{3-b} \quad (27)$$

رابطه (۲۶) به رابطه ویجایان معروف است. مقادیر پارامترهای p و b در رابطه (۲۷) به نوع رژیم جریان (آرام، گذار و متلاطم) وابسته هستند که مطابق رابطه (۲۸) برای تعیین ضریب اصطکاک نیز استفاده می‌شوند [۶]:

$$f = \frac{p}{Re^b} = \frac{p\omega^{-b}}{Re_{ss}^b} \quad (28)$$

اختلاف دمای دو سر هیتر با استفاده از رابطه بقاء انرژی در هیتر مطابق رابطه (۲۹) به دست می‌آید.

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (13)$$

۴- حل حالت پایا

با فرض جریان پایا، حل حالت پایا می‌تواند با برابر یک قرار دادن نرخ دبی جرمی بدون بعد و همچنین مساوی صفر قرار دادن تغییرات زمانی دبی جرمی بدون بعد و دمای بدون بعد در معادلات مومنتم و انرژی به دست آید:

$$\omega = 1, d\omega/d\tau = \partial\theta/\partial\tau = 0 \quad (14)$$

بنابراین با استفاده از معادله انرژی (معادله (۳)) عبارت‌هایی صریح برای توزیع دمای بدون بعد در هیتر و کولر به دست می‌آیند که به ترتیب در معادلات (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده‌اند:

$$[\theta_h(S)]_{ss} = (\theta_{cl})_{ss} + \frac{H}{L_h} S \quad (15)$$

$$[\theta_c(S)]_{ss} = (\theta_{hl})_{ss} \exp\left(St_m H \frac{S_{hl} - S}{L_t} \right) \quad (16)$$

در روابط (۱۵) و (۱۶)، $(\theta_{cl})_{ss}$ و $(\theta_{hl})_{ss}$ به ترتیب دمای‌های بدون بعد بازوهای سمت سرد و گرم می‌باشند که به ترتیب از معادلات (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آیند:

$$(\theta_{cl})_{ss} = \left(e^{\frac{St_m L_c}{L_t}} - 1 \right)^{-1} \quad (17)$$

$$(\theta_{hl})_{ss} = \left(1 - e^{-\frac{St_m L_c}{L_t}} \right)^{-1} \quad (18)$$

جالب است توجه شود در حل حالت پایا اختلاف دمای بدون بعد بازوهای سمت گرم و سرد مدار جابه‌جایی طبیعی مساوی یک است. یعنی با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸) داریم:

$$(\theta_{hl})_{ss} - (\theta_{cl})_{ss} = 1 \quad (19)$$

حل حالت پایا برای معادله مومنتم (معادله (۵)) به صورت معادله (۲۰) بیان می‌شود:

$$Re_{ss} = \left(\frac{2}{p} Gr_m \frac{D}{L_t} I_{ss} \right)^{\frac{1}{3-b}} \quad (20)$$




جدول ۲: خواص ترموفیزیکی آب و نانو ذره

Table 2. Thermo-physical properties of pure water and nanoparticle

خاصیت	مس	آب خالص در فشار یک اتمسفر و دمای ۲۵ °C
ρ (kg m ⁻³)	۸۹۳۳	۹۹۷/۱
c_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	۳۸۵	۴۱۸۳
k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	۴۰۱	۰/۶۱۲۵
β (K ⁻¹)	—	۰/۰۰۰۲۵
Pr	—	۶/۳
μ (Pa s)	—	۰/۰۰۰۸۹

جدول ۳: مقادیر ضریب شکل برای شکل‌های مختلف نانو ذره

Table 3: The values of nanoparticle shaping factor

نام	شکل ظاهری	ضریب شکل ذره (m)
کروی ^۲		۳
استوانه‌ای ^۳		۴/۸
قرص (پلاکتی) ^۴		۵/۷

¹ Particle shapes factor

² Spherical

³ Cylinder

⁴ Platelet

جدول ۱ نشان داده شده است. برای بررسی اثر هر پارامتر، مقدار پارامتر مد نظر را تغییر می‌دهیم و سایر پارامترها را ثابت در نظر می‌گیریم. در همه بررسی‌های مربوط به تغییر جهت هیتر و کولر، طول کل مدار ثابت در نظر گرفته شده است که در آخرین ردیف جدول ۱ آورده شده است. همچنین در جدول ۲ خواص ترموفیزیکی آب و نانو ذره مس داده شده است.

شکل نانو ذره و مقدار ضریب شکل مرتبط با آن (یعنی پارامتر m در رابطه (۱۰)) در جدول ۳، نشان داده شده است [۲۳].

۵-۱- اعتبار سنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی، نتایج به دست آمده از کد با سه مرجع [۷ و ۱۹ و ۲۱] مقایسه شده‌اند. در اولین مقایسه، مشخصات هندسی

جدول ۱: مشخصات هندسی مدار جابه‌جایی طبیعی

Table 1. Geometrical specification of the NCL

نام پارامتر	مقدار پارامتر			
	HHHC	HHVC	VHHC	VHVC
D (mm)	۵	۵	۵	۵
W (mm)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
H (mm)	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
L_h (mm)	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
L_c (mm)	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
L_1 (mm)	۴۰	۴۰	۶۵	۶۵
L_2 (mm)	۴۵	۷۰	۴۵	۷۰
L_3 (mm)	۴۵	۷۰	۴۵	۷۰
L_4 (mm)	۴۰	۴۰	۶۵	۶۵
α (°)	۰	۰	۰	۰
L_t (mm)	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰

$$(\Delta T_h)_{ss} = \frac{\dot{Q}_h}{C_p \dot{m}_{ss}} \quad (29)$$

۵- بحث و بررسی نتایج

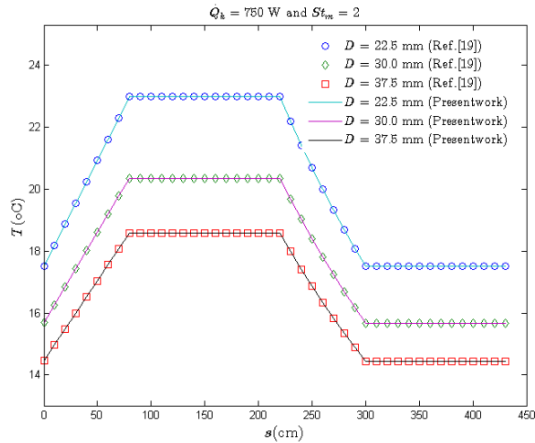
برای تحلیل مدار جابه‌جایی طبیعی و حل معادلات در حالت پایا، کد کامپیوتری در محیط برنامه نویسی متلب^۱ نوشته شده و اثر پارامترهای مختلف بررسی شده است. نخستین گام در تحلیل حالت پایای مدار، تعیین ضریب اصطکاک است. در مدارهای مینیاتوری، معمولاً جریان آرام است و بنابراین مقادیر پارامترهای p و b در رابطه (۲۸) به ترتیب برابر ۶۴ و ۱ می‌باشد. (مقادیر پارامترهای p و b برای جریان گذار به ترتیب برابر ۱/۲۰۶۳ و ۰/۴۱۶ و برای جریان مغشوش به ترتیب برابر ۰/۳۱۶ و ۰/۲۵ می‌باشند.) برای جزئیات بیشتر مرجع [۱۹] را ببینید. بنابراین رابطه (۲۸) برای جریان آرام در حالت پایا به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$f = \frac{64}{Re_{ss}} \quad (30)$$

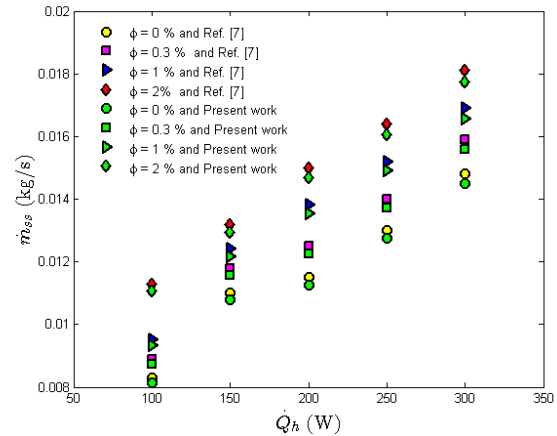
همچنین ضریب انتقال حرارت کلی، با توجه به اختلاف دمای متوسط لگاریتمی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$U = \frac{\dot{Q}_h}{\pi DL_c \Delta T_m} \quad (31)$$

با توجه به شکل ۱ مقادیر اولیه هندسی مدارهای مورد بررسی در

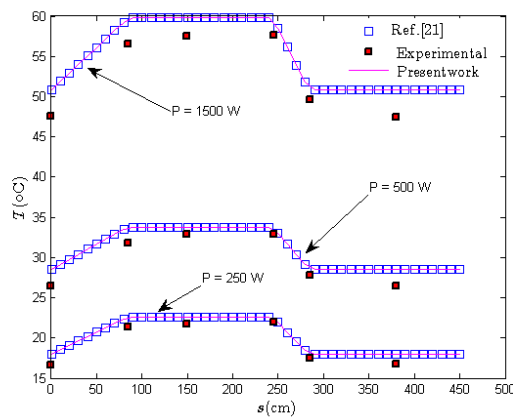


(ب)



(الف)

شکل ۲: اعتبار سنجی پژوهش حاضر با (الف) مرجع [۷] برای تغییرات دبی جرمی حالت پایا و (ب) مرجع [۱۹] برای توزیع دمای سیال در طول مدار
Fig. 2. Validation of present work with (a) Ref. [7] for variations of steady state mass flow rate (b) Ref. [19] for fluid temperature distribution along the loop



(ب)

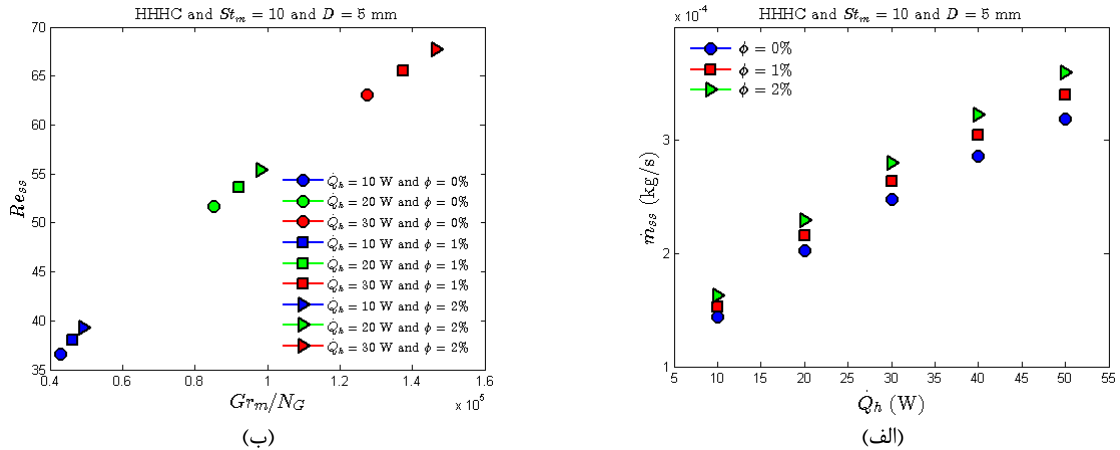


(الف)

شکل ۳: (الف) شماتیک مدار آزمایشگاهی (ب) مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی و مرجع [۲۱] برای توزیع دمای سیال در طول مدار
Fig. 3. (a) Schematic of experimental loop, (b) comparison between the results of present work with experimental results and Ref. [21] for fluid temperature distribution along the loop

گرفته شد. توزیع دما در طول مدار، برای سه قطر مختلف به دست آمد که نتیجه در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است. برای سومین مقایسه، مشخصات هندسی مدار جابه‌جایی طبیعی که قبلاً توسط نویسندگان این مقاله ساخته شده و نتایج آن در مرجع [۲۱] آمده است به کد پژوهش حاضر وارد شد. سیال عامل مطابق با مرجع [۲۱]، آب خالص در نظر گرفته شد. توزیع دما در طول مدار، برای سه توان مختلف هیتر به دست آمد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که نتیجه در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. در مقایسه نتایج پژوهش

مدار جابه‌جایی طبیعی مرجع [۷] با نانو سیال اکسید آلومینیوم به کد پژوهش حاضر وارد شد. نرخ دبی جرمی برای توان‌های مختلف هیتر و در چهار مقدار مختلف درصد نانو ذره مقایسه شد. نتیجه در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است که توافق خوبی بین نتایج مرجع [۷] و پژوهش حاضر مشاهده می‌گردد. حداکثر خطا در این نمودار ۲ درصد می‌باشد. در دومین مقایسه، مشخصات هندسی مدار جابه‌جایی طبیعی مرجع [۱۹] که یک مدار اندازه بزرگ است به کد پژوهش حاضر وارد شد. سیال عامل مطابق با مرجع [۱۹]، آب خالص در نظر



شکل ۴: (الف) نرخ دبی جرمی بر حسب توان هیتر در سه مقدار مختلف نانو ذره (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m / N_G در توان‌های مختلف هیتر و درصدهای متفاوت نانو ذره

Fig. 4. (a) Mass flow rate versus heater power for three different values of nanoparticles volume fraction (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different values of heater powers and nanoparticle volume fractions

گام ۱۰: تعیین اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا توسط رابطه (۲۹)

گام ۱۱: تعیین دمای بدون بعد بازوهای سرد و گرم به ترتیب از معادلات (۱۷) و (۱۸)

گام ۱۲: تعیین توزیع دمای بدون بعد در هیتر و کولر به ترتیب از معادلات (۱۵) و (۱۶)

گام ۱۳: محاسبه اختلاف دمای متوسط لگاریتمی در کولر (فرض می‌شود دمای سیال خنک کن در کولر (T_s) ثابت باشد و $\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$ که در آن ΔT_1 و ΔT_2 به ترتیب اختلاف دما در طرف اول و دوم کولر می‌باشند)

گام ۱۴: محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی با استفاده از رابطه (۳۱)

$$(Nu = \frac{UL_t}{k_{nf}}) \text{ محاسبه عدد ناسلت}$$

گام ۱۵: محاسبه عدد ناسلت $(Nu = \frac{UL_t}{k_{nf}})$

گام ۱۶: محاسبه عدد استانتون اصلاح شده $(St_m = \frac{4Nu}{Re_{ss}Pr})$

دقت شود محاسبه St_m در گام ۱۶، جهت بررسی درستی محاسبات می‌باشد که باید با St_m در گام ۳ برابر باشد)

۵-۳- بررسی اثر درصد نانو ذره

در شکل ۴-الف اثر تغییر درصد نانو ذره بر روی دبی جرمی مدار جابه‌جایی در حالت هیتر افقی- کولر افقی در پنج مقدار متفاوت توان هیتر نشان داده شده است. همچنانکه شکل نشان می‌دهد در هر

حاضر با نتایج مراجع [۱۹ و ۲۱] خطایی مشاهده نگردید.

۵-۲- الگوریتم انجام محاسبات

الگوریتم محاسبات به صورت گام به گام به شرح زیر است.

گام ۱: تعیین حالت قرارگیری هیتر و کولر در مدار جابه‌جایی طبیعی

گام ۲: تعیین مشخصات هندسی مدار (جدول ۱)

گام ۳: تعیین متغیرهای مربوط به شرایط مرزی و عملکردی مدار مانند: قدرت هیتر (\dot{Q}_h) ، عدد استانتون اصلاح شده (St_m) ، زاویه شیب مدار (α) ، درصد نانو ذره (ϕ) و ...

گام ۴: محاسبه خواص نانو سیال با استفاده از جداول ۲ و ۳ و روابط (۸) تا (۱۳)

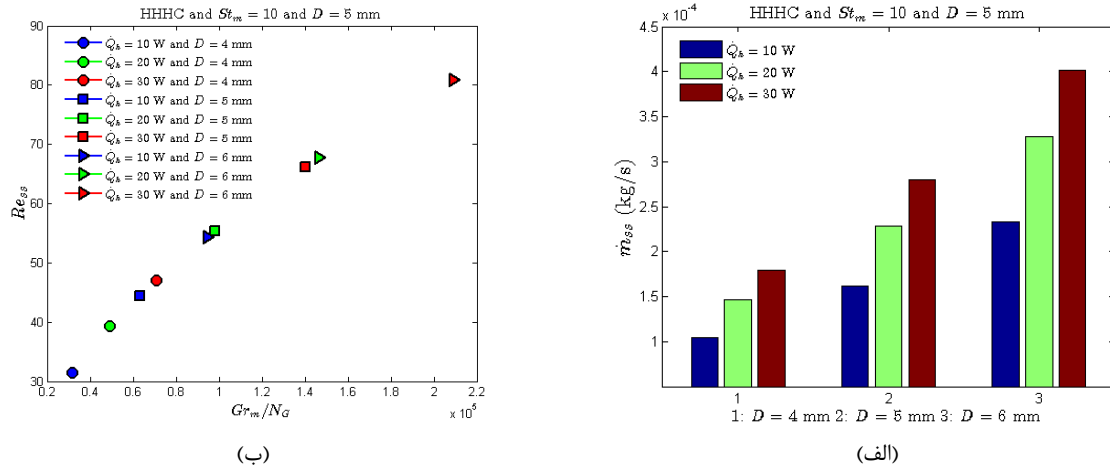
گام ۵: محاسبه عدد گراشف اصلاح شده $(Gr_m = \frac{g \beta_{nf} D^3 \rho_f \dot{Q}_h H \cos \alpha}{A \mu_{nf}^2 C_{pmf}})$

گام ۶: تعیین مقدار I_{ss} توسط یکی از روابط (۲۲) تا (۲۵) توجه به گام ۱

گام ۷: محاسبه عدد رینولدز در حالت پایا با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷)

گام ۸: محاسبه ضریب اصطکاک توسط رابطه (۲۸) (در جریان آرام از رابطه (۳۰) استفاده می‌شود)

گام ۹: محاسبه دبی جرمی حالت پایا $(\dot{m}_{ss} = \frac{Re_{ss} A \mu_{nf}}{D})$



شکل ۵: (الف) نرخ دبی جرمی در توان‌ها و قطرهای مختلف برای هیتر افقی - کولر افقی (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m / N_G در توان‌های مختلف هیتر و قطرهای متفاوت

Fig. 5. (a) Mass flow rate in different heater powers and diameters for HHHC (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different values of heater powers and diameters

افزایش یابد (۵۰٪ افزایش) برای درصد نانو ذره ۱٪ (علامت مربع سبز و قرمز رنگ را ببینید) عدد رینولدز از $53/6$ به $65/6$ افزایش می‌یابد (۲۲/۴٪ افزایش) که بیانگر افزایش آشفتگی جریان است.

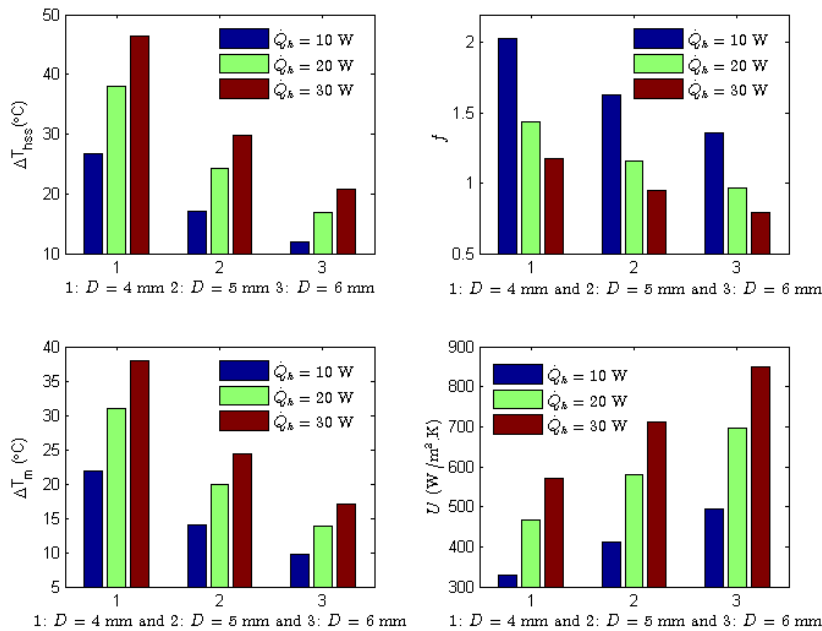
۴-۵- بررسی اثر قطر مدار برای حالت هیتر افقی - کولر افقی

شکل‌های ۵ و ۶ اثر تغییر قطر لوله‌های مدار را به ترتیب روی دبی جرمی حالت پایا، عدد رینولدز حالت پایا، اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی برای سه مقدار متفاوت توان هیتر در مدار جابه‌جایی طبیعی حالت هیتر افقی - کولر افقی نشان می‌دهند. در این شکل‌ها St_m برابر با ۱۰ و مقدار ϕ برابر با ۲٪ در نظر گرفته شده است.

در شکل ۵-الف قطر مبنا ۵mm است و اثر افزایش (یا کاهش) ۲۰ درصدی قطر مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا نشان داده شده است. به طور مثال شکل نشان می‌دهد برای توان هیتر ۲۰W در صورتی که قطر لوله‌های مدار ۲۰٪ افزایش یابد دبی جرمی حالت پایا $43/47$ ٪ افزایش می‌یابد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که در یک قطر ثابت، اگر توان هیتر افزایش یابد، دبی جرمی حالت پایا نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن در تفسیر شکل ۴-الف بیان شد. به طور مثال برای همه قطرهای، هنگامی که توان هیتر از ۲۰W به ۳۰W افزایش یابد (۵۰٪ افزایش)، مقدار دبی جرمی مدار به طور متوسط ۲۲/۲٪ افزایش می‌یابد.

مقدار توان هیتر، با افزایش درصد نانو ذره، دبی جرمی مدار افزایش می‌یابد. به طور مثال، در توان هیتر ۵۰W، هنگامی که درصد نانو ذره از مقدار صفر به ۲٪ درصد افزایش می‌یابد، دبی جرمی تقریباً $12/8$ ٪ افزایش می‌یابد. دلیل افزایش دبی جرمی این است که با توجه با رابطه (۸) و (۱۱)، با افزایش درصد نانو ذره ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال کاهش می‌یابد و سپس با توجه به رابطه (۲۹) دبی جرمی حالت پایا افزایش می‌یابد (اختلاف دمای دو سر هیتر با تغییر درصد نانو ذره تغییر نمی‌کند و ثابت است). همچنین، در هر درصدی از نانو ذره، با افزایش توان هیتر دبی جرمی مدار افزایش می‌یابد که دلیل آن با توجه با رابطه (۲۹) واضح است. به طور مثال برای غلظت نانو ذره ۲٪، هنگامی که توان هیتر از ۲۰W به ۳۰W افزایش می‌یابد (۵۰٪ افزایش)، مقدار دبی جرمی مدار از $0/0022876$ به $0/0027965$ افزایش می‌یابد (۲۲/۲٪ افزایش).

شکل ۴-ب عدد رینولدز در حالت پایا را (Re_{ss}) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه درصد نانو ذره متفاوت و سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل St_m برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است. شکل نشان می‌دهد که در یک توان ثابت هیتر، با افزایش درصد نانو ذره، عدد رینولدز افزایش می‌یابد (به طور مثال، علامت‌های دایره، مربع و مثلث سبز رنگ را ببینید). همچنین، با افزایش توان هیتر در یک درصد نانو ذره ثابت، باز هم عدد رینولدز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، اگر توان هیتر از ۲۰W به ۳۰W



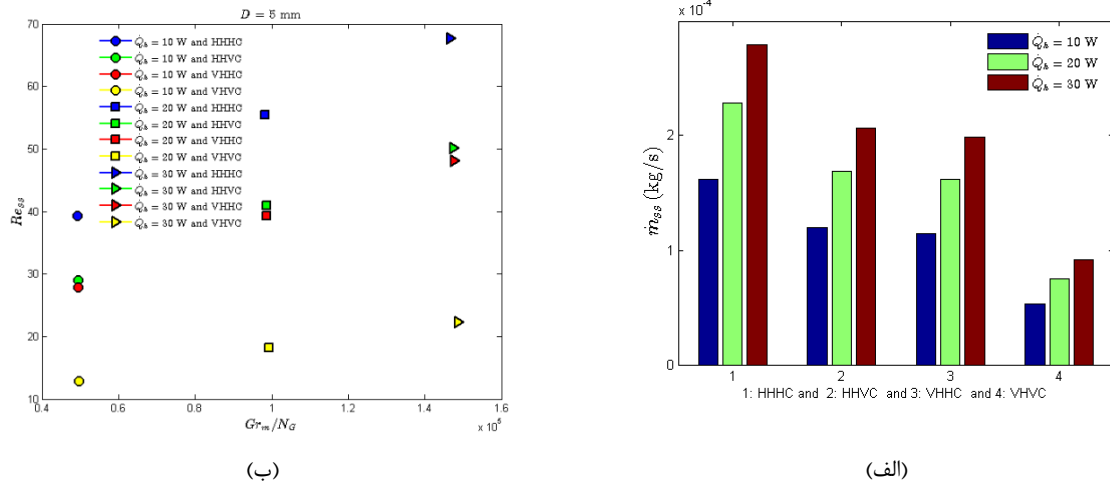
شکل ۶: اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی در توان‌ها و قطرهای مختلف برای هیتر افقی - کولر افقی

Fig. 6. Heater temperature difference, friction coefficient, logarithmic mean temperature difference and overall heat transfer coefficient at different powers and diameters for HHHC

از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا از $29/86^\circ C$ به $20/83^\circ C$ (۳۰٪ کاهش) کاهش می‌یابد (ستون قرمز رنگ را ببینید). همچنین در هر قطر ثابت، با افزایش توان هیتر، اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا افزایش می‌یابد. در مورد ضریب اصطکاک می‌توان بیان داشت که با افزایش قطر یا افزایش توان هیتر، عدد رینولدز افزایش می‌یابد (شکل ۵-الف را ببینید) و با توجه به رابطه (۳۰) مقدار ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. به طور مثال برای توان ۲۰W، اگر قطر لوله‌های مدار از ۵mm به ۴mm یا ۶mm تغییر کند، مقدار ضریب اصطکاک به ترتیب از $1/1555$ به $1/440$ یا $0/9664$ تغییر پیدا خواهد کرد (ستون‌های سبز رنگ در شکل را ببینید). همچنانکه مشاهده می‌شود در هر توان هیتر، با افزایش قطر، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش قطر اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش می‌یابد (شکل مربوط به اختلاف دمای دو سر هیتر را ببینید) و با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸) اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش می‌یابد. همچنین در یک قطر ثابت، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی با افزایش توان هیتر، افزایش می‌یابد. چهارمین بخش شکل نشان می‌دهد در یک توان ثابت هیتر، با افزایش قطر لوله‌های مدار، ضریب

شکل ۵-ب، عدد رینولدز در حالت پایا را (Re_{ss}) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه توان مختلف هیتر و سه قطر متفاوت نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که در یک توان ثابت هیتر، با افزایش قطر لوله‌های مدار، Re_{ss} افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد آشفتگی جریان افزایش یافته است (علامت‌های دایره، مربع و مثلث سبز رنگ را در توان ۲۰W ببینید). ارتباط مستقیم بین قطر و Re_{ss} در رابطه (۷) نشان داده شده است. همچنین، با افزایش توان هیتر برای هر یک از قطرها، باز هم عدد رینولدز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، اگر توان هیتر از ۱۰W به ۳۰W افزایش یابد (۲۰۰٪ افزایش) برای قطر ۵mm، (علامت مربع آبی و قرمز رنگ را ببینید) عدد رینولدز از $39/3$ به حدود $67/7$ افزایش می‌یابد (۷۲٪ افزایش).

شکل ۶، اثر تغییر قطر لوله‌های مدار را بر روی اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی برای توان‌های مختلف هیتر نشان می‌دهد. تحلیل اولین شکل با کمک شکل ۵-الف انجام می‌شود. با افزایش قطر لوله‌های مدار، در یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی حالت پایای مدار افزایش و اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش می‌یابد (رابطه ۲۹) را ببینید). به طور مثال در توان ۳۰W هنگامی که قطر لوله‌های مدار



شکل ۷: (الف) نرخ دبی جرمی در توان‌های مختلف هیتر برای همه‌ی جهت‌ها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m / N_G در توان‌های مختلف هیتر برای همه‌ی جهت‌ها

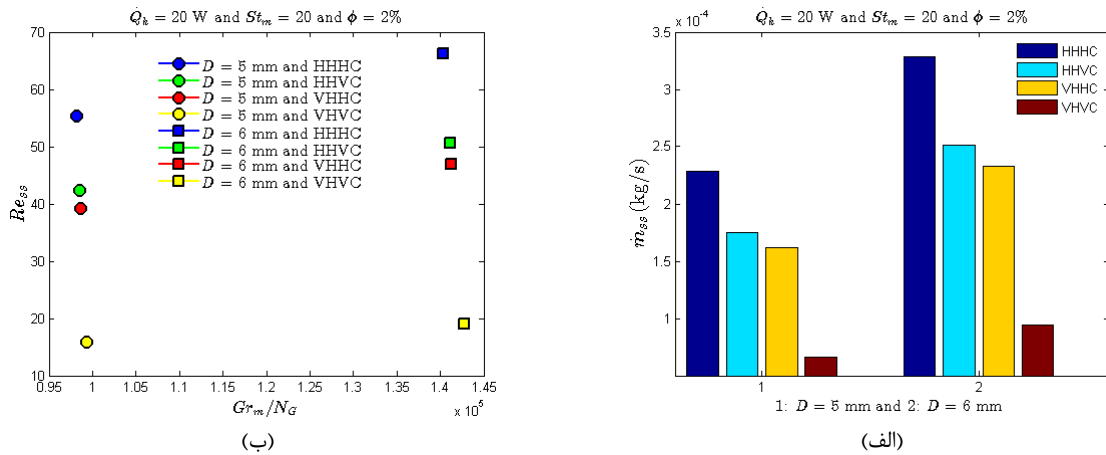
Fig. 7. (a) Mass flow rate at different heater powers for all orientations (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different heater powers for all orientations

یک است)، سپس برای حالت دوم و سوم این مقدار کاهش می‌یابد (ولی تقریباً با یکدیگر برابر است) و در حالت چهارم این مقدار از همه کمتر است (می‌توانید همزمان شکل ۱۱ را ببینید که در ادامه توضیح داده خواهد شد). با توجه به رابطه (۲۶) کاهش مقدار I_{ss} باعث کاهش مقدار Re_{ss} خواهد شد و با توجه به رابطه (۷)، کاهش Re_{ss} نیز منجر به کاهش مقدار دبی جرمی خواهد شد. از طرفی شکل نشان می‌دهد که در هر حالت با افزایش توان هیتر، دبی جرمی افزایش می‌یابد. این افزایش به این دلیل است که با افزایش توان هیتر، مطابق رابطه (۷)، عدد گراشف اصلاح شده افزایش می‌یابد و با افزایش عدد گراشف اصلاح شده، مطابق رابطه ۲۶، عدد رینولدز افزایش می‌یابد که نهایتاً مطابق رابطه ۷، به افزایش دبی جرمی منجر خواهد شد. به طور مثال هنگامی که توان هیتر از ۲۰ W به ۳۰ W افزایش می‌یابد (۵۰٪ افزایش) در همه حالت‌ها، دبی جرمی حالت پایا تقریباً ۲۲/۴٪ افزایش می‌یابد. شکل ۷-ب، عدد رینولدز در حالت پایا را (Re_{ss}) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه توان مختلف هیتر برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که در یک توان ثابت هیتر، Re_{ss} برای حالت هیتر افقی - کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی - کولر عمودی کمترین مقدار را داراست (مثلاً علامت‌های مربع را در توان ۲۰ W ببینید). همچنین، با افزایش توان هیتر برای هر یک از حالت‌ها، باز هم

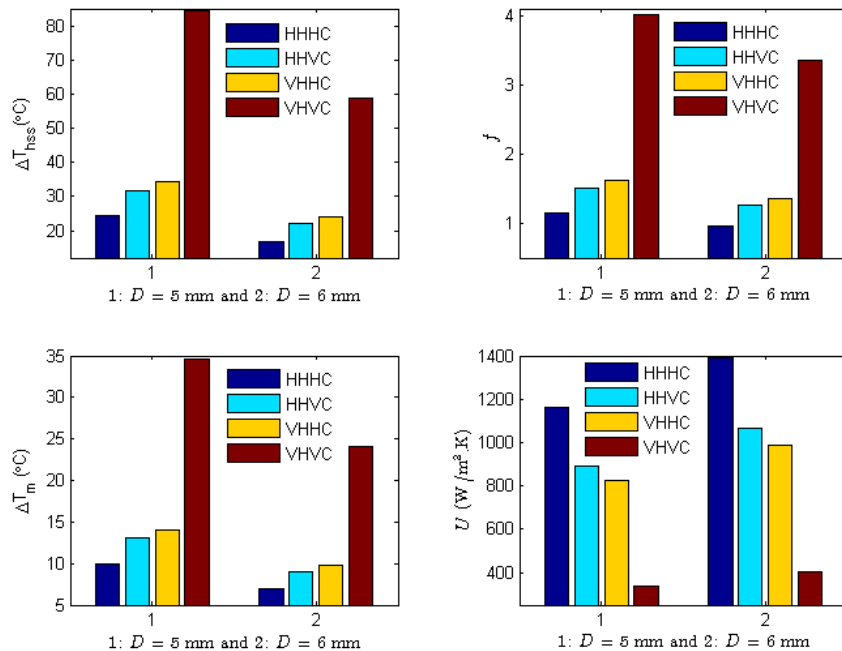
انتقال حرارت کلی افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش قطر لوله‌های مدار، از یک طرف اختلاف دمای متوسط لگاریتمی، کاهش می‌یابد (شکل مربوط به اختلاف دمای متوسط لگاریتمی را ببینید) که این موجب افزایش ضریب انتقال حرارت کلی می‌شود (رابطه (۳۱) را ببینید). ولی از طرف دیگر، با افزایش قطر لوله‌های مدار، سطح جانبی کولر افزایش می‌یابد که باعث کاهش ضریب انتقال حرارت کلی می‌گردد (رابطه (۳۱) را ببینید) که نهایتاً ضریب انتقال حرارت کلی افزایش می‌یابد (یعنی مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت کلی بر مقدار کاهش آن غلبه می‌کند).

۵-۵ - بررسی اثر قدرت هیتر روی عملکرد مدار برای حالت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر

شکل ۷-الف دبی جرمی حالت پایای مدار را برای حالت‌های مختلف جهت قرارگیری هیتر و کولر در سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که در یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی در حالت هیتر افقی - کولر افقی از بقیه حالت‌ها بیشتر است، در حالت‌های هیتر افقی - کولر عمودی و هیتر عمودی - کولر افقی تقریباً یکسان است و در مورد هیتر عمودی - کولر عمودی دبی جرمی کمترین مقدار را دارد. دلیل این امر آن است که با توجه به رابطه‌های (۲۲) تا (۲۵)، در حالت اول بیشترین مقدار I_{ss} وجود دارد (که مساوی



شکل ۸: (الف) نرخ دبی جرمی در قطرهای مختلف برای تمام جهتها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m / N_G در قطرهای مختلف برای تمام جهتها
Fig. 8. (a) Mass flow rate at different diameters for all orientations (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different diameters for all orientations



شکل ۹: اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی در دو قطر مختلف برای تمام جهتها
Fig. 9. Heater temperature difference, friction coefficient, logarithmic mean temperature difference and overall heat transfer coefficient at two different values of diameters for all orientations

۵-۶- بررسی اثر قطر لوله‌ها روی عملکرد مدار برای حالت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر

شکل‌های ۸ و ۹، اثر افزایش قطر لوله‌های مدار را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها مقادیر توان هیتر، درصد نانو ذره و عدد استانتون ثابت در نظر گرفته شده است (St_m برابر با ۲۰، ϕ برابر با ۲٪ و توان هیتر برابر با ۲۰ W است). در شکل ۸-الف، اثر افزایش قطر لوله‌های مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا برای همه جهتها قرارگیری هیتر و کولر

عدد رینولدز افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش توان هیتر، عدد گراش افزایش اصلاح شده می‌یابد (رابطه (۷)) و افزایش عدد گراش اصلاح شده، منجر به افزایش عدد رینولدز خواهد شد (رابطه (۲۰)). به عنوان مثال، اگر توان هیتر از ۲۰ W به ۳۰ W افزایش یابد (۵۰٪ افزایش)، برای حالت هیتر افقی - کولر افقی، (علامت مربع و مثلث آبی رنگ را ببینید) عدد رینولدز از ۵۵ به حدود ۶۸ افزایش می‌یابد (۲۳/۶٪ افزایش) که بیانگر افزایش آشفستگی جریان است.

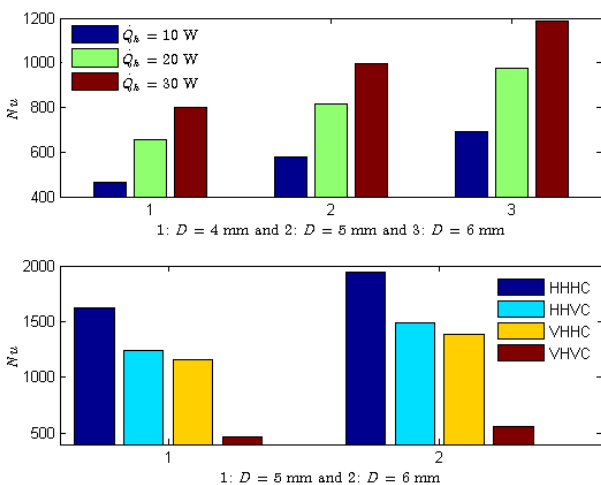
یا کاهش هر پارامتر، مانند تفسیر فیزیکی بیان شده در شکل‌های ۵ و ۶ است. هنگامی که قطر لوله‌های مدار از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) ضریب اصطکاک و اختلاف دمای متوسط لگاریتمی برای همه حالت‌ها به طور متوسط به ترتیب حدوداً ۱۶/۵٪ و ۳۰/۴٪ کاهش می‌یابند، در حالی که ضریب انتقال حرارت کلی به طور متوسط حدوداً ۱۹/۷٪ افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰، اثر تغییر قطر لوله‌های مدار بر روی عدد ناسلت در سه مقدار مختلف توان هیتر برای حالت هیتر افقی-کولر افقی نشان داده شده است. در این حالت St_m برابر با ۱۰ و ϕ برابر با ۲٪ است. همچنانکه مشاهده می‌شود در هر توان هیتر، با افزایش قطر، عدد ناسلت افزایش می‌یابد زیرا با افزایش قطر ضریب انتقال حرارت کلی افزایش می‌یابد (شکل ۶ را ببینید) و با توجه به رابطه (۷) عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک قطر ثابت، عدد ناسلت با افزایش توان هیتر، افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش توان هیتر، ضریب انتقال حرارت کلی افزایش می‌یابد (شکل ۶ را ببینید) و افزایش ضریب انتقال حرارت کلی با توجه به رابطه (۷)، به افزایش عدد ناسلت منجر می‌شود. همچنین این شکل اثر قطر لوله‌های مدار را بر روی عدد ناسلت برای جهت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر نشان می‌دهد. در این قسمت St_m برابر با ۲۰، ϕ برابر با ۲٪ و توان هیتر برابر با ۲۰W است. با افزایش قطر، برای هر کدام از حالت‌ها، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. هنگامی که قطر لوله‌های مدار از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) عدد ناسلت به طور متوسط

نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد در صورتی که قطر لوله‌های مدار از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) دبی جرمی حالت پایا برای حالت‌های اول تا چهارم به ترتیب ۴۳/۴۷٪، ۴۱/۵۹٪، ۴۳/۶۲٪ و ۴۳/۸۴٪ افزایش می‌یابد. دلیل افزایش دبی جرمی حالت پایا، با توجه به تعریف عدد رینولدز و ارتباط مستقیم آن با قطر قابل تحلیل است (رابطه (۷) را ببینید).

شکل ۸-ب، عدد رینولدز در حالت پایا را (Re_{ss}) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در دو قطر مختلف برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که در یک قطر ثابت، Re_{ss} برای حالت هیتر افقی - کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی - کولر عمودی کمترین مقدار را داراست (مثلاً علامت‌های مربع را در قطر ۶mm ببینید). نکته جالب توجه در این نمودار این است که با افزایش قطر، در تمامی حالت‌های مدار، هر دو مقدار Re_{ss} و Gr_m / N_G به طور مستقل از یکدیگر افزایش می‌یابند (به طور مثال علامت دایره و مربع آبی رنگ را ببینید). زیرا با افزایش قطر، با توجه به تعریف عدد رینولدز، مقدار Re_{ss} افزایش می‌یابد و همچنین افزایش قطر، باعث افزایش Gr_m و کاهش N_G و در نتیجه افزایش Gr_m / N_G می‌گردد.

شکل ۹، اثر قطر لوله‌های مدار را بر روی اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی برای جهت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر نشان می‌دهد. با افزایش قطر، دبی جرمی حالت پایا برای هر کدام از حالت‌ها، افزایش می‌یابد (شکل ۸-الف را ببینید) و مطابق رابطه (۲۹)، با افزایش دبی جرمی اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش می‌یابد. در تحلیل پایداری مدار، اختلاف دمای دو سر هیتر یک پارامتر مهم است که می‌تواند جهت چرخش سیال در مدار را نشان دهد. در صورتی که قطر لوله‌های مدار از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا برای اول تا چهارم به ترتیب ۳۰/۳۰٪، ۳۰/۳۶٪، ۳۰/۳۷٪ و ۳۰/۴۸٪ کاهش می‌یابد. شکل نشان می‌دهد که با افزایش قطر، برای هر کدام از حالت‌ها، ضریب اصطکاک و اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش می‌یابد در حالی که ضریب انتقال حرارت کلی افزایش می‌یابد. مقدار ضریب اصطکاک در شکل ۹، از تقسیم عدد ۶۴، بر مقدار رینولدز در هر حالت به دست می‌آید (رابطه (۳۰) را ببینید). دلایل فیزیکی افزایش



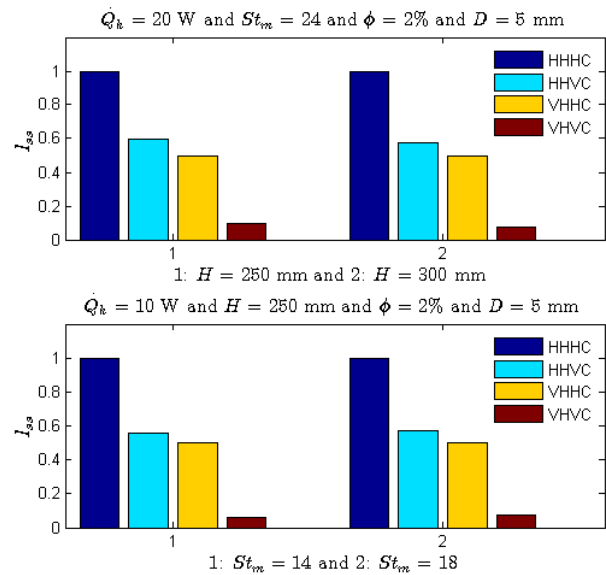
شکل ۱۰: عدد ناسلت در توان‌ها و قطرهای مختلف برای تمام جهت‌ها
 Fig. 10. Nusselt number at different values of heater powers and diameters for all orientations

کولر عمودی به ترتیب تقریباً ۴٪ و ۲۳٪ کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش عدد استانتون اصلاح شده از ۱۴ به ۱۸ (۲۸/۶٪ افزایش) مقدار I_{ss} برای حالت‌های هیتر افقی- کولر عمودی و هیتر عمودی- مقدار کولر عمودی به ترتیب تقریباً ۲/۷٪ و ۲۴/۹٪ افزایش می‌یابد. مقدار I_{ss} ، برای حالت هیتر عمودی- کولر افقی، با توجه به رابطه (۲۴) برابر با ۰/۵ است. دقت شود هر چند ظاهراً این رابطه نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع، مقدار I_{ss} باید کاهش یابد، ولی چون هنگام بررسی اثر ارتفاع، طول هیتر ثابت در نظر گرفته می‌شود، بنابراین مقدار I_{ss} با تغییر ارتفاع تغییری نمی‌کند و ثابت می‌ماند به عبارتی دیگر با توجه به رابطه (۲۴) مقدار I_{ss} ، برای حالت هیتر عمودی- کولر افقی، در صورتی که هیتر در وسط قرار گیرد (یعنی مطابق شکل ۱ فاصله L_1 با L_4 مساوی باشد)، همیشه برابر با ۰/۵ است.

۷-۵- بررسی اثر ارتفاع مدار بر عملکرد مدار برای حالت‌های مختلف

قرارگیری هیتر و کولر

در شکل ۱۲-الف، اثر افزایش ارتفاع مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا برای همه جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع مدار، در سه حالت اول دبی جرمی حالت پایا افزایش می‌یابد در صورتی که در حالت هیتر عمودی- کولر عمودی دبی جرمی حالت پایا با افزایش ارتفاع مدار، کاهش می‌یابد. به طور مثال اگر ارتفاع مدار از ۲۰۰ mm به ۳۰۰ mm

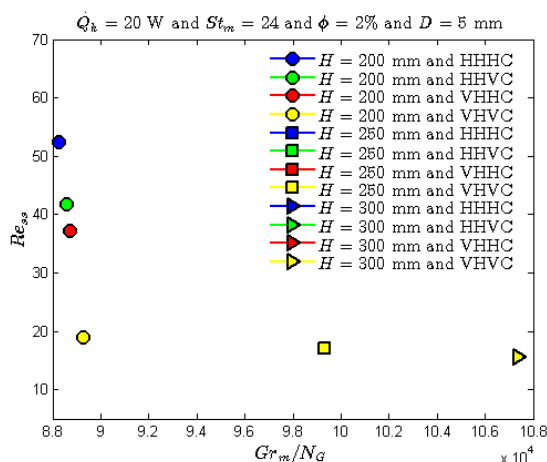


شکل ۱۱: مقدار I_{ss} برای تمام جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر

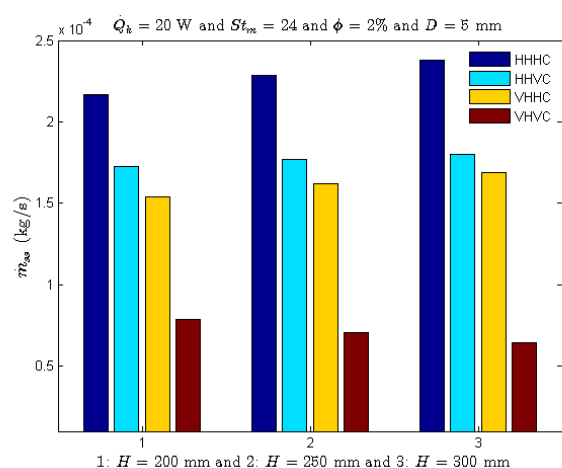
Fig. 11. I_{ss} for different orientations of heater and cooler

۱۹/۶٪ افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۱، مقدار I_{ss} (رابطه (۲۱)) برای تمام جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر در دو ارتفاع مختلف و دو عدد استانتون مختلف نشان داده شده است. مقدار I_{ss} ، برای حالت هیتر افقی- کولر افقی، همیشه مساوی یک است (رابطه (۲۲)). شکل نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع از ۲۵۰ mm به ۳۰۰ mm (۲۰٪ افزایش)، مقدار I_{ss} برای حالت‌های هیتر افقی- کولر عمودی و هیتر عمودی-



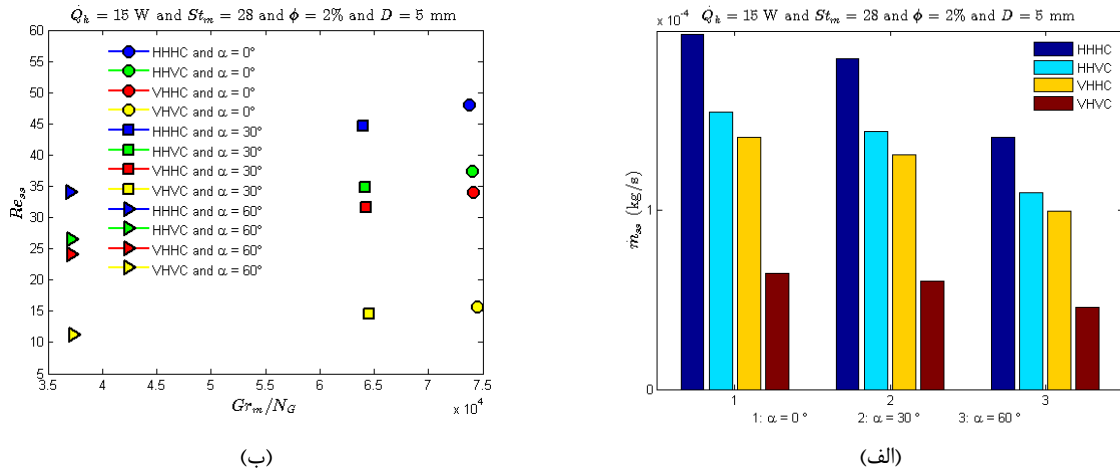
(ب)



(الف)

شکل ۱۲: (الف) نرخ دبی جرمی در ارتفاع‌های مختلف برای تمام جهت‌ها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m / N_G در ارتفاع‌های مختلف برای تمام جهت‌ها

Fig. 12. (a) Mass flow rate at different heights for all orientations (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different heights for all orientations



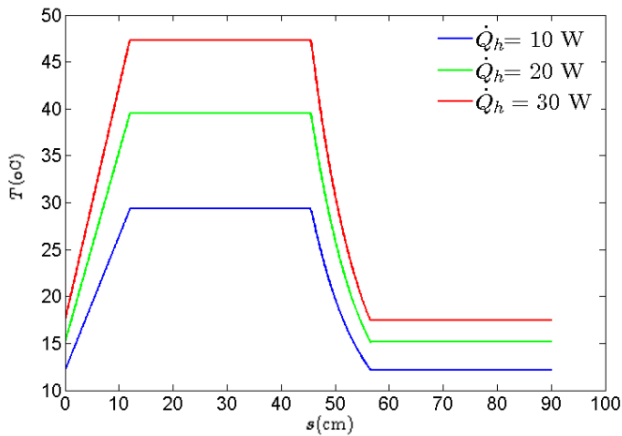
شکل ۱۳: (الف) نرخ دبی جرمی در زاویه‌های شیب مختلف برای تمام جهت‌ها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m/N_G در زاویه‌های شیب مختلف برای تمام جهت‌ها
Fig. 13. (a) Mass flow rate at different inclination angles for all orientations (b) Re_{ss} versus Gr_m/N_G at different inclination angles for all orientations

شکل ۱۲-ب، عدد رینولدز در حالت پایا (Re_{ss}) را بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m/N_G) در سه ارتفاع مختلف برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که در یک ارتفاع ثابت، برای حالت هیتر افقی - کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی - کولر عمودی کمترین مقدار را داراست (مثلاً علامت‌های مثلث آبی و زرد رنگ را ببینید). شکل نشان می‌دهد که در سه حالت اول، با افزایش ارتفاع عدد رینولدز افزایش می‌یابد و برای حالت چهارم یعنی هیتر عمودی - کولر عمودی، عدد رینولدز کاهش می‌یابد (علامت‌های دایره، مربع و مثلث زرد رنگ را ببینید). استدلال در این مورد مانند توضیحات شکل ۱۲-الف می‌باشد. البته شکل نشان می‌دهد که مقدار پارامتر بدون بعد (Gr_m/N_G) در تمامی حالت‌ها، با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد که با توجه با رابطه (۷)، مشخص است که رابطه مستقیمی بین ارتفاع و پارامتر بدون بعد (Gr_m/N_G) وجود دارد.

۵-۸- بررسی اثر زاویه شیب مدار بر عملکرد مدار برای حالت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر

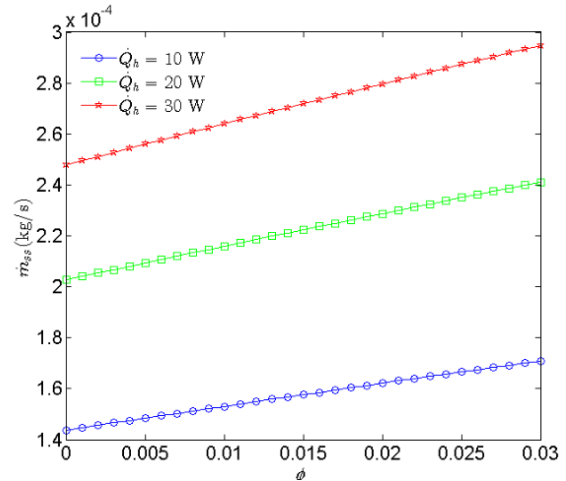
در شکل ۱۳-الف، اثر افزایش زاویه شیب مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا برای همه جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد با افزایش زاویه شیب مدار، در همه حالت‌ها، دبی جرمی حالت پایا کاهش می‌یابد. به طور مثال هنگامی

افزایش یابد (۵۰٪ افزایش)، دبی جرمی حالت پایا برای حالت‌های اول تا سوم به ترتیب ۹/۷٪، ۳/۵٪ و ۹/۶٪ افزایش می‌یابد و برای حالت چهارم ۱۷/۸٪ کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که در هر چهار حالت، با افزایش ارتفاع مدار عدد گراش اصلاح شده افزایش می‌یابد (رابطه (۷)) که در نتیجه عدد رینولدز افزایش می‌یابد (رابطه (۲۶)) و در پی آن، دبی جرمی حالت پایای مدار افزایش می‌یابد (رابطه (۷)). اما از طرفی، در حالت‌های هیتر افقی - کولر عمودی و هیتر عمودی - کولر عمودی با افزایش ارتفاع مدار مقدار I_{ss} ، کاهش می‌یابد (تحلیل شکل ۱۱ را ببینید). با کاهش مقدار I_{ss} ، عدد رینولدز کاهش می‌یابد (رابطه (۲۶)) و در نتیجه مقدار دبی جرمی حالت پایای مدار کاهش می‌یابد (رابطه (۷)). در حالت هیتر افقی - کولر عمودی، افزایش دبی جرمی حاصل از افزایش عدد گراش اصلاح شده بر کاهش دبی جرمی ناشی از کاهش مقدار I_{ss} غلبه می‌کند که نهایتاً دبی جرمی حالت پایای مدار افزایش می‌یابد. اما در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی، افزایش دبی جرمی حاصل از افزایش عدد گراش اصلاح شده نمی‌تواند بر کاهش دبی جرمی ناشی از کاهش مقدار I_{ss} غلبه کند و بنابراین نهایتاً، دبی جرمی حالت پایای مدار کاهش می‌یابد. در دو حالت دیگر، یعنی حالت‌های هیتر افقی - کولر افقی و هیتر عمودی - کولر افقی، افزایش ارتفاع بر مقدار I_{ss} اثری ندارد (تحلیل شکل ۱۱ را ببینید)، و بنابراین افزایش ارتفاع باعث افزایش دبی جرمی حالت پایای مدار می‌شود.



شکل ۱۵: توزیع دما در توان‌های مختلف

Fig. 15. Temperature distribution for different heater powers



شکل ۱۴: نرخ دبی جرمی بر حسب درصد نانو ذره در توان‌های مختلف
Fig. 14. Mass flow rate versus nanoparticle concentration for different heater powers

$$W_{ss} = a_1 \phi + a_0 \quad (32)$$

ضرایب a_1 و a_0 با استفاده از برازش منحنی در توان هیتر 10 W به ترتیب برابر با 0.0001439 و 0.0009089 می‌باشند و برای توان‌های دیگر به طور مشابه قابل محاسبه هستند. همچنین شکل نشان می‌دهد که در یک درصد نانو ذره‌ی ثابت، دبی جرمی پایای مدار با افزایش توان هیتر افزایش می‌یابد.

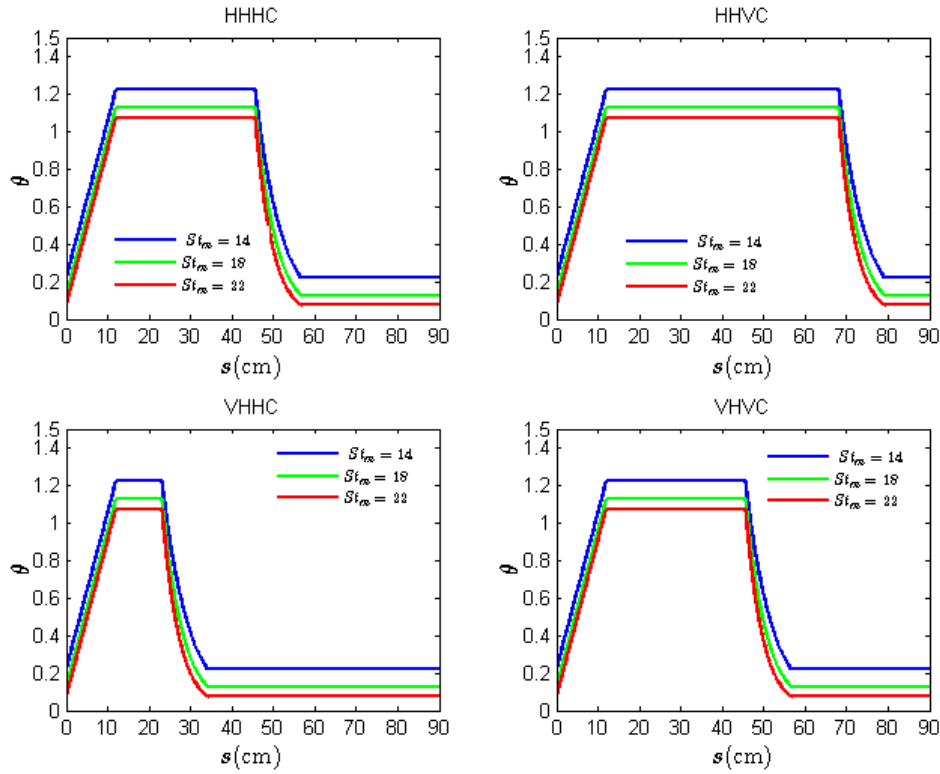
۱۰-۵- بررسی توزیع دما در مدار برای حالت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر

شکل ۱۵ توزیع دما را بر حسب طول مدار در سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. این شکل برای حالت هیتر افقی - کولر افقی و $\phi = 2\%$ رسم شده است. در یک توان مشخص، با حرکت در طول مدار و از ابتدای هیتر ($s=0$)، ابتدا دما در طول هیتر افزایش می‌یابد (خط با شیب مثبت)، سپس دما در بازوی گرم ثابت می‌ماند (اولین خط افقی). آنگاه دمای نانو سیال با ورود به قسمت کولر کاهش می‌یابد (خط با شیب منفی) و نهایتاً دما در بازوی سرد ثابت می‌ماند (دومین خط افقی) و انتهای بازوی سرد بر ابتدای هیتر منطبق است (مقدار دما یکسان است). همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش توان هیتر در هر مکان از مدار، دمای نانو سیال افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در انتهای هیتر با افزایش توان هیتر از 20 W به 30 W (50% افزایش)، دمای نانو سیال از $39/5^\circ\text{C}$ به $47/6^\circ\text{C}$ افزایش می‌یابد (20% افزایش).

که زاویه شیب مدار از حالت عمودی به 60 درجه تغییر می‌کند، دبی جرمی برای تمام حالت‌ها به طور متوسط $29/2\%$ کاهش پیدا می‌کند. دلیل کاهش دبی جرمی حالت پایای مدار این است که با افزایش زاویه شیب مدار، عدد گراش اصلاح شده کاهش می‌یابد (رابطه (۷)) و در نتیجه عدد رینولدز کاهش می‌یابد (رابطه (۲۶)) که نهایتاً منجر به کاهش دبی جرمی حالت پایای مدار خواهد شد (رابطه (۷)). شکل ۱۳-ب، عدد رینولدز در حالت پایا (Re_{ss}) را بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه زاویه شیب مختلف مدار برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب مدار، برای تمامی جهت‌ها، عدد رینولدز کاهش می‌یابد. به طور مثال برای حالت هیتر افقی - کولر افقی مقدار Re_{ss} برای سه زاویه شیب مدار 0 ، 30 و 60 درجه به ترتیب برابر با $48/02$ ، $44/71$ و $34/03$ می‌باشد (علامت‌های دایره، مربع و مثلث آبی رنگ را ببینید).

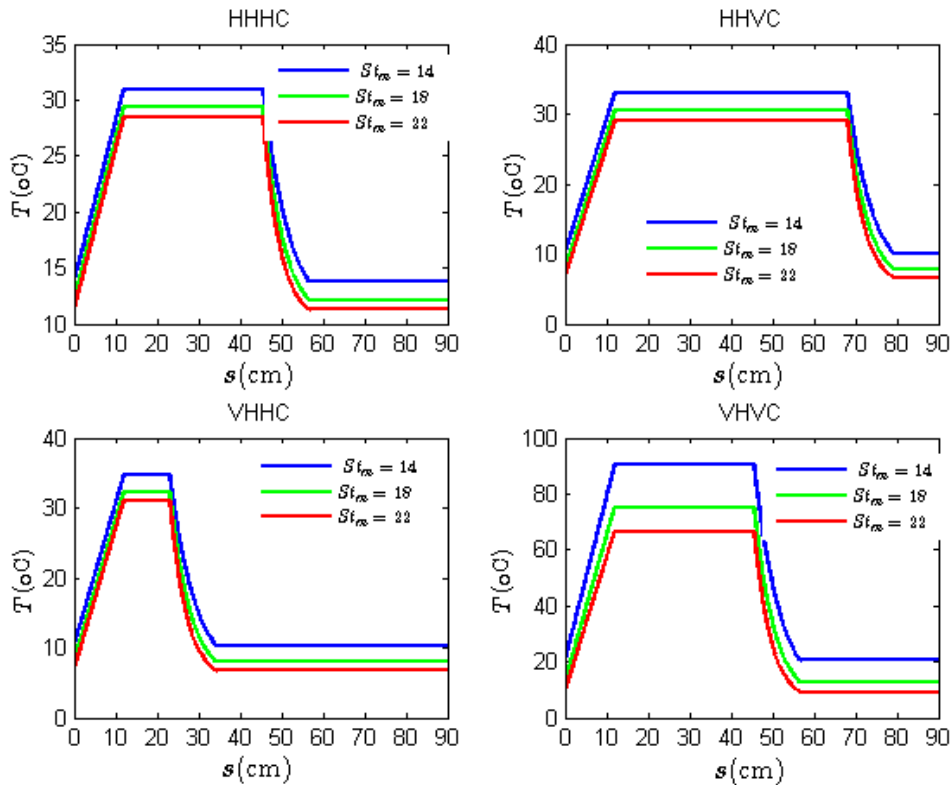
۹-۵- استخراج رابطه ریاضی دبی جرمی حالت پایای مدار

شکل ۱۴ دبی جرمی پایای مدار را بر حسب درصد نانو ذره در سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل St_m برابر با 10 فرض شده است. شکل نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانو ذره در یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی پایای مدار تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، دبی جرمی حالت پایای مدار را بر حسب درصد نانو ذره می‌توان از رابطه خطی زیر محاسبه نمود:



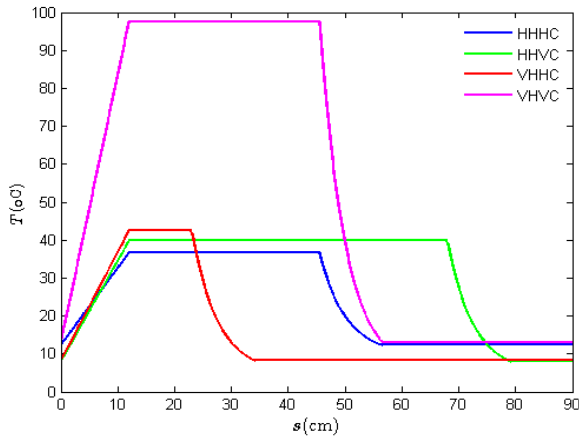
شکل ۱۶: توزیع دمای بدون بعد در اعداد استانتون اصلاح شده مختلف برای همه جهت‌ها

Fig. 16. Dimensionless temperature distribution in different modified Stanton numbers for all orientations

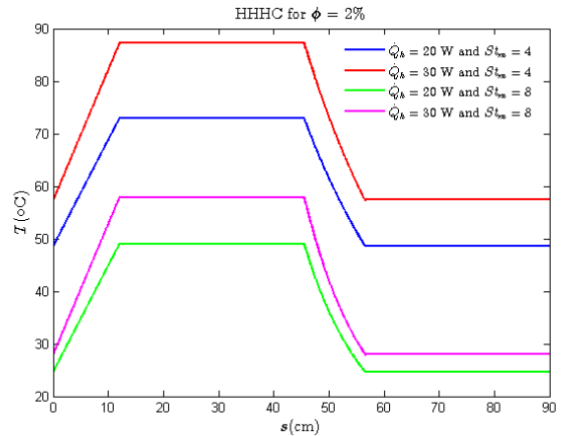


شکل ۱۷: توزیع دمای نانو سیال در اعداد استانتون اصلاح شده مختلف برای همه جهت‌ها

Fig. 17. Nanofluid temperature distribution in different modified Stanton numbers for all orientations



(ب)



(الف)

شکل ۱۸: (الف) توزیع دما در توان‌ها و اعداد استانتون اصلاح شده مختلف برای هیتر افقی - کولر افقی (ب) توزیع دما در $\dot{Q}_h = 20 \text{ W}$ برای تمام جهتها
Fig. 18. (a) Temperature distribution in different heater powers and modified Stanton numbers for HHHC (b) Temperature distribution at $\dot{Q}_h = 20 \text{ W}$ for different orientations

شیب خطوط دما در هیتر و کولر در حالت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر با یکدیگر متفاوت است. به عبارتی دیگر می‌توان بیان داشت که طول خطوط دما در بازوهای گرم و سرد برای حالت‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است (خطوط افقی در نمودارها را با یکدیگر مقایسه کنید).

در شکل ۱۸-الف توزیع دمای نانوسیال در مدار برای حالت هیتر افقی - کولر افقی در دو مقدار مختلف عدد استانتون اصلاح شده و برای دو توان مختلف هیتر رسم شده است. شکل نشان می‌دهد که هر چقدر توان هیتر بیشتر و عدد استانتون اصلاح شده کمتر انتخاب شود دمای نانوسیال افزایش می‌یابد (خط قرمز رنگ را در نمودار مشاهده کنید). این شکل برای درصد نانو ذره ۲٪ رسم شده است. همانطور که از شکل دیده می‌شود برای St_m برابر با ۴ هنگامی که توان هیتر از ۲۰ W به ۳۰ W افزایش پیدا می‌کند، اختلاف دمای دو سر هیتر از 23°C به 29°C (۲۶/۱٪ افزایش) افزایش می‌یابد (خطوط آبی و قرمز را ببینید). اما برای St_m برابر با ۸، اختلاف دمای دو سر هیتر از 22°C به 28°C (۲۷/۳٪ افزایش) افزایش می‌یابد (خطوط سبز و صورتی را ببینید).

در شکل ۱۸-ب توزیع دمای نانوسیال در مدار برای همه حالت‌های قرارگیری هیتر و کولر با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل توان هیتر ۲۰ W، درصد نانو ذره ۲٪، و عدد استانتون اصلاح

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب، توزیع دمای بدون بعد و دمای نانو سیال در مدار برای حالت‌های مختلف قرارگیری هیتر و کولر در سه مقدار مختلف عدد استانتون اصلاح شده (St_m) رسم شده است. در همه این شکل‌ها، توان هیتر ۱۰ W و مقدار نانو ذره ۲ درصد در نظر گرفته شده است. با دقت در همه شکل‌ها مشخص می‌گردد که در یک عدد استانتون اصلاح شده ثابت، اختلاف دمای بدون بعد در بازوهای سرد و گرم مساوی یک است و این مهم تأیید رابطه (۱۹) می‌باشد. شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد استانتون اصلاح شده، دمای بدون بعد و دمای نانوسیال در مدار کاهش می‌یابد و این به دلیل افزایش قدرت خنک‌کاری کولر است. زیرا با توجه به رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) با افزایش عدد استانتون اصلاح شده (St_m)، دمای بدون بعد در بازوهای سرد و گرم کاهش می‌یابد و بنابراین با جایگذاری این مقادیر در رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) دمای بدون بعد در هیتر و کولر نیز کاهش می‌یابد. البته به لحاظ فیزیکی هنگامی که دمای سیال خنک‌کن Ts در کولر کاهش می‌یابد، قدرت خنک‌کاری کولر افزایش می‌یابد و به عبارتی عدد استانتون افزایش می‌یابد و سبب کاهش دمای کل مدار می‌گردد [۶]. در همه این شکل‌ها به جهت این که مقایسه صحیح باشد، طول هیتر، طول کولر و طول کل مدار به ترتیب برابر با ۱۲۰ mm، ۱۱۰ mm، ۹۰۰ mm و ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود،

مدار برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر کاهش می‌یابند.

➤ اختلاف دمای بدون بعد بین بازوهای گرم و سرد برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر در حل حالت پایا همیشه برابر یک است.

➤ برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر، دمای نانو سیال در هر مکان از مدار با افزایش توان هیتر افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش عدد استانتون اصلاح شده کاهش می‌یابد.

➤ برای یک حالت هندسی مشخص و با پارامترهای عملکردی ثابت، مدار در حالت هیتر افقی - کولر افقی بیشترین دبی جرمی و در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی کمترین دبی جرمی را داراست. مشخص گردید مقدار دبی جرمی در حالت هیتر افقی - کولر افقی تقریباً چهار برابر مقدار دبی جرمی در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی است. همچنین، دمای بازوی گرم در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی بیشترین مقدار و در حالت هیتر افقی - کولر افقی کمترین مقدار را داراست که این اختلاف با توجه به شکل ۱۸-ب، حدوداً 63°C است.

شده برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است. شکل نشان می‌دهد که در هر مکان از مدار، دمای نانوسیال برای حالت هیتر افقی - کولر افقی کمترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی - کولر عمودی بیشترین مقدار را داراست (باید توجه شود که دمای حداکثر باید زیر 100°C باقی بماند تا فرض تکفاز بودن سیال معتبر باشد). به طور مثال، دما در انتهای هیتر برای حالت اول و چهارم به ترتیب 34°C و 97°C است (خطوط آبی و صورتی را ببینید). علت این که خط افقی اول مربوط به حالت هیتر عمودی - کولر عمودی در این نمودار (یعنی دمای خروجی از هیتر یا به عبارتی دمای بازوی گرم) نسبت به دیگر حالت‌ها بالاتر قرار می‌گیرد این است که دبی جرمی حالت پایا در این حالت نسبت به دیگر حالت‌ها کمتر است (شکل ۱۶ را ببینید) و با توجه به رابطه (۲۹) اختلاف دمای دو سر هیتر از بقیه حالت‌ها بیشتر است که نهایتاً به بالاتر بودن دمای بازوی گرم منجر می‌گردد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، با کمک معادلات بدون بعد حاکم بر یک مدار جابه‌جایی طبیعی مینیاتوری، حل در حالت پایا به دست آمد و سپس اثرات قطر لوله‌ها، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، درصد نانو ذره مس و توان هیتر بر روی دبی جرمی مدار و توزیع دما در مدار بررسی گردید. نتایج این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

➤ دبی جرمی و عدد رینولدز پایای مدار با افزایش توان هیتر و درصد نانو ذره افزایش می‌یابند.

➤ دبی جرمی، ضریب انتقال حرارت کلی و عدد ناسلت با افزایش قطر لوله‌های مدار برای تمامی جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر افزایش می‌یابند در حالی که اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک و اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش می‌یابند.

➤ برای یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی و عدد رینولدز برای حالت هیتر افقی - کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی - کولر عمودی کمترین مقدار را داراست.

➤ با افزایش ارتفاع، دبی جرمی و عدد رینولدز پایای مدار برای همه جهت‌های قرارگیری هیتر و کولر به جز حالت هیتر عمودی - کولر عمودی افزایش می‌یابند.

➤ دبی جرمی و عدد رینولدز پایای مدار با افزایش زاویه شیب

فهرست شرح

علائم	شرح
A	سطح جریان (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D	قطر (m)
f	ضریب اصطکاک
g	شتاب جاذبه (m s^{-2})
Gr	عدد گراشف
Gr_m	عدد گراشف اصلاح شده ^۱
H	ارتفاع مدار (m)
I_{ss}	انتگرال دمای پایای بدون بعد در کل مدار (رابطه (21))
k	ضریب هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
L	طول (m)
\dot{m}	نرخ دبی جرمی (kg s^{-1})
Nu	عدد ناسلت ^۲
Pr	عدد پرانتل

سیال پایه	f	شار حرارتی ($W m^{-2}$)	q''
هیتر	h	توان هیتر (W)	\dot{Q}_h
بازوی گرم	hl	عدد رینولدز	Re
نانو سیال	nf	مختصات در امتداد مدار (m)	s
حالت پایا	ss	فاصله بدون بعد در امتداد مدار	S
ذرات جامد	s	عدد استانتون	St
کل	t	عدد استانتون اصلاح شده ³	St_m

مراجع

- [1] Q. Zhou, Y. Xia, G. Liu, X. Ouyang, A miniature integrated nuclear reactor design with gravity independent autonomous circulation, Nuclear Engineering and Design, 340 (2018) 9-16.
- [2] D. Japikse, Advances in thermosyphon technology, in: Advances in heat transfer, Elsevier, 1973, pp. 1-111.
- [3] Y. Zvirin, A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems, Nuclear Engineering and Design, 67(2) (1982) 203-225.
- [4] R. Greif, Natural circulation loops, Journal of Heat Transfer, 110(4b) (1988) 1243-1258.
- [5] P. Vijayan, A. Nayak, D. Saha, M. Gartia, Effect of loop diameter on the steady state and stability behaviour of single-phase and two-phase natural circulation loops, Science and technology of nuclear installations, 2008 (2008).
- [6] P. Vijayan, Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops, Nuclear Engineering and Design, 215(1-2) (2002) 139-152.
- [7] A. Nayak, M. Gartia, P. Vijayan, An experimental investigation of single-phase natural circulation behavior in a rectangular loop with Al₂O₃ nanofluids, Experimental thermal and fluid science, 33(1) (2008) 184-189.
- [8] M. Misale, F. Devia, P. Garibaldi, Experiments with Al₂O₃ nanofluid in a single-phase natural circulation mini-loop: Preliminary results, Applied Thermal Engineering, 40 (2012) 64-70.
- [9] B. Swapnalee, P. Vijayan, A generalized flow equation

زمان (s)	t
دما (K)	T
دمای منبع سرد (K)	T_s
ضریب انتقال حرارت کلی ($W m^{-2} K^{-1}$)	U
حجم (m^3)	V
عرض مدار (m)	W
ارتفاع (m)	z
ارتفاع بدون بعد	Z

علائم یونانی

زاویه شیب مدار (°)، ضریب پخش حرارتی ($m^2 s^{-1}$)	α
ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	β
دمای بدون بعد	θ
لزجت دینامیکی ($kg m^{-1} s^{-1}$)	μ
چگالی ($kg m^{-3}$)	ρ
زمان بدون بعد	τ
درصد نانو ذرات	ϕ
دبی جرمی بدون بعد	ω
اختلاف دمای دو سر هیتر (K)	ΔT_h
اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (K)	ΔT_m

زیرنویس‌ها

حالت مبنا (مرجع)	0
کولر	c
بازوی سرد	cl
مؤثر	eff

1 Modified Grashof number

2 Nusselt number

3 Modified Stanton number

- [18] G.A. Sheikhzadeh, M. Sepehrnia, M. Rezaie, M. Mollamahdi, Natural Convection of Turbulent Al₂O₃-Water Nanofluid with Variable Properties in a Cavity with a Heat Source and Heat Sink on Vertical Walls, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(6) (2019) 1237-1250.
- [19] S.M. Seyyedi, M. Hashemi-Tilehnoee, Parametric study of a rectangular single phase natural circulation loop at steady state, *Modares Mechanical Engineering*, 18(2) (2018) 413-422.
- [20] H. Cheng, H. Lei, L. Zeng, C. Dai, Experimental investigation of single-phase natural circulation in a mini-loop driven by heating and cooling fluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 103 (2019) 182-190.
- [21] S. Seyyedi, N. Sahebi, A. Dogonchi, M. Hashemi-Tilehnoee, Numerical and experimental analysis of a rectangular single-phase natural circulation loop with asymmetric heater position, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130 (2019) 1343-1357.
- [22] M. Hashemi-Tilehnoee, N. Sahebi, A. Dogonchi, S.M. Seyyedi, S. Tashakor, Simulation of the dynamic behavior of a rectangular single-phase natural circulation vertical loop with asymmetric heater, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139 (2019) 974-981.
- [23] X.-Q. Wang, A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International journal of thermal sciences*, 46(1) (2007) 1-19.
- [24] A. Dogonchi, M.A. Ismael, A.J. Chamkha, D. Ganji, Numerical analysis of natural convection of Cu-water nanofluid filling triangular cavity with semicircular bottom wall, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(6) (2019) 3485-3497.
- [25] J. Reyes, *Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments*, Dr. Jose Reyes (US), 2005.
- for single phase natural circulation loops obeying multiple friction laws, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(11-12) (2011) 2618-2629.
- [10] C.-J. Ho, Y. Chung, C.-M. Lai, Thermal performance of Al₂O₃/water nanofluid in a natural circulation loop with a mini-channel heat sink and heat source, *Energy conversion and management*, 87 (2014) 848-858.
- [11] S. Doganay, A. Turgut, Enhanced effectiveness of nanofluid based natural circulation mini loop, *Applied Thermal Engineering*, 75 (2015) 669-676.
- [12] L. Lima, N. Mangiavacchi, L. Ferrari, Stability analysis of passive cooling systems for nuclear spent fuel pool, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(3) (2017) 1019-1031.
- [13] A. Srivastava, J.Y. Kudariyawar, A. Borgohain, S. Jana, N. Maheshwari, P. Vijayan, Experimental and theoretical studies on the natural circulation behavior of molten salt loop, *Applied Thermal Engineering*, 98 (2016) 513-521.
- [14] m. moradzadeh, b. ghasemi, A. Raisi, Nanofluid mixed-convection heat transfer in a ventilated cavity with a baffle, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(3) (2016) 257-266.
- [15] M. Hosseini Abadshapoori, M.H. Saidi, Al₂O₃-water Nanofluid in a Square Cavity with Curved Boundaries, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(3) (2017) 567-580.
- [16] H. Cheng, H. Lei, C. Dai, Thermo-hydraulic characteristics and second-law analysis of a single-phase natural circulation loop with end heat exchangers, *International Journal of Thermal Sciences*, 129 (2018) 375-384.
- [17] H. Cheng, H. Lei, L. Zeng, C. Dai, Theoretical and experimental studies of heat transfer characteristics of a single-phase natural circulation mini-loop with end heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128 (2019) 208-216.

