



## مطالعه پارامتریک مدار جابه‌جایی طبیعی مستطیل شکل تک‌فاز در حالت پایدار

سید مسعود سیدی<sup>1\*</sup>، مهدی هاشمی تیله‌نویی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علی‌آباد کتول، علی‌آباد کتول

2- استادیار، مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علی‌آباد کتول، علی‌آباد کتول

\* علی‌آباد کتول، صندوق پستی 49417-93451، s.masoud\_seyedi@aliabadiau.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>یک مدار جابه‌جایی طبیعی حرارت را از یک منبع دما بالا دریافت کرده و بدون نیاز به یک پمپ مکانیکی آن را به یک منبع دما پایین پس می‌دهد. مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز در بسیاری از سیستم‌های صنعتی جهت خنک‌سازی کاربرد دارد. توانایی انتقال حرارت مدار جابه‌جایی طبیعی به دبی جریان که مدار می‌تواند تولید نماید بستگی دارد. برای مشخص کردن توانایی انتقال حرارت این مدار، دانستن دبی جریان ضروری است. در حالت پایا نیروی شناوری و نیروی اصطکاک در امتداد مدار با یکدیگر موازنه می‌شوند. در این مقاله ابتدا معادلات حاکم بر مدار جابه‌جایی طبیعی بیان می‌شوند، سپس با تعریف پارامترهای بدون بعد مناسب معادلات حاکم به صورت بدون بعد باز نویسی می‌گردند. آن‌گاه اثرات طول هیتر، طول کولر، قطر لوله‌ها، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، فاصله هیتر نسبت به بازوهای چپ و راست، فاصله کولر نسبت به بازوهای چپ و راست و توان هیتر بر نرخ دبی جرمی و توزیع دما در مدار در حالت پایا بررسی می‌شوند. در این مطالعه برخلاف سایر پژوهش‌ها مدلی پیوسته برای ضریب اصطکاک در تمامی رژیم‌های جریان در نظر گرفته شده است. همچنین محل قرارگیری هیتر و کولر در مدار به صورت نامتقارن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش ارتفاع مدار، قطر مدار و توان هیتر سبب افزایش نرخ دبی جرمی می‌گردد. افزایش یا کاهش طول هیتر بر نرخ دبی جرمی اثری ندارد، در حالی که افزایش زاویه مدار باعث کاهش نرخ دبی جرمی مدار می‌گردد.</p>	<p>مقاله پژوهشی کامل دریافت: 28 مهر 1396 پذیرش: 06 بهمن 1396 ارائه در سایت: 26 بهمن 1396 کلید واژگان: مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز نرخ دبی جرمی توان هیتر</p>

## Parametric study of a rectangular single phase natural circulation loop at steady state

Seyyed Masoud Seyyedi<sup>1\*</sup>, Mehdi Hashemi-Tilehnoee<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran.

2- Department of Nuclear Engineering, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran.

\*P.O.B 49417-93451 Aliabad Katoul, Iran, s.masoud\_seyedi@aliabadiau.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 October 2017  
Accepted 26 January 2018  
Available Online 15 February 2018

## Keywords:

Natural circulation loop  
Single phase  
Mass flow rate  
Heater Power

## ABSTRACT

A natural circulation loop receives heat from a high-temperature source and rejects it to a low-temperature source without using a mechanical pump. Single phase natural circulation loop has been applied in many industrial systems for cooling. The heat transport capability of natural circulation loops (NCLs) is directly proportional to the flow rate that it can generate. To establish the heat transport capability of a natural circulation loop, it is essential to know the flow rate. Friction force and gravitational force are balanced with each other along the loop at steady state. In this paper, firstly the governing equations have been written for a natural circulation loop. Then the governing equations have been rewritten in the dimensionless form. Then, effects of heater length, cooler length, tube diameter, loop height, loops inclination angle, the distance of heater from the right side or left side, the distance of cooler from right or left sides and power of the heater on the loop mass flow rate and loop temperature distribution have been investigated. The results show that increasing of loop height, loop diameter and power of heater increase the mass flow rate. Also, increasing or decreasing of heater length, has no effect on the mass flow rate, whereas increasing of loop inclination angle decreases the mass flow rate. In this study, the friction coefficient is considered as continues for all regimes. In addition, the position of the heater and cooler has been unsymmetrically investigated.

## 1- مقدمه

یک مدار جابه‌جایی طبیعی به منظور انتقال گرما از چشمه حرارتی به چاه حرارتی طراحی می‌گردد. توانایی انتقال حرارت یک مدار جابه‌جایی طبیعی مستقیماً به دبی جریانی که مدار می‌تواند تولید نماید بستگی دارد. مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز در بسیاری از سیستم‌های صنعتی مانند راکتورهای هسته‌ای، سیستم‌های زمین گرمایی، سیستم‌های گرمایش آب

ساده‌ترین مدل یک مدار جابه‌جایی طبیعی از یک منبع حرارتی دما بالا در پایین‌ترین قسمت مدار، یک منبع حرارتی دما پایین در بالاترین قسمت مدار و دو لوله عمودی تشکیل شده است. شکل 1 شماتیک ساده مدار جابه‌جایی طبیعی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

## Please cite this article using:

S. M. Seyyedi, M. Hashemi Tilehnoee, Parametric study of a rectangular single phase natural circulation loop at steady state, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 413-422, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بعد دو عدد ثابت که تابع ماهیت جریان (یعنی جریان آرام یا متلاطم) بودند را برای هر حالت تعیین کرد. در سال 2004 موسویان و همکاران [11] به تحلیل حالت گذرا و تحلیل رفتار پایداری برای مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز پرداختند. آن‌ها نتایج کارشان را به صورت آزمایشگاهی و حل عددی با یکدیگر مقایسه نمودند. در سال 2007 پیل خوال و همکاران [12] تحلیل پایداری را برای یک مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز با کمک مدل دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند و نتایج حاصل از تحلیل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در سال 2008 ویجایان و همکاران [13] به بررسی اثر قطر لوله‌های مدار جابه‌جایی تک‌فاز و دوفاز پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند برای حالت پایا در یک توان ثابت با افزایش قطر لوله‌ها دبی جرمی مدار افزایش می‌یابد. در سال 2010 ویجایان و همکاران [14] مقایسه‌ای بین مدارهای جابه‌جایی طبیعی در حالت تک‌فاز، دو فاز و فوق بحرانی انجام دادند. نتیجه تحقیق آن‌ها مشخص کرد فشار مدار بر دبی جریان در حالت تک‌فاز، دوفاز و فوق بحرانی به ترتیب بی‌اثر، کم اثر و بسیار مؤثر است. در سال 2010 میساله و گاری‌بالدی [15] اثر تغییر زاویه شیب مدار (زاویه شیب مدار نسبت به خط عمود اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین زاویه شیب مدار در یک مدار عمودی صفر است) را در یک مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند با افزایش زاویه شیب مدار (نزدیک‌تر شدن مدار به سطح افق) پایداری مدار افزایش می‌یابد. در سال 2012 دوپا و میساله [16] به بررسی اثر دمای منبع چاه حرارتی بر رفتار مدارهای جابه‌جایی طبیعی در حالت تک‌فاز پرداختند. آن‌ها نتایج مدل دینامیک سیالات محاسباتی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در سال 2012 میساله و همکاران [17] به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر نانوسیال  $Al_2O_3$  در یک مدار جابه‌جایی طبیعی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عملکرد حرارتی سیستم بین آب خالص و نانو سیال تفاوت محسوسی ندارد. در سال 2012 سوپانالی و ویجایان [18] سعی کردند یک رابطه کلی برای ضریب اصطکاک به دست آورند که در هر سه ناحیه آرام، گذار و متلاطم برای مدارهای جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز معتبر باشد. در سال 2014 کومار ناون و همکاران [19, 20] در دو پژوهش متوالی به بررسی رفتار دینامیکی یک مدار جابه‌جایی طبیعی به صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی پرداختند. در سال 2015 ریتابراتا ساها و همکاران [21] به بررسی عددی و آزمایشگاهی یک مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز مربع شکل پرداختند. آن‌ها اثر تغییر دمای محیط را بر عملکرد حرارتی سیستم در توان‌های پایین و متوسط بررسی نمودند، همچنین برای ضریب اصطکاک از سه تابع متفاوت (برحسب عدد رینولدز) برای ناحیه‌های آرام، گذار و متلاطم استفاده کردند. در سال 2016 سرواستاوا و همکاران [22] رفتار یک مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز با سیال عامل نمک مذاب را به طور تئوری و آزمایشگاهی مطالعه نمودند. در سال 2016 کوداری یاور و همکاران [23] به تحلیل پایداری یک مدار جابه‌جایی طبیعی با کمک مدل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. آن‌ها در مدل‌سازی ضخامت لوله‌ها را نیز در نظر گرفتند. در سال 2017 مایور کریشنانی و همکاران [24] به محاسبه چگونگی افزایش پایداری در مدار جابه‌جایی طبیعی مستطیلی شکل پرداختند. آن‌ها اثر تغییر زاویه شیب مدار را نیز بررسی کردند.

در پژوهش حاضر با استفاده از معادلات بدون بعد حاکم بر مسأله اثرات طول هیتز، طول کولر، قطر لوله‌ها، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، فاصله هیتز نسبت به سمت راست یا چپ مدار، فاصله کولر نسبت به سمت راست یا چپ مدار و توان هیتز بر نرخ دبی جرمی و توزیع دما در مدار

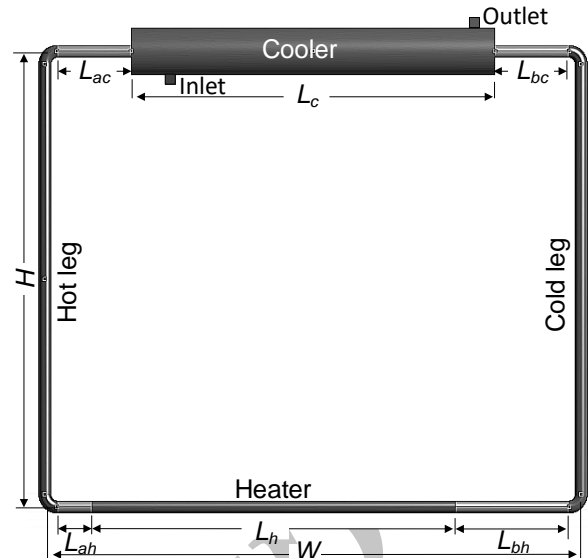


Fig. 1 Schematic of rectangular natural circulation loop

شکل 1 شماتیک مدار جابه‌جایی طبیعی مستطیل شکل

خورشیدی، سرمایه‌های توریب گاز، سرمایه‌های روتور ماشین‌های الکتریکی، خنک‌سازی قطعات الکترونیکی و برخی فرآیندهای صنعتی کاربرد دارد. مدارهای جابه‌جایی طبیعی بسته به نوع کاربردها به شکل‌های متفاوت طراحی می‌شوند. مدار جابه‌جایی طبیعی مستطیل شکل یکی از پر کاربردترین مدل‌هاست که به نوبه خود برحسب قرارگیری مکان منبع حرارتی دما بالا (هیتز) و منبع حرارتی دما پایین (کولر) به چهار مدل تقسیم می‌شود که عبارت از هیتز افقی و کولر افقی<sup>1</sup>، هیتز افقی و کولر عمودی<sup>2</sup>، هیتز عمودی و کولر افقی<sup>3</sup> و هیتز عمودی و کولر عمودی<sup>4</sup> است. مطالعات کلی روی مدارهای جابه‌جایی طبیعی و به دست آوردن معادلات حاکم توسط جاپیکس (در سال 1973) [1]، زوبرین (در سال 1981) [2]، مرتول و جریف (در سال 1985) [3] و جریف (در سال 1988) [4] انجام گردیده است.

برای درک بهتر جریان حالت پایا، تعریف گروه‌های بدون بعد مناسب امری ضروری است. زوبر (در سال 1980) [5]، هیسلسر (در سال 1982) [6] و ایشی کاتوکا (در سال 1984) [7] هر کدام با کمک معادلات دیفرانسیل حاکم گروه‌های بدون بعد متفاوتی تعریف کردند، اما مشکل اصلی در کار آنها تعداد زیاد گروه‌های بدون بعد و عدم ارائه راه حل مسأله در حالت پایا برحسب گروه‌های بدون بعد بود. وابستگی گروه‌های بدون بعد به دبی جرمی دلیل عدم ارائه راه حل بود که پارامتری مجهول در مدار جابه‌جایی طبیعی است. برای غلبه بر این مشکل در سال 1992 ویجایان و همکاران [8] دبی جرمی در حالت پایا را به عنوان تابعی از یک گروه بدون بعد به دست آوردند. در سال 1999 ویجایان و همکاران [9] همین روند را برای یک مدار جابه‌جایی طبیعی با لوله‌هایی با قطرهای غیریکسان (یعنی قطر لوله‌ها در قسمت‌های مختلف مدار یکسان نبود) توسعه دادند. آن‌ها حل پایداری را در ترم‌هایی از گروه‌های تشابهی به دست آوردند. پایداری مدار جابه‌جایی طبیعی به برهم‌کنش بین نیروهای شناوری (که در نتیجه اختلاف چگالی تولید می‌گردند) و نیروهای اصطکاکی در امتداد مدار بستگی دارد. در سال 2002 ویجایان [10] به مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی حالت پایا و رفتار پایداری یک مدار جابه‌جایی طبیعی پرداخت. او در این مطالعه با تعریف یک گروه بدون

<sup>1</sup> Horizontal heater and horizontal cooler (HHHC)

<sup>2</sup> Horizontal heater and vertical cooler (HHVC)

<sup>3</sup> Vertical heater and horizontal cooler (VHHC)

<sup>4</sup> Vertical heater and vertical cooler (VHVC)

$$\text{رابطه (7) را در روابط (6,5) به صورت زیر داریم [11,10].}$$

$$\text{Re} = \frac{\dot{m}D}{\mu A}; \text{Pr} = \frac{\mu C_p}{k}; \text{Nu} = \frac{UL_t}{k}; \text{St} = \frac{UA}{C_p \dot{m}};$$

$$\text{St}_m = \frac{4\text{Nu}}{\text{Re}_{ss}\text{Pr}}; \text{Gr}_m = \frac{g\beta D^3 \rho_0^2 Q_h H \cos\alpha}{A\mu^3 C_p} \quad (7)$$

این نکته باید بیان شود که در رابطه (7) به جای شتاب جاذبه ( $g$ ) عبارت  $g\cos\alpha$  استفاده شده تا امکان بررسی اثر زاویه شیب مدار فراهم گردد.

### 3- حل حالت 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 صورت رابطه (8) به دست آید [11,10].

$$\omega = 1 \text{ و } d\omega/d\tau = \partial\theta/\partial\tau = 0 \quad (8)$$

با استفاده از معادله انرژی (رابطه (3)) عبارتهایی صریح برای توزیع دمای بدون بعد در هیترو کولر به دست می‌آیند که به ترتیب در روابط (10,9) نشان داده شده‌اند.

$$[\theta_h(S)]_{ss} = (\theta_{cl})_{ss} + \frac{H}{L_h} S \quad (9)$$

$$[\theta_c(S)]_{ss} = (\theta_{hl})_{ss} \exp\left(\text{St}_m H \frac{S_{hl} - S}{L_t}\right) \quad (10)$$

در روابط (10,9)  $(\theta_{hl})_{ss}$  و  $(\theta_{cl})_{ss}$  به ترتیب دمای‌های بدون بعد بازوهای سمت سرد و گرم است که به ترتیب از روابط (12,11) به دست می‌آیند.

$$(\theta_{cl})_{ss} = \left(e^{\frac{\text{St}_m L_c}{L_t}} - 1\right)^{-1} \quad (11)$$

$$(\theta_{hl})_{ss} = \left(1 - e^{-\frac{\text{St}_m L_c}{L_t}}\right)^{-1} \quad (12)$$

جالب است توجه شود در حل حالت پایا اختلاف دمای بدون بعد بازوهای سمت گرم و سرد مدار جابه‌جایی طبیعی مساوی یک است. یعنی رابطه (13) با توجه به روابط (12,11) داریم.

$$(\theta_{hl})_{ss} - (\theta_{cl})_{ss} = 1 \quad (13)$$

حل حالت پایا برای معادله مومنتم (رابطه (5)) به صورت رابطه (14) بیان می‌شود [11,10].

$$\text{Re}_{ss} = \left(\frac{2}{p}\text{Gr}_m \frac{D}{L_t} I_{ss}\right)^{\frac{1}{3-b}} \quad (14)$$

رابطه (15) را در رابطه (14) داریم.

$$I_{ss} = \int \theta_{ss} dZ \quad (15)$$

پاسخ نهایی رابطه (15) برای مدار جابه‌جایی طبیعی با هیترو افقی و کولر افقی مساوی یک است؛ بنابراین رابطه (14) به صورت رابطه (16) بازنویسی می‌گردد.

$$\text{Re}_{ss} = \left(\frac{2\text{Gr}_m}{pN_G}\right)^{\frac{1}{3-b}} = C \left(\frac{\text{Gr}_m}{N_G}\right)^r \quad (16)$$

که در آن رابطه (17) را داریم.

$$N_G = \frac{L_t}{D}; C = \left(\frac{2}{p}\right)^r \text{ و } r = \frac{1}{3-b} \quad (17)$$

رابطه (16) به رابطه ویجایان معروف است. مقادیر پارامترهای  $p$  و  $b$  در رابطه (17) به نوع رژیم جریان (آرام، گذار و متلاطم) وابسته هستند که مطابق رابطه (18) برای تعیین ضریب اصطکاک نیز استفاده می‌شوند.

برای شرایط حالت پایا در یک مدار جابه‌جایی طبیعی از نوع هیترو افقی و کولر افقی بررسی می‌گردد. نقطه قوت کار حاضر استفاده از مدلی است که تابعی پیوسته برای ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز در سه رژیم آرام، گذار و متلاطم ارائه می‌دهد، همچنین ویژگی دیگر این پژوهش بررسی اثر فاصله هیترو نسبت به سمت راست یا چپ مدار و فاصله کولر نسبت به سمت راست یا چپ مدار (فواصل نامتقارن) در توان‌های مختلف هیترو بر نرخ دبی جرمی و توزیع دما در مدار است.

### 2- معادلات حاکم

معادلات بقا جرم، مومنتم و انرژی برای یک مدار جابه‌جایی طبیعی تک‌فاز به ترتیب در روابط (3-1) آمده است [11,10].

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

$$\frac{L_t}{A} \frac{d\dot{m}}{dt} = g \int \rho dz - \frac{f(L_{eff})_t \dot{m}^2}{2D\rho_0 A^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{A\rho_0} \frac{\partial T}{\partial s} = \begin{cases} \frac{4q}{D\rho_0 C_p} & \text{هیترو } (0 < s \leq S_h) \\ 0 & \text{لوله ها } (S_h < s \leq S_{hl} \text{ و } S_c < s \leq L_t) \\ -\frac{4U}{D\rho_0 C_p} (T - T_s) & \text{کولر } (S_{hl} < s \leq S_c) \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه (2)  $(L_{eff})_t$  طول مؤثر کل 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 مسئله 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.
- برای بیان شرایط مرزی و حل مسئله کافی است عدد استانتون (شرط مرزی سمت کولر) و عدد گراشف (شرط مرزی سمت هیترو) را انتخاب کنیم.
- در معادله انرژی (رابطه (3)) از اثر هدایت محوری و اتلافات ویسکوز صرف‌نظر شده است. معادلات مومنتم و انرژی با تعریف پارامترهای رابطه (4) بدون بعد می‌شوند [11,10].

$$\omega = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ss}}; \theta = \frac{T - T_s}{(\Delta T_h)_{ss}}; \tau = \frac{t}{t_r}; S = \frac{s}{H} \text{ and } Z = \frac{z}{H} \quad (4)$$

در رابطه (4)  $t_r = V\rho_0/\dot{m}_{ss}$  است. با استفاده از تقریب بوزینس و پارامترهای بدون بعد ارائه شده در رابطه (4) شکل بدون بعد معادلات مومنتم و انرژی به صورت روابط (6,5) به دست می‌آیند.

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{\text{Gr}_m}{\text{Re}_{ss}^3} \int \theta dZ - \frac{pL_t \omega^{2-b}}{2D\text{Re}_{ss}^b} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{L_t}{H} \omega \frac{\partial \theta}{\partial S} = \begin{cases} \frac{L_t}{L_h} & \text{هیترو } (0 < S \leq S_h) \\ 0 & \text{لوله ها } (S_h < S \leq S_{hl} \text{ و } S_c < S \leq S_t) \\ -\text{St}_m \theta & \text{کولر } (S_{hl} < S \leq S_c) \end{cases} \quad (6)$$

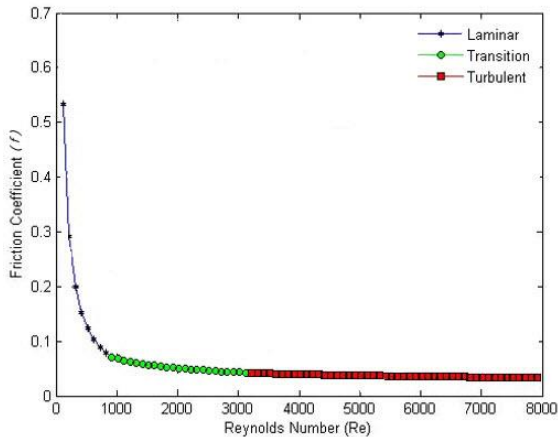


Fig. 2 Friction coefficient with respect to Reynolds number

شکل 2 ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز

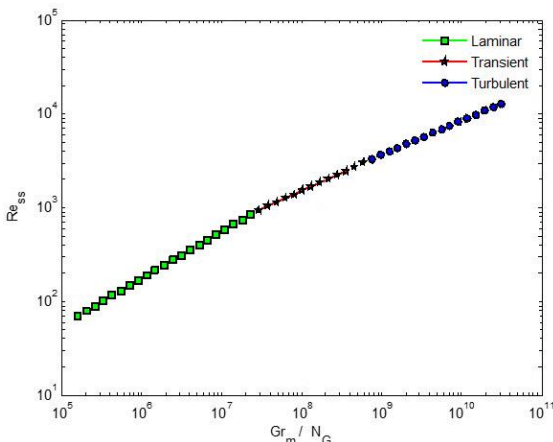


Fig. 3 Diagram of flow equation at steady state (Eq. 21)

شکل 3 نمودار معادله جریان در حالت پایا (رابطه 21)

جدول 1 ابعاد هندسی مدار

Table 1 Geometric dimensions of the NCL

مقدار	پارامتر
30	$D$ (mm)
1200	$W$ (mm)
1000	$H$ (mm)
800	$L_h$ (mm)
400	$L_c$ (mm)
200	$L_{ah}$ (mm)
200	$L_{bh}$ (mm)
200	$L_{ac}$ (mm)
200	$L_{bc}$ (mm)
0	$\alpha$ (°)

جدول 2 خواص ترموفیزیکی آب

Table 2 Thermo-physical properties of water

مقدار خاصیت در 1 atm و 25°C	خاصیت
997.1	$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )
$8.9 \cdot 10^{-4}$	$\mu$ (pa s <sup>-1</sup> )
$2.5 \cdot 10^{-4}$	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )
4183	$C_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
6.3	Pr
0.6125	$K$ (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )

2-4- بررسی اثر عدد استانتون اصلاح شده ( $St_m$ )

شکل 4 توزیع دمای بدون بعد را برحسب طول مدار در سه مقدار مختلف  $St_m$  نشان می‌دهد. همچنان که شکل نشان می‌دهد در هر مکان از مدار با

$$f = \frac{p}{Re^b} = \frac{p\omega^{-b}}{Re_{ss}^b} \quad (18)$$

ارتباط بین نرخ دبی جرمی، توان هیتر و اختلاف دمای دو سر هیتر در رابطه (19) نشان داده شده است (این رابطه بقا انرژی در هیتر را نشان می‌دهد).

$$\dot{m}_{ss} = \frac{Q_h}{C_p(\Delta T_h)_{ss}} \quad (19)$$

#### 4- بحث و نتیجه‌گیری

برای تحلیل مدار جابه‌جایی طبیعی و حل معادلات در حالت پایا، یک کد رایانه‌ای در محیط برنامه‌نویسی متلب نوشته شده و اثر پارامترهای مختلف بررسی شده است.

#### 4-1- ضریب اصطکاک و معادله جریان حالت پایا

تعیین ضریب اصطکاک نخستین گام در تحلیل حالت پایا مدار است. در این پژوهش از بین مدل‌های مختلف ارائه شده توسط پژوهشگران مدل ارائه شده توسط سواینالی و ویجایان [22] انتخاب شده و دلیل آن پیوسته بودن رابطه ضریب اصطکاک در سه ناحیه آرام، گذار و متلاطم است. این پیوستگی باعث به دست آمدن نتایج واقعی‌تر و منطبق‌تر بر نتایج آزمایشگاهی می‌شود و در به دست آوردن نقشه پایداری<sup>1</sup> مدار نیز مؤثر است. پارامترهای  $p$  و  $b$  (رابطه 17) بسته به نوع رژیم جریان (آرام، گذار و متلاطم) در این مدل به صورت رابطه (20) هستند [18].

$$P=64, \quad b=1 \text{ رژیم آرام} \quad (20-a)$$

$$P=1.2063, \quad b=0.416 \text{ رژیم گذار} \quad (20-b)$$

$$P=0.316, \quad b=0.25 \text{ رژیم متلاطم} \quad (20-c)$$

با توجه به رابطه‌های (20,18) مقدار ضریب اصطکاک تعیین می‌گردد. شکل 2 ضریب اصطکاک را برحسب عدد رینولدز در سه ناحیه آرام، گذار و متلاطم نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز در سه ناحیه به صورت پیوسته تغییر می‌کند. ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد که با توجه به رابطه (18) قابل توجیه است.

با توجه به رابطه‌های (20,17,16) معادله جریان حالت پایا برای سه ناحیه آرام، گذار و متلاطم به صورت رابطه (21) به دست می‌آید.

$$Re_{ss} = 0.1768 \left( \frac{Gr_m}{N_G} \right)^{0.5} \text{ رژیم آرام} \quad (21-a)$$

$$Re_{ss} = 1.21 \text{ رژیم گذار} \quad (21-b)$$

$$Re_{ss} = 1.956 \left( \frac{Gr_m}{N_G} \right)^{0.364} \text{ رژیم متلاطم} \quad (21-c)$$

برای درک بهتر رابطه‌های (21) این روابط در شکل 3 به صورت ترسیمی نشان داده شده‌اند. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد برای  $Re_{ss} < 898$  جریان آرام است. در محدوده  $898 \leq Re_{ss} \leq 3196$  جریان در ناحیه گذار و برای  $Re_{ss} > 3196$  جریان متلاطم است.

با توجه به شکل 1 مقادیر اولیه هندسی مدار مورد بررسی در جدول 1 نشان داده شده است. برای بررسی اثر هر پارامتر مقدار پارامتر مورد نظر را تغییر می‌دهیم و سایر پارامترها را ثابت در نظر می‌گیریم.

در جدول 2 خواص ترموفیزیکی آب نشان داده شده است که در رابطه (7) استفاده می‌شوند.

<sup>1</sup> Stability Map

افزایش  $St_m$  دمای بدون بعد کاهش می‌یابد، زیرا با توجه به رابطه‌های (12,11) با افزایش عدد استانتون اصلاح شده،  $(St_m)$ ، دمای بدون بعد در بازوهای سرد و گرم کاهش می‌یابد و بنابراین جای‌گذاری این مقادیر در رابطه‌های (10,9) باعث کاهش دمای بدون بعد در هیتر و کولر نیز می‌گردد. البته به لحاظ فیزیکی هنگامی که دمای سیال خنک‌کن  $T_s$  در کولر کاهش می‌یابد، قدرت خنک‌کاری کولر افزایش می‌یابد و به عبارتی عدد استانتون افزایش می‌یابد و سبب کاهش دمای کل مدار می‌گردد. باید دقت شود در هر مکان از مدار در اعداد استانتون بزرگ‌تر تغییرات دمای بدون بعد کاهش می‌یابد. برای مثال در انتهای هیتر  $(s = 80 \text{ mm})$  با افزایش  $St_m$  از 2 به 4 (100% افزایش)، دمای بدون بعد از 3.3 حدود 2 (40% کاهش) کاهش می‌یابد. در حالی که با افزایش  $St_m$  از 4 به 8 (100% افزایش) دمای بدون بعد از 2 به 3.1 (35% کاهش) کاهش می‌یابد و به همین ترتیب با افزایش  $St_m$  از 8 به 12 (50% افزایش) دمای بدون بعد از 1.3 به 1.2 (7.5% کاهش) می‌یابد. دلیل این امر به خاصیت تابع‌نمایی در رابطه‌های (12,11) بازمی‌گردد.

### 3-4- بررسی اثر ارتفاع مدار

شکل 5 توزیع دمای بدون بعد را برحسب طول مدار در سه ارتفاع متفاوت نشان می‌دهد. در این شکل  $Power = 500 \text{ W}$  و  $St_m = 2$  است. دلیل انتخاب این  $St_m = 2$  این است که معمولاً عدد استانتون مربوط به داده‌های آزمایشگاهی در این محدوده است. با حرکت در طول مدار از ابتدای هیتر (افزایش پارامتر  $s$ ) ابتدا دمای بدون بعد در طول هیتر افزایش می‌یابد. سپس دمای بدون بعد در بازوی گرم ثابت می‌ماند (اولین خط افقی). مجدداً با ورود به قسمت کولر دمای بدون بعد کاهش می‌یابد و در نهایت دمای بدون بعد در بازوی سرد ثابت می‌ماند (دومین خط افقی) و انتهای بازوی سرد بر ابتدای هیتر منطبق است (مقدار دمای بدون بعد یکسان است). همان‌طور که مشاهده می‌گردد دمای بدون بعد با افزایش ارتفاع در هر مکان از مدار افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه‌های (10,9) دلیل افزایش دمای بدون بعد با افزایش ارتفاع مدار قابل توجیه است، زیرا این دو رابطه بیان می‌کنند که رابطه مستقیمی بین افزایش ارتفاع مدار و دمای بدون بعد وجود دارد. به لحاظ فیزیکی هنگامی که ارتفاع مدار افزایش می‌یابد، فاصله مکانی بین هیتر و کولر افزایش می‌یابد و بنابراین مدت زمان زیادتری لازم است تا سیال از منبع گرم به منبع سرد برسد و خنک شود و این بر افزایش دما در کل مدار اثر می‌گذارد. برای مثال در انتهای هیتر  $(s = 80 \text{ mm})$  با افزایش ارتفاع از

شکل 6 توزیع دما را برحسب طول مدار در سه ارتفاع متفاوت نشان می‌دهد (روند رفتاری این شکل مانند شکل 5 است).

شکل 7 عدد رینولدز در حالت پایا را  $(Re_{ss})$  برحسب پارامتر بدون بعد  $(Gr_m/N_G)$  در سه ارتفاع متفاوت و سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل  $St_m = 2$  در نظر گرفته شده است. شکل نشان می‌دهد که در یک توان ثابت هیتر، با افزایش ارتفاع عدد رینولدز افزایش می‌یابد (علامت‌های دایره، مربع و ستاره را در هر توان ببینید). همچنین با افزایش توان هیتر در یک ارتفاع ثابت باز هم عدد رینولدز افزایش می‌یابد. دلیل آن این است که افزایش توان هیتر سبب افزایش عدد گراشف اصلاح شده  $(Gr_m)$  می‌شود (رابطه (16)) و افزایش عدد گراشف اصلاح شده باعث افزایش عدد رینولدز می‌گردد (رابطه 16). برای نمونه اگر توان هیتر از 250W به 750W افزایش یابد (200% افزایش) عدد رینولدز از 1200 به حدود 1800 افزایش می‌یابد (50% افزایش) که بیانگر افزایش آشفته‌گی جریان است.

شکل 8 نرخ دبی جرمی را در سه ارتفاع متفاوت و سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل  $St_m = 2$  در نظر گرفته شده است. شکل نشان می‌دهد که با افزایش توان هیتر و افزایش ارتفاع، نرخ دبی جرمی افزایش می‌یابد، زیرا افزایش توان هیتر سبب افزایش عدد گراشف اصلاح شده  $(Gr_m)$  و افزایش عدد رینولدز می‌گردد (رابطه‌های (16,7)) و مطابق رابطه (7) ارتباط مستقیمی بین افزایش عدد رینولدز و افزایش دبی جرمی سیال در مدار وجود دارد. برای مثال اگر توان هیتر از 250W به 750W افزایش یابد (200% افزایش) در ارتفاع 1000mm، نرخ دبی جرمی از 0.025kg/s به حدود 0.037kg/s افزایش می‌یابد (48% افزایش) که بیانگر افزایش توانایی انتقال حرارت مدار جابه‌جایی طبیعی است.

شکل 9 اختلاف دمای دو سر هیتر را در سه ارتفاع متفاوت و سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل نیز  $St_m = 2$  در نظر گرفته شده است.

شکل نشان می‌دهد که اختلاف دمای دو سر هیتر در هر توان هیتر با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. ارتباط بین شکل‌های 8 و 9 با توجه به رابطه

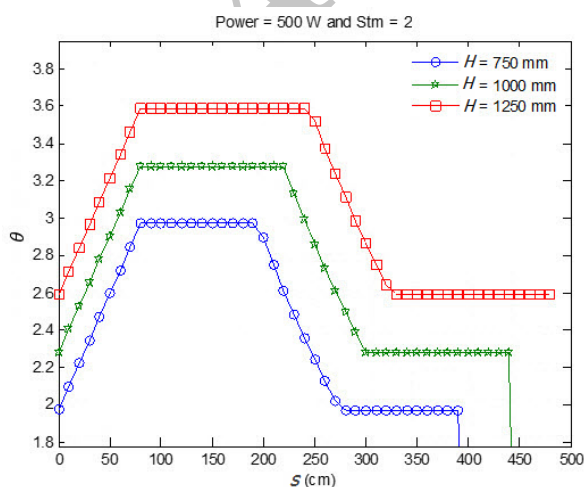


Fig. 5 Distribution of dimensionless temperature in different heights  
شکل 5 توزیع دمای بدون بعد در ارتفاع‌های مختلف

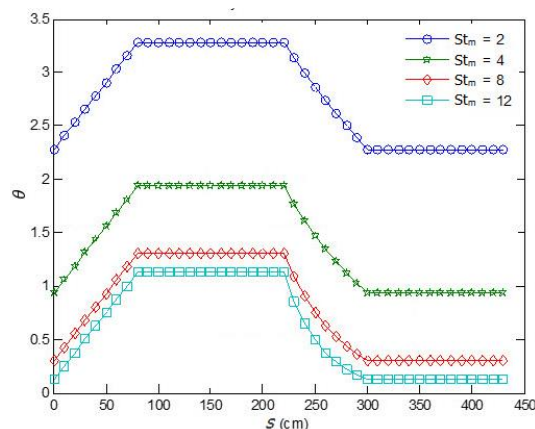


Fig. 4 Distribution of dimensionless temperature in different  $St_m$   
شکل 4 توزیع دمای بدون بعد در  $St_m$  مختلف

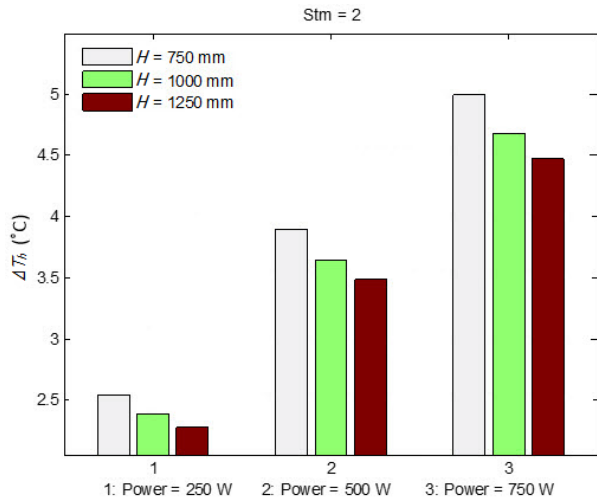


Fig. 9 Temperature difference across the heater in different powers and heights

شکل 9 اختلاف دمای دو سر هیتر در توان‌ها و ارتفاع‌های مختلف

می‌گردد با افزایش قطر در هر مکان از مدار دما کاهش می‌یابد، زیرا با توجه به رابطه (7) افزایش قطر سبب افزایش عدد گرافش اصلاح شده ( $Gr_m$ ) می‌شود، همچنین افزایش قطر منجر به افزایش عدد رینولدز می‌گردد (رابطه‌های (17,16)) (یعنی جریان از آرام به سمت متلاطم پیش می‌رود) و از طرفی با توجه به رابطه (7) دبی جرمی افزایش می‌یابد و افزایش دبی جرمی در یک توان ثابت منجر به کاهش دمای دو سر هیتر می‌گردد (رابطه (19)) و با توجه به ثابت بودن عدد استانتون و عدم تغییر دمای بدون بعد (رابطه‌های (12,11)) از تعریف دمای بدون بعد در رابطه (4) نتیجه گرفته می‌شود که دما در هر نقطه مدار با افزایش قطر کاهش می‌یابد. به طور فیزیکی می‌توان بیان نمود با افزایش قطر دبی عبوری سیال در هر مقطع افزایش می‌یابد و بنابراین دمای متوسط سیال در هر مقطع کاهش می‌یابد. دقت شود در این شکل قطر مینا 30mm است و اثر افزایش یا کاهش 25 درصدی قطر بررسی شده است. برای مثال در انتهای هیتر ( $s = 80$  mm) با افزایش قطر از 30mm به 37.5mm (25% افزایش) دما از 12.9 به 12 (7% کاهش) می‌یابد، اما در همان انتهای هیتر چنانچه قطر از 30mm به 22.5mm (25% کاهش) دما از 12.9 به 14.5 (12.5% افزایش) افزایش می‌یابد.

در شکل 11 نیز توزیع دما برحسب طول مدار در سه قطر متفاوت نشان داده شده است. این شکل مشابه شکل 10، ولی با این تفاوت که در این شکل  $Power = 750$  W است. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که دما در طول مدار در هر قطر ثابت در شکل 11 نسبت به شکل 10 افزایش یافته است. برای مثال در انتهای هیتر ( $s = 80$  mm) در شکل 10 اعداد دمای 12، 12.9 و 14.5 به ترتیب به ازای قطرهای 30mm، 37.5mm و 22.5mm نشان داده شده است که این اعداد به ترتیب به مقادیر اعداد 18.5، 20.2 و 22.8 افزایش یافته‌اند. نتیجه جالب این مقایسه در این است که با افزایش توان از 500W به 750W (50% افزایش) دما در انتهای هیتر در هر قطر به ترتیب حدود 54.1%، 56.6% و 57.2% افزایش یافته و این بدان معنی است که در قطرهای پایین‌تر افزایش دما با افزایش توان هیتر بیشتر است. دلیل آن این است که در قطرهای پایین‌تر چون دبی جرمی کمتر است (که این در شکل 12 نشان داده خواهد شد) به عبارتی دیگر یعنی سیال عبوری از یک سطح مقطع کمتر است؛ بنابراین با افزایش توان هیتر انتظار می‌رود دمای

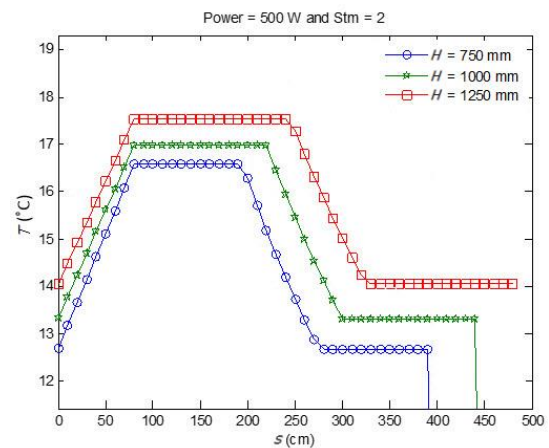


Fig. 6 Distribution of temperature in different heights

شکل 6 توزیع دما در ارتفاع‌های مختلف

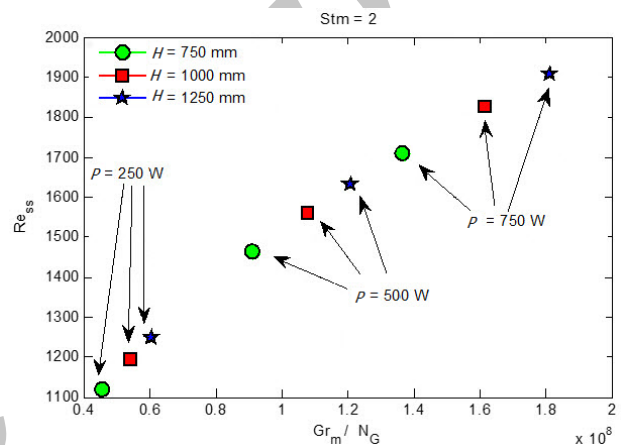


Fig. 7 Diagram of  $Re_{ss}$  versus  $Gr_m/N_G$  in different heights

شکل 7 نمودار  $Re_{ss}$  برحسب  $Gr_m/N_G$  در ارتفاع‌های مختلف

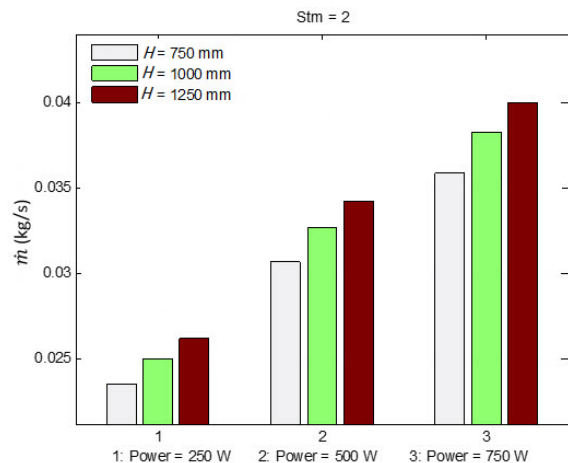


Fig. 8 Mass flow rate in different powers and heights

شکل 8 نرخ دبی جریان در توان‌ها و ارتفاع‌های مختلف

(19) توجیه‌پذیر است. یعنی نرخ دبی جرمی در یک توان ثابت با افزایش اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش می‌یابد.

#### 4-4- بررسی اثر قطر مدار

شکل 10 توزیع دما را برحسب طول مدار در سه قطر متفاوت نشان می‌دهد. در این شکل  $Power = 500$  W و  $St_m = 2$  است. همان‌طور که مشاهده



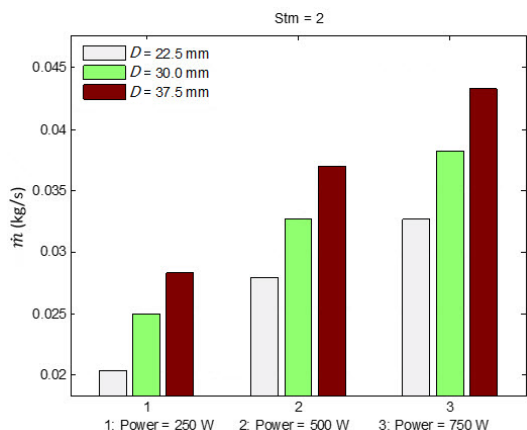


Fig. 12 Mass flow rate in different powers and diameters

شکل 12 نرخ دبی جرمی در توان‌ها و قطرهای مختلف

افزایش یا کاهش طول هیتر تغییر نمی‌کند، اما با افزایش طول هیتر شیب دما در امتداد هیتر کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که با توجه به رابطه (9) مشخص می‌شود که افزایش طول هیتر باعث کاهش شیب دما در امتداد هیتر می‌شود.

شکل 14 نرخ دبی جرمی را در سه طول متفاوت هیتر و سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل نیز  $St_m = 2$  در نظر گرفته شده است. شکل نشان می‌دهد که افزایش یا کاهش طول هیتر در یک توان ثابت هیتر اثری بر افزایش یا کاهش نرخ دبی جرمی ندارد. دلیل آن این است که هر چند تغییر طول هیتر بر شیب دما در امتداد هیتر اثر می‌گذارد (شکل 13)، ولی در هر توان ثابت و استانتون ثابت (شرایط مرزی کولر و هیتر ثابت‌اند)؛ بنابراین با توجه به رابطه‌های (19,7) دبی جرمی تغییر نمی‌کند.

#### 4-6- بررسی اثر طول کولر

در شکل 15 اثر طول کولر بر توزیع دما بررسی شده است. در این شکل  $Power = 500 W$  و  $St_m = 2$  است. طول مینا برای کولر 800mm است که اثر افزایش یا کاهش 25 درصدی طول کولر بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد دما با افزایش طول کولر در هر مکان از مدار کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه‌های (12,11) با افزایش طول کولر دمای بدون بعد در بازوهای سرد و گرم کاهش می‌یابد و بنابراین باعث کاهش دمای بدون بعد هیتر و کولر نیز می‌گردد (رابطه‌های (10,9)). از نقطه نظر فیزیکی هنگامی

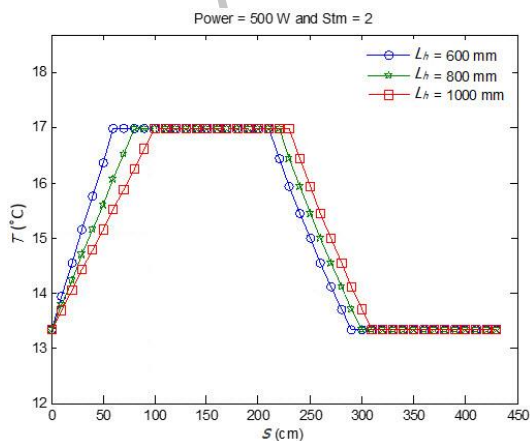


Fig. 13 Distribution of temperature in different heater lengths

شکل 13 توزیع دما در طول‌های مختلف هیتر

سیال بیشتر افزایش یابد. شکل 12 نرخ دبی جرمی را در سه قطر متفاوت و سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل  $St_m = 2$  در نظر گرفته شده است. شکل نشان می‌دهد که نرخ دبی جرمی با افزایش توان هیتر و افزایش قطر افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتیجه مرجع [13] قابل مقایسه است، بدین معنی که مرجع [13] هم به این نتیجه رسیده که اگر قطر لوله‌ها زیاد شود، دبی جرمی زیاد می‌شود که شکل 12 نیز همین نتیجه را بیان می‌کند. برای مثال اگر توان هیتر از 250W به 750W افزایش یابد (200% افزایش) و هم‌زمان قطر از 22.5mm به 37.7mm افزایش یابد (67% افزایش) نرخ دبی جرمی از 0.02kg/s به حدود 0.043kg/s افزایش می‌یابد (115% افزایش) که بیانگر افزایش قابل ملاحظه توانایی انتقال حرارت مدار جابه‌جایی طبیعی است.

#### 4-5- بررسی اثر طول هیتر

در شکل 13 اثر طول هیتر بر توزیع دما بررسی شده است. در این شکل  $Power = 500 W$  و  $St_m = 2$  است. طول مینا برای هیتر 800mm است که اثر افزایش یا کاهش 25 درصدی طول هیتر بررسی شده است. مشاهده می‌گردد دما در بازوهای گرم و سرد (خطوط افقی بالا و پایین در شکل) با

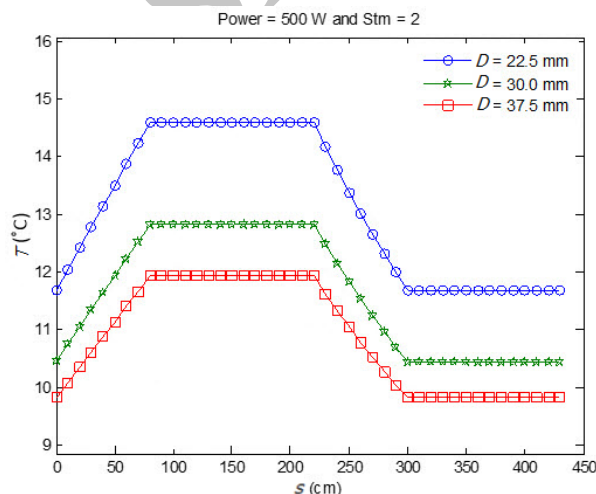


Fig. 10 Distribution of temperature in different diameters at Power=500 W

شکل 10 توزیع دما در قطرهای مختلف در Power=500W

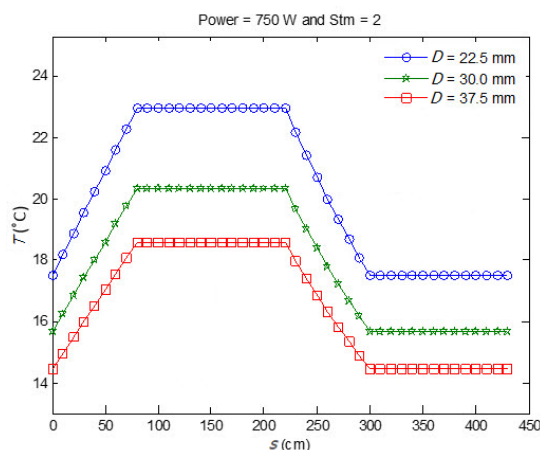


Fig. 11 Distribution of temperature in different diameters at Power = 750 W

شکل 11 توزیع دما در قطرهای مختلف در Power=750 W

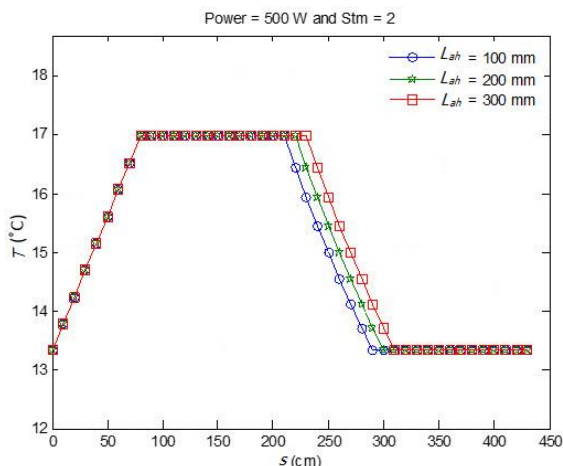


Fig. 16 Distribution of temperature in different distances of heater from left side

شکل 16 توزیع دما در فاصله‌های مختلف هیتر از سمت چپ

( $Gr_m$ ) کاهش و بنابراین مطابق رابطه (16) عدد رینولدز کاهش می‌یابد. کاهش عدد رینولدز سبب کاهش دبی جرمی و مطابق رابطه (19) باعث افزایش اختلاف دمای دو سر هیتر می‌گردد. در نهایت مطابق رابطه (4) با ثابت بودن دمای بدون بعد (چون عدد استانتون ثابت است مطابق رابطه (10,9) دمای بدون بعد ثابت است)، دما در هر نقطه از مدار افزایش می‌یابد. مطابق آنچه برای شکل 17 بیان شد، شکل‌های 18 و 19 نیز نشان می‌دهند در یک توان ثابت هیتر با افزایش زاویه شیب مدار، نرخ دبی جرمی کاهش و اختلاف دمای دو سر هیتر افزایش می‌یابد. شکل 20 عدد رینولدز در حالت پایا را ( $Re_{ss}$ ) برحسب پارامتر بدون بعد ( $Gr_m/N_G$ ) در سه زاویه شیب مدار متفاوت و سه توان مختلف هیتر نشان می‌دهد. در این شکل در  $St_m = 2$  نظر گرفته شده است. شکل نشان می‌دهد که عدد رینولدز در یک توان ثابت هیتر با افزایش زاویه شیب مدار کاهش می‌یابد (علامت‌های دایره، مربع و ستاره را در هر توان ببینید). دلیل آن این است که با افزایش زاویه شیب مدار اثر شتاب جاذبه بر حرکت جریان کاهش می‌یابد و به عبارتی مطابق رابطه (7) عدد گراشف اصلاح شده ( $Gr_m$ ) کاهش می‌یابد.

### 5- جمع بندی

در این پژوهش با کمک معادلات بدون بعد حاکم بر مدار جابه‌جایی طبیعی، حل در حالت پایا به دست آمد و سپس اثرات طول هیتر، طول کولر، قطر

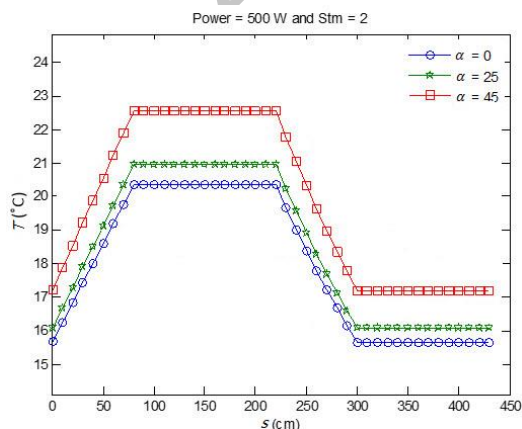


Fig. 17 Distribution of temperature in different loop inclination angles

شکل 17 توزیع دما در زاویه‌های شیب مختلف مدار

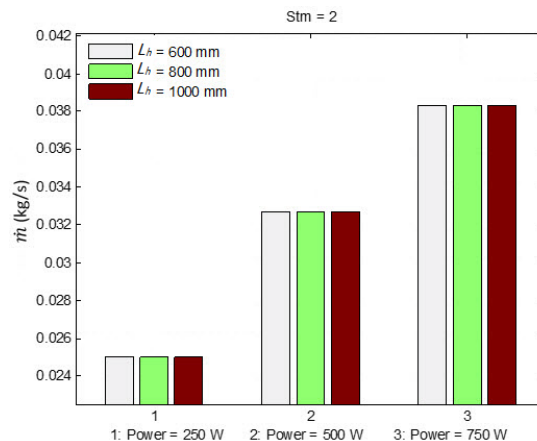


Fig. 14 Mass flow rate in different powers and heater lengths

شکل 14 نرخ دبی جرمی در توان‌ها و طول‌های مختلف هیتر

که طول کولر افزایش می‌یابد، سیال زمان بیشتری برای تبادل حرارت و خنک شدن در کولر دارد. برای مثال در انتهای هیتر ( $s = 80$  mm) با افزایش طول کولر از 800mm به 1000mm (25% افزایش) دما از 17 به 15 (11.8%) کاهش می‌یابد.

### 4-7- بررسی اثر فاصله هیتر از بازوی گرم

در شکل 16 اثر فاصله هیتر از بازوی گرم بر توزیع دما بررسی شده است. در این شکل  $Power = 500$  W و  $St_m = 2$  است. در حالت مینا هیتر در وسط بازوی افقی قرار دارد و فاصله هیتر از بازوی سرد و گرم مساوی یکدیگر و برابر با 200mm است. شکل نشان می‌دهد که با افزایش (یا کاهش) 50 درصدی فاصله هیتر از بازوی گرم، در یک مکان ثابت در کولر، دما تقریباً 3% افزایش (یا کاهش) می‌یابد که دلیل این رفتار با توجه به رابطه (10) قابل توجیه است. همچنین رابطه (9) نشان می‌دهد که تغییر فاصله هیتر از بازوی سمت چپ هیچ اثری بر توزیع دمای نقاط دیگر ندارد.

### 4-8- بررسی اثر زاویه شیب مدار

در شکل‌های 17-20 اثر زاویه شیب مدار به ترتیب بر توزیع دما، نرخ دبی جرمی، اختلاف دمای دو سر هیتر و عدد رینولدز بررسی شده است. شکل 17 نشان می‌دهد دما با افزایش زاویه شیب مدار در هر مکان از مدار افزایش می‌یابد. در این شکل  $Power = 500$  W و  $St_m = 2$  است. به این دلیل که مطابق رابطه (7) با افزایش زاویه شیب مدار عدد گراشف اصلاح شده

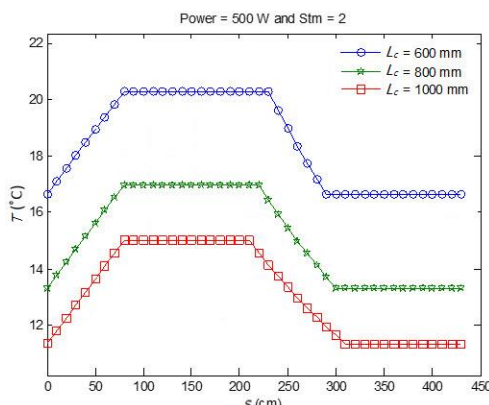


Fig. 15 Distribution of temperature in different cooler lengths

شکل 15 توزیع دما در طول‌های مختلف کولر



با افزایش ارتفاع مدار افزایش می‌یابد در حالی که اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش می‌یابد.

ب- دمای بدون بعد و دما در هر مکان از مدار با افزایش قطر مدار کاهش می‌یابد در حالی که نرخ دبی جرمی افزایش می‌یابد.

ج- شیب دما در امتداد هیتر با افزایش طول هیتر کاهش می‌یابد، ولی این افزایش بر نرخ دبی جرمی اثری ندارد.

د- دما با افزایش طول کولر در هر مکان از مدار کاهش می‌یابد.

ه- دما با افزایش (یا کاهش) فاصله هیتر از بازوی گرم در یک مکان ثابت در کولر تقریباً 3% افزایش (یا کاهش) می‌یابد.

و- دما در هر مکان از مدار و اختلاف دمای دو سر هیتر با افزایش زاویه شیب مدار افزایش می‌یابد در حالی که نرخ دبی جرمی و عدد رینولدز کاهش می‌یابد.

ز- با افزایش  $St_m$  دمای بدون بعد در هر مکان از مدار کاهش می‌یابد.

ح- اختلاف دمای بدون بعد در بازوهای سرد و گرم در حال پایا همیشه مساوی یک است.

برای پژوهش آینده می‌توان اثر پارامترهای مختلف را بر توزیع دما و دبی جرمی در حالت گذرا بررسی نمود.

#### 6- فهرست علائم

$A$	سطح جریان ( $m^2$ )
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $kJ kg^{-1}K^{-1}$ )
$D$	قطر لوله‌های مدار (mm)
$f$	ضریب اصطکاک
$g$	شتاب جاذبه ( $m s^{-2}$ )
$Gr$	عدد گراش
$Gr_m$	عدد گراش اصلاح شده
$H$	ارتفاع مدار (mm)
$K$	ضریب حرارت هدایتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
$L$	طول (mm)
$\dot{m}$	نرخ دبی جرمی ( $kg s^{-1}$ )
$Nu$	عدد ناسلت
$Pr$	عدد پرانتل
$Q_h$	توان هیتر (W)
$Re$	عدد رینولدز
$s$	مختصات در امتداد مدار (mm)
$S$	فاصله بدون بعد در امتداد مدار
$St$	عدد استانتون
$St_m$	عدد استانتون اصلاح شده
$t$	زمان (s)
$T$	دما ( $^{\circ}C$ )
$T_s$	دمای منبع سرد ( $^{\circ}C$ )
$U$	ضریب انتقال حرارت کلی ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$V$	حجم ( $m^3$ )
$W$	عرض مدار (mm)
$Z$	ارتفاع بدون بعد
$\Delta T_h$	اختلاف دمای دو طرف هیتر ( $^{\circ}C$ )

علائم یونانی

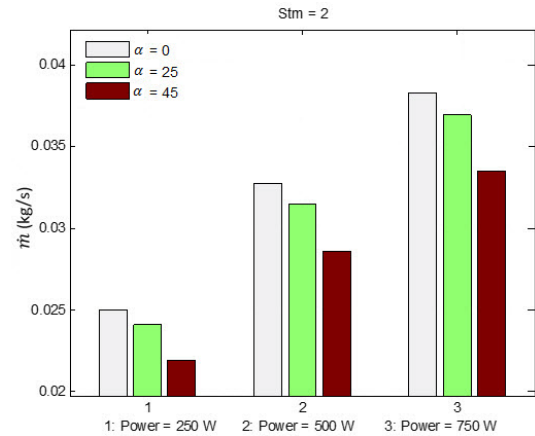


Fig. 18 Mass flow rate in different powers and loop inclination angles  
شکل 18 نرخ دبی جرمی در توان‌ها و زاویه‌های شیب مختلف مدار

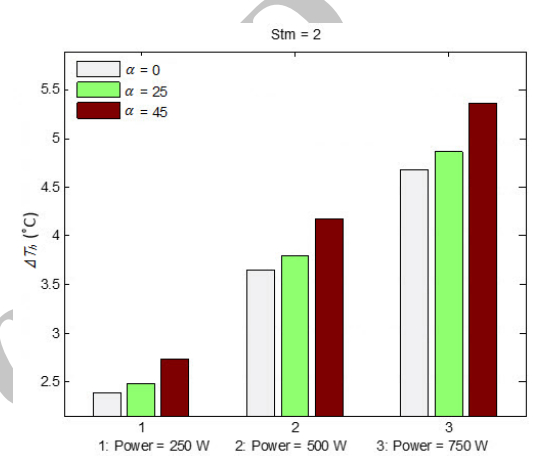


Fig. 19 Temperature difference across the heater in different powers and loop inclination angles

شکل 19 اختلاف دمای دو سر هیتر در توان‌ها و زاویه‌های شیب مختلف مدار

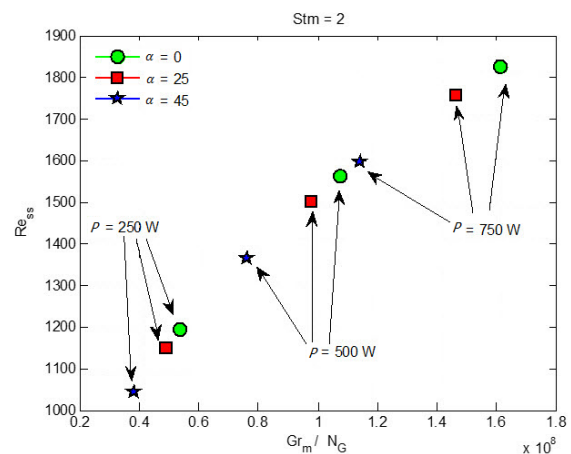


Fig. 20 Diagram of  $Re_{ss}$  versus  $Gr_m/N_g$  in different loop inclination angles

شکل 20 نمودار  $Re_{ss}$  برحسب  $Gr_m/N_g$  در زاویه‌های شیب مختلف مدار

لوله‌ها، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، فاصله هیتر نسبت به سمت راست یا چپ مدار، فاصله کولر نسبت به سمت راست یا چپ مدار و توان هیتر بر دبی جرمی مدار و توزیع دما در مدار بررسی گردید. پس از تحلیل نتایج زیر به دست آمد.

الف- دمای بدون بعد در هر مکان از مدار، نرخ دبی جرمی و عدد رینولدز

- of loop diameter on the stability of single-phase natural circulation in rectangular loops, *Proceedings of the Fifth International Topical Meet, on Reactor Thermalhydraulics*, NURETH-5, Salt Lake City, UT, Vol. 1, pp. 261–267, 1992.
- [9] P. K. Vijayan, H. Austregesilo, Scaling laws for single-phase natural circulation loops *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 152, pp. 331–347, 1994.
- [10] P. K. Vijayan, Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 215, pp. 139–152, 2002.
- [11] S. K. Mousavian, M. Misale, F. D'Auria, M. A. Salehi, Transient and stability analysis in single-phase natural circulation, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 31, pp. 1177–1198, 2004.
- [12] D. S. Pilkhwal, W. Ambrosini, N. Forgiione, P. K. Vijayan, D. Saha, J. C. Ferreri, Analysis of the unstable behavior of a single-phase natural circulation loop with one-dimensional and computational fluid-dynamic models, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 34, pp. 339–355, 2007.
- [13] P. K. Vijayan, A. K. Nayak, D. Saha, M. R. Gartia, Effect of loop diameter on the steady state and stability behavior of single-phase and two-phase natural circulation loops, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 2008, 17 pages, 2008.
- [14] P. K. Vijayan, M. Sharma, D. S. Pilkhwal, D. Saha, R. K. Sinha, A comparative study of single-phase, two-phase, and supercritical natural circulation in a rectangular loop, *Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, No. 10, pp. 102913-1, 2010.
- [15] M. Misale, P. Garibaldi, Dynamic behaviour of a rectangular single-phase natural circulation loop: Influence of loop inclination *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference Mumbai*, India, January 4-6, 2010.
- [16] F. Devia, M. Misale, Analysis of the effects of heat sink temperature on single-phase natural circulation loops behavior, *Thermal Sciences*, Vol. 59, pp. 195-202, 2012.
- [17] M. Misale, F. Devia, P. Garibaldi, Experiments with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid in a single-phase natural circulation mini-loop: Preliminary results, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 40, pp. 64-70, 2012.
- [18] B. T. Swapnalee, P. K. Vijayan, A generalized flow equation for single phase natural circulation loops obeying multiple friction laws, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 2618–2629, 2011.
- [19] K. Naveen, K. N. Iyer, J. B. Doshi, P. K. Vijayan, Investigations on single-phase natural circulation loop dynamics part 1: Model for simulating start-up from rest, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 76, pp. 148-159, 2014.
- [20] K. Naveen, K. N. Iyer, J. B. Dosh, P. K. Vijayan, Investigations on single-phase natural circulation loop dynamics, Part 2: Role of wall constitutive laws, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 75, pp. 105-116, 2014.
- [21] R. Saha, S. Sen, S. Mookherjee, K. Ghosh, A. Mukhopadhyay, D. Sanyal, Experimental and numerical investigation of a single-phase square natural circulation loop, *Heat Transfer*, Vol. 137, No. 12, 121010-1, 2015.
- [22] A. K. Srivastava, J. Y. Kudariyawar, A. Borgohain, S. S. Jana, N. K. Maheshwari, P. K. Vijayan, Experimental and theoretical studies on the natural circulation behavior of molten salt loop, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 98, pp. 513–521, 2016.
- [23] J. Y. Kudariyawar, A. M. Vaidya, N. K. Maheshwari, P. Satyamurthy, Computational study of instabilities in a rectangular natural circulation loop using 3D CFD simulation, *Thermal Sciences*, Vol. 101, pp. 193-206, 2016.
- [24] M. Krishnani, D. N. Basu, Computational stability appraisal of rectangular natural circulation loop: Effect of loop inclination, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 107, pp. 17–30, 2017.

$\alpha$	زاویه شیب مدار نسبت به قائم برحسب درجه ( $^{\circ}$ )
$\beta$	ضریب انبساط حرارتی ( $K^{-1}$ )
$\theta$	دمای بدون بعد
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
T	زمان بدون بعد
$\Omega$	دبی جرمی بدون بعد
زیرنویس‌ها	
0	حالت مبنا (مرجع)
a	فاصله از بازوی گرم
b	فاصله از بازوی سرد
c	کولر
cl	بازوی سرد
eff	مؤثر
h	هیتز
hl	بازوی گرم
ss	حالت پایا
t	کل

## 7- مراجع

- [1] D. Japikse, *Advances in Thermosyphon Technology*, In: Irvine, T.F. Jr, Hartnett, J. P. (Eds.), *Advances in Heat Transfer*, Vol. 9, pp. 1-111, New York, Academic Press, 1973.
- [2] Y. Zvirin, A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 67, No. 2, pp. 203-225, 1982.
- [3] A. Mertol, R. Greif, *A Review of Natural Circulation Loops*, Natural Convection: Fundamentals and Applications, pp. 1033-1071, New York, Hemisphere, 1985.
- [4] R. Greif, Natural circulation loops, *Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1243–1258, 1988.
- [5] N. Zuber, Problems in modelling of small break LOCA, USNRC Report, NUREG-0724, 1980.
- [6] M. P. Heisler, Development of scaling requirements for natural convection liquid-metal fast breeder reactor shutdown heat removal test facilities, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 80, No. 3, pp. 347-359, 1982.
- [7] M. Ishii, I. Kataoka, Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 81, No. 3, pp. 411-25, 1984.
- [8] P. K. Vijayan, A. K. Nayak, D. S. Pilkhwal, D. Saha, V. Venkat Raj, Effect