

## شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای ترموهیدرولیک مدار آزمایشگاهی گردش طبیعی دانشگاه جنوا

INC29-1017

سیدابوالحسن نوراشرف الدین<sup>۱\*</sup>، محسن شایسته<sup>۱</sup>، مجید باهنر<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، صندوق پستی ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، تهران - ایران

۲. مرکز محاسبات پیشرفته هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

## چکیده:

در این مطالعه به تحلیل پارامترهای ترموهیدرولیکی مدار آزمایشگاهی گردش طبیعی سیال دانشگاه جنوا با نرم افزار Ansys Fluent در توان‌های مختلف پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که در توان  $100\text{W}$  به ازای دماهای مختلف چاهک حرارتی ناپایداری جریان وجود دارد و جریان بطور متناوب بین حالت‌های ساعتگرد و پادساعتگرد تغییر جهت می‌دهد، ولی در توان‌های  $500\text{W}$  و  $1000\text{W}$  با توجه به نتایج محاسبات عددی و نقشه پایداری مدار، در گستره وسیعتری از دماهای چاهک حرارتی، پایداری جریان گردش طبیعی برقرار است. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در تطابق خوبی با هم بوده و مقدار اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی برای  $500\text{W}$  و  $1000\text{W}$  به ترتیب حدودا ۲ و ۳ درجه سانتیگراد است نتایج توان‌های بالا با نتایج آزمایشگاهی تطابق خیلی خوبی دارد بویژه برای نتایج اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی که به ترتیب در توان‌های  $500\text{W}$  و  $1000\text{W}$ ، این مقدار اختلاف دما برای نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی به مقادیر حدودا ۲ و ۳ درجه سانتیگراد میل می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مدار آزمایشگاهی جنوا، Ansys Fluent، گردش طبیعی

**Simulation and investigation of the thermohydraulic parameters of the natural circulation loop of the University of Genoa**S.A.Nourashrafeddin<sup>1\*</sup>, M.Shayesteh<sup>1</sup>, M.Bahonar<sup>2</sup>

1. Department of Physics, Faculty of Science, Imam Hussein Comprehensive University, P.O.BOX: 1698715461, Tehran, Iran.

2. Advanced Nuclear Computing Center, Atomic Energy Organization of Iran, P.O.BOX: 14155- 1339, Tehran, Iran.

**Abstract:**

In this study, the thermohydraulic parameters of the natural circulation laboratory loop of the University of Genoa have been analyzed with the Fluent software in different powers. The results show that at the power of 100 watts for different temperatures of the heat sink, there is instability of the current and the current alternately changes direction between clockwise and anticlockwise modes, but at powers of 500 and 1000 watts according to the results of the calculations Numerical and loop stability map, in a wider range of heat sink temperatures, the stability of the natural circulation flow is established. The simulation and laboratory results are in good agreement with each other, and the temperature difference between the two ends of the heat source for 500 and 1000 watts is about 2 and 3 degrees Celsius, respectively. The high power results are in good agreement with the laboratory results, especially for the results of the temperature difference across heating source, which are 500 and 1000 watts, respectively, this temperature difference value for simulation and laboratory results is about 2 and 3 degrees Celsius.

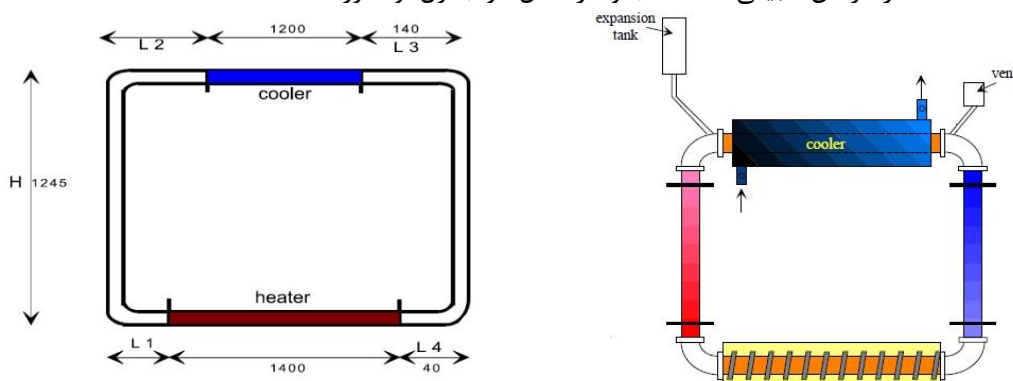
**Keywords:** Genoa laboratory loop, Ansys Fluent, Natural circulation.

## ۱. مقدمه

اساس کار مدار گردش طبیعی بدین صورت است که بدون نیاز به پمپ‌های مکانیکی، گرما از منبع حرارتی<sup>۱</sup> گرفته و به چاهک حرارتی<sup>۲</sup> داده می‌شود. با توجه به اینکه چگالی سیال با افزایش دما کاهش می‌یابد و بالعکس با کاهش دما افزایش می‌یابد، آنگاه چاهک حرارتی در ارتفاعی بالاتر از منبع حرارتی قرار می‌گیرد تا بر اثر شتاب گرانش، جریان گردش طبیعی برقرار گردد؛ بدین صورت که اختلاف چگالی در نواحی سرد و گرم، باعث ایجاد یک نیروی شناوری در مدار می‌گردد که نقش نیروی محرکه سیال را ایفا می‌کند. مدار گردش طبیعی، کاربردهای صنعتی زیادی از جمله در گرم‌کن‌های خورشیدی، خنک‌کننده ماشین‌های الکتریکی و نیروگاه‌های قدرت هسته‌ای و غیره دارد. در راکتورهای هسته‌ای زمانی که سیستم برداشت حرارت به دلیل قطع برق یا نقص فنی پمپ‌ها به درستی کار نکند، عمده برداشت حرارت از قلب به کمک گردش طبیعی سیال انجام می‌شود [۱]؛ گردش طبیعی با چالش‌های ویژه‌ای از جمله نیروی محرکه پایین، شار جرمی کم و اثرات پایداری همراه است که اگر بدرستی برطرف شوند، می‌تواند بطور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. ناپایداری جریان یک تهدید بالقوه سیستم‌های گردش طبیعی است که مانع به کارگیری گسترده آن‌ها می‌شود. بنابراین مساله برقراری پایداری جریان بسیار مهم است. مساله پایداری جریان مدار مستطیلی گردش طبیعی در مقالات زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است از جمله کار آقای ویجیان [۲] که در این کار بر روی رفتار پایداری مدار گردش طبیعی تک‌فاز و به ویژه حالت پایا مطالعاتی صورت گرفته است؛ در کار دیگری آقای موسویان و همکارانش [۳] رفتار پایداری مدار گردش طبیعی جنوا را با استفاده از روش حل عددی مورد بررسی قرار دادند و در مواردی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند؛ پایداری جریان در توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  را نشان دادند و همچنین ناحیه‌های ناپایداری جریان را در نقشه پایداری مشخص نمودند. در کار مشابهی خانم کرمی و همکاران [۴] برای مدار جنوا محاسبات عددی را برای حالت پایا و همچنین حالت گذرا به سه روش ضمنی و صریح و کرانک-نیکلسون<sup>۳</sup> انجام دادند و در مواردی نتایج را با محاسبات به روش CFD<sup>۴</sup> مقایسه کردند؛ نتایج محاسباتی که انجام دادند نشان از ناپایداری جریان در توان پایین  $100\text{ W}$  را دارد و به روش نایکوئیست<sup>۵</sup> نقشه پایداری مدار را بدست آوردند. در این مقاله سعی داریم بطور جامع‌تر این مدار را با نرم افزار Ansys Fluent شبیه‌سازی کرده و با نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی مقایسه نماییم.

## ۲. روش کار

یکی از معروفترین مدارهای گردش طبیعی آزمایشگاهی که برای تحقیق مساله ناپایداری و قوانین مقیاس‌گذاری سیستم‌های پیچیده‌تر می‌توان از نتایج آن بهره گرفت مدار گردش طبیعی دانشگاه جنوا است. این مدار اساساً دارای دو لوله افقی از جنس مس و دو لوله عمودی از جنس پلکسی گلاس است که با زانوهای فولادی به هم متصل شده‌اند. طرح و مشخصات مدار گردش طبیعی دانشگاه جنوا در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است؛



شکل ۱. شماتیکی از مدار مستطیلی گردش طبیعی جنوا [۵] به‌همراه مشخصات مورد استفاده در شبیه‌سازی

<sup>1</sup> Heat Source

<sup>2</sup> Heat Sink

<sup>3</sup> Crank-Nicolson

<sup>4</sup> Computational Fluid Dynamic (CFD)

<sup>5</sup> Nyquist

مدار دانشگاه جنوا mm ۱۲۴۵ ارتفاع و mm ۱۴۸۰ پهنا دارد. قسمت حرارتی پایین از یک سیم گرمایشی الکتریکی که دور سطح خارجی لوله مسی پیچیده شده است، تشکیل شده و با توان بیشینه  $3200\text{ W}$  گرم می‌شود. چاهک حرارتی بالایی از یک مبدل حرارتی استوانه‌ای که سه لایه‌ای است، تشکیل شده و با آب در طرف ثانویه لوله توخالی خنک می‌شود.

D قطر مدار، H ارتفاع مدار، HL طول منبع حرارتی، CL طول چاهک حرارتی و  $L1, L2, L3, L4$  طول قسمت‌های مشخص شده در مدار می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات هندسی مدار گردش طبیعی دانشگاه جنوا و سیال مورد استفاده

	L2=L3 (mm)	L1=L4 (mm)	HL (mm)	CL (mm)	H (mm)	D (mm)
مدار گردش طبیعی جنوا	۱۴۰	۴۰	۱۴۰۰	۱۲۰۰	۱۲۴۵	۴۰

جدول ۲. خواص ترموفیزیکی سیال مدار (آب) در دمای  $25^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد و فشار  $1\text{ atm}$

	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\mu(\text{kg/ms})$	$C_p(\text{J/kg}^\circ\text{C})$	$\beta(\text{K}^{-1})$	Pr
مشخصات ترموفیزیکی سیال	۹۹۷/۱	۰/۰۰۰۸۹	۴۱۸۳	۰/۰۰۰۲۵	۶/۳

برای شبیه‌سازی این مدار با Ansys Fluent نیاز به یکسری فرضیات است که بایست در نظر گرفته شود:

۱- گرما به صورت شار حرارتی ثابت به قسمت پایین مدار (منبع حرارتی) داده می‌شود. مقدار این شار حرارتی برای مطالعه پایداری سیستم تغییر داده می‌شود.

۲- بخش خنک‌کننده (چاهک حرارتی) در قسمت بالای مدار بصورت یک مبدل حرارتی با دمای دیواره ثابت ( $T_c$ ) که پایین‌ترین دما در سیستم را داراست، در نظر گرفته می‌شود.  $T_c$  به عنوان یک پارامتر متغیر برای مطالعه پایداری در نظر گرفته می‌شود.

۳- به علت اینکه دامنه تغییرات دمایی در مساله حاضر زیاد نیست، از تقریب بوزینسک<sup>۱</sup> می‌توان استفاده کرد؛ برای افزایش دقت محاسبات شبیه‌سازی، خصوصیات فیزیکی سیال بصورت تابعی از دما با تابع چندجمله‌ای مرتبه ۷ در قسمت خواص ماده تعریف شد و نتایج تفاوت زیادی با نتایج تقریب بوزینسک نداشت بنابراین از این تقریب در محاسبات استفاده شد.

تقریب بوزینسک، تقریبی است که در تحلیل جریان‌هایی سیال تحت تأثیر نیروی شناوری به کار می‌رود. این تقریب بر این اساس استوار است که در معادله حرکت می‌توان از تأثیر تغییرات چگالی سیال در ترم مومنتم چشم پوشی نمود و تأثیر تغییرات چگالی را تنها در ترم‌هایی از معادله حرکت سیال که ضریب شتاب گرانش می‌باشند منظور نمود. این تقریب در حل معادله حرکت سیال در شرایطی که تغییر چگالی وجود دارد را بسیار ساده‌تر می‌کند.

۴- فرض می‌شود قطر داخلی مدار در تمامی قسمت‌ها یکسان و برابر ۴۰ میلی‌متر است.

۵- پایه گرم و سرد عایق در نظر گرفته می‌شود.

۶- از انتقال حرارت محوری سیال صرف‌نظر می‌شود.

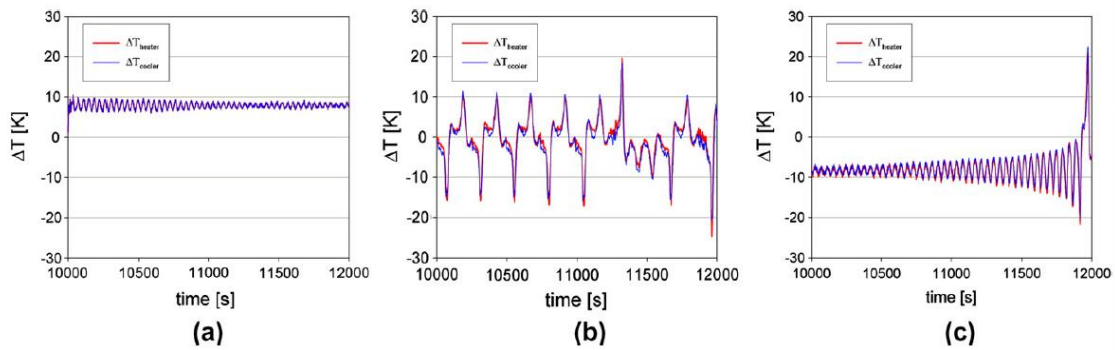
در جدول ۳ برخی پارامترهای مربوط به کیفیت مش و Ansys Fluent برای مدار جنوا آورده شده است. با تجزیه و تحلیل مقدار اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی و دو سر چاهک حرارتی امکان تشخیص رژیم‌های جریان مختلف وجود دارد. فرض آدیاباتیک بودن پایه‌های گرم و سرد با بررسی یکسان بودن مقدار اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی با چاهک حرارتی تایید می‌شود.

جدول ۳. پارامترهای مربوط به کیفیت مش و Ansys Fluent برای مدار جنوا

روش حل گرادیان‌ها	الگوریتم حل	نوع گسسته‌سازی فضایی فشار	حلگر	مدل جریان	هندسه	نوع گره‌بندی	تعداد مش	orthogonality	skewness	aspect ratio	پارامترهای مش و Ansys Fluent
least squares cell based	Coupled	Second Order	Pressure Based	$k - \omega(2eq)$	کانال 3D	چهارضلعی	۷۲۰۵۷۵	۰/۹۹۹	۰/۰۱۲۳۶	۱/۱۳۸	مدار جنوا

<sup>1</sup> Boussinesq approximation

با سیال آب فقط دو رژیم جریان مشاهده می‌شود که برای نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است و به شرح زیر است [۶]:



شکل ۲. رفتارهای ترموهیدرولیک یک مدار گردش طبیعی (a) حالت پایدار<sup>۱</sup> (b) جریان پالسی دوطرفه (ناپایدار)<sup>۲</sup> بدون دامنه (c) جریان پالسی دوطرفه (ناپایدار) با دامنه [۶]

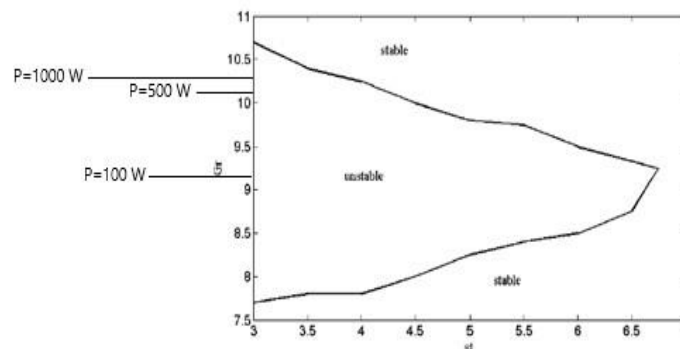
- (a) حالت پایای پایدار (steady stable) که بعد از یک حالت گذرای اولیه، مقدار  $\Delta T$  به یک مقدار ثابت می‌رسد.
- (b) جریان پالسی دو طرفه (ناپایدار) که جریان در هر دو جهت وجود دارد و مدام تغییر می‌کند.
- (c) همانند قسمت (b) البته همراه با نوعی نوسان که دامنه آشفستگی تقویت شده است.
- حال با توجه به مطالب و پیش فرض‌های گفته شده در بالا مدار شبیه‌سازی شده و با توجه به نقشه پایداری مدار جنوا و داده‌های آزمایشگاهی موجود [۳]، محاسبات در توان‌های  $100\text{ W}$ ،  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  انجام شده و نتایج در ادامه آورده شده است.

### ۳. نتایج

ابتدا محاسبات رینولدز را برای توان‌های  $100\text{ W}$ ،  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  انجام داده شد و مشخص شد جریان در این توان‌ها در محدوده آرام قرار دارد و نتایج مربوط به محاسبات عدد رینولدز در جدول ۴ آورده شده است. پایداری جریان‌ها در توان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در ادامه آورده شده است. نقشه پایداری مدار جنوا براساس محاسبات حل عددی [۴] در شکل ۳ آمده است.

جدول ۴. محاسبات عدد رینولدز برای توان‌های  $100\text{ W}$ ،  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$

توان	$100\text{ W}$	$500\text{ W}$	$1000\text{ W}$
عدد رینولدز	۱۴۳۱	۱۷۸۹	۲۵۰۴

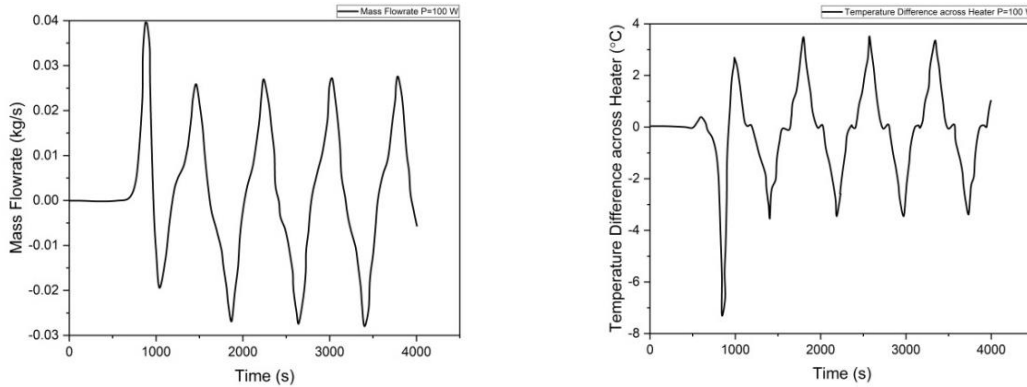


شکل ۳: نقشه پایداری مدار جنوا براساس محاسبات حل عددی [۴]

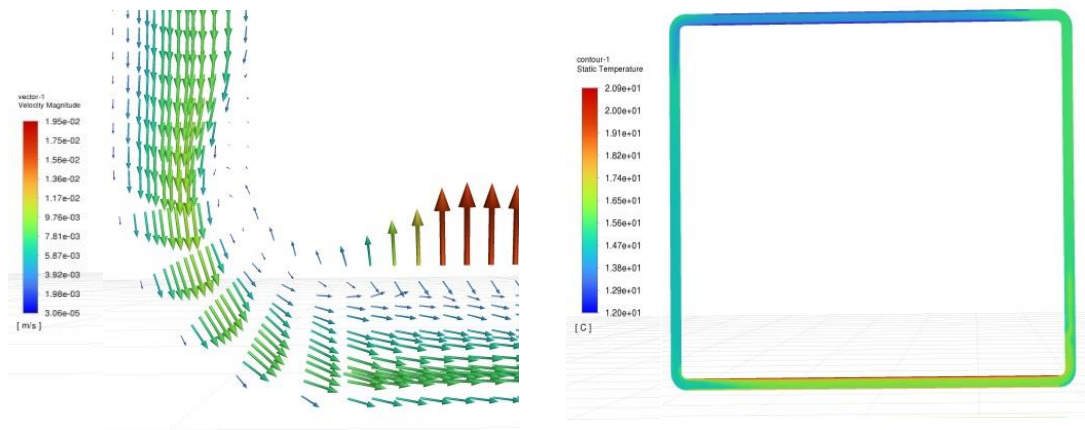
نتایج حاصل از شبیه‌سازی در توان  $100\text{ W}$  حاکی از آن است که جریان گردش طبیعی مدار در این توان به ازای دماهای مختلف چاهک حرارتی، ناپایدار است و جهت جریان از پادساعتگرد به ساعتگرد و بالعکس تغییر می‌کند. به

<sup>1</sup> Stable  
<sup>2</sup> Unstable

ازای این توان، نمودارهای اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی و دبی جریان سیال تا ۴۰۰۰ ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است که با توجه به نمودار دبی جرمی جریان به ازای مقادیر مثبت دبی جرمی، جریان ساعتگرد و به ازای مقادیر منفی دبی جرمی، جریان پادساعتگرد است و تغییر جهت جریان از ساعتگرد به پادساعتگرد در آن مشخص است. همچنین توزیع دمایی مدار و توزیع سرعت سیال در مقطعی از مدار در زمان ۴۰۰۰ ثانیه به عنوان نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است.

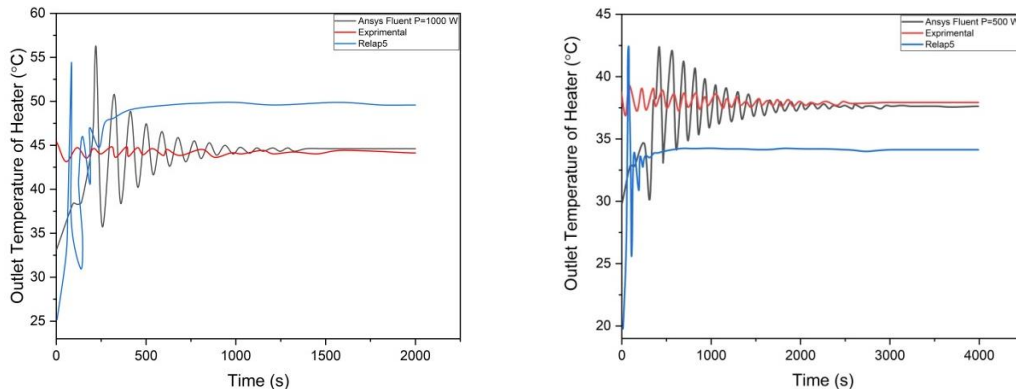


شکل ۴. نمودار اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی و دبی جرمی جریان در توان ۱۰۰ W



شکل ۵. توزیع دمایی مدار و توزیع سرعت سیال در زمان ۴۰۰۰ ثانیه به ازای توان ۱۰۰ W

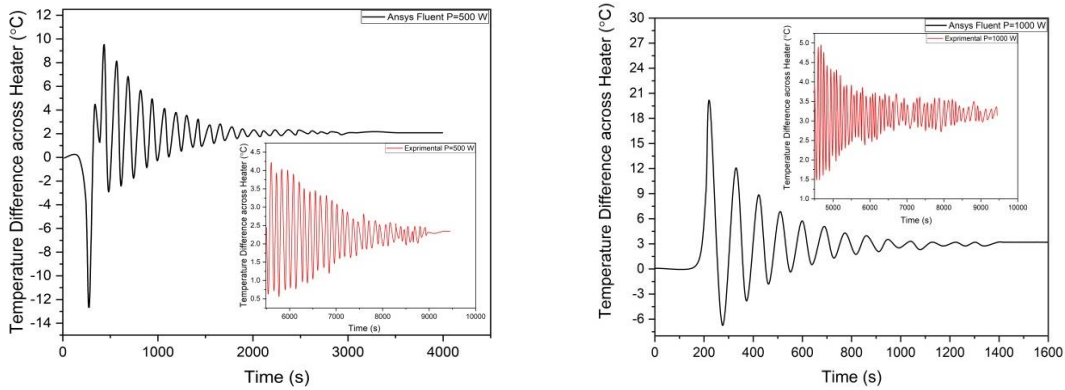
برای این توان همانطور که در شکل ۴ نشان داده شد ناپایداری جریان وجود دارد و جریان بطور متناوب از ساعتگرد به پادساعتگرد و بالعکس تغییر جهت می‌دهد؛ ناپایداری‌های جریان در این توان در کارخانه کرمی و همکاران [۴] نیز مشاهده می‌شود. در شکل ۶ نمودارهای مربوط به دمای خروجی منبع حرارتی به ازای توان ۵۰۰ W و ۱۰۰۰ W آورده شده است که در آن مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی با کد RELAP5 آقای موسویان و همکاران [۳ و ۷] انجام شد که نتایجمان با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد.



شکل ۶. نمودار توزیع دمای مدار در خروجی منبع حرارتی در توان ۵۰۰ W و ۱۰۰۰ W

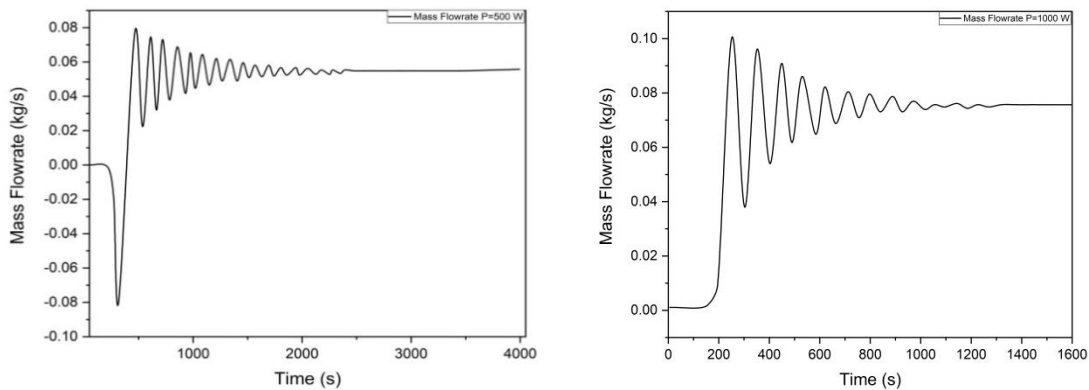


در شکل ۷ مقایسه‌ای بین نمودارهای اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی در توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  با نتایج آزمایشگاهی (نمودار قرمز رنگ) انجام شد که تطابق خوبی بین آن‌ها برقرار است و به ترتیب به مقادیر ۲ و ۳ درجه سانتیگراد همگرا می‌شوند. ( توجه: داده‌های آزمایشگاهی از زمان مشخص شده در شکل در دسترس هستند)



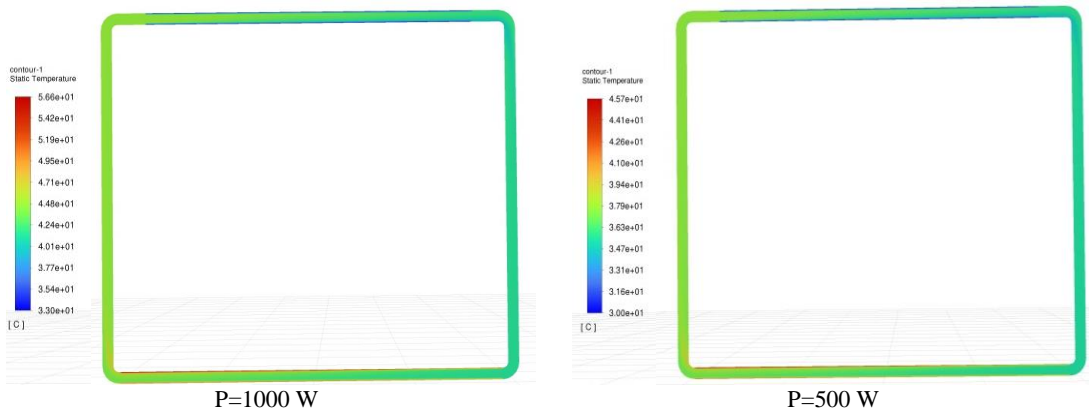
شکل ۷. نمودار اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی در توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی

نمودارهای دبی جرمی سیال به ازای توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  در شکل ۸ آورده شده است که همگرا شدن جریان را نشان می‌دهند.



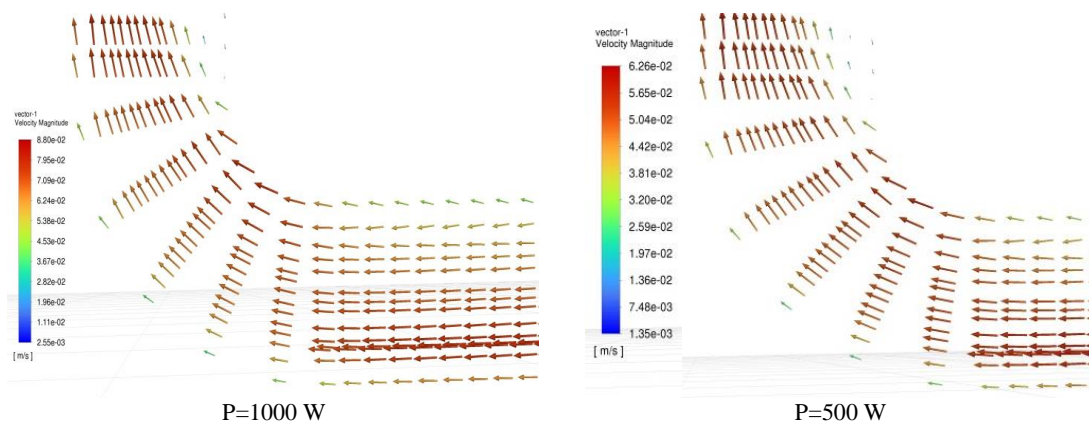
شکل ۸. نمودار دبی جرمی سیال در توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$

نمودارهای توزیع دمایی سیال به ازای توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹. توزیع دمایی سیال در توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$

توزیع سرعت سیال در یک گوشه مدار به ازای توان‌های  $500\text{ W}$  و  $1000\text{ W}$  در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰. توزیع سرعت سیال در یک گوشه مدار به ازای توان‌های ۵۰۰W و ۱۰۰۰W

جریان گردش طبیعی در توان‌های ۵۰۰W و ۱۰۰۰W ساعتگرد است. سیستم گردش طبیعی در توان‌های بالا به ازای دماهای مشخص چاهک حرارتی ( $T_c$ ) در محدوده پایداری قرار دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدار گردش طبیعی دانشگاه جنوا با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent شبیه‌سازی و برای چند توان مختلف، پایداری جریان گردش طبیعی در آن مقایسه شد، در توان ۱۰۰W به ازای دماهای مختلف چاهک حرارتی ناپایداری جریان وجود دارد ولی در توان‌های ۵۰۰W و ۱۰۰۰W با توجه به نتایج محاسبات عددی و نقشه پایداری مدار، در گستره وسیعتری از دماهای چاهک حرارتی، پایداری جریان گردش طبیعی برقرار است. نتایج توان‌های بالا با نتایج آزمایشگاهی تطابق خیلی خوبی دارد بویژه برای اختلاف دمای دو سر منبع حرارتی به ترتیب در توان‌های ۵۰۰W و ۱۰۰۰W به مقدارهای ۲ و ۳ درجه سانتیگراد میل می‌کند.

#### ۵. مراجع

- [1] Bahonar, M. and Aghaie, M. (2017), "Study of fission gas products effect on thermal hydraulics of the WWER1000 with enhanced subchannel method", *Adv. Energy Res.*, 5(2), 91-105.
- [2] Vijayan, P. K. (2002). 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), 139-152.
- [3] Moussavian, S. K., Misale, M., D'Auria, F., & Salehi, M. (2003, January). Stability behavior of single-phase natural circulation loop. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 37157, pp. 119-131).
- [4] Karami, I., & Aghaie, M. (2017). Sensitivity analysis of numerical schemes in natural cooling flows for low power research reactors. *Advances in Energy Research*, 5(3), 255.
- [5] Misale, M. A. R. I. O., Devia, F. R. A. N. C. E. S. C. O., & GARIBALDI, P. (2004). Experiments in a single-phase natural circulation loops: effects of interaction between the wall tube and fluids properties. In *6th International Symposium on Heat Transfer, Beijing, China, June* (pp. 15-19).
- [6] Misale, M., Garibaldi, P., Tarozzi, L., & Barozzi, G. S. (2011). Influence of thermal boundary conditions on the dynamic behaviour of a rectangular single-phase natural circulation loop. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(2), 413-423.
- [7] Mousavian, S. K., Misale, M., D'Auria, F., & Salehi, M. A. (2004). Transient and stability analysis in single-phase natural circulation. *Annals of Nuclear Energy*, 31(10), 1177-1198.