

## شبیه‌سازی عددی جریان سیال داخل لوله تحت‌فشار راکتور CANDU-6 با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و بررسی حضور نانو ذرات در جریان خنک‌کننده

عباس قاسمی زاد\*

استاد، گروه فیزیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

حدیقه عاشوری

دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

سید محمود سادات کیایی

دانشیار، پژوهشکده گداحت، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

اصغر صدیق زاده

دانشیار، پژوهشکده گداحت، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

### چکیده

کاربردهای فراوان نانو سیال در صنایع مختلف موجب شده است تا افزایش کارایی جریان به کمک نانو سیال در راکتورهای هسته‌ای مورد توجه قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین مسائل ایمنی در راکتورها، حاشیه‌ی امن جریان خنک‌کننده می‌باشد. بدین منظور، جریان بدون حضور نانو سیال به صورت عددی با نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی CFX شبیه‌سازی شده است. روش عددی حجم محدود به همراه مدل آشفتگی گذار SST برای تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. جریان در لوله تحت‌فشار با دستگاه مختصات ساکن تحلیل شده است. در حالت جریان نانو سیال، چهار کسر حجمی متفاوت به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اطمینان از صحت شبیه‌سازی و تنظیم شرایط مرزی، یک متغیر فیزیکی (دمای خروجی از لوله‌ی تحت‌فشار) مانیتور گردید. خطای عددی پایین، اطمینان از نتایج حاصل را افزایش داده است. نتایج نشان می‌دهد که کسر حجمی ۱۰ درصد موجب بهبود عملکرد جریان شده است. **واژه‌های کلیدی:** نانو سیال، راکتور هسته‌ای، دینامیک سیالات محاسباتی، CFX.

## numerical simulation of the fluid flow inside the pressurized tube of the CANDU-6 reactor using the Computational Fluid Dynamics and the presence of nanoparticles in the cooling flow

A. Ghasemizad

Physics Department, University of Guilan, Rasht, Iran

H. Ashouri

Physics Department, University of Guilan, Rasht, Iran

S. M. Sadatkieae

Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Nuclear Science Research School, Tehran, Iran

A. Seddighzade

Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Nuclear Science Research School, Tehran, Iran

### Abstract

Recently, Numerous applications of nanofluid in various industries have led to the consideration of increasing the flow efficiency through nanofluid in nuclear reactors. One of the most important safety issues in the reactors is the safety margin of the cooling flow. For this purpose, the performance of flow without presence/presence of nanofluid is simulated numerically with the CFX software. The finite volume numerical method with the SST transition model for numerical analysis has been used, here. The flow in the pressurized pipe is analyzed using a fixed coordinate system. Four different volume fractions are numerically investigated in the nanofluid flow. To ensure the accuracy of the simulation and the setting of boundary conditions, a physical variable (outlet temperature from the pressure pipe) was monitored. The low numerical error has increased the confidence of the results. The results show that the 10% volume fraction has improved the performance of the flow.

**Keywords:** Nanofluid, Nuclear reactor, Computational Fluid Dynamics, CFX.

Clandria (شکل ۱) قرار می‌گیرند و توسط یک گاز عایق گرمایی از لوله تحت‌فشار جدا می‌گردند. این لوله‌ها در یک مخزن استوانه‌ای پر از آب‌سنگین غوطه‌ور هستند که به‌عنوان یک خنک‌کننده نوترن عمل می‌کند. [۱] برخلاف راکتورهای آب سبک، راکتور کندو دارای کانال‌های سوختی افقی شکل است که در نتیجه آن احتمال به وجود آمدن خزش قابل‌ملاحظه‌ای در طول چرخه کاری راکتور، بسیار بالاست. یکی از پیامدهای خزش، افزایش فضای بالای کانال سوخت است که سبب افزایش توزیع خنک‌کننده از مسیری با کمترین مقاومت جریان می‌گردد. این کار سبب کاهش جریان خنک‌کننده‌ی بسته‌های سوخت می‌شود که بالا رفتن دما را به دنبال دارد. [۲] بنابراین بهبود

### ۱- مقدمه

به‌طور دقیق ۳۱ کشور، ۴۳۷ راکتور هسته‌ای را اداره می‌کنند که تعداد ۲۹ راکتور از نوع CANDU (کندو) می‌باشند. در این راکتورها قرص سوخت دی‌اکسید اورانیوم طبیعی درون آلیاژی از زیرکونیوم تشکیل می‌دهد. این سوخت‌ها در قالب بسته‌های سوختی وارد لوله‌های تحت‌فشار افقی شکل می‌گردند و توسط جریان تحت‌فشار آب‌سنگین ( $D_2O$ )، خنک می‌گردند. هر لوله تحت‌فشار شامل ۱۲ بسته سوخت می‌باشد. هر بسته سوخت نیز شامل ۳۷ میله سوخت است. لوله‌های تحت‌فشار به‌صورت هم‌محور داخل یک لوله دیگر به نام

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: aghasemizad@gmail.com

روش‌های خنک‌سازی، راهکار مؤثری برای جلوگیری از حوادث در قلب راکتور خواهد بود.

در تجزیه و تحلیل‌های ایمنی، دانش سرعت جریان و توزیع دما در راکتور CANDU-6 یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها است. بنابراین استفاده از شبیه‌سازی عددی سرعت سیال در لوله‌ها باعث ارائه پیش‌بینی‌های انتقال گرما می‌گردد. [۳]

کاتانا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸) محاسبات ترموهیدرولیکی برای به کارگیری سوخت‌های پیشرفته مورد استفاده در راکتور CANDU6 را انجام دادند. پارامترهای اصلی ترموهیدرولیکی منجمه افت فشار، بالاترین دمای سوخت، چگالی خنک‌کننده، شار گرمایی بحرانی تجزیه و تحلیل شدند. نتیجه پژوهش نشان داد که استفاده از سوخت‌های پیشرفته CANDU6 سبب کاهش هزینه‌های سوخت، کاهش سوخت مصرف شده و افزایش رقابت در انرژی هسته‌ای شده است [۴]. کاتانا و همکاران (۲۰۰۹) آنالیز ترموهیدرولیکی و بررسی عددی جریان خنک‌کننده در یک کانال سوخت راکتور CANDU6 با استفاده از تحلیل نرم افزار FLUENT انجام دادند. اتصالات سوخت، صفحه فاصله ساز و بسته سوخت لخت نیز در شبیه‌سازی وارد گشت. جریان در کانال سوخت بسیار مغشوش و چند فاز بود. شرایط جریان با حل معادلات ممنتوم و جرم شبیه‌سازی گردید. مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  استفاده گردید. تولید / انتقال گرما در این شبیه‌سازی وارد نشده است. شرایط مرزی توسط تحلیل زیر کانال انجام پذیرفت و بسته‌های استاندارد و پیشرفته سوخت نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۵]. کاتانا و همکاران (۲۰۰۹) محاسبات CFD را برای آنالیز یک کانال سوخت راکتور CANDU6 با بسته سوخت نمونه SEU43 انجام دادند [۶]. ژون شنگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴) محاسبات چرخه یک مجتمع سوخت ۲۴ تایی راکتور CANDU6 نمونه را انجام دادند [۷]. عباسیان و همکاران (۲۰۱۵) شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای جریان تک فاز و دو فاز خنک‌کننده یک مجموعه سوخت CANDU را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل CFD قادر به پیش‌بینی روند فشار و دما در داخل کانال جریان و همچنین اثرات هندسی بسته‌ی سوخت بر عملکرد ترموهیدرولیکی سوخت بود [۸]. مهدی زاده<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) شبیه‌سازی‌های عددی وابسته به زمان برای جریان خنک‌کننده CANDU-6 در طیف وسیعی از شرایط جریان را ارائه کردند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد منبع باز (Code\_Saturne V3) انجام گردید [۹]. لاگنتبرگ و همکاران (۲۰۱۸) اقدام به پیش‌بینی دمای حالت پایدار در هنگام عبور جریان از میان بسته‌های سوخت مصرف شده راکتور CANDU با استفاده از روش CFD نمودند. آن‌ها در پژوهششان به برآورد اثربخشی جایجایی جریان در طول قطع سیستم خنک‌کننده راکتور اقدام کردند [۱۰].

در سال‌های اخیر سیالاتی حاوی ذرات معلق با ابعاد نانو بحث جدید و جذابی را در تحقیقات علمی گشوده‌اند که از آن تحت عنوان نانو سیالات نام برده می‌شود. امروزه تأثیرات استفاده از نانو سیالات جهت افزایش کارایی سیستم‌های انتقال گرما بسیار مورد توجه است.

استفاده از نانو سیالات جهت خنک‌سازی قلب راکتور در جهت کاهش حجم سیال خنک‌کننده، کوچک‌سازی ابعاد راکتور و در نتیجه کاهش هزینه‌های ساخت یک نیروگاه هسته‌ای می‌گردد. یکی از مشکلاتی که در تجهیزات انتقال گرما وجود دارد این است که ذرات با ابعاد میکرومتر به دلیل مشکلات ناخالصی، نمی‌توانند در تجهیزات انتقال گرما استفاده شوند، اما نانو فلزات برای کاربردهایی که در آن‌ها جریان سیال از گذرگاه‌های کوچک عبور می‌کنند مناسب می‌باشند زیرا ذرات فلزی به اندازه‌ی کافی کوچک هستند که مانند مولکول‌های مایع عمل کنند. بهبود کارایی تجهیزات انتقال گرما مستلزم کوچک کردن ابعاد آنها و افزایش شار گرمایی می‌باشد.

یکی از راه‌های حل مشکل فوق یافتن ذرات جامدی است که خواص رسانایی گرمایی آنها صدها برابر بیشتر از سیالات انتقال دهنده گرما باشد. با افزودن ذرات بسیار ریز جامد در سیال، می‌توان رسانایی گرمایی آن را بهبود بخشید. نانو سیال، سیالی با چنین ویژگی است. انواع مختلفی از ذرات از جمله فلزی، غیر فلزی و پلیمری را می‌توان به منظور تشکیل نانو سیال استفاده نمود.

تحقیقات نشان می‌دهند که ضرورت استفاده از ساختارهای بهینه افزایش خنک‌سازی یا بهره‌گیری از موادی همچون نانوموادها می‌تواند به خنک‌سازی سریعتر راکتور در زمان‌های حادثه کمک شایان توجهی نماید. در اکثر موارد، کدهای CFD به‌طور مناسب مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، یعنی تعداد گره‌ها برای به دست آوردن همگرایی کافی نیست و مدل‌های آشفتگی استفاده‌شده برای حل آن مسائل مناسب نبوده است. بنابراین در این پژوهش با بررسی اعتبار نتایج عددی در برابر داده‌های تجربی حاصل از ادبیات باز، سعی می‌کنیم برخی از این معایب را روشن کنیم.

با توجه به مزایای استفاده از نانو سیالات در نیروگاه‌های هسته‌ای که در بالا بدان اشاره شد در این مقاله سعی می‌گردد با استفاده از کدهای محاسباتی ترموهیدرولیک در ابتدا انواع نانو سیالات در غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس محاسبات ترموهیدرولیک به صورت کدنویسی و برنامه‌نویسی کامپیوتری در نرم افزار ANSYS-CFX وارد گردیده و با محاسبات ترموهیدرولیک کوپل می‌گردد. در نهایت نتایج بدست آمده اعتبارسنجی شده و عملکرد و کارایی نانو سیالات به عنوان سیال خنک‌کننده در راکتور‌های قدرت آب سنگین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این تحقیق برای اولین بار به این شکل و مدل ارائه شده انجام می‌پذیرد و کار انجام شده در هیچ مقاله و کار علمی گزارش شده رویت نشده است و عملاً پایه‌ای برای اجرای یک طرح بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌های هسته‌ای آب سنگین از نظر ترموهیدرولیکی و افزایش بازدهی، سطح ایمنی و زمان کاربری و کاهش هزینه‌های تمام‌شده‌ی ساخت با کاهش حجم راکتور می‌باشد.

<sup>1</sup> Catana

<sup>2</sup> Zhonsheng

<sup>3</sup> Mehdi Zadeh

است. با توجه هندسه ی مساله، مدل مورد استفاده در این تحقیق SST1 می باشد که می تواند به سرعت همگرایی بالاتری منتهی شود. معادله پایستگی جرم و تکانه برای سیال غیر قابل تراکم به صورت رابطه (۱) و (۲) ارائه شده است. [۱۴]

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho u_i' u_j') \quad (2)$$

تنش برشی اعمال شده نیز به کمک معادله (۳) محاسبه می گردد

$$\bar{\tau}_{ij} = -\mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

معادله های اساسی موجود با استفاده از روش حجم محدود، گسسته سازی و سپس حل می شوند. برای حل معادلات از دستگاه مختصات ثابت استفاده شده است.

#### ۴- هندسه

هندسه این لوله تحت فشار، در نرم افزار Ansys Design Modeler طراحی گردیده است. اطلاعات هندسی لوله تحت فشار، سوخت، غلاف و... در جدول ۲ آمده است. شکل ۲ نمایی از خروجی طراحی شده هندسه را نشان می دهد.

جدول ۲- شرایط هندسی لوله تحت فشار

مقدار	شرح
۳۷	تعداد میله در یک مجتمع سوخت
۴۹۵ mm	طول مجتمع
۱۰۲ mm	قطر مجتمع
۱۲	تعداد مجتمع
۶۰۶۰ mm	طول لوله تحت فشار
میله ی سوخت	
۴۹۳ mm	طول میله
۱۳/۰۸۱ mm	قطر خارجی میله
سوخت	
۱۲/۲۴۳ mm	قطر خارجی سوخت
۱۶ mm	طول سوخت
۳۰ عدد	تعداد سوخت
۳۰ عدد اکسید اورانیوم UO <sub>2</sub>	تعداد سوخت
۱۶ g/cm <sup>3</sup>	چگالی سوخت
۱۴/۸۸۴۵ mm	مرکز تا مرکز سوخت
غلاف و فاصله	
۰/۴ mm	ضخامت غلاف
۶/۵۲۰ g/cm <sup>3</sup>	چگالی غلاف
۱۲/۹۶ mm	قطر خارجی غلاف
۰/۸۳۸ mm	فاصله



شکل ۱- نمایی از بسته سوخت درون یک لوله تحت فشار که همگی درون لوله دیگری به نام Calandria قرار گرفته اند [۱۱].

#### ۲- شبیه سازی سه بعدی و حل عددی

در این مقاله، بررسی عددی جریان خنک کننده در لوله تحت فشار کانال سوخت راکتور هسته ای با استفاده از روش CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) ارائه شده است. [۵ و ۱۲] برای شبیه سازی عددی، مجموعه ی کامل میله های سوخت و غلاف درون لوله ی تحت فشار پر شده از آب سنگین، ترسیم، شبکه بندی و تحلیل می شود. هندسه میله سوخت، توسط نرم افزار مش شبکه بندی شده است. در تولید شبکه ها از سلول های شش وجهی و هرمی یا گوه ای به طور بی سازمان استفاده گردیده است تا به بهترین نحو فضای محاسباتی، شبکه بندی شود. فضای محاسباتی به سه ناحیه مجزا شامل میله سوخت، غلاف سوخت و آب سنگین تقسیم شده است. در گام اول از فرآیند این بررسی، به شبیه سازی جریان سیال داخل لوله تحت فشار بدون حضور ذرات پرداخته شده است. در گام بعد، شبیه سازی با حضور ذرات نانو سیال Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با قطر 0.1 Micron انجام گرفت. چهار شبیه سازی مختلف با کسر حجمی های (0.1%، 1%، 5% و 10%) صورت پذیرفت. در پایان تغییرات دما، سرعت و فشار سیال نسبت به موقعیت طولی برای ایت شبیه سازی ها دست آمد. برای اطمینان از دقت شبیه سازی، از استقلال پاسخ از تعداد تکرار استفاده می گردد؛ خروجی به عنوان یک کمیت فیزیکی متغیر، مانیتور گردید که نشانگر دقت بالای شبیه سازی می باشد. مشخصات سیال D<sub>2</sub>O و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در جدول شماره ۱ آورده شده است.

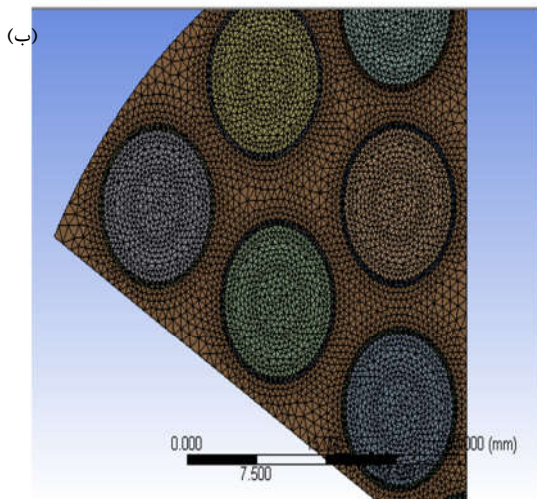
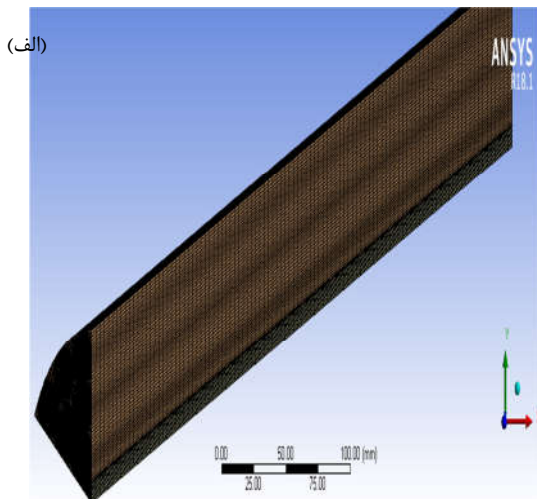
جدول ۱- مشخصات سیال [۱۳]

آب سنگین (D <sub>2</sub> O)	
۴۷۳۶/۷	گرمای ویژه (J/Kg K)
۸۶۲/۶۶	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
نانوسیال (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
۷۶۵	گرمای ویژه (J/Kg K)
۳۹۷۰	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )

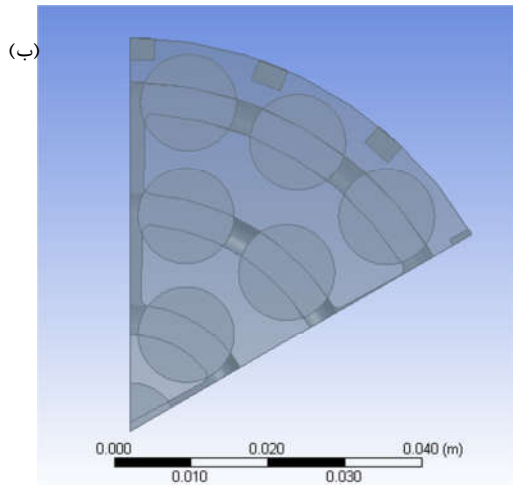
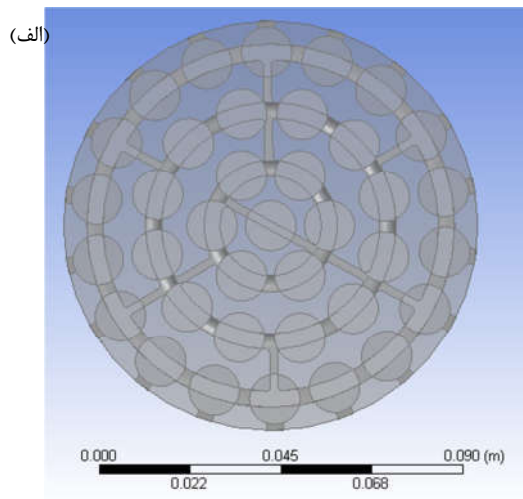
#### ۳- معادلات حاکم و مدل آشفتگی

برای تحلیل جریان در داخل لوله تحت فشار، معادلات اساسی حرکت سیال می بایست حل گردند. جریان در لوله ی تحت فشار، آشفته

<sup>1</sup> shear stress transport

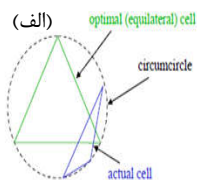


شکل ۳- نمایی از مش اعمال شده روی بسته سوخت (الف) مش روی سطح لوله تحت فشار و (ب) مش روی سطح سوخت



شکل ۲- نمایی از یک مجتمع سوخت شامل ۱۲ بسته سوخت ۳۷ تایی (الف) هندسه لوله تحت فشار و (ب) برش یک‌ششم از هندسه لوله تحت فشار

همانطور که مشخص است بیش از ۸۰ درصد مش‌ها در بازه ۰ تا ۰/۲۵ قرار دارد که نشان از کیفیت عالی مش دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بر اساس توضیح کیفی ارائه شده در شکل ۴، تمامی المان‌های به کار گرفته شده در این شبیه‌سازی، در محدوده عالی و خوب هستند.



$$Q_{EAS} = \frac{(S_{eq} - S)}{S_{eq}}$$

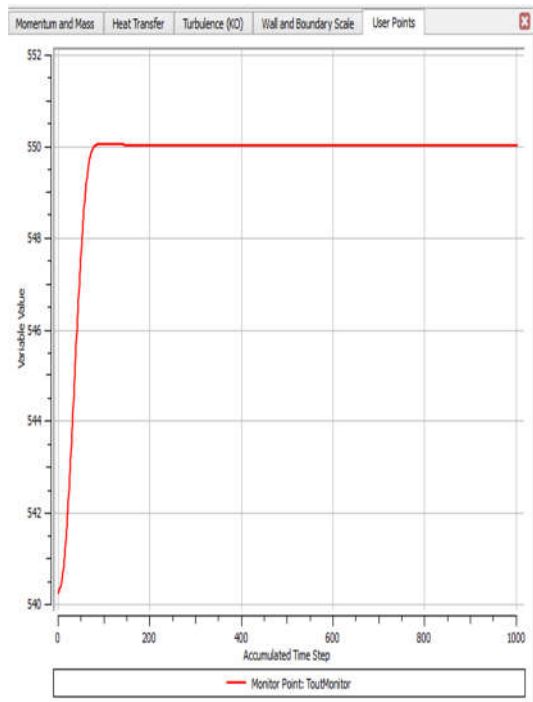
کیفیت	$Q_{EAS}$
عالی	$0 < Q_{EAS} \leq 0.25$
خوب	$0.25 < Q_{EAS} \leq 0.5$
نسبتاً خوب	$0.5 < Q_{EAS} \leq 0.75$
ضعیف	$0.75 < Q_{EAS} \leq 0.9$
بسیار ضعیف	$0.9 \leq Q_{EAS} < 1$
کاملاً معیوب	$Q_{EAS} = 1$

## ۵- مش زنی

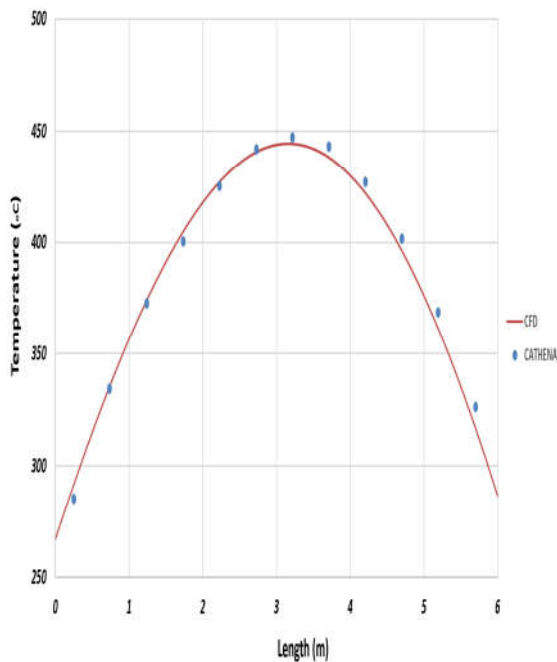
برای مش زنی در اطراف دیواره‌ها از مش مربعی و در مکان‌هایی که تغییر معادلات یا حساسیت و اتصال دو دامنه متفاوت وجود دارد از مش مثلثی ریزتری استفاده گردیده است. شکل ۳ نمایی از مش اعمال شده روی بسته سوخت را نشان داده است. به منظور بررسی کیفیت مش از آزمون Skewness استفاده گردیده است. در این آزمون، سطح هر المان نسبت به المان ایده آل (المان متساوی‌الاضلاع) که در دایره‌ی محیطی آن المان قرار می‌گیرد، سنجیده می‌شود. انحراف سطح مجموعه المان‌ها نسبت به المان ایده‌آل پارامتر Skewness نامیده می‌شود. شکل ۴ کیفیت‌سنجی مش را نشان می‌دهد.

اگر مش در بازه ۰ تا ۰/۲۵ قرار گیرد کیفیت مش عالی خواهد بود ، اگر در بازه ۰/۲۵ تا ۰/۵ قرار گیرد کیفیت مش خوب ، اگر در بازه ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد کیفیت مش نسبتاً خوب ، اگر ۰/۷۵ تا ۰/۹ باشد کیفیت مش ضعیف خواهد بود. اگر پارامتر Skewness برابر با ۱ باشد مش ما کاملاً معیوب بوده است.

در طول میله ی سوخت نمودیم. مقایسه مقادیر تست واقعی و عددی میله‌های سوخت راکتور در نمودار شکل ۴ به صورت کامل نشان داده شده است.

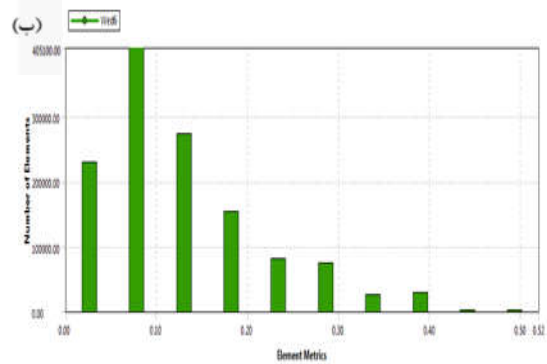


شکل ۴- آنالیز استقلال پاسخ از تعداد تکرار



شکل ۵- تغییرات دما در مرکز میله ی سوخت بر حسب طول و نتایج CATHENA

با توجه به مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی، مشاهده می‌شود



شکل ۶- کیفیت‌سنجی مش: (الف) تعریف آزمون Skewness (ب) چگونگی توزیع Skewness المان‌ها

## ۶- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای تحلیل این لوله تحت فشار به این صورت است که سیال با فشار نسبی ۱۱ مگا پاسکال وارد لوله تحت فشار شده و با دبی جرمی  $4/0.57$  کیلوگرم بر ثانیه از لوله خارج شود. بقیه اجزای لوله به صورت دیوار بدون لغزش در نظر گرفته شده است. همچنین از شرط تقارن یک‌ششم هم بهره برده ایم. شرایط مرزی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- شرایط مرزی

۱۱ MPa	فشار	ورودی سیال
$267/1$ °C	دما ورودی	
$4/0.57$ (kg/m.s)	نرخ دبی حجمی	خروجی
$280$ °C	دمای خروجی	
	دیوار بدون لغزش	دیواره
	یک‌ششم	تقارن

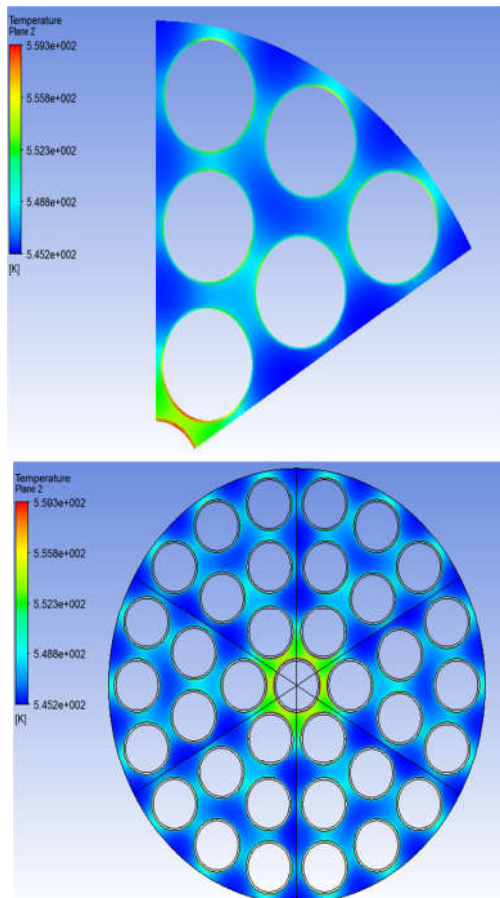
## ۷- استقلال پاسخ از تعداد تکرار

به منظور حصول اطمینان از تنظیم شرایط صحیح مرزی و همچنین استفاده از مدل اغتشاشی مناسب و... اقدام به مانیتور یک متغیر فیزیکی (دمای خروجی از لوله ی تحت فشار) نمودیم. شکل ۵ نمودار تغییرات یک متغیر فیزیکی به منظور آنالیز استقلال پاسخ از تعداد تکرار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر دیده می‌شود، دمای خروجی از لوله تحت فشار برابر با  $550$  K یا  $277$  °C می‌باشد که با دمای واقعی خروجی از لوله تحت فشار که  $545$  K ( $280$  °C) است، تطابق بسیار خوبی دارد و میزان خطای آن کمتر از  $1/07$  درصد است.

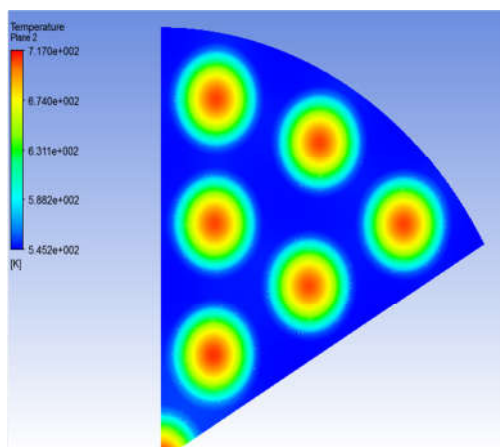
## ۸- اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی شده

برای مقایسه داده‌های تغییرات دما در مرکز میله سوخت یک راکتور CANDU-6 واقعی با تغییرات دما در مرکز میله سوخت شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار Ansys، اقدام به مقایسه تغییرات دما در مرکز میله سوخت نسبت به موقعیت طولی با نتایج پژوهش [۱۵]

ورودی ، دمای اولیه را داراست ولی به دلیل تماس با میله های سوخت ، گرم شده و در خروجی متوسط دما نسبت به ورودی افزایش یافته است.



شکل ۷- کانتور دما در یک برش صفحه‌ای  
(الف) کانتور دما در یک برش صفحه‌ای یک ششم  
(ب) کانتور دما در یک برش صفحه‌ای شش ششم (کامل)



که خطای موجود کم است. با توجه به نمودار، بیشترین خطای موجود ۲/۲۴ درصد می‌باشد و خطا در مرکز میله سوخت حدود ۰/۴۱ درصد است که بسیار کم و قابل قبول به نظر می‌رسد. در نتیجه با دقت بالایی می‌توان از این شبیه‌سازی برای بررسی عددی جریان سیال داخل لوله تحت فشار راکتور CANDU-6 با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین بررسی حضور نانو ذرات در جریان خنک‌کننده این راکتور، استفاده نمود.

جدول ۴- تغییرات دمای میله با طول میله

دمای میله (C)			طول (m)
خطا (%)	عددی	واقعی	
-۱/۳۱	۲۶۴/۷۶	۲۶۷/۵۲	۰
-۰/۵۱	۳۵۵/۱۶	۳۵۷/۰۱	۱
-۰/۴۴	۴۱۶/۰۵	۴۱۷/۸۹	۲
+۰/۴۱	۴۴۵/۵۷	۴۳۳/۷۲	۳
+۰/۶۴	۴۳۲/۶۵	۴۲۹/۸۸	۴
+۰/۹۸	۳۷۹/۱۵	۳۷۵/۴۶	۵
+۲/۲۴	۲۹۳/۳۵	۲۸۶/۹	۶

## ۹- نتایج

همان‌طور که گفته شد، به‌طور کلی دو شبیه‌سازی صورت گرفت. یکی شبیه‌سازی عددی جریان بدون حضور ذرات و دیگری در حضور ذرات نانو سیال  $Al_2O_3$  با قطر 0.1 Micron بود. البته ۴ کسر حجمی (0.1%، 1%، 5% و 10%) نیز مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. تصویر کانتورهای دما، تغییرات دمای سیال نسبت به موقعیت طولی، تغییرات سرعت سیال نسبت به موقعیت طولی و تغییرات فشار سیال نسبت به موقعیت طولی، به‌عنوان خروجی به دست آمدند. در زیر نتایج را به تفکیک ارائه نموده ایم.

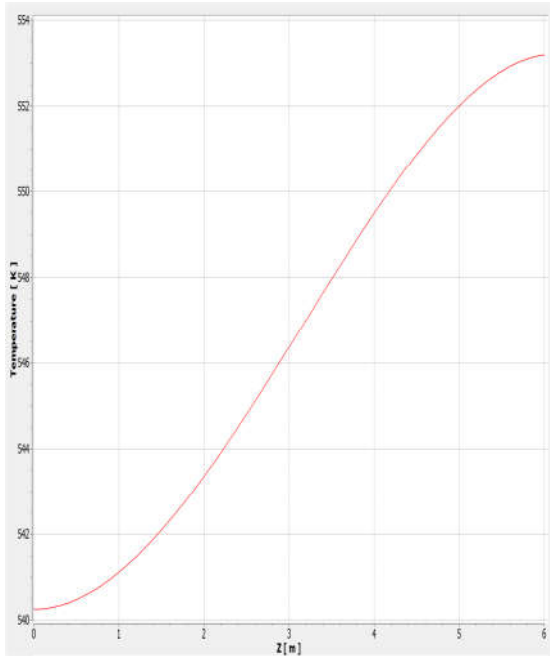
### ۹-۱- بدون حضور ذرات

شکل ۷ کانتور دما را در یک برش صفحه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، دما در میله سوخت مرکزی دارای بالاترین مقدار و سیال اطراف آن بیشتر از سایر نواحی گرم شده است. دمای مرکزیت میله های سوخت برابر با ۷۱۷ کلوین و دمای غلاف چیزی در حدود ۵۸۸ کلوین است. دمای سیال نیز چیزی در حدود ۵۴۵ کلوین بوده است.

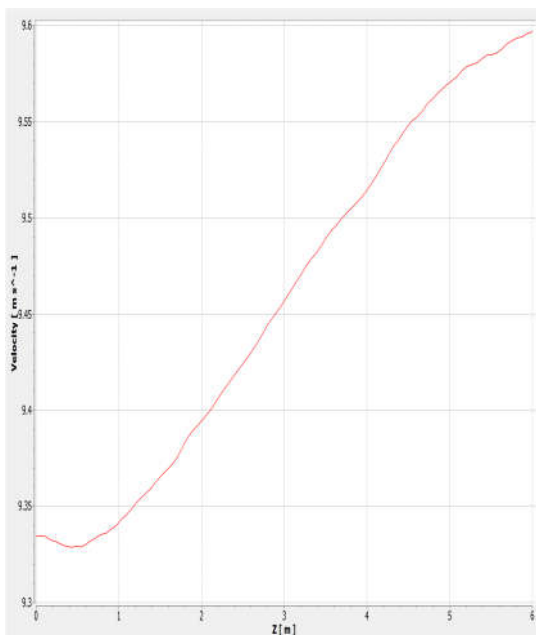
شکل ۸ کانتور دما در یک برش صفحه‌ای با حضور میله‌های سوخت را نشان می‌دهد. دما در مرکز میله‌های سوخت، ۷۱۷K (۴۴۳/۷۲) است. هر چه از میله‌های سوخت فاصله گرفته و به سمت غلاف سوخت می‌رویم، شاهد افت دما هستیم تا جایی که دمای سیال اطراف غلاف سوخت، ۵۴۵ کلوین (۲۷۱°C) می‌باشد.

در شکل ۹ کانتور دما در برش‌های صفحه‌ای مختلف و در طول میله سوخت به نمایش گذاشته شده است. تغییرات دما در صفحات مختلف در این شکل مشخص است. متوسط دمای خروجی آب ۲۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. این تصویر نشان می‌دهد که آب در

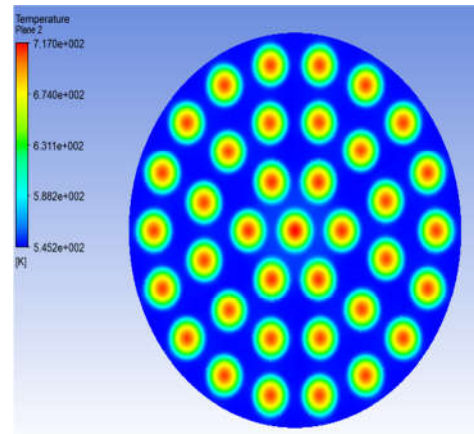
داده شده است. سرعت سیال در موقعیت ابتدایی میله برابر با  $9/35 \text{ m/s}$  می باشد. با افزایش طول میله این مقدار افزایش یافته و به حدود عدد  $9/6 \text{ m/s}$  می رسد. همانطور که در شکل ۱۱ نیز بحث شد با ورود آب به tube و تماس یافتن با میله های سوخت، سیال گرمتر خواهد شد. این گرما سبب ایجاد حرکت در سیال (جوشش) شده و سرعت سیال را افزایش خواهد داد که در شکل ۱۲ این تغییرات نشان داده شده است.



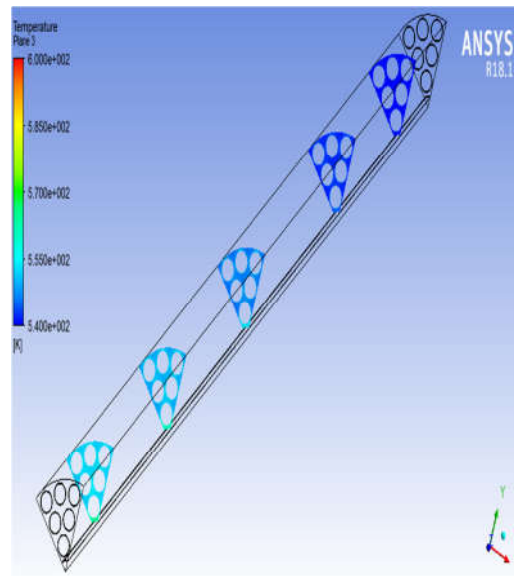
شکل ۱۰- تغییرات دمای سیال بر حسب طول



شکل ۱۱- تغییرات سرعت سیال بر حسب طول



شکل ۸- کانتور دما در یک برش صفحه ای با حضور میله های سوخت (الف) کانتور دما در یک برش صفحه ای با حضور میله های سوخت به صورت یک ششم و (ب) کانتور دما در یک برش صفحه ای با حضور میله های سوخت به صورت شش ششم (کامل)



شکل ۹- کانتور دما در برش های صفحه ای مختلف

### ۹-۱-۱ تغییرات دمای سیال نسبت به موقعیت طولی

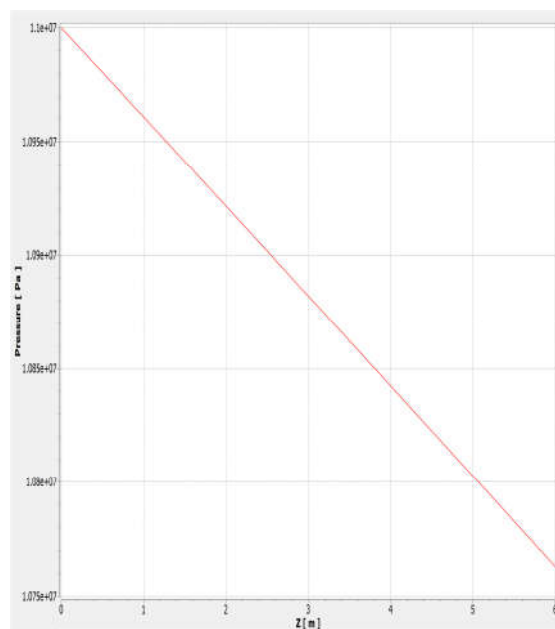
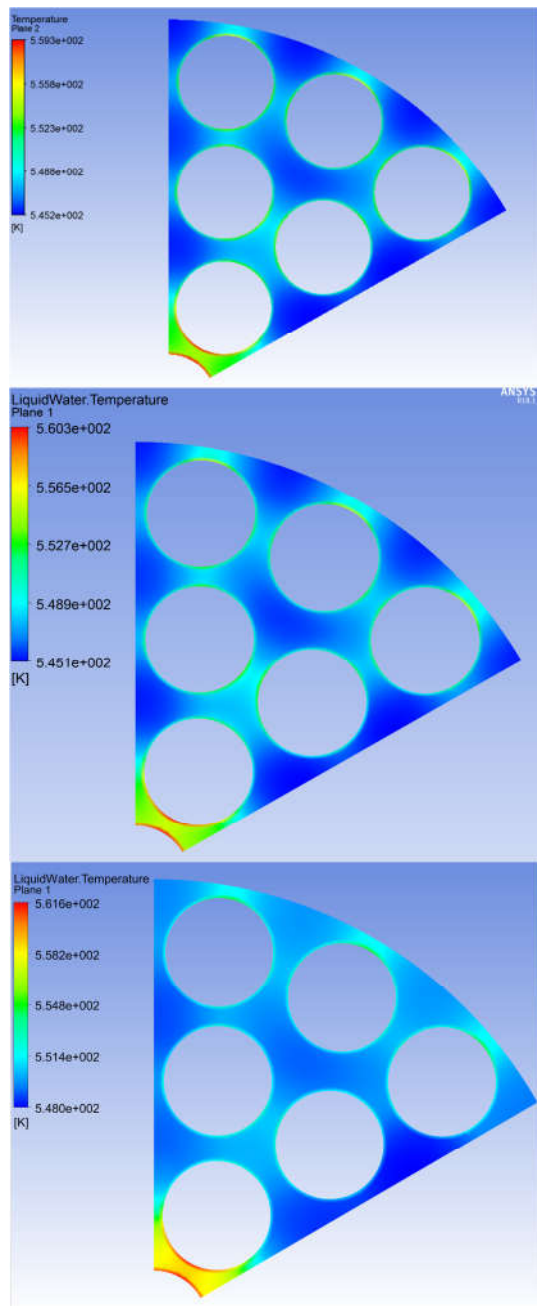
همان طور که از شکل ۱۰ دیده می شود، دمای سیال در ورودی برابر با  $540 \text{ K}$  (معادل با  $267^\circ \text{C}$  که همان دمای ورودی است) می باشد. با افزایش طول، دمای سیال که با غلاف سوخت در تماس است، افزایش می یابد تا به دمای  $553 \text{ K}$  ( $280^\circ \text{C}$ ) می رسد. این مقدار با اطلاعات فنی این راکتور، همخوانی دارد. با ورود سیال به tube و بدلیل گرمای ذاتی میله های سوخت، دما رفته رفته بالا می رود که در شکل این تغییر دما به وضوح قابل مشاهده است.

### ۹-۱-۲ تغییرات سرعت سیال نسبت به موقعیت طولی

در شکل ۱۱ تغییرات سرعت سیال نسبت به موقعیت طولی نشان

### ۹-۳ تغییرات فشار سیال نسبت به موقعیت طولی

شکل ۱۲ تغییرات فشار سیال نسبت به موقعیت طولی را نشان داده است. فشار سیال در موقعیت ابتدایی میله برابر با ۱۱ MPa بوده است. با افزایش طول میله این مقدار کاهش یافته و به حدود ۱۰/۷۶ MPa رسیده است. علت این امر به قانون بقای انرژی بر می‌گردد. در شاره‌ای که جریان دارد، افزایش سرعت جریان با کاهش فشار هم‌زمان است، به شرطی که ارتفاع سیال ثابت بماند. معادله برنولی بیان دقیق‌تر این اصل است، به عبارت دیگر اگر سرعت یک سیال افزایش پیدا کند، فشاری که بر یک سطح وارد می‌کند کاهش می‌یابد و بالعکس. از آنجایی که این tube در ارتفاع ثابتی قرار دارد و ما بدلیل گرما، افزایش سرعت جریان را داریم، بنابراین توجیهی بر کاهش فشار می‌باشد.



شکل ۱۲- تغییرات فشار سیال بر حسب طول

### ۹-۲- در حضور ذرات نانو سیال $Al_2O_3$ ۰/۱ میکرون

چهار شبیه‌سازی مختلف با کسر حجمی‌های 0.1%، 1%، 5% و 10% انجام گرفت. تغییرات دما، سرعت و فشار سیال نسبت به موقعیت طولی برای هر شبیه‌سازی به‌دست‌آمده است. در ادامه به مقایسه تغییرات دمای سیال بر حسب طول برای این شبیه‌سازی‌ها پرداخته شده است. شکل ۱۳ (الف) کانتور دما را در یک برش صفحه‌ای بدون حضور جریان نانو سیال نشان می‌دهد. شکل‌های (ب) و (ج) همین کانتور دما را با حضور نانو سیال با قطر ۰/۱ میکرون و با کسر حجمی ۰/۱ درصد و ۱۰ درصد نشان می‌دهد. با افزایش کسر حجمی دمای سیال افزایش یافته است.

### ۹-۲-۱ تغییرات دمای سیال بر حسب طول در کسرهای

#### حجمی مختلف

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، افزایش کسر حجمی ذرات منجر به افزایش دما می‌گردد. شکل ۱۴ تغییرات دمای سیال بر حسب طول

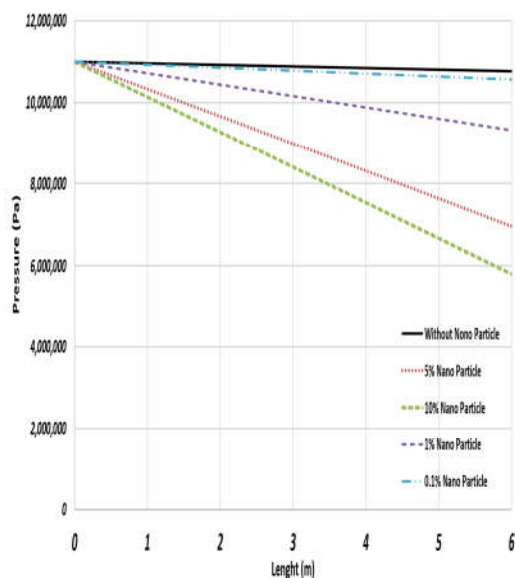
و مقایسه برای کسر حجمی‌های مختلف را نشان می‌دهد. کسر حجمی ۱۰ درصد بهترین عملکرد را ثبت کرده است. در واقع درست است که در ۱۰ درصد حجمی، سیال گرمای بیشتری دارد اما باید آن را این گونه تحلیل کرد که استفاده از نانو سیال ۱۰ درصد حجمی سبب جذب بیشتر گرما و انتقال آن به سیال به منظور خروج از tube می‌گردد. این امر یکی از مهمترین مزایای نانو سیال می‌باشد

شکل ۱۳- کانتور دما در یک برش صفحه‌ای در /بدون حضور ذرات (الف) بدون حضور جریان نانو سیال (ب) با حضور نانو سیال با قطر ۰/۱ میکرون و کسر حجمی ۰/۱ درصد (ج) با حضور نانو سیال با قطر ۰/۱ میکرون و کسر حجمی ۱۰ درصد



### ۹-۲-۳ تغییرات فشار سیال بر حسب طول به ازای کسرهای حجمی مختلف

همان طوری که مشاهده می‌شود، افزایش کسر حجمی ذرات منجر به افزایش افت فشار می‌گردد. در شکل ۱۶ که تغییرات فشار سیال بر حسب طول به ازای کسرهای حجمی مختلف را نشان داده است به وضوح می‌توان کاهش فشار ۵ MPa را برای کسر حجمی ۱۰ درصد مشاهده نمود. این افت فشار به دلیل افزایش سرعت ناشی از افزایش دماست که پیشتر بدان پرداختیم. در اینجا نیز اثبات شده است. هر چه سرعت بیشتر باشد، افت فشار بیشتر است که در اینجا بدلیل سرعت بیشتر نانوسیال با ۱۰ درصد حجمی، افت فشار قابل ملاحظه ای رخ داده است.



شکل ۱۶- تغییرات فشار سیال بر حسب طول به ازای کسرهای حجمی مختلف

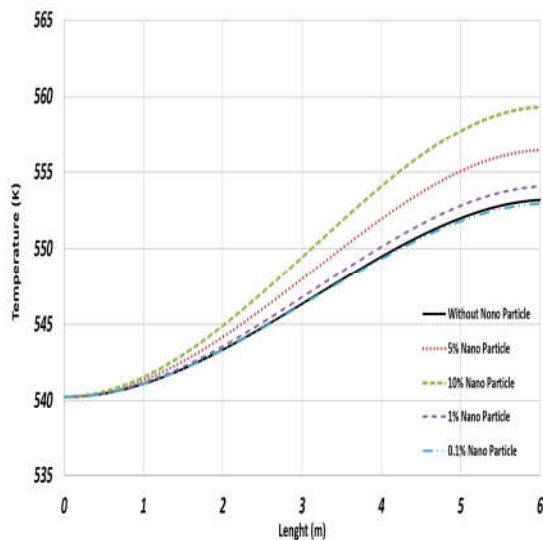
### ۱۰- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، بررسی عددی جریان در لوله تحت فشار راکتور CANDU-6 و همچنین بررسی آن در حضور ذرات نانو است. این تحقیق برای اولین بار به این شکل و مدل ارائه شده انجام می پذیرد و کار انجام شده در هیچ مقاله و کار علمی گزارش شده رویت نشده است و عملاً پایه ای برای اجرای یک طرح بهینه سازی عملکرد نیروگاههای هسته ای آب سنگین از نظر ترموهیدرولیکی و افزایش بازدهی، سطح ایمنی و زمان کاربری و کاهش هزینه های تمام شده ی ساخت با کاهش حجم راکتور می باشد. ابتدا هندسه لوله تحت فشار، طراحی و به منظور بررسی کیفیت مش از آزمون Skewness استفاده شد. تمامی المان های به کار گرفته شده در این شبیه سازی در محدوده ی عالی و خوب بودند. پس از آنالیز استقلال پاسخ از تعداد تکرار و پایش دمای خروجی از لوله تحت فشار به عنوان متغیر فیزیکی، شبیه سازی عددی صورت پذیرفت.

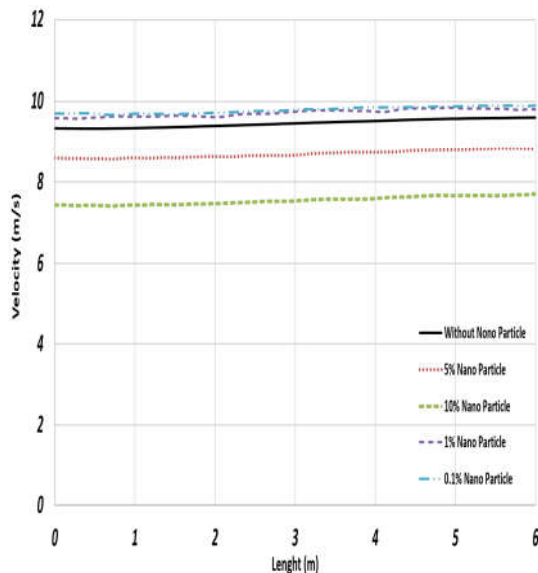
مقایسه تغییرات دما در مرکز میله سوخت نسبت به موقعیت طولی با نتایج [۱۵] صورت پذیرفت. دمای سوخت در مرکز میله بالاتر از سایر نواحی به دست آمد. دمای واقعی ۴۴۳/۷۲ °C است که با مقدار عددی

### ۹-۲-۲ تغییرات سرعت سیال بر حسب طول در کسرهای حجمی مختلف

به نسبت حالت جریان بدون حضور نانو سیال، کسر حجمی کوچک تر ذرات (۰/۱ درصد و ۱ درصد) باعث کم شدن سرعت سیال شده است، حال آن که کسر حجمی بزرگ تر ذرات (۵ درصد و ۱۰ درصد) سبب بالا رفتن سرعت سیال گردیده است. به روش مشابه که پیشتر نیز ذکر شد، دمای سیال بیشتر یعنی سرعت بیشتر و از آنجایی که سیال با ۱۰ درصد حجمی دمای بالاتری را نسبت به دیگر حالت ها ثبت کرده است بنابراین سرعت بیشتری از آن انتظار داریم. شکل ۱۵ تغییرات سرعت سیال بر حسب طول و مقایسه برای کسرهای حجمی مختلف را نشان داده است.



شکل ۱۴- تغییرات دمای سیال بر حسب طول و مقایسه به ازای کسرهای حجمی مختلف



شکل ۱۵- تغییرات سرعت سیال بر حسب طول به ازای کسرهای حجمی مختلف

- Safety Applications (CFD4NRS), Cambridge, USA, 2016.
- [3] Teysseidou, A., Necciari, R., Reggio, M. and Mehdi Zadeh, F., Moderator Flow Simulation Around Calandria Tubes of Candu-6 Nuclear Reactors. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 8, No.1, pp. 178-192, 2014.
- [4] Catana, A., Danila, N., Prisecaru, I., and Dupleac, D., *Thermal-hydraulic analysis for advanced fuel to be used in Candu 600 nuclear reactors*. Paul Scherrer Institut, Switzerland, 2008.
- [5] Catana, A., Dupleac, D., Prisecaru, I. and Denila, N., CFD Thermal-Hydraulic analysis of a CANDU fuel channel. In NUCLEAR 2009 international conference on sustainable development through nuclear research and education, Pitesi, Romania, 2009.
- [6] Catana, A., Prisecaru, I., Dupleac, D., and Danila, N., CFD thermal-hydraulic analysis of a CANDU fuel channel with SEU43 type fuel bundle. In *International Symposium on Nuclear Energy SIEN 2007 Nuclear Power - A New Challenge*, (p. 532). Romania: Romanian Nuclear Energy Association, AREN, 2009.
- [7] Zhonsheng, X., and Boczar, P. G., CANDU Fuel-Cycle Vision. *Xi'an Jiatong University and Atomic Energy of Canada Limited*, 2014.
- [8] Abbasian, F., Hadaller, G. I., and Fortman, R. A., Single-Phase and Two-Phase CFD Simulations of the Coolant Flow Inside a Bruce/Darlington CANDU Flow Channel. In *Proc of the Int. Nuclear reactor thermal hydraulics. Conf., NURETH-16*, Chicago (pp. 7820-7829), 2015.
- [9] Zadeh, F. M., Étienne, S., and Teysseidou, A., 2-D CFD time-dependent thermal-hydraulic simulations of CANDU-6 moderator flows. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 309, pp. 122-135, 2016.
- [10] Logtenberg, D., Grant, W., Chan, P., and Corcoran, E., Convective Heat Transfer in CANDU Spent Fuel Racks After a Loss of Coolant. In *26th International Conference on Nuclear Engineering* (pp. V009T16A030-V009T16A030). American Society of Mechanical Engineers, 2018.
- [11] Piro, M.H.A., Wassermann, F., Grundmann, S. and Leitch, B.W., Progress in on-going Experimental and Computational Fluid Dynamic Investigations within a CANDU Fuel Channel. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 299, pp. 184-200, 2016.
- [12] Keheley, T., AREVA use of CFD in fuel assembly design and licensing, thermal hydraulics, Salt Lake City, UT February, 23/24, 2006.
- [13] Catana, A., Prisecaru, I., Dupleac, D., and Danila, N., Computational fluid dynamic approach for CANDU6 and ACR1000 fuel channel coolant flow. In CIEM2009, In *3rd International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT*, Bucharest, 12-24 November 2009.
- [14] Ehghaghi M. B. and Vajdi M., Numerical and Experimental Study of Splitter Blades Effect on the Centrifugal Pump Performance, *Modares Mechanical Engineering journal*, Vol. 15, No.3, pp. 398-410, 2015.
- [15] Kim, H. T., In, W. K., and Park, J. H., three dimensional analyses of CANDU6 fuel channel using CFX code, In *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Jeju, Korea, 2010.

به دست آمده از این تحقیق، کمتر از ۰/۴۱ درصد اختلاف دارد که عدد بسیار قابل قبولی است. دو شبیه‌سازی عددی جریان، یکی بدون حضور ذرات و دیگری در حضور ذرات نانو سیال  $Al_2O_3$  با قطر 0.1 Micron صورت پذیرفت. شبیه‌سازی در حضور ذرات نانو سیال با ۴ کسر حجمی متفاوت ( 0.1%، 1%، 5% و 10% ) انجام شد. با افزایش کسر حجمی مشاهده می‌شود که دمای سیال افزایش یافته است. کانتور دما در یک برش صفحه‌ای با حضور نانو سیال با قطر ۰/۱ میکرون با کسر حجمی ۱۰ درصد حدود ۵۶۰K ( معادل با ۲۸۷ °C ) است. این در حالی است که متوسط دمای سیال بدون حضور ذرات برابر با ۵۵۰ K ( حدود ۲۷۷ °C ) بود.

برای تغییرات دمای سیال نسبت به موقعیت طولی در حالت بدون حضور ذرات نانو سیال، مشاهده شد که دمای سیال در ورودی برابر با K ۵۴۰ ( معادل با ۲۶۷ °C ) و با افزایش طول، دمای سیال که با غلاف سوخت در تماس است، افزایش یافته و به دمای K ۵۵۳ ( ۲۸۰ °C ) رسیده است. این در حالی است که دمای سیال در حالت حضور ذرات نانو سیال در ورودی برابر با K ۵۴۰ ( معادل با ۲۶۷ °C ) و در خروجی تقریباً برابر با K ۵۶۰ ( معادل با ۲۸۷ °C ) بوده است.

تغییرات سرعت سیال نسبت به موقعیت طولی در حالت بدون حضور ذرات نانو سیال در ورودی برابر با ۹/۳۵ m/s و در خروجی حدود عدد ۹/۶ m/s بوده است، اما در حضور نانو سیال، در کسر حجمی کوچک‌تر ذرات (۰/۱ درصد و ۱ درصد) سرعت سیال افزایش یافته حال آنکه کسر حجمی بزرگ‌تر ذرات (۵ درصد و ۱۰ درصد) سبب کاهش سرعت سیال گردیده است. سرعت نانو سیال در کسر حجمی 10% کمتر از ۸ m/s بوده است.

تغییرات فشار سیال نسبت به موقعیت طولی در حالت بدون حضور ذرات نانو سیال در ورودی برابر با ۱۱ MPa و در خروجی برابر با MPa ۱۰/۷۶ بوده است. حال آن که افت فشار در جریان نانو سیال و کسر حجمی ۱۰ درصد بسیار مشهود بوده به نحوی که فشار خروجی جریان نانو سیال و کسر حجمی ۱۰، کمتر از ۶ مگا پاسکال بوده است. در این تحقیق مستقل بودن عملکرد نانو ذرات نسبت به قطر ذرات و تنها وابسته بودن به کسر حجمی ذرات اثبات شده است. به وضوح دیده شد که استفاده از نانو سیال با ۱۰ درصد حجمی نتیجه بهتری نسبت به ۵ درصد حجمی یا ۱ درصد حجمی داشته است.

#### ۱۱- نمادها

T	دما (°C)
L	طول (m)
p	فشار (MPa)
CANada Deuterium Uranium	CANDU
Computational Fluid Dynamics	CFD

#### ۱۲- مراجع

- [1] Cacuci, D. G., *Handbook of Nuclear Engineering*, Springer, New York, 2010.
- [2] Piro, M., Experimental and Computational Investigation of Flow By-Pass in a 37-Element CANDU Fuel Bundle in a Crept Pressure Tube, In *Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor*