



## بررسی اثر کویل خنک‌کننده راکتور MNSR اصفهان بر زمان عملکرد

میثم زرگر\*<sup>۱</sup>؛ محمد حسین استکی<sup>۲</sup>؛ منصور طالبی<sup>۲</sup>؛ جواد مختاری<sup>۲</sup>

۱. دانشگاه اصفهان، دانشکده فیزیک، گروه مهندسی هسته‌ای، صندوق پستی: ۳۴۴۱-۸۱۷۴۶۷، اصفهان - ایران

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

### چکیده:

یکی از محدودیت اصلی راکتور MNSR زمان عملکرد کوتاه آن در قدرت اسمی است. بر اثر افزایش دمای کندکننده، راکتیویته اضافی در دسترس کاهش می‌یابد؛ بنابراین، زمان موجود برای ادامه عملیات محدود است. در این پژوهش، ابتدا، مروری کوتاه بر هندسه و مشخصات راکتور شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت یک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی کامل برای مدل‌سازی پدیده جابجایی آزاد در قلب، مخزن و استخر راکتور با توجه به اثر کویل خنک‌کننده ماریپیج موجود در بالای مخزن راکتور انجام شده است. محاسبات عددی جریان خنک‌کننده در راکتورهای استخری، به خاطر حجم زیاد سیال پیچیده می‌شود برای کاهش محاسبات، قلب راکتور به عنوان یک محیط متخلخل و یک منبع حرارتی با توان یکنواخت ۳۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. مقایسه‌ی بین داده‌های تجربی و حل عددی به دست آمده از روش محیط متخلخل، این روش را تایید می‌کند. مسئله یک‌مرتب با در نظر نگرفتن اثر کویل و حالت دیگر با در نظر گرفتن اثر کویل خنک‌کننده حل شده و نتایج به دست آمده از هر کدام مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد؛ دمای سیال ورودی و خروجی از قلب در حالت استفاده از کویل در مقایسه با حالت بدون کویل (دبی سیال ورودی به کویل صفر است) ۲ درجه سانتی‌گراد کمتر می‌باشد؛ و زمان عملکرد راکتور حدود نیم ساعت افزایش می‌یابد. یک وضعیت دیگر مورد بررسی قرار گرفت؛ که ابتدا توسط کویل آب استخر را چند درجه‌ای خنک کرده، سپس راکتور راه‌اندازی شود. در این صورت زمان عملکرد راکتور حدود چهار ساعت ونیم می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** کویل خنک‌کننده، محیط متخلخل، تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، راکتور مینیاتوری چشمه نوترونی

## Investigation of the effect the cooling coil of the Esfahan MNSR Reactor on the operation time

M. Zargar<sup>1</sup>, M.H. Esteki<sup>1</sup>, M. Talebi<sup>2</sup>, J.Mokhtari<sup>2</sup>

1. Department of Physics, Nuclear Engineering, University of Isfahan

2. Nuclear Science and Technology Research Institute

### Abstract:

One of the main limitations of the reactor is its short operating time at rated power. The moderator temperature rises. As a result, the available excess reactivity is reduced. Therefore, the time available to continue the operation is limited. In this paper, first, a brief overview of the geometry and specifications of the reactor is given. Then, using Ansys Fluent software, a CFD analysis is performed to model the free natural convection in the core, vessel and pool of the MNSR reactor due to the cooling coil effect above the reactor vessel. The numerical calculations of the coolant flow in the pool reactors are complicated due to the large volume of fluid, to reduce the calculation, the core of the reactor as a porous medium and a heat source with a uniform power of 30kw. Comparison between experimental data and numerical solution obtained by porous medium method, verified this method. The problem is solved once by not considering the effect of the coil and other state by considering the effect of the cooling coil and the results obtained from each are compared. The results show that the temperature of the inlet and outlet fluid of the core when using the coil is 2 °C lower than in the case without the coil (the inlet fluid flow to the coil is zero); And the reactor operating time increases by about half an hour. Another situation was examined, First, cool the pool water by a few degrees with a coil, then start the reactor. In this case, the reactor operating time is about four and a half hours.

**Keywords:** cooling coil, porous medium, CFD, Miniature Neutron Source Reactor

Email: meysam8442@gmail.com

## ۱. مقدمه

راکتورهای تحقیقاتی محدوده وسیعی از راکتورهای هسته‌ای تجاری و غیرنظامی را شامل می‌شوند؛ که عموماً جهت تولید قدرت بکار نمی‌روند. هدف اصلی راکتورهای تحقیقاتی فراهم کردن چشمه نوترون به‌منظور تحقیق و اهداف دیگر است. خروجی آن‌ها (باریکه نوترونی) بسته به مورداستفاده آن می‌تواند مشخصات گوناگونی داشته باشد. تولید رادیو ایزوتوپ‌ها، کاربردهای باریکه نوترونی، تزریق سیلیکونی<sup>۱</sup> و پرتوهای مواد کاربردهای اصلی بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی است [۱]. یک نوع مرسوم این راکتورها، راکتور مخزن استخری است. راکتور مینیاتوری چشمه نوترونی یک راکتور تحقیقاتی پیشرفته و کوچک از نوع استخری است که بر اساس طراحی راکتور کانادایی SLOWPOKE ساخته شده است، در این راکتور از اورانیوم با غنای بالا<sup>۲</sup> به‌عنوان سوخت، آب سبک به‌عنوان خنک‌کننده و کندکننده و بریلیوم به‌عنوان بازتابنده استفاده شده است [۲]. راکتور با گردش طبیعی آب خنک می‌شود؛ متوسط دمای خنک‌کننده راکتور در سطح توان نامی، باید کمتر از ۵۷ درجه سانتی‌گراد باشد [۳]. تحقیقات و بررسی‌های متعددی جهت شبیه‌سازی رفتار ترموهیدرولیکی راکتور MNSR صورت گرفته است. البارحم<sup>۳</sup> و همکاران؛ مسئله ترموهیدرولیکی ناپایدار با استفاده از ده معادله دیفرانسیل به روش رانگ کوتاه حل کرده‌اند. شبکه‌های سوختی و مدل کوئل خنک‌کننده نیز در این مدل گنجانده شده است. اثر کوئل خنک‌کننده بخش فوقانی حوضچه بر پارامترهای ترموهیدرولیکی راکتور مورد بحث قرار می‌گیرد [۴]. به‌طور کلی کدهای مختلف محاسباتی جهت شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به Relap5 و COBRA\_EN اشاره کرد. این کدها قادر به نشان دادن الگوی جریان سه‌بعدی نیستند؛ بنابراین استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند، کمک زیادی به طراحان کند. عباسی و همکاران؛ قلب راکتور اصفهان علاوه بر مخزن بزرگ آن مطالعه پارامتری جابجایی طبیعی را در ابعاد زمان مشکل می‌کند. برای غلبه بر این مانع، از تقریب محیط متخلخل و به کمک نرم افزار انسیس فلونت استفاده کرده‌اند. روش محیط متخلخل با داده‌های تجربی و کدهای هسته‌ای مورد تایید قرار گرفته است [۵]. خنک‌کننده با دمای متوسط از طریق دهانه ورودی وارد قلب شده و از پوشش بالای قلب که شامل ۱۲ سوراخ به قطر ۳ سانتی‌متر می‌باشد خارج می‌شود؛ و خنک‌کننده با دمای پایین‌تر جایگزین می‌شود؛ و به همین ترتیب انتقال حرارت به‌صورت جابجایی طبیعی انجام می‌گیرد [۶]. کوئل راکتور از تیوب‌های فولاد ضدزنگ ساخته شده است. سیال خنک‌کننده با آهنگ ۱ تا ۱/۵ تن بر ساعت از میان کوئل جریان می‌یابد. سامانه کوئل در راکتور، در حال حاضر موجود است اما از آن استفاده نمی‌شود. هدف استفاده از این کوئل، کاهش دمای آب استخر و افزایش زمان عملکرد است. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت، اثر کوئل خنک‌کننده ماریچ موجود در بالای محفظه راکتور مینیاتوری چشمه نوترون اصفهان برافزایش مدت‌زمان بهره‌برداری راکتور مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. روش کار و شرح بیان مسئله

ابتدا برای ایجاد هندسه مدل به‌طور کامل با ابعاد واقعی، از نرم‌افزار سالید ورکز<sup>۴</sup> که یک نرم‌افزار مناسب برای طراحی می‌باشد، استفاده کرده و سپس برای شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده شد. مسئله یک‌مرتبه با بدون در نظر گرفتن اثر کوئل و حالت دیگر با در نظر گرفتن اثر کوئل خنک‌کننده حل شده و نتایج به‌دست آمده از هر کدام مقایسه شده است. معادلات حاکم بر مسئله معادله پیوستگی (۱)، مومنتوم (۲)، انرژی (۳) و ناویراستوکس (۴) می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان با روش حجم محدود گسسته سازی شده و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به‌صورت عددی حل می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho x_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\tau_{ij}}{\partial_j} + \rho g_1 + F_1 \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \nabla \cdot k \nabla T - \nabla \cdot \left( \sum_j \gamma_j h_j \nabla m_j \right) - \mu \Phi - \frac{DP}{Dt} - S = 0 \quad (3)$$

<sup>1</sup> Silicon doping

<sup>2</sup> Highly Enriched Uranium

<sup>3</sup> Albarhoum

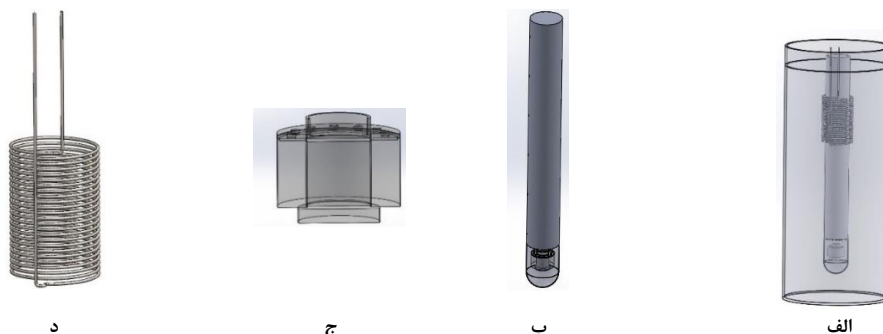
<sup>4</sup> SolidWorks

$$\rho \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (۴)$$

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۲۴۳	قطر (mm)	۶۱۰	قطر خارجی (mm)
۱۰۹/۵	ضخامت کل (mm)	۱۰	ضخامت (mm)
		۵۶۰۰	ارتفاع کل (mm)
		۲۷۰۰	قطر (mm)
۵۰	گام (mm)	۶۵۰۰	عمق (mm)
۷۸۰	قطر خارجی (mm)	۴۳۵	قطر خارجی (mm)
۵۰×۲۴	ارتفاع (mm)	۲۳۱	قطر داخلی (mm)
۲۵	قطر خارجی (mm)		
	لوله (mm)		
۲۰	قطر داخلی (mm)	۲۳۸/۵	ضخامت (mm)
۶	ارتفاع کانال ورودی سیال به قلب (mm)	۵۰	ضخامت (mm)
۷/۵	ارتفاع کانال خروجی سیال از قلب (mm)	۲۹۰	قطر (mm)

اندازه ابعاد هر یک از اجزای راکتور و نمای ترسیمی آن‌ها را در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای ترسیمی اجزای راکتور الف) مدل مونتاژ شده مسئله ب) محفظه راکتور ج) محفظه قلب، بازتابنده‌های برلیومی د) کوئل مارپیچ

برای مدل‌سازی قلب، اثر محیط متخلخل بر روی جریان متوسط، توسط ترم اضافه‌شده مقاومت جریان، در معادله مومنوم وارد می‌شود.

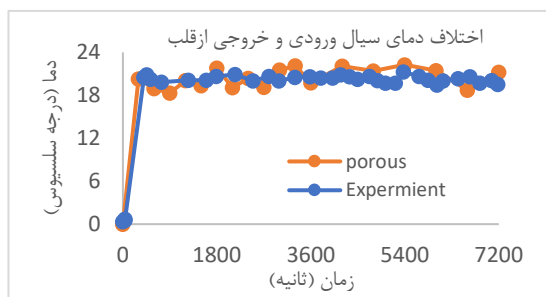
$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_j \right) \quad (۱)$$

در این رابطه  $S_i$  عبارت مربوط به چشمه است که در معادله‌ی آم مومنوم ظاهر می‌شود. عبارات  $D_{ij}$  و  $C_{ij}$  ماتریس‌های از پیش توصیف‌شده هستند که به ترتیب به فاکتور مقاومت ویسکوز و فاکتور مقاومت درونی معروف می‌باشند. ترم اول در سمت راست معادله (۱) (عبارت Darcy) مربوط به افت فشار ویسکوز و عبارت دوم بیانگر افت فشار ناشی از مومنوم جریان در محیط متخلخل می‌باشد. با مقایسه معادله (۱) که در آن عبارت  $S_i$  به عنوان افت فشار ناشی از محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود، با تابع فیت شده درجه دوم برای افت فشار، مقادیر پارامترهای  $D_{ij}$  و  $C_{ij}$  به ترتیب

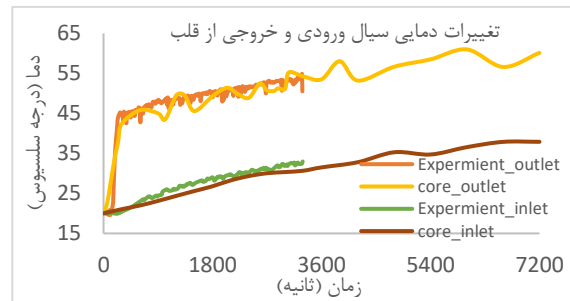
1850 [ $\frac{1}{m}$ ] و 415 [ $\frac{1}{m^2}$ ] به دست می‌آیند [۴]. خنک‌کننده در نظر گرفته شده آب سبک بوده چگالی آن با تقریب مدل بوزینسک<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده است. دمای آن ۲۹۸ درجه کلوین برای استخر و ۲۹۳ درجه کلوین برای محفظه راکتور می‌باشد. برای سطح آزاد استخر و خروجی از کویل شرط مرزی Pressure\_Outlet انتخاب شده است. در ورودی کویل شرط مرزی Mass\_flow\_inlet مقدار دبی جرمی ورودی ۰/۴۲ کیلوگرم بر ثانیه انتخاب شده است. دماهای مختلف ورودی به کویل ۱۰، ۱۵ و ۵ درجه سانتی‌گراد بوده و یک حالت دیگر نیز دمای ورودی به کویل ۵ درجه سانتی‌گراد و دبی جرمی ۰/۶۳ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده و نتایج مقایسه شده‌اند. قلب راکتور نیز به‌عنوان یک محیط متخلخل و یک منبع حرارتی<sup>۶</sup> با توان یکنواخت ۳۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. مرزهای جسم (دیواره) ترکیب جابجایی و هدایت<sup>۷</sup> در نظر گرفته شد. در مسیر انجام شبیه‌سازی از الگوریتم SIMPLE مبتنی بر Pressure based برای کویل شدگی بین سرعت و فشار؛ و برای حل پارامترهای گسسته سازی شده از مرتبه دوم استفاده شد؛ و از مدل  $k - \epsilon$  گروه RNG برای مدل آشفستگی استفاده گردید. با توجه به طولانی بودن زمان حل و بالا بودن هزینه محاسباتی، مسئله با گام زمانی ۲۰ ثانیه حل شده است.

### ۳. نتایج

در این پژوهش از شبکه‌بندی مثلثی بی ساختار استفاده شد. با در نظر گرفتن ۴ شبکه با اندازه‌های مختلف، مطالعه استقلال حل از شبکه صورت گرفت و در نهایت تعداد المان‌های تشکیل شده در شبکه‌بندی ۱۲۲۳۳۷۲۹ در نظر گرفته شد. همان‌طور که اشاره شد قلب راکتور به‌عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. مقایسه تغییرات دمایی سیال ورودی و خروجی از قلب در حالتی که از کویل استفاده نشده (دبی ورودی به کویل صفر است) و داده‌های تجربی در شکل ۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهد؛ اختلاف دمایی حل عددی به‌دست‌آمده از روش محیط متخلخل و داده‌های تجربی کمتر از ۱ درجه سانتی‌گراد است.



ب



الف

شکل ۲. الف) تغییرات دمایی سیال ورودی و خروجی از قلب ب) اختلاف دمایی سیال ورودی و خروجی از قلب

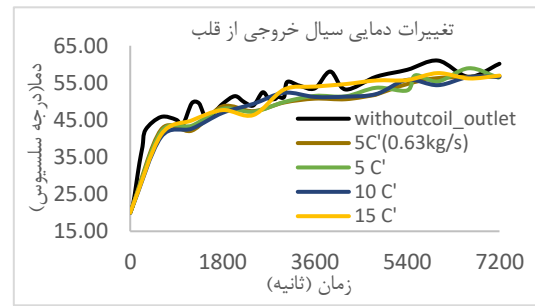
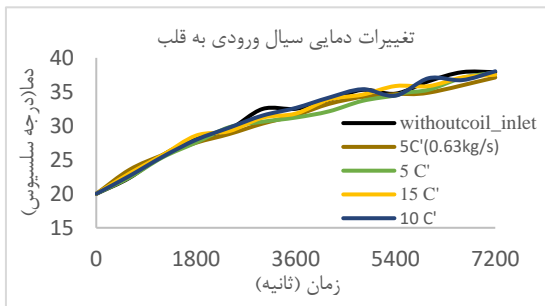
مقایسه تغییرات دمایی سیال ورودی و خروجی از قلب در حالت بدون در نظر گرفتن اثر کویل و در نظر گرفتن اثر کویل در شکل ۳ آمده است. نتایج برای سیال ورودی به کویل با دماهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد و دبی جرمی ۰/۴۲ کیلوگرم بر ثانیه و یک مرتبه نیز برای حالتی که سیال با دمای ۵ درجه و دبی جرمی ۰/۶۳ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد، به‌دست‌آمده و مقایسه شده است. نتایجی که از حل حالت‌های مختلف به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، دمای سیال ورودی و خروجی از قلب در حالت استفاده از کویل در مقایسه با حالت بدون استفاده از کویل تقریباً ۲ درجه سانتی‌گراد کمتر است؛ در نتیجه زمان عملکرد راکتور حدود نیم ساعت افزایش می‌یابد (در حالتی که از کویل استفاده نشده است، با توجه به محدودیت دمایی ۵۷ درجه سیال خنک‌کننده، راکتور در زمان تقریبی ۵۴۰۰ ثانیه خاموش می‌شود).

بردار سرعت و توزیع دمایی سیال کویل خنک‌کننده، استخر و محفظه راکتور در هر یک از دماهای مختلف سیال ورودی به کویل در مدت زمان ۷۲۰۰ ثانیه در شکل‌های (۴-۷) نشان داده شده است.

<sup>5</sup> Boussinesq Model

<sup>6</sup> Source Term

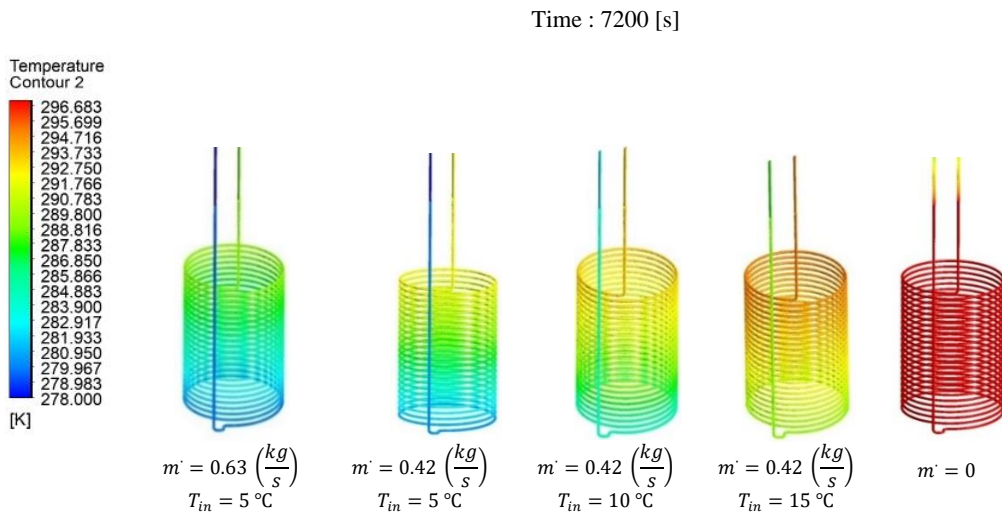
<sup>7</sup> Via System Coupling B.C



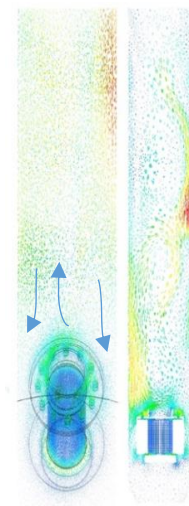
ب

الف

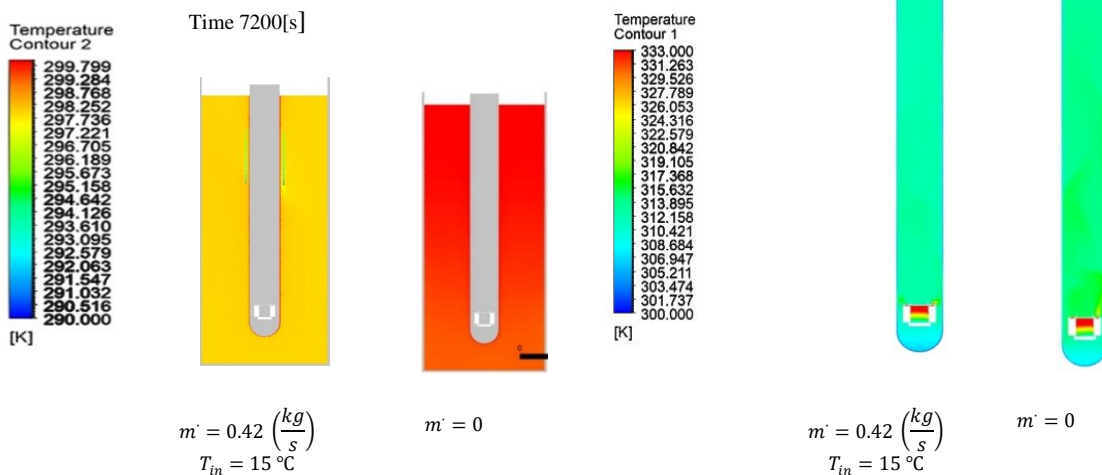
شکل ۳. الف) تغییرات دمایی سیال خروجی از قلب. ب) تغییرات دمایی سیال ورودی به قلب با دمای مختلف سیال ورودی به کویل

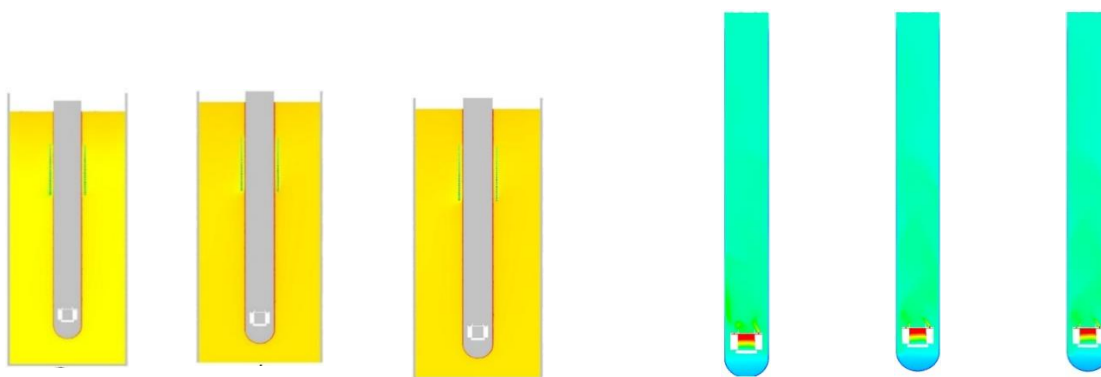


شکل ۵. توزیع دمایی سیال درون کویل خنک‌کننده با دمای مختلف سیال ورودی به کویل در مدت زمان ۷۲۰۰ ثانیه



شکل ۴. وکتور سرعت در مدت زمان ۷۲۰۰ ثانیه





$$m' = 0.63 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

$$T_{in} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m' = 0.42 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

$$T_{in} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m' = 0.42 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

$$T_{in} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

شکل ۷. توزیع دمایی استخر با دمای مختلف سیال ورودی به کویل در مدت زمان ۷۲۰۰ ثانیه

$$m' = 0.63 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

$$T_{in} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m' = 0.42 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

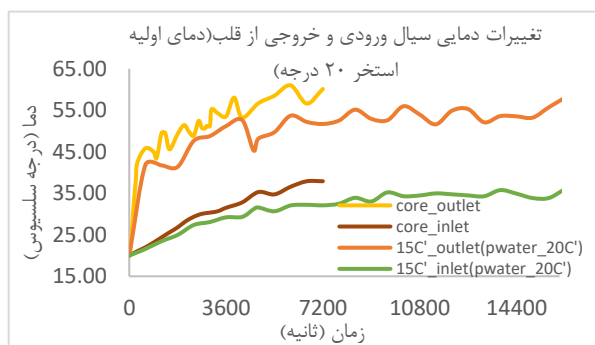
$$T_{in} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m' = 0.42 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

$$T_{in} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

شکل ۶. توزیع دمایی سیال درون محفظه راکتور با دمای مختلف سیال ورودی به کویل در مدت زمان ۷۲۰۰ ثانیه

یک وضعیت دیگری مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب که ابتدا در حالی که راکتور خاموش است، توسط کویل آب استخر را چند درجه‌ای خنک کنیم و بعد مادامی که کویل در حال کار است راکتور را راه‌اندازی کنیم. در این حالت دمای ابتدایی استخر ۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای سیال ورودی به کویل ۱۵ درجه و دبی جرمی ۰/۴۲ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مقایسه تغییرات دمایی سیال ورودی و خروجی از قلب در حالت بدون کویل و حالت در نظر گرفتن کویل در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد؛ با توجه به محدودیت دمایی ۵۷ درجه‌ای سیال خنک‌کننده زمان عملکرد راکتور در این وضعیت حدود چهار ساعت و نیم می‌رسد.



شکل ۸. تغییرات دمایی سیال ورودی و خروجی از قلب. (دمای اولیه استخر ۲۰ درجه و دمای سیال ورودی به کویل ۱۵ درجه)

جدول ۲. دمای متوسط محیط متخلخل، سیال درون محفظه و استخر راکتور در مدت زمان ۷۲۰۰ ثانیه

	حالت بدون در نظر گرفتن اثر کویل	ورودی ۱۵ درجه	ورودی ۱۰ درجه	ورودی ۵ درجه	ورودی ۵ درجه و دبی جرمی ۰/۶۳	سیال ورودی ۱۵ درجه و دمای اولیه استخر ۲۰ درجه
$T_{pool}$	۳۰۰/۸	۲۹۷/۱	۲۹۶/۵	۲۹۵/۷	۲۹۵/۲	۲۹۲/۸
$T_{Vessel}$	۳۱۶/۶	۳۱۴/۸	۳۱۴/۶	۳۱۴/۵	۳۱۴/۰	۳۱۱
$T_{core}$	۳۲۹/۳	۳۲۷/۸	۳۲۷/۱	۳۲۷/۰	۲۹۶/۵	۳۲۳



#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت، اثر کویل خنک‌کننده مارپیچ موجود در بالای راکتور MNSR تحلیل شده است که در نتیجه آن با استفاده از این کویل، دمای کاری کاهش یافته که با استفاده از راکتیویته اضافی به دست آمده از فید بک خنک‌کننده آن، امکان انجام عملیات طولانی‌تر این راکتور فراهم می‌آید. قلب راکتور به عنوان محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. مقایسه‌ی بین داده‌های تجربی و حل عددی به دست آمده از روش محیط متخلخل، این روش را تایید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد؛ اختلاف دمای سیال خنک‌کننده قلب در حالت استفاده از کویل در مقایسه با حالت در نظر نگرفتن کویل در حد ۲ درجه می‌رسد و زمان عملکرد راکتور حدود نیم ساعت افزایش یافته است. یک وضعیت دیگر مورد بررسی قرار گرفت؛ که ابتدا توسط کویل آب استخر را چند درجه‌ای خنک کرده، سپس راکتور راه‌اندازی شود. در این صورت زمان عملکرد راکتور حدود چهار ساعت و نیم می‌رسد.

#### مراجع

1. Ahmed, Y. A., Ewa, I. O., Umar, M., Bezboruah, T., Johri, M., & Akaho, E. H. (2006). The low power miniature neutron source reactors: design, safety and applications.
2. Khamis, I., & Alhalabi, W. (2007). Assessment of cooling effects on extending the maximum operating time for the Syrian miniature neutron source reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 49(3), 253-261.
3. Khamis, I., & Alhalabi, W. (2007). Assessment of cooling effects on extending the maximum operating time for the Syrian miniature neutron source reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 49(3), 253-261.
4. Albarhoum, M., & Mohammed, S. (2009). A thermal-hydraulic code (THYD) for the miniature neutron source reactor thermal-hydraulic transients. *Progress in Nuclear Energy*, 51(3), 470-473.
5. Abbasi, Y., Asgarian, S., Ghahremani, E., & Abbasi, M. (2016). Investigation of natural convection in Miniature Neutron Source Reactor of Isfahan by applying the porous media approach. *Nuclear Engineering and Design*, 309, 213-223.
6. Ahmadi, M., Rabiee, A., & Pirouzmand, A. (2019). Development of a 3D thermohydraulic-neutronic coupling model for accident analysis in research miniature neutron source reactor (MNSR). *Nuclear Engineering and Technology*, 51(7), 1776-1783.