



بررسی اثر مارپیچ خنک‌کننده رآکتور مینیاتوری بر افزایش زمان بهره‌برداری از رآکتور

میثم زرگر^۱، محمدحسین استکی^۱، منصور طالبی^{۲*}، جواد مختاری^۲

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۳۴۴۱-۸۱۷۴۶۷، اصفهان - ایران
۲. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

*Email: mansour_talebi@yahoo.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۶/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

چکیده

رآکتور مینیاتوری چشمه نوترونی یک رآکتور تحقیقاتی از نوع مخزن-استخری است که در آن از اورانیوم با غنای بالا به‌عنوان سوخت، آب سبک به‌عنوان خنک‌کننده و برلیوم به‌عنوان بازتابنده استفاده شده است. هنگام بهره‌برداری از رآکتور دمای سیال خنک‌کننده افزایش می‌یابد و باعث ایجاد فیدبک منفی در رآکتور می‌شود. بر اثر تزریق راکتیویته منفی در عین حال که یکی از مزایای این رآکتور و خصلت ایمنی ذاتی آن است، راکتیویته اضافی در دسترس کاهش یافته و زمان عملکرد رآکتور کاهش می‌یابد؛ بنابراین یکی از محدودیت‌های اصلی رآکتور MNSR زمان عملکرد کوتاه آن (حدود ۲٫۵ ساعت) در قدرت اسمی است. در این پژوهش، یک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی پدیده جابه‌جایی آزاد در قلب، مخزن و استخر رآکتور انجام شده؛ و اثر کوئل خنک‌کننده در بالای مخزن رآکتور بر افزایش زمان عملکرد رآکتور مورد بررسی قرار گرفته است. قلب رآکتور به‌عنوان یک محیط متخلخل و یک منبع حرارتی با توان ثابت ۳۰ کیلووات در نظر گرفته شده است تا با کاهش جزییات، حجم محاسبات کاهش یابد. مقادیر تجربی و مقادیری که از حل عددی به دست آمده، تطابق قابل قبول دارند و این روش را تأیید می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد؛ در حالت بدون کوئل، افزایش دمای سیال خنک‌کننده به طور پیوسته یک شیب صعودی دارد؛ اما در حالت استفاده از کوئل، افزایش دمای سیال خنک‌کننده تا مدت زمان حدود ۲ ساعت، شیب صعودی دارد اما بعد گذشت این زمان، شیب صعودی بسیار کم می‌شود و دما در یک محدوده نوسان می‌کند؛ در مقایسه با حالت بدون کوئل، متوسط دما ۳ درجه کاهش یافته و زمان عملکرد رآکتور حدود ۱٫۵ ساعت افزایش پیدا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: کوئل خنک‌کننده، محیط متخلخل، تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، رآکتور مینیاتوری چشمه نوترونی

Investigating the effect of the miniature reactor cooling spiral on increasing the reactor operating time

M. Zargar¹, M.H. Esteki¹, M. Talebi^{2*}, J. Mokhtari²

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Physics, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 817467-3441, Isfahan-Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Isfahan - Iran

Research Article

Received 10.9.2021, Accepted 9.1.2022

Abstract

The Miniature Neutron Source Reactor is a tank-in-pool research reactor that uses highly-enriched uranium as fuel, light water as coolant, and beryllium as reflector. During the operation of the reactor, the coolant temperature increases and leads to negative feedback in the reactor. Although the negative reactivity is amongst the advantages of this reactor and an inherent safety feature; it causes a decrease in both the additional available reactivity and the reactor operation time. Therefore, short operation time (about 2.5 hours) at nominal power is one of the main limitations of the MNSR reactor. The natural convection in the core, vessel and pool of the reactor was modeled through a CFD analysis and the effect of the cooling coil at the top of the reactor tank on increasing the reactor operation time was investigated. To reduce the computations the details were decreased by considering the reactor core as a porous medium and a heat source with a constant power of 30kw. The experimental values and those obtained from the numerical solution are in good agreement. Results show a steady upward slope in the temperature rise of the coolant in the absence of coil, and an about-2-hours rise of the temperature in its presence. After this 2-hours period, the increasing rate decreases and the temperature fluctuates in a certain range. Compared to the case without the cooling coil, the average temperature is reduced by 3 degrees and the reactor operation time is increased by 1.5 hours.

Keywords: Cooling coil, Porous medium, CFD, Miniature neutron source reactor



۱. مقدمه

رآکتورهای تحقیقاتی محدوده‌ی وسیعی از رآکتورهای هسته‌ای را شامل می‌شوند؛ که عموماً جهت تولید قدرت به کار نمی‌روند. هدف اصلی رآکتورهای تحقیقاتی، فراهم کردن چشمه نوترون می‌باشد. تولید رادیوایزوتوپ‌ها، تزریق سیلیکونی، پرتودهی مواد و سن‌سنجی کاربردهای اصلی بسیاری از رآکتورهای تحقیقاتی است [۱]. یک نوع مرسوم این رآکتورها، رآکتور مخزن استخری است. رآکتور مینیاتوری چشمه نوترونی یک رآکتور تحقیقاتی پیشرفته و کوچک از نوع استخری است که بر اساس طراحی رآکتور کانادایی SLOWPOKE ساخته شده است، در این رآکتور از اورانیوم با غنای بالا به‌عنوان سوخت، آب سبک به‌عنوان خنک‌کننده و کندکننده، برلیوم به‌عنوان بازتابنده استفاده شده است؛ و گرمای حاصل از شکافت توسط انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی برداشت می‌گردد [۲]. در رآکتور MNSR دو عامل اصلی که باعث مصرف راکتیویته اضافی می‌شود عبارت‌اند از: انباشت سم xenon و فیدبک منفی ناشی از افزایش دمای خنک‌کننده [۲]. با افزایش دمای متوسط خنک‌کننده از 15°C به 50°C مقدار این فیدبک دمایی بین $0.07\text{ mk}/^{\circ}\text{C}$ و $0.146\text{ mk}/^{\circ}\text{C}$ متغیر می‌باشد [۴]. میزان کاهش راکتیویته اضافی بر اثر زینان نسبت به فیدبک دمایی ناچیز است به طوری که بعد از ۵ ساعت حدود 0.4 mk - و بعد از ۱۰ ساعت حدود 1.3 mk - می‌باشد [۵]؛ بنابراین با توجه به این دو عامل راکتیویته اضافی در دسترس کاهش یافته و زمان عملکرد رآکتور به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

البارحم و همکاران [۶] مسأله ترموهیدرولیکی ناپایدار رآکتور را با استفاده از ده معادله دیفرانسیل از روش رانگ کوتاه حل کرده‌اند. اثر سیستم خنک‌کننده بخش فوقانی استخر بر مدت‌زمان عملکرد رآکتور مورد بحث قرار داده و نتایج محاسباتی با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه نمودند. خمیس [۷] طرح‌های مختلف سرمایش به‌منظور ارزیابی زمان عملکرد رآکتور MNSR سوریه را مورد بررسی قرار داد. یک مدل هیدرولیکی دقیق برای تحلیل رآکتور توسعه نمود. این مدل نشان داد که یک سیستم خنک‌کننده کمکی نصب‌شده در بخش پایینی مخزن رآکتور، به‌طور قابل توجهی مصرف راکتیویته اضافی ناشی از ضریب راکتیویته منفی دما را جبران خواهد کرد. از این‌رو، حداکثر زمان عملیات رآکتور افزایش می‌یابد. منصیر و همکاران [۸] اثرات راکتیویته اضافی قلب و دمای خنک‌کننده در مدت‌زمان کارکرد رآکتور و تغییرات راکتیویته اضافی قلب با ضریب دما را طی یک دوره پنج‌ساله مورد بررسی قرار دادند؛

نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که وابستگی زیادی بین زمان عملکرد رآکتور با مقدار راکتیویته اضافی قلب و ضریب دمایی وجود دارد. نظری و همکاران [۹] انتقال حرارت گذرای سیال درون یک مخزن استوانه‌ای شکل که توسط جریان در لوله گذرانده شده از آن خنک می‌شود، به شیوه آزمایشگاهی مورد توجه قرار دادند. لوله گذرانده شده از مخزن به دو صورت کوئل ماریپج و لوله مستقیم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده کاهش ۴۲ درصدی دمای مخزن با استفاده از لوله ماریپج در مقایسه با لوله مستقیم است. میرقربانی و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای عددی روی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی یک کوئل ماریپج با پوسته استوانه‌ای در اعداد رینولدز و رایلی مختلف، هم‌چنین نسبت قطر لوله به قطر کوئل و گام بی‌بعد مختلف انجام دادند. شاخصه‌های طولی مختلف را برای محاسبه عدد ناسلت استفاده کردند و درنهایت نشان دادند که طول نرمال شده پوسته کناری مبدل، رابطه دلخواه را تشریح می‌کند. تجزیه و تحلیل جریان سیال در محیط‌های متخلخل در بسیاری از کاربردهای مهندسی علی‌رغم رشد قابل توجه منابع محاسباتی مورد نیاز است. در استفاده از روش محیط متخلخل در کد CFD، هندسه با جزئیات دقیق مورد نیاز نیست، در حالی که اثر هندسی از طریق تخلخل سطح و حجم در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. سیپون و عثمان [۱۲] یک تحلیل دینامیک سیالاتی برای پیش‌بینی رفتار انتقال حرارت در رآکتور تحقیقاتی دانشگاه علم و فن‌آوری میسوری با هدف به دست آوردن پارامترهای محیط متخلخل برای قلب رآکتور مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها از شبیه‌سازی به دست آوردند با مقادیر تجربی به طور قابل توجهی مطابقت دارد و روش محیط متخلخل مورد تأیید قرار می‌گیرد. عباسی و همکاران [۱۳] یک تحلیل دینامیک سیالاتی بر پارامترهای انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در رآکتور MNSR اصفهان به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام دادند. قلب رآکتور به عنوان یک محیط متخلخل شبیه‌سازی شده؛ و روش محیط متخلخل را با داده‌های تجربی و کدهای هسته‌ای مورد تأیید قرار دادند.

در تحقیقات انجام شده اخیر، با مدل کردن و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده به کمک نرم‌افزارهای مختلف توانسته‌اند اثرات مختلف پارامترها را بر رفتار ترموهیدرولیکی و افزایش زمان پیوسته بهره‌برداری رآکتور MNSR مورد بررسی قرار دهند؛ اما در تحقیقات انجام‌شده به‌ندرت به بررسی اثر کوئل ماریپج خنک‌کننده پرداخته شده است. در این پژوهش، با استفاده از روش تحلیل دینامیک سیالاتی، اثر کوئل خنک‌کننده



جدول ۱. مشخصات فنی و ابعاد هندسی رآکتور اصفهان

مقدار	پارامتر
	رآکتور
مخزن استخری	نوع رآکتور
۳۰ Kw	توان اسمی
جابه‌جایی طبیعی	سیستم خنک‌کننده
	قلب رآکتور
۳٫۸۵	راکتیویته اضافی
۲۳۰	قطر (mm)
۲۳۰	ارتفاع (mm)
۶	ارتفاع کانال ورودی سیال به قلب (mm)
۷٫۵	ارتفاع کانال خروجی سیال از قلب (mm)
	المان سوخت
UAl ₄ (۹۰٫۲٪)	سوخت
۲۳۰	ارتفاع (mm)
۴٫۳	قطر (mm)
۳٫۴۵	چگالی (g/cm ^۳)
	مخزن رآکتور
۶۱۰	قطر خارجی (mm)
۱۰	ضخامت (mm)
۵۶۰۰	ارتفاع کل (mm)
	استخر
۲۷۰۰	قطر (mm)
۶۵۰۰	عمق (mm)
	Sid Be annulus
۴۳۵	قطر خارجی (mm)
۲۳۱	قطر داخلی (mm)
۲۳۸٫۵	ضخامت (mm)
	Bottom Be plate
۵۰	ضخامت (mm)
۲۹۰	قطر (mm)
	Top Be shims
۲۴۳	قطر (mm)
۱۰۹٫۵	ضخامت کل (mm)
	کوئل خنک‌کننده
۵۰	گام (mm)
۷۸۰	قطر خارجی (mm)
۵۰×۲۴	ارتفاع (mm)
۲۵	قطر خارجی لوله (mm)
۲۰	قطر داخلی لوله (mm)

مارپیچ موجود در بالای رآکتور MNSR اصفهان بر افزایش مدت‌زمان بهره‌برداری رآکتور مورد بررسی قرار گرفته است. هدف استفاده از این کوئل، کاهش دمای آب استخر و در نتیجه جبران راکتیویته اضافی و افزایش زمان عملکرد رآکتور می‌باشد. در این پژوهش هیچ تغییراتی در مورد طرح اولیه قلب رآکتور و پارامتر و فیدبک‌های نوترونیکی انجام نشده است. فیدبک‌های دمایی رآکتور با توجه به این‌که مستقیماً روی قلب اثر می‌گذارند تحت تأثیر استفاده از کوئل که نزدیک به شش متر بالاتر و بیرون از تانک رآکتور است، قرار نمی‌گیرند. استفاده از کوئل یک اثر با تأخیر زمانی بسیار بیشتر از فیدبک‌های دمایی است.

۲. بیان مسأله

رآکتور مینیاتوری اصفهان رآکتوری است متراکم، دارای ایمنی ذاتی و با قدرت اسمی ۳۰kw و از نوع مخزن استخری که در آن از اورانیم با غنای بالا برای سوخت، آب سبک به‌عنوان خنک‌کننده، از برلیوم به عنوان بازتابنده و انتقال حرارت به طریق جابه‌جایی طبیعی می‌باشد. برای مدل‌سازی هندسه، هر یک از اجزا با اندازه‌ی واقعی طراحی شد. مشخصات فنی و ابعاد هندسی مدل به‌کار برده شده در شبیه‌سازی در جدول ۱ ارایه شده است. شکل ۱ مدل طراحی‌شده جهت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. برای شبکه‌بندی مدل، از شبکه‌بندی مثلثی بی‌ساختار استفاده گردید؛ و برای حل عددی از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده شده است. شکل ۲ نمونه از شبکه‌بندی هندسه مورد بررسی و بزرگ‌نمایی قسمت کوئل ارایه شده است. کوئل رآکتور از تیوب‌های فولاد ضدزنگ ساخته شده است. در طرح اولیه رآکتور MNSR اصفهان، کوئل در بخش فوقانی استخر رآکتور قرار گرفته است و سیال خنک‌کننده با آهنک ۱ تا ۱٫۵ تن بر ساعت از میان کوئل در جریان می‌باشد. سیال خنک‌کننده با یک دبی و دمای مشخص وارد کوئل مارپیچ شده و با برداشت حرارت از استخر منجر به کاهش دمای استخر و در نتیجه کاهش متوسط دمای سیال خنک‌کننده قلب می‌شود. قلب رآکتور شامل ۳۴۳ میله سوخت می‌باشد علاوه بر آن به دلیل حجم زیاد سیال و جزییات قلب، در این نوع رآکتور مطالعه پارامتری جابه‌جایی طبیعی در زمان را برای ما مشکل می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، قلب رآکتور به‌عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفته شده است.



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) \\ = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\overline{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

S_m ، \vec{F} و S_h به ترتیب چشمه‌های جرمی، مومنتوم و آنتالپی می‌باشد. در معادله (۲) که یک معادله برداری است $\overline{\tau}$ تانسور برشی می‌باشد. در معادله (۳)، k_{eff} ضریب هدایت مؤثر و عبارت E انرژی درونی است. این معادلات با روش حجم محدود، گسسته‌سازی شده و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در دامنه حل مخزن، استخر و کویل حل می‌شوند. از حل معادلات، توزیع سرعت و دما در کل دامنه حل به دست می‌آید و می‌توان بیشینه دما و سرعت و دبی جریان و دیگر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه نمود.

در بسیاری از جریان‌های جابه‌جایی طبیعی به‌جای تعریف چگالی برحسب دما می‌توان با استفاده از مدل بوزینسک^۱ به همگرایی سریع‌تری رسید. این تقریب تا هنگامی که تغییرات در چگالی کوچک است، دقیق است. در این مدل چگالی در تمامی معادلات به جز عبارت شناوری در معادله مومنتوم ثابت فرض می‌شود.

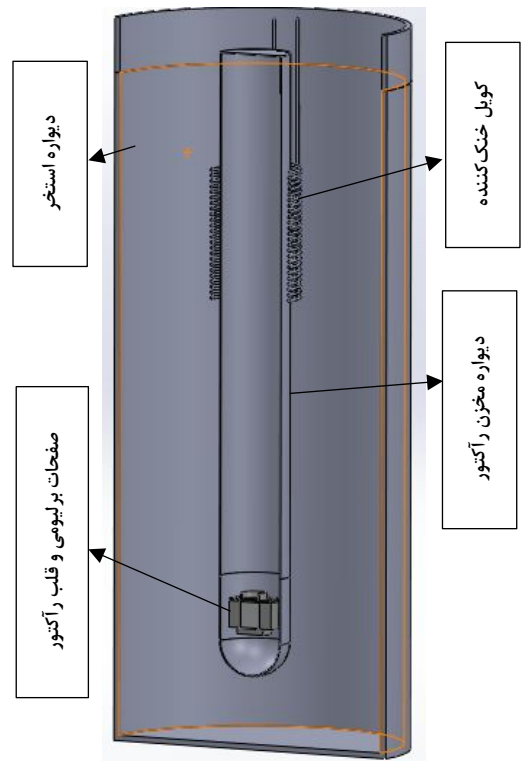
$$(\rho - \rho_0)g \cong -\rho_0 \beta (T - T_0)g \quad (4)$$

معادله بالا از تقریب بوزینسک به‌دست‌آمده تا ρ را از عبارت شناوری حذف نماید.

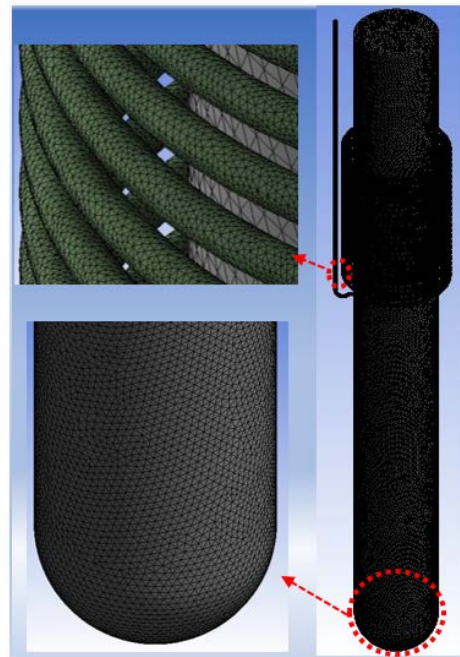
$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) \quad (5)$$

در رابطه (۴) ρ_0 چگالی جریان، T_0 دمای کارکرد ($20^\circ C$) و β ضریب انبساط حرارتی می‌باشد و مقدار آن برای آب $20^\circ C \left[\frac{1}{K} \right] 0.00207$ است.

در علوم مهندسی محیط متخلخل، محیطی است که درون جسم جامد حفره‌های خلأ وجود دارد و یا به محیطی که به علت وجود تعداد بسیار زیاد و سری‌وار جسم، می‌توان آن را به‌عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفت [۱۴]. در این پژوهش برای به دست آوردن پارامترهای محیط متخلخل، از نتایجی که پیش از این توسط عباسی و همکاران [۱۳] در مورد



شکل ۱. هندسه مورد بررسی و اجزای آن.



شکل ۲. نمونه از شبکه‌بندی هندسه مورد بررسی و بزرگ‌نمایی قسمت کویل.

۳. معادلات حاکم بر مسأله و روش کار

معادلات حاکم بر مسأله معادله پیوستگی جرم سیال خنک‌کننده، مومنتوم و انرژی می‌باشد [۱۱].

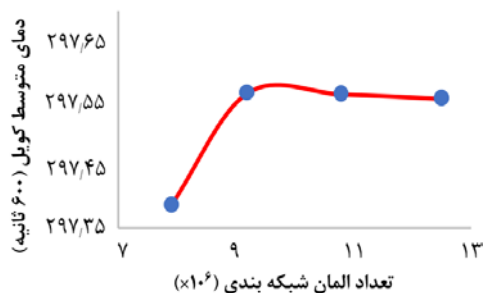


دارد. با توجه به این که تعداد المان‌های شبکه‌بندی مدل زیاد بوده و زمان و هزینه محاسبات بسیار بالا است، گام زمانی که برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده ۲۰ ثانیه می‌باشد. قلب رآکتور به‌عنوان یک منبع حرارتی با توان ثابت ۳۰ kW در نظر گرفته شده است. دمای اولیه همه اجزای رآکتور و سیال درون استخر و مخزن رآکتور ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برای ورودی و خروجی کویل خنک‌کننده به ترتیب شرط مرزی دبی جرمی ورودی و فشار خروجی انتخاب گردید. برای دیواره‌ها نیز شرط مرزی ترکیب جابه‌جایی و هدایت استفاده شده است.

۳. نتایج

برای مطالعه استقلال از شبکه، در چند مرحله شبکه‌بندی دامنه‌ی حل، ریزتر شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به شکل ۳ با افزایش تعداد المان شبکه از مرحله سوم به بعد، تغییر محسوسی در نتایج دیده نمی‌شود.

به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج به‌دست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی مقایسه شده است. شکل ۴ تغییرات زمانی دمای سیال ورودی و خروجی از قلب را نشان می‌دهد که نتایج حاصل از حل عددی و نتایج تجربی نشان داده شده و باهم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات به‌دست‌آمده از روش عددی با تقریب خوبی از مقادیر تجربی مطابقت می‌کند. با توجه این که توان قلب در طول عملیات ثابت می‌ماند اما نرخ جریان جرمی قلب می‌تواند افزایش یابد؛ این افزایش در نرخ جریان جرمی که از درون قلب می‌گذرد، منجر به کاهش جزئی افزایش دما و رفتار نوسانی دما می‌شود. همچنین ارتفاع کانال ورودی به قلب و قطر دهانه‌های خروجی از قلب نیز بر رفتار نوسانی دما تأثیرگذار هستند. لازم به ذکر است در حالت استفاده از کویل جهت اعتبارسنجی هیچ مقدار تجربی ثبت نشده است. مسأله برای دو حالت بدون کویل و حالت در نظر گرفتن کویل حل شده است. برای بررسی اثر کویل خنک‌کننده، مسأله برای دو حالت با دمای سیال ورودی به کویل ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد و مقدار دبی ورودی به کویل ۰/۴۲ کیلوگرم بر ثانیه حل شده و باحالت بدون کویل مقایسه شده است.



شکل ۳. استقلال از شبکه.

قلب رآکتور MNSR اصفهان صورت گرفته، استفاده شده است. تقریب محیط متخلخل در فلوننت با استفاده از رابطه‌ی (۶) بیان می‌شود.

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^r D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^r C_{ij} \frac{1}{\rho} \rho v_{mag} v_j\right) \quad (6)$$

در این رابطه S_i مربوط به چشمه است که در معادله‌ی نام مومنوم ظاهر می‌شود. D_{ij} و C_{ij} به ترتیب به فاکتور مقاومت ویسکوز و فاکتور مقاومت درونی معروف می‌باشند؛ که به‌صورت تجربی یا حل عددی محاسبه می‌شوند.

معادله انرژی در این مدل به‌صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \rho_f E_f + (1-\gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\tau} \cdot \bar{v}) \right] + S_f^h \quad (7)$$

اندیس‌های f و s در این معادله بیانگر محیط سیال و جامد است. ترم γ بیانگر تخلخل بوده و طبق رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\gamma = \frac{V_f}{V_f + V_s} \quad (8)$$

ضریب هدایت حرارتی در محیط متخلخل به‌صورت معادله (۹) محاسبه می‌شود.

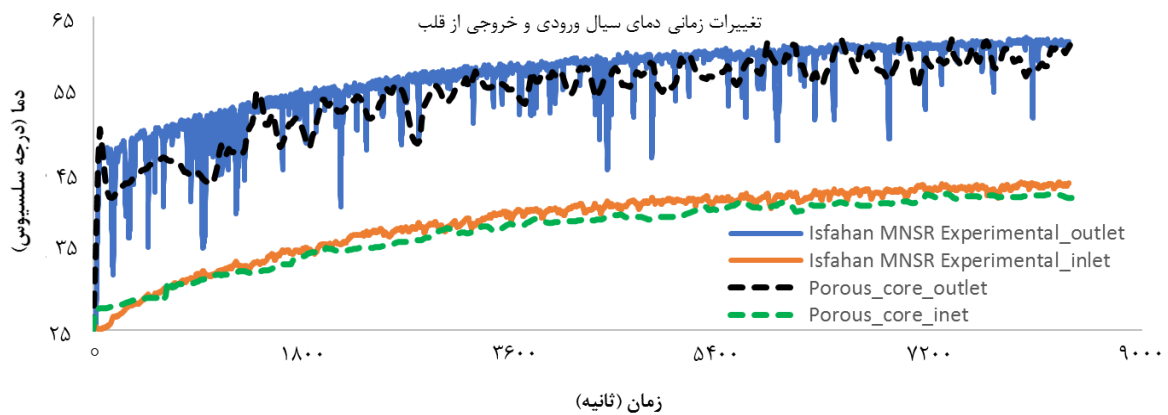
$$k_{eff} = \gamma k_f + (1-\gamma) k_s \quad (9)$$

ترم اول در سمت راست معادله (۶) افت فشار ویسکوز و عبارت دوم بیانگر افت فشار ناشی از مومنوم جریان در محیط متخلخل می‌باشد. در نتیجه S_i به‌عنوان افت فشار ناشی از محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تابع فیت شده درجه دوم برای افت فشار ناشی از جزییات ساختاری (S_i) به ازای مقادیر سرعت ورودی، مقادیر پارامترهای D_{ij} و C_{ij} به ترتیب به $185 \cdot \left[\frac{1}{m}\right]$ و $415 \left[\frac{1}{m^2}\right]$ به دست می‌آیند [۱۱]. این مقادیر به عنوان ورودی به نرم‌افزار انسیس فلوننت داده می‌شود.

در مسیر شبیه‌سازی از الگوریتم سیمپل مبتنی بر Pressure based برای کویل سرعت-فشار و برای گسسته‌سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم استفاده شد. از آنجایی که در مخزن و رآکتور جریان آرام و در کویل مغشوش است، از مدل k-ε گروه RNG برای رفتار جریان استفاده شده است.

در مدل RNG یک رابطه دیفرانسیلی تحلیلی برای محاسبه ویسکوزیته مؤثر وجود دارد که باعث می‌شود این مدل برای رینولدزهای پایین نیز به‌خوبی عمل کند هم‌چنین استفاده مؤثر از این ویژگی بستگی به رفتار مناسب در ناحیه نزدیک دیواره





شکل ۴. تغییرات زمانی دمای سیال ورودی و خروجی از قلب در حالت بدون کویل.

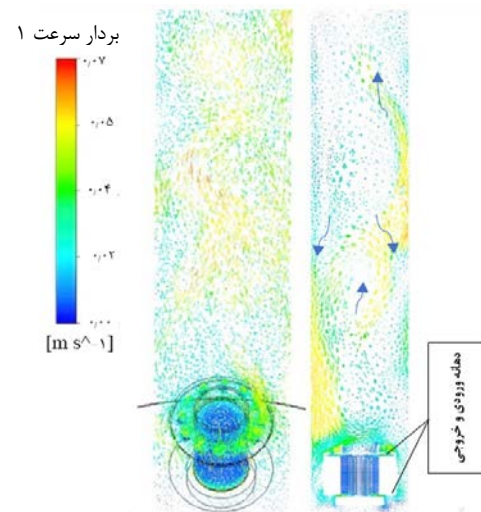
شکل ۷ توزیع دمایی سیال درون مخزن رآکتور در حالت بدون کویل و حالت دماهای مختلف سیال ورودی به کویل، در صفحه xy گذرنده از وسط مخزن در مدت زمان ۳۶۰۰ و ۹۰۰۰ ثانیه را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که یک توده گرم از قلب سرعت می‌گیرد و به آب نسبتاً سردتر مخزن نفوذ می‌کند. این توده گرم در مخزن پخش می‌شود و دمای کلی را افزایش می‌دهد. منطقه‌ای که در زیر قلب قرار دارد به‌ندرت تحت تأثیر پدیده جابه‌جایی در سایر مناطق قرار می‌گیرد و دمای متوسط منطقه‌ای که درست بالای قلب قرار گرفته است، نسبت به دیگر مناطق مخزن، بالاتر است. در حالت بدون کویل دمای متوسط مخزن بعد از ۹۰۰۰ ثانیه تقریباً به ۳۱۳ درجه کلون می‌رسد؛ در حالت استفاده از کویل در مقایسه با حالت بدون کویل دمای متوسط مخزن تا ۲ درجه کم‌تر می‌باشد. نرخ انتقال حرارت در کویل از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$Q' = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (7)$$

در این رابطه \dot{m} دبی جرمی عبوری از لوله، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای سیال خروجی و ورودی به کویل خنک‌کننده است. در شکل ۸ توزیع دمایی سیال درون کویل خنک‌کننده در دماهای مختلف در مدت زمان ۹۰۰۰ ثانیه آمده است. نرخ انتقال حرارت در حالت سیال ورودی به کویل با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد ($T_{in} = 5^\circ C$) نسبت ورودی به کویل با دمای ۱۰ درجه با توجه به رابطه ۷ بیش‌تر است بنابراین نقش بیش‌تری را در سرد کردن سیال خنک‌کننده ایفا می‌کند.

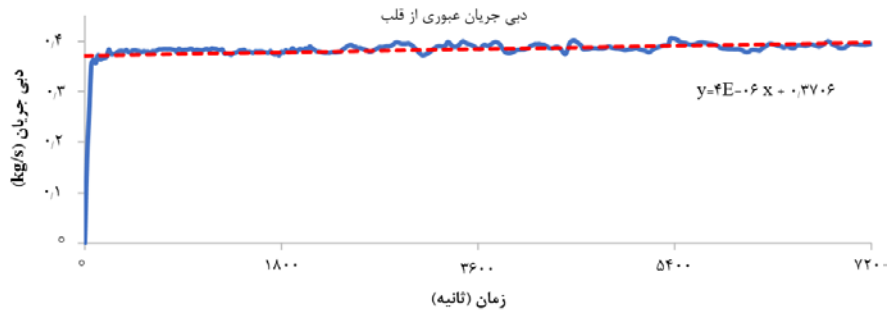
در شکل ۵ نمایی از بردار سرعت در مخزن و قلب رآکتور در حالت بدون کویل را نشان می‌دهد. سیال خنک‌کننده با دمای پایین‌تر از طریق دهانه ورودی قلب، وارد قلب شده و با برداشت حرارت دمای آن افزایش یافته و از دهانه خروجی، از طریق ۱۲ سوراخ به قطر ۳ سانتی‌متر خارج می‌گردد. در دقایق ابتدایی شبیه‌سازی به دلیل این‌که جابه‌جایی طبیعی هنوز گسترش نیافته است؛ شاهد برگشت جریان از دهانه خروجی به داخل قلب هستیم اما با گذشت زمان، جریان به‌طور کامل ایجاد خواهد شد و در نتیجه جریان برگشتی در قسمت بالاتر مخزن رخ خواهد داد.

در شکل ۶ دبی جرمی جریان عبوری از قلب در مدت زمان عملکرد رآکتور آمده است. اگرچه در مقدار آن نوسانات وجود دارد اما با نادیده گرفتن شیب صعودی ناچیز آن، می‌توان آن را به‌عنوان مقدار ثابت 0.37 kg/s در نظر گرفت.

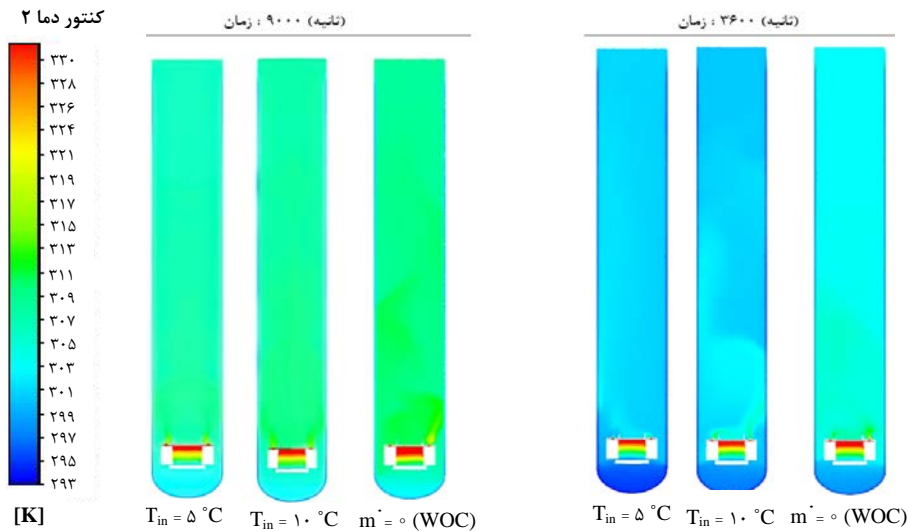


شکل ۵. بردار سرعت در مخزن و قلب رآکتور در حالت بدون کویل در زمان ۷۲۰۰ ثانیه.

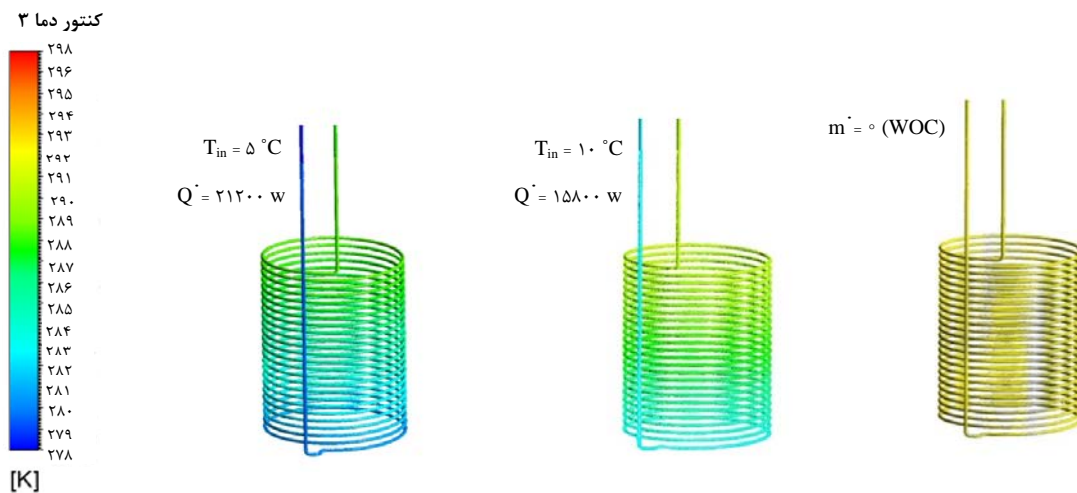




شکل ۶. دبی جرمی عبوری از میان قلب در حالت بدون کویل.



شکل ۷. توزیع دمایی سیال درون مخزن رآکتور در دماهای مختلف سیال ورودی به کویل در مدت زمان ۳۶۰۰ (سمت راست) و ۹۰۰۰ ثانیه (سمت چپ).

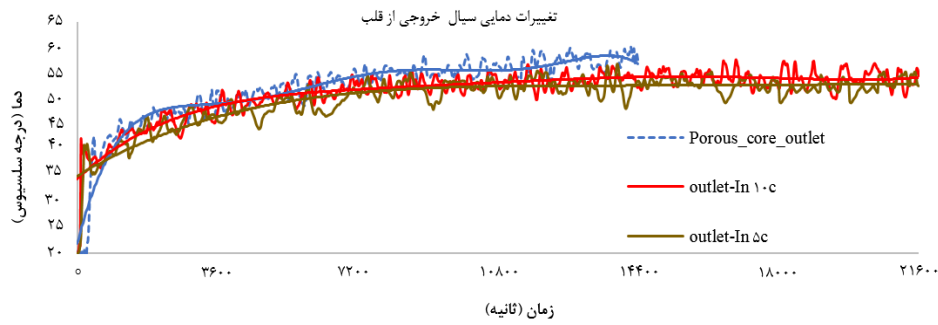


شکل ۸. توزیع دمایی سیال درون کویل خنک‌کننده در دماهای مختلف سیال ورودی به کویل در مدت زمان ۹۰۰۰ ثانیه.

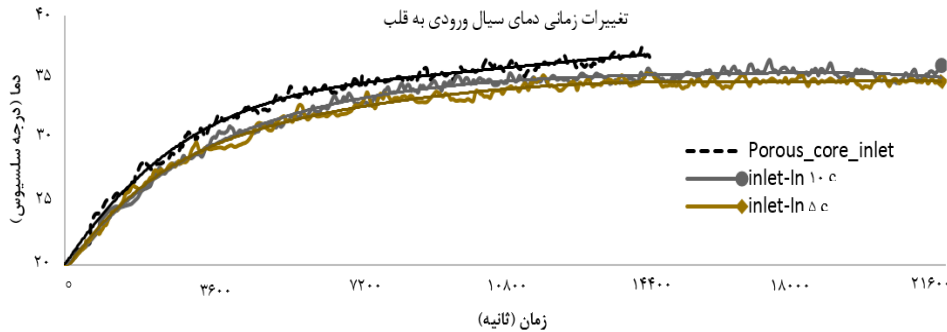
در حالت استفاده از کویل افزایش دما تا زمان حدود ۲ ساعت، شیب صعودی دارد اما بعد گذشت این زمان، شیب صعودی کم شده و دما در محدوده ۵۳ تا ۵۴ درجه نوسان می‌کند. برای درک بهتر به دلیل نوسانات دما، برازش هر یک از منحنی‌ها رسم شده است.

در شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب تغییرات زمانی دمای سیال خروجی و سیال ورودی به قلب در حالت دماهای مختلف سیال ورودی به کویل و حالت بدون در نظر گرفتن اثر کویل نمایش داده شده است. در حالت بدون کویل افزایش دما به صورت یک شیب صعودی در حال افزایش است و بعد از گذشت ۴ ساعت، حداکثر دمای سیال خروجی از قلب در حدود ۵۸ °C می‌رسد؛





شکل ۹. تغییرات زمانی دمای سیال خروجی از قلب در دماهای مختلف سیال ورودی به کویل.



شکل ۱۰. تغییرات زمانی دمای سیال ورودی به قلب در دماهای مختلف سیال ورودی به کویل.

مصرف راکتیویته اضافی بر اثر انباشت xenon در شارهای مختلف در شکل ۱۲ آمده است.

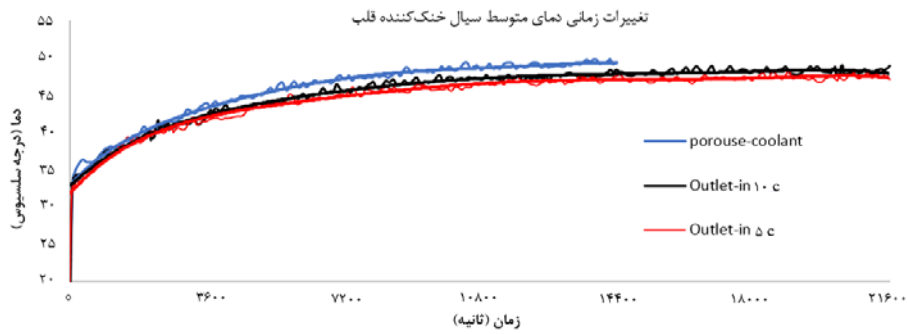
با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان میزان مدت‌زمان عملکرد رآکتور در قدرت اسمی را به صورتی تقریبی به دست آورد. برای مثال در حالت بدون کویل با توجه به شکل ۱۱ با گذشت زمان ۳ ساعت، دمای متوسط خنک‌کننده حدود ۲۹ درجه افزایش یافته و فیدبک ناشی از آن حدود ۳/۶۸ mk می‌شود و با توجه به شکل ۱۲ میزان مصرف راکتیویته اضافی در اثر زینان در مدت‌زمان ۳ ساعت حدود ۰/۱۷ mk می‌باشد؛ بنابراین میزان راکتیویته اضافی در دسترس تمام می‌شود. به همین صورت میزان مدت‌زمان عملکرد رآکتور برای حالت در نظر گرفتن کویل نیز، قابل‌محاسبه خواهد بود. میزان افزایش مدت‌زمان عملکرد رآکتور در مقایسه با حالت بدون کویل در جدول ۲ ارایه شده است. در حالت سیال ورودی به کویل با دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد، زمان عملکرد رآکتور حدود ۱/۰۸ ساعت و حالت سیال ورودی به کویل با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد زمان عملکرد رآکتور حدود ۱/۵۸ ساعت، نسبت به حالت بدون کویل افزایش داشته است.

در شکل ۱۱ تغییرات زمانی دمای متوسط سیال خنک‌کننده قلب در دماهای مختلف سیال ورودی به کویل و حالت بدون در نظر گرفتن اثر کویل نمایش داده شده است. در این شکل نیز همانند شکل ۹ در حالت بدون کویل افزایش دما به صورت یک شیب صعودی در حال افزایش می‌باشد؛ در حالت استفاده از کویل افزایش دما تا زمان حدود ۷۲۰۰ ثانیه، شیب صعودی دارد اما بعد گذشت زمان، شیب صعودی بسیار کم می‌شود و دما در یک محدوده نوسان می‌کند. برای درک بهتر این موضوع با توجه به نوسانات دما، برازش هر یک از منحنی‌ها رسم شده است.

مقدار راکتیویته اضافی سرد^۱ در دمای اولیه 20°C ، $3/85\text{mk}$ می‌باشد (SAR of Isfahan MNSR). همان‌طور که قبلاً اشاره شد؛ دو عامل اصلی که باعث مصرف راکتیویته اضافی می‌شود؛ ضریب- راکتیویته دمای متوسط خنک‌کننده و انباشت سم xenon می‌باشد. با افزایش دمای متوسط خنک‌کننده از 15°C به 50°C مقدار این فیدبک دمایی بین $0/07\text{mk}/^{\circ}\text{C}$ و $0/146\text{mk}/^{\circ}\text{C}$ متغیر می‌باشد. با این اوصاف با بررسی نتایج تجربی می‌توان مقدار این ضریب را در طول زمان عملکرد رآکتور به طور متوسط $0/127\text{mk}/^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفت. میزان

1. Cold Excess Reactivity



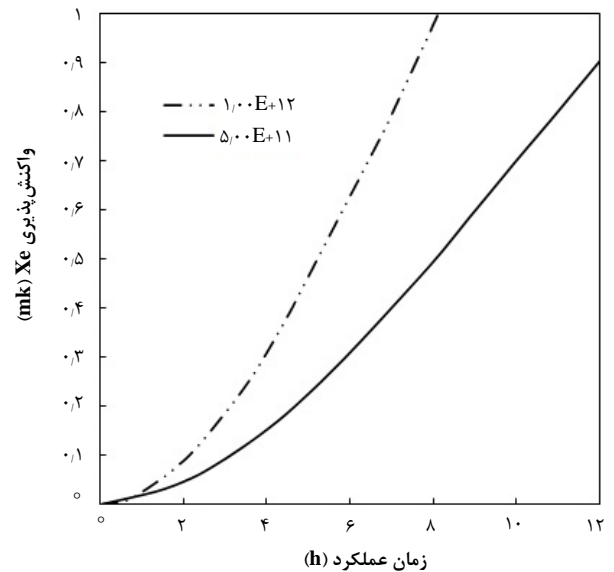


شکل ۱۱. تغییرات زمانی دمای متوسط سیال خنک کننده قلب در دماهای مختلف سیال ورودی به کویل.

از حل عددی به دست آمده، تطابق قابل قبول دارند و این روش را تأیید می کنند. نتایج نشان می دهد؛ دمای متوسط سیال خنک کننده قلب در حالت استفاده از کویل در مقایسه با حالت بدون کویل حدود ۲ تا ۳ درجه کاهش دما داشته و زمان عملکرد رآکتور در حالت استفاده از کویل، سیال ورودی به کویل با دمای ۱۰ درجه سانتی گراد، حدود ۱٫۰۸ ساعت و حالت سیال ورودی به کویل با دمای ۵ درجه سانتی گراد حدود ۱٫۵۸ ساعت افزایش داشته است.

۵. علایم، نشانه ها

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
\dot{m}	دبی جرمی ($kg \cdot s^{-1}$)
v	سرعت ($m \cdot s^{-1}$)
v_{mag}	سرعت نسبی ($m \cdot s^{-1}$)
β	ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})
μ	ویسکوزیته دینامیکی ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)
ρ	چگالی ($kg \cdot m^{-3}$)
زیر نویس ها	
woc	حالت بدون کویل
wic	حالت استفاده از کویل
in	ورودی به کویل
out	خروجی از کویل



شکل ۱۲. مصرف راکتیویته اضافی در اثر زینان بر حسب مدت زمان عملکرد رآکتور (SAR of Isfahan MNSR).

جدول ۲. افزایش مدت زمان عملکرد رآکتور در مقایسه با حالت بدون کویل

حالت	$T_{max}(hr)$	$T_{wic}-T_{woc}(hr)$
بدون کویل خنک کننده	۳	-
دمای سیال ورودی به کویل ۱۰°C	۴٫۰۸	۱٫۰۸
دمای سیال ورودی به کویل ۵°C	۴٫۵۸	۱٫۵۸

۴. جمع بندی

در این پژوهش، یک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل سازی پدیده جابه جایی آزاد در قلب، مخزن و استخر رآکتور انجام شده و اثر کویل خنک کننده در بالای رآکتور MNSR بر مدت زمان عملکرد رآکتور بررسی شده است که در نتیجه آن با استفاده از این کویل، دمای متوسط خنک کننده کاهش یافته که با استفاده از راکتیویته اضافی به دست آمده از فیدبک خنک کننده آن، امکان انجام عملیات طولانی تر این رآکتور فراهم می آید. قلب رآکتور به عنوان یک محیط متخلخل نظر گرفته شده است. به منظور اعتبارسنجی، مقادیر تجربی و مقادیری که

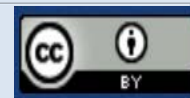


مراجع

1. A. Hainoun, S. Alissa, *Full-scale modelling of the MNSR reactor to simulate normal operation, transients and reactivity insertion accidents under natural circulation conditions using the thermal hydraulic code ATHLET*, *Nuclear Engineering and Design*, **235(1)**, 33-52 (2005).
2. Z.H.O.U Yongmao, *Safe private nuclear tool the miniature neutron source reactor*, *Transactions of the American Nuclear Society*, **56(1)**, 253-259 (1998).
3. F. Faghihi, S.M. Mirvakili, *Burn up calculations for the Iranian miniature reactor: a reliable and safe research reactor*, *Nuclear Engineering and Design*, **239(6)**, 1000-1009 (2009).
4. M. Ahmadi, A. Rabiee, A. Pirouzmand, *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 (2019).
5. J. Al Zain, et al, *Validation of DRAGON4/DONJON4 simulation methodology for a typical MNSR by calculating reactivity feedback coefficient and neutron flux*, *Results in Physics*, **9**, 1155-1160 (2018).
6. M. Albarhoum, S.A. Mohammed, *Thermal-hydraulic code (THYD) for the miniature neutron source reactor thermal-hydraulic transients*, *Progress in Nuclear Energy*, **51(3)**, 470-473 (2009).
7. I. Khamis, W. Alhalabi, *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 (2007).
8. Y.A. Ahmed, et al, *Effects of core excess reactivity and coolant average temperature on maximum operable time of NIRR-1 miniature neutron source reactor*, *Nuclear Engineering and Design*, **241(5)**, 1559-1564 (2011).
9. M. Nazari, N. Babazadeh Baie, M.M. Shahmardan, *Comparing Between Thermal Performance of Coiled Tube and Straight Tube Inserted in a Cylindrical Reservoir in the Transient Convection Heat Transfer, Experimental Study*, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, **49(3)**, 557-566 (2017).
10. H. Mirgolbabaie, et al, *Numerical estimation of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers*, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **66(7)**, 805-819 (2015).
11. R. Chen, et al, *Three dimensional thermal hydraulic characteristic analysis of reactor core based on porous media method*, *Annals of Nuclear Energy*, **104**, 178 (2017).
12. S. Sipaun, Shoaib Usman, *Prediction of Missouri S&T Reactor's natural convection with porous media approximation*, *Nuclear Engineering and Design*, **285**, 241 (2015).
13. Y. Abbassi, et al, *Investigation of natural convection in Miniature Neutron Source Reactor of Isfahan by applying the porous media approach*, *Nuclear Engineering and Design*, **309**, 213 (2016).
14. Y. Yizhou, Ph.D. Thesis, *Illinois at Urbana-Champaign University*, (2011). Retrieved from <http://hdl.handle.net/2142/29660>.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

میشم زرگر، محمدحسین استکی، منصور طالبی، جواد مختاری (۱۴۰۲)، بررسی اثر ماریپیج خنک‌کننده رآکتور مینیاتوری بر افزایش زمان بهره‌برداری از رآکتور، ۱۰۳، دوره ۴۴، شماره ۱، جلد ۱۰۳، بهار ۱۴۰۲، ص ۱۱۱-۱۲۰

DOI: 10.24200/nst.2022.1331

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1331.html

