

تحلیل پایای نوترونی و ترموهیدرولیک مجتمع‌های سوخت رآکتور هسته‌ای بوشهر با استفاده از روش نودال بسط شار و تک‌کانال گرم‌شونده

داود نقوی دیزجی، علی کللی، ناصر وثوقی*

دانشکده‌ی مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۶۵-۱۱۱۴، تهران - ایران

*Email: nvosoughi@sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۴/۱۰

چکیده

برای تحلیل نوترونی-ترموهیدرولیکی قلب رآکتورهای هسته‌ای، نیاز به توسعه نرم‌افزارهای محاسبات هسته‌ای جهت محاسبه پارامترهای نوترونی-ترموهیدرولیکی به منظور بهره‌برداری ایمن از آن‌ها می‌باشد. در این مقاله نرم‌افزار S^4HC جهت انجام محاسبات ترموهیدرولیکی قلب در حالت پایا به روش تک‌کانال گرم‌شونده توسعه داده شد. به منظور تحلیل قلب رآکتور بوشهر، پس از محاسبه پارامترهای نوترونی به روش نودال بسط شار، به تحلیل ترموهیدرولیکی مجتمع‌های سوخت با استفاده از نرم‌افزار S^4HC پرداخته شد. پس از انجام محاسبات ترموهیدرولیکی برای مجتمع‌های سوخت از جمله مجتمع سوخت داغ، نتیجه شد که تمام پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال خنک‌کننده در حدود مجاز خود قرار دارند و رآکتور دارای حاشیه مناسبی از حالت اشباع است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل نوترونی-ترموهیدرولیک، تک‌کانال گرم‌شونده، نودال بسط شار مرتبه بالا، S^4HC ، رآکتور بوشهر

Steady-state analysis of neutronic and thermal-hydraulic for Bushehr nuclear reactor's fuel assemblies using nodal expansion and single heated channel method

D. Naghavi Dizaji, A. Kolali, N. Vosoughi*

Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.BOX: 14565-1114, Tehran - Iran

Research Article

Received 18.2.2022, Revised: 15.6.2022, Accepted 1.7.2022

Abstract

For the neutronic and thermal-hydraulic analysis of nuclear reactor cores, it is necessary to develop nuclear computing software to calculate neutronic and thermal-hydrodynamic parameters for their safe operation. In this paper, S^4HC software was developed for steady-state thermal-hydraulic core calculations using a single heated channel method. To analyze the Bushehr reactor core, after calculating neutron parameters by the nodal expansion method, a thermal-hydraulic analysis of fuel assemblies was performed using S^4HC software. After thermal-hydraulic calculations for the fuel assemblies, including the hot fuel assembly, it was concluded that all the coolant thermal-hydraulic parameters are within their allowed ranges and the reactor has sufficient saturation margins.

Keywords: Neutronic and thermal-hydraulic analysis, Single heated channel, High-order nodal expansion method, S^4HC , Bushehr nuclear reactor



۱. مقدمه

دارد. مطابق مرجع [۴] در برنامه SH³-ACNEM با افزایش مرتبه بسط شار از چندجمله‌ای‌های درجه ۳ به درجه ۵، خطای محاسبات به صورت قابل توجهی بهبود می‌یابد. در این پژوهش برنامه SH³-ACNEM برای سیکل اول رآکتور بوشهر اجرا شده است که خروجی‌های آن در بخش نتایج قابل مشاهده است.

۳. تحلیل پایای ترموهیدرولیک با استفاده از S^fHC

با توجه به این که در روش نودال بسط شار از نودهایی به اندازه یک مجتمع سوخت استفاده شده است پس توزیع توان نسبی خروجی نیز مربوط به هر مجتمع سوخت می‌باشد. با توجه این موضوع، کانال ترموهیدرولیکی به صورت یک مجتمع سوخت با خنک‌کننده اطراف آن در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌سازی ترموهیدرولیکی شامل معادلات ترموهیدرولیکی در کانال، روابط ضریب اصطکاک تک‌فاز و کیفیت بخار می‌باشد. معادلات اساسی تحلیل سیال شامل سه معادله بقای جرم، مومنتم و انرژی است [۵]. معادله بقای جرم [۵]:

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

در رابطه ۱، ρ چگالی و G شار جرمی مایع است. در حالت پایا بخش تغییرات زمانی چگالی در معادله فوق حذف می‌شود (جمله اول سمت چپ). جمله دوم معادله فوق نشان‌دهنده تغییرات شار جرمی در طول حجم کنترل^{۱۱} است. معادله بقای مومنتم [۵]:

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{fG^2}{2D_e \rho} - \rho g \quad (2)$$

در رابطه ۲، g شتاب جاذبه، f ضریب اصطکاک، $D_e = \frac{4A}{P}$ قطر هیدرولیکی کانال و P فشار سیال است هم‌چنین A سطح مقطع جریان و P محیط خیس شده جریان است. معادله بقای انرژی [۵]:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + G \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{f_{TP} G^2}{2D_e \rho} \right] \quad (3)$$

توجه به ایمنی رآکتورهای تجاری در حین بهره‌برداری به منظور جلوگیری از وقوع حوادث هسته‌ای بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور باید تحلیل نوترونی و ترموهیدرولیکی به‌طور هم‌زمان انجام شود تا بتوان ارزیابی دقیق‌تری نسبت به رفتار پارامترهای ترمونوترونی قلب رآکتور ارائه نمود.

از پارامترهای مهم برای ایمنی رآکتورهای آب سبک تحت فشار^۱ می‌توان به توزیع توان نسبی^۲ قلب، نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای، شار حرارتی، دما و فشار سیال خنک‌کننده و هم‌چنین حاشیه سیال از حالت اشباع^۳ اشاره کرد.

برای تحلیل پایای نوترونی و ترموهیدرولیک قلب، باید ابتدا معادله پخش نوترون برای به‌دست آوردن توزیع توان نسبی به روش عددی حل شود و سپس از توزیع توان نسبی به‌دست‌آمده به‌عنوان ورودی بخش ترموهیدرولیکی استفاده کرد [۱].

به‌منظور داشتن نرم‌افزار سریع و با دقت قابل‌قبول، از روش‌های عددی مش درشت^۴ برای حل معادله پخش نوترون استفاده می‌شود که در این پژوهش از روش نودال بسط شار مرتبه بالا^۵ استفاده شده است [۲]. هم‌چنین برای به دست آوردن توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی از حل عددی معادلات بقای جرم^۶، مومنتم^۷ و انرژی^۸ به‌روش تک‌کانال گرم‌شونده^۹ استفاده می‌شود [۳] که در نهایت منجر به توسعه نرم‌افزار S^fHC^{۱۰} شد. در این مقاله با استفاده از داده‌های نوترونی و ترموهیدرولیک قلب رآکتور هسته‌ای بوشهر، هر مجتمع سوخت به‌عنوان کانال ترموهیدرولیکی در نظر گرفته‌شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. تحلیل پایای نوترونی با استفاده از SH³-ACNEM

به‌منظور تحلیل نوترونی قلب رآکتورهای با هندسه شش‌گوش، معادله پخش نوترون در حالت پایا، به‌روش نودال بسط شار گسسته شده است. از آنجایی که روش نودال بسط شار از نودهایی به اندازه یک مجتمع سوخت استفاده می‌کند، زمان اجرای بهینه اما خطای بالاتری نسبت به روش‌های مش ریز

1. Pressurized Water Reactor (PWR)
2. Relative Power Distribution
3. Fluid Saturation Margin
4. Coarse Mesh
5. High-Order Nodal Expansion Method
6. Mass Conservation Equation
7. Momentum Conservation Equation
8. Energy Conservation Equation
9. Single Heating Channel Method
10. Sharif Steady-State Single Heating Channel

11. Sharif Hexagonal Geometry High-Order Average Current Nodal Expansion Method
12. Control Volume
Journal of Nuclear Science and Technology



می‌شود [۷]. لازم به توضیح است که با توجه به تعریف‌های ترمودینامیکی، نسبت جرم بخار به جرم کل مخلوط آب و بخار را کیفیت می‌گویند اما در اینجا کیفیت تعادلی همواره منفی خواهد بود که بیانگر فاصله از حالت دوفازی (میزان مادون سرد بودن سیال) است. در رابطه ۹، h بیانگر آنتالپی می‌باشد هم‌چنین اندیس‌های m ، f و g به ترتیب بیانگر مخلوط بخار و آب، سیال اشباع و بخار اشباع هستند. در نهایت با استفاده از برنامه‌نویسی روابط گسسته شده فوق، نرم‌افزار S^fHC به منظور تحلیل ترموهیدرولیکی قلب رآکتورهای آب سبک به روش تک‌کانال گرم‌شونده توسعه داده شد.

۴. الگوریتم استفاده‌شده در S^fHC

با حل عددی معادلات گسسته مربوط به بقای جرم، مومنتم و انرژی می‌توان توزیع پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی را در طول کانال به دست آورد. لازم به توضیح است که برای حل عددی معادلات ترموهیدرولیکی نیاز به جدول ترمودینامیکی است و در این نرم‌افزار از تابع XSTEAM که توسط انجمن بین‌المللی خواص آب و بخار^۳ تهیه‌شده، استفاده می‌شود. هم‌چنین شرط هم‌گرایی برای محاسبات ترموهیدرولیکی بر روی پارامتر چگالی بررسی می‌شود که معیار هم‌گرایی [۱] برابر با 10^{-5} در نظر گرفته‌شده است. نرم‌افزار ابتدا طول مش را از کاربر دریافت می‌کند و سپس برای انجام محاسبات در هر مش، پس از بررسی شرط عدم پایان کانال، به بررسی هم‌گرایی پارامتر چگالی می‌پردازد که روندنمای مربوط به محاسبات ترموهیدرولیکی در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

۵. مشخصات قلب رآکتور بوشهر

شبیه‌سازی برای چیدمان سیکل اول رآکتور بوشهر انجام شد و اطلاعات ترموهیدرولیکی موردنیاز در جدول ۱ آمده است [۸]. چیدمان سیکل اول در شکل ۲ قابل مشاهده است. هم‌چنین شماره موجود در هر یک از مجتمع‌های سوخت بیانگر شماره ماده است که مشخصات سطح مقطع آن‌ها در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

در رابطه ۳، P فشار سیال، h آنتالپی ویژه، q'' شار حرارتی، A_z سطح مقطع کانال و P_h محیط کانال است. لازم به توضیح است که از روابط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برای محاسبه سرعت، فشار و آنتالپی ویژه در خروجی حجم کنترل استفاده می‌شود [۱]. بعد از گسسته‌سازی معادلات به روش حجم محدود^۱، شکل گسسته روابط ۱، ۲ و ۳ به صورت روابط ۴، ۵ و ۶ به دست می‌آیند که به ترتیب معادلات گسسته بقای جرم، مومنتم و انرژی هستند.

$$G_m = \rho V = cte \rightarrow \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \rightarrow \frac{\rho^{j+1} V^{j+1} - \rho^j V^j}{\Delta z} = 0 \rightarrow V^{j+1} = \frac{\rho^j V^j}{\rho^{j+1}} \quad (4)$$

$$P^{j+1} = P^j - \left[\left[G^T \left(\frac{1}{\rho^{j+1}} - \frac{1}{\rho^j} \right) \right] \right] + f \frac{G^T \Delta z}{2 D_e (\rho^{j+1} + \rho^j)} + \Delta z \times \frac{(\rho^{j+1} + \rho^j)}{2} \times g \quad (5)$$

$$h^{j+1} = h^j + \frac{\Delta z}{G} \left\{ \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{G}{\rho} \left[\frac{P^{j+1} - P^j}{\Delta z} \right] + f \frac{G^T}{2 D_e (\rho^{j+1} + \rho^j)} \right\} \quad (6)$$

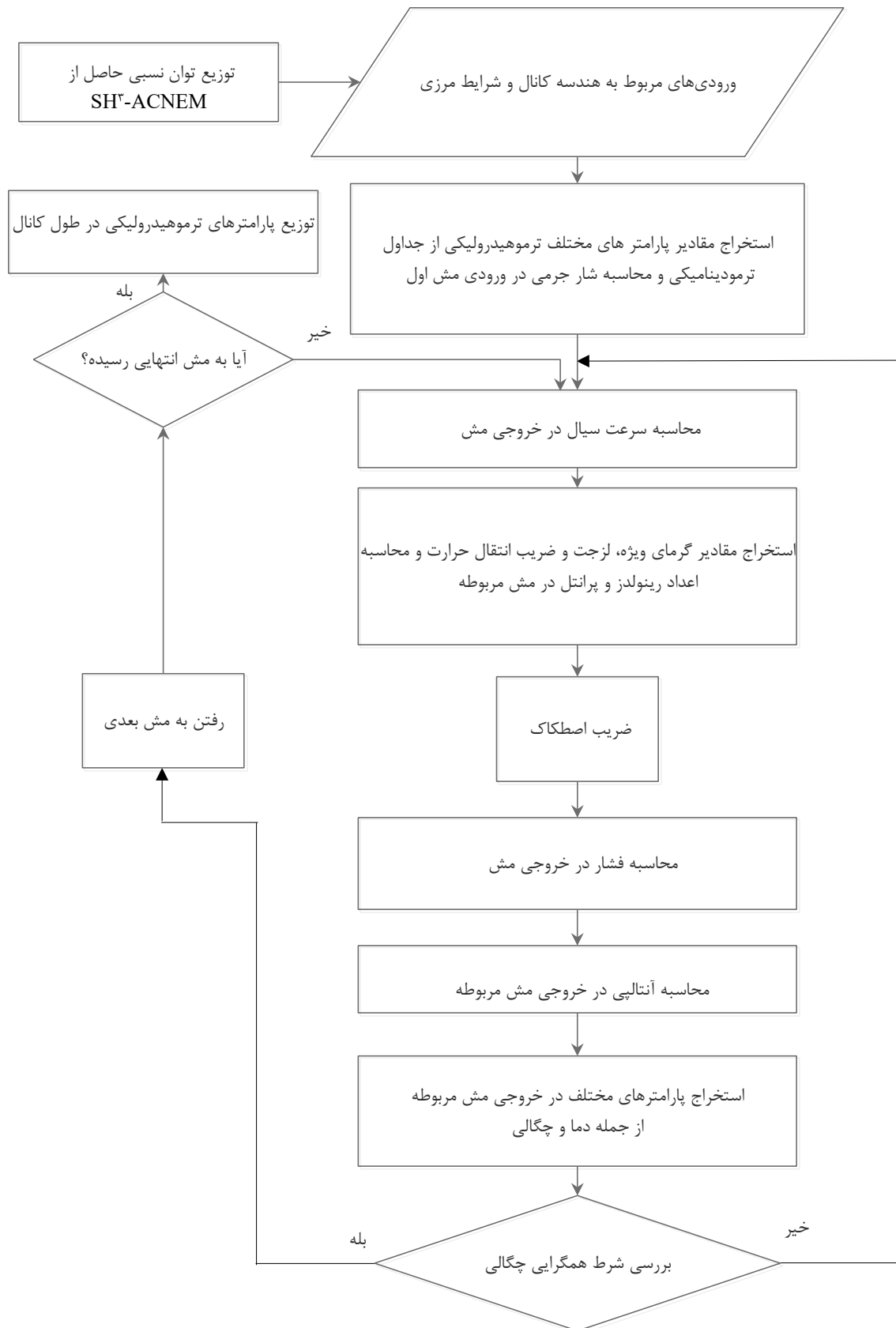
$$f(Re) = \begin{cases} \frac{64}{Re} & , Re < 2100 \\ \left[0.045 \left(1 + \frac{1}{2} \times 10^{-4} \left(\frac{e}{D} \right) \right) + \frac{1}{Re} \right]^{0.25} & , Re \geq 4000 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Re = \frac{GD}{\mu} \\ Pr = \frac{\mu C_p}{k} \\ Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ Nu = \frac{hl}{k_f} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k_f}{l} \end{cases} \quad (8)$$

$$x = \frac{h_m - h_f}{h_g - h_f} \quad (9)$$

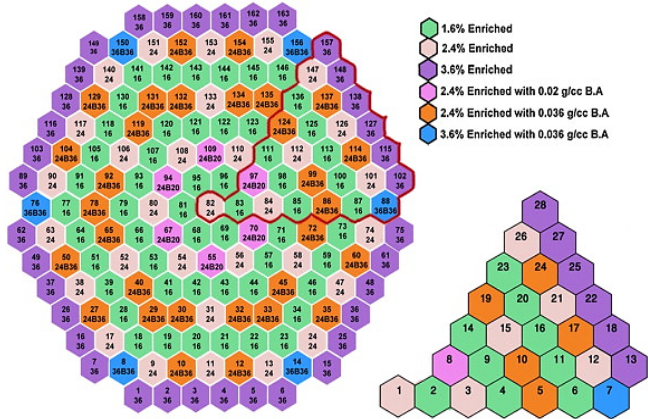
روابط مربوط به محاسبه ضریب اصطکاک با استفاده از عدد رینولدز جریان [۶] در رابطه ۷ و روابط مربوط به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در رابطه ۸ قابل مشاهده هستند [۵]. در رابطه ۸، G شار جرمی سیال^۲، D قطر هیدرولیکی کانال، μ ضریب ویسکوزیته سیال، k ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و l طول مشخصه است. هم‌چنین به منظور محاسبه کیفیت بخار از رابطه ۹ استفاده





شکل ۱. الگوریتم استفاده‌شده برای محاسبات ترموهیدرولیکی در نرم‌افزار S⁴HC.





شکل ۲. چیدمان مجتمع‌های سوخت در سیکل اول رآکتور بوشهر [۹].

جدول ۱. مشخصات ترموهیدرولیکی قلب رآکتور بوشهر [۸]

مقدار	پارامتر
۳۰۰۰	توان حرارتی رآکتور (مگاوات)
۱۶۳	تعداد مجتمع‌های سوخت
۳۵۵	ارتفاع مجتمع‌های سوخت (سانتی‌متر)
۱/۲۷۵	گام بین میله‌های سوخت (سانتی‌متر)
۲۵۵	قطر بزرگ مجتمع‌های سوخت (میلی‌متر)
۳۱۱	تعداد میله‌های سوخت موجود در هر مجتمع
۲۰	تعداد کانال‌های غیرسوخت در هر مجتمع
۲۹۱	دمای خنک‌کننده در ورودی قلب (درجه سلسیوس)
۱۵۷	فشار خنک‌کننده در ورودی قلب (بار)
۵٫۶	سرعت متوسط خنک‌کننده در ورودی قلب (متر بر ثانیه)
۰٫۰۰۰۰۴	زبری نسبی سطح

جدول ۲. ثوابت گروهی سیکل اول رآکتور بوشهر [۹]

FA۱۶	FA۲۴	FA۳۶	FA۲۴B۲۰	FA۲۴B۳۶	FA۳۶B۳۶	بازتابنده	ثوابت گروهی
۱٫۳۴۱	۱٫۳۴۵	۱٫۳۷۱	۱٫۴۳۱	۱٫۴۳۱۵	۱٫۴۳۵۳	۱۶۰۴۳	$D_r(\text{cm})$
۰٫۴۶۳	۰٫۴۵۶	۰٫۴۳۲	۰٫۴۰۷۷	۰٫۴۰۵۷	۰٫۳۹۹۹	۰٫۲۴۹۴	$D_r(\text{cm})$
۰٫۰۰۵۳	۰٫۰۰۶۶	۰٫۰۰۸۱	۰٫۰۰۵۸۶۷	۰٫۰۰۵۸۶۱	۰٫۰۰۷۴۰	۰٫۰	$V\Sigma_{f,1}(\text{cm}^{-1})$
۰٫۰۹۵۲	۰٫۱۳۴۸	۰٫۱۷۸۳	۰٫۱۱۰۳	۰٫۱۱۰۴	۰٫۱۵۲۱۹	۰٫۰	$V\Sigma_{f,2}(\text{cm}^{-1})$
۰٫۰۱۰۰	۰٫۰۱۰۶	۰٫۰۱۱۱	۰٫۰۰۹۶	۰٫۰۰۹۷	۰٫۰۱۰۴	۰٫۰۰۰۴۷۱	$\Sigma_{a,1}(\text{cm}^{-1})$
۰٫۰۷۰۴	۰٫۰۸۸۵	۰٫۱۰۹۰	۰٫۰۸۴۱	۰٫۰۸۷۷	۰٫۱۰۴۸	۰٫۰۱۲۰۴۵	$\Sigma_{a,2}(\text{cm}^{-1})$
۰٫۰۱۱۱	۰٫۰۱۰۷	۰٫۰۱۱۴	۰٫۰۱۴۲	۰٫۰۱۴۱	۰٫۰۱۳۹	۰٫۰۴۱۹۵۸	$\Sigma_{s,12}(\text{cm}^{-1})$

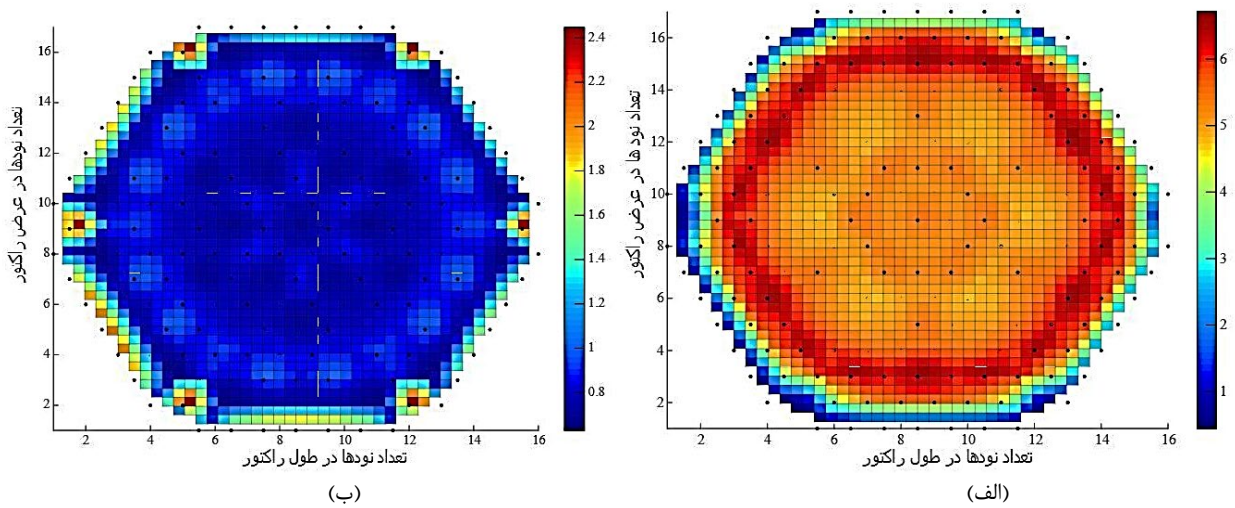
۶. نتایج و بحث

به‌منظور شبیه‌سازی نوترونی قلب رآکتور، شرط مرزی به‌صورت شرط مرزی خلأ در نظر گرفته‌شده [۹] و محاسبات برای نودهایی به اندازه یک مجتمع سوخت با گام شبکه ۲۳/۶ سانتی‌متر انجام‌شده است. هم‌چنین ضریب تکثیر مؤثر نوترونی برابر با ۱/۰۰۵۶۷ با خطای ۱۱۹ pcm- نسبت به مرجع [۹] به دست آمد. در شکل ۳ توزیع شار نوترونی سریع و حرارتی محاسبه‌شده با روش نودال بسط شار مرتبه اول نمایش داده‌شده و توزیع توان نسبی به‌دست‌آمده نیز در شکل ۴ قابل‌مشاهده است. متوسط خطای نسبی برای توزیع توان برابر با ۳/۷۷٪ و هم‌چنین بیشینه آن برابر با ۱۳/۵۰٪ نتیجه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه خطاها در مجتمع سوخت‌هایی با بیش‌ترین تغییرات شار رخ‌داده است. این تغییرات شار به دلیل اختلاف سطح‌مقطع‌های مجتمع‌های سوخت با همسایگانشان باشد که در مجتمع‌های سوخت مجاور با بازتابنده بیش‌ترین

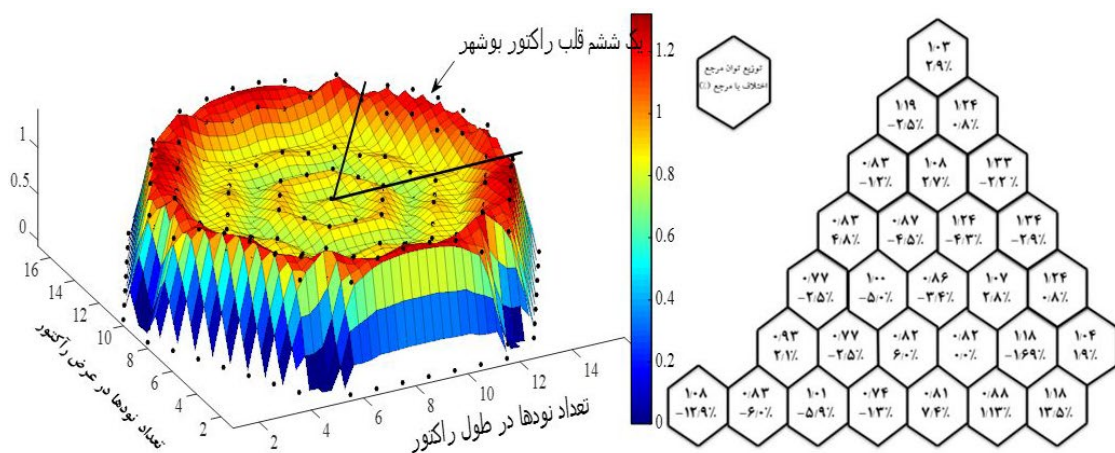
تغییرات شار نوترونی وجود دارد. پس از انجام شبیه‌سازی نوترونی، از توزیع توان نسبی به‌دست‌آمده برای محاسبات ترموهیدرولیک استفاده می‌شود. مقادیر ورودی کانال‌ها برای تحلیل ترموهیدرولیکی از جدول ۱ استخراج‌شده‌اند. ازجمله پارامترهای خروجی نرم‌افزار S^۴HC می‌توان به دما، فشار، سرعت و چگالی سیال خنک‌کننده اشاره کرد. در شکل ۵ توزیع دمای سیال در طول و در خروجی کانال برای یک‌ششم قلب قابل‌مشاهده است. شماره‌های موجود در نمودارهای مربوط به پارامترهای ترموهیدرولیکی در شکل ۲ مشخص‌شده‌اند. مطابق انتظار کانال‌های دارای مجتمع سوخت با توان نسبی بالاتر دماهای خروجی بالاتری دارند. لازم به ذکر است که کانال داغ مربوط به مجتمع سوخت شماره ۷ است که دما در این کانال از ۲۹۱ درجه سلسیوس در ورودی به ۳۳۲/۲ در خروجی افزایش‌یافته است و هم‌چنین دمای متوسط خروجی کانال‌ها ۳۲۲/۷ درجه سلسیوس به دست آمد که تطابق خوبی با مقدار گزارش‌شده در فصل ۴ مرجع [۸] دارد.

1. Vacuum Boundary Condition

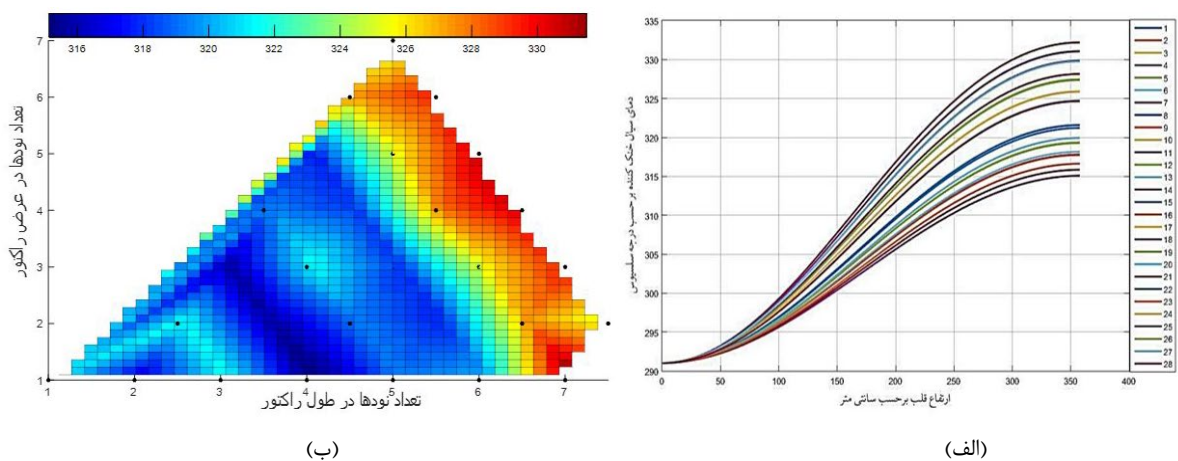




شکل ۳. توزیع شار نوترونی سریع (الف) و حرارتی (ب) برای قلب رآکتور بوشهر.



شکل ۴. توزیع توان نسبی در یک‌ششم قلب رآکتور بوشهر نسبت به مرجع [۹].



شکل ۵. توزیع دمای خنک‌کننده در راستای محوری (الف) و خروجی کانال (ب).

فشار (راست) مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در این شکل (چپ) قابل مشاهده است سیال به حالت اشباع نمی‌رسد چراکه در ناحیه سمت چپ خط مایع اشباع قرار گرفته و حاشیه امنی با شرایط جوشش دارد. مطابق انتظار با افت فشار در طول کانال، دمای اشباع نیز کاهش می‌یابد که در منحنی‌های شکل ۶

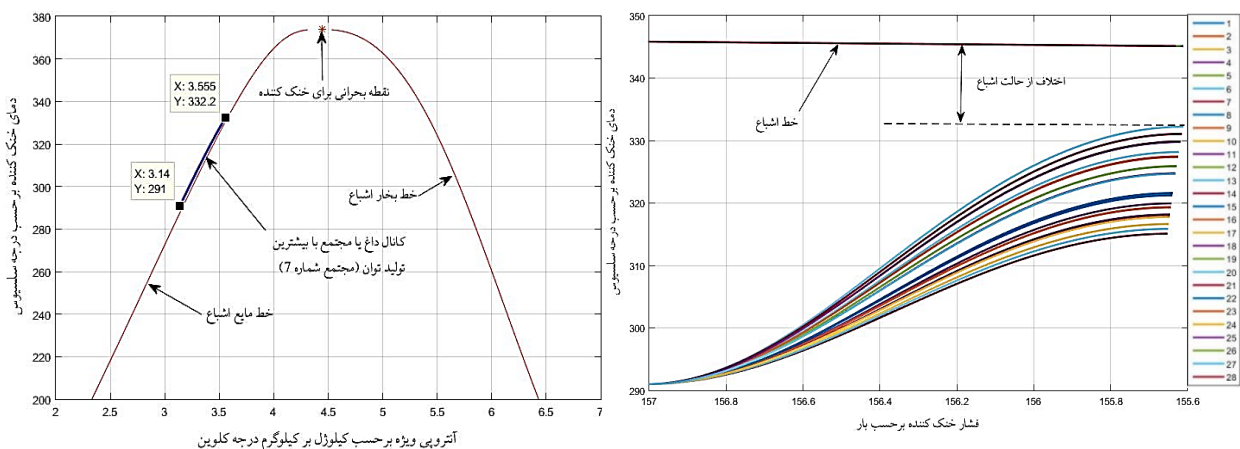
یکی از نگرانی‌هایی که در مورد کانال داغ وجود دارد، رسیدن دمای سیال خنک‌کننده در آن به دمای اشباع است که می‌تواند فرایند بهره‌برداری ایمن را تحت تأثیر قرار دهد [۳، ۸]. در شکل ۶ شرایط ورودی و خروجی تمام کانال‌ها از جمله کانال داغ با استفاده از نمودار دما-آنترپوی ویژه (چپ) و نمودار دما



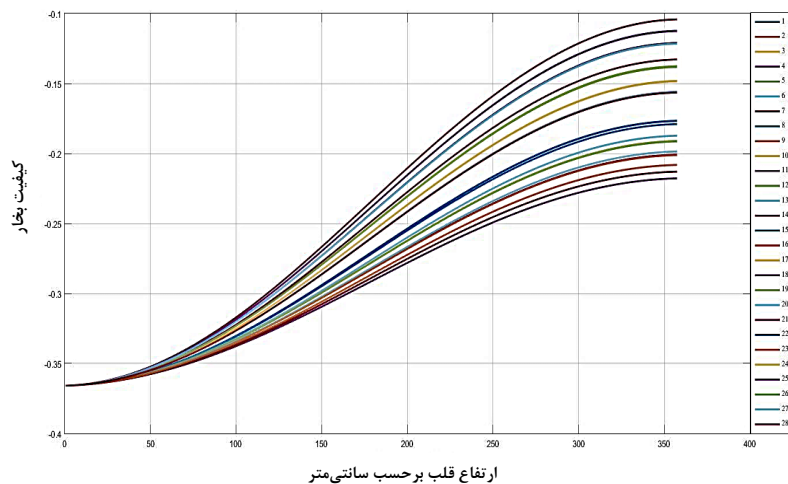
همچنین با توجه به شار جرمی ثابت سیال خنک‌کننده می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش چگالی در طول کانال، سرعت خنک‌کننده باید صعودی باشد که در شکل ۹ روند افزایش سرعت خنک‌کننده در طول کانال و توزیع سرعت در خروجی کانال‌ها در یک‌ششم قلب به‌وضوح قابل‌مشاهده است. با توجه به وجود عوامل مختلف کاهشنده فشار در طول کانال از جمله انتقال حرارت، وجود اصطکاک سیال با سازه‌های حرارتی و افزایش سرعت در طول کانال، روند فشار در طول کانال باید نزولی باشد. شکل ۱۰ توزیع فشار در خروجی کانال‌ها را نشان می‌دهد که در این شکل کانال داغ (مجموع سوخت شماره ۷) به دلیل انتقال حرارت بالا باید کم‌ترین فشار را در خروجی داشته باشد.

(راست) به‌وضوح مشاهده می‌شود. برای بهتر نشان دادن این موضوع، با استفاده از کیفیت بخار تعریف‌شده در رابطه ۹، نمودار کیفیت در شکل ۷ برای یک‌ششم قلب رسم شده است.

از آنجایی‌که سیال خنک‌کننده وظیفه برداشت حرارت را در طول کانال بر عهده دارد پس بدیهی است که در طول کانال دچار کاهش چگالی شود که مطابق شکل ۸ نمودار تغییرات چگالی در طول کانال و در خروجی کانال‌ها در یک‌ششم قلب نشان داده‌شده است. با توجه به نمودار چگالی سیال خنک‌کننده در طول کانال می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط راکتورهای آب سبک تحت‌فشار، آب سیال تراکم‌پذیر است و استفاده از خواص میانگین از جمله پارامتر چگالی می‌تواند خطای زیادی را در تحلیل‌ها وارد کند.

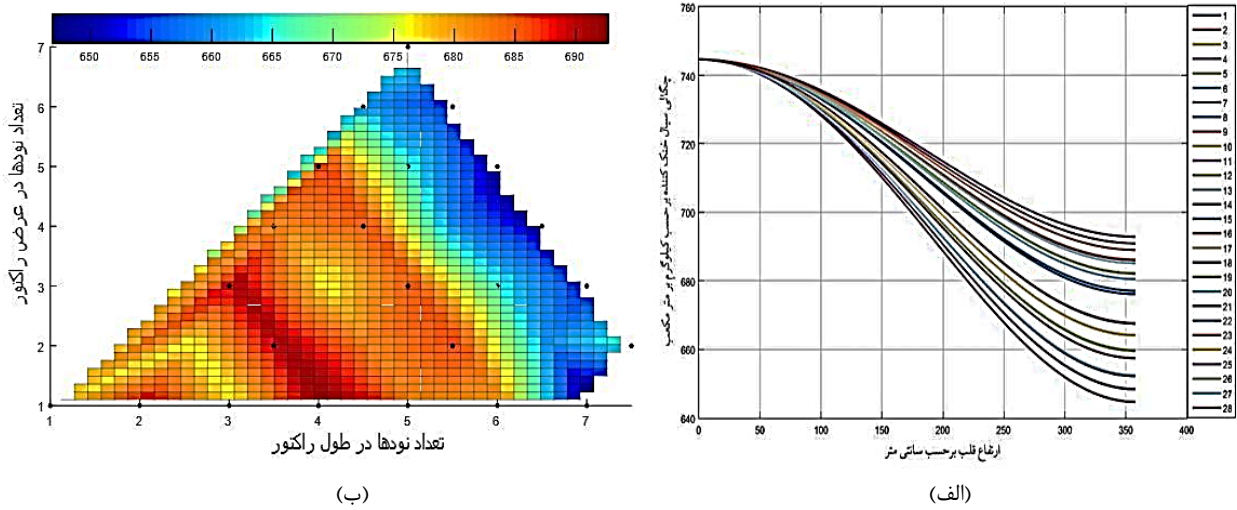


شکل ۶. توزیع دمای خنک‌کننده بر حسب فشار و اختلاف از ناحیه اشباع (راست) و نمودار دما-آنتروپی ویژه برای کانال داغ.

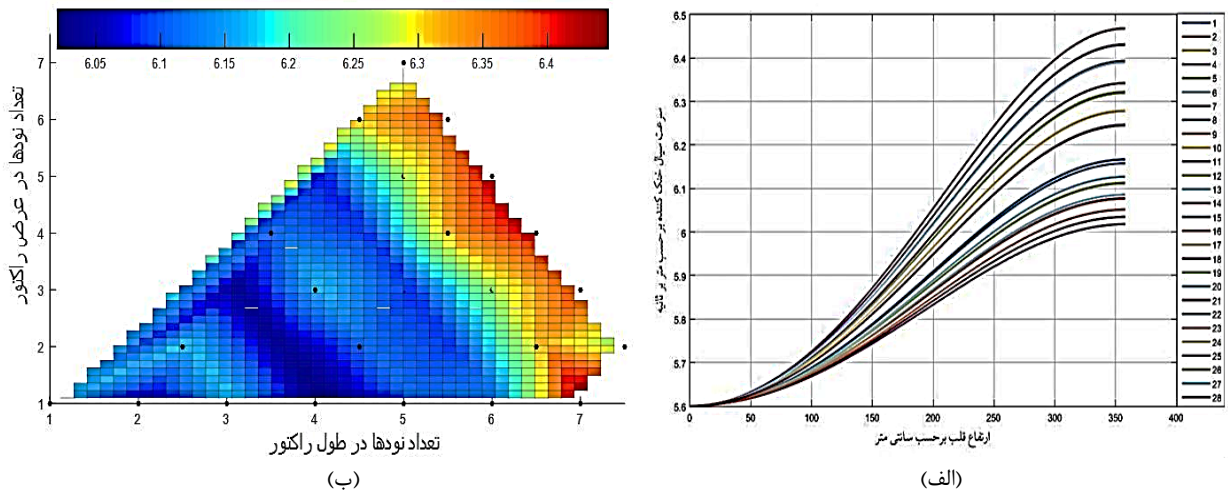


شکل ۷. توزیع کیفیت تعادلی در طول کانال.

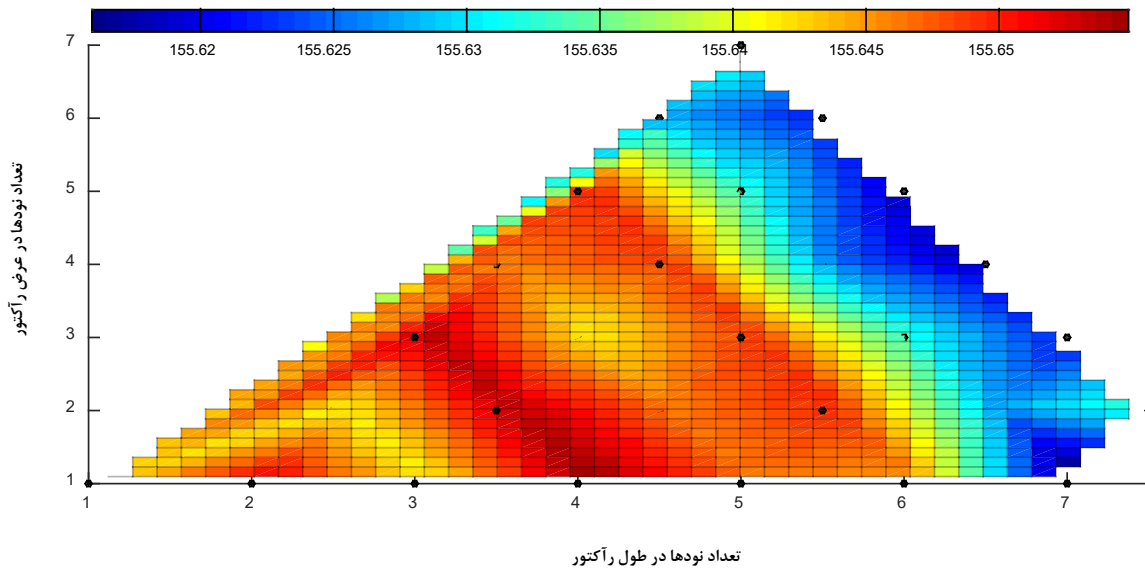




شکل ۸. توزیع چگالی خنک‌کننده در طول (الف) و خروجی کانال‌ها (ب).



شکل ۹. توزیع سرعت خنک‌کننده در طول (الف) و خروجی کانال‌ها (ب).



شکل ۱۰. توزیع فشار خنک‌کننده در خروجی کانال‌ها.



۷. نتیجه گیری

مراجع

1. Naghavi Dizaji D. Investigating the Propagation of Thermal-hydraulic Noise in PWRs in Two phases. MSc Thesis, [Sharif University of Technology, Tehran, Iran](#). 2018 [In Persian]. Available at: <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/6652df6a65abbfe32f6168bf4782a19>.
2. Kolali A, Naghavi Dizaji D, Vosoughi N. Development of the S³-HACNEM Simulator Program in order to Solving the Forward and Adjoint Neutron Diffusion Equation for Rectangular Geometry Reactor Cores. [Journal of Nuclear Science and Technology](#). 2024;45(2):21-28 [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/nst.2023.469.1319>.
3. Naghavi Dizaji D, Vosoughi N. Thermal-hydraulic Investigation of Bushehr Nuclear Reactor in Two-Phase mode by Single Heating Channel method. [25th Iran Nuclear Conference, Bushehr, Iran](#). 2019 [In Persian].
4. Kolali A, Naghavi Dizaji D, Vosoughi N. Development of the SH³-ACNEM Simulator Program in order to Solving the Forward and Adjoint neutron Diffusion Equation for Hexagonal Geometry Reactor Cores. [Journal of Nuclear Science and Technology](#). 2024;44(1):103-110 [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/nst.2023.436.1298>.
5. Todreas N.E, Kazimi M.S. Nuclear systems I&II. [Taylor & Francis](#). 1990.
6. Brkić D. Determining friction factors in turbulent pipe flow. 2012.
7. El-Wakil M.M. Nuclear Heat Transport. 1971.
8. AEOI, Final Safety Analysis Report (FSAR) of BNPP-1. 2007.
9. Hosseini S.A, Vosoughi N. On a various noise source reconstruction algorithms in VVER-1000 reactor core. [Nuclear Engineering and Design](#). 2013;261:132-143.

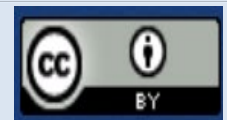
امروزه اهمیت نرم افزارهای محاسباتی به منظور تحلیل نوترونی- ترموهیدرولیکی در مباحث طراحی یا شبیه سازی قلب رآکتورهای هسته ای غیرقابل انکار هست. با توجه به وجود نیروگاه هسته ای بوشهر به عنوان اولین نیروگاه هسته ای کشور، بررسی پارامترهای مختلف رآکتور این نیروگاه برای متخصصین کشور بسیار حائز اهمیت است و در این راستا سعی می شود تا نرم افزارهای بهینه (از نظر زمان و حجم محاسبات) برای تحلیل قلب این رآکتور توسعه داده شوند.

در این پژوهش نرم افزار S⁴HC به منظور تحلیل پایای ترموهیدرولیکی قلب رآکتورهای آب سبک تحت فشار توسعه داده شد. به منظور تحلیل پایای قلب رآکتور بوشهر پس از به دست آوردن توزیع توان نسبی از محاسبات نوترونی توسط نرم افزار SH³-ACNEM، تحلیل ترموهیدرولیکی سیال خنک کننده توسط نرم افزار S⁴HC انجام شد.

با توجه به نمودارهای به دست آمده می توان نتیجه گرفت که پارامترهای ترموهیدرولیکی در همه کانال ها در محدوده مجاز خود قرار دارند و در کانال مربوط به مجتمع سوخت داغ رآکتور، جریان سیال با حاشیه ایمنی خوبی در حالت تک فاز است. با توجه به تحلیل انجام شده نتیجه شد که بیشترین میزان تولید گرما در کانال شماره ۷ می باشد و دمای خروجی سیال خنک کننده در آن برابر با ۳۳۲٫۲ درجه سلسیوس به دست آمد. لازم به توضیح است که این کانال بیشترین افت فشار (۱٫۴ بار) و به تبع آن کمترین دمای اشباع (۳۴۵٫۱ درجه سلسیوس) را دارد.

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

نقوی دیزجی، داود، کللی، علی، وثوقی، ناصر. (۱۴۰۳)، تحلیل پایای نوترونی و ترموهیدرولیک مجتمع های سوخت رآکتور هسته ای بوشهر با استفاده از روش نودال بسط شار و تک کانال گرم شوند. مجله علوم و فنون هسته ای، ۱۰۹ (۳)، ۱۳-۲۱. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2020.548.1369>

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1632.html

