مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology
Vol. 45 (4), Serial Number 109, 2024

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: ۱۱۱۴-۱۴۵۶۵، 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 به‌منظور بهره‌برداری ایمن از آن‌ها می‌باشد. در این مقاله نرم‌افزار S^4HC جهت انجام محاسبات ترموهیدرولیکی قلب در حالت پایا به‌روش تک‌کانال گرم‌شونده توسعه داده شد. به‌منظور تحلیل قلب رآکتور بوشهر، پس از محاسبه پارامترهای نوترونی به‌روش نودال بسط شار، به تحلیل ترموهیدرولیکی مجتمع‌های سوخت با استفاده از نرم‌افزار S^4HC پرداخته شد. پس از انجام محاسبات ترموهیدرولیکی برای مجتمع‌های سوخت ازجمله 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, S4HC 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 S4HC 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

توجه به ایمنی رآکتورهای تجاری در حین بهره‌برداری به‌منظور 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 تحت‌فشار[1] می‌توان به توزیع توان نسبی[2] قلب، نسبت انحراف از جوشش هسته ای، شار حرارتی، دما و فشار سیال خنک‌کننده و هم‌چنین حاشیه سیال از حالت اشباع[3] 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[4] برای حل معادله پخش نوترون استفاده می‌شود که در این پژوهش از روش نودال بسط شار مرتبه بالا[5] استفاده شده است [۲]. هم‌چنین برای به دست آوردن توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی از حل عددی معادلات بقای جرم[6]، مومنتم[7] و انرژی[8] به‌روش تک‌کانال گرم‌شونده[9] استفاده می‌شود [۳] که درنهایت منجر به توسعه نرم‌افزار S^{4}HC[10] 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 SH^3-ACNEM

به‌منظور تحلیل نوترونی قلب رآکتورهای با هندسه شش‌گوش، معادله پخش نوترون در حالت پایا، به‌روش نودال بسط شار گسسته شده است. از آن‌جایی‌که روش نودال بسط شار از نودهایی به اندازه یک مجتمع سوخت استفاده می‌کند، زمان اجرای بهینه اما خطای بالاتری نسبت به روش‌های مش ریز دارد. مطابق مرجع [۴] در برنامه SH^3-ACNEM[11] با افزایش مرتبه بسط شار از چندجمله‌ای‌های درجه ۳ به درجه ۵، خطای محاسبات به‌صورت قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. در این پژوهش برنامه SH^3-ACNEM برای سیکل اول رآکتور بوشهر اجرا شده است که خروجی‌های آن در بخش نتایج قابل‌مشاهده است.

۳. تحلیل پایای ترموهیدرولیک با استفاده از S^{4}HC

با توجه به این‌که 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 به‌صورت 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]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial G}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، ρ چگالی و G شار جرمی مایع است. در حالت‌پایا 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[12] است.

معادله بقای مومنتم [۵]:

$$\frac{\partial G}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{G^2}{\rho}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}-\frac{fG^2}{2D_e\rho}-\rho g \qquad (۲)$$

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]:

$$\rho\frac{\partial h}{\partial t}+G\frac{\partial h}{\partial z}=\frac{q''P_h}{A_z}+\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{G}{\rho}\left[\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{f_{TP}G^2}{2D_e\rho}\right] \qquad (۳)$$

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

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 محاسبه‌سرعت، فشار و آنتالپی ویژه در خروجی حجم کنترل استفاده می‌شود [۱]. بعد از گسسته‌سازی معادلات به‌روش حجم محدود[1]، شکل گسسته روابط ۱، ۲ و ۳ به‌صورت روابط ۴، ۵ و ۶ به دست می‌آیند که به ترتیب معادلات گسسته بقای جرم، مومنتم و انرژی هستند.

$$G_m = \rho V = cte \rightarrow \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \rightarrow \frac{\rho^{j+1}V^{j+1} - \rho^{j}V^{j}}{\Delta z} = 0 \rightarrow V^{j+1} = \frac{\rho^{j}V^{j}}{\rho^{j+1}} \quad (۴)$$

$$P^{j+1} = P^{j} - \left\{\left[G^{2}\left(\frac{1}{\rho^{j+1}} - \frac{1}{\rho^{j}}\right)\right]\right\} + f\frac{G^{2}\Delta z}{2D_e\frac{(\rho^{j+1}+\rho^{j})}{2}} + \Delta Z \times \frac{(\rho^{j+1}+\rho^{j})}{2} \times g \quad (۵)$$

$$h^{j+1} = h^{j} + \frac{\Delta z}{G}\left\{\frac{q''P_h}{A_z} + \frac{G}{\rho}\left[\frac{P^{j+1}-P^{j}}{\Delta z}\right] + f\frac{G^{2}}{2D_e\frac{(\rho^{j+1}+\rho^{j})}{2}}\right\} \quad (۶)$$

$$f(Re) = \begin{cases} 64/Re & ,Re < 2100 \\ \left\{0.0055\left(1 + 2\times10^{4}\left(\varepsilon/D\right) + \frac{10^{6}}{Re}\right)\right\}^{1/3} & ,Re \geq 4000 \end{cases} \quad (۷)$$

$$\begin{cases} Re = \dfrac{GD}{\mu} \\ Pr = \dfrac{\mu C_p}{k} \\ Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ Nu = \dfrac{hl}{k_f} \rightarrow h = \dfrac{Nu.k_f}{l} \end{cases} \quad (۸)$$

$$x = \frac{h_m - h_f}{h_g - h_f} \quad (۹)$$

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 قابل‌مشاهده هستند [۵]. در رابطه ۸، G شار جرمی سیال[2]، 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 به‌منظور محاسبه کیفیت بخار از رابطه ۹ استفاده 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. درنهایت با استفاده از برنامه‌نویسی روابط گسسته شده فوق، نرم‌افزار S^{4}HC به‌منظور تحلیل ترموهیدرولیکی قلب رآکتورهای آب سبک به‌روش تک‌کانال گرم‌شونده توسعه داده شد.

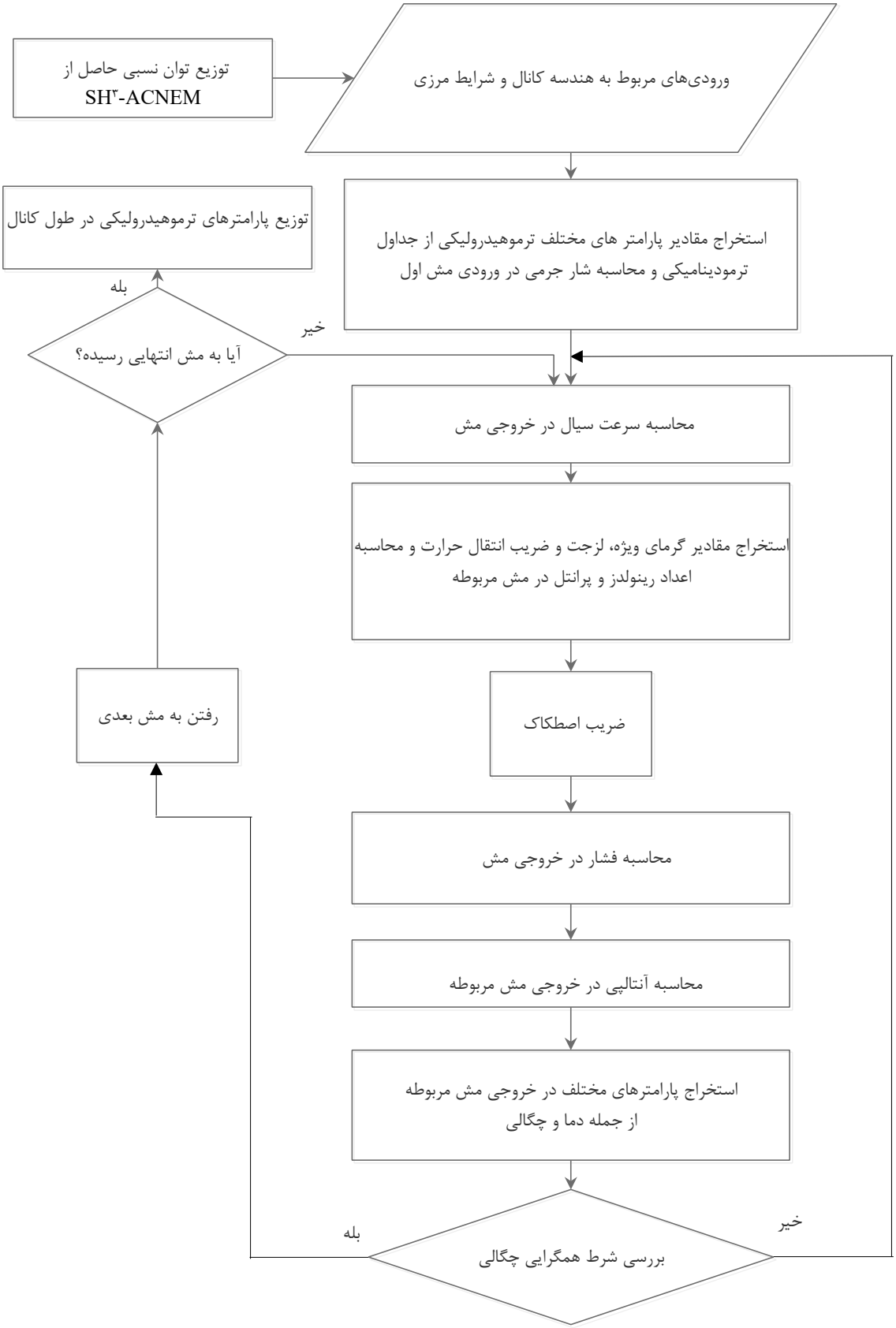
۴. الگوریتم استفاده‌شده در S^{4}HC

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[3] 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 قابل‌مشاهده 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.

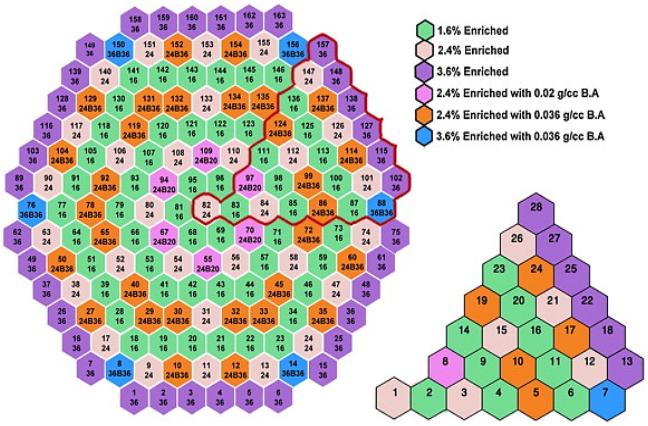
1. Finite Volume
2. Mass Velocity
3. International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)



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

جدول ۱. مشخصات ترموهیدرولیکی قلب رآکتور بوشهر [۸]

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



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

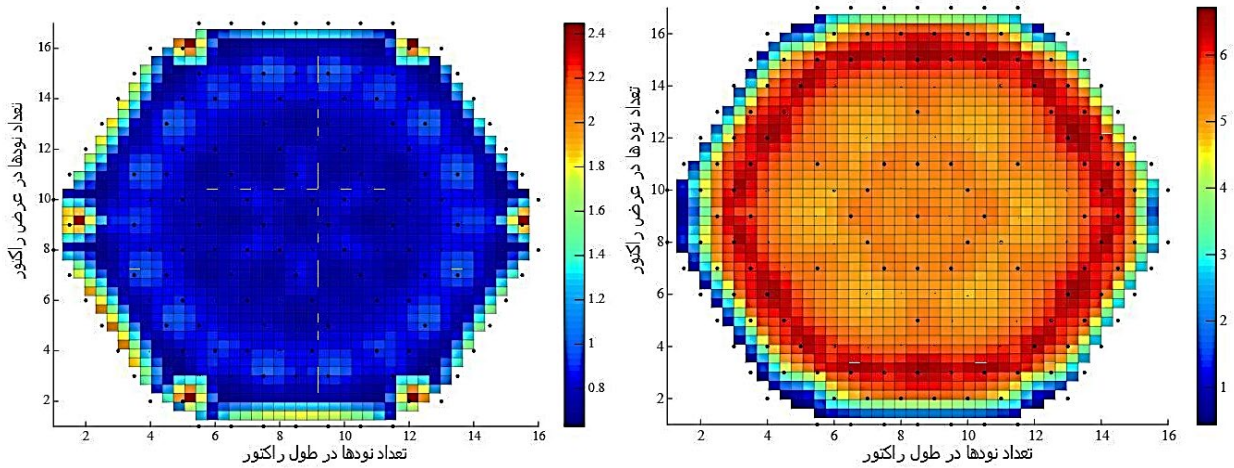
جدول ۲. ثوابت گروهی سیکل اول رآکتور بوشهر [۹]

ثوابت گروهی	بازتابنده	FA۳۶B۳۶	FA۲۴B۳۶	FA۲۴B۲۰	FA۳۶	FA۲۴	FA۱۶
$D_1(cm)$	۱٫۶۰۴۳	۱٫۴۳۵۳	۱٫۴۳۱۵	۱٫۴۳۱	۱٫۳۷۱	۱٫۳۴۵	۱٫۳۴۱
$D_2(cm)$	۰٫۲۴۹۴	۰٫۳۹۹۹	۰٫۴۰۵۷	۰٫۴۰۷۷	۰٫۴۳۲	۰٫۴۵۶	۰٫۴۶۳
$V\Sigma_{f,1}(cm^{-1})$	۰٫۰	۰٫۰۰۷۴۰	۰٫۰۰۵۸۶۱	۰٫۰۰۵۸۶۷	۰٫۰۰۸۱	۰٫۰۰۶۶	۰٫۰۰۵۳
$V\Sigma_{f,2}(cm^{-1})$	۰٫۰	۰٫۱۵۲۱۹	۰٫۱۱۰۴	۰٫۱۱۰۳	۰٫۱۷۸۳	۰٫۱۳۴۸	۰٫۰۹۵۲
$\Sigma_{a,1}(cm^{-1})$	۰٫۰۰۰۴۷۱	۰٫۰۱۰۴	۰٫۰۰۹۷	۰٫۰۰۹۶	۰٫۰۱۱۱	۰٫۰۱۰۶	۰٫۰۱۰۰
$\Sigma_{a,2}(cm^{-1})$	۰٫۰۱۲۰۴۵	۰٫۱۰۴۸	۰٫۰۸۷۷	۰٫۰۸۴۱	۰٫۱۰۹۰	۰٫۰۸۸۵	۰٫۰۷۰۴
$\Sigma_{s,12}(cm^{-1})$	۰٫۰۴۱۹۵۸	۰٫۰۱۳۹	۰٫۰۱۴۱	۰٫۰۱۴۲	۰٫۰۱۱۴	۰٫۰۱۰۷	۰٫۰۱۱۱

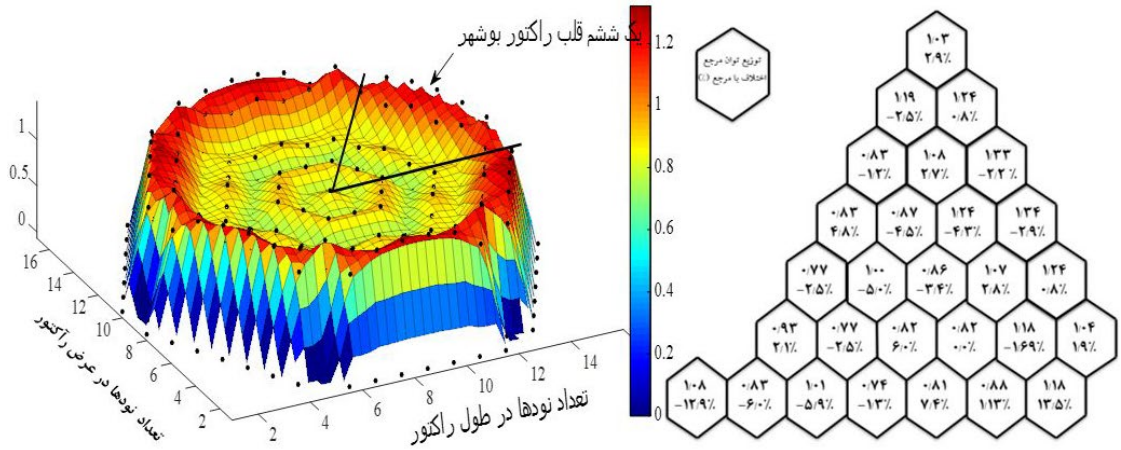
۶. نتایج و بحث

به‌منظور شبیه‌سازی نوترونی قلب رآکتور، شرط مرزی به‌صورت شرط مرزی خلأ[1] 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^{4}HC 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.

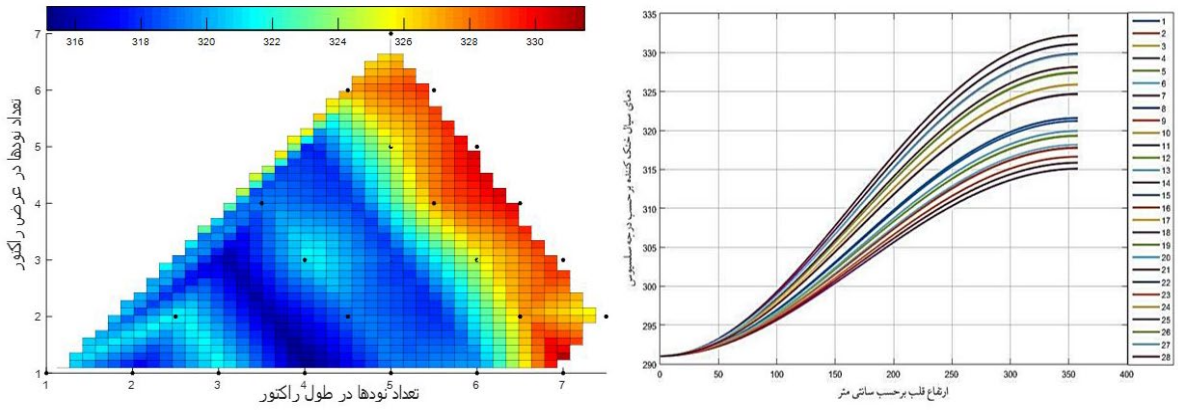
1. Vacuum Boundary Condition



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].



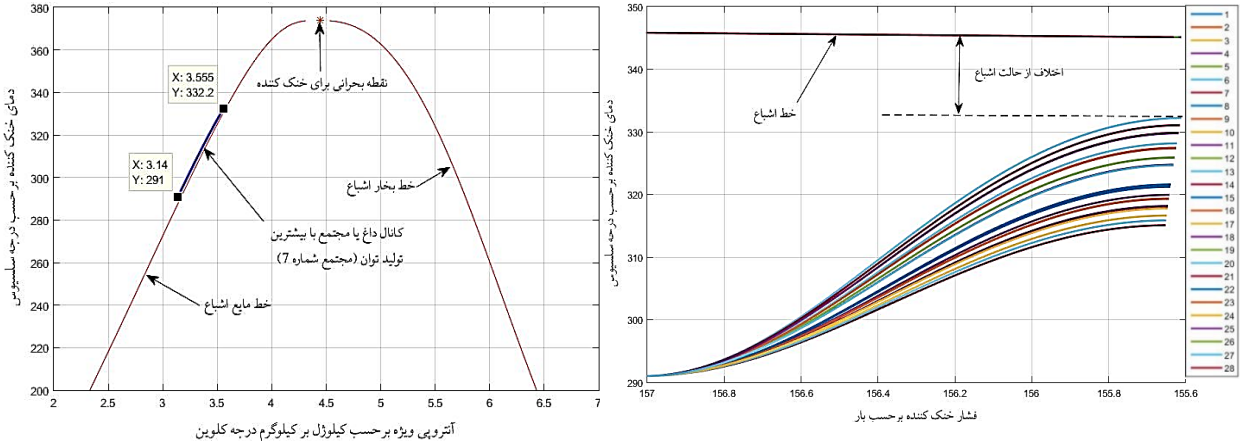
شکل ۵. توزیع دمای خنک‌کننده در راستای محوری (الف) و خروجی کانال (ب).

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 ازجمله کانال داغ با استفاده از نمودار دما- آنتروپی ویژه (چپ) و نمودار دما فشار (راست) مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در این شکل(چپ) قابل‌مشاهده است سیال به حالت اشباع نمی‌رسد چراکه در ناحیه سمت چپ خط مایع اشباع قرار گرفته و حاشیه

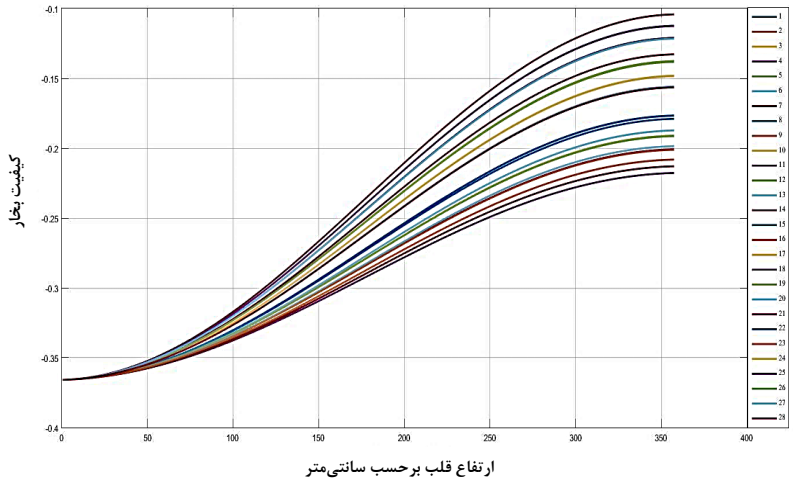
امنی با شرایط جوشش دارد. مطابق انتظار با افت فشار در طول کانال، دمای اشباع نیز کاهش می‌یابد که در منحنی‌های شکل ۶ (راست) به‌وضوح مشاهده می‌شود. برای بهتر نشان دادن این موضوع، با استفاده از کیفیت بخار تعریف‌شده در رابطه ۹، نمودار کیفیت در شکل ۷ برای یک‌ششم قلب رسم شده است.

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 رآکتورهای آب سبک تحت‌فشار، آب سیال تراکم‌پذیر است و استفاده از خواص میانگین ازجمله پارامتر چگالی می‌تواند خطای زیادی را در تحلیل‌ها وارد کند.

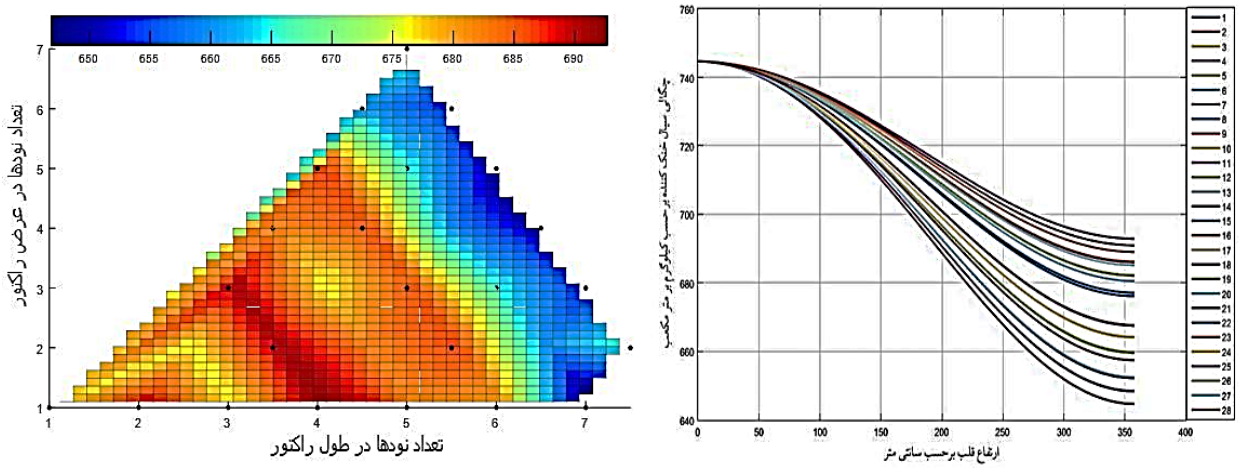
هم‌چنین با توجه به شار جرمی ثابت سیال خنک‌کننده می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش چگالی در طول کانال، سرعت خنک‌کننده باید صعودی باشد که در شکل ۹ روند افزایش سرعت خنک‌کننده در طول کانال و توزیع سرعت در خروجی کانال‌ها در یک‌ششم قلب به‌وضوح قابل‌مشاهده است. با توجه به وجود عوامل مختلف کاهنده فشار در طول کانال ازجمله 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 (مجتمع سوخت شماره ۷) به دلیل انتقال حرارت بالا باید کم‌ترین فشار را در خروجی داشته باشد.



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

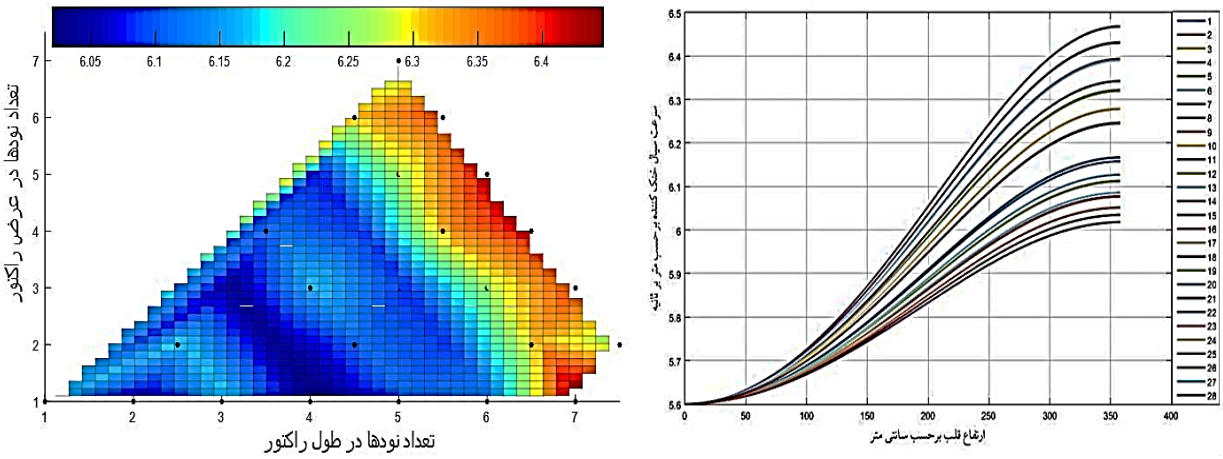


شکل ۷. توزیع کیفیت تعادلی در طول کانال.



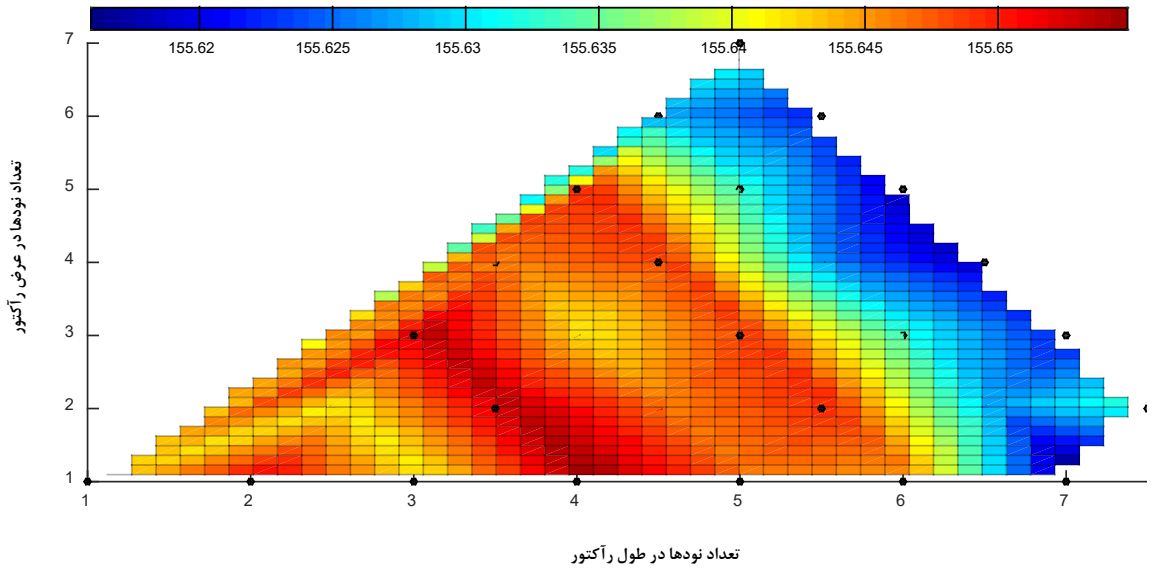
(ب) (الف)

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



(ب) (الف)

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



شکل ۱۰. توزیع فشار خنک‌کننده در خروجی کانال‌ها.

۷. نتیجه‌گیری

امروزه اهمیت نرم‌افزارهای محاسباتی به‌منظور تحلیل نوترونی- ترموهیدرولیکی در مباحث طراحی یا شبیه‌سازی قلب رآکتورهای هسته‌ای غیرقابل‌انکار هست. با توجه به وجود نیروگاه هسته‌ای بوشهر به‌عنوان اولین نیروگاه هسته‌ای کشور، بررسی پارامترهای مختلف رآکتور این نیروگاه برای متخصصین کشور بسیار حائز اهمیت است و در این راستا سعی می‌شود تا نرم‌افزارهای بهینه (از نظر زمان و حجم محاسبات) برای تحلیل قلب این رآکتور توسعه داده شوند.

در این پژوهش نرم‌افزار S^4HC به‌منظور تحلیل پایای ترموهیدرولیکی قلب رآکتورهای آب سبک تحت‌فشار توسعه داده شد. به‌منظور تحلیل پایای قلب رآکتور بوشهر پس از به دست آوردن توزیع توان نسبی از محاسبات نوترونی توسط نرم‌افزار SH^3-ACNEM، تحلیل ترموهیدرولیکی سیال خنک‌کننده توسط نرم‌افزار S^4HC انجام شد.

با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای ترموهیدرولیکی در همه کانال‌ها در محدوده مجاز خود قرار دارند و در کانال مربوط به مجتمع سوخت داغ رآکتور، جریان سیال با حاشیه ایمنی خوبی در حالت تک‌فازی است. با توجه به تحلیل انجام‌شده نتیجه شد که بیش‌ترین میزان تولید گرما در کانال شماره ۷ می‌باشد و دمای خروجی سیال خنک‌کننده 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 به‌تبع آن کم‌ترین دمای اشباع (۳۴۵٫۱ درجه سلسیوس) را دارد.

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/6652df6a65abbfee32f6168bf4782a19.
2. Kolali A, Naghavi Dizaji D, Vosoughi N. Development of the S^3-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 SH^3-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. BrkiÄ 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.

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 مجتمع‌های سوخت رآکتور هسته‌ای بوشهر با استفاده از روش نودال بسط شار و تک‌کانال گرم‌شونده. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۰۹(۳)، ۱۳-۲۱. DOI: https://doi.org/10.24200/nst.2020.548.1369
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1632.html