بررسی مقایسه‌ای ضرایب فیدبک راکتیویته دمایی در یک راکتور هسته‌ای آب تحت فشار با خنک‌کننده نانوسیال آلومینا (Al_2O_3) و تیتانیا (TiO_2)

رضا کیانپور، غلامرضا انصاری‌فر*

دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

*Email: ghr.ansarifar@ast.ui.ac.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۲/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۷/۵

چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از درصد‌های حجمی مختلف و اندازه‌های متفاوت نانوذرات TiO_2 (تیتانیا) و Al_2O_3 (آلومینا)، پارامترهای مهم و اساسی راکتور VVER-1000، از جمله پارامترهای دینامیکی راکتور (نظیر ضرایب راکتیویته دمایی)، که نقش مهمی در تحلیل دینامیکی راکتور و الزامات ایمنی قلب ایفا می‌کنند، محاسبه شده است. به این منظور، ابتدا سلول معادل میله سوخت و نانوسیال خنک‌کننده اطراف آن در مجتمع سوخت شش‌ضلعی راکتور VVER-1000 تعیین شد. سپس محاسبات ترموهیدرولیک در غلظت و اندازه‌های مختلف نانوذره توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز ANSYS FLUENT انجام شده و تأثیر آنان بر پارامترهای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، دمای سوخت و خنک‌کننده محاسبه گردید. در ادامه با استفاده از کدهای محاسبات نوترونیک WIMS و CITATION، قلب راکتور شبیه‌سازی شده و تأثیر تغییرات دمای نانوسیال خنک‌کننده و سوخت بر فاکتور ضریب تکثیر مؤثر محاسبه و تحلیل شد. بر این اساس، ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و خنک‌کننده تعیین گردید. این ضرایب با تغییرات غلظت و اندازه نانوذرات در سیال خنک‌کننده محاسبه شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: راکتور آب تحت فشار، نانوسیال، ضرایب راکتیویته دمایی، آنالیز نوترونیک، آنالیز ترموهیدرولیک، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

Comparative investigation of temperature reactivity feedback coefficients in a pressurized water reactor (PWR) with Alumina (Al_2O_3) and Titania (TiO_2) nano-fluids as coolant

R. Kianpour, G.R. Ansarifar*

Faculty of Physics, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan-Iran

Technical Paper

Received 7.12.2020, Accepted 15.3.2021

Abstract

In the present work, using different volume percentages and different sizes of TiO_2 (Titania) and Al_2O_3 (Alumina) nanoparticles, the important and essential parameters of VVER-1000 reactor, including dynamic parameters of the reactor (such as temperature reactivity coefficients) that play an important role in reactor dynamic analysis and core safety requirements are calculated. For this purpose, at first the equivalent cell of the fuel rod and the surrounding coolant nanofluid in the hexagonal fuel cell of the VVER-1000 reactor is determined. After that, thermohydraulic calculations are performed using the ANSYS FLUENT simulator software in different concentrations and sizes of nanoparticles to study their effect on the heat transfer coefficient, fuel, and coolant temperature parameters. Then, using WIMS and CITATION neutron computing codes, the reactor core is simulated. The effect of coolant nanofluid and fuel temperature changes on the effective multiplication factor is calculated and analyzed. The fuel and coolant temperature reactivity coefficients are determined. These coefficients are calculated by varying the concentration and size of nanoparticles in the coolant.

Keywords: Pressurized water reactor (PWR), Nano fluid, Temperature reactivity coefficients, Neutronics analysis, Thermal hydraulic analysis, Heat transfer coefficient

۱. مقدمه

یکی از ابزارهای توفیق در مسیر توسعه صنعتی، گسترش واحدهای بهره‌برداری و فرایندی و کمک گرفتن از فن‌آوری‌های روز دنیا جهت غلبه بر چالش‌های موجود است. نمونه‌ای از چالش‌های عمده در واحدهای صنعتی، بحث انتقال حرارت در تجهیزاتی نظیر مبدل‌ها، راکتورها، ترانسفورماتورها و غیره می‌باشد. در دهه‌های اخیر، سیالات متداول نظیر آب، اتیلن گلیکول، روغن و غیره در سیستم‌های انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سیالات متداول، خواص ترموفیزیکی کافی از خود نشان نمی‌دهند که این امر موجب محدود شدن عملکرد سیستم‌های مذکور می‌شود. یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت افزایش هدایت حرارتی، افزودن جامدات در ابعاد نانومتر به سیالات است که این جامدات می‌توانند فلزات، اکسیدهای فلزی، گرافیت و یا نانولوله‌های کربنی باشند. به این سیالات انتقال حرارتی، نانوسیال گفته می‌شود [۱، ۲].

نانوسیالات، سوسپانسیونی از نانوذرات جامد هستند که از مخلوط کردن نانوذرات در مایعات مختلفی مانند آب، روغن یا اتیلن گلیکول ساخته می‌شوند و در عین پایداری بیش‌تر و افزایش کم‌تر افت فشار در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی، خواص انتقال حرارت بهتری دارند. چوی [۳]، در سال ۱۹۹۵ برای نخستین بار ایده استفاده از نانوسیالات در سیستم‌های انتقال حرارت را مطرح کرد. نانوسیالات به دلیل دارا بودن خواص ترموهیدرولیکی بهبود یافته نسبت به سیال خالص، امکان و استعداد استفاده‌های فراوانی دارند؛ از جمله در صنایع هسته‌ای و در نیروگاه‌های هسته‌ای جهت بهبود انتقال حرارت، کاهش حجم راکتور، افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌های ساخت نیروگاه می‌توان از آن‌ها بهره برد [۴].

در راکتورهای هسته‌ای به دلیل انجام فرایند شکافت هسته‌ای، میزان حرارت تولید شده درون راکتور به مقدار خیلی زیادی افزایش یافته و این حرارت تولید شده باید با سرعت و نرخ بسیار بالایی توسط یک سیال خنک‌کننده از راکتور خارج شود. از این‌رو سیستم‌های انتقال حرارت دارای کاربرد عمده‌ای در خنک‌کاری راکتورهای اتمی می‌باشند. رایج‌ترین سیالی که وظیفه خنک‌کاری راکتور را بر عهده دارد، آب است. این سیال دارای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی پایینی بوده و به‌منظور خنک‌کاری راکتور، باید سرعت جریان در سیکل افزایش یابد. این مسئله نیازمند به‌کارگیری پمپ‌های بزرگ‌تر و صرف هزینه بیش‌تر جهت مصرف پمپ‌ها است. با توجه به این‌که تولید انرژی مسئله‌ای حائز اهمیت می‌باشد، پژوهشگران به دنبال دستیابی به توان تولیدی بیش‌تر در راکتورهای هسته‌ای هستند. با پیشرفت تکنولوژی در زمینه نانوسیالات، امکان دستیابی به توان تولیدی بیش‌تر در راکتور فراهم شده است. هو و بونگیورنو [۵] بررسی‌هایی بر روی جایگزینی سیال خنک‌کننده راکتور هسته‌ای با نانوسیالات انجام داده‌اند. آن‌ها یک نیروگاه هسته‌ای

آب تحت فشار ساخت شرکت وستینگ‌هاوس را مورد بررسی قرار دادند. در بررسی انجام شده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در درصدهای حجمی ۰.۰۱٪ و ۰.۱٪ استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که با ثابت در نظر گرفتن جوشش هسته‌ای و با استفاده از نانوسیال ۱۰ تا ۲۰ درصد، دمای خروجی از راکتور هسته‌ای در مقایسه با آب بیش‌تر بوده و هم‌چنین میزان توان تولید شده در راکتور ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

مطالعه ضرایب فیدبک دمایی یک راکتور هسته‌ای یک روش مهم برای افزایش اطمینان در طول دوره کاری آن است [۶، ۷]. با توجه به اهمیت بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال به‌عنوان خنک‌کننده بر این پارامترهای دینامیکی، در پژوهش حاضر مقایسه بین این ضرایب، که نقش مهمی در تحلیل دینامیکی و ایمنی راکتور VVER-۱۰۰۰ دارند، انجام شد. این تحقیق در راستای فعالیت‌های تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران می‌باشد.

۲. روش‌ها و ابزارها

۲.۲ مدل‌های تئوری نانوسیال

برای چگالی مؤثر نانوسیال از رابطه زیر استفاده شده است [۸]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (1)$$

در این رابطه ρ_{nf} ، ρ_f و ρ_p به ترتیب چگالی نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات و هم‌چنین ϕ درصد حجمی نانوذره است.

گرمای ویژه نانوسیال از رابطه زیر به دست می‌آید [۹]:

$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

در این پژوهش، برای ویسکوزیته نانوسیال از رابطه زیر استفاده شده است [۱۰]:

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \cdot \mu_{bf} \quad (3)$$

نظریه‌های زیادی برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه شده است. در مدل چون [۱۱] که اثر حرکت براونی، شکل و اندازه نانوذرات و سیال پایه مورد بررسی قرار گرفت، از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{64}{3} \phi \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{1/3} \times \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{1/4} \text{Pr}_f^{1/4} \text{Re}_p^{1/4} \quad (4)$$

که در آن $\text{Pr} = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f}$ عدد پراوتل و $\text{Re} = \frac{\rho_f k T}{3 \pi \mu_f \lambda_f}$ عدد رینولدز که α_f ضریب پخش حرارتی، k_b ثابت بولتزمن و λ_f مسافت آزاد میانگین ملکول‌های آب و $d_f = \left(\frac{6M}{N \pi \rho_f} \right)^{1/3}$ قطر معادل سیال پایه (N عدد آووگادرو و ρ_f چگالی سیال پایه در دمای ۲۹۳ K) است.

برای به دست آوردن ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه ۵ استفاده شده است:

$$\dot{m} c_{p,nf} \Delta T_{nf} = h A \Delta T_F \quad (5)$$

شکل ۱. قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ و نحوه چیدمان مجتمع‌های سوخت [۱۲].

جدول ۱. مشخصات رآکتور

مقدار	قلب رآکتور و مشخصات اجزا
	مجتمع سوخت
شش‌ضلعی	شکل مجتمع سوخت
۱۶۳	تعداد مجتمع سوخت در قلب
۲۳.۶	گام بین مجتمع‌های سوخت (cm)
۳۱۱	تعداد میله‌های سوخت در مجتمع سوخت
۳.۵۳	طول فعال میله (m)
۱.۱۶، ۲.۴ و ۳.۶٪	غناي مجتمع سوخت تازه
	میله سوخت
۱.۵	قطر حفره در قرص سوخت (mm)
۷.۵۷	قطر خارجی قرص سوخت (mm)
۷.۷۳	قطر داخلی غلاف (mm)
۹.۱	قطر خارجی غلاف (mm)
۱۲.۷۵	گام بین میله‌های سوخت (mm)
UO ₂	مواد قرص سوخت
Alloy Zr + ۱٪ Nb	مواد غلاف

شکل ۳. نمایی از قلب رآکتور شبیه‌سازی شده توسط کد CITATION.

شکل ۲. مجتمع سوخت طراحی شده در کد WIMS.

شکل ۴. سلول معادل.

شکل ۶. مش‌بندی طراحی شده در Ansys Workbench.

شکل ۵. هندسه طراحی شده در Ansys Workbench.

که در آن m نرخ جریان جرمی نانوسیال که با توان متغیر است و A سطح انتقال حرارت است.

۲.۲ رآکتور VVER-۱۰۰۰

نیروگاه هسته‌ای بوشهر با قدرت ۱۰۰۰ MW الکتریکی دارای رآکتور هسته‌ای آب تحت فشار به قدرت ۳۰۰۰ MW حرارتی است که از دو مدار اولیه و ثانویه تشکیل شده است. قلب رآکتور هسته‌ای بوشهر از نوع PWR است که آب سبک هم‌زمان دو وظیفه خنک‌کنندگی و کندکنندگی را برعهده دارد [۱۲]. مقطع عرضی قلب رآکتور در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصات رآکتور نیز در جدول ۱ ارایه شده است.

برای انجام محاسبات نوترونیک در قلب رآکتور، شبیه‌سازی رآکتور ضروری است. برای این منظور قدم اول محاسبه سلولی، که مجتمع سوخت قلب رآکتور شبیه‌سازی می‌کند. محاسبه سلولی در مجتمع‌های سوخت با غناهای مختلف با استفاده از کد WIMS در مدل خوشه‌ای انجام می‌شود [۱۳]. شکل ۲ نشان‌دهنده مجتمع سوخت طراحی شده در کد WIMS است.

۳.۲ شبیه‌سازی قلب

مرحله دوم محاسبات نوترونیک، محاسبات قلب رآکتور و شبیه‌سازی آن است. این کار با استفاده از کد CITATION با استفاده از ثابت‌های گروهی حاصل از کد WIMS انجام شد. با تعریف هندسه سه‌بعدی برای قلب رآکتور، معادله پخش نوترون در فضای سه‌بعدی با روش finite-difference حل شد. در کد CITATION، هندسه قلب به‌طور کامل شبیه‌سازی شده است؛ به‌طوری‌که هر مجتمع سوخت به ۷ مش تقسیم شده و در کنار هم قرار گرفته‌اند. نمایی از قلب رآکتور شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴.۲ طراحی مجتمع سوخت

برای مجتمع سوخت شش‌ضلعی با مشخصات اشاره شده در جدول ۱ و طبق رابطه زیر (R_{cell} شعاع سلول معادل و P گام شبکه) [۱۴] یک سلول معادل به‌دست آمد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$R_{cell} = P \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi}} \quad (6)$$

برای تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی سلول به‌دست آمده، یک کد CFD استفاده شده است. شکل ۵ سلول معادل در نرم‌افزار ANSYS FLUENT و شکل ۶ مش‌بندی سلول، که شامل ۳ میلیون مش است، را نشان می‌دهند.

جدول ۲. مقایسه ضریب تکثیر مؤثر با پژوهش قبلی

ضریب تکثیر مؤثر	نتیجه به‌دست آمده	۱/۰۶
آب خالص	نتیجه مرجع [۱۶]	۱/۰۷
درصد خطا		۱

جدول ۳. خواص فیزیکی نانوذرات

نانوذره	اسم	ρ [kg/m ³]	Cp[J/Kg.K]	Kp[W/m.K]
Al ₂ O ₃	آلومینا	۳۹۰۰	۸۸۰	۳۰
TiO ₂	تیتانیا	۴۲۵۰	۷۱۰	۸/۴

جدول ۴. خواص فیزیکی آب خالص

اسم	ρ [kg/m ³]	μ [kg/m.s]	Cp[J/Kg.K]	Kp[W/m.K]
آب	۷۰۹	$۸/۶۱۸ \times ۱۰^{-۵}$	۵۳۲۸	۰/۵۵

۲.۶.۲ ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده:

$$\alpha_{TC} = \alpha_C \approx \frac{1}{K} \frac{dK}{dT} = \frac{d(\ln K)}{dT} \quad (10)$$

$$\alpha_{TC}(p) = -[\alpha_T(I) + \beta_M] \log \frac{1}{p} \quad (11)$$

$$\alpha_{TC}(f) = (1-f)[\alpha_T(g_{af}) + \beta_M - \alpha_T(\zeta)] \quad (12)$$

g_a فاکتور رفتار غیر- $\frac{1}{v}$ ، $\alpha_T(g_{af})$ برای سوخت اورانیم دارای مقداری کوچک است و محاسبه $\alpha_T(\zeta)$ معمولاً بسیار پیچیده و همیشه عددی منفی است. β_M ضریب انبساط حجمی خنک‌کننده بوده و در نتیجه $\alpha_{TC}(f)$ دارای مقداری مثبت است. f بهره حرارتی در رآکتور ناهمگن است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{\sum_{af} V_F}{\sum_{af} V_F + \sum_{am} V_M \zeta} \quad (13)$$

که فاکتور ضرر است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\zeta = \frac{\bar{\Phi}_M}{\bar{\Phi}_F} \quad (14)$$

Φ بیانگر شار در کندکننده و سوخت است.

۳. نتایج

محاسبات ترموهیدرولیکی برای سوخت رآکتور VVER-۱۰۰۰ در سطح توان‌های مختلف انجام شد و دمایی میانگین اجزای مختلف سوخت و خنک‌کننده گزارش شد.

۱.۳ تحلیل ترموهیدرولیکی

هدف اصلی تحلیل در این بخش، به‌دست آوردن توزیع دمایی سوخت و خنک‌کننده است که در نرم‌افزار ANSYS FLUENT محاسبه شده و از آن‌ها در تحلیل نوترونیک استفاده شده است. نمودار دمایی خنک‌کننده و سوخت در حالت ۱۰۰٪ توان کاری برای غلظت‌های مختلف حجمی و اندازه‌های مختلف برای نانوذرات آلومینا و تیتانیا در اشکال ۷-۱۰ ارائه می‌گردد. می‌توان برای توان‌های دیگر نیز چنین نموداری رسم نمود.

۵.۲ ضریب تکثیر مؤثر قلب رآکتور

نسبت تعداد نوترون‌های تازه تولید شده توسط شکافت به تعداد نوترون‌های جذب شده در قلب یا فرار کرده از رآکتور، ضریب تکثیر مؤثر است [۱۵]. چون تغییرات سطح قدرت و مواد موجود در قلب رآکتور (مخصوصاً تغییر در خواص خنک‌کننده) مستقیماً روی این ضریب تأثیرگذار است، بنابراین با افزودن نانوذرات به خنک‌کننده اثر آن بررسی می‌شود. ضریب تکثیر مؤثر در حالتی که آب خنک‌کننده باشد با نتایج پژوهش‌های قبلی [۱۶] مورد مقایسه قرار گرفت. نتیجه در جدول ۲ گزارش شده است. نانوذرات مورد استفاده در این مقاله Al₂O₃ و TiO₂ با غلظت ۰/۱٪ تا ۹٪ حجمی در سیکل اول رآکتور VVER-۱۰۰۰ شبیه‌سازی شده است. خواص فیزیکی نانوذرات در جدول ۳ و آب خالص در شرایط کاری مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است.

۶.۲ ضریب فیدبک دمایی راکتیویته

دما عوامل مؤثر در ضریب تکثیر مؤثر را تغییر می‌دهد. بنابراین تغییر در دما منجر به تغییر راکتیویته می‌شود. از آن‌جا که سوخت اولین قسمتی است که تغییر دما را احساس می‌کند، ضریب راکتیویته دمایی آن، ضریب آبی نامیده می‌شود و به عامل احتمال گریز از رزونانس (p) وابسته است. خنک‌کننده پس از سوخت تغییر دما را احساس می‌کند و از این‌رو ضریب راکتیویته دمایی آن، ضریب تأخیری نامیده می‌شود. این ضریب به دو عامل احتمال گریز از رزونانس و بهره حرارتی (f) وابسته است. با توجه به اهمیت این ضرایب برای ایمنی، برای سوخت و خنک‌کننده به‌صورتی که در ادامه آمده، محاسبه می‌شوند [۱۵].

۱.۶.۲ ضریب راکتیویته دمایی سوخت:

$$\alpha_{TF} = \alpha_{TF}(p) \approx \frac{1}{K} \frac{dK}{dT} = \frac{1}{p} \frac{dp}{dT} = \frac{d(\ln p)}{dT} = -\alpha_T(I) \log \frac{1}{p} = -\frac{\gamma}{\sqrt{T}} \log \frac{1}{p(T_o)} \quad (7)$$

K ، ضریب تکثیر مؤثر و p احتمال گریز از رزونانس است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$p = \exp\left(-\frac{N_F V_F I}{\xi_M \sum_{SM} V_M}\right) \quad (8)$$

N_F چگالی اتمی سوخت، V_F و V_M به‌ترتیب حجم سوخت و کندکننده، $\xi_M \sum_{SM}$ توان کندکنندگی کندکننده و I انتگرال رزونانسی است.

$$I(T) = I(T_o) \left[1 + \gamma(\sqrt{T} - \sqrt{T_o})\right] \quad (9)$$

T دما سوخت و γ تابعی تقریباً خطی از نسبت سطح به جرم سوخت و $T_o = 300$ K است.

شکل ۷. تغییرات دمای نانوسیال خنک‌کننده آلومینا برحسب ارتفاع میله سوخت در اندازه ۱۰ nm و غلظت‌های مختلف.

شکل ۸. تغییرات دما نانوسیال خنک‌کننده تیتانیا برحسب ارتفاع میله سوخت در اندازه ۱۰ nm و غلظت‌های مختلف.

شکل ۹. تغییرات دما مرکز سوخت بر حسب ارتفاع در اندازه ۱۰ nm و غلظت‌های مختلف نانوسیال خنک‌کننده آلومینا.

شکل ۱۰. تغییرات دما مرکز سوخت بر حسب ارتفاع در اندازه ۱۰ nm و غلظت‌های مختلف نانوسیال خنک‌کننده تیتانیا.

شکل ۱۱. تغییرات دمای نانوسیال خنک‌کننده آلومینا بر حسب ارتفاع میله سوخت در غلظت ۱٪ حجمی و اندازه‌های مختلف.

شکل ۱۲. تغییرات دمای نانوسیال خنک‌کننده تیتانیا بر حسب ارتفاع میله سوخت در غلظت ۱٪ حجمی و اندازه‌های مختلف.

شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که با افزایش فاصله از ورودی کانال، دمای خنک‌کننده بیش‌تر می‌شود. با افزودن نانوذره نیز دمای نانوسیال تولید شده از سیال پایه بیش‌تر می‌شود. هم‌چنین در یک اندازه مشخص، با افزایش غلظت دمای خنک‌کننده بیش‌تر خواهد شد. زیرا طبق رابطه ۲، هرچه غلظت افزایش یابد، ظرفیت گرمایی نانوسیال کاهش می‌یابد. هم‌چنین طبق رابطه ۴، در یک اندازه مشخص، با افزایش غلظت، ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. از این دو نمودار می‌توان فهمید که دمای خنک‌کننده نانوسیال تیتانیا در شرایط برابر بیش‌تر از آلومینا است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که رفتار تغییرات دمای سوخت با افزودن نانوذره به سیال پایه نامنظم است. به این صورت که در غلظت‌های پایین (تا ۵٪ حجمی) دمای سوخت نسبت به زمانی که خنک‌کننده آب باشد، کم‌تر است ولی در غلظت‌های بالاتر دمای مرکز سوخت بالاتر می‌رود. زیرا با افزایش غلظت طبق رابطه ۳، لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد و سرعت حرکت آن کم‌تر شده و در نتیجه برداشت گرما آن کم‌تر خواهد شد. از این دو نمودار می‌توان فهمید که دمای سوخت زمانی که خنک‌کننده نانوسیال تیتانیا باشد، بیش‌تر از زمانی است که خنک‌کننده آلومینا باشد.

نمودار دمای خنک‌کننده و سوخت در حالت ۱۰۰٪ توان کاری برای غلظت ۱٪ حجمی و اندازه‌های مختلف برای نانوذرات آلومینا و تیتانیا در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ مشاهده می‌گردد.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند که در حالت کلی با افزودن نانوذره به سیال، دمای خنک‌کننده افزایش می‌یابد. زیرا طبق معادلات ۲ و ۴، با افزودن نانوذره ظرفیت گرمایی ویژه آن کاهش یافته و ضریب هدایت گرمایی نانوسیال افزایش می‌یابد. ولی در یک غلظت مشخص با افزایش اندازه، دمای آن کاهش می‌یابد، زیرا طبق رابطه ۴، در یک غلظت مشخص با افزایش اندازه، ضریب هدایت حرارتی کاهش می‌یابد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند که در یک غلظت خاص، با کاهش اندازه نانوذره دمای مرکز سوخت کم‌تر می‌شود، زیرا طبق رابطه ۴، در یک غلظت مشخص هرچه اندازه کوچک‌تر شود، ضریب هدایت حرارتی بزرگ‌تر می‌شود. پس برداشت گرمای نانوسیال افزایش یافته و دمای آن زیادتر می‌شود. در نتیجه سوخت خنک‌تر خواهد شد.

مشاهده می‌گردد که با افزایش دما، رفتار کاهشی است. شیب این نمودار بیان‌گر ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده است. که به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\ln K_{eff} = -1.7489 \times 10^{-5} T_c + 0.148$$

$$\alpha_c = \frac{1}{K_{eff}} \frac{\partial K_{eff}}{\partial T_c} = \frac{\partial \ln K_{eff}}{\partial T_c} = -1.7489 \times 10^{-5} \left(\frac{\delta K}{K} \right) = -1.7489 \left(\frac{p.c.m}{^{\circ}K} \right)$$

بنابراین ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده آلومینا در غلظت ۱٪ و اندازه ۱۰ nm برابر -1.7489×10^{-5} است.

اما برای دقت بیش‌تر در محاسبه این ضریب باید آن را در هر سطح توان جداگانه محاسبه کرد. برای انجام این کار با استفاده از دستور Curve Fitting در MATLAB، بهترین نمودار بر این داده‌ها برازش می‌شود (شکل ۱۷) و شیب آن در هر توان (دما) محاسبه می‌گردد. میانگین اعداد به‌دست آمده (-2.08188×10^{-5}) برابر ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۱۵. تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برحسب درصد حجمی نانوسیال آلومینا در اندازه ۱۰ nm و توان ۱۰٪.

شکل ۱۶. لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر برحسب دما نانوسیال خنک‌کننده آلومینا در غلظت حجمی ۱٪ و اندازه ۱۰ nm.

شکل ۱۷. ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده در غلظت ۱٪ حجمی و اندازه ۱۰ nm.

شکل ۱۳. تغییرات دمای سوخت بر حسب ارتفاع در غلظت ۱٪ حجمی و اندازه‌های مختلف خنک‌کننده آلومینا.

شکل ۱۴. تغییرات دما سوخت بر حسب ارتفاع در غلظت ۱٪ حجمی و اندازه‌های مختلف خنک‌کننده تیتانیا.

جدول ۵ نشان‌دهنده میانگین دمای خنک‌کننده و سوخت در توان ۱۰٪ در اندازه و غلظت‌های مختلف نانوسیال آلومینا و تیتانیا است و نشان می‌دهد در حالتی که خنک‌کننده نانوسیال آلومینا باشد، دمای سوخت و خنک‌کننده کم‌تر از حالتی است که خنک‌کننده تیتانیا باشد. می‌توان چنین جدولی برای سایر توان‌ها نیز ارایه کرد.

۲.۳ تحلیل نوترونیک

در این بخش میانگین دماهای به‌دست آمده در قسمت قبل به‌عنوان دماهای موردنظر، در نظر گرفته می‌شوند و در کد WIMS قرار داده شده و سطح مقطع‌های مورد نیاز برای کد CITATION جهت به‌دست آوردن ضریب تکثیر مؤثر (K_{eff}) در پارامترهای مختلف توان، غلظت و اندازه تولید می‌گردد.

شکل ۱۵ نشان‌دهنده تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برحسب غلظت حجمی نانوسیال آلومینا در اندازه ۱۰ nm و توان ۱۰٪ است. در ابتدا به‌دلیل افزودن نانوذره، اثر پراکندگی غالب می‌شود. زیرا عامل $\sum_{SM} V_M$ در رابطه ۸ افزایش یافته و منجر به افزایش توان کندکنندگی شده و احتمال گریز از رزونانس افزایش می‌یابد. در نتیجه ضریب تکثیر مؤثر افزایش می‌یابد. پس از غلظت ۱٪ حجمی، دمای سوخت افزایش یافته و انتگرال رزونانسی در رابطه ۸ افزایش می‌یابد؛ در نتیجه احتمال گریز از رزونانس کاهش خواهد یافت. هم‌چنین دمای خنک‌کننده نیز افزایش می‌یابد و قدرت پراکندگی آن کم‌تر می‌شود؛ هم‌چنین جذب بیش‌تر شده و عامل بهره حرارتی (رابطه ۱۳) کم می‌شود؛ پس ضریب تکثیر مؤثر به تدریج کاهش می‌یابد.

اگر لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر ($\ln K_{eff}$) برحسب دمای خنک‌کننده نانوسیال آلومینا (T_c) رسم شود (شکل ۱۶)،

بهره حرارتی کم می‌شود. در نتیجه طبق رابطه ۱۲، اندازه ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده افزایش می‌یابد.

شکل ۲۱ نشان می‌دهد که با افزایش اندازه، دمایی خنک‌کننده کاهش می‌یابد و پراکندگی بیش‌تر می‌شود. در نتیجه احتمال فرار از رزونانس (p) بزرگ‌تر شده و اندازه ضریب دمایی خنک‌کننده کوچک‌تر می‌شود. با افزایش بیش‌تر اندازه دما سوخت بیش‌تر می‌شود و انتگرال رزونانسی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه احتمال فرار از رزونانس کوچک‌تر شده و اندازه ضریب دمایی خنک‌کننده بزرگ‌تر می‌شود.

شکل ۱۸. لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر برحسب دمای سوخت در غلظت حجمی ۱٪ و اندازه ۱۰ nm (خنک‌کننده آلومینا).

شکل ۱۹. ضریب راکتیویته دمایی سوخت در غلظت ۱٪ حجمی و اندازه ۱۰ nm (خنک‌کننده آلومینا).

شکل ۲۰. ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده بر حسب غلظت‌های حجمی مختلف.

شکل ۲۱. ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده بر حسب اندازه نانوذر.

جدول ۵. دمای خنک‌کننده و سوخت در توان ۱۰۰٪

کسر حجمی (%)	اندازه (nm)	TiO ₂		AL ₂ O ₃	
		دمای سوخت (K)	دمای خنک‌کننده (K)	دمای سوخت (K)	دمای خنک‌کننده (K)
۰.۱	-	۱۰۱۴,۴۴۲۱	۵۷۶,۶۸۰۲۴	۱۰۱۴,۴۴۲۱	۵۷۶,۶۸۰۲
	۱۰	۱۰۱۴,۱۳۰۷	۵۷۶,۷۴۶۴	۱۰۱۳,۴۱۴۶	۵۷۶,۷۳۸۹۹
	۳۰	۱۰۱۴,۲۶۲۶	۵۷۶,۷۴۶۳۵	۱۰۱۳,۷۲۲۳	۵۷۶,۷۳۸۹۹
	۶۰	۱۰۱۴,۳۲۴۹	۵۷۶,۷۴۶۳	۱۰۱۳,۸۷۹۹	۵۷۶,۷۳۸۸۳
۱	۹۰	۱۰۱۴,۳۵۵۲	۵۷۶,۷۴۶۲۴	۱۰۱۳,۹۵۹۶	۵۷۶,۷۳۸۷۹
	۱۰	۱۰۱۳,۸۵۸	۵۷۷,۳۴۱۸۴	۱۰۱۳,۳۴۷۵	۵۷۷,۳۶۵۹۷
	۳۰	۱۰۱۴,۲۷۰۹	۵۷۷,۳۴۱۵۶	۱۰۱۳,۸۳۸۲	۵۷۷,۳۶۵۲۵
	۶۰	۱۰۱۴,۴۹۵۶	۵۷۷,۳۴۱۴۸	۱۰۱۳,۱۴۹۷	۵۷۷,۳۶۵۰۱
۳	۹۰	۱۰۱۴,۶۱۳۸	۵۷۷,۳۴۱۱۲	۱۰۱۳,۳۲۸۶	۵۷۷,۳۶۴۸
	۱۰	۱۰۱۴,۹۶۸۳	۵۷۸,۶۷۳۷۳	۱۰۱۳,۱۹۲۴	۵۷۸,۴۳۹۸۷
	۳۰	۱۰۱۵,۴۹۰۴	۵۷۸,۶۷۳۳۹	۱۰۱۳,۶۴۶۱	۵۷۸,۴۳۸۱
	۶۰	۱۰۱۵,۸۰۸۶	۵۷۸,۶۷۳۱۱	۱۰۱۳,۹۵۹۳	۵۷۸,۴۳۷۳۴
۵	۹۰	۱۰۱۵,۹۸۶۷	۵۷۸,۶۷۳۰۱	۱۰۱۴,۱۳۹۹	۵۷۸,۴۳۶۸۶
	۱۰	۱۰۱۶,۵۳۳۲	۵۸۰,۰۱۵۳۹	۱۰۱۴,۵۹۷۳	۵۷۹,۶۱۷۹۳
	۳۰	۱۰۱۷,۰۷۹۶	۵۸۰,۰۱۴۴	۱۰۱۵,۰۴۸	۵۷۹,۶۱۵۲۲
	۶۰	۱۰۱۷,۴۳۲۹	۵۸۰,۰۱۳۹۱	۱۰۱۵,۳۵۴۶	۵۷۹,۶۱۳۹۸
۸	۹۰	۱۰۱۷,۶۳۶۲	۵۸۰,۰۱۳۷	۱۰۱۵,۵۴۲۵	۵۷۹,۶۱۳۴۴
	۱۰	۱۰۱۹,۰۹۵۸	۵۸۲,۰۵۰۶۵	۱۰۱۶,۷۵۱۹	۵۸۱,۳۹۵۰۸
	۳۰	۱۰۱۹,۶۸۲۴	۵۸۲,۰۴۸۸۶	۱۰۱۷,۲۱۸۲	۵۸۱,۳۹۰۶۳
	۶۰	۱۰۲۰,۰۶۷۲	۵۸۲,۰۴۸۰۸	۱۰۱۷,۵۳۰۱	۵۸۱,۳۸۸۴۵
۱۰	۹۰	۱۰۲۰,۲۹۳۹	۵۸۲,۰۴۸۶۲	۱۰۱۷,۷۲۱۷	۵۸۱,۳۸۷۵
	۱۰	۱۰۲۰,۸۷۴۹	۵۸۳,۳۲۲۰۹	۱۰۱۸,۲۱۹۳	۵۸۳,۵۹۶۰۹
	۳۰	۱۰۲۱,۴۸۲۶	۵۸۳,۴۱۹۶۹	۱۰۱۸,۷۰۶۲	۵۸۳,۵۸۰۳۹
	۶۰	۱۰۲۱,۸۸۵۲	۵۸۳,۴۱۸۶۲	۱۰۱۹,۰۳۰۴	۵۸۳,۵۷۷۶۱
	۹۰	۱۰۲۲,۱۲۴۴	۵۸۳,۴۱۸۱۲	۱۰۱۹,۲۲۶۱	۵۸۳,۵۷۶۳۳

اگر لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر برحسب دمای سوخت (T_F) رسم شود (شکل ۱۸)، شیب این نمودار بیان‌گر ضریب راکتیویته دمایی سوخت است که به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$LnK_{eff} = -۱,۱۶۸۵ \times ۱۰^{-۶} T_F + ۰,۱۳۸۸$$

$$\alpha_F = \frac{1}{K_{eff}} \frac{\partial K_{eff}}{\partial T_F} = \frac{\partial LnK_{eff}}{\partial T_F} = -۱,۱۶۸۵ \times ۱۰^{-۶} \left(\frac{\delta K}{\delta T_F} \right) = -۰,۱۱۶۸۵ \left(\frac{p.c.m}{^{\circ}K} \right)$$

با استفاده از دستور Curve Fitting (شکل ۱۹) میانگین اعداد به‌دست آمده ($-۱,۱۴۹۰۵ \times ۱۰^{-۶}$) برابر ضریب راکتیویته دمایی سوخت در نظر گرفته می‌شود.

پس از رسم نمودارهای مربوط به اندازه و غلظت‌های مختلف نانوذر در سطح توان‌های متفاوت، می‌توان ضرایب راکتیویته دمایی را در حالت‌های مختلف محاسبه کرد. جدول‌های ۶ و ۷ مقادیر ضرایب راکتیویته دمایی خنک‌کننده و سوخت برای نانوسیال آلومینا را نشان می‌دهند. همچنین این مقادیر در جدول ۸ برای خنک‌کننده آب خالص ارایه شده است. اگر ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده نانوسیال آلومینا بر حسب غلظت رسم گردد، شکل ۲۰ حاصل می‌شود که براساس آن می‌توان دریافت که در ابتدا با افزایش غلظت، پراکندگی نوترون بیش‌تر می‌شود و راحت‌تر کند می‌شود. در نتیجه طبق رابطه ۱۱، اندازه ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده کوچک‌تر می‌شود. با افزایش بیش‌تر غلظت، جذب و پراکندگی در تقابل با یک‌دیگر هستند که جذب غلبه می‌کند. پس طبق رابطه ۱۳،

کاهش می‌یابد؛ همچنین جذب آن نیز بیشتر شده و بر پراکندگی آن غلبه می‌کند.

اگر لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر برحسب دمای خنک‌کننده نانوسیال تیتانیا (T_c) رسم شود (شکل ۲۵ الف):

$$LnK_{eff} = -1.1879 \times 10^{-5} T_c + 0.195$$

$$\alpha_c = \frac{1}{K_{eff}} \frac{\partial K_{eff}}{\partial T_c} = \frac{\partial LnK_{eff}}{\partial T_c} = -1.1879 \times 10^{-5} \left(\frac{\delta K/K}{\delta T_c} \right) = -1.1879 \left(\frac{p.c.m}{^\circ K} \right)$$

با استفاده از دستور Curve Fitting (شکل ۲۵ ب) میانگین اعداد به‌دست آمد (-2.04137×10^{-5}) برابر ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده در نظر گرفته می‌شود.

اگر لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر برحسب دمای سوخت (T_F) رسم شود (شکل ۲۶ الف)، شیب این نمودار به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$LnK_{eff} = -1.185 \times 10^{-5} T_F + 0.1953$$

$$\alpha_F = \frac{1}{K_{eff}} \frac{\partial K_{eff}}{\partial T_F} = \frac{\partial LnK_{eff}}{\partial T_F} = -1.185 \times 10^{-5} \left(\frac{\delta K/K}{\delta T_F} \right) = -1.185 \left(\frac{p.c.m}{^\circ K} \right)$$

شکل ۲۲. ضریب راکتیویته دمایی سوخت برحسب غلظت‌های حجمی مختلف.

شکل ۲۳. ضریب راکتیویته دمایی سوخت بر حسب اندازه نانوذره.

شکل ۲۴. تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برحسب درصد حجمی نانوسیال تیتانیا در اندازه ۱۰ nm و توان ۱۰۰٪.

جدول ۶. مقادیر ضریب راکتیویته دمایی (p.c.m/K) نانوسیال خنک‌کننده آلومینا بر حسب اندازه و غلظت‌های مختلف.

کسر حجمی (%)	۱۰	۸	۵	۳	۱	۰٫۱
قطر (nm)	۱۰	۸	۵	۳	۱	۰٫۱
۱۰	-۲٫۳۰۱۲۵	-۱٫۷۰۱۸۷	-۱٫۶۰۵۲۶	-۱٫۵۱۰۸۳	-۲٫۰۸۱۹۹	-۳٫۶۱۶۰۷
۳۰	-۱٫۶۱۵۶۲	-۱٫۴۵۸۲	-۱٫۳۴۳۷	-۱٫۳۹۹۶۴	-۱٫۸۴۶۲۱	-۲٫۴۳۶۷۴
۶۰	-۱٫۰۰۷۷	-۱٫۳۲۲۹۹	-۱٫۲۶۴۰۳	-۱٫۴۰۵۷۷	-۱٫۲۷۵۷۹	-۱٫۷۷۴۱۶
۹۰	-۱٫۸۲۰۶۳	-۱٫۳۶۲۳۴	-۱٫۴۲۶۴۶	-۱٫۶۱۱۵۳	-۱٫۶۷۷۷۴	-۲٫۱۰۳۵۳

جدول ۷. مقادیر ضریب راکتیویته دمایی سوخت (p.c.m/K) بر حسب اندازه و غلظت‌های مختلف

کسر حجمی (%)	۱۰	۸	۵	۳	۱	۰٫۱
قطر (nm)	۱۰	۸	۵	۳	۱	۰٫۱
۱۰	-۰٫۵۷۴۷۱۵	-۰٫۵۸۷۵۶۳	-۰٫۵۹۲۴۹۸	-۰٫۱۰۸۲۷۹	-۰٫۱۱۴۹۰۵	-۰٫۵۹۶۳۶۶
۳۰	-۰٫۵۷۶۷۸۸	-۰٫۵۹۰۳۹۶	-۰٫۵۸۱۹۷۷	-۰٫۱۰۷۳۵۳	-۰٫۱۱۲۹۲۹	-۰٫۶۰۷۱۹۵
۶۰	-۰٫۵۷۲۶۵۹	-۰٫۵۹۰۸۰۵	-۰٫۵۷۷۴۱	-۰٫۱۰۷۹۵۸	-۰٫۱۰۶۷۶۲	-۰٫۵۹۰۷۰۴
۹۰	-۰٫۵۷۰۹۹۳	-۰٫۵۸۸۷۴۳	-۰٫۵۸۱۹۲۷	-۰٫۱۱۰۲۶۸	-۰٫۱۱۰۹۱	-۰٫۶۱۶۲۷

جدول ۸. مقادیر ضریب راکتیویته دمایی خنک‌کننده و سوخت (p.c.m/K) برای خنک‌کننده آب خالص

-۱٫۱۴۱۳۷	α_c	آب
-۰٫۶۰۹۲۹۱	α_f	

از شکل ۲۲ می‌توان فهمید که با افزایش غلظت، پراکندگی بیشتر می‌شود و اندازه ضریب راکتیویته دمایی سوخت کاهش می‌یابد. با بیشتر شدن غلظت، دمای سوخت بیشتر شده و انتگرال رزونانسی نیز بزرگ‌تر می‌شود؛ در نتیجه فاکتور p کوچک‌تر می‌شود و اندازه ضریب راکتیویته دمایی سوخت افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت، پراکندگی بیشتر می‌شود و اندازه ضریب راکتیویته دمایی سوخت کاهش می‌یابد.

با افزایش اندازه نانوذره، دمای سوخت بیشتر می‌شود. در نتیجه انتگرال رزونانسی افزایش می‌یابد و مطابق آن فاکتور p کم شده و در نتیجه مقدار ضریب راکتیویته دمایی سوخت بزرگ‌تر می‌شود. با بزرگ‌تر شدن اندازه، اثر پراکندگی بر افزایش دمای سوخت غلبه می‌کند و اندازه ضریب راکتیویته دمایی سوخت کوچک‌تر می‌شود. اگر اندازه نانوذره از ۶۰ nm بیشتر شود، اندازه این ضریب بزرگ‌تر می‌شود؛ زیرا اثر افزایش دمای سوخت بر پراکندگی غلبه کرده و در نتیجه انتگرال رزونانسی افزایش می‌یابد و مطابق آن فاکتور p کم می‌شود (شکل ۲۳).

شکل ۲۴ نشان‌دهنده تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برحسب درصد غلظت حجمی در اندازه ۱۰ nm و توان ۱۰۰٪ است و نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوذره تیتانیا، ضریب تکثیر مؤثر کاهش می‌یابد. زیرا در یک اندازه خاص، با افزایش غلظت دمای نانوسیال افزایش می‌یابد و از این‌رو قدرت کندکنندگی آن

ترموهیدرولیک و نوترونیک آن پرداخته شد. به دلیل نیاز به دما برای تحلیل نوترونیک، ابتدا تحلیل ترموهیدرولیک انجام شد. نانوسیال به دلیل دارا بودن خواص ترموهیدرولیکی خوب، بیش تر برای تقویت خواص انتقال حرارت مورد استفاده قرار می گیرد؛ اما اثراتی هم بر روی خواص نوترونیکی دارد که باید در نظر گرفته شود. در این جا برای دو نوع نانوذره (آلومینا و تیتانیا) در درصد های حجمی ۰/۱ تا ۱۰٪ و اندازه ۱۰ تا ۹۰ nm، تمام محاسبات ترموهیدرولیکی و نوترونیکی انجام شد.

شکل ۲۵. الف) لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر بر حسب دمای نانوسیال خنک کننده تیتانیا در غلظت حجمی ۱٪ و اندازه ۱۰ nm، ب) ضریب راکتیویته دمایی خنک کننده در غلظت ۱٪ و حجمی و اندازه ۱۰ nm.

شکل ۲۶. الف) لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر بر حسب دمای سوخت در غلظت حجمی ۱٪ و اندازه ۱۰ nm (خنک کننده تیتانیا)، ب) ضریب راکتیویته دمایی سوخت در غلظت حجمی ۱٪ و اندازه ۱۰ nm (خنک کننده تیتانیا).

شکل ۲۷. ضریب راکتیویته دمایی خنک کننده تیتانیا بر حسب الف) غلظت های حجمی مختلف، ب) اندازه نانوذره.

شکل ۲۸. ضریب راکتیویته دمایی سوخت بر حسب الف) غلظت های حجمی مختلف، ب) اندازه نانوذره تیتانیا.

با استفاده از دستور Curve Fitting (شکل ۲۶ ب) میانگین اعداد به دست آمده $(-1/163 \times 10^{-5})$ برابر ضریب راکتیویته دمایی سوخت در نظر گرفته می شود.

پس از رسم نمودارهای مختلف در اندازه و غلظت های مختلف نانوذره در سطح توان های متفاوت، می توان ضرایب راکتیویته دمایی را در حالت های مختلف محاسبه کرد. جدول های ۹ و ۱۰ مقادیر ضریب راکتیویته دمایی خنک کننده و سوخت برای نانوسیال تیتانیا را نشان می دهند.

اگر ضریب راکتیویته دمایی خنک کننده نانوسیال تیتانیا بر حسب غلظت رسم گردد، شکل ۲۷ الف حاصل می گردد. براساس این شکل می توان دریافت که با افزودن نانوذره دمای سوخت افزایش می یابد و همچنین جذب آن نسبت به قبل بیش تر می شود. پس فاکتور f در آن کاهش می یابد و اندازه ضریب دمایی خنک کننده بزرگ تر می شود. تا غلظت حدود ۳٪ دمای سوخت کم ترین مقدار را دارد، از این رو انتگرال رزونانسی کم می شود و فاکتور p افزایش می یابد. بنابراین اندازه ضریب دمایی خنک کننده کوچک تر می شود. بعد از آن دوباره جذب افزایش می یابد و فاکتور f کم شده و اندازه ضریب دمایی خنک کننده بزرگ تر می شود. از آن به بعد دمای سوخت خیلی رشد کرده و اندازه ضریب دمایی خنک کننده کوچک تر می شود.

شکل ۲۷ ب نشان می دهد که با افزایش اندازه نانوذره، دمای نانوسیال کاهش می یابد و پراکندگی بیش تر می شود. پس فاکتور p افزایش می یابد و اندازه ضریب دمایی خنک کننده کوچک تر می شود. با بیش تر شدن اندازه، دمای سوخت بیش تر می شود و انتگرال رزونانسی افزایش می یابد و فاکتور p کوچک تر می شود؛ در نتیجه اندازه ضریب دمایی خنک کننده بزرگ تر خواهد شد. در نهایت هم دوباره اثر کاهش دمای خنک کننده غالب و فاکتور p افزایش می یابد در نتیجه اندازه ضریب دمایی خنک کننده کوچک تر می شود.

شکل ۲۸ الف نشان می دهد که در قسمت هایی که اندازه در حال کوچک تر شدن است، پراکندگی افزایش یافته است و فاکتور p افزایش یافته و همچنین اثر افزایش دمای سوخت نیز غالب شده است. هم چنین در قسمت هایی که اندازه در حال بزرگ تر شدن است، جذب غالب شده و فاکتور p کاهش یافته است.

شکل ۲۸ ب نشان می دهد که با بزرگ تر شدن اندازه، دمای سوخت افزایش می یابد. از این رو انتگرال رزونانسی بیش تر و فاکتور p کم تر می شود. در نتیجه اندازه ضریب دمایی سوخت افزایش می یابد. با بزرگ تر شدن بیش تر، اندازه پراکندگی بیش تر شده و فاکتور p بزرگ تر می شود؛ در نتیجه اندازه ضریب راکتیویته دمایی سوخت کوچک تر می شود.

۴. نتیجه گیری

بررسی ما بر روی اثرات ترموهیدرولیک و نوترونیک نانوسیال نشان داد که با انتخاب نوع و درصد حجمی مناسب نانوذره، از آن می توان استفاده کرد.

در این پژوهش به بررسی ضرایب راکتیویته دمایی خنک کننده و سوخت در حالتی که خنک کننده نانوسیال باشد، پرداخته شد. در این جا بعد از طراحی مجتمع سوخت، به تحلیل پارامترهای مختلف

مراجع

1. S. Khanjani, et al, *Effect of cut twisted tape and Al_2O_3 nanofluid on heat transfer of double tube heat exchanger*, *Modares Mechanical Engineering*, **15** (11), 181-190(2015).
2. H. Aslani, M. Moghiman, *Experimental investigation and fuzzy logic modelling of nanofluid solidification behavior*, *Modares Mechanical Engineering*, **15** (11), 284-292 (2016).
3. S.U.S. Choi, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, In *developments and applications of non-newtonian flows*, *ASME Fluids Engineering Division (FED)*, **66**, 99- 103 (1995).
4. S. Tashakor, et al, *Neutronic analysis of HPLWR fuel assembly cluster*, *Annals of Nuclear Energy*, **50**, 38-43 (2012).
5. J. Buongiorno, et al, *Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: an evaluation of the potential features, issues, and research gaps*, *Nuclear Technology*, **162** (1), 80-91 (2008).
6. F. Salimi, J. Salimi, *A review of nanofluid applications in the field of heat transfer and mass transfer* *Scientific-Extension Quarterly*, *New Process*, **42**, (1392).
7. S.U.I. Ahmad, N.A. Aslam, *Effect of different cross-section data sets on reflectors of a typical material test research reactor*, *Prog. Nucl. Energy*, **48**(2), 155-164 (2006).
8. R. Kianpour, G.R. Ansarifar, *Assessment of the nano-fluid effects on the thermal reactivity feedback coefficients in the VVER-1000 nuclear reactor with nano-fluid as a coolant using thermal hydraulic and neutronics analysis*, *Annals of Nuclear Energy*, **133**, 623-636 (2019).
9. Y. Xuan, W. Roetzel, *Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids*, *International Journal of heat and Mass transfer*, **43**, 3701-3707 (2000).
10. M.H. Kayhani, et al, *Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO_2 /water nanofluid*, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **39** (3), 456-462 (2012).
11. C.H. Chon, et al, *Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement*, *Applied Physics Letters*, **87** (15), 153107 (2005).
12. Bushehr, *VVER-1000 reactor, Final Safety Analysis Report (FSAR), Chapter 4*, *Ministry of Russian Federation of Atomic Energy (Atomenergoproekt)*, Moscow, (2003).
13. R. Kianpour, G.R. Ansarifar, M. Fathi, *Optimal Design of a VVER-1000 Nuclear Reactor Core with Dual Cooled Annular Fuel based on the Reactivity Temperature Coefficients using Thermal hydraulic and Neutronic Analysis by implementing the Genetic Algorithms*, *Annals of Nuclear Energy*, **148**, 107682 (2020).
14. N.E. Todreas, M.S. Kazimi, *Nuclear systems: thermal hydraulic fundamentals*, *CRC Press*, (2011).
15. J.R. Lamarsh, *Introduction to nuclear reactor theory*, *Addison-Wesley Reading*, MA, (1966).
16. A. Koraniani, *Optimal fuel richness design of Bushehr nuclear reactor based on thermohydraulic parameters and maximum radial power factor*, *Master Thesis*, University of Isfahan, (1398).
17. D.L. Hetrick, *Dynamics of Nuclear Reactors the University of Chicago Press Chicago and London*, (1971).

جدول ۹. مقادیر ضریب راکتیویته دمایی نانوسیال خنک‌کننده (p.c.m/K)

تیتانیا بر حسب اندازه و غلظت‌های مختلف						کسر حجمی (%)
۱۰	۸	۵	۳	۱	۰٫۱	قطر (nm)
-۰٫۹۸۳۴۸۱	-۱٫۴۲۸۶۹	-۱٫۰۵۹۱۶	-۱٫۱۱۰۸۴	-۲٫۰۴۱۳۷	-۱٫۲۱۵۷۳	۱۰
-۰٫۹۴۵۱۵۱	-۱٫۴۹۲۰۶	-۱٫۰۹۵۱	-۰٫۶۲۵۳۵۴	-۵٫۴۶۴۶۶	-۰٫۶۲۲۹۰۳	۳۰
-۰٫۷۹۵۷۳	-۳٫۸۸۹۲۴	-۱٫۴۵۷۴۹	-۱٫۳۶۶۲۹	-۱٫۳۱۲۷۶	-۱٫۲۵۱۳۹	۶۰
-۳٫۹۲۳۳۵	-۱٫۲۷۳۸۴	-۰٫۹۳۸۶۳۶	-۱٫۷۵۰۹۶	-۱٫۲۸۷۳۷	-۱٫۲۵۶۹۸	۹۰

جدول ۱۰. مقادیر ضریب راکتیویته دمایی سوخت (p.c.m/K) بر حسب

اندازه و غلظت‌های مختلف						کسر حجمی (%)
۱۰	۸	۵	۳	۱	۰٫۱	قطر (nm)
-۱٫۲۶۳۶۱	-۱٫۴۲۴۴۹	-۱٫۱۶۹۶۸	-۱٫۲۰۰۰۲	-۱٫۱۶۱۶۳	-۱٫۱۶۰۷۷	۱۰
-۱٫۲۵۸۸۸	-۱٫۴۴۷۷۷	-۱٫۲۱۱۲۸	-۱٫۱۹۳۴۹	-۱٫۱۷۰۶۳	-۱٫۱۵۸۲۵	۳۰
-۱٫۲۰۲۹۶	-۲٫۴۱۹۱۱	-۱٫۲۱۱۱۷	-۱٫۱۸۲۶۷	-۱٫۱۹۴۷	-۱٫۱۵۸۳۱	۶۰
-۱٫۲۵۶۳۴	-۱٫۲۳۳۷۱	-۱٫۱۸۴۰۵	-۱٫۱۵۲۵۱	-۱٫۱۶۲۶۹	-۱٫۱۶۴۴۸	۹۰

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش غلظت نانوذره، دمایی خنک‌کننده و سوخت افزایش می‌یابد و این افزایش دما با یک‌دیگر برابر نیست، بلکه در نانوسیال تیتانیا بیش‌تر است. در توان ۱۰۰٪، دمای سوخت به ۱۰۲۲ K می‌رسد که هنوز از دمای بحرانی سوخت فاصله زیادی دارد. هم‌چنین دمای خنک‌کننده به ۵۸۳ K می‌رسد که ناشی از برداشت بیش‌تر حرارت از میله سوخت است که می‌تواند موجب افزایش توان خروجی نیروگاه هسته‌ای شود. در این قسمت هم‌چنین نتایج نشان داد که در یک غلظت خاص با افزایش اندازه، دمای خنک‌کننده کاهش یافته و دمای سوخت افزایش می‌یابد ولی این تغییرات بسیار ناچیز است. مقایسه کامل این دماها در جدول ۵ ارائه شده است.

پس از انجام تحلیل‌های ترموهیدرولیکی توسط نرم‌افزار ANSYS FLUENT در بخش ۱،۳ و به‌دست آوردن توزیع‌های دمایی مختلف، این دماها به کد هسته‌ای WIMS معرفی می‌گردند تا سطح مقطع‌های لازم برای کد هسته‌ای CITATIN جهت به‌دست آوردن ضریب تکثیر مؤثر، تولید شوند. طبق نتایج به‌دست آمده، ضریب تکثیر مؤثر مربوط به نانوذره تیتانیا، بزرگ‌تر از نانوذره آلومینا است؛ یعنی قدرت پراکندگی تیتانیا بیش‌تر از آلومینا و قدرت جذب آلومینا بیش‌تر از تیتانیا است.

اگر لگاریتم ضریب تکثیر مؤثر برحسب دما رسم شود، شیب آن بیان‌گر ضریب راکتیویته دمایی سوخت است. با مقایسه مقادیر ضرایب راکتیویته دمایی خنک‌کننده و سوخت به‌دست آمده، این نتایج حاصل شد که نانوسیال آلومینا دارای ضریب فیدبک دمایی خنک‌کننده بهتری نسبت به نانوسیال تیتانیا است و هم‌چنین نانوسیال تیتانیا دارای ضرایب راکتیویته دمایی سوخت بهتری نسبت به نانوسیال آلومینا است.

استناد به این مقاله

رضا کیانیپور، غلامرضا انصاری‌فر (۱۴۰۰)، بررسی مقایسه‌ای ضرایب فیدبک راکتیویته دمایی در یک راکتور هسته‌ای

آب تحت فشار با خنک‌کننده نانوسیال آلومینا (Al_2O_3) و تیتانیا (TiO_2)، ۹۷، ۱۱۹-۱۲۸

DOI: 10.24200/nst.2021.1304

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1304.html