



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بررسی اثرات نوترونیکی استفاده از نانوسیال در راکتور VVER-1000 همراه با مجتمع های سوخت حلقوی با قابلیت خنک کنندگی از داخل و خارج

غلامرضا نصاریفر\*؛ محسن ابراهیمیان شمس آباد؛ مجید زیدآبادی نژاد

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی هسته ای

### چکیده:

امروزه برای بهبود راندمان نیروگاههای هسته‌ای اقدامات زیادی صورت می‌گیرد. یکی از این اقدامات استفاده از میله سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج و یکی دیگر هم استفاده از ذرات نانو در سیال خنک‌کننده، تحت عنوان استفاده از نانوسیالات می‌باشد. در این مقاله با ترکیب این دو روش، اثرات نوترونیکی استفاده از نانوسیال را در سوخت حلقوی در قلب یک راکتور VVER-1000 با استفاده از کدهای محاسباتی نوترونیکی wims و citation بررسی شده است. نتایج بر مبنای تغییرات ضریب تکثیر موثر قلب با درصد های حجمی مختلف شش نوع نانو ذره، استفاده از سیال خنک‌کننده آب سبک همراه با نانو ذره  $Al_2O_3$  یا  $ZrO_2$  مفید می‌داند.

کلیدواژه: سوخت حلقوی، نانوسیال، ضریب تکثیر موثر، مجتمع سوخت شش ضلعی.

### مقدمه:

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از سوخت حلقوی در نیروگاه‌های هسته‌ای، موجب بهبود نرخ برداشت حرارت از میله‌های سوخت می‌شود. به این منظور مطالعاتی در زمینه‌های نوترونیکی و ترموهیدرولیک این نوع سوخت‌ها و خنک‌کننده‌ای که همراه آن به کار می‌رود، صورت گرفته است [۱].

این عمل علاوه بر افزایش سطح انتقال حرارت، موجب کاهش دمای میله سوخت شده، که از لحاظ ایمنی بسیار مورد توجه است [۲]. اما نکته‌ای که در استفاده از سوخت حلقوی وجود دارد، کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی خنک‌کننده در سطح خارجی میله سوخت می‌باشد؛ که با استفاده از نانوسیال علاوه بر فائق آمدن بر این مشکل، می‌توان ضمن کاهش دبی گرمی خنک‌کننده، توان نیروگاه را هم افزایش داد [۳، ۴، ۵]. در این پژوهش قصد داریم با بررسی تغییرات غلظت شش نوع نانو ذره، شامل آلومینا، آلومینیوم، اکسید مس، مس، زیرکونیا و تیتانیاد، خنک‌کننده یک نوع راکتور با مجتمع سوخت حلقوی که پیش از این با ایده از یک راکتور VVER-1000 طراحی شده است، اثرات آنرا بر پارامتر نوترونیکی ضریب تکثیر موثر ( $K_{eff}$ ) بررسی کنیم. مضمون طراحی بهینه نوع و غلظت نانوسیال، اثر ته نشینی نانو ذره بر روی غلاف سوخت را نیز مشاهده کنیم. به



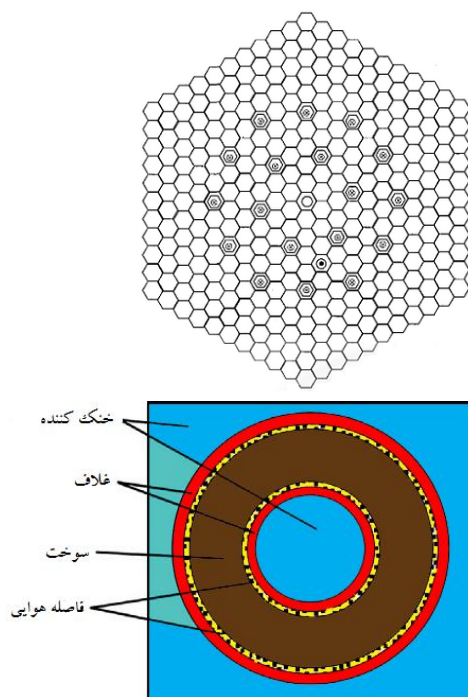
## بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

این منظور، از کدهای نوترونیک (WIMS & CITATION) که توسط یک برنامه نوشته شده با زبان جاوا به یکدیگر ارتباط داده شده‌اند استفاده کرده‌ایم. قلب راکتوری که این نوع سوخت در آن استفاده شده است، مشابه یک راکتور VVER-1000، که شامل ۱۶۳ عدد مجتمع سوخت شش ضلعی، که هر کدام از آنها دارای ۳۱۱ میله سوخت حلقوی با قابلیت خنک کنندگی از داخل و خارج است، می‌باشد. همچنین قرص‌های سوخت از جنس  $UO_2$  همراه با غلافی از جنس زیرکالوی می‌باشند. در جدول (۱) مشخصات هندسی سوخت و در شکل (۱) نمایی از میله سوخت حلقوی و یک نوع مجتمع سوخت نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات میله

۱۳/۶۶ میلی‌متر	قطر خارجی غلاف خارجی
۰/۸۷ میلی‌متر	ضخامت غلاف خارجی
۱۱/۹۲ میلی‌متر	قطر داخلی غلاف خارجی
۰/۰۵ میلی‌متر	ضخامت gap خارجی
۱۱/۸۲ میلی‌متر	قطر خارجی سوخت
۹/۲ میلی‌متر	قطر داخلی سوخت
۰/۰۶ میلی‌متر	ضخامت gap داخلی
۹/۰۸ میلی‌متر	قطر خارجی غلاف داخلی
۰/۵۴ میلی‌متر	ضخامت غلاف داخلی
۸ میلی‌متر	قطر داخلی غلاف داخلی



شکل ۱- نمایی از یک میله سوخت حلقوی و مجتمع

### روش کار

۱- مدل‌سازی مجتمع‌های سوخت:

قلب راکتور از شش نوع مجتمع سوخت تشکیل شده است که با معرفی مشخصات هندسی میله‌ها، انواع مواد به کاررفته در آنها در کد محاسباتی wims مدل شده‌اند. با بکارگیری هندسه سوزنی، سلول معادل را برای سه نوع مجتمع سوخت با غناهای متوسط ۲/۱، ۴/۶ و ۳/۶ درصد استخراج کردیم تا کد معادله انتقال نوترون را با استفاده از روش احتمالات برخورد در شرایط cold & clean حل کند.

در ضمن در وارد کردن خواص خنک کننده در کد از رابطه زیر برای دانسیته نانو سیال استفاده کرده‌ایم:



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

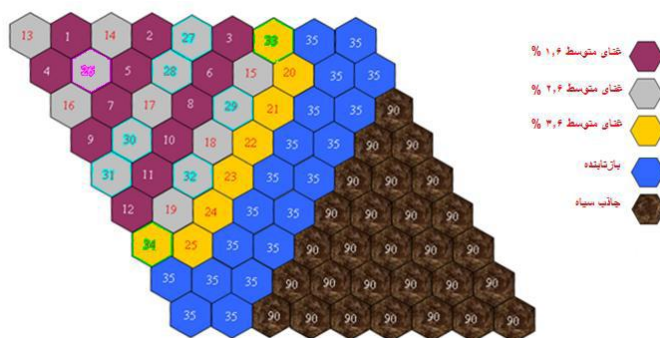
$$(\rho)_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p$$

که پارامترهای آن به صورت زیر می باشند:

$\rho$ : چگالی جرمی،  $\phi$ : کسر حجمی نانوذرات،  $P$ : نانوذرات،  $f$ : سیال پایه،  $nf$ : نانوسیال.

۲- مدل سازی قلب راکتور:

در طول سیکل اول، ۱۶۳ مجتمع سوخت با آرایش شش ضلعی در کنار هم قرار گرفته اند که به علت تقارن، ما در کد محاسباتی قلب (citation) برای محاسبات بحرانیت، یک ششم قلب را مانند شکل شماره (۲) با در نظر گرفتن ۱۰ مش محوری مدل کرده ایم.



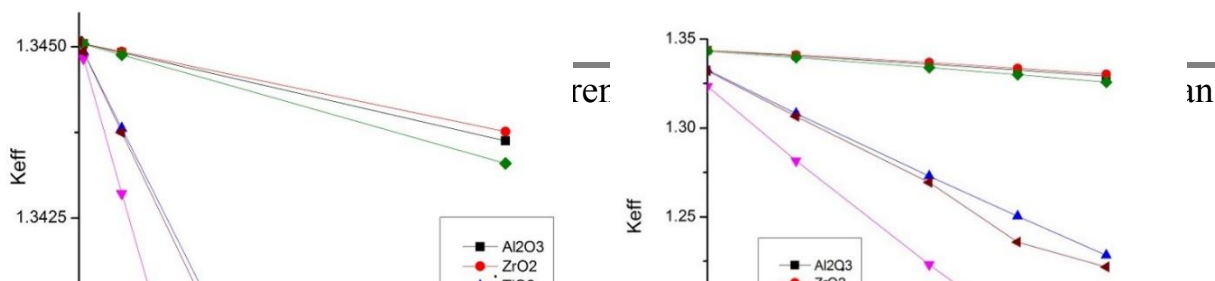
شکل ۲- نمایش ششم قلب راکتور سوخت سرد در شرایط cold &

## نتایج

ضریب تکثیر موثر ( $K_{eff}$ ) یکی از کلیدی ترین فاکتورها برای کارکرد و کنترل راکتور می باشد. هر تغییری در خواص مواد به کاررفته در قلب راکتور، موجب تغییر بحرانیت قلب و از این رو تغییر در  $K_{eff}$  می شود. مطالعات قبلی بیانگر این نکته است که وجود درصد های حجمی کم نانوذره در خنک کننده راکتورهای آب سبک، به علت شفافیت نوترون نسبت به ذرات نانو، کمترین اثر را بر فعال سازی خنک کننده دارد [۴]. همچنین برای درصد های حجمی بسیار کوچک، کمترین تاثیر بر نرخ انتقال حرارت مشاهده شده است [۴]. از طرف دیگر با افزایش درصد حجمی نانوذرات، کاهش ضریب تکثیر قلب و اثرات ته نشینی ذرات نانو بر روی غلاف میله سوخت پراهمیت می شوند.

ما برای شش نوع نانوذره انتخابی، شش مقدار کسر حجمی مختلف (۰/۰۰۰۱ تا ۰/۱) را به کار برده ایم.

نتایج در شکل (۳) نشان می دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات در خنک کننده، ضریب تکثیر موثر قلب کاهش می یابد که نتایج آن شبیه مطالعات قبلی می باشد که بر روی سوخت توپر صورت گرفته است [۴]. در ضمن کمترین کاهش در دو نانوذره  $ZrO_2$  و  $Al_2O_3$  مشاهده شده است.





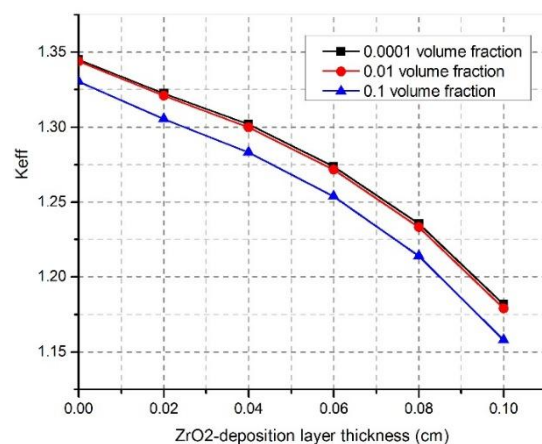
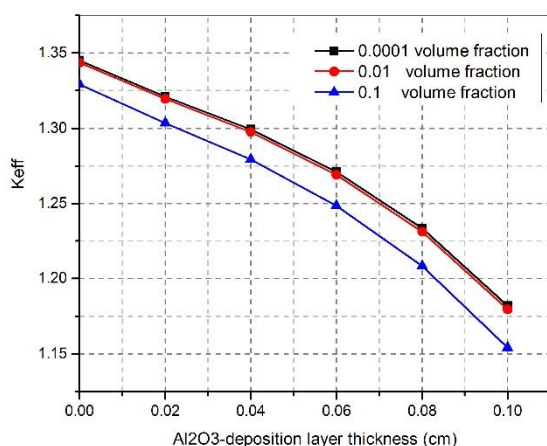
# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شکل ۳- نمودار ضریب تکثیر موثر بر حسب درصد حجمی نانوذرات مختلف

شکل (۳) بیانگر این نکته نیز است که اگر جنبه‌های ایمنی راکتور مدنظر باشد، نانوذره Cu مناسب‌ترین می‌باشد؛ چون که بیشترین کاهش را در ضریب تکثیر داشته است.

اثر مهم دیگر که باید در به‌کارگیری نانوسیال به‌عنوان خنک‌کننده در قلب راکتور در نظر گرفته شود، ته‌نشینی ذرات نانو بر روی غلاف سوخت می‌باشد. لازم به ذکر است که ته‌نشینی ذرات نانو با غلظت‌های کم بر روی غلاف از نقطه‌نظر ترموهیدرولیکی می‌تواند موجب افزایش شار حرارتی بحرانی (CHF) در برخی راکتورها شود. که علت آن ایجاد یک ناحیه متخلخل بر روی سطح و در نتیجه افزایش جوشش هسته‌ای باشد. راکتور مورد بررسی ما در فاز مایع کار می‌کند، اما نباید از اثر ته‌نشینی نانوذره بر روی بحرانیات راکتور غافل شد. به این منظور ما در این مقاله برای دو نانوذره  $ZrO_2$  و  $Al_2O_3$  که در شکل شماره (۳) رفتار خوبی را از خود در کاهش ندادن ضریب تکثیر نشان داده‌اند، در سه درصد حجمی مختلف، با مدل کردن یک لایه از آنها بر روی سطوح غلاف خارجی و داخلی سوخت حلقوی، اثرات ته‌نشینی آنها را بر روی ضریب تکثیر موثر مشاهده کرده‌ایم. نتایج به صورت نمودار در



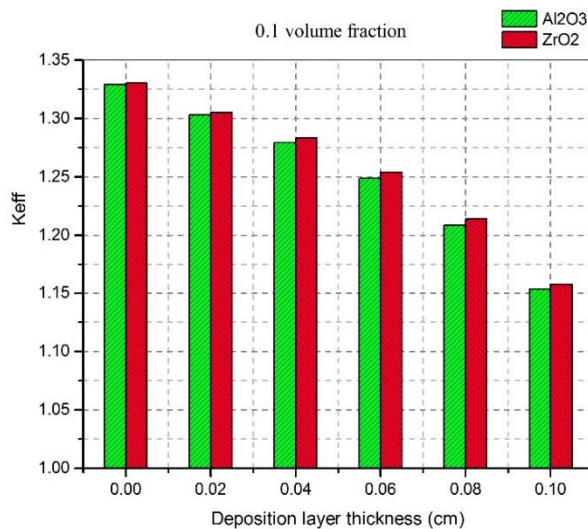


# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## شکل ۴- نمودار ضریب تکثیر موثر بر حسب ضخامت ته نشینی دو نانوذره $Al_2O_3$ و

دیده می شود. با مقایسه نتایج حاصله و کارهای مشابه صورت گرفته بر روی سوخت توپر [۴]، اثر کاهشی ضریب تکثیر در اثر ته نشینی برای سوخت حلقوی محسوس تر می باشد که به علت سطح تماس بیشتری که نانوسیال با سوخت در این حالت دارد، همین انتظار را هم باید داشته باشیم.



## شکل ۵- مقایسه رفتار ته نشینیدو نانوذره

برای مقایسه هرچه بیشتر دو نانوذره آلومینا و تیتانیا که رفتار تقریباً مشابهی داشتند، نمودار ستونی شکل (۵) را برای ضخامت های مختلف ته نشینی، در حالتی که کسر حجمی ذره نانو ۱/۱۰ در آب می باشد، رسم کرده ایم. این شکل هم نشانگر یک مقدار برتری بیشتر نانوذره تیتانیا نسبت به آلومینا می باشد.

## بحث و نتیجه گیری

نتایج قبلی نشان می دهد که استفاده از نانوسیالات به عنوان خنک کننده در راکتور های هسته ای موجب بهبود خواص انتقال حرارتی آن می شود. اما بررسی ما بر روی اثرات نوترونیک نانوسیال، آن هم بر روی سوخت حلقوی که امروزه استفاده از آن در راکتورهای هسته ای در حال پیشرفت می باشد، نشان داد که با انتخاب نوع و درصد حجمی بهینه ذره نانو، از آنمی توان در این نوع سوخت ها نیز استفاده کرد. بررسی ای که روی ضریب تکثیر موثر قلب راکتور در درصدهای حجمی مختلف نانوذره صورت گرفت، نشان داد که مقدار آن با افزایش درصد حجمی کاهش می یابد ولی این کاهش برای انواع نانوذرات متفاوت می باشد. برای کارکرد در شرایط کار راکتور VVER-





# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

1000، استفاده از نانوذرات  $ZrO_2$  و  $Al_2O_3$  پیشنهاد می‌شود؛ اما از نقطه نظر ایمنی، نانوذرات Cu و  $CuO$  مناسب می‌باشند. اثر ته‌نشینی نانوذره بر روی غلاف نیز نشان داد که با کاهش ضریب تکثیر، کارکرد در توان های پایین تر برای راکتور حاصل خواهد شد؛ اما لازم است که بدانیم می‌توان از این اثر هم به عنوان معیاری از ایمنی راکتور استفاده کرد.

## مراجع

- [1] M. Amin Mozafari, F. Faghihi. "Design of annular fuels for a typical VVER-1000 core: Neutronic investigation, pitch optimization and MDNBR calculation." *Annals of Nuclear Energy*, vol. 60, pp. 226–234, 2013.
- [2] G. Petrangeli. Nuclear Safety. Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 2-35, 2006.
- [3] E. Zarifi, Gh. Jahanfarnia and F. Veysi. "Thermal-hydraulic modeling of nanofluids as the coolant in VVER-1000 reactor core by the porous media approach." *Annals of Nuclear Energy*, vol. 51, pp. 203–212, 2013.
- [4] K. Hadad, A. Hajizadeh, K. Jafarpour and B.D. Ganapol. "Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000." *Annals of Nuclear Energy*, vol. 37, pp. 1447–1455, 2010.
- [5] E. Zarifi, Gh. Jahanfarnia and F. Veysi. "Neutronic simulation of water-based nanofluids as a coolant in VVER-1000 reactor." *Progress in Nuclear Energy*, vol. 65, pp. 32-41, 2013.