



## تحلیل نوترونی نانوسیال‌ها به عنوان خنک‌کننده در یک بسته سوخت رآکتور آب سبک با بازده بالا (HPLWR)

احسان ظریفی<sup>۱</sup>، کامران سپانلو<sup>۲،۳</sup>، نعیم‌الدین متاجی کجوری\*<sup>۳</sup>

۱. پژوهشکده رآکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران - ایران

۲. مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

۳. گروه ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتوی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران - ایران

**چکیده:** رآکتورهای آب سبک با بازده بالا یکی از انواع رآکتورهای آب سبک در فشار فوق بحرانی‌اند که توسط اتحادیه‌ی اروپا مورد مطالعه و طراحی قرار گرفته است. این مقاله تغییرات سطح مقطع‌های نوترونی و ضریب تکثیر مؤثر رآکتور را برای مقادیر مختلف نانوذره در خنک‌کننده مورد بررسی قرار می‌دهد. در این رابطه، ۴ نانوسیال با مقادیر مختلف نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{CuO}$  و  $\text{Cu}$  بررسی شده است. با به‌کارگیری کدهای WIMS-D5 و CITATION-LDI2 نوع و غلظت نانوذره‌ی مناسب در سیال خنک‌کننده محاسبه شد. یافته‌های اولیه نشان داد که در مقادیر پایین (کم‌تر از ۱ درصد حجمی) استفاده از نانوسیال آلومینا در خنک‌کننده‌ی رآکتور مناسب‌تر از سایر نانوسیال‌های مورد بررسی است.

**کلیدواژه‌ها:** نانوسیال، تحلیل نوترونی، رآکتور آب سبک با بازده بالا، کد WIMS، کد CITATION

## Neutronic analysis of nanofluid as a coolant in HPLWR fuel assembly

E. Zarifi<sup>1</sup>, K. Sepanloo<sup>2,3</sup>, N. Mataji Kojouri\*<sup>2,3</sup>

1. Reactor Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399-51113, Tehran - Iran

2. Iran Nuclear Regulatory Authority, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

3. Safety and Radiation Research Group, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

**Abstract:** The main objective of this study is to predict the neutronic behavior of nanofluids as a coolant in the fuel assembly of the HPLWR. The high-performance light water reactor (HPLWR) is the European version of the supercritical-pressure water cooled reactor (SCWR). Light water reactor at supercritical pressure which is currently under the design, is considered as a new generation of nuclear reactors. The variations of neutron cross sections and effective multiplication factor have been investigated in different concentrations of nanoparticles in the coolant and moderator channel. In the present analysis, water-based nanofluids containing various volume fractions of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$  and  $\text{Cu}$  nanoparticles are studied. The neutronic properties of nanofluids with the optimum concentration of nanoparticles are calculated using WIMS-D5 and CITATION-LDI2 codes. The results show that at low concentrations of less than 1 volume percentage, alumina is the optimum nanoparticle for the normal operation of a reactor.

**Keywords:** Nanofluid, Neutronic analysis, HPLWR, WIMS code, CITATION code

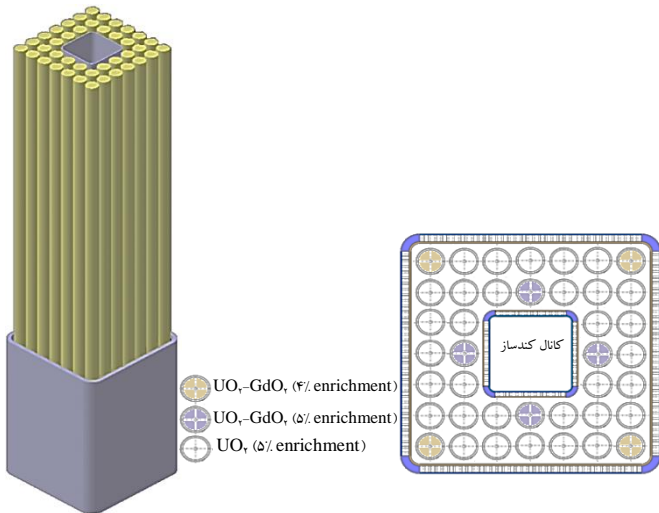


## ۱. مقدمه

محاسبه‌های آن‌ها نشان داد که در درصد‌های حجمی ۱ و ۴، افت فشار در امتداد زیرکانال‌های خنک‌کننده به ترتیب، حدود ۱۴ و ۹۸ درصد افزایش می‌یابد. ظریفی و همکاران در اقدام بعدی در طی سه مقاله در سال‌های ۲۰۱۳ [۸، ۹] و ۲۰۱۴ [۱۰] با استفاده از تحلیل ریاضی و با ارایه‌ی مدل ترموهیدرولیکی، به بررسی رفتار قلب رآکتور VVER-1000 پرداختند. در این مطالعه‌ها ابتدا با استفاده از روش محیط متخلخل به بررسی رفتار ترموهیدرولیکی قلب رآکتور با نانوسیال به عنوان خنک‌کننده پرداخته شد. سپس در ادامه با استفاده از روش تحلیل زیرکانال، رفتار ترموهیدرولیکی گرم‌ترین مجتمع سوخت مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این پژوهش‌ها نشان داد که با توجه به بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت نانوسیال‌ها نسبت به آب معمولی، دمای خنک‌کننده افزایش یافته و این افزایش منجر به کاهش اندازه‌ی قلب رآکتور خواهد شد. در سال ۲۰۱۴ صفرزاده و همکاران [۱۱] طی مقاله‌ای با انجام محاسبات نوترونیک با کدهای DRAGON و DONJON و ارایه‌ی یک مدل ترموهیدرولیکی، رفتار نانوسیال آلومینا در قلب رآکتور VVER-1000 را مورد ارزیابی قرار دادند. محاسبات نشان داد که در مقادیر پایین نانوذرات آلومینا در خنک‌کننده، کم‌ترین میزان تأثیر بوریسک اسید بحرانی در حدود ۳ درصد بوده و توزیع نسبی قدرت در حدود ۲ درصد نسبت به آب خالص افزایش می‌یابد.

مطالعه‌هایی که تاکنون در مورد کاربرد نانوسیال‌ها در نیروگاه‌های هسته‌ای انجام شده بیش‌تر مربوط به رآکتورهای نسل سوم بوده و به استفاده از نانوسیال‌ها در رآکتورهای نسل چهارم مانند رآکتورهای آب سبک با بازده بالا<sup>(۱)</sup> (HPLWR) کم‌تر اشاره شده است. در این پژوهش برای تحلیل نوترونی قلب حاوی نانوسیال‌ها به عنوان خنک‌کننده در رآکتورهای آب سبک با بازده بالا از جفت‌شدگی کدهای WIMS-D5 [۱۲] و CITATION-LDI2 [۱۳] استفاده شد. ابتدا با حل معادله‌ی ترابرد نوترون با کد WIMS ثابت‌های گروهی در هر یک از مجتمع‌های سوخت محاسبه و سپس با به‌کارگیری کد CITATION توزیع شار و توان گرمایی در یک بسته سوخت محاسبه شد.

در سال‌های اخیر سیال‌های حاوی ذرات معلق با ابعاد نانو بحث جدید و جذابی را در پژوهش‌های علمی گشوده‌اند، که از آن تحت عنوان نانوسیال‌ها نام برده می‌شود. به‌کارگیری نانوسیال‌ها به عنوان خنک‌کننده در قلب رآکتور هسته‌ای، اولین بار طی مقاله‌ای در سال ۲۰۰۵ توسط بونژورنر [۱] در دانشگاه ماساچوست آمریکا مطرح شد. از آن زمان به بعد، او و همکارانش به بررسی خواص ترموهیدرولیکی نانوسیال‌ها از ابعاد گوناگون پرداختند. نخستین گزارش آن‌ها حاکی از افزایش ۴۰٪ چگالی قدرت همراه با افزایش ۱۸٪ نرخ جریان جرمی و ۲۰٪ افزایش دمای قلب رآکتور بوده است. بونژورنو و همکاران [۲، ۳] در ادامه‌ی پژوهش‌هایشان در سال ۲۰۰۹ طی مقاله‌ای به بررسی به‌کارگیری نانوسیالات در سیستم‌های ایمنی و ارزیابی استراتژی<sup>(۱)</sup> IVR در حادثه‌ی ذوب قلب رآکتور پرداختند. آن‌ها پیش‌بینی نمودند که با استفاده از نانوسیال‌ها می‌توان حاشیه‌ی ایمنی رآکتور را تا ۴۰٪ افزایش داد. در سال ۲۰۱۰ حداد و همکاران [۴] طی مقاله‌ای، پارامترهای نوترونیک قلب رآکتور VVER-1000 با نانوسیال به عنوان خنک‌کننده را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این بررسی با استفاده از کد MCNP به ارزیابی نوترونیک ۵ نوع نانوسیال آلومینیم، آلومینیم اکسید، مس، مس اکسید و زیرکونیم اکسید پرداختند. نتیجه‌های مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که در مقادیر کم (کم‌تر از ۰/۱ درصد حجمی)، آلومینا نانوذره‌ی مناسب‌تری در شرایط کاری عادی رآکتور است. ظریفی و همکاران طی دو مقاله در سال‌های ۲۰۱۲ [۵] و ۲۰۱۳ [۶] به بررسی ضریب تکثیر مؤثر و توان گرمایی رآکتور VVER-1000 در طول چرخه‌ی اول کاری رآکتور با استفاده از کدهای WIMS و CITATION پرداختند. در این مطالعه ۴ نانوذره‌ی آلومینا، تیتانیا، مس و اکسید مس مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های بررسی آن‌ها نشان داد که در میان این ۴ نانوذره‌ی مورد بررسی، آلومینا نانوذره‌ی مناسب‌تری بوده و هم‌چنین درصد حجمی مجاز آن در قلب رآکتور در حدود ۰/۱ است. نظیفی‌فرد و همکاران [۷] با به‌کارگیری مدل k-ε و استفاده از نرم‌افزار ANSYS-FLUENT ۱۲/۱ به بررسی افت فشار ناشی از نانوسیال آلومینا در کانال‌های خنک‌کننده پرداختند. یافته‌های

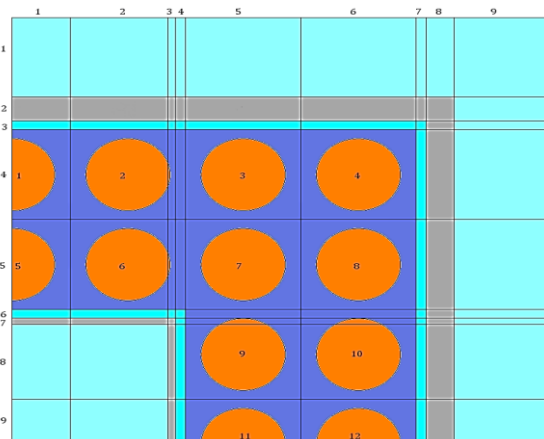


شکل ۱. نمایی از یک بسته سوخت در رآکتور آب سبک با بازده بالا [۱۴].

جدول ۱. مشخصه‌های بسته سوخت خوشه‌ای در رآکتور آب سبک با بازده

بالا [۱۴، ۱۵، ۱۶]

نوع / مقدار	یکا	پارامتر
UO <sub>2</sub>	-	سوخت
فولاد ضدزنگ	-	غلاف
۸	mm	قطر خارجی غلاف
۷	mm	قطر داخلی غلاف
۶۹۰	mm	قطر خارجی قرص سوخت
۴۲۰۰	mm	ارتفاع مؤثر
۹،۲	mm	گام میله‌های سوخت
۴۰	-	تعداد میله‌های سوخت در هر بسته سوخت
۱	mm	فاصله‌ی بین میله‌های سوخت و دیواره
۲۵	MPa	فشار سیال
۲۶،۲	mm	طول داخلی کانال کندساز
۰،۳	mm	ضخامت دیواره‌ی کانال کندساز
۵٪-۴	-	غنای سوخت
۴	-	درصد وزنی گادولینیم محلول در خنک کننده
۲۵،۸۰	MW	توان گرمایی یک بسته سوخت
۱۱،۸۵۵۴	kg s <sup>-1</sup>	کل نرخ جریان خنک کننده
۰،۰۷۷۸۴	kg s <sup>-1</sup>	نرخ جریان عبوری از کانال کندساز
۰،۱۵۵۶۸	kg s <sup>-1</sup>	نرخ جریان عبوری از فضای میانی بسته‌های سوخت



شکل ۲. نحوه‌ی مش بندی یک بسته سوخت در کد CITATION.

## ۲. روش کار

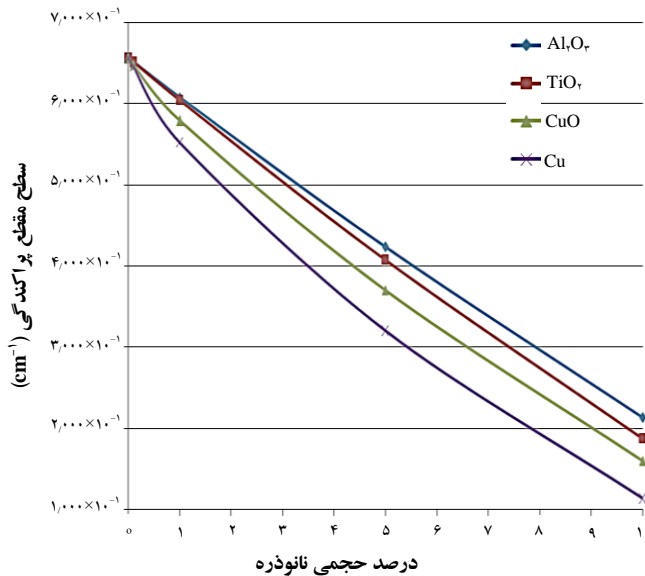
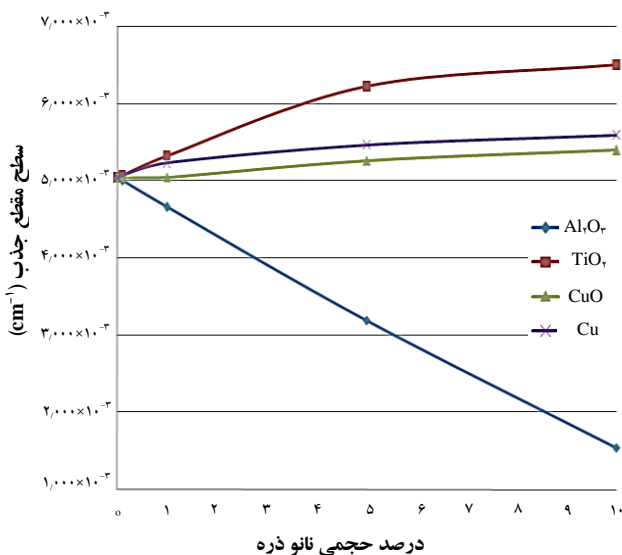
در شکل ۱ نمایی از یک بسته سوخت در رآکتور آب سبک با بازده بالا نشان داده شده است. این بسته سوخت شامل ۴۰ میله‌ی سوخت با آرایش ۷×۷ است. در مرکز این بسته سوخت یک کانال کندساز تعبیه شده است. قطر خارجی میله‌های سوخت ۸ mm با فاصله‌ی بین سوخت و دیواره‌ی، ۰،۰۵ mm و ضخامت غلاف ۰،۵ mm است. نسبت مرکز تا مرکز دو سوخت متوالی<sup>(۳)</sup> به قطر سوخت برابر با ۱،۱۵ و ارتفاع مؤثر قلب ۴،۲ متر است. ضخامت شکاف میانی بسته سوخت برابر ۱۰ mm است. پارامترها و مشخصه‌های طراحی این بسته سوخت در جدول ۱ درج شده است.

محاسبه‌ی توزیع توان و ضریب تکثیر مؤثر در محاسبه‌های نوترونیک با محاسبه‌های سلولی و قلب رآکتور تعریف می‌شود. در مرحله‌ی اول با بهره‌گیری از کد WIMS ضریب‌های گروهی مورد نیاز کد CITATION محاسبه شد. برای این منظور با توجه به ساختار و چیدمان میله‌های سوخت در یک بسته سوخت به مدل‌سازی انواع سلول‌های محاسباتی در کد WIMS پرداخته و داده‌های به دست آمده از آن، برای محاسبه‌های شار نوترونی و توان در قالب لازم، به کد CITATION انتقال داده شد. با توجه به تقارن یک چهارم در یک بسته سوخت، محاسبه‌های سلولی در ۱۲ نوع میله‌ی سوخت، بسته به مکان قرارگیری آن در یک بسته سوخت به همراه مدل‌سازی ناحیه‌ی کندساز مرکزی و خنک کننده‌ی بین دو سوخت مجاور انجام شد. هم‌چنین برای افزایش دقت محاسبات، هر یک از انواع سلول‌های محاسباتی در ۴۵ مش در راستای ارتفاع مدل‌سازی شد.

پس از این مرحله و به دست آوردن ثابت‌های گروهی عناصر به کار رفته، با اتصال داده‌ها به فایل ورودی کد CITATION، مدل‌سازی یک بسته سوخت در رآکتور آب سبک با بازده بالا با استفاده از کد CITATION انجام شد تا با بهره‌گیری از آن توزیع توان گرمایی در هر یک از سلول‌های محاسباتی با در نظر گرفتن مقدارهای مختلفی از نانوذرات مختلف به دست آید. نحوه‌ی مش بندی یک بسته سوخت در قلب رآکتور آب سبک با بازده بالا در کد CITATION در شکل ۲ نشان داده شده است. یک چهارم بسته سوخت با ۹ مش عرضی و طولی و ۴۵ مش محوری مدل‌سازی شد.

**جدول ۲.** مقایسه‌ی پارامترهای گرمایی- فیزیکی نانوذرات با آب [۱۷]

Cu	CuO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	آب	خاصیت
۳۸۵	۵۳۵٫۶	۶۸۶٫۲	۷۶۵	۴۱۷۹	گرمای ویژه C [J/kg K]
۸۹۳۳	۶۵۰۰	۴۲۵۰	۳۹۷۰	۹۹۷٫۱	چگالی ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
۴۰۰	۲۰	۸٫۹۵۳۸	۴۰	۰٫۶۰۵	رسانش گرمایی k [W/mK]
۱۱۶۳	۵۷٫۴۵	۳۰٫۷	۱۳۱۷	۱٫۴۷	ضریب پخش در سیال α [m <sup>2</sup> /s]

**شکل ۳.** رابطه‌ی بین سطح مقطع پراکندگی ماکروسکوپی نوترون‌های گرمایی در کانال کندساز و درصد حجمی نانوذره.**شکل ۴.** رابطه‌ی بین سطح مقطع جذب ماکروسکوپی نوترون‌های گرمایی در کانال کندساز و درصد حجمی نانوذره.

برای محاسبه‌ی نانوذره‌ی مناسب و مقدار بهینه‌ی آن، مقدارهای مختلفی از نانوذرات CuO، TiO<sub>2</sub> و Cu از ۰٫۰۰۱ تا ۱۰ درصد حجمی در سیال خنک‌کننده وارد شد. در جدول ۲ ویژگی‌های گرمایی این ۴ نانوذره با آب مقایسه شده است.

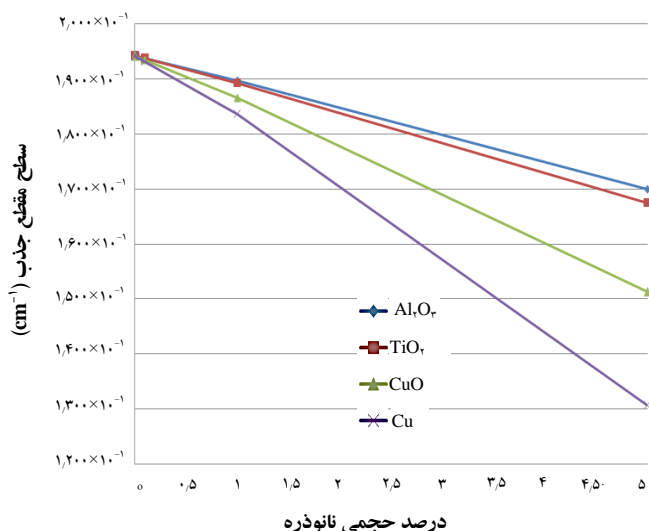
### ۳. یافته‌ها

شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب، تغییرات سطح مقطع‌های ماکروسکوپی پراکندگی و جذب، و ضریب پخش را در ناحیه‌ی نوترون‌های گرمایی در کانال کندساز برای درصد‌های حجمی مختلف نانوذره در خنک‌کننده نشان می‌دهند. در نمودارهای ارایه شده محور افقی بیان‌گر درصد حجمی نانوذره در خنک‌کننده بوده و نقطه‌ی شروع محور افقی (عدد صفر) بیان‌گر خنک‌کننده‌ی آب بدون نانوذره است؛ بدین نحو، داده‌های حاصل از نانوسیال‌ها با آب مقایسه شده است.

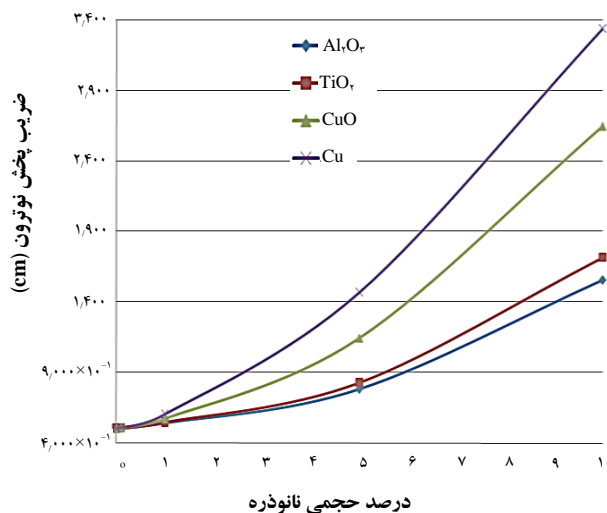
از شکل ۳ ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار نانوذره در کانال کندساز، سطح مقطع پراکندگی ماکروسکوپی به شدت کاهش می‌یابد به گونه‌ای که نانوذرات مختلف رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهند. کاهش سطح مقطع پراکندگی ماکروسکوپی به کاهش مقدار کندساز آب با افزایش مقدار نانوذره در خنک‌کننده مربوط می‌شود. اما تغییرات سطح مقطع جذب ماکروسکوپی نوترون‌های گرمایی در کانال کندساز نتیجه‌ی متفاوت‌تری را نشان می‌دهد به گونه‌ای که میزان جذب نانوسیال‌ها به جز نانوسیال آلومینا، با افزایش مقدار نانوذره آن‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این گونه رفتار متفاوت، به سطح مقطع جذب نانوذره مربوط می‌شود. در جدول ۳ سطح مقطع جذب آب با عناصر مختلف مقایسه شده است.

بر اساس اطلاعات جدول ۳، از میان ۴ نانوذره‌ی انتخابی، آلومینیم دارای کم‌ترین سطح مقطع جذب میکروسکوپی و حتی پایین‌تر از سطح مقطع میکروسکوپی آب است؛ در نتیجه هنگامی که غلظت این نانوذره در خنک‌کننده و کندساز افزایش می‌یابد با کاهش مقدار خنک‌کننده‌ی آب، از میزان جذب نوترون‌ها در کندساز کاسته می‌شود. اما دیگر نانوذرات دارای سطح مقطع جذب میکروسکوپی بالاتری نسبت به آب هستند و از این رو با افزایش غلظت این نانوذرات میزان جذب در کندساز افزایش می‌یابد.

است، در حالی که در مدل مورد بحث، محاسبه‌ها تنها برای یک بسته سوخت  $7 \times 7$  با  $40$  میله‌ی سوخت به انجام رسیده است. این در حالی است که در مرجع [۲۰] برای یک بسته سوخت پیشنهادی برای رآکتور آب سبک با بازده بالا مقدار ضریب تکثیر بی‌نهایت در حدود  $1/1$  محاسبه شده است. دلیل این اختلاف در نظر گرفتن ضریب تکثیر مؤثر به جای ضریب تکثیر بی‌نهایت در مقاله‌ی حاضر است.



شکل ۵. رابطه‌ی بین ضریب پخش نوترون‌های گرمایی در کانال کندساز و درصد حجمی نانوذره.



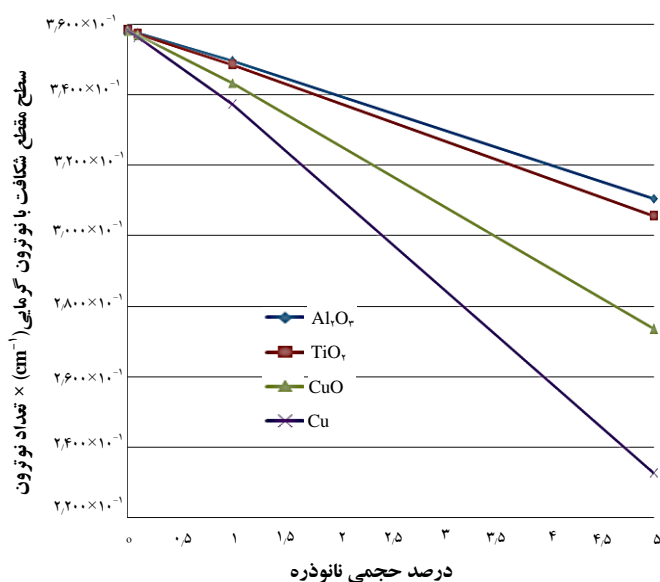
شکل ۶. رابطه‌ی بین سطح مقطع ماکروسکوپی جذب نوترون‌های گرمایی در یک میله سوخت و درصد حجمی نانوذره.

جدول ۳. مقایسه‌ی سطح مقطع جذب میکروسکوپی عناصر مختلف [۱۸]

عنصر	سطح مقطع جذب میکروسکوپی (بارن)
H	۰٫۳۳۲
O	۰٫۰۰۰۲۷
H <sub>2</sub> O	۰٫۶۶۴
Al	۰٫۲۳
Ti	۶٫۱
Cu	۳٫۷۹

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب، تغییرات سطح مقطع‌های ماکروسکوپی جذب و شکافت در میله‌ی سوخت شماره ۱ (شکل ۲) را به صورت تابعی از درصد حجمی نانوذرات مختلف نشان می‌دهد.

از شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوذره در سیال خنک‌کننده، سطح مقطع‌های ماکروسکوپی جذب و شکافت به شدت کاهش می‌یابند، به گونه‌ای که نانوذرات مختلف رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. در شکل ۸ رابطه‌ی بین ضریب تکثیر مؤثر و درصد حجمی مقدار نانوذره ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار ضریب تکثیر مؤثر در نبود نانوذره حدود  $1/0.3$  محاسبه شده است؛ این نتیجه به مقدار ضریب تکثیر گزارش شده در مرجع [۱۹] (حدود  $1/0.18$ ) نزدیک است. دلیل اختلاف به مدل محاسباتی برمی‌گردد. در مدل محاسباتی مرجع ذکر شده، محاسبه‌های نوترونیک برای یک خوشه‌ی سوخت  $3 \times 3$  با بسته‌های سوخت  $7 \times 7$  انجام شده



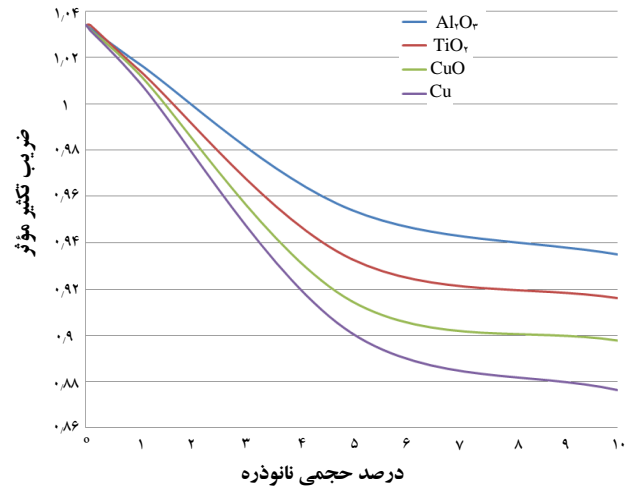
شکل ۷. رابطه‌ی بین سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت با نوترون‌های گرمایی ضرب در تعداد متوسط نوترون‌های گرمایی حاصل از شکافت ( $\Sigma_f$ ) در یک میله سوخت و درصد حجمی نانوذره.



ضریب تکثیر با افزودن این نانوذره به خنک‌کننده اتفاق می‌افتد. این در حالی است که نانوذره آلومینا بر خلاف سه نانوذره دیگر رفتار متفاوتی نشان می‌دهد به گونه‌ای که با افزایش مقدار آن، سطح مقطع جذب نوترون‌ها در کندساز، کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که چون سطح مقطع جذب آلومینا نسبت به آب پایین‌تر است، هم‌زمان با کاهش مقدار سیال خنک‌کننده از میزان جذب نوترون‌ها در کندساز کاسته می‌شود. بنابراین گمان می‌رود با کاهش جذب نوترون‌ها در کندساز با اضافه نمودن این نانوذره، جذب در سوخت باید افزایش یابد، در این صورت می‌باید ضریب تکثیر مؤثر نیز با افزایش مقدار این نانوذره (آلومینیم) افزایش یابد، در حالی که عکس این حالت اتفاق می‌افتد. به علت کاهش توان کندکنندگی با افزایش مقدار نانوذره، از جمعیت نوترون‌های گرمایی کاسته شده و طیف به سمت نوترون‌های با انرژی بالاتر جابه‌جا می‌شود. بنابراین، بر اثر کاهش نوترون‌های گرمایی، آهنگ جذب و در نتیجه آهنگ شکافت در سوخت نیز مطابق شکل‌های ۶ و ۷ کاهش می‌یابد و این، به صورت کاهش ضریب تکثیر مؤثر نمایان می‌شود.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه بررسی رفتار نوترونیکی رآکتورهای آب سبک با بازده بالا در پی به کارگیری نانوسیال به عنوان خنک‌کننده قلب رآکتور بود. با بررسی یافته‌های حاصل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد حجمی نانوذره در خنک‌کننده و کندساز، ضریب تکثیر مؤثر شدیداً کاهش می‌یابد؛ دلیل این امر را می‌توان کاهش تعداد اتم‌های سبک نظیر هیدروژن در کندساز و افزایش چگالی سیال خنک‌کننده دانست که به نوبه‌ی خود باعث کاهش قدرت کندسازی سیال برای نوترون‌ها در قلب رآکتور و کاهش ضریب تکثیر می‌شود. کاهش ضریب تکثیر مؤثر در مورد نانوذره‌ی مس شدیدتر و در مورد نانوذره‌ی آلومینیم اکسید ملایم‌تر است. این پدیده به چگالی نانوذره مربوط می‌شود. با افزایش مقدار نانوذره، آهنگ کندسازی در قلب رآکتور به تدریج تغییر می‌یابد. هر قدر نانوذره‌ی اضافه شده سنگین‌تر باشند، کاهش انرژی نوترون‌ها کم‌تر می‌شود؛ این پدیده کاهش ضریب تکثیر مؤثر را به دنبال دارد. هم‌چنین با توجه به یافته‌ها، ملاحظه می‌شود که با نانوذره‌ی آلومینا برخلاف سه نانوذره‌ی



شکل ۸. رابطه‌ی بین ضریب تکثیر مؤثر و درصد حجمی نانوذره.

بر اساس داده‌های مربوط به ضریب تکثیر مؤثر (شکل ۸) با افزایش مقدار نانوذره ضریب تکثیر مؤثر کاهش می‌یابد. این اثر می‌تواند به دلیل تغییر سطح مقطع‌های جذب و پراکندگی ناشی از وارد نمودن نانوذره به خنک‌کننده باشد به طوری که با افزایش بیش‌تر مقدار نانوذره توان کندسازی سیال بیش‌تر کاهش می‌یابد. هم‌چنین تا مقدار ۱ درصد حجمی از نانو ذرات مختلف، مجتمع سوخت حالت بحرانی خود را حفظ نموده و در ورای آن به حالت زیر بحرانی میل می‌کند. بیش‌ترین کاهش ضریب تکثیر مربوط به نانوذره‌ی مس و کم‌ترین آن مربوط به نانوذره‌ی آلومینا است. با افزایش مقدار نانوذره، سطح مقطع پراکندگی ماکروسکوپی مطابق شکل ۴ کاهش می‌یابد. این امر منجر به سخت شدن طیف نوترون‌ها و کاهش کم‌تر انرژی نوترون می‌شود. از این رو نوترون باید فاصله بیش‌تری را طی کند تا به حالت گرمایی برسد، یا به عبارت دیگر با افزایش مقدار نانوذره در خنک‌کننده، طول پخش نوترون افزایش می‌یابد. در نتیجه تأثیر نانوذره بر رفتار کلی رآکتور، کاهش شار نوترون‌های گرمایی است. هر اندازه جمعیت نوترون‌های گرمایی کم‌تر شود جذب نوترون در سوخت به همان اندازه کم‌تر می‌شود و این اثر کاهش بیش‌تر ضریب تکثیر مؤثر را به دنبال دارد.

مطابق شکل ۳، با افزایش درصد حجمی نانوذره، سطح مقطع پراکندگی نوترون‌های گرمایی در ناحیه‌ی کندساز در مورد مس بیش‌تر از دیگر نانو ذرات کاهش می‌یابد؛ این اثر با لحاظ نمودن افزایش ثابت پخش و جذب در کندساز منجر به کاهش بیش‌تر جمعیت نوترون‌های گرمایی می‌شود. بنابراین بیش‌ترین کاهش



## مرجع‌ها

- [1] J. Buongiorno, B. Truong, Preliminary study of water-based nanofluid coolants for PWRs, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 92 (2005) 383-384.
- [2] J. Buongiorno, L.W. Hu, S.J. Kim, R. Hannink, B. Truong, E. Forrest, Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: An evaluation of the potential features, Issues and Research Gaps. *Nucl. Technol.*, 162 (2008) 80-91.
- [3] J. Buongiorno, L.W. Hu, G. Apostolakis, R. Hanninka, T. Lucasa, A. Chupin, A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in light-water reactors, *Nucl. Eng. Des.* 239(5) (2009) 941-948.
- [4] K. Hadad, A. Hajizadeh, K. Jafarpour, B.D. Ganapo, Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000, *Ann. Nucl. Energy*, 37 (2010) 1447-1455.
- [5] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, F. Veisy, Neutronic Analysis of Nanofluids as a Coolant in Bushehr VVER-1000 Reactor, *Nukleonika*, 52(3) (2012) 375-381.
- [6] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, F. Veisy, Neutronic simulation of water-based Nanofluids as a Coolant in VVER-1000 Reactor, *Progress in Nuclear Energy*, 65 (2013 b) 32-41.
- [7] M. Nazififard, M. Nematollahi, K. Jafarpur, K.Y. Suh, Numerical Simulation of Water-Based Alumina Nanofluid in Subchannel Geometry, *Science and Technology of Nuclear Installations*, 928406 (2012).
- [8] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, F. Veisy, Subchannel Analysis of Nanofluids Application to VVER-1000 Reactor, *Chemical Engineering Research and Design*, 91(4) (2013 c) 625-632.
- [9] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, F. Veisy, Thermal-hydraulic modeling of nanofluids as the coolant in VVER-1000 reactor core by the porous media approach, *Annals of Nuclear Energy*, 51 (2013 a) 203-212.
- [10] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, Subchannel analysis of  $TiO_2$  nanofluid as the coolant in VVER-1000 reactor, *Progress in Nuclear Energy*, 73 (2014) 140-152.

دیگر تا مقدار ۱ درصد حجمی نانوذره رآکتور حالت بحرانی را حفظ کرده و نسبت به نانوذرات دیگر کاهش کم‌تری را نشان می‌دهد. از طرفی ثابت پخش نوترون‌ها با افزایش مقدار نانوذره افزایش می‌یابد به گونه‌ای که نانوذره‌ی مس دارای بیش‌ترین افزایش و نانوذره‌ی آلومینا دارای کم‌ترین افزایش است. این افزایش ثابت پخش باعث می‌شود که نوترون قبل از رسیدن به حالت گرمایی، فاصله‌ی بیش‌تری را در ناحیه‌ی کندساز طی کند. تا این امر تأثیر به‌سزایی در فرایند کند شدن نوترون و کاهش ضریب تکثیر مؤثر خواهد داشت. بنابراین در مقدارهای کم‌تر از ۱ درصد حجمی، نانوذره‌ی آلومینا در شرایط عملکرد طبیعی رآکتور، نانوذره‌ی مناسب‌تری است. با این حال، در شرایط گذرا و طی حوادث که نیاز به کاهش شدید ضریب تکثیر مؤثر است برای افزایش ایمنی رآکتور نانوسیال مس گزینه‌ی مناسب‌تری خواهد بود.

## پی‌نوشت‌ها

1. In vessel retention (IVR)
1. High performance light water reactor (HPLWR)
2. Pitch to fuel diameter, P/D



- [11] O. Safarzadeh, A.S. Shirani, A. Minucmehr, F. Saadatian-derakhshandeh, Coupled neutronic/thermo-hydraulic analysis of water/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids in a VVER-1000 reactor, *Annals of Nuclear Energy*, 65 (2014) 72-77.
- [12] NEA, NEA-1507, WIMSD-5B (98/11), Deterministic Multi-group Reactor Lattice Calculations (1999).
- [13] T.B. Fowler, CITATION-LDI2 Nuclear Reactor Core Analysis Code System, CCC-643, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (1999).
- [14] US DOE, Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, a Technology Roadmap for the G. IV Nuclear Energy System (2002).
- [15] X. Cheng, Design analysis of core assemblies for supercritical pressure conditions *Nucl, Eng. Des.*, 223 (2003) 279-294.
- [16] D. Squarer, T. Schulenberg, D. Struwe, Y. Oka, D. Bittermann, N. Aksan, C. Maráczy, R. Kyrki-Rajamäki, A. Souyri, P. Dumaz, High performance light water reactor, *Nucl. Eng. Des.*, 221 (2003) 167-180.
- [17] V. Velagapudi, R.K. Konijeti, C.S. Aduru, Empirical correlation to predict thermo-physical and heat transfer characteristics of nanofluids, *Thermal Science*, 12(2) (2008) 27-37.
- [18] J.J. Duderstadt, L.J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons Inc (1976).
- [19] S. Tashakora, A.A. Salehia, G. Jahanfarnia, A. Abbaspour Tehrani Fard, Neutronic analysis of HPLWR fuel assembly cluster, *Annals of Nuclear Energy*, 50 (2012) 38-43.
- [20] Y. Oka, S. Koshizuka, Y. Ishiwatari, A. Yamaji, Super light water reactors and super fast reactors, *Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors*, Springer Science+Business Media (2010).