

نشریه تابش و فناوری هسته‌ای، دوره ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶

## کاربرد نانو سیال آلومینا به عنوان خنک کننده در راکتور هسته‌ای آب سبک در فشار فوق بحرانی (HPLWR)

سامان تشکر\*

استادیار، گروه مهندسی انرژی تجدید پذیر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۸ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸)

### چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی رفتار ترموهیدرولیکی نانوسیالات آلومینا به عنوان خنک کننده در بسته سوخت راکتور HPLWR می باشد. راکتورهای آب سبک با بازده بالا (HPLWR) یکی از انواع راکتورهای آب سبک در فشار فوق بحرانی (SCWR) می باشد که توسط اتحادیه اروپا مورد مطالعه و طراحی قرار گرفته است. این نوع راکتور نسبت به سایر راکتورها دارای تکنولوژی ساده تر، بازده بالا و دبی سیال خنک کننده کمتر می باشد. هیچ گونه جوششی در این نوع راکتور وجود نخواهد داشت. معادلات بقا با بکارگیری روش حجم محدود جداسازی شده و دستگاه معادلات جبری غیر خطی بدست آمده توسط روشهای عددی حل شده اند. نتایج بدست آمده از بررسی غلظت های مختلف نانوذره آلومینا در خنک کننده و کندکننده با نتایج سیال آب مقایسه شده است. نتایج اولیه نشان دادند در غلظت های پایین (کمتر از ۰/۱ درصد کسر حجمی) استفاده از نانوسیال آلومینا به عنوان خنک کننده در قلب راکتور HPLWR از سایر غلظت های مورد بررسی مناسب تر می باشد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوسیال، آنالیز ترموهیدرولیکی، فشار فوق بحرانی

\*شیراز، کیلومتر ۵ جاده صدرا، پردیس دانشگاه آزاد اسلامی شیراز، گروه مهندس مکانیک و انرژی تجدید پذیر. تلفن: ۰۷۱۱-۶۴۱۰۰۴۰

دورنگار: ۰۷۱۱-۶۱۹۱۶۵۶

پست الکترونیکی: saman.tashakor@yahoo.com

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر سیالاتی حاوی ذرات معلق با ابعاد نانو بحث جدید و جذابی را در تحقیقات علمی گشوده‌اند، که از آن تحت عنوان نانوسیالات نام برده می‌شود. نانو سیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی هستند. اندازه ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. این ذرات از جنس ذرات فلزی آلومینیوم اکسید ( $Al_2O_3$ ) و اکسید مس (CuO) هستند. سیالات متداولی که در زمینه انتقال حرارت استفاده می‌شوند ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. ذرات نانو با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال، که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می‌شود، می‌گردند. نانوسیالات به علت 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 نیز می‌توان از نانوسیالات جهت بهبود انتقال حرارت، کاهش حجم راکتور، افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌های ساخت نیروگاه، بهره برد [۱]. راکتورهای آب سبک تحت فشار ما فوق بحرانی (HPLWR) یکی از شش نوع راکتور تحت طراحی نسل چهارم می‌باشند. در این نوع راکتور، آب سبک با فشار ۲۵ MPa به عنوان سیال خنک کننده و کند کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی این نوع راکتور بر اساس تکنولوژی به کار رفته در راکتورهای آب سبک (LWR) و نیروگاه‌های با سوخت فسیلی در فشار بالا انجام گرفته است. این نوع راکتور نسبت به سایر راکتورها دارای تکنولوژی ساده‌تر، بازده بالا و دبی سیال خنک کننده کمتر می‌باشد. هیچ گونه جوششی در این نوع راکتور وجود نخواهد داشت، بنابراین دمای خنک کننده بدون محدودیت می‌تواند افزایش یابد. بازده بالا باعث کمتر بودن هزینه

تولید الکتریسیته و کاهش مصرف سوخت می‌باشد [۳-۱].

گرچه اثرات و رفتار حرارتی و نوترونیکی نانوسیالات در

راکتورهای نسل سوم مورد مطالعه قرار گرفته است [۹-۴]

اما به تاثیرات آن در راکتورهای نسل چهارم، تا کنون اشاره نشده است. در این تحقیق برای تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی نانوسیالات به عنوان خنک کننده در بسته سوخت راکتور HPLWR از روش تحلیل زیرکانال استفاده شده است. زیرکانال معمولاً به جریان عبوری از میان میله سوخت مربوط می‌شود. برای تجزیه و تحلیل رفتار یک مجتمع سوخت معمولاً از روش تحلیل زیرکانال استفاده می‌شود زیرا در این روش علاوه بر محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی نظیر فشار، دما و سرعت در خنک کننده توزیع دما در سوخت نیز محاسبه می‌گردد. از آنجا که در کتابخانه کدهای ترموهیدرولیکی موجود نظیر COBRA-EN و RELAP5 فقط ویژگی‌های حرارتی سیال آب در محدوده فشار راکتورهای PWR معمول وجود داشت لازم بود برای تجزیه تحلیل رفتار راکتور HPLWR یک برنامه ترموهیدرولیکی با لحاظ نمودن جداول ترمودینامیکی آب در محدوده فشار فوق بحرانی و در نظر گرفتن ویژگی‌های حرارتی نانوسیال ارائه شود. بدین جهت یک برنامه ترموهیدرولیکی جدید برای بسته سوخت راکتور HPLWR ارائه گردید.

## ۲. روش کار

## ۱.۲. استخراج معادلات بقاء [۱۰]

## ۱.۱. ۱. معادله بقای جرم

معادلات بقا جرم در حجم کنترل انتخابی  $k$ ، شامل جریان محوری و عرضی بین کانال‌های مجاور می‌باشد. معادله فوق بیان می‌کند که جریان خروجی از زیر کانال شماره  $k$  شامل جریان ورودی به این کانال و جریان‌های عرضی از کانال‌های مجاور

$$A \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + A \frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} h_k - G'_{jk} h_j) \quad (\xi)$$

$$+ \sum_j S_{kj} G'_{kj} h_k^* = q' + A \frac{DP}{Dt}$$

می‌باشد. جریان‌های عرضی توسط اختلاف فشار بین دو کانال مجاور و همچنین جریان‌های اغتشاش به وجود می‌آید.

در معادله فوق  $\Delta Z(m)$  معرف ارتفاع حجم کنترل انتخابی،  $t(s)$  معرف زمان،  $Sk_j(m)$  بیانگر فاصله عرضی مابین دو زیر کانال مجاور  $j, k$ ،  $\rho(kg/m^3)$  معرف دانسیته نانو سیال،  $u(m/s)$  معرف سرعت سیال در حجم کنترل انتخابی می‌باشد.  $G'$  و  $G^*$  معرف جریان عرضی اغتشاش و دگرسویی بین دو کانال مجاور می‌باشد.

## ۲.۲. مدل انتقال حرارت بین سوخت و خنک کننده

### ۱.۲.۲. معادله انتقال حرارت جابجایی

با توجه به مقاومت‌های حرارتی بین سطح خارجی دیواره غلاف و بالک سیال، معادله انتقال حرارت به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\Delta T_w = (T_w - T_b) = \frac{q''}{h_{nf}} = \frac{q'}{2\pi R_{co} h_{nf}} \quad (5)$$

در این معادله  $T_w$  دمای دیواره غلاف و  $T_b$  دمای توده سیال خنک کننده می‌باشد.  $h_{nf}$  ضریب هدایت حرارتی نانو سیال می‌باشد که وابسته به مشخصات نانو سیال در قلب رآکتور می‌باشد [۱۱]. بنابراین می‌توان نوشت:

$$h_{nf} = \frac{Nu_{nf} K_{nf}}{D} \quad (6)$$

تا کنون مدل‌های تئوری و تجربی بسیاری جهت محاسبه هدایت حرارتی نانو سیالات ارائه شده است. در این مدل‌سازی از مدلی که توسط Xuan و همکارانش ارائه شده بود به دلیل انطباق مناسب با نتایج آزمایشگاهی و شرایط فیزیکی مسئله انتخاب گردید [۱۲].

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = c Re_m^{0.175} \phi^{0.05} \left( \frac{k_p}{k_f} \right)^{0.2324} \quad (7)$$

می‌باشد. جریان‌های عرضی توسط اختلاف فشار بین دو کانال مجاور و همچنین جریان‌های اغتشاش به وجود می‌آید.

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + A \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} - G'_{jk})$$

$$+ \sum_j S_{kj} G'_{kj} = 0 \quad (1)$$

در معادله فوق  $\Delta Z(m)$  معرف ارتفاع حجم کنترل انتخابی،  $t(s)$  معرف زمان،  $Sk_j(m)$  بیانگر فاصله عرضی مابین دو زیر کانال مجاور  $j, k$ ،  $\rho(kg/m^3)$  معرف دانسیته نانو سیال،  $u(m/s)$  معرف سرعت سیال در حجم کنترل انتخابی می‌باشد.  $G'$  و  $G^*$  معرف جریان عرضی اغتشاش و دگرسویی بین دو کانال مجاور می‌باشد.

### ۲.۱.۲. معادله بقای مومتم محوری

$$-A \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - A \frac{\partial(P)}{\partial z} - AC_k \rho u^2 - A \rho g \sin \theta =$$

$$A \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} u_k - G'_{jk} u_j)$$

$$+ \sum_j S_{kj} G'_{kj} u_k^* \quad (2)$$

ضریب  $C_k$  در معادله مومتم به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$C_k = \frac{f}{2D_e} \quad (3)$$

که در این معادله  $P(Pa)$  معرف فشار سیال در حجم کنترل انتخابی از زیر کانال،  $f$  معرف ضریب اصطکاک،  $De(m)$  قطر هیدرولیکی،  $A(m^2)$  معرف سطح مقطع زیر کانال  $\rho(kg/m^3)$  معرف چگالی سیال،  $\Delta Z(m)$  معرف ارتفاع حجم کنترل انتخابی،  $g(\frac{m}{s^2})$  شتاب جاذبه و  $u_k(\frac{m}{s^2})$  و  $u_j(\frac{m}{s^2})$  سرعت‌های محوری در زیرکانال‌های مجاور  $k$  و  $j$  می‌باشد.

### ۲.۱.۳. معادله انرژی داخلی

معادله انرژی داخلی را نیز می‌توان به همین ترتیب استخراج نمود.

می‌باشند.

### ۳.۲. ویژگیهای حرارتی نانوسیال آلومینا

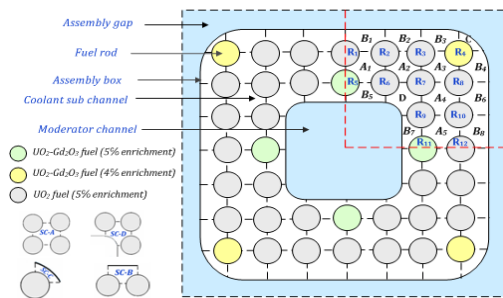
در مدل‌سازی انجام شده نانوسیال آلومینا به عنوان خنک کننده و کند کننده در غلظت‌های مختلف نانوذرات از ۰/۰۰۰۱ تا ۵ درصد حجمی در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ ویژگی‌های حرارتی نانوذرات آلومینا با آب مقایسه شده است [۱۵].

جدول ۱. مقایسه ویژگیهای حرارتی نانوذرات آلومینا با آب

Property	C [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	k [W/m.K]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]
Water	4179	997.1	0.605	1.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	765	3970	40	1317

### ۳. نتایج

در شکل (۱) چیدمان میله‌های سوخت در یک مجتمع سوخت راکتور HPLWR نشان داده شده است.



شکل ۱. چیدمان میله‌های سوخت در یک مجتمع

سوخت راکتور HPLWR [۱۰]

در مدل‌سازی انجام شده برای مقایسه رفتار نانوسیالات نسبت به سیال آب، از شرایط مرزی یکسانی استفاده شده است که شامل شار حرارتی، فشار خروجی، دبی و دمای ورودی یکسان می‌باشد. از آنجا که نانوذره آلومینا مطابق محاسبات نوترونیکی نانوذره مناسب‌تری ارزیابی گردید این بخش از محاسبات بر روی این نانوذره متمرکز شده است. از طرفی با توجه به مراجع ذکر شده

در این رابطه  $K_p$  رسانش حرارتی نانو ذره،  $K_f$  رسانش حرارتی سیال پایه (آب) و  $Re_m$  عدد رینولدز بهینه شده می‌باشد. ثابت C وابسته به نوع نانوذرات می‌باشد که برای نانوذره آلومینا در آب مقدار آن برابر ۱ است. عدد رینولدز بهینه شده در رابطه (۷) وابسته به نوع نانوذرات و ابعاد آنها می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Re_m = \frac{1}{\nu_f} \left( \frac{18k_B T}{\rho_p d_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

ضریب انتقال حرارت در رابطه (۶) در جریان آشفته برای لوله (کانال)‌های دایره‌ای از طریق معادله زیر محاسبه می‌گردد [۱۲].

$$(Nu_{nf})_{c.t.} = 0.0256(Re_{nf})^{0.8} (Pr_{nf})^{0.4} \quad (۹)$$

در این معادله رینولدز و پراتل از معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \nu D}{\mu_{nf}} \quad (۱۰)$$

$$Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} C_{nf}}{K_{nf}} \quad (۱۱)$$

Pak و Cho [۱۳] در سال ۱۹۹۸ رابطه‌ای را برای لزجت

نانوذرات آلومینا در آب ارائه نمودند که توافق خوبی با نتایج تجربی داشت:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2) \quad (۱۲)$$

### ۲.۲.۲. معادله هدایت حرارتی [۱۴]

معادلات هدایت حرارتی در سوخت و غلاف در جهت

شعاعی به صورت زیر می‌باشد:

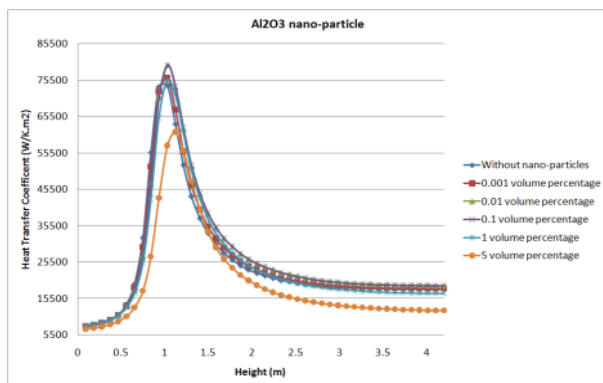
$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( K_{fuel} r \frac{dT}{dr} \right) = \dot{q}''' \quad (۱۳)$$

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( K_{clad} r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (۱۴)$$

در این معادلات  $K_f$  و  $K_c$  به ترتیب ضریب هدایت سوخت

و غلاف می‌باشند که مقادیر آنها تابعی از دمای سوخت و غلاف

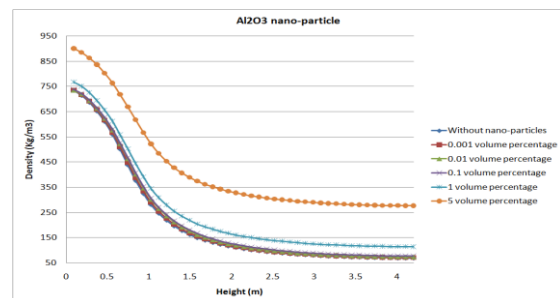
با توجه به اینکه دبی یکسانی برای غلظت های مختلفی از نانوسیال در نظر گرفته شده است، لذا بنابر قانون پیوستگی جرم و با توجه به اینکه سطح مقطع کانال ثابت مانده است، هر چقدر غلظت نانوسیال در قلب افزایش یابد به تبع آن سرعت نانوسیال در قلب کاهش پیدا می کند به گونه های این روند کاهش عکس رفتار چگالی خنک کننده می باشد. توزیع ضریب انتقال حرارت بین سطح خارجی غلاف سوخت و خنک کننده در شکل (۴) برای سیال آب و نانوذره آلومینا در درصد های حجمی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند.



شکل ۴. توزیع محوری ضریب انتقال حرارت نانوسیال آلومینا در خنک کننده

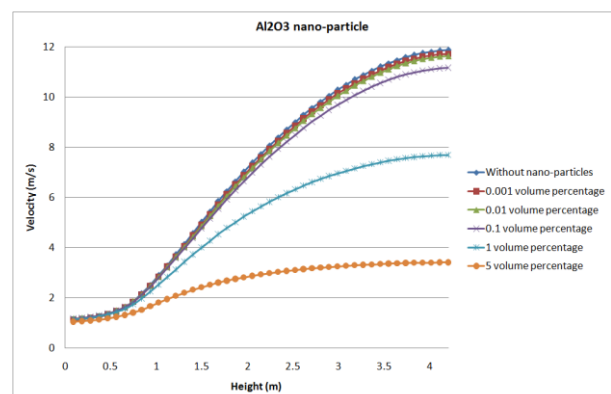
نتایج نشان می دهند ضریب انتقال حرارت در طول کانال افزایش یافته و به ماکزیمم مقدار خود در دمای شبه بحرانی می رسد و سپس شروع به کاهش می کند. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت در ارتفاع تقریبی  $1/3$  m مشاهده می شود. اما در غلظت- های مختلف نانوذرات در خنک کننده رفتار متفاوتی از افزایش ضریب انتقال حرارت مشاهده می گردد. هر چقدر غلظت نانوذرات در خنک کننده افزایش می یابد ضریب انتقال حرارت نیز بیشتر می شود اما از غلظت  $0/1$  درصد به بالا این روند افزایشی عکس شده به گونه ای در غلظت های بالاتر شاهد کاهش ضریب انتقال حرارت سیال می باشیم. دلیل این گونه رفتار متفاوت به ویژگی های منحصر به فرد سیال در فشار فوق بحرانی و نوسان ضریب انتقال حرارت در چنین شرایطی برمی گردد. در غلظت

روابط تجربی مربوط به ویژگی های نانوسیال آلومینا تا محدوده کسر حجمی ۵ درصد معتبر می باشد لذا نتایج این بخش از محاسبات تا این غلظت ارائه می گردد. در شکل (۲) توزیع محوری چگالی خنک کننده در گرمترین کانال خنک کننده برای سیال آب و نانوذره آلومینا در درصد های حجمی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند. واضح است، با افزایش درصد حجمی نانو ذرات، چگالی خنک کننده مطابق رابطه (۲) افزایش می یابد.



شکل ۲. توزیع محوری چگالی خنک کننده در غلظت های مختلف نانوذرات آلومینا

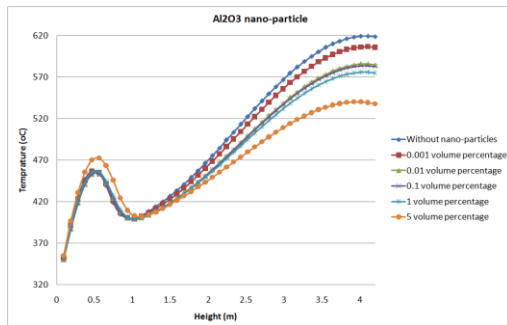
اما به علت افزایش دمای سیال در طول کانال خنک کننده، سیال منبسط شده در نتیجه چگالی خنک کننده در امتداد طول کاهش می یابد. در شکل (۳) توزیع محوری سرعت در گرمترین کانال خنک کننده در غلظت های مختلفی از نانوسیال آلومینا با آب مقایسه شده است.



شکل ۳. توزیع محوری سرعت نانوسیال آلومینا در خنک کننده

ملاحظه می گردد با افزایش درصد حجمی نانو ذرات، دمای خنک کننده کاهش می یابد. دلیل کاهش دمای خنک کننده یکی به علت رفتار متفاوت ضریب انتقال حرارت مطابق شکل (۴) می باشد و دیگری به تغییرات فشار و دبی سیال با افزایش غلظت نانو ذرات برمی گردد. با افزایش غلظت نانو ذرات، سرعت سیال کاهش می یابد در نتیجه فشار نیز در گرم ترین کانال خنک کننده افزایش می یابد.

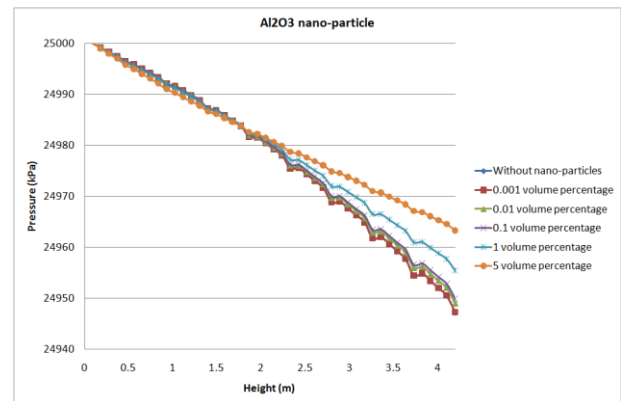
بنابراین جهت یکسان سازی فشار در خروج از همه کانالها، دبی سیال در چنین شرایطی افزایش می یابد. افزایش دبی باعث افزایش ضریب اصطکاک و در نتیجه افزایش افت فشار خواهد شد. از طرفی افزایش دبی سیال در هر حجم کنترلی باعث می گردد جرم بیشتری از سیال در مقابل هر بخش از سطوح انتقال حرارت (دیواره غلاف) واقع شود. این امر منجر به کاهش دمای سیال می گردد. توزیع محوری دمای سطح خارجی غلاف در گرم ترین میله سوخت در غلظت های مختلف نانو ذره آلومینا در خنک کننده در شکل (۷) ارائه شده است.



شکل ۷. توزیع محوری دمای غلاف در گرم ترین میله سوخت در حالت نانو سیال آلومینا به عنوان خنک

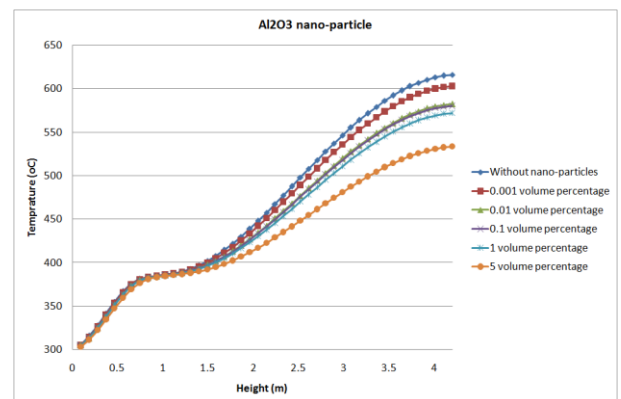
توزیع محوری دمای سطح خارجی غلاف با افزایش شار حرارتی، دمای خنک کننده و ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. در محدوده ای که ضریب انتقال حرارت بیشترین مقدار خود را داراست، دمای سطح خارجی غلاف کاهش می یابد و سپس با

های ۱ درصد حجمی و بالاتر از آن به دلیل افزایش لزجت سیال و کاهش سرعت سیال مطابق شکل (۳) باعث کاهش عدد رینولدز سیال شده، بنابراین عدد ناسلت و به تبع آن ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد. در شکل (۵) توزیع محوری فشار در گرمترین کانال خنک کننده برای سیال آب و نانو ذره آلومینا در درصدهای حجمی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند.



شکل ۵. توزیع محوری فشار نانو سیال آلومینا در خنک کننده

در مدل محاسباتی، دبی ورودی به زیر کانالهای خنک کننده به گونه ای تنظیم شده است که فشار خروجی در تمامی کانال های موازی برابر باشد. شبکه نگهدارنده میله های سوخت، باعث ایجاد نوسانهایی در توزیع افت فشار محوری می گردد. در شکل (۶) توزیع محوری دما در گرمترین کانال خنک کننده برای سیال آب و نانو ذره آلومینا در درصدهای حجمی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند.



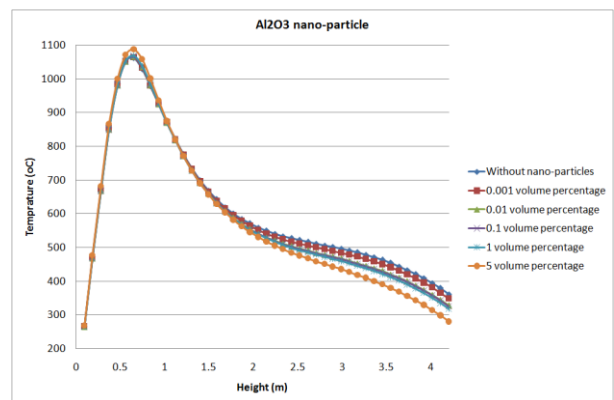
شکل ۶. توزیع محوری دمای نانو سیال آلومینا در خنک کننده

می کند. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت در ارتفاع تقریبی ۱/۳m مشاهده می شود. در محاسبات انجام داده شده نشان داده شده است که دمای مرکز سوخت و دمای غلاف در داغ ترین کانال از مقدار مجاز در نظر گرفته شده برای آن تجاوز نمی کند. بیشترین مقدار دمای خنک کننده و غلاف در نواحی خروج از بسته سوخت و بیشترین مقدار دمای سوخت در ارتفاع ۰/۶m بدست آمده است. نتایج نشان می دهند در درصدهای حجمی بسیار پایین، نتایج حاصل از نانوسیال با سیال آب تفاوت چندانی ندارد. اما از درصد حجمی ۰/۱ درصد (کسر حجمی ۰/۰۰۱) به بالا تغییرات قابل توجه خواهد بود. دمای متوسط سیال خنک کننده آب در خروج از بسته سوخت برابر با ۴۹۰ °C می باشد. اما با اضافه نمودن نانوذرات به خنک کننده و کند کننده، دمای خروجی از داغ ترین کانال کاهش می یابد در حالی که متوسط دمای خروج از بسته سوخت تقریباً ثابت می ماند. که دلیل این امر را می توان تغییرات ضریب انتقال حرارت و دبی سیال در نتیجه وارد نمودن نانوذرات دانست. بنابراین ایمنی راکتور در چنین حالتی در مواجهه با حوادث گذرا افزایش می یابد.

## مراجع

- [1] 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), 941-948, 2009.
- [2] S. Tashakor, A.A. Salehi, G. Jahanfarnia, A. Abbaspour Tehrani Fard, Thermal-hydraulic analysis of HPLWR fuel assembly cluster, *The Journal of Supercritical Fluids*, 77, 91-99, 2013.
- [3] S. Tashakor, A.A. Salehi, G. Jahanfarnia, A. Abbaspour Tehrani Fard, Neutronic analysis of HPLWR fuel assembly cluster, *Annals of Nuclear Energy*, 50, 38-43, 2012.
- [4] US DOE, Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, a Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy System, 2002.
- [5] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, F. Veisy, Thermal-hydraulic modeling of nanofluids as the coolant in

کاهش ضریب انتقال حرارت، دمای سطح خارجی غلاف افزایش می یابد. توزیع محوری دمای متوسط سوخت در شکل (۸) ارائه شده است. توزیع محوری دمایی سوخت در نواحی پایینی بسته سوخت به ماکزیمم مقدار خود می رسد. پیک قدرت ایجاد شده در پایین زیر کانالها به دلیل کمتر بودن ضریب انتقال حرارت بیشتر می باشد.



شکل ۸. توزیع محوری متوسط دمای میله سوخت در حالت نانوسیال آلومینا به عنوان خنک کننده

## ۴. بحث و نتیجه گیری

هدف از ارائه این تحقیق بررسی رفتار ترموهیدرولیکی نانوسیال آلومینا به عنوان خنک کننده و کند کننده در راکتور HPLWR بوده است. در محاسبات ترموهیدرولیکی انجام شده معادلات بقای پیوستگی، مومنتوم و انرژی با استفاده از روش حجم محدود به صورت عددی حل شده اند. دبی خنک کننده در ورود به زیر کانالها به گونه ای محاسبه شده اند که فشار سیال خنک کننده در خروج از تمامی کانالها یکسان باشد. نتایج نشان می دهند که دمای خنک کننده در انتهای زیر کانالها به دلیل افزایش شدید انتقال حرارت از خنک کننده داغ به کند کننده سرد اندکی کاهش می یابد. ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد و به ماکزیمم مقدار خود در دمای شبه بحرانی رسیده و سپس شروع به کاهش

- VVER-1000 reactor core by the porous media approach, *Annals of Nuclear Energy*, 51, 203-212, 2013a.
- [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, 32-41, 2013b.
- [7] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, F. Veisy, Subchannel Analysis of Nanofluids Application to VVER-1000 Reactor, *Chemical Engineering Research and Design*, 91 (4), 625-632, 2013c.
- [8] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, Subchannel analysis of TiO<sub>2</sub> nanofluid as the coolant in VVER-1000 reactor, *Progress in Nuclear Energy*, 73, 140-152, 2014.
- [9] K. Hadad, A. Hajizadeh, K. Jafarpour, B.D. Ganapo, Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000, *Ann. Nucl. Energy*, 37, 1447-1455, 2010.
- [10] S. Tashakor, A.A. Salehi, G. Jahanfarnia, A. Abbaspour Tehrani Fard, Thermal-hydraulic analysis of HPLWR fuel assembly cluster, *The Journal of Supercritical Fluids*, 77, 91-99, 2013.
- [11] V. Velagapudi, R.K. Konijeti, C.S. Aduru, Empirical correlation to predict thermo-physical and heat transfer characteristics of nanofluids, *THERMAL SCIENCE*, 12 (2), 27-37, 2008.
- [12] Y.M. Xuan, Li Q. Investigation on convective heattransfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat transfer*, 125, 151-155, 2003.
- [13] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particle, *Experimental Heat Transfer*, 11, pp. 151-170, 1998.
- [14] N.E. Todreas, M.S. Kazimi, Nuclear system II, Elements of Thermal Hydraulic Design, Taylor & Francis, USA, 1990.
- [15] V. Velagapudi, R.K. Konijeti, C.S. Aduru, Empirical correlation to predict thermo-physical and heat transfer characteristics of nanofluids, *Thermal Science*, 12 (2), 27-37, 2008.



*Journal of Radiation and Nuclear Technology / Vol. 04 / No. 02 / Summer 2017*

## **Nano fluid application as a coolant in High performance light water Reactor(HPLWR)**

**S.Tashakor**

*Department of Renewable energy ,Shiraz Branch, Islamic Azad University Shiraz Iran*

*Corresponding author's E-mail: [saman.tashakor@yahoo.com](mailto:saman.tashakor@yahoo.com)*

*(Received: 28/04/2017- Accepted: 18/06/2017)*

### **ABSTRACT**

The present article is a thermal–hydraulic analysis of the nanofluid in HPLWR fuel assembly. The High-Performance Light Water Reactor (HPLWR) is the European version of the Supercritical-pressure Water Cooled Reactor (SCWR). Light water reactors at supercritical pressure, being currently under design, are the new generation of nuclear reactors. Supercritical water cooled reactors (HPLWR & SCWR) are essentially light water reactors (LWRs) operating at higher pressure and temperature. HPLWRs achieve high thermal efficiency (i.e., about 45% vs. about 35% efficiency for advanced LWRs) and are simpler plants as the need for many of the traditional LWR components. The governing equations include energy, mass and momentum equations beside thermal–hydraulic equations are solved numerically using the finite volume (upwind) method. Thermal hydraulic results using nanofluid in coolant and moderator channel are discussed and compared to pure water results. The achieved results show that the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with volume fraction less than 0.1 percent is the optimum case.

**Keywords:** *Nanofluid, Thermal–hydraulic analysis, HPLWR, supercritical pressure.*