



# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفندماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

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

سامان، تشکر: احسان، ظریفی

\* دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، دانشکده فنی و مهندسی، شیراز، ایران

\*\*\* سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای،

### 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. معادلات بقا با بکارگیری روش حجم محدود 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. واژه های کلیدی: نانوسیال، آنالیز ترموهیدرولیکی، HPLWR، فشار فوق بحرانی



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## ۱- مقدمه

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. این ذرات از جنس ذرات فلزی آلومینیوم اکسید ( $Al_2O_3$ ) و اکسید مس ( $CuO$ ) هستند. 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، بهره‌برد [1]. 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 خنک‌کننده و کندکننده 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 خنک‌کننده کمتر می‌باشد. هیچ‌گونه جوششی در این نوع راکتور وجود نخواهد داشت، بنابراین دمای خنک‌کننده بدون محدودیت می‌تواند افزایش یابد. بازده بالا باعث کمتر بودن هزینه تولید الکتریسیته و کاهش مصرف سوخت می‌باشد [3] [4] [2].

گرچه اثرات و رفتار حرارتی و نوترونیکی نانوسیالات در راکتورهای نسل سوم مورد مطالعه قرار گرفته است [6] [7] [8] [5] [9] اما به تاثیرات آن در راکتورهای نسل چهارم، تا کنون اشاره نشده است. 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

۲-۱- استخراج معادلات بقاء [10]

۲. ۱. ۱. معادله بقای جرم



# بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

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

(۱)

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + A \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} - G'_{jk}) + \sum_j S_{kj} G_{kj}^* = 0$$

در معادله فوق  $\Delta Z (m)$  معرف ارتفاع حجم کنترل انتخابی،  $t (s)$  معرف زمان،  $S_{kj} (m)$  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 می باشد.  $G$  و  $G^*$  معرف جریان عرضی اغتشاش و دگرسویی بین دو کانال مجاور می باشد.

۲. ۱. ۲. معادله بقای مومنتم محوری

(۲)

$$-A \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - A \frac{\partial(P)}{\partial z} - AC_k \rho u^2 - A \rho g \sin \theta = A \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} u_k - G'_{jk} u_j) + \sum_j S_{kj} G_{kj}^* u_{kj}^*$$

ضریب  $C_k$  در معادله مومنتوم به صورت زیر نمایش داده می شود:

(۳)

$$C_k = \frac{f}{2D_e}$$

که در این معادله  $P (Pa)$  معرف فشار سیال در حجم کنترل انتخابی از زیر کانال،  $f$  معرف ضریب اصطکاک،  $D_e (m)$  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  $u_j (\frac{m}{s^2})$  و  $u_k (\frac{m}{s^2})$  سرعت های محوری در زیرکانال های مجاور  $k$  و  $j$  می باشد.

۲. ۱. ۳. معادله انرژی داخلی

معادله انرژی داخلی را نیز می توان به همین ترتیب استخراج نمود.

(۴)

$$A \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + A \frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} h_k - G'_{jk} h_j) + \sum_j S_{kj} G_{kj}^* h_{kj}^* = q' + A \frac{DP}{Dt}$$



# بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ و دانشگاه اصفهان

$\dot{q}$  (معرف گرمای اضافه شده به زیر کانال  $k$  از میله های سوخت مجاور می باشد.  $h$  (kJ/kg) معرف آنتالپی نانو سیال می باشد. عبارتهای در سمت چپ معادله معرف نرخ افزایش آنتالپی نانو سیال، تغییرات محوری آنتالپی و آنتالپی منتقل شده در اثر جریان عرضی دگرسویی و اغتشاش می باشد.

۲-۲- مدل انتقال حرارت بین سوخت و خنک کننده

- معادله انتقال حرارت جابجایی

با توجه به مقاومت های حرارتی بین سطح خارجی دیواره غلاف و بالک سیال، معادله انتقال حرارت به صورت زیر نوشته می شود.

(۵)

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

در این معادله  $T_w$ ، دمای دیواره غلاف و  $T_b$ ، دمای بالک سیال خنک کننده می باشد.  $h_{nf}$  ضریب هدایت حرارتی نانو سیال می باشد که وابسته به مشخصات نانو سیال در قلب رآکتور دارد [11]. بنابراین می توان نوشت:

(۶)

$$h_{nf} = \frac{Nu_{nf} K_{nf}}{D}$$

تا کنون مدل های تئوری و تجربی بسیاری جهت محاسبه هدایت حرارتی نانو سیالات ارائه شده است. در این مدل سازی از مدلی که توسط Jang و همکارانش [11] ارائه شده بود به دلیل انطباق مناسب با نتایج آزمایشگاهی و شرایط فیزیکی مسئله انتخاب گردید.

(۷)

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

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

(۸)

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



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

ضریب انتقال حرارت در رابطه (۶) در جریان آشفته برای لوله (کانال) های دایره ای از طریق معادله زیر محاسبه می گردد [12]:

(۹)

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

در این معادله رینولدز و پرائتل از معادلات زیر بدست می آیند:

(۱۰)

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} v D}{\mu_{nf}}$$

(۱۱)

$$Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} C_{nf}}{K_{nf}}$$

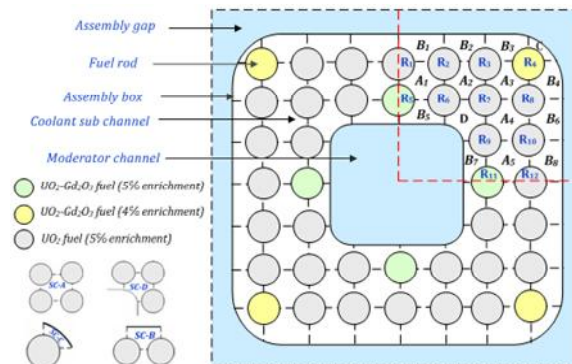
Pak و Cho [13] در سال ۱۹۹۸ رابطه ای را برای لزجت نانوذرات آلومینا در آب ارائه نمودند که توافق خوبی با نتایج تجربی داشت:

(۱۲)

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

۲۳- نتایج

در شکل (۱) چیدمان میله های سوخت در یک مجتمع سوخت رآکتور HPLWR نشان داده شده است.



شکل ۱: چیدمان میله های سوخت در یک مجتمع سوخت رآکتور HPLWR [10]

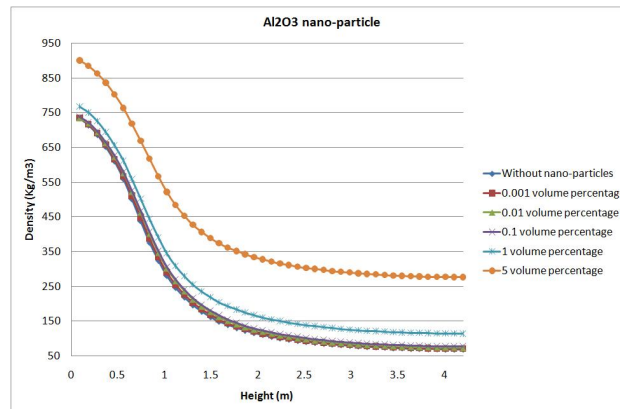
در مدلسازی انجام شده برای مقایسه رفتار نانوسیالات نسبت به سیال آب، از شرایط مرزی یکسانی استفاده شده است که شامل شار حرارتی، فشار خروجی، دبی و دمای ورودی یکسان می باشد. در شکل (۲) توزیع محوری چگالی خنک کننده در گرمترین کانال خنک کننده برای سیال آب و نانوذره آلومینا در درصدهای حجمی مختلف



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

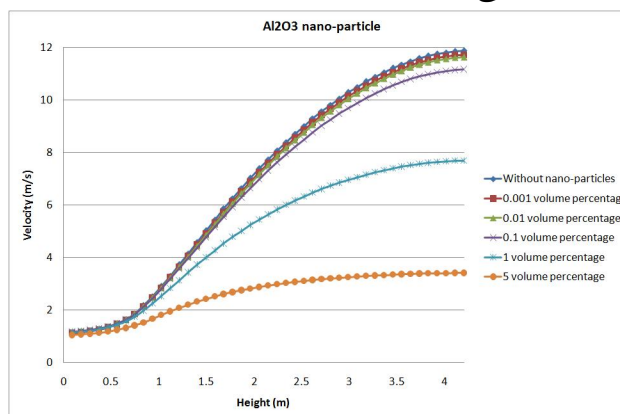
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند. واضح است، با افزایش درصد حجمی نانو ذرات، چگالی خنک کننده افزایش می یابد. 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.



شکل (۲) توزیع محوری چگالی خنک کننده در غلظت های مختلف نانو ذرات آلومینا

در شکل (۳) توزیع محوری سرعت در گرمترین کانال خنک کننده در غلظت های مختلفی از نانو سیال آلومینا با آب مقایسه شده است. بنابر قانون پیوستگی جرم و با توجه به اینکه سطح مقطع کانال ثابت مانده است، هر چه قدر غلظت نانو سیال در قلب افزایش یابد به تبع آن سرعت نانو سیال در قلب کاهش پیدا می کند.



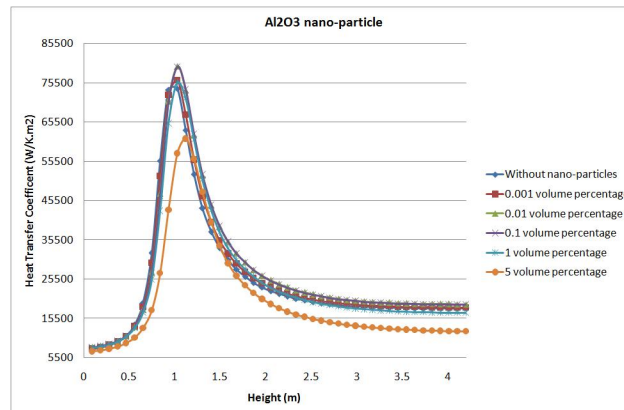
شکل (۳) توزیع محوری سرعت نانو سیال آلومینا در خنک کننده

توزیع ضریب انتقال حرارت بین سطح خارجی غلاف سوخت و خنک کننده در شکل (۴) برای سیال آب و نانو ذره آلومینا در درصدهای حجمی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند.



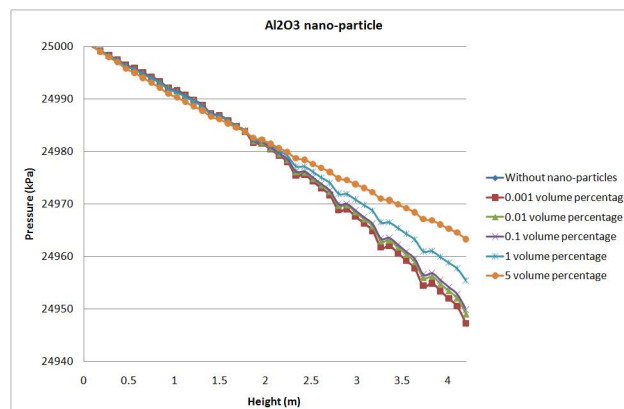
# بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



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  $1/3 \text{ m}$  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 ویژگیهای منحصر به فرد سیال در فشار فوق بحرانی و نوسان ضریب انتقال حرارت در چنین شرایطی برمی گردد. در غلظت های  $1$  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 نانوذره آلومینا در درصدهای حجمی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند. 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.



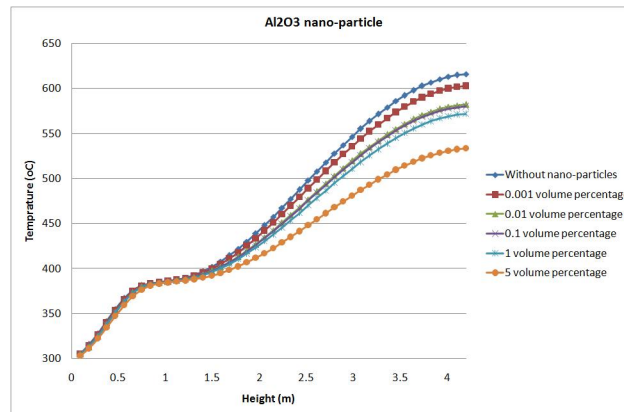


# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شکل (۵) توزیع محوری فشار نانوسیال آلومینا در خنک کننده

در شکل (۶) توزیع محوری دما در گرمترین کانال خنک کننده برای سیال آب و نانوذره آلومینا در درصد های حجمی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند.



شکل (۶) توزیع محوری دمای 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 نانوذرات برمی گردد. با افزایش غلظت نانوذرات، 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.

## ۴. بحث و نتیجه گیری

هدف از ارائه این تحقیق بررسی رفتار ترموهیدرولیکی نانوسیال آلومینا به عنوان خنک کننده و کند کننده در رآکتور HPLWR بوده است. نتایج ارائه شده 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 می کند. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت در ارتفاع تقریبی  $1/3$  m 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  $0/7$  m بدست آمده است. دمای متوسط سیال خنک کننده آب در خروج از بسته سوخت برابر با  $490^{\circ}\text{C}$  می باشد. با اضافه نمودن نانوذرات به خنک کننده و کند کننده، دمای خروجی از داغ ترین کانال کاهش می یابد در





# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

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.

## مرجع ها:

1. Buongiorno, J., Hu, L. W., Apostolakis, G., Hanninka, R., Lucasa, T., Chupin, A., 2009. 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.
2. Tashakor, S., Salehi, A. A., Jahanfarnia, G., Abbaspour Tehrani Fard, A., 2013. Thermal-hydraulic analysis of HPLWR fuel assembly cluster, The Journal of Supercritical Fluids, 77, 91-99.
3. Tashakor, S., Salehi, A. A., Jahanfarnia, G., Abbaspour Tehrani Fard, A., 2012. Neutronic analysis of HPLWR fuel assembly cluster, Annals of Nuclear Energy, 50, 38-43.
4. US DOE, 2002. Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, a Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy System.
5. Zarifi, E., Jahanfarnia, G., Veisy, F., 2013a. Thermal-hydraulic modeling of nanofluids as the coolant in VVER-1000 reactor core by the porous media approach, Annals of Nuclear Energy, 51, 203-212.
6. Zarifi, E., Jahanfarnia, G., Veisy, F., 2013b. Neutronic simulation of water-based Nanofluids as a Coolant in VVER-1000 Reactor, Progress in Nuclear Energy, 65, 32-41.
7. Zarifi, E., Jahanfarnia, G., Veisy, F., 2013c. Subchannel Analysis of Nanofluids Application to VVER-1000 Reactor, Chemical Engineering Research and Design, 91 (4), 625-632.
8. Zarifi, E., Jahanfarnia, G., 2014. Subchannel analysis of TiO<sub>2</sub> nanofluid as the coolant in VVER-1000 reactor, Progress in Nuclear Energy, 73, 140-152.
9. Hadad, K., Hajizadeh, A., Jafarpour, K., Ganapo, B.D., 2010. Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000, Ann. Nucl. Energy, 37, 1447-1455.
10. Tashakor, S., Salehi, A. A., Jahanfarnia, G., Abbaspour Tehrani Fard, A., 2013. Thermal-hydraulic analysis of HPLWR fuel assembly cluster, The Journal of Supercritical Fluids, 77, 91-99.
11. Velagapudi, V., Konijeti, R. K., Aduru, C. S., 2008. Empirical correlation to predict thermo-physical and heat transfer characteristics of nanofluids, THERMAL SCIENCE, 12 (2)
12. Xuan Y.M., Li Q. (2003) Investigation on convective heattransfer and flow features of nanofluids, Journal of Heat transfer, 125, 151-155.
13. Pak, B. C., Cho, Y. I. (1998) Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particle, Experimental Heat Transfer, 11, pp. 151-170.
14. Todreas, N. E., Kazimi, M.S. (1990) Nuclear system II, Elements of Thermal Hydraulic Design, Taylor & Francis, USA.
15. Velagapudi, V., Konijeti, R. K., Aduru, C. S., 2008. Empirical correlation to predict thermo-physical and heat transfer characteristics of nanofluids, THERMAL SCIENCE, 12 (2), 27-37