



# بست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## تحلیل ترموهیدرولیکی یک میله سوخت حلقوی با خنک‌شوندگی از داخل و خارج در یک مجتمع سوخت راکتور VVER-1000

غلامرضا انصاری فر\*، محمدحسین استکی، مجید زیدآبادی نژاد

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

### چکیده:

در این پژوهش، پارامترهای ترموهیدرولیکی یک میله سوخت قلب یک راکتور VVER-1000 متداول و یک راکتور VVER-1000 با میله‌های سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی داخلی و خارجی در کانال داغ مجتمع سوخت دو راکتور، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور با استفاده از شبیه‌سازی یکی از میله‌های سوخت در کانال داغ هر دو راکتور توسط کدهای شبیه ساز *Fluent & Gambit* محاسبات ترموهیدرولیکی انجام گردیده است. مشاهده می‌گردد که بیشینه‌ی دما در سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی داخلی و خارجی به میزان قابل توجهی کاهش یافته که بیانگر سطح ایمنی بالاتر راکتور با سوخت جدید در کارکرد با توان بالاتر نیز در حوادث می‌باشد.

واژگان کلیدی: تحلیل ترموهیدرولیک، مجتمع سوخت حلقوی، بیشینه دمای سوخت

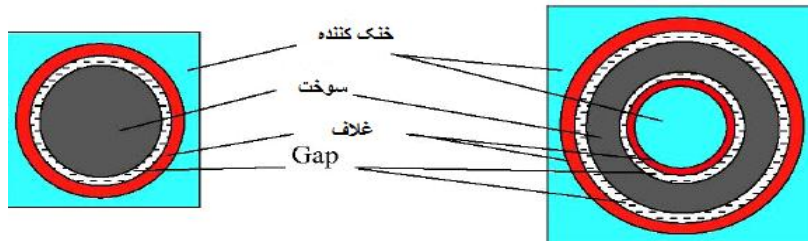
### مقدمه

امروزه اکثر نیروگاه‌های هسته‌ای از میله سوخت توپُر استفاده می‌کنند. یکی از مشکلات مهمی که در طول عملکرد راکتور با این نوع میله‌های سوخت ممکن است ایجاد شود، احتمال ذوب شدن سوخت در قسمت مرکزی میله به دلیل انباشت حرارتی است. از کارهایی که در زمینه تحلیل حرارتی قلب راکتور با سوخت توپُر انجام شده است، می‌توان به عنوان نمونه به کارهای آقای گلسوین و همکاران از مرکز تحقیقات انرژی هسته‌ای آمریکا [۱]، آقای تاپوسو و همکاران از مرکز تحقیقات انرژی هسته‌ای کانادا [۲] و آقای جکسونتانزانتیتو MIT آمریکا [۳] اشاره کرد. در دهه‌های اخیر، مطالعات زیادی بر روی مقرون به صرفه کردن قدرت نیروگاه‌های هسته‌ای و کاهش هزینه‌های آنها انجام شده، ولی حجم کمی از این مطالعات به تغییر در ساختار سوخت در قلب راکتور انجامیده است. یکی از راه‌های بهبود راندمان حرارتی نیروگاه‌های هسته‌ای، استفاده از سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود میله سوخت حلقوی دارای دو سطح خنک‌شوندگی است به طوری که سیال خنک‌کننده هم از داخل و هم از خارج میله سوخت عبور کرده و از انباشت حرارت و ذوب شدن میله سوخت جلوگیری می‌کند.



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۱: شماتیک میله سوخت توپُر و سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی داخلی و خارجی

در سال‌های اخیر انستیتو MIT، تحقیقاتی بر روی سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج انجام داده که در این راستا سازمان‌ها و افراد مختلف، با استفاده از تحقیقات انجام شده توسط MIT، سعی در گسترش این فناوری و عملی کردن آن دارند که در ادامه هر کدام از این تحقیقات عنوان گردیده است. (الف) تحقیقاتی بر روی توسعه کد، تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی سوخت حلقوی [۴] که توسط آقای چانگ و همکاران انجام‌گردیده‌است.

(ب) تحقیقاتی برای بررسی ارزیابی ترموهیدرولیک سوخت حلقوی در راکتور [OPR-1000] که توسط آقای چون و همکاران انجام گردیده است.

(ج) تحقیقاتی بر روی توسعه کد، تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی راکتور خنک‌شونده با گاز و سوخت حلقوی [۶] که توسط آقای هان و همکاران انجام گردیده است.

(د) تحقیقاتی بر روی بررسی توزیع دما و تقسیم حرارت در سوخت‌های حلقوی [۷] که توسط آقای یانگ انجام گرفته است.

باید توجه داشت که تحقیقات انجام گرفته، برای مجتمع‌های سوخت مریعی می‌باشند ولی در این پروژه تحلیل ترموهیدرولیکی میله سوخت حلقوی با خنک‌شوندگی از داخل و خارج (سوخت جدید) در مجتمع‌های سوختش ضلعی (مجتمع‌های سوخت راکتور VVER-1000) انجام گرفته است.

بدین منظور ابتدا سلول معادل یک میله سوخت جدید و سیال خنک‌کننده اطراف آن در کانال داغ مجتمع سوخت شش ضلعی راکتور VVER-1000 فرض شده (راکتور جدید) به دست آورده شده است. سپس، سلول معادل طراحی شده با استفاده از کدهای شبیه‌ساز CFD شبیه‌سازی شده و محاسبات ترموهیدرولیکی آن انجام گرفته است. به همین ترتیب، مراحل ذکر شده در بالا برای میله سوخت راکتور VVER-1000 متداول نیز انجام گرفته است.

### روش کار

در ابتدا برای شبیه‌سازی یک میله سوخت با توجه به فرمول ۱ برای مجتمع‌های شش ضلعی، سلول معادلی که شامل میله سوخت و سیال اطراف آن می‌باشد (شکل ۲) به دست آورده شده است.

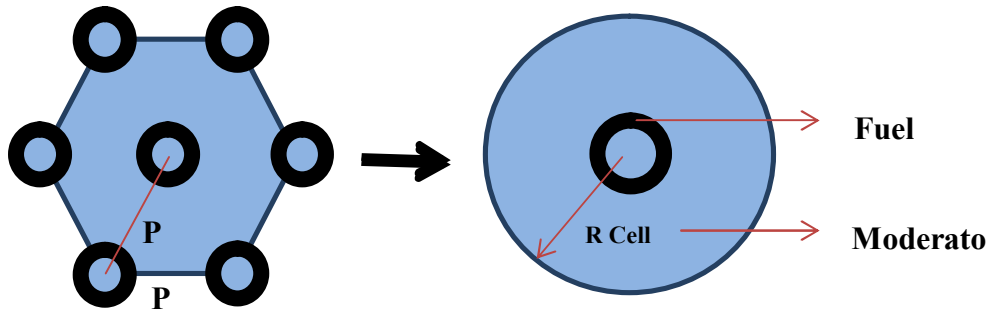


## بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$R \quad (1)$$

در فرمول (۱) طول گام میله های سوخت می باشد.



برای تحلیل برموهیدروییکی سلول معادن به دسب آمده از یک حد  $CFD$  اسفاده سده است. ددهای محاسباتی  $CFD$  با اسفاده از گسسته سازی معادلات حاکم، مسئله را حل می نمایند. کد  $CFD$  مورد اسفاده در این پژوهش  $Fluent$  می باشد که برای گسسته سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود اسفاده می کند. روش حجم محدود یک روش انتگرالی است، یعنی اینکه از معادله های دیفرانسیلی اولیه در فضای فیزیکی انتگرال گرفته می شود و در مرحله آخر آن ها را به روش عددی حل می شوند. از این رو، در روش حجم محدود شبکه نقاط مستقیما در فضای فیزیکی ایجاد می گردد در نتیجه کد با اسفاده از حافظه دینامیکی، ساختار مناسب داده ها و اطلاعات، کنترل و انعطاف پذیری محاسبات را ممکن می سازد.

معادلات و قوانین زیادی بر حرکت و جریان سیالات در مجراها حاکم است ولی در ادامه سعی شده معادلات حاکم بر مسئله (در شرایط پایا و جریان مغشوش تراکم ناپذیر) آورده شود [۸].

الف) معادله بقاء جرم

$$(2)$$

ب) معادله بقاء ممنتوم

$$(3)$$

تانسور تنش  $\bar{\bar{T}}$  به صورت زیر بیان می شود

$$(4)$$

برای جریان تراکم ناپذیر ترم  $[\nabla \cdot \vec{v} I]$  در معادله بالا صفر می باشد.

ج) معادله بقاء انرژی



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۱۷ و ۱۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۶ (۵)

که در آن  $k_e$  رسانایی موثر است که از رابطه  $k + k_f$  به دست می‌آید و عبارت  $k_f$  نیز هدایت حرارتی آشفته می‌باشد.

برای حل معادلات حاکم بر مسئله توسط نرم افزار **Fluent** در ابتدا باید فضای حل گسسته سازی شود. برای گسسته سازی فضای حل از نرم افزار **Gambit** استفاده شده که به کمک آن هندسه مورد نظر ساخته و شبکه بندی شده است. با توجه به تقارن شعاعی موجود در میله سوخت جدید که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده، به منظور کاهش حجم محاسبات تنها یک چهارم آن مدل‌سازی شده است.

جدول ۱: مشخصات میله سوخت حلقوی با قابلیت خنک شونده داخلی و خارجی

۱۳/۶۶ میلیمتر	قطر خارجی غلاف خارجی	۱۱/۹۲ میلیمتر	قطر داخلی غلاف خارجی
۱۱/۸۲ میلیمتر	قطر خارجی سوخت	۹/۲ میلیمتر	قطر داخلی سوخت
۹/۰۸ میلیمتر	قطر خارجی غلاف داخلی	۸ میلیمتر	قطر داخلی غلاف داخلی

در این پروژه به علت پیچیدگی ابعاد هندسی (ابعاد میلیمتر در راستای شعاعی و ابعاد متر در راستای محوری) برای شبکه بندی، ابتدا تعداد گره‌های لازم و مناسب روی هر کدام از خطوط رسم شده، مشخص گردیده و سپس به شبکه بندی صفحه‌ای پرداخته شده است. برای تعیین اجزا شبکه، از مدل‌های مختلف شبکه‌های ترکیبی استفاده شده که این عمل موجب کیفیت بهتر شبکه ایجاد شده و افزایش دقت در حل مسئله می‌باشد به طوری که تعداد گره‌ها در شبکه ۱۴۸۵۶۹۳۱ است.

مراحل ذکر شده در بالا برای میله سوخت راکتور **VVER-1000** متداول که جرم سوخت، شار حرارتی، دبی و فشار کاری آن با راکتور **VVER-1000** جدید یکسان می‌باشد نیز انجام گرفته است.

پس از ساخت هندسه شبکه بندی شده مسئله، با اعمال شرایط اولیه زیر معادلات حاکم توسط نرم افزار **Fluent** حل می‌گردند.

۱. دبی جریان ورودی:  $\frac{kg}{s} \dot{m} = 0.81211$

۲. فشار کاری سیستم: 15.73 MPa



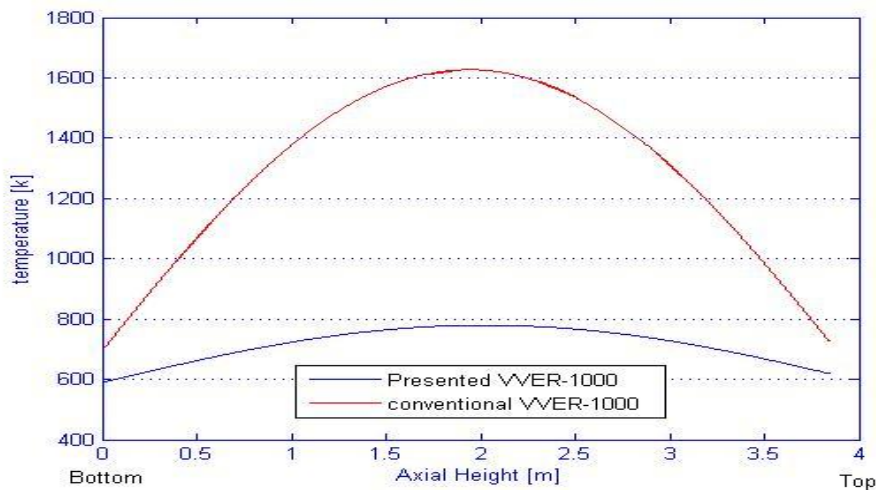
# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$q''' = 1037700000 \cos\left(\frac{\pi Z}{4.1736}\right) \text{ : شار حرارتی } ۳$$

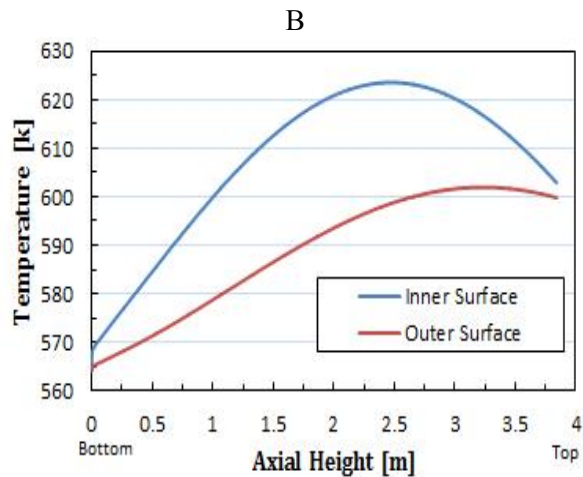
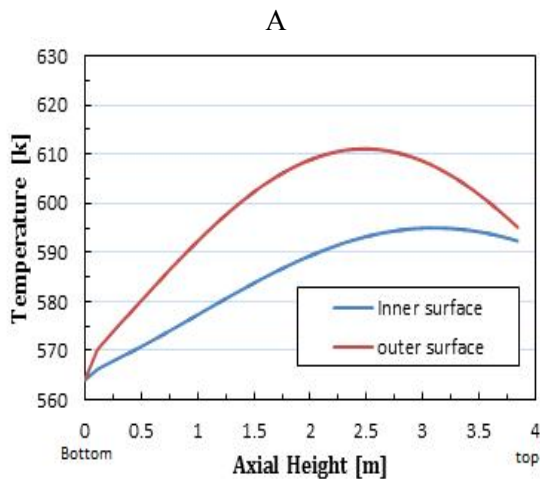
## نتایج

با توجه به این موضوع که شار حرارتی به صورت کسینوسی بوده و دو راکتور در شرایط یکسان از نظر جرم سوخت، شار حرارتی، دبی و فشارکاری می‌باشند نتایج زیر حاصل شده است.  
برای سوخت راکتور جدید و راکتور متداول به دلیل تفاوت در هندسه‌ها فقط می‌توان بیشینه دمای سوخت آن‌ها را با هم مقایسه کرد که شکل ۳ گویای این موضوع می‌باشد.



شکل ۳: توزیع دمای محوری در شعاعی که در آن بیشینه دمای سوخت در شرایط کارکرد عادی دو راکتور اتفاق می‌افتد،

راکتور متداول = Conventional و راکتوری که از فناوری سوخت جدید بهره می‌برد = Presented

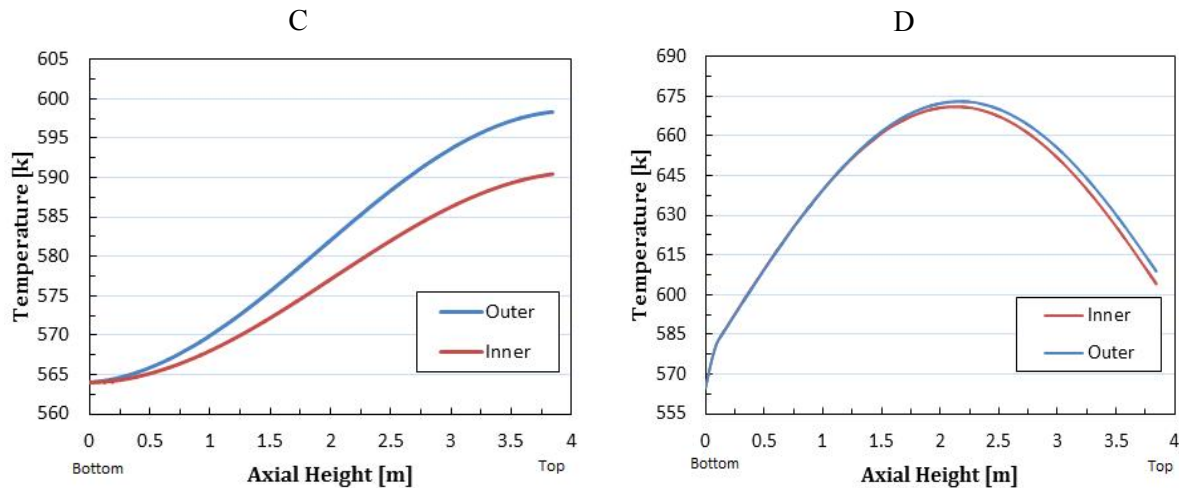




# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شکل ۴: توزیع دمای محوری (A) غلاف داخلی (B) غلاف خارجی در سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی داخلی و خارجی



شکل ۵: توزیع دمای محوری (C) سیال خنک کننده (D) سطح مرکزی gap ها در سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی داخلی و خارجی

## بحث و نتیجه گیری

یکی از مشکلات مهمی که در طول عملکرد راکتور با میله‌های سوخت توپُر ممکن است ایجاد شود، احتمال ذوب شدن سوخت در قسمت مرکزی میله به دلیل انباشت حرارتی است [۹]. در راکتورهایی که از فناوری سوخت جدید بهره نمی‌برند معمولاً دمای مرکز سوخت در حال کارکرد عادی بسیار بالا است که به تبع آن احتمال ذوب سوخت نیز بالا می‌رود. با توجه به شکل‌های ۳ تا ۵ دیده می‌شود که بیشینه دمای قسمت‌های مختلف سوخت جدید (سوخت با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج) در شرایط کارکرد عادی راکتور بسیار پایین است و از نقطه ذوب سوخت فاصله زیادی دارد که همین دمای پایین و فاصله داشتن از نقطه ذوب سوخت، احتمال ذوب میله سوخت را به شدت کاهش می‌دهد و این در حالی است که میانگین دمای خروجی سیال داخل و خارج در حد مطلوب قرار دارد.

شکل ۳ این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد که بیشینه دمای سوخت در کارکرد عادی دو راکتور VVER-1000 که در شرایط کاملاً یکسان قرار دارند ولی با این تفاوت که یکی از آنها دارای فناوری سوخت جدید و دیگری بدون این فناوری (راکتور متداول) می‌باشد چقدر با یکدیگر اختلاف دارد که این مطلب تاثیر سوخت جدید را بر روی بیشینه دمای سوخت در شرایط کارکرد عادی راکتور را به وضوح نشان می‌دهد. این مزیت می‌تواند سطح ایمنی راکتور را بالا ببرد به نحوی که در کارکرد عادی و حوادث مانع از ذوب میله سوخت گردد. همچنین از این مزیت می‌توان با حفظ معیارهای ایمنی برای افزایش توان حرارتی راکتور استفاده نمود.



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## منابع

- [1] Gulsevin et al, "The Thermal hydraulic Codes COBRA III-C and TERHID, An Analytical and Comparison", ANS, USA, (1981).
- [2] A. Tapucu et al. "Comparison of Subchannel Codes COBRA III-C and COBRA IV with Experimental Data obtained on Two Lateral Interconnected Flows", Canada, (1983).
- [3] J.W. Jackson et al. "COBRA III-C2 a Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements" MIT, USA, (1981).
- Chang "Development of a thermal-hydraulic analysis code for .H.Han, S.[4] K.H annular fuel assemblies", Nuclear Engineering and Design, 226, 267–275, (2003).
- In, "Thermal hydraulic performance assessment .K.Oh, W.S.H.Chun, D.[5] C.H.Shin, T of dual-cooled annular nuclear fuel for OPR-1000". Nuclear Engineering and Design, 243, 291–300, (2012).
- Chang, "Development of a thermal hydraulic . H.Hwang, S.H.Seo, D.W.Han, K.H.[6] K analysis code for gas-cooled reactors with annular fuels. Nuclear Engineering and Design, 236, 164–178, (2006).
- SONG "Evaluation of a Dual-. W. CHUN, K. H. SHIN, T. H. YANG, C. S.[7] Y Cooled Annular Fuel Heat Split and Temperature Distribution", Nuclear Science and Technology, 46, 8, 836–845, (2009).
- [8] F.M. White, "Fluid Mechanics, fourth edition", McGraw-Hill, New York, (1999).
- [9] M. S. Kazimi et al, "High Performance Fuel Design for Next Generation PWRs: Final Report, MIT-NFC-PR-082", Center for Advanced Nuclear Energy Systems (CANES), (2006).