



# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## پیش بینی عددی زمان تماس سوخت و غلاف در خلال فرسایش سوخت

مرتضی ایمانی، مهدی آقایی مغانلو\*، احمدرضا ذوالفقاری  
دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه چرخه سوخت

### چکیده:

در طراحی میله سوخت، داشتن یک پیش‌بینی قابل اطمینان از عملکرد سوخت به منظور رعایت اصول ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. بر همین اساس در این مقاله برای تحلیل حرارتی و مکانیکی میله سوخت در حالت پایا، برنامه‌ای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده، که پدیده‌هایی از قبیل تورم و تراکم سوخت و همچنین خزش در غلاف را در نظر گرفته و تحلیل حرارتی و مکانیکی میله سوخت را بصورت همزمان در طول زمان انجام داده، و پارامترهای مهمی از قبیل دمای مرکز میله سوخت، تغییرات گپ مابین سوخت و غلاف را طول زمان ارائه می‌دهد. در پایان نتایج بدست آمده از این برنامه برای راکتور *VVER1000* ارائه شده است.

کلید واژه: اصل تحلیل مکانیکی و حرارتی، تورم، تراکم، خزش

### مقدمه:

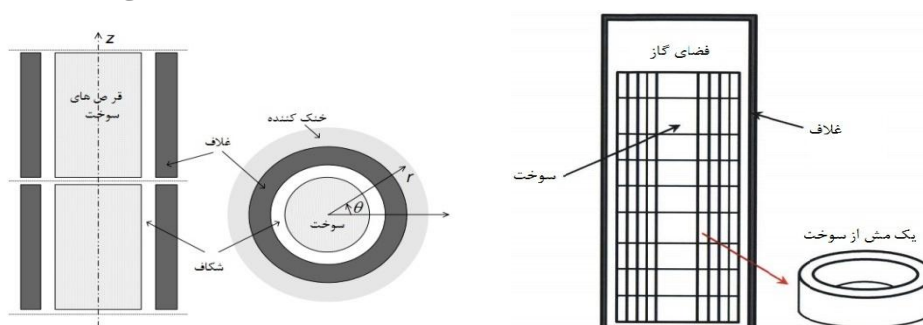
کدهای پیش بینی عملکرد میله‌های سوخت، برای طراحی و بررسی ایمنی میله‌های سوخت اهمیت داشته و مورد توجه سازندگان میله سوخت و اپراتورهای راکتورها می‌باشد. بر همین اساس در این مقاله کد کامپیوتری به زبان فرترن با نام *IR-FRA (Iran Fuel Rod Analyzer)* برای تحلیل حرارتی و مکانیکی میله سوخت در حالت پایا نوشته شده است. این کد شامل دو بخش تحلیل حرارتی و مکانیکی بوده که می‌بایست در هر بازه زمانی بصورت همزمان این دو تحلیل انجام شود. از پدیده‌های مدل شده در این کد می‌توان کرنش ناشی از تراکم سوخت در ابتدای شرایط کاری راکتور، کرنش تورمی سوخت و رشد خزشی غلاف را نام برد. تحلیل حرارتی و مکانیکی این کد بصورت تک بعدی بوده و محاسبات در راستای شعاعی، برای هر مقطع محوری انجام می‌شود. از مهم ترین نتایج بدست آمده توسط این کد می‌توان، محاسبه دمای مرکز سوخت در طول زمان و



# بیست و یکمین کنفرانس هتته ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

همچنین محاسبه زمان بسته شدن گپ مابین سوخت و غلاف را اشاره کرد. در پایان با استفاده از این کد نتایج تحلیل حرارتی و مکانیکی برای راکتور *VVER1000* ارائه می‌شود. **روش کار:** کدهای پیش بینی عملکرد میله سوخت دارای دو بخش تحلیل حرارتی و مکانیکی می‌باشند که انجام این دو تحلیل به یکدیگر وابسته بوده و می‌بایست به طور همزمان انجام شود. هندسه در نظر گرفته شده برای میله سوخت در شکل (۱) نمایش داده شده است، سوخت بصورت توپر در نظر گرفته شده، و طریقه مش بندی برای غلاف نیز همانند سوخت می‌باشد.



شکل (۱): نمایش هندسه و مش بندی سوخت

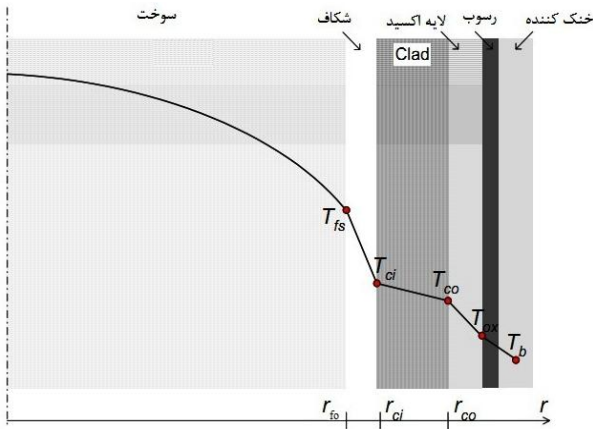
به دلیل پایا در نظر گرفتن کد، میزان نرخ تولید حرارت خطی برای هر مقطع محوری در ورودی به برنامه داده شده و تا پایان محاسبات ثابت می‌باشد. در شکل (۲) الگوریتم کد نوشته شده مشاهده می‌شود.

**تحلیل حرارتی:** در قسمت تحلیل حرارتی در یک مقطع محوری توزیع دما در راستای شعاعی مطابق شکل (۳) می‌باشد و با توجه به میزان نرخ تولید حرارت خطی و دمای توده سیال خنک کننده که ورودی محاسبات می‌باشند به ترتیب دمای سطح غلاف، اختلاف دما در لایه اکسید شکل گرفته بر روی غلاف، توزیع دما درون غلاف، هدایت حرارتی گاز درون غلاف و در پایان توزیع دما درون سوخت محاسبه می‌شود. روابط مورد استفاده قرار گرفته برای این قسمت از محاسبات، از مراجع [۱] و [۲] می‌باشد. مطابق مراجع ذکر شده رشد لایه اکسید بر روی غلاف در نظر گرفته شده و همچنین هدایت حرارتی سوخت بصورت تابعی از مصرف سوخت و دما محاسبه می‌شود، و برای محاسبه توزیع دما در داخل سوخت از مش بندی ثابت استفاده شده و توزیع توان در راستای شعاع سوخت ثابت در نظر گرفته می‌شود.

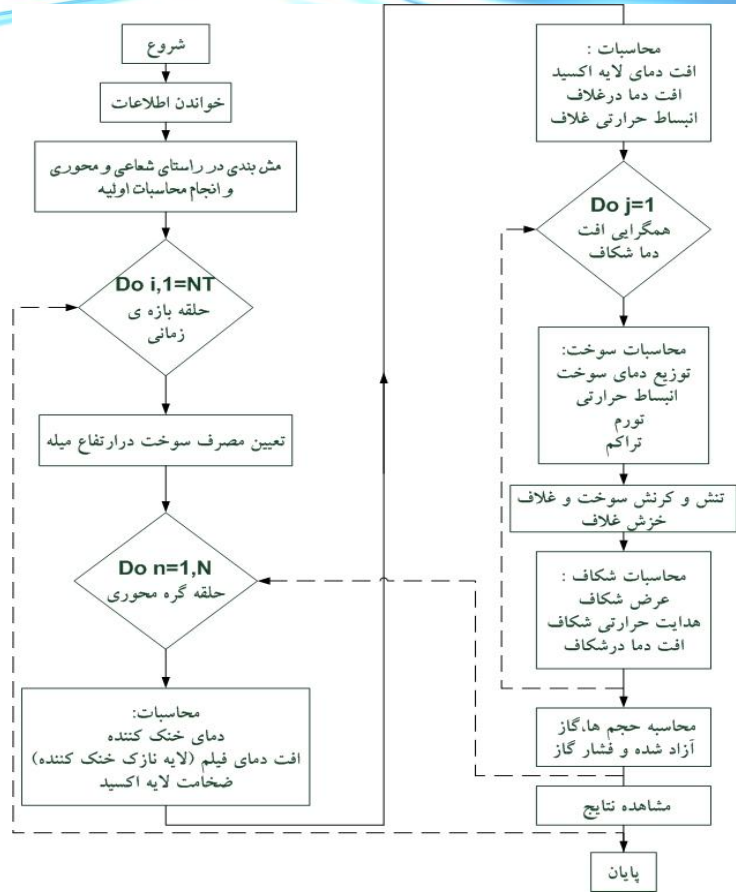


# بیت و یکمین کنفرانس هشتای ایران

ع ۷ و ۱۳۹۳ اسفندماه دانشگاه اصفهان



شکل (۳): توزیع دما در یک مقطع محوری میله سوخت





# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

**تحلیل مکانیکی:** در تحلیل مکانیکی با استفاده از معادله تعادل و قانون هوک و معادله همسازی کرنش و قرار دادن این روابط در یکدیگر می توان جابجایی ناشی از انبساط حرارتی و تنش های اعمالی بر سوخت و غلاف را محاسبه کرد [۳]. برای محاسبه کرنش تراکمی سوخت که در ابتدای شرایط کاری به دلیل سینتر شدن مجدد سوخت به وجود می آید از رابطه تجربی زیر استفاده می شود [۴].

$$\varepsilon_D = \Delta\rho_0 \left( e^{\frac{Bu \ln(0.01)}{C_D Bu_D}} - 1 \right) \quad (1)$$

در رابطه بالا  $\varepsilon_D$  کرنش بر اثر تراکم،  $\Delta\rho_0$  حداکثر تراکمی که در سوخت می تواند رخ دهد (بصورت کسری از دانسیته تئوری وارد می شود)،  $Bu_D$  میزان مصرف سوختی که در آن تراکم سوخت پایان می پذیرد بر حسب  $MWday / kg - u$  و  $C_D$  برای دمای سوخت کمتر از  $750$  درجه سلسیوس بصورت  $C_D = 7.2 - 0.0086(T - 25)$  محاسبه می شود و برای بیشتر از این دما برابر یک در نظر گرفته می شود. برای محاسبه ترم کرنش تورم ناشی از تجمع پاره های شکافت نیز از روابط تجربی زیر استفاده می شود [۵].

$$\Delta\varepsilon_{sw-s} = 7.435 * 10^{-13} \rho \Delta Bu \quad (2)$$

$$\Delta\varepsilon_{sw-g} = 2.617 * 10^{-39} \cdot \Delta Bu \cdot \rho (2800 - T)^{11.73} \cdot e^{(-0.0162 \cdot (2800 - T))} \cdot e^{(-2.4 * 10^{-10} \cdot \rho \cdot Bu)} \quad (3)$$

در روابط بالا  $\Delta\varepsilon_{sw-s}$  نرخ کرنش تورم حجمی بر اثر پاره های شکافت جامد،  $\Delta\varepsilon_{sw-g}$  نرخ کرنش تورم حجمی بر اثر پاره های شکافت گازی،  $\Delta Bu$  بازه مصرف سوخت که تورم در آن محاسبه می شود، و  $\rho$  دانسیته سوخت بر حسب  $kg/m^3$  می باشد. و در نهایت برای محاسبه کرنش ناشی از رشد خزشی غلاف نیز از رابطه تجربی زیر که اصلاح شده رابطه موجود در کد FRAPCON می باشد مورد استفاده قرار گرفته است [۶].

$$\dot{\varepsilon}_\theta = f_1(\sigma_\theta) f_2(T) f_3(\phi t) t^{-0.5} \quad (4)$$

$$f_1(\sigma_\theta) = 150 \sigma_\theta^{2.95} \quad f_2(T) = \exp\left(\frac{-15000}{T}\right) \quad f_3(\phi t) = \exp(-2.8 * 10^{-22} * \phi * t)$$

در رابطه بالا  $\dot{\varepsilon}_\theta$  نرخ کرنش خزشی مماسی،  $\phi$  فلاکس نوترون های سریع بر حسب  $n/m^2.s$ ،  $t$  زمان بر حسب ساعت،  $\sigma_\theta$  تنش مماسی بر حسب  $MPa$  و  $T$  دما بر حسب کلوین می باشد.



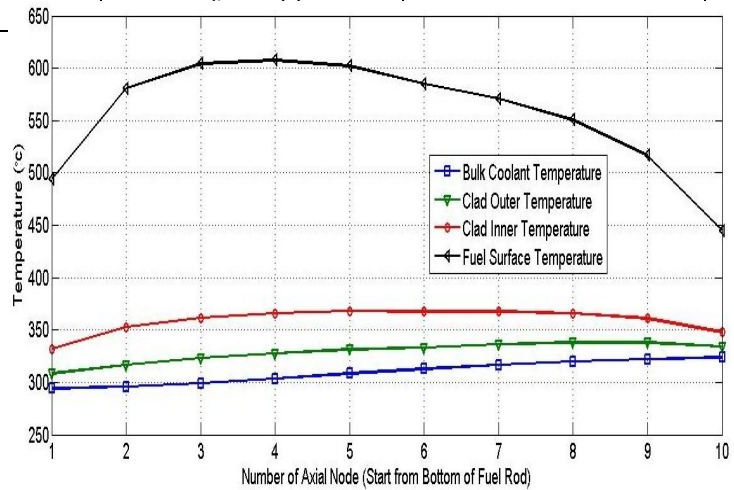
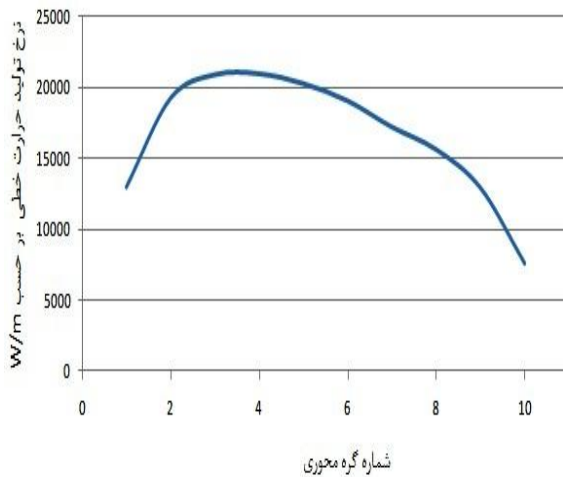
# بیت و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نتایج: با استفاده از اطلاعات راکتور *VVER1000* فایل ورودی برای برنامه تولید می شود [۷]. توزیع ورودی نرخ انتقال حرارت خطی در ارتفاع میله سوخت مطابق شکل (۴) می باشد.

جدول ۱: ورودی های مورد استفاده در برنامه [۷]

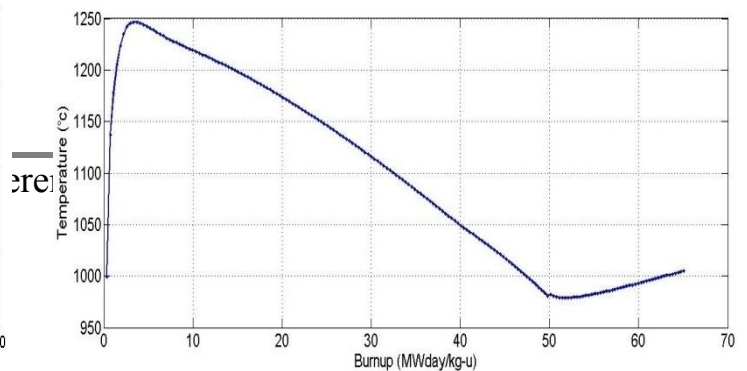
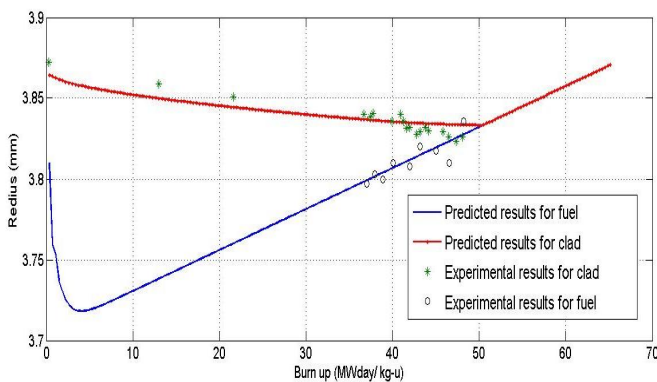
| Parameter                 | Value                  | Parameter                       | Value    |
|---------------------------|------------------------|---------------------------------|----------|
| Operating time            | 1600 day               | Average linear power            | 170 w/cm |
| Gap width                 | 80 $\mu\text{m}$       | Time step                       | 200      |
| Radius fuel               | 3.785mm                | Heating length                  | 3.58 m   |
| Fuel rod diameter         | 0.91cm                 | Coolant pressure                | 15.7 MPa |
| Coolant inlet temperature | 291 $^{\circ}\text{C}$ | No. of radial segments for fuel | 100      |
| No. of axial segments     | 10                     | No. of radial segments          | 50       |



شکل (۴): توزیع توان در ارتفاع میله

شکل (۵): توزیع دما در ارتفاع میله

در شکل (۵) توزیع دمای توده سیال، سطح داخلی و خارجی غلاف و دمای سطح سوخت در ارتفاع میله سوخت نمایش داده شده است، همانطور که مشاهده می شود دمای سطح سوخت شکلی مشابه شکل نرخ تولید حرارت خطی وارده شده را دارا می باشد. در شکل (۶) تغییرات دمای مرکز سوخت بر حسب مصرف سوخت مشاهده می شود. در ابتدای شرایط کاری راکتور به دلیل تراکم سوخت میزان گپ مابین سوخت و غلاف افزایش پیدا کرده و متعاقب آن هدایت حرارتی گاز درون گپ کاهش پیدا کرده و دمای مرکز سوخت افزایش می یابد، با از بین رفتن اثر تراکم، سوخت متورم شده







# بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

و طول گپ کاهش پیدا می کند و در نتیجه دمای سوخت کاهش پیدا می کند. در نهایت با بسته شدن گپ، بر اثر کاهش تدریجی کیفیت سوخت و کاهش هدایت حرارتی افزایش دما مشاهده می شود.

شکل (۶): دمای مرکز سوخت بر حسب مصرف در شکل (۷): شعاع سوخت و غلاف بر حسب مصرف

شکل (۷) شعاع سوخت و غلاف محاسبه شده، و همچنین نتایج تجربی موجود در مقاله [۸] برای مقایسه قرار داده شده است، که با استفاده از آن می توان به درستی محاسبات انجام شده پی برد. همانطور که مشاهده می شود سوخت و غلاف در مصرف سوخت  $50/18 \text{ MWday/kgu}$  با یکدیگر تماس پیدا کرده و گپ مابین سوخت و غلاف از بین می رود، که این تماس در ادامه منجر به وقوع نقص در میله سوخت می شود.

## بحث و نتیجه گیری:

با توجه به ضرورت پیش بینی عملکرد میله سوخت، کد نوشته شده در این زمینه تصویر قابل اطمینانی از عملکرد حرارتی و مکانیکی میله سوخت و همچنین پیش بینی وقوع نقص تماس سوخت و غلاف ارائه می کند. برای بدست آوردن نتایج دقیق می توان روابط تجربی موجود در برنامه را با روابط به روز در این زمینه جایگزین کرده و در آینده همچنین تحلیل های انجام شده را بصورت دو و یا سه بعدی انجام داد.

## مراجع:

- [۱] *berna, G.A., beyer, C.E, Davis, K.L, FRAPCON-3: a computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup. 1997, System Regulatory Research: Washington Technology Office of Nuclear*
- [۲] *C. M. Allison, G.A.B., R. Chambers, E. W. Coryell, K. L. , et al., SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO - A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis. Vol. IV. 1993: Idaho National Engineering Laboratory*
- [۳] *Zednona Zudans, T.C.Y., William H. Steigelmann, ed. Thermal stress Techniques in the nuclear industry. 1965: Philadelphia*
- [۴] *Y. Rashid, R.D., R. Montgomery, Fuel analysis and licensing code:FALCON MOD01. 2004, EPRI Report 1011308*
- [۵] *Williamson, R.L., Enhancing the ABAQUS thermomechanics code to simulate multipellet steady and transient LWR fuel rod behavior. Journal of Nuclear Materials, 2011. 415(1): p. 74-83*
- [۶] *Herranz, L.E. and F. Feria, Extension of the FRAPCON-3.3 creep model to dry storage conditions. Progress in Nuclear Energy, 2010. 52(7): p. 634-639*



# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- Chapter 4 (FSAR) for BNPP. 2007, Russia Federal Agency on Nuclear Energy (RFANE): ]۷[  
Moscow
- A.V. Smirnov, B.A.K., D.V. Markov, V.A. Ovchinnikov, V.S. Polenok, A.A. Ivashchenko ]۸[  
PELLET-CLADDING INTERACTION IN VVER FUEL RODS in Pellet-clad Interaction in  
Water Reactor Fuels. 2004. France