



دانشگاه گیلان

## محاسبه و مدل‌سازی فرآیند آزادسازی پاره های شکافت گازی

### به فضای گپ در راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر

یاشنار، رحمانی\*؛ مریم، تبرایی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، دانشکده فنی مهندسی و علوم پایه، گروه فیزیک

#### چکیده:

با توجه به تاثیرات کتمان ناپذیر برآورد غلظت پاره های شکافت گازی آزاد شده (به فضای گپ) بر روی افزایش دقت محاسبات وابسته به زمان ترمونوترونیک قلب راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر، در این تحقیق با استفاده از کوپلینگ محاسبات نوترونیک و ترموهیدرولیک و علاوه برآن بهره گیری از مدل‌های Booth و Weisman، به محاسبه مقدار غلظت آزاد شده پاره های شکافت گازی تولیدی در پلت سوختی به فضای گازی گپ (در طول سیکل اول کاری) پرداخته شد. در این راستا از کدهای WIMSD5-B و CITATION-LDI2 در بخش نوترونیک بهره گیری شد و در بخش ترموهیدرولیکی نیز بمنظور احتراز از ضعفهای محاسباتی کدهای رایج، به طراحی یک برنامه محاسباتی پرداخته شد.

کلید واژه: VVER-۱۰۰۰، پاره های شکافت گازی، Booth، Weisman، ترمونوترونیک

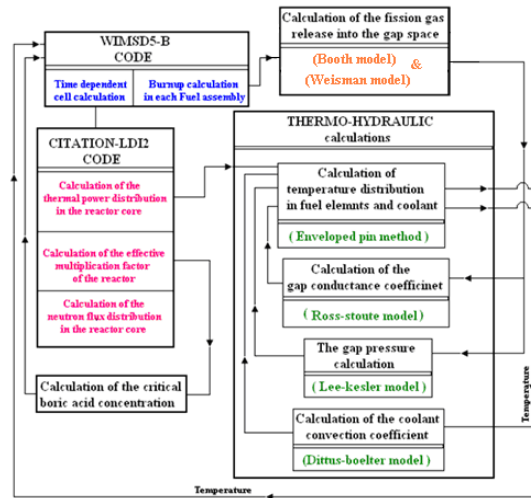
#### مقدمه:

پاره های شکافت گازی زینان و کریپتون از ضریب هدایت حرارتی کمتری در مقایسه با گاز هلیوم (موجود در گپ) برخوردار بوده و همچنین افزوده شدنشان به فضای گپ باعث افزایش فشار در این ناحیه می شود. علاوه براین از آنجا که گاز زینان از سطح مقطع جذب نوترونی بالایی برخوردار بوده و میله های سوختی راکتورهای VVER-۱۰۰۰ نیز دارای ساختار هندسی خاصی می باشند، بنابراین مدل‌سازی و تاثیر بخشی فرآیند آزادسازی پاره های شکافت گازی نقش موثری در افزایش دقت و قابلیت اطمینان محاسبات پارامترهای ترمونوترونیک قلب راکتور ایفاء خواهد نمود.

#### روش کار:

بمنظور محاسبه و مدل‌سازی فرآیند وابسته به زمان آزادسازی پاره های شکافت گازی (به درون گپ)، به طراحی یک زنجیره محاسبات ترمونوترونیک پرداخته شد [۱]، [۲] و [۳] تا با بهره گیری از آن بتوان به برآورد پارامترهای ترمونوترونیک و ترکیبات سوختی قلب در خلال سیکل اول کاری راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر [۴] پرداخت.

در شکل ۱ به تشریح شماتیکی زنجیره محاسبات ترمونوترونیک بکاربرده شده در این تحقیق پرداخته شده است.



شکل ۱ - تشریح شماتیکی فلوچارت محاسباتی بکار برده شده در این تحقیق

### محاسبه غلظت پاره های شکافت گازی آزاد شده به فضای گپ

بخشی از پاره های شکافت گازی تولید شده در پلت سوختی همچون ایزوتوپهای زینان و کریپتون ، توسط فرآیندهای Recoil و knockout بداخل فضای گپ آزاد می شوند . از آنجاکه این پاره های شکافت گازی تاثیرات مهمی بر روی فرآیند انتقال حرارت در فضای گپ و همچنین محاسبات نوترونیک قلب راکتور داشتند لذا در این تحقیق ، با استفاده از روشهای [۵] Weisman و [۶] Booth به مدلسازی فرآیند آزاد سازی پاره های شکافت گازی بدرون فضای گپ میله های سوختی پرداخته شد.

### استفاده از متد Weisman در مدلسازی فرآیند آزادسازی پاره های شکافت گازی

دراین بخش، نخست در هریک از استپهای زمانی با استفاده از کد WIMSD5-B به محاسبه غلظت پاره های شکافت گازی در هریک از میله های سوختی پرداخته شد، سپس با استفاده از روابط حاکم در مدل Weisman میزان غلظت پاره های شکافت آزاد شده به فضای گازی گپ محاسبه گردید(روابط ۱ الی ۵)[۵].

$$C_{rel_i} = C_{pro_i} \times \left( \Delta t - \left( \frac{1-K_1}{K_2} \right) [1 - \exp(-K_2 \times \Delta t)] \right) + C_{ret_{i-1}} \times (1 - \exp(-K_2 \Delta t)) \quad (1)$$

$$C_{ret_i} = C_{tot_i} - C_{rel_i} \quad (2)$$

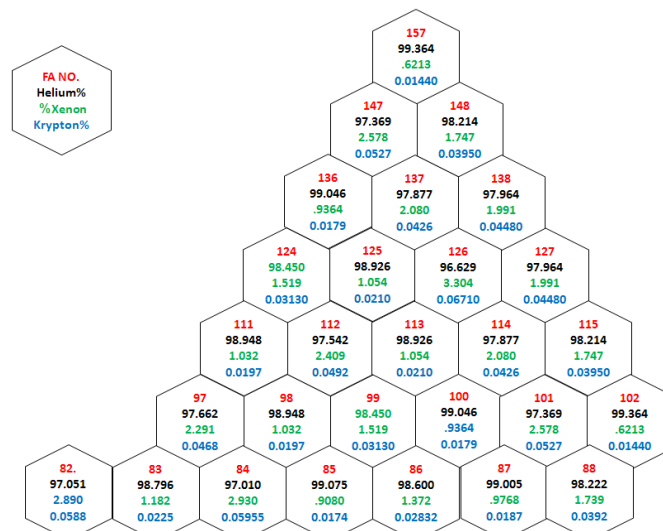
$$C_{pro_i} = C_{tot_i} - C_{ret_{i-1}} \quad (3)$$

$$K_1 = \exp\left(\frac{-6916.66}{T} + 1.84\right) \quad (4)$$

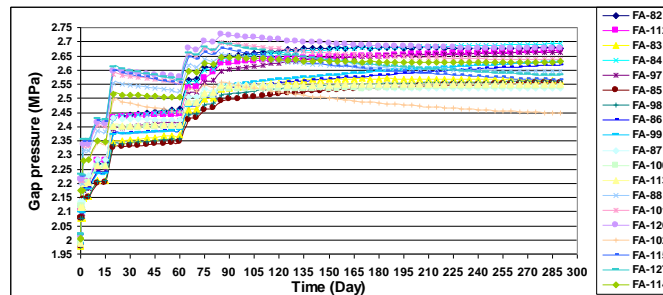
$$K_2 = 6.944 \times 10^{-5} \times \exp\left(\frac{-11894.44}{T}\right) \quad (5)$$

که  $C_{ret_i}$  و  $C_{rel_i}$ ،  $C_{pro_i}$ ،  $C_{tot_i}$  بترتیب میزان غلظت گاز کل (بدست آمده از کد WIMSD5-B)، گاز تولید شده، گاز آزاد شده و گاز گیراندازی شده بر حسب مول در استپ زمانی  $\Delta t$  میباشد. همچنین  $\Delta t$  طول استپ زمانی بر حسب ثانیه می باشد و  $T$  دمای متوسط سوخت در واحد کلوین است. لازم به ذکر است که بمنظور محاسبه میزان غلظت هریک از پاره های شکافت گازی آزاد شده بایستی محاسبات فوق بصورت مجزا انجام گیرد. در ادامه بمنظور افزایش دقت محاسبات نوترونیک، پس از محاسبه مقدار غلظت گاز های آزاد شده به فضای گپ و همچنین غلظت جدید پاره های شکافت گازی باقیمانده در درون پلت، به اصلاح غلظت این عناصر در ورودیهای WIMSD5-B مجتمع های سوختی پرداخته و محاسبات سلولی مجدداً انجام گرفت.

در شکلهای ۲ و ۳ بترتیب به تشریح درصد حضور گازهای حاصل از شکافت در فضای گپ (در انتهای سیکل اول) و همچنین تغییرات وابسته به زمان فشار گپ مجتمعهای سوختی قلب راکتور پرداخته شده است.



شکل ۲- درصد حضور پاره های شکافت گازی در فضای گپ در مدل Weisman ( انتهای سیکل اول)



شکل ۳- تغییرات وابسته به زمان فشار گپ مجتمعهای سوختی در طول سیکل اول

بهره گیری از روش Booth در محاسبه غلظت پاره های شکافت گازی آزاد شده به گپ



در این مدل ساختار متخلخل سوخت اکسید اورانیوم به عنوان مجموعه ای از کره های یکسان با شعاعی معادل با شعاع دانه های سوخت لحاظ میگردد. در روابط ۶ الی ۱۰ به نحوه محاسبه میزان غلظت پاره های شکافت آزاد شده (با استفاده از این مدل) پرداخته شده است [۶].

$$p_f = p/v \quad (6)$$

$$\dot{F} = \frac{P_f}{3.2 * 10^{-11}} \quad (7)$$

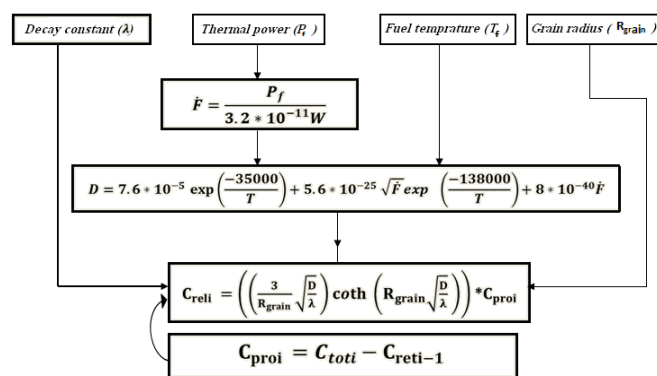
$$D = 7.6 * 10^{-5} \exp\left(\frac{-35000}{T}\right) + 5.6 * 10^{-25} \sqrt{\dot{F}} \exp\left(\frac{-136000}{T}\right) + 8 * 10^{-4} \dot{F} \quad (8)$$

$$C_{reli} = \left( \frac{3}{R_{grain} \sqrt{\lambda}} \left[ \coth\left( R_{grain} \sqrt{\frac{\lambda}{D}} - \frac{1}{R_{grain} \sqrt{\lambda}} \right) \right] \right) * C_{proi} \quad (9)$$

$$C_{proi} = C_{toti} - C_{reti-1} \quad (10)$$

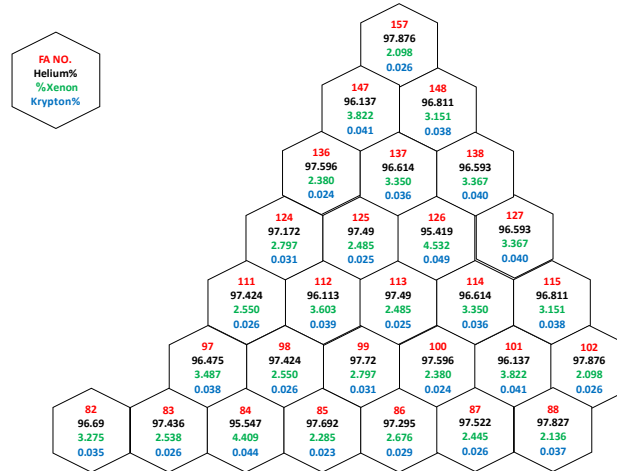
در معادلات فوق چگالی شکافت ( $\dot{F}$ ) بر حسب  $\frac{Fission}{m^3 \cdot sec}$ ، دمای سوخت ( $T$ ) بر حسب کلوین، ضریب انتشار ( $D$ ) بر حسب  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ ، شعاع دانه ( $R_{grain}$ ) بر حسب میکرومتر و نهایتاً ثابت واپاشی زینان و کریپتون ( $\lambda$ ) بر حسب ثانیه می باشد. علاوه بر این پارامترهای  $C_{reli}$  و  $C_{proi}$  و  $C_{toti}$  به ترتیب غلظتهای گاز آزاد شده، گاز تولید شده و کل گازها بوده و  $C_{reti-1}$  غلظت گاز باقی مانده در سوخت در استپ زمانی قبل می باشد.

در شکل ۴ به تشریح شماتیکی نحوه انجام محاسبه در مدل Booth پرداخته شده است.

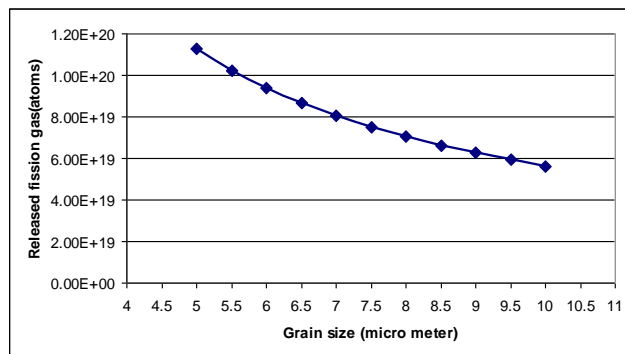


شکل ۴ - بیان شماتیکی نحوه انجام محاسبه در مدل Booth

در شکل‌های ۵ و ۶، بترتیب به تشریح درصد حضور گازهای حاصل از شکافت در فضای گپ (مدل Booth) و همچنین تغییرات غلظت آزادسازی پاره های شکافت گازی بر حسب سایز دانه (در انتهای سیکل) پرداخته شده است.



شکل ۵- درصد حضور پاره های شکافت گازی در فضای گپ در مدل Booth ( انتهای سیکل اول)



شکل ۶- تغییرات غلظت آزادسازی پاره های شکافت گازی بر حسب تغییرات سایز دانه (در انتهای سیکل)

### بحث و نتیجه گیری:

با بررسی و مقایسه شکل‌های ۲ و ۵ ملاحظه می شود که نوعی هم نرخ در نتایج مدل‌های Weisman و Booth وجود دارد. لذا با توجه به عدم در اختیار داشتن داده های تجربی برای مقایسه، نیل به نوعی همگرایی در نتایج دو مدل مختلف میتواند دلیلی بر صحت محاسبات و مدلسازی انجام گرفته در راستای این تحقیق باشد.

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می شود، آزاد شدن پاره های شکافت گازی بدرون فضای گپ به انضمام وجود انبساط دمایی ناهمگون در سوخت و غلاف منجر به افزایش تدریجی فشار گپ در طول سیکل اول میگردد که البته با تعامل موجود بین ضریب کندکتانس و فشار گپ، نوعی پدیده خود کنترلی رخ می دهد که از افزایش زیاد آن جلوگیری می کند. همچنین همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می شود با افزایش سایز دانه های سوختی از میزان آزاد سازی پاره های شکافت گازی به گپ کاسته می شود، بنابراین از تاثیر بخشی این پدیده می توان در کنترل فرآیند آزادسازی پاره های شکافت گازی به گپ بهره برد. با آزاد شدن پاره های شکافت گازی از سطح پلت سوختی به سمت گپ، از مقدار غلظت این گازها در درون سوخت کاسته می شود. با توجه به مرتبط بودن فضاهای گازی گپ، کپسول بالایی و همچنین سوراخ مرکزی با یکدیگر،



گازهای آزاد شده در تمام فضای این حجم گازی پخش می گردند. از نظر نوترونیک بخشی از این حجم گازی از جمله کپسول بالایی و سوراخ مرکزی تقریباً جزو فضاهاى غیر فعال محسوب می گردند. بنابراین در حالتی که مدلسازی فرآیند آزادسازی پاره های شکافت گازی در نظر گرفته شود، راکتیویته منفی ناشی از پاره های شکافت گازی کمتر از حالتی خواهد بود که این فرآیند لحاظ نگردد .

#### References:

- [۱] Rahmani, Y., Rahgoshay, M., Study of the role of gap conductance coefficient of fuel on increasing safety in VVER-۱۰۰۰ reactors. In: proceeding of the Safety assurance of NPP with WWER conference, GIDROPPRESS, Podolsk, Russia, ۲۰۱۱
- [۲] Rahmani, Y, Study of Thermohydraulic Parameters of the Bushehr's VVER-۱۰۰۰ Reactor during the Initial Startup and the First Cycle Using the Coupling of WIMSD<sup>۰</sup>-B, CITATION-LDI<sup>۲</sup> and WERL Codes. In: proceeding of the Safety assurance of NPP with WWER conference, GIDROPPRESS, Podolsk, Russia. ۲۰۱۳.
- [۳] Rahmani, Y., Pazirandeh, A., Ghofrani, M. B., Sadighi, M., Calculation of the fuel composition and the thermo-neutronic parameters of the Bushehr's VVER-۱۰۰۰ reactor during the initial startup and the first cycle using the WIMSD<sup>۰</sup>-B, CITATION-LDI<sup>۲</sup> and WERL codes, Trans. Annals. Nucl. Energy, ۵۷, ۶۸-۸۳., ۲۰۱۳
- [۴] Atomenergoproekt,. Final Safety Analysis Report of Bushehr's VVER-۱۰۰۰ Reactor (Chapter ۴). Ministry of Russian Federation of Atomic Energy, Moscow. ۲۰۰۳
- [۵] Weisman, J., Macdonald, P. E., Miller, A. I., Ferrari, H.,. Fission Gas Release from UO<sub>2</sub> Fuel Rods with Time Varying Power Histories, Trans. Am. Nucl. Soc, ۱۲, ۹۰۰, ۱۹۶۹
- [۶] Booth A .H , A suggested method of calculating fission gas diffusion from uo<sub>2</sub> fuel and its application to the x-۲-f loop test. Technical report CRDC-۷۲۱, Canada, ۱۹۵۷.