

## بررسی تاثیر فشار اولیه گاز محبوس درون میله سوخت بر عملکرد آن با استفاده از کد FRAPCON-3

پویان نجفی<sup>(۱)</sup> - سعید طالبی\*<sup>(۱)</sup> - مجید قصابیان<sup>(۱)</sup>

دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه راکتور

### چکیده:

وقوع هرگونه ایراد در عملکرد میله‌های سوخت و غلاف منجر به آزاد شدن محصولات شکافت به خنک‌کننده قلب راکتور می‌شود که از منظر ایمنی یک امر غیرقابل قبول است. در مقاله پیش رو اثر فشار گاز اولیه محبوس درون میله سوخت بر آهنگ آزاد شدن محصولات شکافت گازی از ساختار کریستالی قرص سوخت و تاثیر آن بر دمای مرکز سوخت به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای ایمنی عملکردی سوخت بررسی شده است. در ادامه اثر افزایش فشار اولیه گاز درون میله سوخت بر یکپارچگی غلاف میله‌های سوخت یک راکتور نمونه در بیشترین میزان سطح مصرف سوخت توسط کد عملکردی FRAPCON-3 بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** میله سوخت، فشار گاز، یکپارچگی غلاف، FRAPCON-3

### ۱- مقدمه :

در فرایند ساخت میله‌های سوخت، قرص سوخت و غلاف در تماس با یکدیگر قرار نمی‌گیرند تا فضای مناسبی (گپ) برای تغییرات شعاع قرص سوخت ناشی از پدیده‌های تورم، تراکم، جابجایی و انبساط حرارتی فراهم شده باشد. به منظور تسهیل انتقال حرارت ناشی از فرایند شکافت درون سوخت و نیز جبران کردن بخشی از تنش‌های وارد شده توسط جریان خنک‌کننده به جداره غلاف؛ در هنگام ساخت میله‌های سوخت با گاز در فشار ۲۵ اتمسفر و یا بیشتر پر می‌شوند [۱]. با شروع به کار راکتور دو عامل باعث افزایش فشار گاز محبوس درون میله سوخت خواهند شد. از یکسو راه یافتن بخشی از مقادیر محصولات گازی شکافت، به ویژه گازهای  $Kr$  و  $Xe$ ، به فضاهای خالی میله سوخت باعث تغییر میزان و ترکیب گاز میله سوخت خواهد شد و از سوی دیگر فضاهای خالی میله سوخت (پلنوم، شکاف گپ، کانال مرکزی در قرص‌های سوخت حفره‌دار، تخلخل‌های باز، ترک‌های سطح قرص سوخت، زبری سطح قرص سوخت و غلاف) در انتهای دوره بهره‌برداری به علت تغییرات شعاع خارجی قرص سوخت و خزش در غلاف کاهش چشمگیری پیدا خواهند کرد. در این مقاله تلاش شده است تا اثر فشار گاز محبوس درون میله‌های سوخت بر عملکرد میله‌های سوخت بررسی شود.

## ۲- روش کار :

توصیف دقیق رفتار میله‌های سوخت نیازمند استفاده از کدهای شبیه سازی معتبر است. از این رو در این مقاله کد عملکردی سوخت FRAPCON-3 به منظور ارزیابی عملکرد میله های سوخت و اطمینان از حفظ یکپارچگی غلاف مورد استفاده قرار گرفته است. این کد قابلیت شبیه سازی رفتار حرارتی و مکانیکی میله‌های سوخت راکتورهای آب سبک و آب سنگین تحت شرایط پایدار و گذراهای بلند مدت را دارا است. هم چنین این کد توانایی محاسبه انتقال حرارت بین اجزاء میله سوخت، برهمکنش مکانیکی قرص سوخت و غلاف، ضخامت لایه اکسید و ترد شوندهای غلاف، تخمین میزان گازهای آزاد شده حاصل از فرایند شکافت، حجم فضاهای خالی میله سوخت و فشار گاز محبوس در میله سوخت را دارد [۲]. معیارهای طراحی و بهره‌برداری معرفی شده توسط برای فشار داخل گاز میله سوخت شامل دو مورد زیر است [۳].

۱- در کارکرد عادی راکتور فشار گاز درون میله سوخت می‌بایست همواره از فشار سیستم خنک‌کننده کم‌تر باشد.

۲- در صورت تجاوز فشار گاز میله سوخت از فشار سیستم خنک‌کننده، آهنگ کرنش محیطی غلاف می‌بایست کم‌تر از آهنگ تورم قرص سوخت باشد تا تغییرات قطر خارجی غلاف از ۰,۲ درصد تجاوز نکند.

در کد FRAPCON-3 تنش موثر وارد شده به غلاف ناشی از اختلاف فشار بین سیال خنک‌کننده و گاز محبوس درون میله سوخت با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴].

$$\sigma_{eff} = \sqrt{0.5 \cdot ((\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2)}$$

$$\sigma_z = \frac{r_{in}^2 * p_{in} - r_{out}^2 * p_{out}}{r_{out}^2 - r_{in}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_{in} * p_{in} - r_{out} * p_{out}}{T_{clad}}$$

در رابطه فوق  $p_o$  و  $p_i$  به ترتیب فشار گاز محبوس درون میله سوخت و فشار سیال خنک‌کننده،  $r_o$  و  $r_i$  شعاع داخلی و خارجی غلاف و  $T_{clad}$  دمای مطلق میانگین غلاف است. همچنین، مدل حاکم بر آزاد شدن محصولات گازی حاصل از شکافت در این کد، بر مبنای پخش گازهای حاصل از شکافت در دانه‌های کروی قرص سوخت به سطح دانه‌بندی است. در این مدل، گازها با تجمع در سطح دانه‌بندی قرص سوخت تشکیل حباب‌های کوچکی از گاز را می‌دهند که با گذشت زمان و اضافه شدن مقدار بیش‌تری از محصولات شکافت گازی، این حباب‌ها رشد می‌کنند و با پیوستن به یکدیگر تشکیل حباب‌های بزرگ‌تری را می‌دهند. با رسیدن

سطح گازها به یک حد اشباع مشخص، کسری از این محصولات گازی شکافت با استفاده از تخلخل‌های موجود در قرص سوخت به فضاهای خالی میله سوخت راه پیدا می‌کنند و باعث تغییر در ترکیب و فشار گاز محبوس درون میله سوخت خواهند شد [۵]. در زیر رابطه حاکم بر سطح اشباع گاز موجود در حباب‌ها بیان شده است [۴].

$$N_{saturate} = \left[ \frac{0.5e^{-6} \times (1 - 1.5 \cdot \cos \theta + \cos^3 \theta)}{3 \cdot K_B \cdot T_{grain} \cdot \sin^2 \theta} \right] \cdot (2.4 + P_i) \cdot 1e^{-6} \quad (2)$$

$$\theta = 50^\circ$$

در رابطه فوق  $N_{saturate}$  سطح اشباع گازها برحسب مول،  $K_B$  ثابت بولتزمن،  $T_{grain}$  دمای مطلق دانه‌بندی قرص سوخت و  $P_i$  فشار گاز درون میله سوخت برحسب MPa است.

## ۲-۱ مدل‌سازی عملکرد میله سوخت

برای شبیه‌سازی عملکرد میله سوخت باید اطلاعات بهره‌برداری راکتور و پارامترهای طراحی میله سوخت از قبیل مواد ساختاری، هندسه قرص سوخت، غلاف و عرض شکاف گپ، توزیع محوری پروفیل توان و تاریخچه قدرت بهره‌برداری میله سوخت را در اختیار داشته باشیم. مشخصات عملیاتی میله سوخت مورد بررسی در آزمایش BNFL/HBEP Br-3 که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است در جدول ۱ آورده شده است [۶]. این میله سوخت به‌خصوص، با گاز He در فشار اتمسفر پر شده است و به مدت تقریبی ۱۶۶۰ روز مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

جدول شماره (۱)

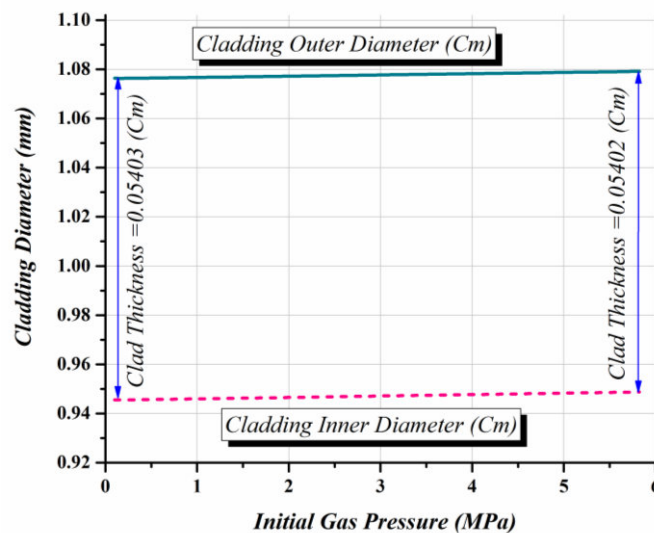
میله سوخت		قرص سوخت		شرایط کارکرد راکتور	
ارتفاع میله سوخت (mm)	۱۱۳،۱۱	ماده سوخت	$UO_2$	نوع راکتور	PWR
قطر میله سوخت (mm)	۱۰،۷۷	غنا (%)	۹	فشار خنک‌کننده (Mpa)	۱۵،۱۷
ضخامت گپ (mm)	۰،۱۰	قطر قرص سوخت (mm)	۹،۲۶	دمای ورودی خنک‌کننده به قلب (°C)	۲۵۵
ضخامت غلاف (mm)	۰،۶۰	میزان تخلخل (%)	۷	دمای خروجی خنک‌کننده از قلب (°C)	۲۷۹
فشار اولیه گاز در دمای محیط (MPa)	۰،۱	قطر دانه‌بندی (μm)	۸		

در ۴۰۰ روز اول کارکرد راکتور ماکزیمم توان خطی بهره‌برداری میله سوخت به طور تقریبی مقدار  $45 \text{ Kw/m}$  خواهد بود و در طی ۱۲۶۰ روز باقی‌مانده به مقدار  $15 \text{ Kw/m}$  می‌رسد. به دلیل غنای اولیه بارگذاری بالا و

خروج میله های کنترل توزیع ضرایب قدرت محوری در طی بهره برداری به شکل سینوسی با نسبت مقدار ماکزیمم به متوسط ۱,۳ ثابت باقی خواهد ماند.

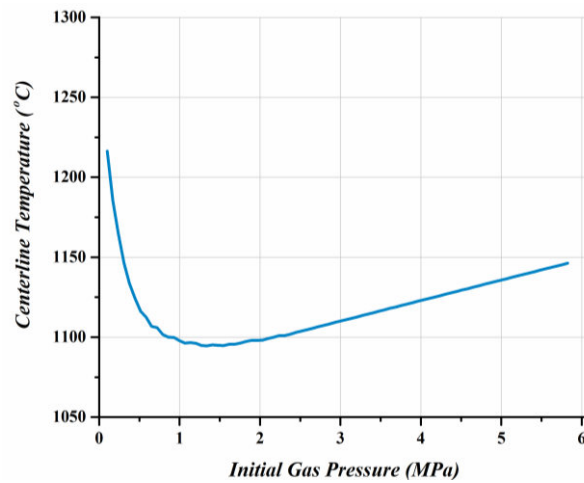
### ۳- نتایج :

در شکل ۱ تغییرات شعاع خارجی و داخلی غلاف میله سوخت بر اثر افزایش فشار اولیه گاز محبوس در ناحیه گپ در بیشترین میزان سطح مصرف سوخت (Burn-up) نشان داده شده است. بر اساس ضوابط ایمنی و طراحی افزایش شعاع خارجی غلاف ناشی از افزایش فشار گاز درون میله سوخت تا زمانی مجاز خواهد بود که رشد قطر خارجی غلاف از مقدار اشاره شده تجاوز نکند. بدین منظور حداکثر مقدار فشار گاز اولیه در این شبیه سازی حداکثر ۵,۹ MPa تعیین شد. مشاهده می شود افزایش فشار گاز اولیه باعث ایجاد تغییر محسوسی در ضخامت غلاف در طی مدت بهره برداری نخواهد شد ولی افزایش مداوم قطر خارجی میله سوخت، منجر به افزایش ضخامت گپ خواهد شد.



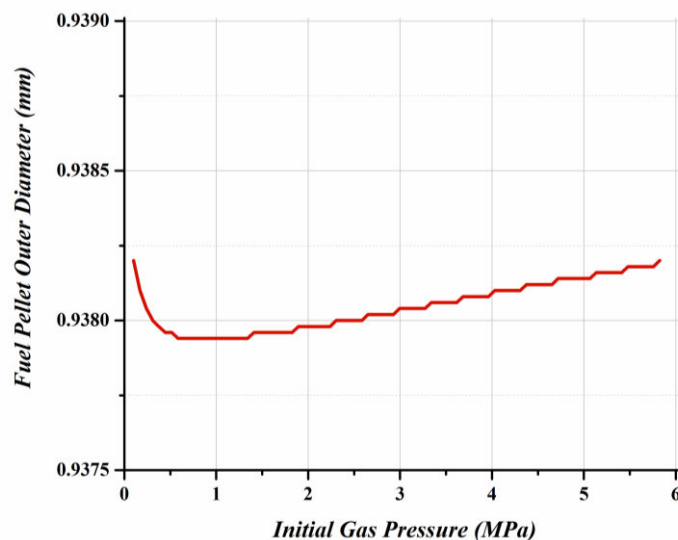
شکل ۱. تغییرات قطر خارجی و داخلی غلاف با افزایش فشار داخلی میله سوخت

در شکل ۲ تغییرات دمای مرکز سوخت را برحسب تغییرات فشار اولیه گاز تا حد نهایی، نشان داده شده است. اشاره شد که با گذشت زمان و راه یافتن بخشی از محصولات شکافت گازی به شکاف گپ و تغییر ترکیب گاز محبوس درون میله سوخت، هدایت حرارت ناشی از شکافت مشکل تر خواهد شد. مشاهده می شود با افزایش فشار اولیه گاز و در نتیجه افزایش ضخامت گپ، سطح دمای مرکز سوخت ابتدا تا مرحله ای کاهش می یابد و سپس افزایش می یابد؛ این امر حاکی از آن است که در فشار مذکور، انتقال حرارت به بهینه ترین حالت خود رسیده است.



شکل ۲. دمای مرکز سوخت در بیشترین سطح توان بهره‌برداری

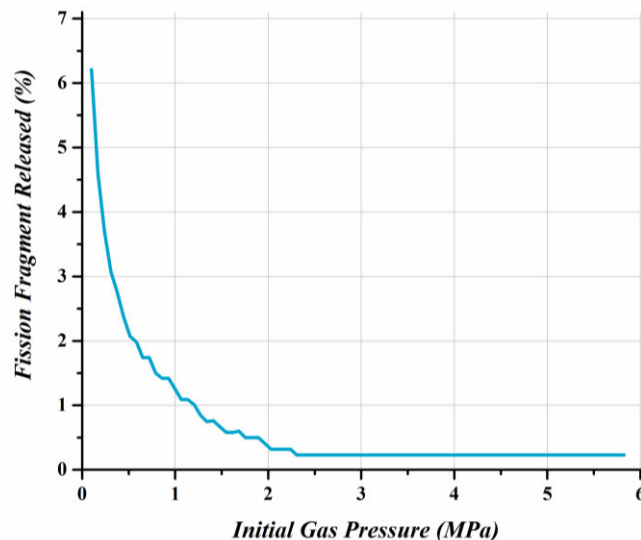
در شکل ۳ تغییرات قطر خارجی قرص سوخت برحسب تغییرات فشار گاز در بیشترین میزان سطح Burn-up نشان داده شده است. قرص سوخت در کد FRAPCON-3 به صورت صلب در نظر گرفته می‌شود؛ در نتیجه افزایش فشار گاز محبوس درون میله سوخت باعث تغییر در قطر داخلی غلاف، افزایش ضخامت شکاف گپ و در نتیجه وخیم‌تر شدن انتقال حرارت خواهد شد که به افزایش دمای متوسط سطح قرص سوخت منجر می‌گردد، این افزایش سطح دما تنها در پدیده انبساط حرارتی قرص سوخت نمود پیدا کرده و باعث افزایش قطر خارجی قرص سوخت می‌گردد.



شکل ۳. تغییرات قطر خارجی قرص سوخت متناظر با دمای سوخت در حالت بیشترین سطح توان بهره‌برداری از آنجا که تغییر قطر خارجی سوخت بر اثر انبساط دمایی در کل سطح قرص سوخت اتفاق می‌افتد، مقدار افزایش قطر قرص زمانی حداقل خواهد شد که میانگین دمای سطح قرص سوخت به کمترین میزان خود برسد. در نتیجه جهت رعایت معیارهای ایمنی در کارکرد راکتور از منظر تغییرات شعاع قرص سوخت، علاوه

بر دمای مرکز، می‌بایست دمای میانگین کل سطح قرص سوخت نیز مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله مشاهده شد دمای مرکز سوخت به ازای فشار اولیه گاز  $1.34 \text{ MPa}$  مقدار کمینه خود و شعاع خارجی قرص سوخت به ازای فشار اولیه  $0.8 \text{ MPa}$  مقدار کمینه خود را خواهد داشت.

از رابطه (۲) مشاهده می‌شود، مقدار اشباع محصولات گازی در حباب‌های تشکیل شده در سطح دانه‌بندی رابطه مستقیمی با فشار گاز محبوس درون میله سوخت دارد. از این رو انتظار می‌رود آهنگ خروج محصولات شکافت گازی از ساختار کریستالی قرص سوخت به فضاهای خالی موجود درون میله سوخت، با افزایش فشار گاز محبوس کاهش یابد. نتیجه افزایش فشار گاز اولیه محبوس درون میله سوخت بر تغییرات محصولات گازی شکافت راه یافته به فضاهای خالی میله سوخت در انتهای دوره بهره‌برداری در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. تغییرات محصولات شکافت گازی راه یافته به فضاهای خالی میله سوخت با افزایش فشار اولیه گاز محبوس درون میله سوخت

#### ۴- بحث و نتیجه گیری :

با توجه به تنش‌های منفی وارده به جداره خارجی غلاف ناشی از اختلاف فشار زیاد سیال خنک‌کننده راکتورهای تحت فشار و گاز محبوس درون میله سوخت در طول دوره پرتو دهی، شعاع داخلی و خارجی غلاف در حین بهره‌برداری از میله سوخت در قلب راکتور شعاع اولیه آن در هنگام فرایند ساخت کمتر خواهد بود، لذا حداکثر مقدار گزارش شده  $4.06 \text{ MPa}$  در ضوابط ایمنی و طراحی برای تنش موثر [۳] و مقدار تنش موثر محاسبه شده  $23 \text{ MPa}$  از طریق رابطه (۱) در شبیه‌سازی حاضر، پدیده بادکردگی غلاف ناشی از افزایش فشار داخلی میله سوخت منجر به پارگی غلاف نخواهد شد. از سوی دیگر با افزایش فشار

اولیه گاز محبوس درون میله سوخت تا حد  $1,34 MPa$  دمای مرکز سوخت به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای مهم ایمنی و بهره‌برداری سوخت در طی مدت زمان کارکرد راکتور به حداقل خواهد رسید و میزان محصولات گازی ناشی از فرایند شکافت محبوس درون میله سوخت در انتهای دوره بهره‌برداری به حداقل میزان ممکن خواهد رسید.

مراجع :

- [1] K. Lassmann, "The structure of fuel element codes," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 57, no. 1, pp. 17–39, 1980.
- [2] G. A. Berna, G. A. Beyer, K. L. Davis, and D. D. Lanning, "FRAPCON-3: A computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup," 1997.
- [3] NEA, "Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review," pp. 32–40, 2012.
- [4] D. D. Lanning, C. E. Beyer, and C. L. Painter, "FRAPCON-3: modifications to fuel rod material properties and performance models for high-burnup application," 1997.
- [5] K. Forsberg, F. Lindström, and A. R. Massih, "Modelling of some high burnup phenomena in nuclear fuel," 1997.
- [6] D. D. Lanning, G. A. Berna, and G. A. Berna, "FRAPCON-3: Integral assessment," 1997.