



بررسی و تحلیل رفتار حرارتی میله سوخت و انتشار گازهای شکافت درون آن برای راکتور VVER-1000 بوشهر در کد FRAPCON-3 در Burnup بالا

ره گشای، محمد*^(۱) - عبداللهی، مهدی^(۱) - سلطان محمدی، سعید^(۲)

^(۱) دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای

^(۲) دانشگاه شیراز، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

محاسبه دقیق عملکرد میله های سوخت راکتور آب سبک و تحلیل رفتار حرارتی و مکانیکی آن تحت شرایط Burnup بالا، اطلاعات مهمی را در حوزه ایمنی در اختیار قرار می دهد. در این پروژه تحلیل حرارتی- مکانیکی حالت پایدار میله های سوخت راکتور PWR مرجع [1] با استفاده از کد FRAPCON-3 انجام شد و نتایج بدست آمده از مدلسازی های کد جهت صحت سنجی کد با داده های تجربی موجود مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله ی بعد میله های سوخت راکتور VVER-1000 مدلسازی گردید و نتایج آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: VVER-1000, FRAPCON-3, Thermal - Mechanical Analysis

مقدمه :

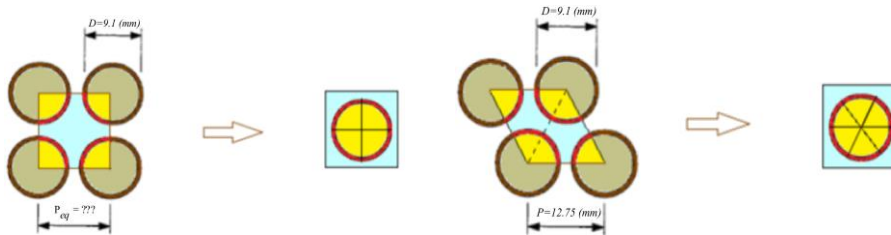
هنگامی که دمای سوخت افزایش می یابد، تنش های بسیار زیاد ناشی از گرادیان دمایی بالا در سوخت، باعث ایجاد ترک و جابجایی سوخت می شود. ترک ها می توانند شعاعی یا محیطی باشند، اما بیشتر بصورت شعاعی هستند. وقتی که تکه های سوخت به ظاهر درون گپ سوخت - غلاف جابجا می شوند، فضای خلأ که ابتدا در گپ سوخت - غلاف می باشد، درون سوخت جابجا می شود. هنگامی که سوخت گرم تر می شود، منبسط شده و برخی از حفره های درون آن پر می شوند. از آنجا که زبری ها (نا همواری ها) بطور دقیق با هم تراز نمی شوند، در نتیجه باعث می شود قطر سوخت بزرگ تر شده و نیز به علت مکانیزم های انبساط یا انقباض طبیعی شامل انبساط حرارتی، بادکردگی و متراکم سازی، باعث می شود سوخت اثر متقابل با غلاف در یک سطح قدرت پایین تر از آنچه که انتظار می رود داشته باشد. مدلسازی حرارتی و مکانیکی سوخت ترک خورده و جابجا شده مستلزم محاسبه تغییرات اندازه گپ سوخت - غلاف (و متعاقب آن محاسبه رسانایی گپ) و تغییرات قطر قرص سوخت در نتیجه اثرات متقابل سوخت و غلاف می باشد. سطح سوخت جابجا شده یک اندازه جدید گپ سوخت - غلاف را برای محاسبه حرارتی گپ و اثرات متقابل مکانیکی فراهم می کند. علاوه بر این ملاحظه شده است که گاز موجود در گپ سوخت - غلاف به درون ترک های قرص سوخت انتقال یافته (و در نتیجه به دلیل دمای بالاتر در ترک ها، فشار تغییر می یابد) و در محاسبات حرارتی و مکانیکی بازخورد خواهد

داشت. یک محاسبه دقیق از تغییر شکل سوخت و غلاف در هر تحلیل واکنش میله سوخت ضروری است؛ زیرا ضریب انتقال حرارت در عرض گپ سوخت - غلاف تابعی از اندازه مؤثر و همچنین فشار فصل مشترک آن می باشد. علاوه بر این، محاسبه دقیق از تنش ها در غلاف به منظور محاسبه دقیق آغاز شکست غلاف (و بدنبال آن آزادسازی محصولات شکافت) مورد نیاز است. [2]

روش کار :

در روابط حرارتی کد FRAPCON-3 قطر گرم شونده‌گی معادل برای زیرکانال خنک کننده با آرایش مربعی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین لازم است برای مدل‌سازی میله سوخت راکتور VVER-1000 با آرایش مثلثی اصلاحات لازم انجام شود. روش پیشنهادی در این مقاله برابر قرار دادن قطر گرم شونده‌گی معادل در آرایش مثلثی با قطر گرم شونده‌گی معادل در آرایش مربعی متناظر و در نهایت یافتن گام شبکه برای این آرایش مربعی معادل می باشد. شرح این روش در ادامه توضیح داده می شود.

کد FRAPCON-3 محاسبات را برای یک زیرکانال مربعی که در مجموع تشکیل یک میله سوخت را می دهد، در نظر می گیرد. از این رو برای مدل‌سازی آرایش مثلثی راکتور VVER-1000 می توان دو زیرکانال مثلثی مجاور را که در مجموع یک میله سوخت را تشکیل می دهند، مطابق شکل (۱) در نظر گرفت.



شکل (۱): شمای دو زیرکانال مثلثی مجاور در راکتور VVER-1000 و شمای کانال مربعی معادل در نظر گرفته شده

برای دو زیرکانال مثلثی مجاور در راکتور VVER-1000

قطر گرم شونده‌گی معادل برای کانال مثلثی و مربعی مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می شود :

$$D_H^{\text{مثلثی}} = 4 \frac{A_C}{P_H} = 4 \times \frac{2 \left(P^2 \frac{\sqrt{3}}{4} - 3 \times \frac{1}{6} \times \frac{\pi D^2}{4} \right)}{6 \times \frac{1}{6} \times \pi D} = 10.598 \text{ (mm)}$$

رابطه (۱)

$$D_H^{\text{مربعی}} = 4 \times \frac{\left(P_{eq}^2 - 4 \times \frac{1}{4} \times \frac{\pi D^2}{4} \right)}{4 \times \frac{1}{4} \times \pi D}$$

رابطه (۲)

برای یافتن گام شبکه در این کانال مربعی معادل، باید قطر گرم شونده‌گی معادل محاسبه شده در رابطه (۱) را برابر با قطر گرم شونده‌گی معادل کانال مربعی قرار داد

$$D_H^{\text{مربعی}} = D_H^{\text{مثلثی}} = 10.598 \text{ (mm)}$$

رابطه (۳)



حال با استفاده از رابطه (۱) و (۲) می توان گام شبکه در کانال مربعی معادل را محاسبه نمود :

$$P_{eq} = 11.865 \text{ (mm)}$$

پارامتر دیگری که در ورودی کد 3-FRAPCON مورد نیاز است نرخ جریان خنک کننده اطراف میله سوخت می باشد که با استفاده از دانسیته خنک کننده در ورودی قلب و نیز سطح معادل جریان عبوری از یک مجتمع سوخت در راکتور VVER-1000 قابل محاسبه است

$$Q_{FA} = 515 \text{ (m}^3\text{/h)}, \quad \rho = 743 \text{ (Kg/m}^3\text{)}, \quad A_{FA} = 254 \text{ E-4 (m}^2\text{)}$$

با توجه به داده های فوق، نرخ جریان خنک کننده اطراف میله سوخت مطابق زیر محاسبه می شود:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q_{FA} = 106.29 \text{ (Kg/sec)}, \quad G = \frac{\dot{m}}{A_{FA}} = 4184.65 \text{ (Kg/m}^2\text{.sec)}$$

مشخصات هندسی میله سوخت، شرایط راکتور، تاریخچه توان و نیز توزیع توان محوری میله سوخت برای راکتورهای VVER-1000 و Halden در جداول (۱) و (۲) قابل مشاهده است.

به منظور ارزیابی تغییرات دمای مرکز سوخت پیش بینی شده توسط کد 3-FRAPCON بصورت تابعی از فرسایش سوخت، از نتایج تجربی میله سوخت IFA-677.1 Rod2 ساخت شرکت Framatome ANP استفاده شده است که در راکتور آزمایشگاهی Halden از دسامبر 2004 تا سپتامبر 2007 تا میزان فرسایش سوخت

32 (GWd/MTU) بارگذاری شده است. لازم به توضیح است راکتور Halden یک راکتور آزمایشگاهی - تحقیقاتی می باشد که ارتفاع قلب آن نسبت به راکتورهای تجاری کوچکتر است؛ لذا میله سوخت مورد

آزمایش از نظر ارتفاع مجدداً بازسازی شده است.

جدول (۱) : مشخصات هندسی میله سوخت و شرایط عملیاتی راکتور VVER-1000 [3].

25.2 (cm)	طول ناحیه <i>plenum</i> در حالت سرد	UO ₂	نوع سوخت
7.57 (mm)	قطر بیرونی فنر موجود در <i>plenum</i> [۵]	7.57 (mm)	قطر بیرونی قرص سوخت
1.27 (mm)	قطر سیم فنر <i>plenum</i> [۵]	1.5 (mm)	قطر حفره مرکزی قرص سوخت
28 دور	تعداد گردش های فنر <i>plenum</i> [۵]	9.8 (mm)	ارتفاع قرص سوخت [۴]
12.75 (mm)	گام شبکه در آرایش مثلثی	95 (%TD)	جرم حجمی واقعی سوخت
هلیوم	نوع گاز اولیه پر شده درون میله	3.62 %	غناي متوسط سوخت تازه
2.25 (MPa)	فشار گاز اولیه پر شده درون میله	0.90 (μm)	میانگین زبری سطح قرص [۴]
15.7 (MPa)	فشار سیستمی سیال خنک کننده	Zircaloy-4	نوع غلاف
564.15 (K)	دمای ورودی سیال خنک کننده به قلب	9.1 (mm)	قطر خارجی غلاف
594.15 (K)	دمای خروجی سیال خنک کننده از قلب	7.73 (mm)	قطر داخلی غلاف
743 (Kg/m ³)	دانسیته خنک کننده در ورودی قلب	15 (ppm)	مقدار هیدروژن غلاف
84800 (m ³ /h)	دبی حجمی خنک کننده در قلب	0.51 (μm)	میانگین زبری سطح غلاف [۵]
515 (m ³ /h)	دبی حجمی خنک کننده در یک FA	3.53 (m)	طول مؤثر میله سوخت
254 E-4 (m ²)	سطح معادل جریان عبوری از یک FA	0.080 (mm)	ضخامت گپ سوخت-غلاف



جدول (۲): مشخصات هندسی میله سوخت IFA-677.1 Rod2 و شرایط راکتور آزمایشگاهی Halden [6].

3.4 (MPa)	فشار سیستمی سیال خنک کننده	Zircaloy-4	نوع غلاف
508.0 (K)	دمای ورودی سیال خنک کننده	10.70 (mm)	قطر خارجی غلاف
0.0 (kg/m ² .h)	نرخ جریان خنک کننده اطراف میله	9.30 (mm)	قطر داخلی غلاف
46.0 (mm)	گام شبکه	0.50 (μm)	میانگین زبری سطح غلاف
UO ₂	نوع سوخت	50 (%)	کار- سرد غلاف
9.13 (mm)	قطر قرص سوخت	10.0 (ppm)	مقدار هیدروژن غلاف
11.0 (mm)	ارتفاع قرص سوخت	0.399 (m)	طول مؤثر میله سوخت
0.221 (mm)	عمق ناحیه تقعر قرص سوخت	4.55 (cm)	طول ناحیه plenum در حالت سرد
6.39 (mm)	قطر ناحیه تقعر قرص	8.0 (mm)	قطر بیرونی فنر موجود در plenum
1.80 (mm)	قطر حفره مرکزی قرص سوخت	1.27 (mm)	قطر سیم فنر plenum
2.0 (μm)	میانگین زبری سطح قرص	10.0 دور	تعداد گردش های فنر plenum
1870 (K)	دمای زینت سازی قرص سوخت	0.170 (mm)	ضخامت گپ سوخت-غلاف
95.2 (%TD)	جرم حجمی واقعی سوخت	هلیوم	نوع گاز اولیه پر شده درون میله
4.93 (%)	درصد غنای U ²³⁵ سوخت	1.35 (MPa)	فشار گاز اولیه پر شده درون میله

نتایج:

پیش بینی دقیق انتشار گاز شکافت به دو دلیل تأثیر ویژه روی رسانایی حرارتی گپ و در نتیجه دمای سوخت و برای محاسبه فشار گاز داخلی میله سوخت (که بر تحلیل فشار میله سوخت در انتهای عمر کارکرد آن اثر می گذارد) ضروری است [4]. سایر نتایج در شکل های (۱) تا (۶) آورده شده است.

جدول (۳): مقایسه مقدار اندازه گیری شده حجم فضاهای خالی میله [1] با مقدار پیش بینی شده توسط FRAPCON-3

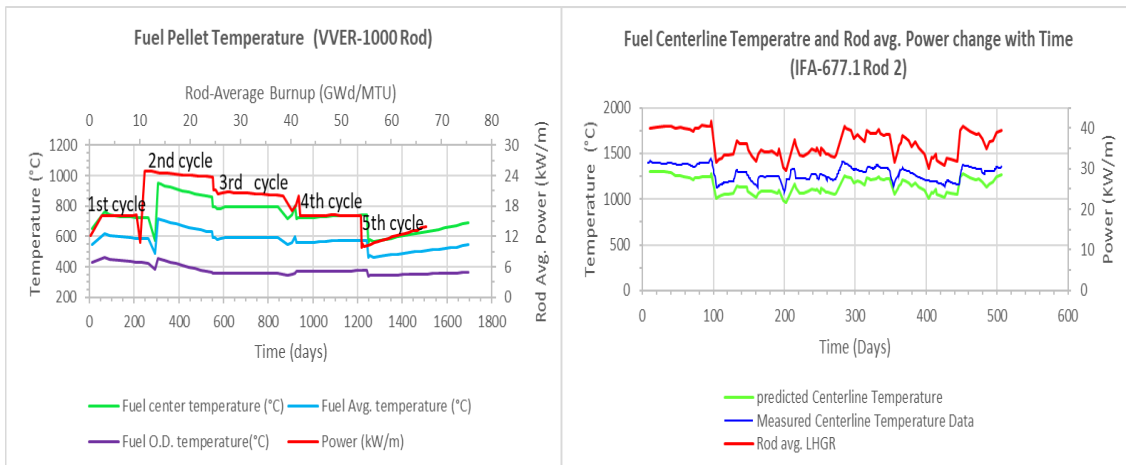
برای میله های سوخت مرجع ANO-2 Rod TSQ002 و Ocone Rod 15309، و نیز میله سوخت VVER-1000

حجم فضای خالی در انتهای عمر میله (cm ³)		حجم فضای خالی در آغاز عمر میله (cm ³)		فرسایش متوسط میله (GWd/MTU)	نام میله	نام راکتور
پیش بینی	اندازه گیری [۱]	پیش بینی	اندازه گیری [۱]			
18.63	17.8	25.4	25.4	53.0	TSQ002	ANO-2
26.27	26.22	35.07	35.07	50.0	15309	Ocone
18.40	—	30.7	—	70.29	VVER-1000	

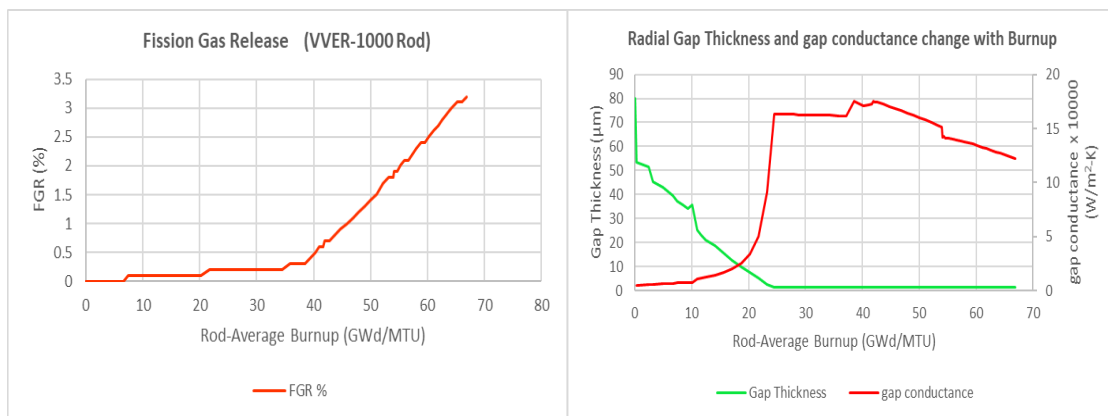
جدول (۴): مقایسه مقدار اندازه گیری شده انتشار گاز شکافت [۱] با مقدار پیش بینی شده توسط FRAPCON-3

برای میله های سوخت مرجع ANO-2 Rod TSQ002 و Ocone Rod 15309، و نیز میله سوخت VVER-1000 در انتهای عمر میله

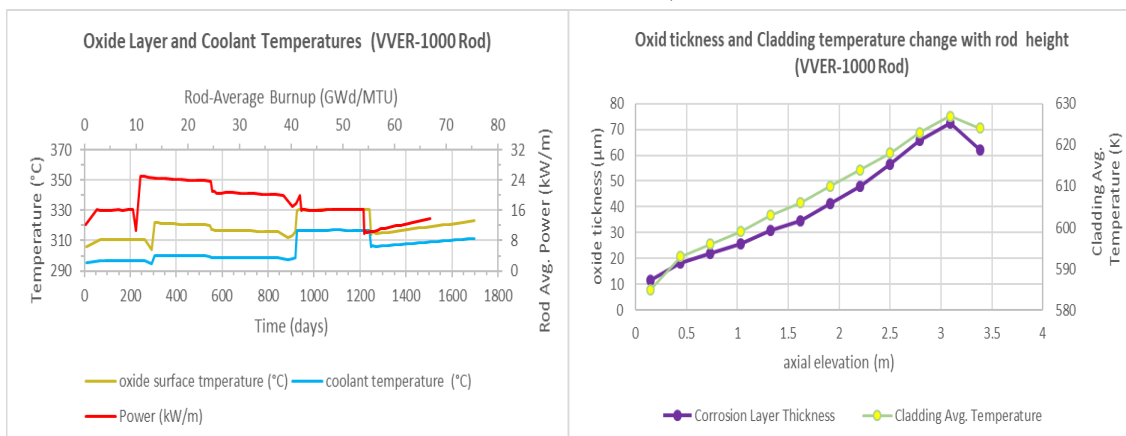
درصد انتشار گاز شکافت در انتهای عمر میله (%)		فرسایش متوسط میله (GWd/MTU)	نام میله	نام راکتور
مقدار پیش بینی شده توسط FRAPCON-3	مقدار اندازه گیری [۱]			
1.88	1.0	53.0	TSQ002	ANO-2
1.2	0.8	50.0	15309	Ocone
3.2	—	70.29	VVER-1000	



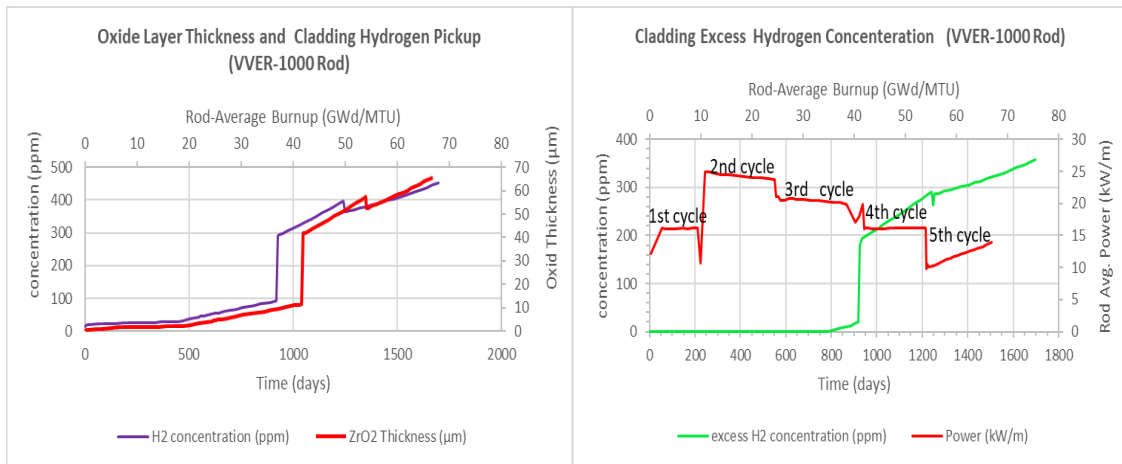
شکل (۲): تغییرات دمای سوخت بر حسب فرسایش متوسط میله برای میله سوخت VVER-1000 پیش بینی شده توسط کد FRAPCON-3 و دمای مرکز سوخت اندازه گیری شده و پیش بینی شده توسط FRAPCON-3 برای میله سوخت IFA-677.1R2 در طول عمر میله تا میزان فرسایش 32 (GWd/MTU) [1].



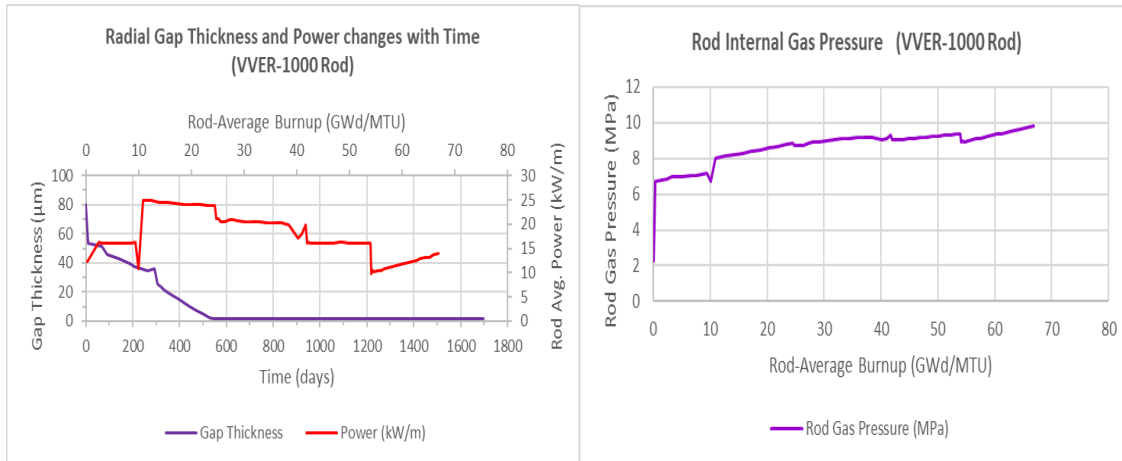
شکل (۳): درصد انتشار گاز شکافت از سوخت در طول فرسایش سوخت برای میله سوخت VVER-1000 و تغییرات ضخامت گپ سوخت-غلاف و رسانایی حرارتی گپ در طول فرسایش سوخت برای میله سوخت VVER-1000



شکل (۴): تغییرات دمای سطح لایه اکسیدی و دمای خنک کننده بر حسب فرسایش متوسط میله برای میله سوخت VVER-1000 پیش بینی شده توسط کد FRAPCON-3 و ضخامت لایه اکسیدی پیش بینی شده بصورت تابعی از ارتفاع میله برای میله سوخت VVER-1000 در سیکل پنجم با فرسایش متوسط 70.29 (GWd/MTU)



شکل (۵): ضخامت لایه اکسیدی پیش بینی شده بصورت تابعی از ارتفاع برای میله سوخت VVER-1000 در سیکل پنجم با فرسایش متوسط 70.29 (GWd/MTU) و مقدار هیدروژن مازاد غلاف در طول زمان برای میله سوخت VVER-1000



شکل (۶): تغییرات فشار گاز داخلی میله سوخت برحسب فرسایش سوخت و تغییرات ضخامت گپ سوخت-غلاف و قدرت متوسط میله در طول زمان برای میله سوخت VVER-1000

بحث و نتیجه گیری :

مشاهده می‌شود که برای یک نرخ تولید حرارت داده شده، دمای قرص سوخت در طول فرسایش سوخت افزایش می‌یابد که دلیل آن مربوط به چند عامل از جمله رشد لایه اکسیدی در سطح بیرونی غلاف، کاهش رسانایی حرارتی گپ (ناشی از تولید و انتشار گاز شکافت Xe و Kr)، و کاهش رسانایی حرارتی در خود سوخت در اثر فرسایش می‌باشد. همچنین نتایج میله سوخت VVER-1000 نشان داده‌اند که تا فرسایش 40 (GWd/MTU) حدوداً در انتهای سیکل سوم، مطابق شکل (۵) هیدروژن مازادی محاسبه نشده است اما از این مرحله به بعد غلظت هیدروژن مازاد افزایش یافته و باعث سخت شدن غلاف می‌شود که از لحاظ ایمنی مناسب نمی‌باشد و پدیده شکست غلاف را به همراه خواهد داشت همچنین مطابق شکل (۶) با تجمع گازهای شکافت آزاد شده در حجم خالی داخل میله، فشار گاز داخلی میله سوخت افزایش می‌یابد. علی



رغم افزایش چشمگیر انتشار گاز شکافت در انتهای عمر میله، مشهود است که فشار گاز داخلی میله افزایش ناگهانی ندارد؛ عبارتی با افت توان میله در انتهای عمر کارکرد دمای ناحیه plenum نیز کاهش یافته و در نتیجه اثر افزایش مقدار گاز شکافت را خنثی می‌کند.

مراجع :

- [1] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer.2011. " FRAPCON-3.4: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup ", NUREG/CR-7022, Vol. 1 , PNNL-19418, Vol. 1 , Pacific Northwest National Laboratory , P.O. Box 999 , Richland, WA 99352.
- [2] L.o.Jernkvist and A.Massih , 2002."Evaluation of the FRAPCON-3 Computer Code , Quantum Technologies AB, Uppsala Science Park ,SE-751 83 Uppsala , Sweden.
- [3] Federal State Unitary Enterprise ,2003, "FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT ", NUREG-1754, Ministry of Russian Federation of Atomic Energy, NPP "Bushehr" Unit 1, chapter4, REACTOR, 49.BU.1 0.0.00.FSAR.RDROOI , Moscow.
- [4] L.o.Jernkvist and A.Massih , 2002 ."Analysis of the Effect of UO₂ High Burnup Microstructure on Fission Gas Release", Quantum Technologies AB , Uppsala Science Park,SE-751 83 Uppsala , Sweden .
- [5] G.M. O'Donnell, H.H. Scott, R.O. Meyer, 2001, " A NEW COMPARATIVE ANALYSIS OF LWR FUEL DESIGNS " , U.S.Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001.
- [6] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer .2011. "FRAPCON-3.4: Integral Assessment "NUREG/CR-7022, Vol. 2 , PNNL-19418, Vol. 2 , Pacific Northwest National Laboratory, P.O. Box 999 , Richland, WA 99352 .