



مقدمه‌ای بر پایش وضعیت سلامت غلاف سوخت در نیروگاه‌های اتمی

عباسی، محمد رضا* (۲۰۱)

۱- شرکت بهره‌برداری نیروگاه اتمی بوشهر
۲- گروه فیزیک دانشگاه خلیج فارس بوشهر

چکیده:

در این مقاله روش‌های پایش وضعیت غلاف سوخت به عنوان دومین سد در برابر آزاد شدن مواد پرتوزا در یک نیروگاه اتمی آب سبک مطالعه می‌گردد. با توجه به تاثیر خرابی میله‌های سوخت بر هزینه‌های بهره‌برداری و خطر پرتوگیری کارکنان نیروگاه، مطالعه وضعیت سلامت میله‌های سوخت از اهمیت بسزایی برخوردار است. اندازه‌گیری و پایش میزان اکتیویته محصولات شکافت، می‌تواند معیاری از معیوب بودن یا سالم بودن غلاف سوخت را بدست دهد. نوع مواد رادیو اکتیو و مقدار اکتیویته آن‌ها نیز برآوردی از نوع و میزان نشتی غلاف را منعکس می‌کند. همچنین مثال‌هایی عملی از تعیین نشتی و عیب‌یابی غلاف سوخت در یک نیروگاه اتمی آب سبک در حال کار آورده می‌شود.

کلمات کلیدی: غلاف سوخت، پایش، محصولات شکافت، نیروگاه اتمی آب سبک

An introduction to fuel integrity monitoring in nuclear power plant

Mohammad Reza Abbasi^{1,2}

1- Bushehr nuclear power plant operating co.
2- Department of physics, Persian Gulf University

Abstract:

In this paper, integrity monitoring methods of fuel rods as the second barrier against radioactive material release in a light water-cooled reactor is investigated. Due to effect of fuel rod defects on operating cost and personnel radiation exposure, monitoring of fuel integrity is of crucial importance. The activity monitoring of fission products to the primary circuit gives a measure of fuel integrity. The types of released material and amount of their activities also reflect the kind and size of fuel rod defects. In addition, some practical related examples for an operating nuclear power plant are also addressed.

Key words: fuel rod, monitoring, fission product, light water-cooled power plant

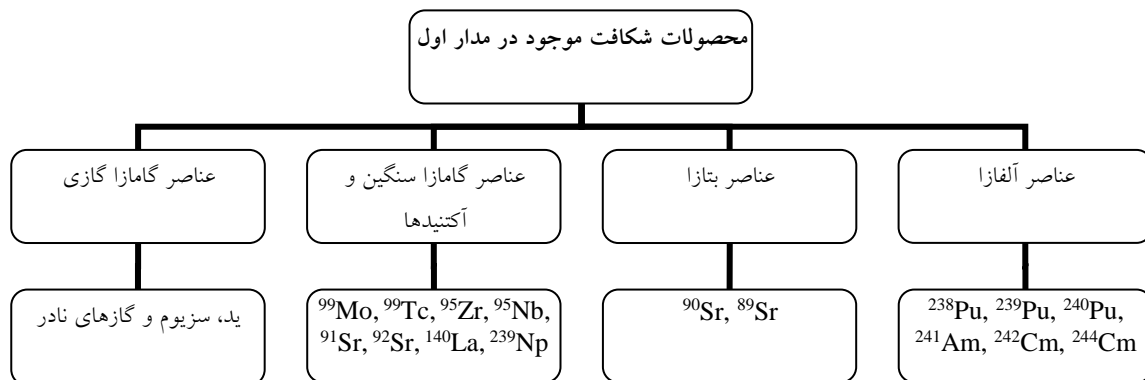
مقدمه :

غلاف سوخت^۱ به عنوان سد دوم در برابر خروج مواد رادیواکتیو شناخته می‌شود. خروج مواد رادیو اکتیو به صورت محصولات ناشی از شکافت هسته‌ای می‌تواند تاثیرات جدی و شدیدی را بر سلامت کارکنان، هزینه-

¹ Fuel rod



های بهره‌برداری، تعمیرات و محیط زیست بگذارد. غلاف سوخت به صورت مداوم از یک طرف تحت تاثیر تابش نوترونی حاصل از شکافت هسته ای قرار دارد که می‌تواند ساختار کریستالی آنرا تخریب کند و از طرف دیگر تنش‌های حرارتی و مکانیکی با سیال خنک کننده مدار اول می‌تواند باعث خمیدگی و در ادامه باعث بوجود آمدن نشتی غلاف شود. به هر حال وجود هر عیب و نقصی در غلاف سوخت می‌تواند به نشت محصولات شکافت به سیال خنک کننده مدار اول منجر شود. محصولات شکافتی که بدلیل نقص و عیب غلاف سوخت می‌تواند به مدار اول راه یابند در شکل شماره ۱ دسته بندی شده‌اند. وجود تنها عناصر گاما زای گازی مانند ید، سزیوم و گازهای نادر می‌تواند نشانه‌ای از نشتی گازی غلاف سوخت باشد. در این حالت قرص‌های سوخت^۱ در تماس مستقیم با سیال خنک کننده نبوده و فقط محصولات گازی حاصل از شکافت، که از قرص‌های سوخت خارج می‌شوند، می‌توانند از طریق ترک‌های فوق ریز ایجاد شده در غلاف سوخت به سیال راه یابند. در سایر موارد غلاف سوخت بدلیل وجود ترک/سوراخ با ابعاد قابل ملاحظه در تماس با سیال مدار اول قرار گرفته و سایر عناصر موجود در شکل شماره ۱ نیز علاوه بر محصولات گازی شکل می‌توانند در سیال مدار اول حضور داشته باشند.



شکل شماره ۱: دسته‌بندی محصولات شکافت موجود در مدار اول

به هر حال در رابطه با عیب غلاف سوخت سوالات زیر را می‌توان مطرح نمود [۱]:

- آیا غلاف دارای نشتی در قلب راکتور وجود دارد؟ اگر وجود دارد تعداد غلاف سوخت معیوب چقدر است؟
- مقدار آلودگی سیال خنک کننده مدار اول به خاطر مواد ولگرد^۲ چقدر است؟
- ابعاد و اندازه عیب ایجاد شده در غلاف سوخت چقدر است؟
- عیب غلاف سوخت در چه منطقه‌ای قرار دارد؟
- Burn-up سوختی که درون غلاف سوخت معیوب قرار دارد چقدر است؟

¹ Fuel tablet

² Tramp material



مشخص است با استفاده از اندازه گیری اکتیویته به تمامی این سوالات نمی‌توان پاسخ داد زیرا این نشتی ممکن است از چند غلاف با غناها و عیوب مختلف باشند. در این مقاله به دو سوال از سوالات فوق پاسخ می‌دهیم. اول آنکه آیا غلاف های سوخت نشتی دارند؟ و اندازه عیب ایجاد شده چقدر است؟ معمولاً در نیروگاه اندازه‌گیری اکتیویته مدار اول با به صورت دستی انجام می‌گیرد به این صورت که آب مدار اول از محل نمونه گیری گرفته شده و به محل آزمایشگاه اسپکترومتری جهت طیف‌سنجی منتقل می‌شود بنابراین اکتیویته عناصری که دارای نیمه عمر کوتاهی در مقایسه با زمان انتقال هستند تغییر کرده و بایستی اکتیویته تصحیح شود. علاوه بر آن منشأ اکتیویته مدار اول فقط نشتی غلاف سوخت نبوده بلکه این اکتیویته می‌تواند ناشی از آلودگی سطحی غلاف سوخت با ماکزیمم مقدار $10^{-9} \text{g/cm}^2 \text{ } ^{235}\text{U}$ یا وجود ناخالصی اورانیوم در آلیاژ زیرکونیم با ماکزیمم مقدار $5 \times 10^{-6} \text{ KgU/KgZr}$ باشد [۲]. در نتیجه اگر هیچگونه نشتی در سوخت هم وجود نداشته باشد غیرممکن است که اکتیویته آب مدار اول صفر شود. بنابراین در محاسبات نشتی سوخت بایستی تاثیر این موارد نیز در نظر گرفته شوند. اهمیت غلاف سوخت در نیروگاه اتمی تا آن اندازه است که تمامی سیستم‌های ایمنی و حفاظتی که در نیروگاه طراحی و بهره‌برداری می‌شود به صورت مستقیم یا غیر مستقیم مسئولیت حفاظت از آن را بر عهده دارند. در این مقاله دو روش پایش و ارزیابی سلامت غلاف سوخت معرفی و ارائه می‌گردد.

روش اول :

همانطور که پیشتر توضیح داده شد منشأ آلودگی رادیو اکتیو در مدار اول می‌تواند هم از نشتی محصولات شکافت (به صورت گازی یا جامد) و همچنین بدلیل آلودگی‌های سطحی باشد. تفاوتی که این دو دسته با هم دارند اینست که زمان پخش‌شدگی^۱ (نفوذ پذیری) مواد رادیواکتیو به سیال خنک کننده مدار اول معمولاً با نیمه عمر بعضی از ایزوتوپ‌ها برابر است در صورتیکه محصولات شکافت ناشی از آلودگی‌های سطحی به صورت آبی در مدار اول وارد می‌شوند. بنابراین تفاوت اکتیویته محصولات با نیمه عمر بالا با اکتیویته مواد رادیواکتیو با نیمه عمر کم معیاری از نشتی غلاف سوخت را بدست می‌دهد. این ایده به صورت گسترده‌ای امروزه در نیروگاه‌های اتمی دنیا تحت عنوان شاخص قابلیت اطمینان^۲ سوخت به کار گرفته می‌شود. در این روش که فقط تعیین کننده سالم بودن سوخت است و اطلاعاتی را راجع به نوع، مکان و اندازه عیب غلاف سوخت بدست نمی‌دهد، بر اساس تفاوت اکتیویته ایزوتوپ ید ۱۳۱ و ید ۱۳۴ استوار است. با توجه به نیمه عمر ۸ روزه ید ۱۳۱ و نیمه عمر ۵۲ دقیقه‌ای ید ۱۳۴ این دو ایزوتوپ کاندیدای مناسبی جهت ارزیابی نشتی غلاف سوخت هستند.

¹ Diffusion Time

² Fuel reliability indicator



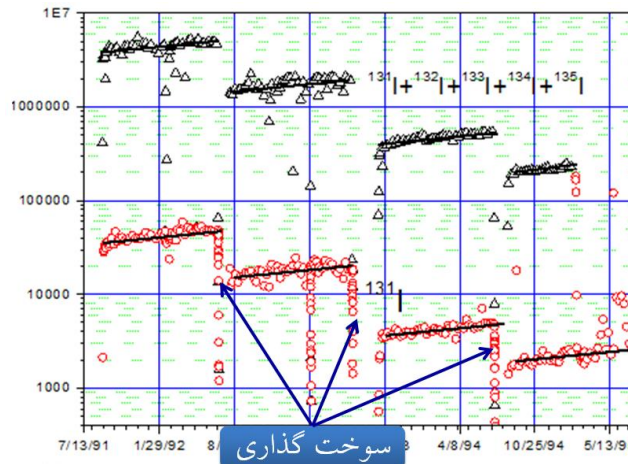
علاوه بر واپاشی طبیعی ایزوتوپ‌های ید در نیروگاه اتمی، بایستی تاثیر سیستم تصفیه کننده سیال خنک کننده مدار اول را نیز در اکتیویته موثر این ایزوتوپ‌ها در نظر گرفت. وجود و عملکرد این سیستم باعث زدودن آنیونها و کاتیونها و از جمله یدهای رادیو اکتیو از سیال خنک کننده مدار اول می شود. هر چه کارایی فیلترهای این سیستم مطلوبتر باشد اکتیویته سیال خنک کننده مدار اول نیز کم خواهد شد. بنابراین برای اینکه اکتیویته ید نشان دهنده عیب در میله‌های سوخت باشد بایستی از اکتیویته موثر استفاده کرد. اکتیویته موثر از رابطه زیر بدست می آید

$$A_N^i = A_m^i \frac{\lambda^i + \eta^i}{\lambda^i + \bar{\eta}^i} e^{\lambda^i t_{tr}} \quad (1)$$

که در رابطه فوق A_m^i اکتیویته ید اندازه گیری شده، λ ثابت واپاشی ید، η^i نرخ تمیزکاری سیال خنک کننده مدار اول توسط سیستم تصفیه، $\bar{\eta}^i$ ثابت نرمالیزاسیون نرخ تمیزکاری سیال خنک کننده مدار اول، A_N^i اکتیویته موثر ایزوتوپ i -ام ید و t_{tr} زمان انتقال نمونه سیال مدار اول از محل به آزمایشگاه اسپکترومتری است. شاخص قابلیت اطمینان سوخت با استفاده از اکتیویته موثر ید ۱۳۴ و ۱۳۱ مطابق فرمول شماره (۲) محاسبه می شود [۳]:

$$FRI = \left[A_N^{131} - k A_N^{134} \right] \times \left[\left(\frac{H_L^N}{H_L} \right) \times \left(\frac{100}{P} \right) \right]^2 \quad (2)$$

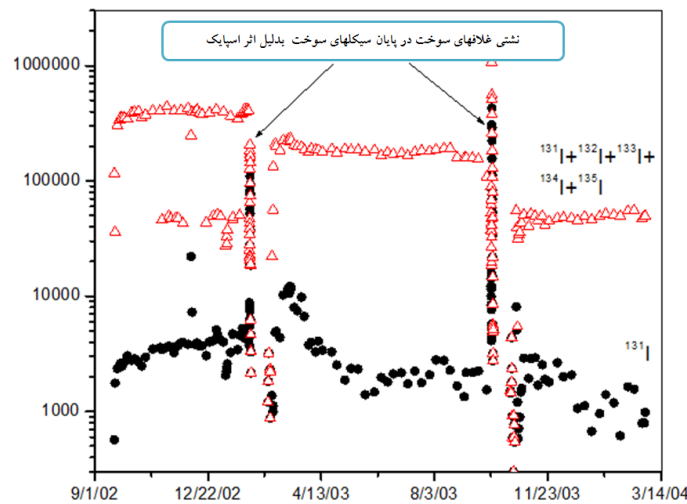
که k ضریب تصحیحی برابر با ۰,۰۳۱۸ برای راکتورهای VVER-1000 است. همچنین H_L چگالی خطی تولید گرما توسط میله های سوخت بر حسب کیلو وات بر متر H_L^N ثابت نرمالیزاسیون آن، و P متوسط توان نیروگاه به توان نامی به صورت درصد می باشد. یک از دلایل افزایش این شاخص می تواند عدم بهره برداری یکنواخت از راکتور و در نتیجه ایجاد تنش های حرارتی و مکانیکی در میله های سوخت باشد. تعداد میله های سوخت با ترک های میکرونی و ریز نبایستی بیشتر از ۰/۲ درصد تعداد کل میله های سوخت بیشتر شود. همچنین تعداد میله های سوخت که برای آنها سوخت در تماس مستقیم با سیال خنک کننده قرار دارد از ۰/۰۲ درصد تعداد کل میله های سوخت نبایستی فراتر رود [۴]. این تعداد میله سوخت معیوب اکتیویته ای معادل با 3.7×10^3 بکرل بر گرم در سیال خنک کننده مدار اول ایجاد می کنند.



شکل شماره ۲: اکتیویته ایزوتوپ‌های ید در سیکل‌های متوالی سوخت‌گذاری

در شکل شماره ۲ وضعیت اکتیویته ایزوتوپ‌های ید طی سه دوره تعویض سوخت نشان داده شده است. افزایش یکنواخت اکتیویته ید در مدار اول در این شکل نشان دهنده جمع شدن و افزایش مقدار پولوتونیم در سطح غلاف سوخت است و با توجه به اینکه افزایش ناگهانی و پایدار اکتیویته ید مشاهده نشده است می‌توان نتیجه گرفت که هیچ آلودگی از داخل غلاف سوخت به بیرون نشت نکرده است.

در تناقض با شکل ۲، در شکل شماره ۳ اکتیویته ایزوتوپ‌های ید و ایزوتوپ ید ۱۳۱ در راکتوری که غلاف سوخت آن معیوب است آورده شده است. در انتهای کمپانی سوخت که راکتور خاموش شده است کاهش قدرتی بیشتر از ۲۰٪ رخ داده و نقش غلاف‌های سوخت معیوب در هنگام اثر اسپایک^۱ (افزایش ناگهانی ۵ برابری یا بیشتر اکتیویته ید ۱۳۱) کاملاً مشخص است.



شکل شماره ۳: اکتیویته ایزوتوپ‌های ید در سیکل‌های متوالی سوخت‌گذاری (وجود اثر اسپایک)

¹ Spike effect



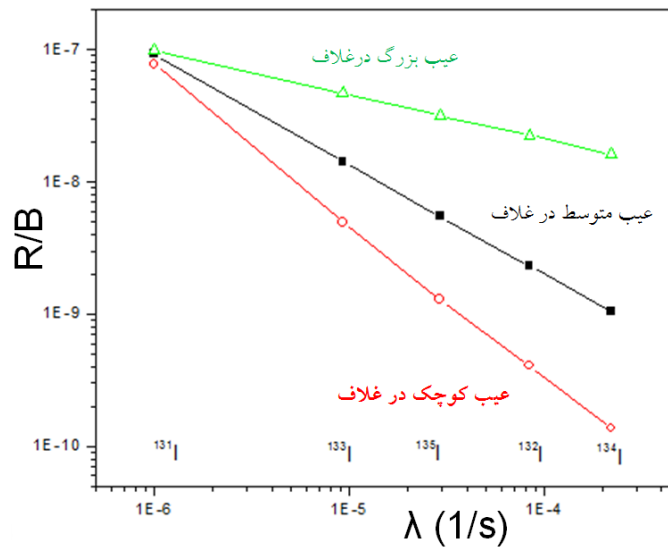
روش دوم :

یکی دیگر از پارامترهایی که می‌توان برای تعیین سلامت غلاف سوخت به کار برده می‌شود، نسبت ره‌اشدن به تولد^۱ است. این شاخص که بزرگی و ابعاد عیب ایجاد شده در سوخت را مشخص می‌کند از فرمول ۳ بدست می‌آید [۵]:

$$\left(\frac{R}{B}\right)_i = \left(\frac{\lambda^i + \eta^i}{\lambda^i}\right) \times \frac{A_i V}{FY} e^{\lambda t_{tr}} \quad (3)$$

که A_i اکتیویته اندازه گیری شده ایزوتوپ بر حسب بکرل بر لیتر، V حجم مدار اول بر حسب لیتر، F نرخ شکافت در قلب بر حسب شکافت بر ثانیه و Y بهره تولید ایزوتوپ بر حسب اتم بر شکافت است. به عنوان مثالی برای نسبت شاخص رها شدن به تولد اگر این نسبت برابر با $0,0001$ باشد این بدان مفهوم است که از هر 10000 واکنش شکافت یک اتم به سیال خنک کننده راه یافته است. برای ایزوتوپ‌های مختلف مقادیر رها شدن به تولد بر حسب ثابت واپاشی ترسیم می‌گردد. ایزوتوپ‌هایی با نیمه عمر کمتر در صورتیکه اندازه عیب غلاف سوخت کوچک باشد با احتمال کمتری در سیال خنک کننده مدار اول حضور دارند در حالیکه اگر عیب غلاف سوخت بزرگ باشد ایزوتوپ‌هایی با نیمه عمر کم نیز به محض تولید می‌توانند در سیال خنک کننده حاضر باشند و اکتیویته آنها در سیال قابل ملاحظه خواهد بود. در شکل ۴ نمودار نسبت رها سازی به تولد برای ایزوتوپ‌های مختلف و اندازه‌های مختلف عیوب غلاف سوخت ترسیم شده است. اگر نمودار R/B بر حسب ثابت واپاشی برای ایزوتوپ‌ها به صورت یک خط با شیب تند شود می‌توان نتیجه گرفت که اندازه عیب موجود در غلاف سوخت به صورت میکرونی یا ریز است. خطوط تقریباً افقی نشان-دهنده رها سازی قابل ملاحظه محصولات شکافت به سیال خنک کننده مدار اول و به معنای اندازه بزرگ عیب موجود در غلاف سوخت است.

¹ Release to birth ratio



شکل شماره ۴: نسبت رها شدن به تولد برای ایزوتوپ‌های ید

بحث و نتیجه گیری :

دو روش پایش سلامت سوخت در راکتورهای آب سبک معرفی گردید. در روش اول با معرفی شاخص قابلیت اطمینان سوخت نشان داده شد که مقدار کوچک این شاخص نشان دهنده عدم وجود عیب پایدار در غلاف سوخت و افزایش ناگهانی این شاخص نشان دهنده بروز عیب در سوخت است. روش دوم با استفاده از کمیت نسبت تولد به رها سازی ایزوتوپ‌ها، معیاری جهت برآورد اندازه عیب معرفی گردید. شیب تند خط R/B بر اساس ثابت واپاشی ایزوتوپ‌های ید نشانه‌ای از سلامت سوخت و شیب کم نشاندهنده ابعاد بزرگ عیب بوجود آمده در غلاف سوخت است. برای داشتن اطلاعات بیشتر در مورد Burn-up غلاف معیوب، روش‌های تکمیلی دیگری بایستی به کار گرفته شود.

مراجع :

- [۱] Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors, IAEA Technical Reports, No. NF-T-2.1, IAEA (2010)
- [۲] P.Slavyagin, L.Lusanova, V.Miglo, Proceedings of Int. Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, Park City, Utah, April 2000
- [۳] Performance indicators reference manual. WANO Moscow Centre. 2014
- [۴] Final Safety Assessment Report (FSAR) of Bushehr NPP.
- [۵] G. Klevinskas et al, Lithuanian journal of physics, 47 (2007) 211-219