



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

ارزیابی میله های سوخت معیوب با استفاده از مدل های مبتنی بر اندازه گیری اکتیویته خنک کننده مدار اول

علی مقیم زاده محبی

شرکت تولید و توسعه انرژی اتمی ایران ، مدیریت سوخت

چکیده :

به منظور انجام ارزیابی دقیق از شرایط میله سوخت معیوب و میزان رهاسازی رادیو نوکلیدها از این سوخت سازوکارها و پدیده هایی که روی رفتار آزادسازی محصولات شکافت تاثیر می گذارند در طی شرایط پایدار و گذرای راکتور با جزئیات شرح داده شده است. رویکرد مکانیکی که با استفاده از مدل های فیزیکی رفتار ترمومکانیکی میله های سوخت معیوب ، رهاسازی محصولات شکافت از سوخت ، انتقال محصولات شکافت داخل سوخت ، تبادل جرم بین سوخت و خنک کننده و اکتیویته خنک کننده را شبیه سازی می کند توضیح داده شده و در ادامه نیز یک روش عملی برای کاربرد در نیروگاه اتمی بوشهر بر اساس ارزیابی اندازه گیری های اکتیویته و داده های نیروگاه که شامل دو مرحله محاسبات حالت پایدار و محاسبات حالت گذرا می باشد توسعه داده شده است .

کلید واژه

سوخت معیوب ، آزادسازی اکتیویته ، محصولات شکافت ، پدیده اسپایک ، خنک کننده مدار اول

مقدمه

به منظور برآورده کردن الزامات ایمنی در طی بهره برداری از نیروگاه اتمی ، پایش سدهای حفاظتی که وظیفه جلوگیری از پخش مواد رادیواکتیو را دارند از اهمیت بالایی برخوردار است. غلاف سوخت یکی از این سدها می باشد. خرابی این سد باعث نشت مواد رادیواکتیو و منجر به افزایش پرتوگیری کارکنان نیروگاه و رها شدن محصولات شکافت رادیواکتیو به محیط زیست می شود. از اینرو عملکرد سوخت باید بطور مداوم پایش شود. روشهای جدید تشخیص سوخت معیوب براساس اندازه گیری و تجزیه تحلیل اکتیویته ویژه رادیونوکلیدهای مرجع در خنک کننده مدار اول می باشد. اکتیویته های اندازه گیری شده فقط نشانگر ویژگی کلی و غیر مستقیم از یکپارچگی سوخت می باشند. اگر قلب راکتور شامل سوخت های دارای نشتی باشد مراحل گذرای راکتور منجر به افزایش ناگهانی اکتیویته در خنک کننده می شود که این پدیده به عنوان پدیده اسپایک شناخته می شود. مدل های کمی وجود دارند که قادرند زمان و دامنه این افزایش اکتیویته خنک کننده مدار اول را پیش بینی کنند [1].



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

اندازه گیری های معمول ایزوتوپهای مختلف رادیواکتیو اطلاعات مشروحی در مورد پرتو زایی عناصر مهم از جمله ید فراهم می کند. وجود میله های سوخت دارای نشتی منجر به افزایش اکتیویته ایزوتوپهای ید در خنک کننده در طی خاموشی راکتور یا مراحل گذار قدرت در مقایسه با حالت نرمال پایدار بهره برداری می شود. تغییر قدرت منجر به خنک شدن سوخت و در نتیجه خارج شدن قرص های دی اکسید اورانیم از حالت یکپارچه شده که این امر رها شدن محصولات شکافت را از بین نواحی بین گرانول ها تسهیل می کند. کاهش فشار سیستم مدار اول یک نیروی محرکه برای انتقال ایزوتوپها از سوخت به داخل خنک کننده ایجاد می کند. اگر از طریق خرابی های ایجاد شده بخار وارد سوخت شود، تبخیر آن رها سازی را توسعه می دهد. تزریق اسید بوریک نیز بعد از خاموشی راکتور باعث افزایش اکتیویته مدار اول می شود. علت این امر حل شدن محصولات شکافت که روی سطوح اجزای قلب رسوب کرده اند می باشد. شبیه سازی یقینی مکانیزی که منجر به افزایش ید می شود دارای عدم قطعیت می باشد، که این امر کاربرد عملی آن را در نیروگاه مشکل می سازد. به همین دلیل محاسبه این پدیده معمولاً بر اساس ارزیابی اندازه گیری های اکتیویته و داده های نیروگاه می باشد [2].

مدل سازی مکانیکی سوخت های معیوب :

مقادیر تعیین شده توسط معادلات ارائه شده در بعضی موارد با داده های تجربی تفاوت دارند. این تفاوت معمولاً به خاطر تفاوت بین پارامترهای هندسی، شرایط دمایی، برن آپ میله های سوخت و پارامترها و شرایطی که تحت آنها این معادلات بدست آمده اند می باشد [3,4].

به منظور انجام ارزیابی دقیق تر از شرایط میله سوخت معیوب و میزان رها سازی رادیو نوکلیدها از این سوخت از روش مکانیکی وبا استفاده از مدل های فیزیکی استفاده می شود. تجربیات مثبتی در خصوص جایگزین کردن این شیوه بجای استفاده از معادلات کسب شده است. در رویکرد مکانیکی، رفتار ترمومکانیکی میله های سوخت معیوب، رها سازی محصولات شکافت از سوخت، انتقال محصولات شکافت داخل سوخت، تبادل جرم بین سوخت و خنک کننده و اکتیویته خنک کننده توضیح داده می شود. در این مدل های فیزیکی هندسه میله سوخت، هندسه عیب بروز کرده در آن و تغییرات خواص فیزیکی سوخت که در اثر اکسیداسیون آن بروز می کند در نظر گرفته می شوند. در این مدل ها فرآیندهای اصلی که اکتیویته خنک کننده را تعیین می کنند عبارتند از: آزاد شدن رادیونوکلیدها از سوخت، انتقال رادیونوکلیدها داخل میله سوخت و آزاد شدن محصولات رادیواکتیو شکافت از میله سوخت به داخل خنک کننده مدار اول.

هر کدام از این فرآیندها توسط تعدادی پدیده نسبی فیزیکی کنترل می شوند. مدل های فیزیکی تغییرات ریز ساختارهای سوخت و رفتار محصولات شکافت گازی را توجیه می نمایند. از جمله پدیده های فیزیکی که در این مدل ها در نظر گرفته می شوند عبارتند از:

۱- انتقال جرم در میله سوخت و تبادل جرم با خنک کننده مدار اول :



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

در بعضی از این مدل ها انتقال اجزاء گازی (رادایونوکلیدها) داخل میله سوخت بر اساس اصل پخش بیان شده اما برای تبادل جرم بین سوخت و خنک کننده از طریق عیوب ایجاد شده در سوخت، فاکتور مؤثر تبادل جرم که بر اساس داده های تجربی محاسبه می شود استفاده شده است. این فاکتور در گستره وسیعی از 10^{-3} - 10^{-7} [Sec⁻¹] تغییر می کند [5]. ورود بخار آب به سوخت در طی افزایش فشار خنک کننده نسبت به فشار داخل میله سوخت، نیز با در نظر گرفتن موارد زیر مدل می شود: اندازه هندسی خرابی سوخت، تفاضل فشار و نرخ تغییرات آن، فاصله خالی بین سوخت و غلاف در شرایط کاری، فشار زیر غلاف، حجم های آزاد در میله سوخت، توزیع دمایی

۲- اکسیداسیون سوخت:

یکی از مکانیزم های غالب در تولید هیدروژن (در کنار اکسیداسیون غلاف) اکسیداسیون UO_2 می باشد. اهمیت مدل کردن این فرآیند مربوط به موارد زیر است [6]:

- ✓ به علت تولید غیر یکنواخت هیدروژن و همچنین غیریکنواخت بودن توزیع هیدروژن به خاطر انتقال جرم در سوخت، توزیع هیدروژن داخل میله سوخت غیریکنواخت می باشد. در محل هایی از داخل میله سوخت که نسبت هیدروژن به بخار بیشینه می باشد شرایط توسعه خرابی ثانویه در غلاف سوخت مهیا می باشد.
 - ✓ در اثر اکسیداسیون سوخت فاصله بین سوخت و غلاف تغییر کرده که این امر منجر به تغییر نرخ انتقال جرم بین میله سوخت و خنک کننده می شود.
 - ✓ تغییر خواص شیمیایی سوخت اساساً روی ضرایب پخش پاره های شکافت تاثیر می گذارد. (معمولاً) ضرایب پخش افزایش پیدا می کنند) از اینرو آزاد شدن عناصر رادیواکتیو از سوخت به داخل غلاف می تواند در اثر اکسیداسیون افزایش پیدا کند.
 - ✓ تغییر خواص شیمیایی سوخت منجر به تغییر ضریب هدایت حرارتی سوخت می شود. با افزایش اکسیژن در سوخت، ضریب هدایت حرارتی بطور قابل ملاحظه ای کاهش یافته و باعث افزایش دمای سوخت می شود.
- ۳- آزاد شدن محصولات شکافت از سوخت:

مکانیزم غالب آزاد شدن محصولات شکافت و گازهای رادیواکتیو از سوخت، پخش می باشد. در دمای پایین ضریب پخش به دما وابسته نیست. در واقع پخش ناشی از جذب گرما برای ایزوتوپ های طولانی عمر مشابه فرآیند ضربه تشعشعی می باشد. برای ایزوتوپ های کوتاه عمر طول پخش عبارتست از: $\delta = (D/\lambda)^{1/2}$ که D : ضریب پخش و λ : ثابت واپاشی می باشد. برای سوخت های با حفره وسط مثل سوخت های روسی، مکانیزم مهم آزادسازی محصولات شکافت مخصوصاً در شرایط کاهش فشار و نیز ورود مقدار زیادی آب به داخل میله سوخت فرآیند پس زنی می باشد. در روش مکانیکی همه این مکانیزم ها مدل می شود.



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

سیستم های پیشرفته علمی در چندین نیروگاه اتمی برای ارزیابی اندازه گیری های اکتیویته در زمان کار نرمال و همچنین برای برآورد تعداد عناصر سوخت دارای نشتی ، اندازه خرابی و مقدار اورانیم وارد شده به آب مدار اول استفاده می شود. برآورد پیک جهش ید در طی مراحل گذرای راکتور بر اساس همبندی این پدیده با پارامترهای بهره برداری مثل قدرت راکتور و فشار مدار اول می باشد. در زیر یک روش عملی برای کاربرد در نیروگاه اتمی توسعه داده شده و شامل دو مرحله محاسبات حالت پایدار و محاسبات حالت گذرای زیر است [7]:

۱) محاسبات حالت پایدار :

با استفاده از نسبت رهاسازی به تولید R/B مربوط به حداقل سه ایزوتوپ ید ، پارامترهای معادله پخش و تعداد عناصر دارای نشتی برای حالت بهره برداری نرمال تعیین شده اند. روش محاسبه بهینه ساده برای برازش پارامترهای مدل انتخاب شده استفاده می شود.

مدل حالت پایدار :

اولین قدم در محاسبه ، تعیین نسبت رهاسازی به تولید R/B برای واحد حجم آب مدار اول بر اساس اکتیویته اندازه گیری شده می باشد .

$$\left(\frac{R}{B}\right)_{\text{measured}} = \left(\frac{\lambda + \beta}{\lambda}\right) \frac{C_m V_L}{FY} \exp(\lambda T_r) \quad (1)$$

R: نرخ آزاد شدن (atom/sec) ، B: نرخ تولید (atom/sec)

F: بهره شکافت برای ایزوتوپ داده شده (atom/fission) ، Y: نرخ شکافت (fission/sec)

λ : ثابت واپاشی (1/sec) ، β : ثابت نرخ تصفیه (1/sec)

V_L : حجم مدار اول (lit) ، T_r : زمان انتقال بین قلب و محل نمونه گیری (sec)

C_m : غلظت اکتیویته ایزوتوپ داده شده در زمان نمونه گیری (Bq/lit)

تعداد شکافت ها با در نظر گرفتن مقدار U-235 و PU-239 در سوخت محاسبه شده است. بر اساس محاسبات انجام شده با کد ORIGEN و با توجه به مشخصات نیروگاه های WWER مقدار متوسط U-235 بین ۱۴ gr/kg تا ۲۱/۵ و مقدار PU-239 بین ۳/۵ gr/kg تا ۵/۵ برای قلب در حالت تعادل و برای طول سیکل ۳۰۰ روز متغیر می باشد.

دومین معادله مدل استفاده شده مقدار R/B را با فرض اینکه اکتیویته آب مدار اول ناشی از دو منبع :

الف: آزاد شدن از عناصر سوخت دارای نشتی ب: اورانیم سرگردان

می باشد تعیین می کند:

$$\frac{R}{B} = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + \lambda}\right) \frac{A}{\sqrt{\lambda}} H + c \quad (2)$$

$$A = 3x\sqrt{D}$$

نرخ فرار از سوخت به فضای بین غلاف و سوخت (1/sec): ϵ



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

D: ضریب پخش داخل قرص سوخت

χ : فاکتور پخش مادر هسته H, تعداد میله های سوخت دارای نشتی

$C = F_1/2F$, F_1 : تعداد شکافت در اورانیم سرگردان, F : تعداد شکافت دارای نشتی

جدول ۱ مشخصات اتمی ایزوتوپهای ید و گازهای نادر

ایزوتوپ	ثابت واپاشی $\lambda, 1/s$	بهره تولید در فرآیند شکافت $Y, \%$	
		U-235	PU-239
I-131	9.98e-7	2.88	3.85
I-132	8.37e-5	4.30	5.39
I-133	9.26e-6	6.70	6.93
I-134	2.20e-4	7.71	7.27
I-135	2.91e-5	6.30	6.45
Kr-85m	4.30e-5	1.3	0.566
Kr-87	1.52e-4	2.52	0.987
Kr-88	6.78e-5	3.55	1.32
Xe-133	1.53e-6	6.70	6.98
Xe-133m	3.66e-6	0.190	0.233
Xe-135	2.12e-5	6.54	7.60
Xe-138	8.18e-4	6.42	5.12
Xe-135m	7.40e-4	1.16	1.69

معادله (2) شامل سه متغیر نا معلوم ϵ , A , C است

اگر اطلاعات حداقل سه ایزوتوپ از همان عنصر در دسترس باشد، با دانستن مقادیر نسبت R/B از معادله (1) می توان متغیرهای نامعلوم را تعیین کرد. میتوان فرض کرد که آزادسازی ایزوتوپهای مختلف یک عنصر تحت یک مکانیزم مشترک و با پارامترهای مشترک مشخص می شود (جدول ۱). محاسبات مربوط به ید و گازهای نادر بصورت جداگانه انجام می شود. سیستم معادلات بر اساس معادله (2) برای چندین ایزوتوپ ایجاد می شود که با توجه به اینکه این سیستم غیر خطی می باشد از روشهای برازش استاندارد نمی توان استفاده کرد. به منظور تعیین سه متغیر نامعلوم، محاسبات سه بعدی اپتیمم استفاده می شود. تابع بهینه براساس حداقل اختلاف بین مقادیر R/B محاسبه شده (2) و مقادیر اندازه گیری شده آن (1) می باشد. تعداد میله های معیوب را میتوان توسط عبارت زیر برآورد نمود:

$$x = \frac{A}{3\sqrt{D}}$$

ضریب پخش برای شرایط قدرت نامی و بر اساس مقادیر تجربی برای ید و گازهای نادر محاسبه می شود. اندازه خرابی سوخت با استفاده از ثابت نرخ فرار ϵ برآورد می شود. اگر با استفاده از معادله (2) ثابت C مشخص گردد مقدار اورانیم سرگردان را می توان محاسبه نمود. پارامترهای تعیین شده امکان ارزیابی تعداد میله های سوخت دارای



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

نشستی و همچنین مقدار اورانیم سرگردان و اندازه خرابی را برای ما فراهم می نماید. محاسبات برای هم اطلاعات مربوط به ید و هم گازهای نادر انجام می شود.

(۲) محاسبات حالت گذرا:

فرآیند افزایش اکتیویته محصولات شکافت بویژه ایزوتوپ I-131 در خنک کننده مدار اول در هنگام خاموش کردن راکتور یا تغییر قدرت راکتور که به عنوان پدیده اسپایک شناخته می شود شاهد خوبی برای وجود میله های سوخت دارای نشستی در مواقعی که منبع رها شدن محصولات شکافت را نتوان توسط روشهای دیگر تعیین کرد می باشد. در بخش زیر تاریخچه جهش ید با در نظر گرفتن اثرات نرخ تغییر قدرت، نرخ افزایش اسید بوریک و نرخ کاهش فشار مدل شده است. ضرایب مختلف برای هر یک از عوامل تاثیر گذار تعیین شده و برای سطح اکتیویته قبل از حالت گذرا تصحیح می گردد.

مدل اسپایک

غلظت اکتیویته ایزوتوپ I-131 با استفاده از معادله (3) که از معادلات (1) و (2) بدست آمده محاسبه شده است.

$$C_m^{calculated} = \frac{FY}{V_L(\lambda + \beta)exp(\lambda T_r)} \left(\frac{3SH\epsilon x \sqrt{SD}\sqrt{\lambda}}{\lambda + S\epsilon} + c\lambda \right) \quad (3)$$

فرض بر این است که فرار محصولات شکافت از سوخت و پخش آنها در قرص سوخت در طی پدیده اسپایک که به خاطر تغییر شرایط بهره برداری بروز می کند، شتابان می شود. اثر قدرت (Q)، فشار (P) و غلظت اسید بوریک (C_{bor}) در عبارت زیر برای محاسبه فاکتور اسپایک S_s در نظر گرفته شده اند:

$$S_s = \left(1 + a_1 \frac{\Delta Q}{Q_{max}} + a_2 \left(\frac{\Delta P}{P_{max}} \right)^n + a_3 \frac{\Delta C_{bor}}{C_{bor}^{max}} \right) e^{\frac{-T}{a_4}} \quad (4)$$

ضرایب a₁, a₂, a₃, a₄ و نمای n براساس پایگاه داده که در طی خاموشی راکتور با سوخت دارای نشستی ثبت می شوند، تعیین می شود. کاهش قدرت (خاموشی اضطراری)، افزایش غلظت اسید بوریک و کاهش فشار یکی پس از دیگری اتفاق می افتند و از این رو اثر آنها روی افزایش اکتیویته باید بصورت مجزا بررسی شود. قوی ترین عامل در افزایش اکتیویته I-131 بعد از کاهش فشار مشاهده شده است. مدل اسپایک از متغیرهای ε، χ و c که باید قبل از رویداد اسپایک و برای حالت پایدار تعیین شوند، استفاده می کند. معادله (3) غلظت حالت تعادلی را به روش "شبه مانا" محاسبه می کند به این دلیل کاربرد آن محدود به حالت های گذرای کند می باشد. پله زمانی نوعی محاسبات برابر ۶۰ دقیقه می باشد.

محاسبات اسپایک نیروگاه



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مدل اسپایک باید با استفاده از اندازه گیری های انجام شده در نیروگاه توسعه و اعتبار سنجی شود. برای اینکه تعداد کافی نقاط تجربی برای مدل کردن داشته باشیم باید تعداد اندازه گیری اکتیویته به کرات انجام شود. از جمله داده های مورد نیاز محاسبات عبارتند از: فشار مدار اول ، غلظت اسید بوریک ، قدرت قلب ، دمای ورودی به قلب ، غلظت های اکتیویته. افزایش غلظت اکتیویته ید بعد از خاموشی راکتور ، افزایش غلظت اسید بوریک و کاهش فشار مشاهده می شود [8]. مجموعه داده های زمان خاموشی تنها شامل اکتیویته ید نمی باشند بلکه اکتیویته سایر عناصر را هم در بر می گیرد. به خاطر اثرات بیولوژیکی ، ایزوتوپهای Cs-134 و Cs-137 مهم می باشند. همراه با اسپایک ید افزایش اکتیویته ایزوتوپ سزیم نیز مشاهده می شود. هرچند که در بیشتر موارد دامنه و نرخ افزایش سزیم با ید متفاوت می باشد.

نتیجه گیری

پدیده های فیزیکی که در شبیه سازی میله های دارای نشتی باید در محاسبه ضرایب مربوط به بهره برداری سوخت در نظر گرفته شوند ذکر گردیده و یک مدل عددی برای شبیه سازی رویداد اسپایک ید توسعه داده شد که باید با استفاده از داده های نیروگاه اتمی بوشهر برای چندین مورد حالت گذرای خاموشی اعتبارسنجی شود. الگوریتم پیشنهاد شده قادر به پیش بینی زمان و دامنه اسپایک I-131 بر اساس داده های اکتیویته قبل از خاموشی و تاریخچه پارامترهای اصلی در طی مراحل گذرا می باشد و می تواند برای پیش بینی پیک های اسپایک ید در طی زمان تعویض و همچنین برآورد تعداد میله های سوخت دارای نشتی و اتخاذ تصمیم در خصوص ادامه بهره برداری از این سوختها یا تعویض آنها استفاده شود.

مراجع

- 1- Chubb W, Piplica E J, Lutz R J: The Iodine Spiking Phenomenon in Pressurized Water Reactor Coolants, Trans. Am. Nucl. Soc. vol. 26(1977), pp 517-518
- 2- Eickelpash N, Seepolt R: Iodine Release Mechanism and Its Verification in Plant Operation, Trans. Am. Nucl. Soc. vol. 28(1978), pp 652-653
- 3- B. Dobrov, V. Kanukova, O. Khoruzhii, V. Likhanskii, S. Kourchatov, B. Sakharov. The Development of a Mechanistic Code on Fission Product Behaviour in the Polycrystalline UO₂ Fuel. Nuclear Engineering and Design, 195(3), 361-371, 2000.
- 4- V. Kanukova, O. Khoruzhii, V. Likhanskii, L. Matweev. Mechanistic Modelling of Gaseous Product Behaviour in UO₂ Fuel by RTOP Code. Proc., International Seminar on Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels, Cadarache, France, 26-29 September, 2000
- 5- B. Lewis, C. Hunt, F. Iglesias. Source Term of Iodine and Noble Gas Fission Products in the Fuel-to-Sheath Gap of Intact Operating Nuclear Fuel Elements. J. Nucl. Mater., 172, 197-205, 1990.



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- 6- Y. Kim. Fission Gas Release From UO_{2+x} in Defective Light Water Reactor Fuel Rods. Proc., Int. Top. Meeting LWR Fuel Performance, Park City, Utah, USA, 10-13 April, 2000.
- 7- B. J. Lewis, R.J. Green, C.W.T. Che : A Prototype Expert System for the Monitoring of Defected Nuclear Fuel Elements in Canada Deuterium Uranium Reactors, Nuclear Technology, vol. 98, pp. 307-321, (1992)
- 8- Cho J C: An Improved Model to Simulate Pressurized Water Reactor Iodine Spiking Behaviour Under Power Transient Conditions, Proc. 4th Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety, April 1994, Taipei.