

پارامترهای شیمی آب خنک‌کننده مدار اول راکتورهای هسته‌ای و بررسی آنها از منظر حفاظت پرتوی و ایمنی هسته‌ای

اسماعیل رحیمی*^۱، سید محمد میروکیلی^۲، محسن خردمند سعدی^۱، محمد ستوده^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای-راکتور

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

این تحقیق به معرفی و بررسی پارامترهای شیمی آب مدار اول و دلایل و روشهای کنترل و حدود استاندارد تعریف شده می‌پردازد. متغیرهای شیمیایی کیفیت آب مدار اول را متاثر، در پی آن جنبه‌ی ایمنی هسته‌ای پیدا می‌کند، و جدای از خوردگی، اثرات متقابل تشعشعات قلب با آب و همچنین برخورد نوترون با مواد ساختاری راکتور و اجزاء جانبی که با آب در تماس هستند، را بدنبال دارد. نتایج پایش و بررسی مستمر آب مدار اول راکتور و کنترل پارامترهای شیمی آب به بهبود عملیات بهره‌برداری راکتور و افزایش ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتوی و قابلیت اتکا به آن و افزایش طول عمر مواد ساختاری راکتور را محقق خواهد ساخت.

کلید واژه‌ها: پارامترهای شیمی آب، حفاظت پرتوی، ایمنی هسته‌ای، راکتورهای هسته‌ای

مقدمه

آب بعنوان خنک کننده مدار اول در برخی راکتورهای هسته‌ای قدرت و راکتورهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [1,2]. زمانی که آب در دمای بالا با مواد ساختاری در تماس است امکان خوردگی برای سیستم‌ها و اجزای ساختاری قلب و غلاف سوخت وجود دارد که ناشی از عدم کنترل شیمی آب و دمای بالا است [2,3]. خوردگی باعث جداسازی مواد ساختاری شده و آنها در حین جابجایی و انتقال از میان قلب و اطراف آن، توسط نوترون‌ها، اکتیو شده و باعث افزایش تشعشع آب مدار اول می‌گردند [4]؛ از سوی دیگر، بدلیل ساختار مولکولی آب، همواره واکنش‌های تابش با آن، رادیونوکلیدهای دیگری را بوجود می‌آورد. بدیهی است این موارد می‌تواند ایمنی سیستم‌ها و تجهیزات هسته‌ای و کارکنان را تحت تاثیر قرار دهد. برنامه‌ی نگهداری کیفیت آب می‌بایست به گونه‌ای باشد که کمترین تاثیر بر سیستم‌هایی که داریم با آب تماس دارند را داشته باشد؛ بنابراین کنترل شیمی آب اثرات زیان آور ناخالصی‌های

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

Esmail.rahimi.171@gmail.com

شیمیایی و خوردگی ساختارها، سیستم‌ها و اجزاء راکتور را به حداقل می‌رساند و به کاهش تولیدات مواد رادیواکتیو و به کم کردن پرتوگیری شغلی کمک می‌کند و همچنین انتشار مواد رادیواکتیو و شیمیایی به محیط زیست را محدود می‌نماید [2]: کارگردانی راکتور، ما را ملزم به رعایت استانداردهای تعیین شده می‌نماید که میتواند ایمنی و حفاظت پرتوی کارکنان را تضمین نماید؛ بنابراین همواره بایستی سعی نمود با کنترل شیمی آب از ظهور هر چه کمتر مواد پرتوزا در آب مدار اول جلوگیری نمود و افزایش طول عمر و قابلیت کار بهتر سیستم های جانبی راکتور را فراهم کرد.

تأثیرات تابش بر شیمی آب مدار اول راکتورهای هسته‌ای

در اثر واکنش‌های جدول ۲، عناصر رادیواکتیو زیادی حاصل می‌شوند که اکتیویته آب را بالا خواهند برد. بیشترین اثرات، مربوط به رادیونوکلیدهای (^{16}N ، ^{14}C ، ^{18}F) می‌باشد که در این میان، ^{14}C بدلیل نیمه عمر طولانی و ^{18}F بدلیل خورنده بودن و نیز نیمه عمر بالا، از اهمیت بالاتری برخوردار هستند [6]. بنابراین، همواره بایستی اثر تابش بر روی آب و مواد ساختاری را جدی تلقی نمود تا مسایل حفاظت پرتوی و ایمنی هسته‌ای رعایت شود.

جدول ۲: اندرکنش ذرات و تابش‌های هسته‌ای با عناصر و ایزوتوپ‌های سازنده‌ی آب در مدار اولیه [6]

نیمه عمر	واکنش هسته‌ای	محصولات اکتیو شده
۷۱۳ ثانیه	$^{16}\text{O}(n, p) ^{16}\text{N}$	^{16}N
۹,۹۶ دقیقه	$^{16}\text{O} (p, \alpha) ^{13}\text{N}$	^{13}N
۱۰۹,۷ دقیقه	$^{18}\text{O}(p,n) ^{18}\text{F}$	^{18}F
۱۲,۳ سال	$^{10}\text{B}(n,\alpha) ^7\text{Li} (n,n\alpha) ^3\text{H}$ $^{10}\text{B}(n,2\alpha) ^3\text{H}$ $^6\text{Li} (n,\alpha) ^3\text{H}$ $^6\text{Li} (n,n\alpha) ^3\text{H}$	^3H
۵۷۳۰ سال	$^{17}\text{O}(n,\alpha) ^{14}\text{C}$ $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$ $^{13}\text{C}(n,\gamma) ^{14}\text{C}$	^{14}C
۱,۸۳ ساعت	$^{40}\text{Ar} (n,\gamma) ^{41}\text{Ar}$	^{41}Ar
۳۷ دقیقه	$^{37}\text{Cl} (n,\gamma) ^{38}\text{Cl}$	^{38}Cl
۲۳ ساعت	$^{23}\text{Na}(n,\gamma) ^{24}\text{Na}$	^{24}Na
۲۴۴ روز	$^{64}\text{Zn}(n,\gamma) ^{65}\text{Zn}$	^{65}Zn

پارمترهای شیمی آب در راکتورهای هسته‌ای

قدرت اسیدی (PH)

PH شاخصی برای اندازه‌گیری غلظت یون $[H^+]$ می‌باشد؛ و بیانگر درجه اسیدی و بازی محلول است؛ مقدار عددی PH از ۰ تا ۱۴ متغیر است که مقادیر پایین‌تر از ۷ قدرت اسیدی و بالاتر از ۷ قدرت قلیایی یا بازی محلول آبی را نشان می‌دهد. در راکتورهای هسته‌ای طبق اکثر استانداردها، PH آب مدار اول، می‌بایست بین ۶٫۵ - ۵ قرار داشته باشد [2,3,5]. دلایل اندازه‌گیری PH عبارت است از: جلوگیری از خوردگی تجهیزات، حفاظت از فیلم خوردگی که در واقع حائل بین آب و غلاف سوخت و اجزاء دیگر است دو روش برای کنترل PH پیشنهاد می‌شود: روش اول تبادل یونی توسط دمنرلایزر و روش دوم استفاده از شیم شیمیایی مانند هیدرواکسید آمونیوم و اسید نیتریک [2]. عدم کنترل PH می‌تواند بنحوی باعث اکتیو شدن اجزاء شده و در پی آن انتشار مواد رادیواکتیو خطرناک به آب و محیط می‌شود؛ بنابراین کنترل PH نقش بسیار اساسی در ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتوی ایفا می‌کند.

کنداکتیویتی (Conductivity)

کنداکتیویتی (هدایت حرارتی) معرف قدرت یونی در آب مدار اول راکتور می‌باشد و شاخصی برای رسانایی آب است. بنابراین، کنداکتیویتی پایین، نمایانگر قدرت یونی پایین‌تر، و رسانایی کمتر خواهد بود و کنداکتیویتی بالا نشانه‌ی حضور یون‌های نامطلوب و نشان‌دهنده‌ی منابع ناخالصی در آب مدار اول است. از دلایل کنترل کنداکتیویتی می‌توان به، کاهش تشکیل رسوب، جلوگیری از افزایش خوردگی مواد ساختاری قلب و اجزاء دیگر و نظارت بر عملکرد ستون تبادل یونی (Mixed-bed) در دمنرلایزر اشاره کرد. مقدار استاندارد کنداکتیویتی آب مدار اول اکثر راکتورهای LWR از درجه خلوص $1 \mu S/cm \leq$ استفاده می‌شود (جدول ۲) [2].

جدول ۱: کنداکتیویتی متناظر با میزان خلوص آب مورد انتظار [2]

بیشینه کنداکتیویتی ($\mu S/cm$) یا ($\mu mhos/cm$)	درجه خلوص
10	خالص
1	خیلی خالص
0.1	خیلی خیلی خالص
0.054	فوق خالص از نظر تئوری (مقیاس)

آزمایشگاهی

روش‌های کنترل کندانکتیویته عبارت است از: ۱. تصفیه آب در گردش، بوسیله‌ی دیمینرلایزر از طریق تبادل یونی؛ و ۲. تصفیه آب جبرانی توسط سیستم میکاپ با عبور آن از میان چهار ستون ذغالی، آنیونی، کاتیونی و ستون Mixed-bed؛ [2]. در راکتورها از دستگاه کندانکتیویته متر که هم بعد از خروجی دیمینرلایزر و هم در مسیر مدار اولیه نصب شده است به صورت آنلاین مقدار عددی آن در اختیار قرار می‌دهند، استفاده می‌شود. با توجه به حد استاندارد تعریف شده، مباحث ایمنی و حفاظت پرتوی را می‌توان رعایت نمود.

اکسیژن محلول

خنک کننده دایم در معرض تشعشع قرار دارد و می‌تواند با برخورد به مولکول‌های آب، واکنش‌های برگشپذیر متفاوتی را منجر شود، که در این فرایند محلول اکسیژن و محلول هیدروژن تولید می‌شود که این محلول‌ها می‌توانند با مواد ساختاری قلب و همچنین عناصر تشکیل دهنده‌ی هوا مانند نیتروژن واکنش دهند [1,2,6]. از هیدروژن (H_2) و هیدرازین (N_2H_4) برای جلوگیری از افزایش اکسیژن محلول استفاده می‌شود؛ روش دیگر استفاده از سیستم گاز زدایی است. در راکتورهای BWR، بدلیل نوع طراحی و ماهیت راکتور، جوشش در داخل راکتور داریم و ناگذیر تجمع بالای غلظت اکسیژن محلول اتفاق می‌افتد به همین دلیل مستعد خوردگی می‌باشد. در راکتورهای PWR جوشش داخل مبدل حرارتی باعث تولید اکسیژن محلول می‌شود و برای جلوگیری از خوردگی می‌بایست به صورت مستمر نظارت شود [1,2,3]. از مهمترین واکنش‌های اکسیژن محلول در آب می‌توان به اکسید شدن آهن در دو دمای متفاوت نام برد؛ در دمای بالاتر از ۴۰۰ درجه فارنهایت Fe_3O_4 و در دمای پایین‌تر از ۴۰۰ درجه فارنهایت، اکسید آهن Fe_2O_3 را شاهد خواهیم بود. این اکسیدها می‌توانند آزادانه روی سطوح بچسبند و یا به راحتی در سراسر سیستم حرکت نمایند. که در پی آن، احتمال رسوب و پرتودهی وجود دارد. پایش اکسیژن محلول هم از طریق سیستم‌های آنالیز آنلاین و هم از طریق آنالیز آب در نمونه‌برداری‌های دوره‌ای امکان‌پذیر است [2].

رادیواکتیویته

خوردگی باعث ایجاد شکاف‌های ریز (Crack) در غلاف سوخت شده، و در نتیجه احتمال نشت محصولات شکافت به آب مدار اول راکتور وجود خواهد داشت؛ از سوی دیگر، خوردگی می‌تواند باعث جدا شدن عناصر تشکیل دهنده مواد (آلیاژهای) ساختاری دیگر نیز بشود؛ همواره محصولات اکتیواسیون (Activity Products) را بوجود می‌آورند [5]؛ یکی از عوامل دیگری که می‌تواند به ظهور رادیونکلئیدها در آب راکتور

بیافزاید، آلودگی سطحی اورانیومی غلاف، در هنگام ساخت صفحات سوخت در کارخانه می‌باشد [6]؛ البته این مورد در خصوص راکتورهای با سوخت صفحه‌ای امکان‌پذیر است. پایش مداوم میزان رادیواکتیویته آب مدار اول به سه دلیل مهم است: ۱. پی بردن به نواقص احتمالی سوخت (حضور محصولات شکافت در اثر نشستی سوخت در آب)؛ ۲. پی بردن به افزایش میزان خوردگی؛ و ۳. تشخیص اثربخشی دمی‌نرلایزر [2]. روش‌های کنترل رادیواکتیویته عبارت است از: تصفیه آب در گردش توسط سیستم تبادل یونی، فیلترهای فیزیکی و تصفیه آب جیرانی و خوراک ورودی و خروجی [2]. پایش آن از طریق اندازه‌گیری آنالین و نیز با نمونه‌برداری دوره‌ای و آنالیز آن، نتایج بدست آمده وضعیت آب راکتور از لحاظ حضور و غلظت اکتیویته رادیونکلئیدها دست یافت [8].

گازها

منشا بیشتر گازها در خنک‌کننده، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن و آرگون می‌باشد، و میزان کمی از گازهای حاصل از شکافت مانند کریپتون و زینان نیز در تشکیل این گازها نقش دارند. اول این‌که غلظت‌های بالای این گازها می‌تواند در پمپ به شکل‌گیری حباب‌ها در مناطقی که جریان آب کم هست، فرسایش و خوردگی در پره‌های پمپ (مدار اول) ایجاد کند و پدیده کاوریتاسیون رخ دهد؛ و دوم این‌که این گازهای خطرناک و رادیواکتیو ممکن است به بیرون نشت پیدا نمایند و مسایل حفاظت پرتوی را بوجود آورند [2,7]. کنترل این گازها به دو صورت امکان‌پذیر است: ۱. هواگیری در سیستم میکاپ؛ و ۲. استفاده از سیستم گاز زدایی. این گازها در راکتورهای PWR معمولاً از طریق تخلیه بخار وارد سیستم گاززدایی می‌شوند.

کلریدها

مهمترین دلیل پایین نگه‌داشتن غلظت یون کلر، جلوگیری از ایجاد خوردگی تنش‌ی است. خوردگی تنش‌ی در اثر وجود یون کلر و اکسیژن محلول در آب مدار اول حاصل می‌شود؛ این خوردگی می‌تواند باعث خوردگی غلاف سوخت و همچنین خوردگی دیواره‌های فلزی و امثال آن شود. برای کنترل این نوع خوردگی، می‌بایست غلظت یون کلر و اکسیژن محلول را تا حد امکان پایین نگه داشت و از سیستم تبادل یونی برای این منظور استفاده نمود. همچنین، ساختارهای فلزی که با آب در تماس هستند را باید از فولادهای کم کربن انتخاب نمود؛ روش دیگر، کنترل تغذیه آب ورودی و خروجی از همان ابتدا می‌باشد [2,7].

فلوئور

فلوئور یک عامل اکسیدکننده قوی می‌باشد این گاز با سایر مواد ساختاری واکنش می‌دهد و باعث خوردگی خواهد شد. غلظت بالایی از فلوئور به طور بالقوه به دو دلیل می‌تواند خطرناک باشد، اول اینکه فلوئور عامل

خوردگی زیرکونیوم توسط مکانیسم خوردگی تنش‌ی است و دوم اینکه فلئوئور نقش اصلی تابش را در خنک کننده را دارد. روش‌های کنترل این گاز، تبادل یونی و کنترل آب ورودی و خروجی در میکاپ می‌باشد. [2].

بحث و نتیجه گیری

در شیمی آب مدار اول راکتورهای هسته‌ای، پارامترهایی وجود دارند که نظارت و کنترل آنها باید به صورت مستمر باید صورت گیرند. برای کاهش تنش‌های دمایی و جلوگیری از خوردگی غلاف ناشی از دما، باید پارامترهای ترموهیدرولیکی را بهینه کنیم. اندرکنش بین غلاف و آب با رعایت حدود استاندارد پارامتر-های بیان شده در بالا، باید به کمینه ترین حد خود برسد. بدلیل وجود ایزوتوپ اکسیژن در آب مدار اول گاز اکتیو و خورنده ^{18}F را تولید میکند و نیز بدلیل نیمه عمر نسبتا بالا و خوردگی زیاد، باید با روش‌های بیان شده کنترل شود. به طور کلی برای اینکه شرایط مناسبی را از نظر ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتوی در استفاده و بهره‌برداری از راکتورها داشته باشیم باید مباحث شیمی آب و پارامترهای تاثیر گذار آن را مورد توجه قرار دهیم، بنابراین حداقل یکی از چند شاخص کنترلی زیر برای کنترل پارامترهای شیمی آب در راکتور باید انجام شود؛

۱- تبادل یونی توسط دمینرالایزر یا افزودن مواد شیمیایی

۲- کاهش هر چه بیشتر اکسیژن محلول توسط هیدروژن و هیدروژین

۳- گاز زدایی

منابع

1. U.S. Department of Energy (DOE), "DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK; CHEMISTRY"; Volume 1 of 2; Washington, D.C. 20585; JANUARY 1993
2. U.S. Department of Energy (DOE), "DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK; CHEMISTRY"; Volume 2 of 2; Washington, D.C. 20585; JANUARY 1993.
3. International Atomic Energy Agency; IAEA-TECDOC-667 V. 1; "Coolant technology of water cooled reactors"; Volume 1: Chemistry of primary coolant in water cooled reactors; IAEA, VIENNA, 1992.
4. International Atomic Energy Agency; IAEA-TECDOC-1303; "High temperature on-line monitoring of water chemistry and corrosion control in water cooled power reactors"; IAEA, 2002

5. International Atomic Energy Agency; IAEA-TECDOC-667 V.3; “Coolant technology of water cooled reactors”; Volume 3: Activity transport mechanisms in water cooled reactors; IAEA, VIENNA, 1992.
6. Nuclear Energy Agency; “Radiation Protection Aspects of Primary Water Chemistry and Source-term Management” ; NEA/CRPPH/R(2014)2 July 2014
7. International Atomic Energy Agency; IAEA-TECDOC-1128; Water chemistry and corrosion control of cladding and primary circuit components; IAEA, VIENNA, 1999
8. International Atomic Energy Agency; (IAEA)-IAEA-TECDOC-1474;”Natural circulation in water cooled nuclear power plants”; November 2005