

بررسی یک مدل ریاضی و معرفی چند کد کامپیوتری جهت شبیه سازی فعالیت پرتوزایی محصولات خوردگی و انتقال و انباشت این مواد در خنک کننده LWR

مہیار اسداله‌زاده گودرزی^۱، خدیجه رضایی ابراهیم سرایی^{۱*}، حجت الله منصوری^۲

علیرضا تابش

۱- دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

۲- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد

چکیده:

سطوح موجود در مدار اولیه راکتور که در تماس مستقیم و پیوسته با خنک کننده راکتور قرار دارند دچار خوردگی می‌شوند. محصولات خوردگی در اثر فرسایش از سطوح اولیه جدا شده و به واسطه‌ی خنک کننده به سایر قسمت‌های مدار اولیه انتقال می‌یابند. این مواد با ورود به قلب راکتور، در معرض شار بزرگ نوترون موجود در این قسمت قرار گرفته و در نتیجه گونه‌های پرتوزا از آن‌ها تولید می‌گردد. این گونه‌های پرتوزا به عنوان یکی از چشمه‌های تابش در مدار اولیه راکتور به حساب می‌آیند و میدان تابش شدیدی را ایجاد می‌کنند. میدان تابش ناشی از محصولات خوردگی پرتوزا نظیر ^{60}Co ، ^{58}Co ، ^{56}Mn ، ^{99}Mo ، ^{59}Fe (که مهم‌ترین محصولات خوردگی موجود در خنک کننده (LWR) هستند) با نیمه عمرهای متفاوت، محدودیت دسترسی به برخی قسمت‌های راکتور را حتی در زمان خاموش بودن راکتور در پی خواهد داشت. در هنگام کار راکتور، ^{56}Mn بیش‌ترین سهم را در تولید فعالیت پرتوزایی در بین محصولات خوردگی دارد اما پس از خاموش شدن راکتور، بیش‌ترین فعالیت پرتوزایی ناشی از ایزوتوپ‌های کبالت گزارش شده است. هدف از این مقاله بررسی یک مدل ریاضی و معرفی چند کد کامپیوتری می‌باشد که براساس آن‌ها می‌توان میزان فعالیت پرتوزایی ناشی از محصولات خوردگی در مدار اولیه راکتورهای آب سبک را محاسبه کرده و انتقال و انباشت این مواد را شبیه سازی نمود.

کلید واژه: مدار اولیه راکتور، محصولات خوردگی، فعالیت پرتوزایی

۱- مقدمه:

بیش از ۱۶٪ از انرژی الکتریکی مورد نیاز جهان که معادل با ۲۸۰۰ تراوات ساعت است، توسط ۴۴۱ نیروگاه هسته‌ای موجود در ۳۱ کشور جهان تامین می‌شود [۱]. در راکتورهای آب سبک از آب به عنوان خنک کننده، کند کننده نوترون‌ها و بازتابنده استفاده می‌شود [۲]. آب در دما و فشار بالا خوردگی قابل ملاحظه‌ای دارد. خاصیت خوردگی آب به واسطه‌ی تابش‌های هسته‌ای موجود در راکتور، تشدید شده و در نتیجه سطوح فلزی (شامل لوله‌ها، غلاف‌های سوخت و...) که در تماس با آب قرار دارند، دچار خوردگی شدید می‌گردند [۲]. در اثر

فرسایش سطوحی که دچار خوردگی شده‌اند، محصولات خوردگی به صورت محلول و ذره‌ای وارد خنک کننده می‌شوند و از طریق آن به تمام قسمت‌های مدار اولیه منتقل می‌شوند. در راکتورهای آب سبک، عمده محصولات خوردگی شامل آهن، نیکل، کروم و کبالت است زیرا اغلب سطوح در این نوع راکتورها از فولاد و سوپر آلیاژی با پایه‌ی نیکل-آهن نظیر اینکونل ساخته شده‌اند. با وجود تصفیه خنک کننده توسط فیلترها، بسته به عواملی چون کارایی فیلترها، تنها بخشی از محصولات خوردگی از سیستم حذف می‌گردند. محصولات خوردگی باقیمانده مشکلاتی را در سیستم ایجاد خواهند کرد که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]:

- رسوب کردن محصولات خوردگی بر روی میله‌های سوخت و سطوح انتقال حرارت. در این صورت به علت خواص انتقال حرارت ضعیف این رسوبات، افزایش بیش از حد دمای میله‌های سوخت و سطوح داخل قلب را خواهیم داشت.
 - به علت حرکت سیال خنک کننده، رسوبات پرتوزا از سطوح داخل قلب راکتور جدا شده و به خارج از قلب منتقل شده و بر روی سطوح خارج از قلب مجدداً رسوب می‌نمایند و میدان‌های تابشی شدید در این بخش‌ها ایجاد می‌کنند که می‌تواند محدودیت دسترسی به این قسمت‌ها را حتی پس از خاموش شدن راکتور در پی داشته باشد.
 - افزایش مقاومت هیدرولیکی سیال خنک کننده که منجر به کاهش آهنگ جریان خنک کننده می‌گردد.
 - کاهش شار نوترون در اثر جذب نوترون توسط محصولات خوردگی
 - نیاز به استفاده از افزودنی‌هایی چون روی به عنوان بازدارنده تابش [۴].
- طبق استاندارد ANSI/ANS-۱۸۰-۱، رادیو نوکلیدهای موجود در خنک کننده شامل گازهای نجیب، هالوژن‌ها، سزیم و روبیدیم، محصولات ناشی از فعال شدن آب (^{14}N ، ...)، تریتم و دیگر هسته‌ها (^{23}Na ، ...) می‌باشند [۵]. در حالت کلی می‌توان چشمه‌هایی که موجب پرتوزا شدن خنک کننده راکتور می‌گردند را در سه گروه اصلی زیر قرار داد.
- الف) پرتوزایی ذاتی ^{14}N و ^{16}N مهم‌ترین عامل پرتوزا شدن خنک کننده در هنگام کار راکتور به حساب می‌آیند.
- ب) پرتوزایی ناشی از محصولات شکافت نشت شده به داخل خنک کننده.
- ج) پرتوزایی ناشی از ناخالصی‌های موجود در خنک کننده که محصولات فرسایش و اکسایش در این رده قرار می‌گیرند. گروه‌های الف و ب، از رادیونوکلیدهایی با نیمه عمرهای کوتاه‌تر نسبت به گروه سوم تشکیل شده‌اند. لذا به نسبت گروه سوم از اهمیت کم‌تری برخوردار می‌باشند. به طور کلی ۷۰ تا ۹۰ درصد پرتوگیری شغلی به محصولات خوردگی موجود در مدار اولیه نسبت داده می‌شود. در سال‌های اخیر به دلیل بهبود ترکیب شیمیایی آب خنک کننده و نیز انتخاب مناسب مواد ساختاری راکتورهای آب سبک، سطح پرتوگیری در مراحل

تعمیر و نگهداری، کاهش پیوسته‌ای را نشان می‌دهد [۶]. مدل‌های ریاضی بسیاری جهت برآورد انباشت فعالیت پرتوزایی و انتقال محصولات خوردگی در راکتورهای آب سبک‌ارائه و توسعه داده شده‌اند. این مدل‌های تجربی و نیمه تجربی، نیازمند ضرایب تجربی می‌باشند که از داده‌های آزمایشگاهی و یا داده‌های مربوط به طراحی نیروگاه قابل تعیین می‌باشند.

مدل ریاضی جهت توصیف محصولات خوردگی

هدف از این مدل ریاضی، محاسبه‌ی غلظت وابسته به زمان محصولات خوردگی پرتوزا در خنک کننده راکتور، روی سطوح داخل قلب، روی سطوح داخلی لوله‌ها و در فیلترها است [۷]. در این مدل، غلظت وابسته به زمان هسته‌های پرتوزا با موازنه‌ی نرخ تولید و نرخ حذف هسته‌های پرتوزا بدست می‌آید. حذف هسته‌های پرتوزا در اثر فرآیندهای تصفیه، رسوب بر روی سطوح، نشت از مدار اولیه و واپاشی هسته‌ای صورت می‌پذیرد. فرضیات این مدل عبارتند از:

- وقوع فرآیند خوردگی به صورت یکپارچه و وابسته به زمان در نظر گرفته شده و از اثرات توزیع فضایی صرف نظر شده است.
- متناسب با غلظت محصولات خوردگی در خنک کننده، محصولات خوردگی پرتوزا بر روی سطوح رسوب می‌کنند.
- سیستم‌های تصفیه کننده تبادل کننده یونی و فیلترها، متناسب با غلظت محصولات خوردگی در خنک کننده، مدار اولیه را از ناخالصی‌ها تصفیه می‌کنند.

محصولات خوردگی پیش از پرتوزا شدن، به عنوان هسته‌های هدف در نظر گرفته می‌شوند و غلظت آن‌ها در خنک کننده مدار اولیه، روی سطوح داخلی لوله‌ها و روی سطوح قلب به ترتیب با N_w و N_p و N_c نشان داده شده و غلظت هسته‌های پرتوزا در آب خنک کننده مدار اولیه، روی دیواره داخلی لوله‌ها و روی سطوح قلب به ترتیب با n_w و n_p و n_c نشان داده شده و واحد غلظت بر حسب $atoms/cm^3$ بیان شده است.

روابط ریاضی و فرمول‌ها

نرخ تغییر غلظت مواد پرتوزا در خنک کننده مدار اولیه راکتور توسط رابطه ریاضی (۱) بیان می‌شود:

$$\frac{dn_w}{dt} = \sigma \Phi_\epsilon N_w - \left\{ \sum_j \frac{\epsilon_j Q_j}{V_w} + \sum_k \frac{l_k}{V_w} + \lambda \right\} n_w + \frac{K_p}{V_w} n_p + \frac{K_c}{V_w} n_c \quad (1)$$

در معادله (۱)، عبارت اول معرف نرخ تولید ایزوتوپ‌های پرتوزا، عبارت دوم نرخ‌های حذف (زدایش) محصولات خوردگی به واسطه‌ی تبادل کننده‌های یونی، رسوب روی لوله‌ها، رسوب روی سطوح داخل قلب و زدایش به وسیله‌ی فیلترها را نشان می‌دهند. عبارت‌های سوم و نیز به ترتیب نرخ‌های معرفی مجدد فعالیت پرتوزایی به داخل خنک کننده در اثر فرسایش سطوحی که محصولات خوردگی پرتوزا روی آن‌ها رسوب کرده‌اند، را بیان می‌کنند. در این رابطه V_w حجم آب خنک کننده (بر حسب cm^3)، σ معرف ثابت گروه برای تولید ایزوتوپ‌های پرتوزا از هسته‌های هدف و Φ_ε شار موثر گروه (بر حسب $atoms/cm^2.s$) می‌باشد. ضرایب K_p و K_c به ترتیب نرخ جدا شدن رسوبات از سطوح داخلی لوله‌ها و سطوح داخل قلب را بیان می‌کنند و واحد آن‌ها cm^2/s می‌باشد. l_k نرخ نشت خنک کننده از نشتی k ام موجود در مدار اولیه راکتور و بر حسب cm^2/s می‌باشد. با جمع بندی $\varepsilon_j Q_j$ روی Z ، خواهیم داشت:

$$\sum_j \varepsilon_j Q_j = \varepsilon_I Q_I + \varepsilon_p Q_p + \varepsilon_c Q_c + \varepsilon_F Q_F \quad (2)$$

در این رابطه $\varepsilon_I Q_I$ و $\varepsilon_p Q_p$ و $\varepsilon_c Q_c$ و $\varepsilon_F Q_F$ به ترتیب نرخ‌های حذف (زدایش) محصولات خوردگی توسط تبادل کننده یونی، رسوب روی لوله‌ها، رسوب روی سطوح داخل قلب و زدایش به وسیله‌ی فیلترها می‌باشند. شار متوسط نوترون برای یک گروه انرژی خاص با رابطه‌ی زیر بیان می‌گردد:

$$\Phi_\varepsilon = \left\{ \frac{1-e^{-\lambda T_c}}{1-e^{-\lambda T_l}} \right\} \varphi, \quad (3)$$

در این رابطه، λ ثابت واپاشی برای هر ایزوتوپ و φ شار گروه است که روی هندسه قلب، متوسط گیری شده است. T_l و T_c نیز به ترتیب زمان ماندگاری در قلب و زمان حلقه (مدت زمان یک بار پیمایش کامل خنک کننده در مدار اولیه راکتور) می‌باشند.

$$T_c = \frac{H\rho A}{\omega}, \quad T_l = \frac{l_p T_c}{H} \quad (4)$$

در این روابط، H ارتفاع قلب راکتور، A مساحت سطح مقطع جریان بر حسب cm^2 ، ρ چگالی خنک کننده در دماهای کاری و ω آهنگ جریان بر حسب g/s و l_p طول مدار اولیه می‌باشد. نرخ انباشت هسته‌های هدف در آب خنک کننده بر طبق رابطه‌ی (۵) بیان می‌گردد:

$$\frac{dN_w}{dt} = - \left\{ \sum_j \frac{\varepsilon_j Q_j}{V_w} + \sum_k \frac{l_k}{V_w} + \sigma \Phi_\varepsilon \right\} N_w + \frac{K_p}{V_w} N_p + \frac{K_c}{V_w} N_c + \frac{C(t) s N_s}{V_w A} f_s f_n \quad (5)$$

در این رابطه $C(t)$ نرخ خوردگی است. که وابسته به زمان بوده و واحد آن $g/cm^2.s$ است. s کل سطح سیستم است که در معرض خنک کننده قرار دارد. N_s عدد آووگادرو و A وزن اتمی هسته‌های هدف می‌باشد.

f_s و f_n به ترتیب، فراوانی هسته‌های هدف و فراوانی عنصر شیمیایی در سیستم می‌باشد. نرخ انباشت محصولات خوردگی پرتوزا در رسوبات قلب توسط رابطه‌ی (۶) بیان می‌گردد:

$$\frac{dn_c}{dt} = \sigma \varphi . N_c + \frac{\varepsilon_c Q_c}{V_c} n_w - \left\{ \frac{K_c}{V_c} + \lambda \right\} n_c \quad (6)$$

در این رابطه V_c حجم رسوبات موجود در قلب بر حسب cm^3 می‌باشد. نرخ انباشت هسته‌های هدف در رسوبات قلب توسط رابطه (۷) بیان می‌گردد:

$$\frac{dN_c}{dt} = \frac{\varepsilon_c Q_c}{V_c} N_w - \left\{ \frac{K_c}{V_c} + \sigma \varphi \right\} N_c \quad (7)$$

نرخ رسوب مواد پرتوزا بر روی رسوبات لوله‌ها (n_p) بر طبق رابطه‌ی (۸) می‌باشد:

$$\frac{dn_p}{dt} = \frac{\varepsilon_p Q_p}{V_p} n_w - \left\{ \frac{K_p}{V_p} + \lambda \right\} n_p \quad (8)$$

در این رابطه V_p حجم رسوبات روی لوله‌ها (بر حسب cm^3) است. نرخ تغییرات هسته‌های هدف روی دیواره‌ی لوله‌ها (N_p) توسط رابطه‌ی (۹) بیان می‌گردد:

$$\frac{dN_p}{dt} = \frac{\varepsilon_p Q_p}{V_p} N_w - \frac{K_p}{V_p} N_p \quad (9)$$

نرخ تغییر غلظت هسته‌های پرتوزا در رسوبات تبادل کننده‌ی یونی، توسط رابطه (۱۰) زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{dn_I}{dt} = \frac{\varepsilon_I Q_I}{V_I} n_w - \lambda n_I \quad (10)$$

در این رابطه، V_I حجم رزین موجود در تبادل کننده‌ی یونی و n_I غلظت هسته‌های پرتوزا در تبادل کننده‌ی یونی است.

نرخ تغییر غلظت رسوبات پرتوزا در فیلتر توسط رابطه‌ی (۱۱) بیان می‌شود:

$$\frac{dn_f}{dt} = \frac{\varepsilon_f Q_f}{V_f} n_w - \lambda n_f \quad (11)$$

در این رابطه، V_f حجم رسوبات داخل فیلتر و n_f غلظت هسته‌های پرتوزا (بر حسب $atoms/cm^3$) در رسوبات فیلتر می‌باشد. این مدل ریاضی برای حالتی طراحی شده است که راکتور در شرایط کارکرد عادی در حداکثر توان قرار دارد و اثرات ناشی از گذارها را منظور نمی‌کند. شایان ذکر است که گذارها که در شرایط کارکرد غیرعادی راکتور رخ می‌دهند، بر روی نرخ خوردگی، غلظت محصولات خوردگی و فعالیت پرتوزایی ناشی از آن‌ها اثرگذار می‌باشند، لذا جهت منظور کردن گذارها، این مدل نیازمند اصلاح می‌باشد. با این فرض که از آب فوق خالص به عنوان خنک کننده راکتور آب سبک استفاده می‌شود، از غلظت ناخالصی‌ها پیش از شروع به کار راکتور صرف نظر می‌گردد و غلظت ناخالصی‌ها پیش از شروع به کار راکتور صفر در نظر گرفته می‌شوند. همچنین فرض می‌شود که در زمان شروع به کار راکتور، $N_w = N_c = N_p = 0$ باشد. بر اساس دستگاه معادلات دیفرانسیل که در این مدل ریاضی ارائه شده، یک کد شبیه سازی نوشته می‌شود. این کد قابلیت محاسبه‌ی غلظت محصولات خوردگی پرتوزا را در خنک کننده، سطوح داخل قلب راکتور، دیواره داخلی لوله‌ها، روی فیلترها و در تبادل کننده‌ی یونی خواهد داشت. البته کدی که با حل این دستگاه به دست می‌آید، یک کد نیمه تجربی خواهد بود چرا که علاوه بر داده‌های مربوط به طراحی راکتور، نیازمند استفاده از یک سری داده‌های تجربی نیز می‌باشد.

مدل‌های ریاضی دیگری نیز جهت توصیف رفتار محصولات خوردگی در راکتورها ارائه شده است، نظیر مدل بابکوک و ویلکوکس (Babcock & Wilcox model) و یا مدل ماشین نگری بوریل (Burril's mechanistic)

(model) که به منظور توصیف رفتار محصولات خوردگی در CANDU PHWR ایجاد شده است [۸]. براساس مدل‌های ریاضی که به توصیف محصولات خوردگی و فعالیت پرتوزایی ناشی از آن‌ها می‌پردازند، مجموعه‌ای از کدها ایجاد شده‌اند. از آن جمله می‌توان به کدهای ACE-II, CRUDTRAN, PACTOLE, DISER, CPAIR, MIGA-RT و CORA اشاره نمود.

بحث و نتیجه‌گیری:

فرآیندهای فیزیکی بسیار پیچیده‌ای در تولید، انتقال و رسوب محصولات خوردگی پرتوزا در راکتورهای PWR و BWR نقش دارند که در حال حاضر در مورد برخی از این فرآیندها اطلاعات جامع وجود ندارد. از طرفی مدل سازی تمام این فرآیندها بسیار دشوار خواهد بود. لذا مدل‌هایی که ارائه می‌شوند و کدهای کامپیوتری که براساس آن‌ها نوشته می‌شوند، بر یک سری فرضیات استوارند، به طوری که هر کدام از آن‌ها برخی از فرآیندهای فیزیکی را منظور کرده و از بقیه فرآیندها صرف نظر می‌کنند که این امر موجب می‌گردد هر کدام از کدهای نوشته شده با محدودیت‌های خاص خود مواجه باشند. در شرایطی که هیچ گذاری در سیستم وجود ندارد و راکتور در شرایط کارکرد عادی در حداکثر توان در حال کار است، مدل ریاضی منظور شده در این بررسی قابلیت محاسبه‌ی غلظت محصولات خوردگی را در رسوبات داخل قلب راکتور، در خنک کننده مدار اولیه راکتور، روی سطوح داخلی لوله‌ها، در فیلترها و تبادل کننده یونی خواهد داشت.

مراجع:

۱. M.Rafique et al., Review of computer codes for modeling corrosion product transport and activity build-up in light water reactors, Nukleonika ۵۵(۳):۲۶۳-۲۶۹, ۲۰۱۰.
۲. IAEA, Coolant technology of water cooled reactors, Vol. ۱. IAEA-TECDOC-۶۶۷, International Atomic Energy Agency, Vienna, ۱۹۹۲.
۳. J.Varoln et al., Paper no.۲۳. In: Proc of the IAEA specialists meeting on Influence of Water Chemistry on Fuel Element Cladding Behaviour in Water cooled Power reactors, Leningrad, USSR, ۶-۱۰ June ۱۹۸۳.
۴. R.Castelli, Nuclear corrosion modeling, ۲۰۰۹.
۵. American National Standard ANSI/ANS ۱۸.۱, "Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactor," (۱۹۸۴).
۶. US NRC, Occupational radiation exposure at commercial nuclear power reactors and other facilities, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, ۲۰۰۳.
۷. N.Mirza et al., Computer simulation of corrosion product activity in primary coolants of a typical PWR under flow rate transients and linearly accelerating corrosion, Ann Nucl Energy ۳۰:۸۳۱-۸۵۱, ۲۰۰۳.
۸. IAEA, Reactor water chemistry relevant to coolant-cladding interaction, IAEA-TECDOC-۴۲۹, International Atomic Energy Agency, Vienna, ۱۹۸۷.