

## ارزیابی میزان آلودگی رادیواکتیو ناشی از حادثه قلب راکتور نیروگاه اتمی بوشهر با گذشت زمان

محمد رضا لطفعلیان، میترا اطهری علاف\*، مسعود منصوری

\*گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

پست الکترونیکی: Athari@srbiau.ac.ir

### چکیده

حوادث هسته‌ای گاهی غیر قابل اجتناب هستند ولی با آمادگی و تدبیر می‌توان خطرات آن را تا حد بسیار زیادی کاهش داد. برای این کار بایستی ارزیابی درستی از پیامدهای حادثه داشت. در این تحقیق جهت تخمین میزان نشت رادیوایزوتوپ‌ها در صورت رخداد وخیم‌ترین حادثه در نیروگاه اتمی بوشهر، از شبیه سازی سه بعدی قلب راکتور استفاده شده است. پس از تطابق پارامترهای اصلی حاصل از شبیه سازی قلب راکتور بوشهر با FSAR آن، و اطمینان از صحت برنامه محاسباتی، فعالیت ایزوتوپ‌ها وابسته به زمان محاسبه شده و نتیجه به عنوان چشمه اولیه برای حادثه فرض گردیده است. سپس حادثه ذوب کامل قلب راکتور و ورود تمامی آلودگی‌ها به محیط زیست شبیه سازی شد. اکتیویته اولیه و فعالیت در طول زمان برای ۱۸ سال پس از حادثه محاسبه گردید. با برر سی صد رادیوایزوتوپ، فعال‌ترین آن‌ها تعیین شدند. نتایج این برر سی برای تغییرات ایزوتوپ‌های مهم و همچنین فعالیت کلی منبع انتشار (Source term) طی مرور زمان تا ۱۸ سال پس از حادثه محاسبه گردید. در نهایت فعالیت اختصا صی ناشی از هر یک از ایزوتوپ‌های مهم نیز به منظور اولویت بندی جهت رفع آلودگی‌ها ارائه شد. محاسبات با استفاده از کد MCNPX2.7.E و با کمک کارت BURN انجام شد.

کلیدواژگان: حادثه هسته‌ای، نیروگاه اتمی بوشهر، تغییرات فعالیت رادیواکتیو با زمان، رادیوایزوتوپ‌های تولیدی راکتور.

### ۱. مقدمه

بپردازند. در این پژوهش میزان و غلظت رادیوایزوتوپ‌های ناشی از ذوب قلب راکتور آب تحت فشار (PWR) بوشهر مطالعه شده است. برای تحدید حوادث و پیشبینی تمهیدات لازم جهت مقابله با آن، داشتن داده‌های کافی جهت برنامه‌ریزی‌های ایمنی و محیط‌زیستی، ضروری است. بررسی و شناخت فعالیت و ایزوتوپ‌های موجود در محیط از دو نظر دارای اهمیت است: اول: الگوی پخش رادیوایزوتوپ‌ها در محیط زیست اگر چه

حادثه منجر به ذوب قلب یک راکتور هسته‌ای بدترین حادثه هسته‌ای است که منجر به پخش مواد رادیواکتیو در محیط می‌شود. خاطره تلخ حوادث هسته‌ای که منجر به انتشار مواد رادیواکتیو در محیط زیست شده، مانند حادثه چرنوبیل، تری‌مایل آیلند و فوکوشیما ژاپن هنوز از اذهان نرفته است. بنابراین ضروری است که کشورهای دارای نیروگاه هسته‌ای پیشاپیش به مطالعه و ارزیابی پیامدهای چنین حوادثی در کشور خود

به وضعیت تشعشع پس از حادثه شود. برخی از داده‌های مربوط به فاجعه چرنوبیل با فاجعه فوکوشیما مقایسه شده است [۴].

در این مطالعه چون تغییرات ایزوتوپ‌ها در حین فعالیت راکتور به دلیل پیچیدگی‌های الگوریتم حرکت نوترون‌ها، واکنش‌های زنجیره‌ای، تنوع سطح مقطع‌های ایزوتوپ‌ها نسبت به طیف و دما امکان محاسبات با روش‌های کلاسیک ریاضی را نمی‌دهد، لذا محاسبات با استفاده از شبیه‌سازی به کمک کدهای محاسباتی، صورت گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱ شبیه‌سازی هندسی قلب راکتور بوشهر

قلب راکتور نیروگاه اتمی بوشهر از نوع PWR مدل VVER-1000 و با ظرفیت حرارتی ۳۰۰۰ MW است. راکتور شامل تعداد ۱۶۳ مجتمع سوخت است که هر یک شامل ۲۶۴ میله سوخت می‌باشد. آرایش میله‌های سوخت هگزگونال است و در هر مجتمع سوخت ۱۸ میله کنترل نیز وجود دارد. چون نوع و غنای مجتمع‌های سوخت یکسان نبود، لذا در این تحقیق در تعریف هندسه از چهار ماتریس جهت تعریف هندسه قلب راکتور استفاده شد.

تعریف سطوح و سلول‌ها به روش ماکروبادی و شبیه‌سازی به صورت هتروژن صورت گرفته است که دقت بالایی داشته باشد. شبیه‌سازی راکتور بوشهر به روش هتروژن این امکان را می‌دهد که آهنگ تولید ایزوتوپ‌ها در انواع مجتمع‌های سوخت به صورت جداگانه نیز قابل بررسی باشد. شکل (۱) پلات‌های مختلف قلب شبیه‌سازی شده را با بزرگ‌نمایی و زوایای مختلف (شبیه به نمونه واقعی) نشان می‌دهد. مجتمع‌های سوخت که غناهای متفاوت دارند و فضای پر شده با سوخت در هر یک متفاوت باشد و فضای آب ورودی در قسمت Down comer و بالا و پایین قلب که به عنوان بازتابنده نقش قابل توجهی در پارامترهای اصلی ایفا می‌نماید.

محاسبات طی دو مرحله کلی یکی کار عادی راکتور (حالت بحرانی) با ۴ مقطع زمانی (Step) تا یک سال پس از شروع

تابعی از جریانات جوی و منطقه‌ای است، اما به هر حال به منبع انتشار و تغییرات زمانی آن وابسته است. دوم: برنامه‌ریزی و حفاظت‌سازی و رفع آلودگی‌های محیط‌زیستی در حله نخست به غلظت ایزوتوپ‌ها در محیط و نیز تغییرات زمانی آن‌ها در اثر واپاشی‌های زنجیره‌ای وابسته است.

در این زمینه، می‌توان به مطالعاتی اشاره کرد که در سال‌های اخیر انجام شده است. در اندونزی با استفاده از طیف‌سنج گاما، غلظت رادیونوکلیدهای  $^{226}\text{Ra}$ ،  $^{232}\text{Th}$ ،  $^{40}\text{K}$  و  $^{137}\text{Cs}$  تعیین شد. اندازه‌گیری نمونه‌های قبل و بعد از افزودن مقادیر غیر رادیواکتیو همین عناصر، نشان داد که مقادیر میانگین سطوح رادیواکتیویته پس از افزودن عناصر غیر رادیواکتیو، کمتر از میانگین‌های جهانی برای  $^{226}\text{Ra}$ ،  $^{232}\text{Th}$ ،  $^{40}\text{K}$  و  $^{137}\text{Cs}$  است [۱].

در تحقیقی دیگر نسبت ایزوتوپ‌های یک نمونه آزمایشگاهی در فواصل مختلف از منابع یون‌های آهن و روی در محلول‌آبی اندازه‌گیری و سپس ایزوتوپ‌های غیر رادیواکتیو افزوده شد. داده‌ها نشان داد پخش ایزوتوپ‌های غیر رادیواکتیو باعث تغییر از صفر تا ۰.۳٪ در نسبت‌های ایزوتوپ‌های  $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$  و  $^{64}\text{Zn}/^{66}\text{Zn}$  شده است. با این حال، مشخص شد که عوامل اضافی، مثلاً سینتیک تبادل یونی و انتشار نیز می‌توانند تأثیرگذار باشند. نتیجه گرفته شد که با افزودن مقادیری از ایزوتوپ‌های غیر رادیواکتیو هر عنصر می‌توان امیدوار بود که به دلیل جایگزینی، میزان پخش ایزوتوپ‌های رادیواکتیو آن عنصر کاهش یابد [۲].

در یک تحقیق از شرایط حادثه هسته‌ای فوکوشیما در ۱۱ مارس ۲۰۱۱ به عنوان یک الگو استفاده شد. این تحقیق نشان داد که استراتژی حفاظت عمومی اتخاذ شده در ژاپن نمی‌تواند در یک حادثه هسته‌ای، به طور کامل از مردم محافظت کند، اما در این خصوص نسبت به فاجعه چرنوبیل موفق‌تر عمل کرده است. در شرایط واقعی، دولت ژاپن، بیشتر به کمک پیروی از الزامات بین المللی قوانین و نه فقط مقررات ملی، در جلوگیری از فجایعی در حد حادثه چرنوبیل، موفق‌تر بود [۳].

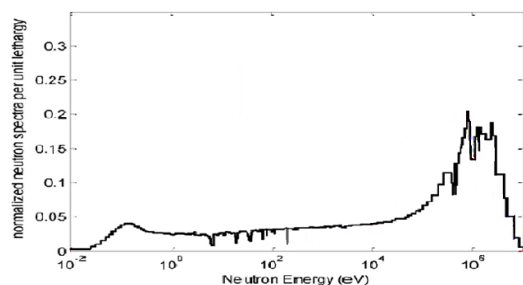
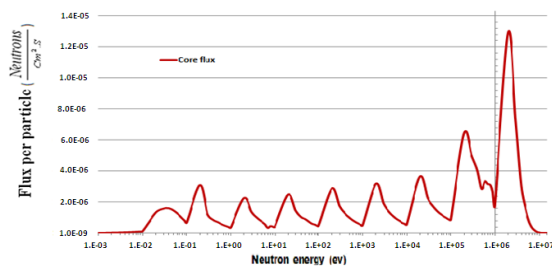
مطالعه حادثه چرنوبیل و بررسی علل حادثه، نشان داد که برای افزایش سطح ایمنی در صنعت هسته‌ای، لازم است توجه ویژه‌ای

دارد. همچنین طیف نوترونی راکتور نیز با طیف نیروگاه مشابه در شکل (۲) مقایسه شد که تایید دیگری بر برنامه شبیه سازی می باشد [۵].

جدول (۱): مقایسه پارامترهای محاسبه شده در تحقیق با نمونه های

واقعی (حالت Full power).

ردیف	پارامترها (برای حالت Full power)	مقدار محاسبه شده	مقدار مندرج در FSAR راکتور بوشهر [5]	تفاوت (%)
۱	ضریب تکثیر	۱.۰۰۷۳۹	۱.۰۰۱۲۸	۰.۶٪
۲	میزان مصرف سوخت یک ساله ( $\frac{Mw.D}{Ton(U)}$ )	۴۲۹۱۶	۴۴۴۸۰	۳.۵٪



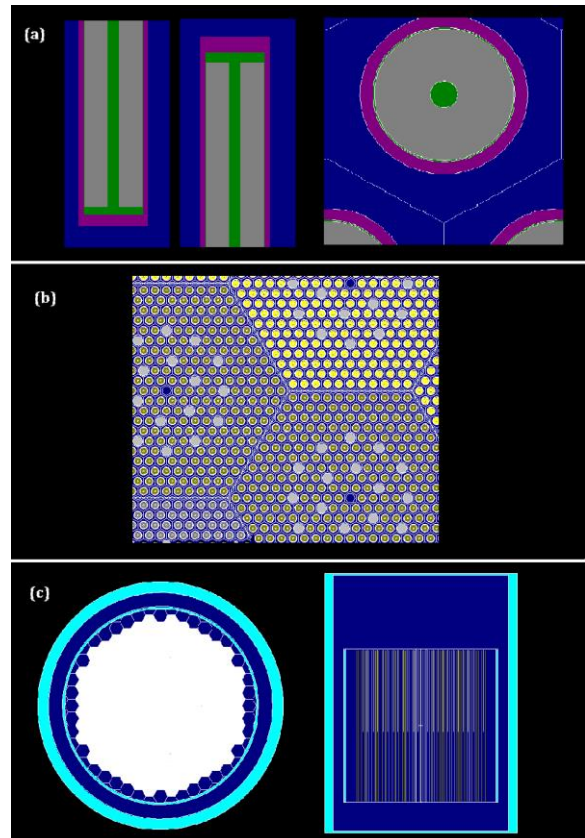
شکل (۲): طیف شبیه سازی شده در نمودار بالا، و طیف راکتور PWR نمودار پایین [۶].

### ۳. تغییرات فعالیت و رادیوایزوتوپ های مهم در طول سیکل کاری راکتور

۳.۱. فعالیت کلی قلب راکتور در طول یک سال کارکرد راکتور

در این مرحله در طول یک سال کارکرد راکتور از لحظه شروع کار تا یک سال پس از کار پیوسته راکتور با قدرت ۳۰۰۰ MW

فعالیت راکتور به منظور تعیین مقدار و نسبت رادیوایزوتوپ ها انجام شد و دیگری بدون ضریب تکثیر و فقط با واکنش های زنجیره ای (مانند واپاشی رادیوایزوتوپ ها در محیط زیست) با ۱۶ مقطع زمانی (Step) تا ۱۸ سال پس از حادثه انجام شد.



شکل (۱): پلات های مربوط به شبیه سازی قلب راکتور نیروگاه اتمی بوشهر (a) پلات های عرضی و طولی یک میله سوخت، (b) نمایی از مقطع قلب (c) برش عرضی و طولی از کل قلب راکتور.

در شکل ۱- b سه نوع مجتمع سوخت ۱.۶٪، ۲.۴٪، ۳.۶٪ و همچنین میله های کنترل رنگ های متفاوت دارند و در شکل ۱- c برش عرضی و طولی از قلب راکتور در حالی که میله های کنترل کمی بیشتر از نصف قلب وارد شده اند، مشاهده می شود.

### ۲.۲. صحت سنجی

پس از شبیه سازی سه بعدی قلب راکتور بوشهر، جهت صحت سنجی برنامه ابتدا پارامترهای ضریب تکثیر و میزان مصرف سوخت بدست آمده با FSAR راکتور بوشهر مقایسه گردید. جدول (۱) نشان می دهد که تطابق قابل قبولی بین نتایج وجود

#### ۴. تغییرات زمانی فعالیت و رادیوایزوتوپ‌های مهم

##### پس از حادثه

اگر حادثه ای منجر به راهیابی کلیه ترکیبات قلب به محیط زیست شود. به این ترتیب خروجی محاسبات مرحله اول محاسبات یعنی ایزوتوپ‌های تولیدی پس از یک سال فعالیت راکتور با حداکثر قدرت، به عنوان ورودی برنامه محاسباتی بعدی استفاده شده است. در این مرحله از محاسبات، پسماند بدون ضریب تکثیر، در بازه زمانی از صفر تا ۱۸ سال پس از حادثه در محیط در نظر گرفته شد. در این محاسبه تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌ها بر اساس واپاشی‌های زنجیره‌ای و خودبه خودی است و واپاشیهای نوترون، گاما و بتا به همراه محصولات آن‌ها دنبال شده است.

#### ۴.۱. تغییرات فعالیت کل در طول ۱۸ سال در محیط

##### زیست

فعالیت پسماند راکتور که فرض شده در محیط زیست در حال واپاشی‌های زنجیره‌ای و خودبه خودی است، در نمودار شکل (۵) ترسیم گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌رفت، تغییرات کلی نیز به صورت نمایی کاهش یافته است. اما رادیوایزوتوپ‌های حاصل از فعالیت راکتور متنوع‌تر هستند و متوسط نیمه عمر آن‌ها نیز طولانی‌تر است لذا در دراز مدت خطرناک‌تر هستند.

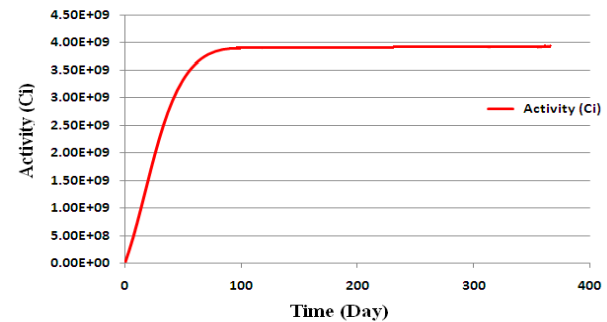
#### ۴.۲. تغییرات مقدار ایزوتوپ‌های مهم در طول ۱۸ سال

##### در محیط زیست

مقادیر ۱۵ مورد از رادیوایزوتوپ‌های موجود در پسماند راکتور در محیط زیست با تغییرات ناشی از واپاشی‌های زنجیره‌ای و خود به خودی محاسبه گردیده است. نتایج در نمودار شکل (۶) مشاهده می‌گردد.

برخی ایزوتوپ‌ها فقط روند کاهشی به صورت نمایی دارند. برخی دیگر مانند  $^{135}\text{Xe}$  هم تولید و هم از بین رفتن دارند و برخی رادیوایزوتوپ‌ها نیز از طریق واپاشی هسته‌های دیگر تولید می‌شوند، که از آن جمله می‌توان به تولید  $^{241}\text{Am}$  از واپاشی بتای منفی  $^{241}\text{Pu}$  اشاره نمود. البته  $^{241}\text{Am}$  در ابتدای کار صفر است اما پس از تولید، مقدار آن رو به افزایش است چون نیمه عمر

و حالت بحرانی، با در نظر گرفتن وابستگی پارامترها به زمان، تغییرات فعالیت محاسبه و در نمودار شکل (۳) ترسیم گردید.



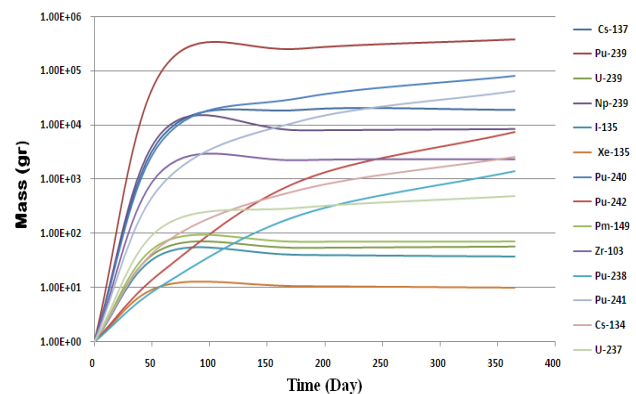
شکل (۳): تغییرات زمانی فعالیت کل راکتور بوشهر طی یک سال کارکرد.

#### ۳.۲. تغییرات مقدار ایزوتوپ‌های مهم در طول یک سال

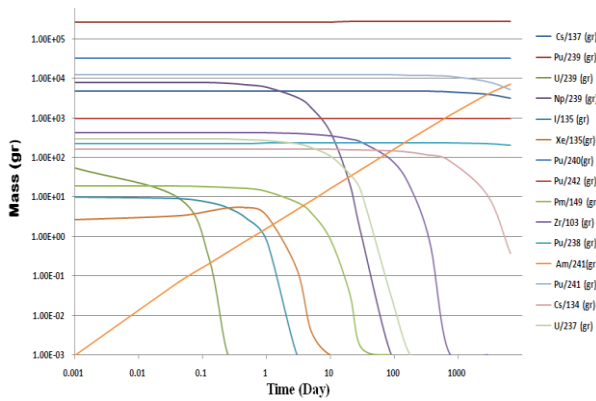
##### کارکرد راکتور

در این مرحله در طول یک سال کارکرد راکتور از لحظه شروع کار راکتور تا یک سال پس از کار پیوسته با قدرت ۳۰۰۰ MW و حالت بحرانی، با در نظر گرفتن وابستگی پارامترها نسبت به زمان، تغییرات همه ایزوتوپ‌ها نسبت به زمان محاسبه گردید. در این محاسبات تغییرات ناشی از تولید پاره‌های شکافت، واپاشی‌های زنجیره‌ای و به تبع آن‌ها تغییرات طیف در نظر گرفته شد و ایزوتوپ‌های فعال و پایدار محاسبه گردید.

گرچه در برنامه اصلی، بیش از صد ایزوتوپ محاسبه شده است، ولی نتایج برای ۱۴ مورد از آن‌ها ترسیم شد. نتیجه در نمودار شکل (۴) قابل مشاهده است.



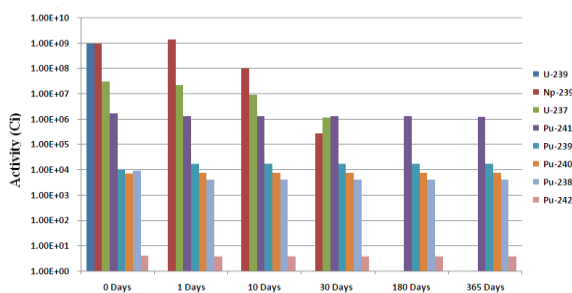
شکل (۴): تغییرات زمانی برخی از ایزوتوپ‌های با فعالیت بیشتر، تولید شده در راکتور طی یک سال کارکرد.



شکل (۶): تغییرات زمانی جرم ایزوتوپ‌های خطرناکتر طی مرور زمان تا ۱۸ سال پس از حادثه.

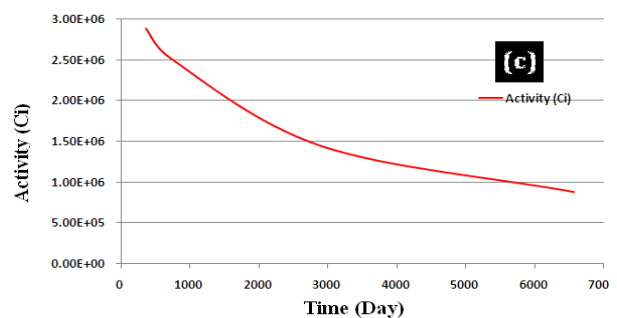
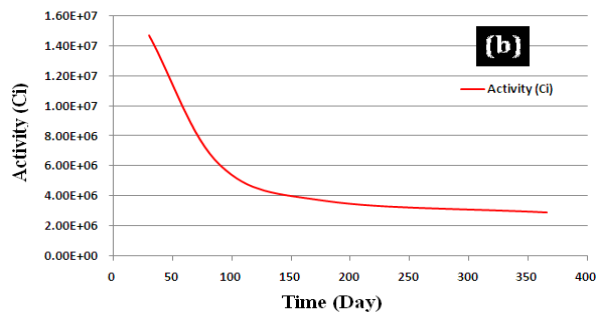
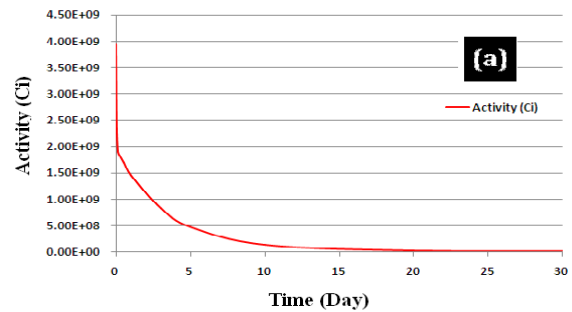
### ۵. فعالیت اختصاصی برخی از ایزوتوپ‌ها

میزان فعالیت رادیو ایزوتوپ‌ها هم به مقدار و هم به نیمه عمر آن‌ها بستگی دارد. آن‌هایی که نیمه عمر بسیار کوتاه دارند به شرط آن‌که واپاشی آن‌ها زنجیره‌ای نباشد، خودشان در کوتاه مدت نابود می‌شوند. اما باید برای سایر رادیوایزوتوپ‌ها، متناسب با نیمه عمر و زنجیره واپاشی جهت مقابله با آثار سوء آن‌ها در محیط زیست، به ترتیب اولویت برنامه‌ریزی کرد. لذا پیشگیری لازمه دانستن روند تغییرات است. در هر حال تعدادی از آن‌هایی که فعالیت بیشتری دارند، در نمودارهای (۷) و (۸) مشاهده می‌گردد.



شکل (۷): تغییرات فعالیت اختصاصی برخی ایزوتوپ‌ها بر حسب زمان طی یک سال برای آکنیدها.

$^{241}\text{Pu}$  برابر ۱۱ سال می‌باشد. لذا برعکس سایر ایزوتوپ‌ها روند افزایشی نشان می‌دهد.

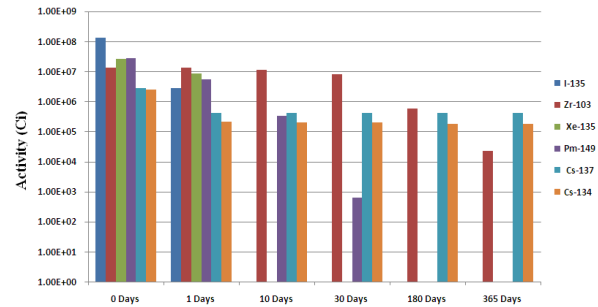


شکل (۵): تغییرات زمانی فعالیت کل پسماند راکتور رها شده در محیط

زیست طی مرور زمان (a): از لحظه حادثه تا ۳۰ روز، (b): از ۳۰ روز تا ۱ سال و (c): از ۱ سال تا ۱۸ سال.

## ۷. مراجع

1. D. I. P. Putra, W. R. Prihatiningsih, M. Makmur, M. N. Yahya, Y. Priasetyono, Untara. Distribution of some natural and anthropogenic radionuclides in the sediments and seawater along the coastal areas of North Sulawesi. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 890 (2021) 012005.
2. I. Rodushkin, A. Stenberg, H. Andren, D. Malinovsky, D. C. Baxter. Isotopic Fractionation during Diffusion of Transition Metal Ions in Solution. Anal. Chem. 76 (7) (2004) 2148-2151.
3. V. A. Kutkov, V. V. Tkachenko. Fukushima Daiichi accident as a stress test for the national system for the protection of the public in event of severe accident at NPP. Nucl. Energy Tech. 3 (1) (2017) 38-42.
4. V. Kortov, Y. Ustyantsev. Chernobyl accident: Causes, consequences and problems of radiation measurements. Radiat. Measure. 55 (2013) 12-16.
5. Bushehr NPP Final safety analysis report. Sheet 4-32, Atomic energy organization of Iran, 30.01.2007.
6. F. Ganda, F. J. Arias, J. Vujic, E. Greenspan. Self-sustaining thorium boiling water reactors. Sustainability. 4 (10) (2012) 2472-2497.



شکل (۸): تغییرات فعالیت اختصاصی برخی ایزوتوپ‌ها بر حسب زمان طی یک سال برای آنکئیدها.

## ۶. نتیجه گیری

در مورد چگونگی پخش ایزوتوپ‌ها در محیط زیست نمی‌توان پیش‌بینی خاصی انجام داد چرا که زمان حادثه احتمالی و به تبع آن تغییرات و جهت جریانات جوی قابل پیش‌بینی نیست. لذا نتایج محاسبات برای منبع انتشار صورت گرفته که البته در محاسبات مرحله بعدی (جریانات جوی) قابل استفاده است. پس ایزوتوپ‌های مختلف و تغییرات آن‌ها در منبع انتشار اولیه (Source term) محاسبه و پیش‌بینی شده است، تا با داشتن مقدار کل رادیوایزوتوپ‌های موجود در محیط زیست، در هر لحظه با توجه به شرایط جوی و الگوی پخش محیطی جهت رفع آلودگی‌ها تمهیدات لازم را پیش‌بینی نماییم. ایزوتوپ‌های دارای نیمه عمر بسیار کوتاه به شرطی که از نوع واپاشی زنجیره‌ای نباشد، در کوتاه مدت و به صورت خودبه‌خودی انجام می‌شود اما رفع آلودگی‌های ناشی از ایزوتوپ‌های دارای نیمه عمر طولانی‌تر به‌خصوص آن‌هایی که از نظر بیولوژیکی مهم هستند مانند ایزوتوپ‌های پلوتونیوم، از نظر حفاظت عمومی اهمیت بیشتری دارد لذا دانستن مقادیر آن‌ها جهت آلودگی‌زدایی لازم است. این مقادیر در تحقیق حاضر با اعداد و ارقام در دسترس است.

تغییرات زمانی فعالیت و میزان ایزوتوپ‌های رها شده در محیط زیست، در کوتاه مدت و بلند مدت به‌خصوص به صورت نمودار، در برنامه‌ریزی جهت حفاظت عمومی و پاکسازی محیط‌زیست، به‌طور اساسی قابل استفاده است.