پژوهش و فناوری محیط زیست، ۱۴۰۱ ۷(۱۱)، ۱۴۱-۱۵۴

پژوهش و فناوری محیط زیست

وبگاه نشریه:www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

تحلیلی بر سیستم موانع چندگانه مهندسی - طبیعی در راستای مدیریت پایدار پسماندهای رادیواکتیو

مهدی یزدیان [۱]، مهجبین ردایی [۲*]، راضیه صفار [۳]، علیرضا جباری [۴]

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

۲- مدرس گروه مهندسی عمران، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مروری

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۳/۲۱

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۱/۰۶/۲۵

کلید واژه‌ها:
مدیریت پایدار،
پسماند رادیواکتیو،
سیستم موانع چندگانه

چکیده

رشد جمعیت، فرآیندهای توسعه شهری و صنعتی در سراسر جهان اتخاذ منابع جایگزین انرژی در زمینه کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین تأثیرات مضر آنها بر سلامت انسان و محیط‌زیست را اجتناب‌ناپذیر کرده است. طی دهه‌های گذشته، گسترش استفاده از انرژی هسته‌ای به عنوان منابع انرژی جایگزین، حکایت از تولید گسترده پسماند رادیواکتیو را دارد و مدیریت صحیح پسماندهای رادیواکتیو را به چالشی حیاتی برای جامعه جهانی مبدل ساخته است. مطالعه حاضر نوعی مطالعه مروری است که اصول و فرآیندهای مدیریت پسماندهای رادیواکتیو و عوامل موثر در مکان‌یابی سایت‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو را مورد واکاوی قرار می‌دهد، و بر طراحی موانع چندگانه مهندسی-طبیعی و اتخاذ برنامه‌های کنترلی-نظارتی همراه با الزامات قانونی در راستای دفع بهینه پسماندهای رادیواکتیو تأکید می‌ورزد تا ضمن اخذ راهبردهای کارا به ابعاد مختلف پایداری در تمامی ابعاد محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی توجه شود. نتایج مطالعه حاکی از آن است که فرآیندهای آمایش و تثبیت پسماندهای خطرناک، ارزیابی ریسک، مکانیابی سایت دفن، ایمنی طولانی مدت سایت‌های دفن، طراحی سازه‌های مقاوم، اتخاذ سیستم موانع چندگانه مهندسی- طبیعی، طراحی برنامه‌های پایش و نظارتی می‌تواند میزان آسیب‌پذیری انسان و محیط زیست را از سایت‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو کاهش دهد و به عنوان چارچوب موثر در مدیریت پسماندهای رادیواکتیو توسط طراحان، برنامه‌ریزان و مهندسان به کار گرفته شود.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.radaei@ut.ac.ir

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 3060-2676

Analysis of multiple engineering-natural barriers system for sustainable management of radioactive wastes

Mehdi Yazdian[1], Mahjabin Radaei[2*], Raziyeh Saffar[3], Alireza Jabbari[4]

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran
2- Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran
3- Bachelor Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran
4- Master of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Engineering, Science and Arts University, Yazd, Iran

Article Info

Article type:
Review Article

Received:
15/04/2022
Accepted:
11/06/2022
Available online:
16/09/2022

Keywords:
Sustainable Management,
Radioactive Waste,
Multiple Barrier System

Abstract

Population growth and urban and industrial development processes around the world have made the adoption of alternative energy sources inevitable to reduce fossil fuel consumption as well as their harmful effects on human and environmental health. Over the past decades, the expansion of using nuclear energy as an alternative energy source indicates the widespread production of radioactive waste and the proper management of radioactive waste has become a vital challenge for the international community. The present study is a review study that examines the principles and processes of radioactive waste management and the factors influencing the location of radioactive waste landfills. It also emphasizes on the design of multiple engineering-natural barriers and the adoption of control-monitoring programs with legal requirements for the optimal disposal of radioactive waste to adopt efficient strategies to pay attention to various aspects of sustainability in all aspects of the environmental, social, and economic. The results of the study indicate that the processes of preparation and stabilization of hazardous waste, risk assessment, landfill site selection, the long-term safety of landfills, design of durable structures, adoption of multiple engineering-natural barrier systems, design of monitoring and control programs can reduce humans and environment vulnerability from radioactive waste landfills and can be used as effective frameworks in the radioactive waste management by designers, planners and, engineers.

* Corresponding author E-mail address: m.radaei@ut.ac.ir

مقدمه

روند رو به رشد جمعیت، فرآیندهای توسعه شهری و صنعتی در سراسر جهان اتخاذ منابع جایگزین انرژی در زمینه کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و همچنین تأثیرات مضر آنها بر سلامت محیط‌زیست و انسان را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. از این منظر، انرژی هسته‌ای به عنوان یک گزینه مناسب به منظور دستیابی به انرژی مقرون به صرفه، قابل اطمینان و پاک، تسهیل توسعه صنعتی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نهایت اهداف توسعه پایدار بسیار مهم است. انرژی هسته‌ای همراه با سایر فن‌آوری‌ها می‌تواند انرژی لازم را برای دستیابی به استانداردهای بالای زندگی، سلامتی، محیطی پاک و اقتصادی پایدار فراهم آورد. اگرچه که کاربردهای متنوع و افزایشی رادیوایزوتوپ‌ها در پزشکی، صنعت، کشاورزی، پرتودهی غذایی، تحقیقات، آموزش و غیره منجر به تولید انواع مختلفی از پسماندهای رادیواکتیو شده است (IAEA, 2019). به گونه‌ای که حدود ۳۰ گرم از یک پسماند اتمی سطح بالا می‌تواند حدود ۸۰۰۰ کیلو وات ساعت انرژی تولید کند. این مقدار انرژی معادل چیزی حدود 8 تن زغال سنگ با کیفیت بسیار بالا است. لذا اگرچه انرژی‌های هسته‌ای می‌تواند جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی باشد، از سویی دیگر پسماندهای رادیواکتیو در صورت عدم مدیریت صحیح می‌توانند خطر ساز باشند (Ma et al., 2019; Chapman & Hooper, 2012). طبق داده‌های اخیر منتشر شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA[1])، حجم جهانی پسماند رادیواکتیو جامد در حدود ۳۵ میلیون متر مکعب است که ۲۸/۵ میلیون متر مکعب آن (۸۲٪) به طور دائم دفع شده است و ۶/۳ میلیون مترمکعب دیگر (۱۸٪) در انبار منتظر دفع نهایی است. بیش از ۹۸٪ این موارد به عنوان پسماندهای با سطح رادیواکتیویته بسیار کم طبقه بندی می شوند و اکثر پسماندهای باقیمانده در سطح متوسط هستند (IAEA, 2018). پسماندهای رادیواکتیو نوعی از پسماندهای خطرناک هستند که به طور خاص توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، در قانون حفظ و احیاء منابع (RCRA[2]) تعریف شده‌اند، "پسماندهایی با ویژگی‌های خاص که برای سلامتی انسان یا محیط‌زیست خطرناک یا به طور بالقوه مضر باشند" (EPA, 2012). بنا بر تعریف مذکور پسماند رادیواکتیو ماده‌ای است که محتوی یا آلوده به هسته‌های پرتوزا در غلظت یا فعالیت پرتوی بزرگ‌تر از سطوح ترخیص مقرر بوده و برای آن کاربردی پیش بینی نشده باشد. از این‌رو پسماندهایی که ذاتاً رادیواکتیو باشد، یا توسط مواد رادیواکتیو آلوده شده باشد، و قابلیت استفاده نداشته باشد، پسماند رادیواکتیو قلمداد می‌شود. صنایعی تولید کننده پسماندهای رادیواکتیو شامل نیروگاه‌های هسته‌ای، تولید انرژی الکتریکی، پزشکی هسته‌ای، تحقیقات هسته‌ای، استخراج زغال سنگ، ساخت و بازسازی سلاح‌های اتمی است (Zhang et al., 2019). پسماندهای رادیواکتیو علاوه بر سمیت شیمیایی به دلیل ساطع کردن پرتوهای مضر و خطرناک در اثر واپاشی، از جمله مواد سرطان‌زا به حساب می‌آیند و چنانچه مقادیر بسیار کمی از آنها از طریق آب، هوا و یا از طریق زنجیره غذایی وارد بدن شود، با گذشت زمان موجب بروز سرطان و یا تأثیرات سوء ژنتیکی در نسل‌های بعدی می‌شوند. لذا پسماندهای رادیواکتیو تهدید قابل توجهی برای سلامت انسان و محیط‌زیست است. محققانی نظیر زاچتی[3] و همکاران (۲۰۱۹) راهبرد منحصر به فرد مدیریت پسماندها رادیواکتیو را پیشنهاد می‌دهند. این استراتژی اجتناب از دفن زیرزمینی و به حداکثر رساندن بازیافت و استفاده مجدد از مواد فعال، و فروش مجدد مواد بازیافتی در بازارهای تجاری است. اگرچه که مشکلات فناوری و کمبود پیشرفت‌های تحقیقاتی در این زمینه را نیز خاطر نشان می‌کنند، بسیاری دیگر از محققین در مطالعات خود مطرح می‌نمایند که اگرچه پسماندهای خطرناک و رادیواکتیو به روش‌های مختلفی مدیریت می‌شوند، اما به عنوان آخرین راهکار، طراحی تجویزی و اقتضایی محل‌های دفن پسماند می‌تواند به کاهش خطرات طولانی مدت کمک کند (Tauxe, 2015). همچنین تائوس[4] (۲۰۱۵) در مطالعه خود با عنوان دفن پسماندهای رادیواکتیو و حفاظت از نسل‌های آتی تصریح می‌کند که رویکردی عملی همراه با ارزیابی ریسک و پیش‌بینی خطرات احتمالی می‌تواند در کاهش پیامدهای ناگوار آتی موثر واقع شود. اگرچه این رویکرد با عدم قطعیت همراه است اما قابلیت پیش‌بینی و زمان‌بندی اوج خطرزایی را برای موقعیت‌های خاص فراهم می‌آورد (Poškas et al., 2019). مرور بر مطالعات بر این مهم تأکید دارند که اتخاذ روش‌های مدیریتی صحیح در جهت کمینه‌سازی اثرات مخرب تشعشعات رادیواکتیو، مکان‌یابی صحیح، طراحی بهینه محل‌های دفن، ارزیابی ریسک و پیش‌بینی خطرات احتمالی می‌تواند تضمینی برای حفظ سلامت انسان و محیط‌زیست در طولانی مدت باشد. با توجه به اینکه پسماندهای رادیواکتیو بر اساس ویژگی‌های مختلف اعم از نوع پسماند، شدت تشعشعات ساطع شده، طول عمر پسماند و... می‌تواند خطرناک متنوع طولانی مدت را حتی بعد فرآیند دفن، متوجه انسان و محیط‌زیست نمایند، از این‌رو عوامل محیطی و ملاحظات مهندسی در مکان‌یابی سایت و طراحی سازه‌های بهینه برای دفن پسماندهای رادیواکتیو از اهمیت بسزایی برخورداراست. بر این اساس در مطالعه

[1]. International Atomic Energy Agency
[2]. Resource Conservation and Recovery
[3]. Zucchetti
[4]. Tauxe

حاضر ضمن مرور بر پسماندهای رادیواکتیو، اصول و فرآیندهای مدیریت پسماندهای رادیواکتیو مورد بررسی قرار گرفته و بر اهمیت طراحی مکان‌های دفن و اتخاذ سیستم موانع چندگانه مهندسی-طبیعی در راستای مدیریت و دفن بهینه پسماندهای رادیواکتیو به منظور کاهش اثرات منفی بر اساس و محیط‌زیست تأکید می‌شود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق از نوع کیفی و مبتنی بر تحلیل محتوا است و از رویکرد توصیفی -تحلیلی برای توصیف و ارزیابی محتوای اسناد و مدارک مرتبط با موضوع هدف استفاده می‌شود. از این‌رو با مروری بر مطالعات انجام یافته در زمینه پسماندهای رادیواکتیو، به تحلیل و واکاوی ویژگی‌های این نوع پسماندها پرداخته شده و با اتخاذ دیدگاه کل‌نگر و جامع سعی در ارائه راهبردهایی در کاهش اثرات سوء در فرآیند مدیریت پسماندهای رادیواکتیو دارد. ابزار جمع‌آوری اطلاعات، مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی منابع مکتوب، اسناد و تحقیقات پیشین است. برای یافتن مستندات مرتبط با نگارش مقاله در پایگاه‌های اطلاعاتی نظیر Science Direct، Scopus، ProQuest ، Web of Science، با استفاده ازکلمات کلیدی نظیر پسماند رادیواکتیو، مدیریت و پایداری، جستجو انجام می شود. اسناد و مدارک حاصله بر اساس عوامل

- طبقه‌بندی پسماندهای رادیواکتیو بر اساس طول عمر، سطح تشعشعات و...
- اصول بنیادین مدیریت پسماندهای رادیواکتیو بر اساس حفاظت انسان، محیط‌زیست، نسل امروز و آتی و...
- فرآیندهای بنیادین مدیریت پسماندهای رادیواکتیو
- عوامل موثر در مکان‌یابی سایت‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو
- فرآیندهای دفن و انهدام پسماندهای رادیواکتیو
- طراحی سازه‌های متنوع به منظور دفن ایمن پسماندهای رادیواکتیو

فیش‌برداری و کدگذاری می‌شود. سپس با استفاده از روش تحلیل محتوا، به تحلیل روابط بین عناصر و متغیرهای مستخرج و ارائه راهبردهای مناسب در مدیریت بهینه پسماندهای رادیواکتیو پرداخته می‌شود. نتایج مطالعه جنبهٔ کاربردی دارد که می‌تواند در تصمیم-گیری‌ها، سیاست‌گذاری‌ها و همچنین برنامه‌ریزی‌ها به منظور کاهش اثرات سوء پسماندهای رادیواکتیو مورد استفاده قرار گیرد.

مفاهیم و مبانی نظری

➢ طبقه‌بندی پسماندهای رادیواکتیو

طبقه‌بندی پسماندهای رادیواکتیو از کشوری به کشور دیگر متفاوت است، اما پس از چندین دهه توسعه، روش‌های طبقه‌بندی بر اساس فرم و سطح تشعشعات ساطع شده مقرر شده است. به طور کلی پسماندهای رادیواکتیو را بر اساس فرم و شکل می‌توان به انواع جامد، مایع و گازی شکل طبقه‌بندی کرد (Wang et al., 2010). همچنین طبقات بر اساس سطح تشعشعات اتمی عبارتند از: (Wang et al., 2010; ; IAEA, 2011; 2014)

- **پسماندهای با سطح بسیار پایین:** VLLW[1]: پسماندهایی که می‌توانند همانند پسماند معمولی با ایمنی دفن شوند. چنین پسماندهایی نیاز به طراحی خاص برای دفن ندارند.

- **پسماندهای سطح پایین:** LLW[2]: این پسماندها از نوع بی‌خطرترین مواد رادیواکتیو هستند که مدت زمان بسیار کوتاهی توانایی تشعشع دارند. این زباله‌ها آن‌گونه نیستند که مانند پسماندهای عادی با آنها برخورد شود، از این‌رو این نوع پسماندها معمولاً سوزانده می‌شوند و در عمق کم دریا یا خشکی دفن می‌شوند.

- **پسماندهای سطح متوسط**: ILW[1]: این دسته از پسماندها شامل موادی مانند پساب‌های شیمیایی، روکش فلزی. سوخت‌ها و بسیاری از مواد زائد نیروگاه‌های اتمی هستند. این نوع مواد دارای عمر کوتاه تشعشع هستند، لذا لازم است که توسط پوشش‌های مخصوص محافظت شوند، چراکه در عمر محدود خود تشعشع قابل توجه دارند.

[1]. Very Low Level Waste
[2]. Low Level Waste

- **پسماندهای سطح بالا**: HLW[۲]: پسماندهایی که در آنها ممکن است دما درنتیجه رادیواکتیویته به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد و لذا لازم است این عامل در طراحی انبار و تأسیسات دفن آنها مدنظر قرار گیرد.

➢ اصول مدیریت پسماندهای رادیواکتیو

مدیریت صحیح پسماند رادیواکتیو چالشی حیاتی برای جامعه جهانی است. گزینه‌های مدیریتی با توجه به ماهیت مواد رادیواکتیو انتخاب می‌شود که شامل انواع رادیونوکلئیدها، حجم مواد، نوع فعالیت، نیمه عمر و غیره است. اگرچه حجم پسماندهای رادیواکتیو اندک است، ولی خطر آنها به مراتب بیشتر از سوخت‌های فسیلی و مراقبت از آنها ضرورتی‌تر و دشوارتر است (Chapman & Hooper, 2012). کشورهای متنوع اصول مدیریت خاص خود را در روند مدیریت پسماندهای رادیواکتیو اتخاذ می‌کنند، اما در اصول، همه آنها مشترک هستند. به طور کلی، اصول بنیادین مطرح در مدیریت پسماندهایرادیواکتیو عبارتند از (Salama et al., 2015):

- ✓ حفاظت از سلامت انسان: مدیریت پسماند هسته‌ای باید از سلامت انسان تا حد قابل قبولی محافظت کند.
- ✓ حفاظت از محیط‌زیست: مدیریت پسماند هسته‌ای در واقع باید از محیط‌زیست تا حد قابل قبولی محافظت کند.
- ✓ حفاظت از سلامت انسان و محیط‌زیست در مرزهای فراملی: مدیریت پسماند هسته‌ای هنگام انتقال از مرزهای ملی باید تأثیر آن بر سلامت انسان و محیط‌زیست مورد واکاوی قرار گیرد.
- ✓ حفاظت از نسل‌های آتی و حداقل‌سازی تاثیرات منفی بر آیندگان: مدیریت پسماند هسته‌ای باید اطمینان حاصل کند که خطرات سلامتی برای نسل‌های آینده را کاهش داده است و درمان فعلی بهینه با حداکثر اطمینان، حداقل بار اضافی برای نسل‌های آینده، قابلیت اجرایی بالا را تضمین نماید.
- ✓ حمایت توسط چارچوب قانونی ملی: مدیریت پسماند هسته‌ای باید توسط چارچوب قانونی ملی پشتیبانی شود.
- ✓ کنترل تولید پسماندهای هسته‌ای: تولید پسماندهای هسته‌ای باید به طور منطقی به حداقل برسد.
- ✓ ایمنی تأسیسات: لازم است به طور مناسبی نسبت به ایمنی تأسیسات مدیریت پسماند رادیواکتیو، در طول دوره کاری آنها اطمینان حاصل شود.
- ✓ مکان‌یابی بهینه دفن پسماندهای هسته‌ای و طراحی صحیح لندفیل: به گونه‌ای که همراه با ارزیابی ریسک در جهت کاهش خطرات طولانی مدت باشد.

➢ فرآیندهای بنیادین مدیریت پسماندهای رادیواکتیو

مراحل اصلی مدیریت پسماند رادیواکتیو شامل پیش آمایش، آمایش، تثبیت، انبارش و دفن است. وقتی هر مرحله اثراتی بر مراحل دیگر دارد رویکردی کل‌نگر لازم می‌شود. تصمیمی که برای مدیریت پسماند رادیواکتیو در یک مرحله اتخاذ می‌شود، ممکن است شیوه‌های جایگزین برای آن مرحله را مسدود کند یا در غیر این صورت بر مرحله بعدی اثر بگذارد. چنین تصمیماتی باید سازگار با ملزومات ایمنی برای دفن پسماند باشد. به علاوه، ارتباطی بین مراحل مدیریت پسماند و عملیاتی که تولید پسماند رادیواکتیو یا مواد قابل بازیافت می‌کند، وجود دارد (ICRP, 1977). فرآوری مجدد سوخت هسته‌ای مصرف شده، فرآیندی است که امکان بازیابی مجدد موادی مانند اورانیوم و پلوتونیوم را برای سوخت جدید در آینده فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، فرآوری تکنیکی است که بسیاری از کشورها به جای دفن برای پسماندهای خود در نظر می‌گیرند. پردازش فیزیکی و شیمیایی سوخت هسته‌ای مصرف شده برای جدا کردن اجزای تشکیل‌دهنده آن (اورانیم، محصولات شکافت و پلوتونیم) باز فرآوری نامیده می‌شود. اما متأسفانه، پردازش مجدد سوخت هسته‌ای مصرف شده هزینه‌های زیادی را به همراه دارد و مقادیر قابل توجهی پسماند رادیواکتیو نیز تولید می‌کند (Choi, 2016). بنابراین، ذخیره و مدیریت پسماند رادیواکتیو و فاضلاب آغشته به مواد رادیواکتیو به یک مسئله اساسی تبدیل شده است. به طور معمول، قبل از حمل و نقل، دوره ذخیره‌سازی در امکانات موقت برای خنک‌سازی و کاهش رادیواکتیویته مورد نیاز است. فارغ از راهبردهای اتخاذ شده توسط کشورها، اعم از پردازش مجدد و بازیافت، یا دفن مستقیم، هر دو روش نیازمند امکانات دفن زمینی[۳] است. حتی در چنین شرایطی پسماندهای رادیواکتیو تولید شده باید به خوبی مدیریت شده و به درستی در مکان‌های ویژه دفن شوند، تا یک فرآیند ایمن و سازگار با محیط‌زیست

---

[1]. Intermediate Level Waste
[2]. High Level Waste
[3]. Geological Disposal Facility

صورت گیرد (Beken, 2010). در چنین شرایطی نتایج تحقیقات پس سال‌ها پایش و ارزیابی ریسک بر ایمنی و سازگاری با عوامل محیط‌زیست سایت‌های مجهز به تأسیسات ذخیره‌سازی پسماندهای رادیواکتیو، حکایت دارد (Lavrentyeva, 2019).
با مروری بر مطالعات انجام شده توسط اوجوان[1] و همکاران (۲۰۱۹)، کالیر[2] و همکاران (۲۰۱۴)، اوجوان و لی[3] (۲۰۱۱)، وانسی و پریرا[4](۲۰۰۹) روش‌های مدیریت و تثبیت پسماندهای رادیواکتیو به صورت زیر قابل طبقه‌بندی است.

❖ پیش آمایش

پیش آمایش اولین مرحله مدیریت پسماند پس از تولید آن است و شامل مراحل زیر است:

- ✓ جمع‌آوری: در این مرحله پسماندها جمع‌آوری شده و به طور موقت تا زمان جداسازی و آمایش نگهداری می‌شود.
- ✓ جداسازی: پسماندهای معاف جداسازی شده و باقی‌مانده پسماندها بر اساس میزان و نوع آلودگی جنس و ترکیب شیمیایی جداسازی می‌شوند. فرآیند جداسازی ترجیحاً در محل تولید پسماند انجام می‌شود تا پرتوگیری و اختلاط پسماندها به کمترین مقدار ممکن برسد.
- ✓ تنظیم شیمیایی: برای انبارش موقت، حمل و نقل و نیز آمایش پسماندها ضروری است و شامل فرآیندهایی نظیر اصلاح اسیدی یا قلیایی، حذف مواد خاص (مانند حذف آمونیاک و...)، تخریب مواد مزاحم (تخریب اگزالات موجود در پسماندها)، تخریب الکترولیتیکی اسیدهای آلی مانند اگزالیک اسید برای کاهش خوردگی.
- ✓ رفع آلودگی: پسماندهایی که قابلیت رفع آلودگی دارند در این مرحله حذف می‌شوند و حجم پسماندهای رادیواکتیو کاهش می‌یابد. اهداف آن عبارتند از: کاهش تابش پرتو از محل‌های آلوده شده، کاهش حجم پسماند تولید شده، کاهش تجهیزات آلوده، کنترل آلودگی و جلوگیری از گسترش آلودگی، امکان استفاده مجدد از وسایل و تجهیزات روش‌های رفع آلودگی به دو روش کلی شیمیایی (نظیر اسیدهای معدنی قوی، اسیدهای آلی، نمک‌های باز و قلیایی، معرف‌های کمپلکس‌ساز، شوینده‌ها و...) و فیزیکی-مکانیکی (اولتراسونیک، شستشو با آب پرفشار[5]، سایش، روش‌های پلاستینگ، پاشیدن پر فشار فرئون، پاشیدن آب پر فشار[6]، شکافت، الکتروپولیشینگ، ذوب، رفع آلودگی از بتن، روش‌های ترکیبی شیمیایی-مکانیکی، سایش نوری، سایش مایکرو ویو و...
- ✓ کاهش اندازه و بسته‌بندی: لازم به ذکر است که کاهش اندازه و بسته‌بندی نیز، دو مرحله مجزا در پیش آمایش به حساب می‌آیند. کاهش اندازه برای تسهیل بسته‌بندی و کاهش هزینه‌های حمل و نقل و یا برای آماده کردن پسماند برای آمایش بعدی به کار می‌رود.

❖ آمایش

پسماندهای رادیواکتیو که در قسمت‌های مختلف تولید می‌شوند دارای خواص فیزیکی، شیمیایی و رادیولوژیکی متفاوتی می‌باشند. جهت جلوگیری از پخش و انتشار غیرمتعارف مواد پرتوزا در محیط‌زیست و آلودگی تأسیسات، لازم است پسماندهای رادیواکتیو به تناسب خواص مختلفی که دارند، مورد عملیات و فرآیندهای متفاوتی قرار گیرند.

- **آمایش پسماندهای گازی شکل:** پسماندهای گازی شکل که در مراحل مختلف فعالیت‌های هسته‌ای تولید می‌شوند به روش‌های زیر آمایش می‌شوند.

- ✓ تصفیه گازها از طریق عبور از فیلترها، این فیلترها ذرات جامد موجود در هوا را جدا می‌نمایند.
- ✓ شستشوی گازها با محلول های شستشو دهنده
- ✓ جذب گازها بر روی مواد جاذب مانند ذغال فعال
- ✓ جدا کردن گازهای پرتوزا به روش تقطیر در درجات حرارت پایین، گازهای نادر و بخصوص کریپتون

---

[1]. Ojovan
[2]. Collier
[3]. Ojovan & Lee
[4]. Vance & Perera
[5]. Flushing
[6]. Water jet

در کلیه روش‌های ذکر شده پسماندهای گازی شکل پس از انجام عملیات به داخل دودکش‌هایی که در داخل آنها نیز فیلترها و تله‌های مخصوص برای جذب هسته‌های پرتوزا خاص تعبیه شده است هدایت می‌شوند و نهایتاً پس از کنترل و اطمینان از سطح پرتوزایی قابل قبول آن ها در محیط تخلیه می‌شود.

- **آمایش پسماندهای جامد**: روش های متداول برای آمایش این پسماندها عبارتند از:

الف) قطعه قطعه کردن: بعضی از تجهیزات آلوده و یا قطعات بزرگ پسماندها بایستی قبل از جداسازی و انجام عملیات دیگر به قطعات کوچکتر تبدیل شوند.

ب) سوزاندن: پسماندهایی که قابل سوزاندن می‌باشند پس از جداسازی، در دستگاهی به نام زباله سوز اتمی سوزانده می‌شوند. با این روش حجم پسماند به میزان قابل توجهی کاهش یافته و تبدیل به خاکستر با حجم بسیار کم اما پرتوزایی بیشتر می‌شود. خاکستر حاصل را باید با تثبیت در مواد مناسب مانند سیمان، قیر، شیشه، با اطمینان به مدت طولانی نگهداری کرد.

ج) متراکم کردن: با این روش که در دستگاهی به نام متراکم کننده انجام می‌شود پسماندها توسط یک پرس هیدرولیکی فشرده می‌شوند و حجم آنها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که عملیات نگهداری و دفع آن‌ها را تسهیل می‌کند.

- **آمایش پسماندهای مایع**

از نقطه نظر کمی معمولاً پسماندهای جامد را می‌توان قبل از انجام هر گونه عملیات موقتاً انبار و نگهداری کرد، حال اینکه مقادیر زیادی از پسماندهای مایع را نمی‌توان برای مدت زمان طولانی انبار کرد. این گونه پسماندها با پرتوزایی بالا را با مواد مناسب تثبیت و جامدسازی کرده و سپس در محل‌های مطمئن، دفن و نگهداری طولانی مدت می‌کنند. روش‌های مورد استفاده برای جامدسازی پسماندها عبارتند از: تبدیل مواد زائد رادیواکتیو به پودر از طریق حرارت دادن پسماند و نگهداری پودر یا خاکستر، و جامدسازی است.

❖ تثبیت پسماند

پسماند خام را که معمولاً حاوی آلاینده‌های سیار است، به شکلی جامد یا پایدار تبدیل می‌کنند. تثبیت پسماند این امکان را پدید می‌آورد که بتوان آن را جابه جا، انبارش و به طرز ایمن و مناسبی دفن کرد که به میزان بسیار زیادی خطر رهاسازی هسته‌های پرتوزا به محیط زیست را کاهش می‌دهد. برای انبارش دراز مدت و دفن، تثبیت پسماند می‌بایست فرآیندی برگشت ناپذیر باشد، تا از رهاسازی آلاینده‌ها از بافت پسماند طی مدت نگهداری و دفن جلوگیری کند. انتخاب فن‌آوری تثبیت به طبیعت فیزیکی و شیمیایی پسماند و معیار پذیرش برای انبارش دراز مدت و امکان دفن پسماند ارسال شده بستگی دارد

- ✓ تثبیت در سیمان‌های هیدرولیک: سیمان‌های هیدرولیک مواد معدنی هستند که تحت شرایط محیطی، دارای توانایی واکنش با آب برای تشکیل محصول محکم و مقاوم به آب هستند.
- ✓ تثبیت در قیر: فرونشانی پسماندهای پرتوزا در قیر به منظور تثبیت آنها
- ✓ تثبیت در شیشه: شیشه‌ای کردن شامل ذوب مواد پسماند همراه با افزودنی به منظور تشکیل محصول شیشه‌ای است، به گونه‌ای که پسماند را در ساختار شیشه جای گیرد.
- ✓ تثبیت در سرامیک
- ✓ تثبیت در پلیمر

❖ مکان‌یابی سایت دفن پسماندهای رادیواکتیو

انتخاب سایت یکی از مراحل بسیار مهم برای ساخت یک مرکز انهدام است. سایت منتخب می‌باید پایدار باشد که در کنار ویژگی‌های طولانی‌مدت بتواند از جوامع انسانی و همچنین محیط‌زیست محافظت کند و از نظر اقتصادی کارآمد باشد (Ismail & Manaf,

(2013نتایج مطالعات محققان مختلف نظیر گویجون[1] و همکاران (۲۰۰۹) در زمینه ویژگی‌های سازندهای نمکی و رفتار خود آب‌بندی نمک به منظور دفن پسماندهای رادیواکتیو سطح بالا نشانگر آن است که سنگ نمک به دلیل داشتن تخلخل کم، تعداد شکاف اندک، نفوذپذیری اندک، نرخ خزش بالا، و خاصیت خود ترمیمی برای دفن پسماندهای اتمی بسیار مناسب است (Guijun et al., 2009). برومند و همکاران (۲۰۰۸) شرایط زمین‌شناسی، هیدرولوژی منطقه، دسترسی و توزیع جمعیت را به عنوان مهمترین عوامل موثر در مکان‌یابی محل‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو نتیجه گرفتند. رضایی محمدی و همکاران (۲۰۱۴) مهمترین عوامل موثر را شرایط توپوگرافی و شیب زمین، ویژگی‌های زمین‌شناسی، گسل‌ها، منابع آبی، مناطق حفاظت شده، دسترسی و فواصل از جاده معرفی کردند. در بعد اجتماعی محققانی نظیر رامانا[2] (۲۰۱۳)، یانو[3](۲۰۱۸)، تانتائو و ویشانو[4] (۲۰۲۰) بدین دیدگاه دست یافتند که میزان اطلاعات و آگاهی از خطرات، نگرش افراد، میزان حمایت‌های اقتصادی، اجتماعی، اعتقادات و دیدگاه‌ها نسبت به تکنولوژی‌های هسته‌ای همگی در میزان پذیرش عمومی در مورد مکان‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو بسیار حائز اهمیت است. سکیب[5] و همکاران (۲۰۲۰) ضمن بررسی عوامل موثر بر مکان‌یابی محل‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو به این نتیجه دست یافتند که عوامل زمین‌شناسی (شرایط لرزه‌خیزی، وجود گسل‌ها و...)، هیدرولوژی (جریان آب‌های سطحی و رودخانه، سطح سفره‌های آب‌زیرزمینی، دریاچه و...)، اقلیم‌شناسی (میزان بارش، سرعت باد، رگبار،...)، خاک‌شناسی (نفوذپذیری، کیفیت پوشش سطحی خاک و..)، کاربری اراضی (کاربری جنگلی، کشاورزی، و...)، اقتصادی-اجتماعی (تراکم جمعیت، حمل و نقل، فرودگاه، ریل راه‌آهن و...) از عوامل مهم در مکان‌یابی دفن پسماندهای رادیواکتیو محسوب می‌شود. از این‌رو مهمترین عوامل موثر در مکان‌یابی دفن پسماندهای رادیواکتیو در ابعاد مختلف جغرافیایی، اکولوژیکی، اجتماعی، و اقتصادی و عوامل متعدد قابل استنتاج است.

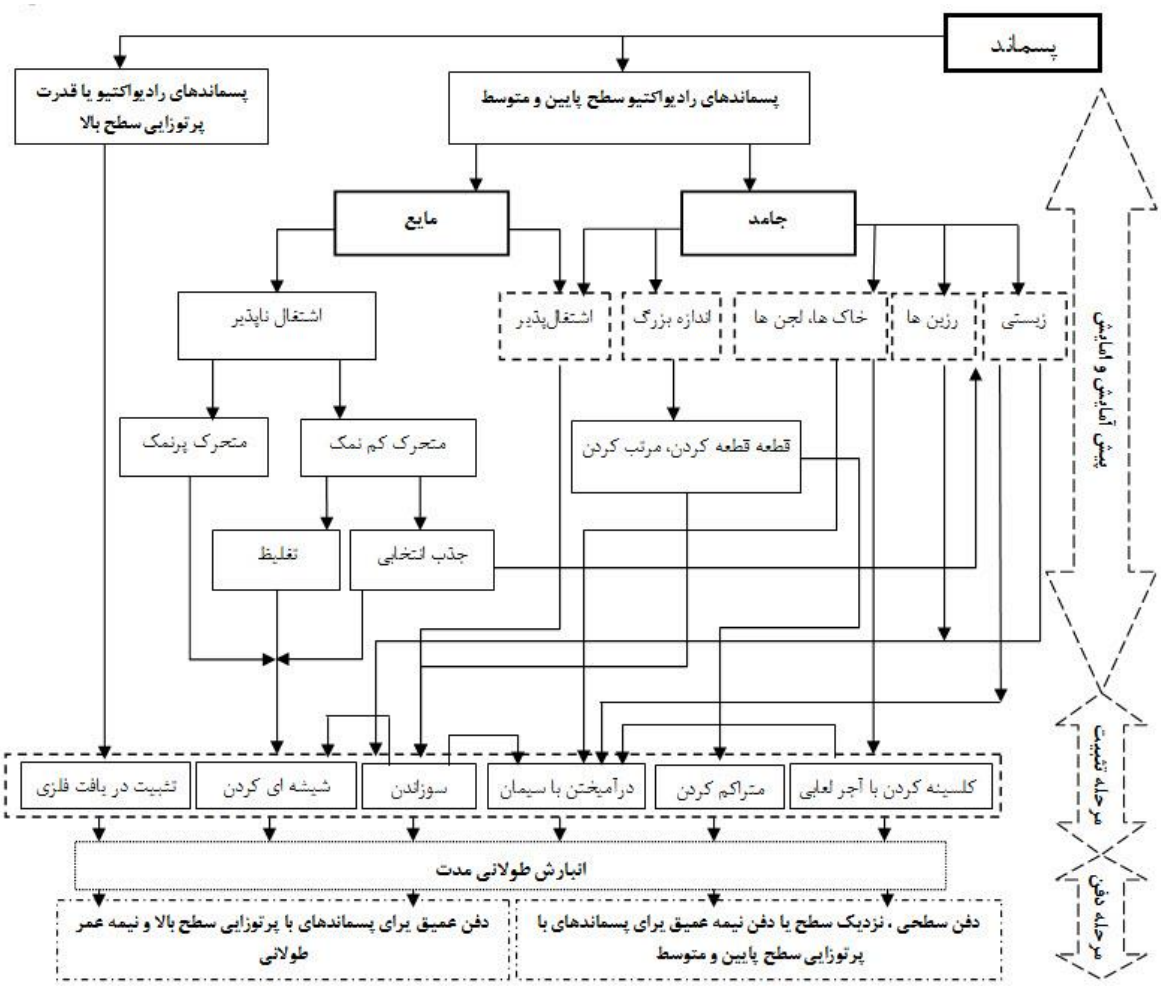
- عوامل زمین‌شناسی (شرایط لرزه‌خیزی، وجود گسل‌ها، سازندهای نمکی و...)،
- عوامل هیدرولوژی (جریان آب‌های سطحی و رودخانه، سطح سفره‌های آب‌زیرزمینی، دریاچه و...)،
- عوامل اقلیم‌شناسی (میزان بارش، سرعت باد، جهت وزش باد، رگبار،...)،
- عوامل خاک‌شناسی (نفوذپذیری، تخلخل، بافت خاک، کیفیت پوشش سطحی خاک، فرسایش پذیری خاک و..)
- عوامل کاربری اراضی (کاربری جنگلی، کشاورزی، و حمل و نقل، فرودگاه، ریل راه‌آهن و.....)،
- عوامل اقتصادی-اجتماعی (تراکم جمعیت، پذیرش اجتماعی، میزان آگاهی و اطلاعات از پیامدهای خطرات و امکان ریسک)
- عوامل ژئومورفوژیکی منطقه (شیب، جهت، ارتفاع و...)
- عوامل دسترسی (فواصل از جاده‌های اصلی و فرعی و...)

❖ دفن پسماند

دفن[6] پسماند آخرین مرحلهٔ مدیریت پسماند است و به طور ایده‌آل شامل قراردادن پسماند رادیواکتیو در یک محل دفن اختصاصی است. روش‌های مختلف دفن، مانند دفن در اقیانوس، دفن در فضا، دفن در زیر زمین، دفن در لایه‌های یخی، دفن در سازندهای نمکی و... برای دفن مواد زائد رادیواکتیو در سطح بالا استفاده شده‌است (Fentiman et al., 2014; Brunnengräber, 2019) که هریک معایب و مزایای مربوط به خود را دارند. اصطلاح "دفن" به محل قرار دادن پسماند رادیواکتیو در یک تأسیسات یا مکانی بدون قصد بازیابی پسماند گفته می‌شود. با توجه به مفاهیم مطرح شده، گراف شماره ۱ به اختصار فرآیند مدیریت پسماندهای رادیواکتیو را به تصویر می‌کشد.

---

1. Guijun
2. Ramana
3. Yano
4. Tantau & Vitioanu
5. Sakib
6. Disposal



شکل (۱): فرآیند مدیریت پسماندهای رادیواکتیو (Yun et al., 2013)

با توجه به اثرات آلایندگی پسماندهای رادیواکتیو، سازه‌های متنوع در اعماق مختلف زمین مانند سطح زمین، دفن در عمق متوسط و یا زیاد زمین در نظر گرفته می‌شود. روش‌های عمومی برای دفن پسماندهای رادیواکتیو سطح پایین در نزدیک سطح را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد (Mohamed & Paleologos, 2018)

الف) گودال‌های سرپوشیده[1]: این تکنیک قدیمی‌ترین و ساده‌ترین مفهوم دفع است و شامل قرار دادن پسماند در حفره‌های زمین و پوشاندن آن با خاک است (A)

ب) اتاقک‌های سربسته[2]: شامل اتاقک‌های بتنی است که پسماندهای بسته‌بندی شده و یا تصفیه شده در آن قرار می‌گیرد. حفره‌ها ممکن است توسط آسفالت و سایر مواد عایق مهر و موم شود. سپس کل ساختار توسط کلاهک خاکی محافظت می‌شود (B)

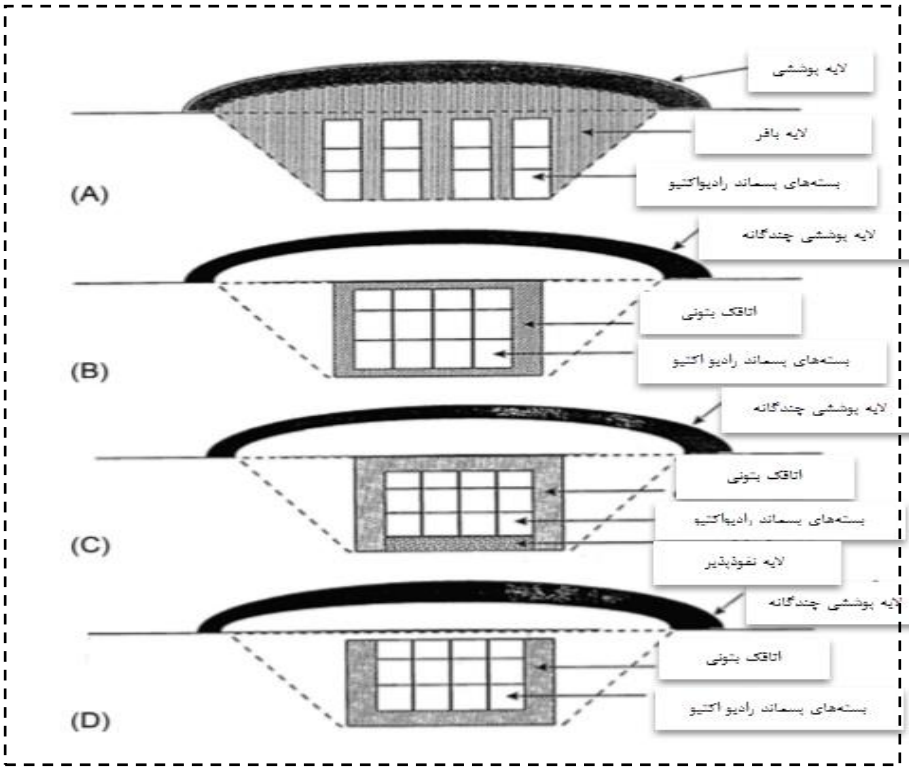
ج) اتاقک گنبدی[3]: در این طرح با قرار دادن پسماند در یک لایه خشک نفوذپذیر و پوشاندن ضایعات با سقف بتونی غیر قابل نفوذ که متعاقباً توسط کلاهک خاکی محافظت می‌شود، نفوذ کنترل می‌شود (C)

د) اتاقک‌های سرباز[4]: در این روش، کلاهک خاکی بر روی طاق اتاقک بدون قرار دادن دال بتونی قرار می‌گیرد. این کلاهک به گونه‌ای طراحی شده است که تمامی اتاقک را پوشش دهد (D).

طبقه‌بندی مذکور گواهی بر این مهم است که استفاده از موانع متنوع همراه با ساختار و عملکرد مختلف می‌تواند اهمیت قابل توجهی بر پایداری سایت‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو و کاهش تأثیرات منفی آن بر جای گذارد.

---

1. Covered trench
2. Closed vault
3. Domed vault
4. Open vault



شکل (۲): روش‌های عمومی برای دفن پسماندهای رادیواکتیو سطح پایین در نزدیک سطح زمین (Mohamed & Paleologos, 2018)

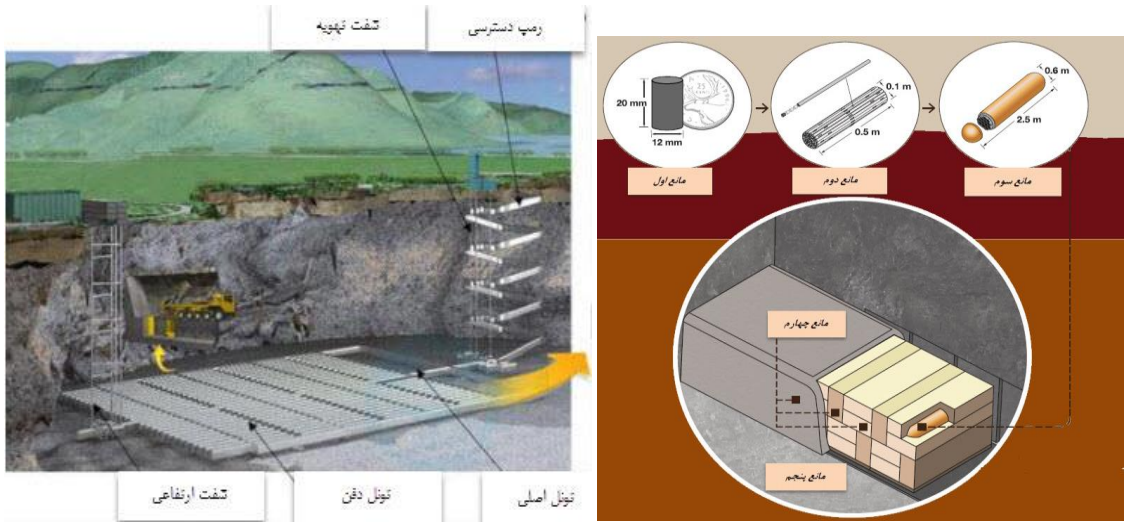
یافته‌های پژوهش

در کنار تکنیک‌های دفن سطحی و نیمه عمیق، روش دفن عمیق زیرزمینی به عنوان بهترین راه‌حل از لحاظ تکنیک فنی، هزینه، ایمنی و اثرات محیطی، برای پسماندهای سطح بالا و پسماندهای با عمر طولانی قابل ذکر است (Rempe, 2007). اصل فرآیند دفن زمینی پسماندهای هسته‌ای (بطور مثال سوخت مصرف شده رآکتور، پسماندهای سطح متوسط و بالا، رادیونوکلئیدهای با عمر طولانی و ...) این است که بسته‌های آماده شده پسماند ها بطور دقیق و به گونه‌ای در تونل‌های عمیق حفر شده در سازندهای زمینی مثل سنگ نمک، سنگ سخت (آذرین و ...)، سنگ‌رس و غیره قرار داده شوند. این مفهوم بر استفاده از سیستم موانع چندگانه (MBS[1]) تأکید دارد که شامل ترکیبی از موانع طبیعی و سیستم موانع مهندسی[2] است. سیستم موانع چندگانه شامل پالت سوختی، عناصر و بسته‌های سوختی، نگهدارنده سوختی، رس بنتونیت و زمین‌کره است که به اختصار تشریح می‌شود (Streimikiene, 2012; Chapman (& Hooper; Sellin & Leupin, 2013; Freiesleben, 2013).

- پالت سوخت[3]: اولین مانع در سیستم موانع چندگانه، پالت سوخت است. پالت‌های سوخت از پودر دی‌اکسید اورانیوم ساخته می‌شوند که ضمن پخت در کوره، به سرامیکی سخت با چگالی بالا تبدیل می‌شوند. سرامیکی بسیار بادوام که به راحتی در آب حل نمی‌شوند و مقاومت در برابر سایش و دمای بالا آن را به یکی از با دوام‌ترین مواد مهندسی تبدیل کرده است.
- عناصر و بسته‌های سوخت[4]: هر بسته سوخت متشکل از تعدادی لوله مهر و موم شده است که عناصر سوخت نامیده می‌شوند. عناصر سوخت حاوی پلت‌های سوخت هستند و برای محافظت در برابر خوردگی از فلزی مقاوم پوشیده می‌شوند. عملکرد هر عنصر محافظت و ایزوله کردن پلت‌های سوخت است.

1. Multiple Barrier System
2. Engineered barrier system
3. Fuel Pellet
4. Fuel Element & Fuel Bundle

- نگهدارنده سوخت[1]: محافظ یا نگهدارنده سوختی از فرار رادیونوکلئیدهای موجود در سوخت به محیط زیرزمینی جلوگیری می‌کند. محافظ زمینه‌ای را برای انزوای کامل بسته‌های سوختی فراهم می‌آورد تا جایی که میزان رادیواکتیویته سوخت به سطح اورانیوم طبیعی کاهش یابد. هر محافظ، ۴۸ بسته سوخت استفاده شده را در سبدی فولادی درون یک لوله فولادی کربنی نگهداری می‌کند. این لوله فولادی دارای مقاومت مکانیکی زیاد در برابر فشارهای سنگ‌های پوشاننده و یخچال‌های طبیعی به ضخامت سه کیلومتر است. این لوله توسط پوشش مسی مقاوم در برابر خوردگی، محافظت می‌شود. محافظ دارای سری کروی است که به بخش مرکزی جوش داده می‌شود. این شکل کروی برای مقاومت در برابر فشار قابل توجه، طراحی می‌شود.
- رس بنتونیت[2]: در هنگام قرار دادن در مخزن، هر نگهدارنده سوخت هسته‌ای، در یک جعبه بافر رس بنتونیت فشرده، محفوظ می‌شود. رس بنتونیت ماده‌ای طبیعی از خاکستر آتشفشانی و مانعی قدرتمند در برابر جریان آب است. به گونه‌ای که در معرض آب متورم به ماده غیرقابل نفوذ عالی تبدیل می‌شود. همچنین خواص شیمیایی خاک رس بنتونیت، در به دام انداختن هرگونه رادیونوکلئید در یک احتمال غیرمترقبه بسیار کمک‌کننده است. به منظور عایق‌بندی، فضای مخزن دفن توسط بلوک‌های پیش فشرده متشکل از بنتونیت و سنگ‌های خرد شده پر می‌شود، همچنین فضای پشت بلوک‌ها تا سنگ سطحی توسط قرص‌های فشرده بنتونیت با گرانول پر می‌شود.
- زمین کره[3]: زمین کره یک سد طبیعی از سنگ تشکیل می‌دهد که از مخزن در برابر حوادث طبیعی مخرب، جریان آب و یا فعالیت‌های تخریبی انسان محافظت می‌کند. ناحیه عمیق زیرزمینی، قابلیت به وجود آوردن سیستم ایزوله طبیعی‌ای را داراست که می‌تواند برای صدها تا هزاران سال پسماند هسته‌ای سطح بالا را در خود نگه دارد. مواد رادیواکتیو با طول عمر طولانی همچنین سوخت مصرف شده رآکتورهای هسته‌ای، تنها قابلیت ذخیره شدن در مخازن زیرزمینی را دارا هستند. به این منظور می‌توان از سنگ‌های بستر کریستالی (گرانیت، گنیس)، آرژلیتی (خاک‌های رس) و یا سنگ‌های نمکی استفاده کرد. مخزن تقریباً ۵۰۰ متر در زیر زمین قرار دارد، عمق دقیق آن به محل بستگی دارد و در یک سازند سنگ رسوبی یا کریستالی که مطابق با شرایط فنی و ایمنی پروژه است، حفاری خواهد شد.



شکل ۳- سیستم‌های تکمیل‌کننده ایمنی مخازن دفن عمیق پسماندهای سطح بالا (Streimikiene, 2012; Chapman& Hooper, 2012; Sellin & Leupin, 2013; Freiesleben, 2013).

شکل (۳) سیستم‌های تکمیل‌کننده ایمنی مخازن دفن عمیق پسماندهای سطح بالا را به تصویر می‌کشد. این سیستم‌ها شامل تثبیت و جامدسازی پسماند و شکل نهایی آن است که فرم‌دهی پسماند نامیده می‌شود (Streimikiene, 2012; Chapman& Hooper, 2012; Sellin & Leupin, 2013; Freiesleben, 2013). به این معنی که در آن، پسماند در سیمان، قیر، مواد پلیمری، شیشه و سرامیک

[1]. Fuel Container
[2]. Bentonite Clay
[3]. Geosphere

جامدسازی می‌شود تا از نفوذ آنها به صورت مایع در آب‌های زیرزمینی جلوگیری شود. در مرحله بعد تشکیل کپسول است که در آن پسماندهای رادیواکتیو محصور می‌شود و مهم‌ترین مانع برای ایزوله کردن پسماند است. کپسول معمولاً از یک ظرف دو جداره با پوسته داخلی از جنس چدن و پوسته بیرونی از جنس مس تشکیل شده است، در این راستا بررسی‌هایی در زمینه مقاومت کپسول در برابر خوردگی حاصل از تنش‌های حرارتی و تغییر و تبدیل ناشی از دوز بالای تابش در مواد آهنی، که تمایل به شکنندگی را در آن‌ها سبب می‌شوند، انجام می‌گیرد. مواد بافر در اطراف کپسول برای جلوگیری از نفوذ آب‌های زیرزمینی قرار می‌گیرند و همچنین یک فیلتر کلوئیدی با جذب بالای رادیو نوکلئیدها محسوب می‌شوند و در نهایت پس از حفر تونل‌های عمیق جهت دفن پسماند از سطح و شمع نگهدارنده برای ایجاد ثبات تونل، جلوگیری از تزریق[1] مواد سطحی به تونل‌های اصلی، نگهداشتن بافر بنتونیت در محل، و جلوگیری از ورود آب به تونل استفاده می‌شود. دسترسی به سلول‌های دفن توسط دو نوع سازه صورت می‌گیرد: الف) سازه‌های ارتباط‌دهنده بین تأسیسات سطحی و تأسیسات زیرزمینی (شفت و رمپ) شفت‌ها سازه‌های عمودی هستند که به طور معمول مجهز به ماشین‌آلاتی که امکان انتقال بارها توسط قفسه‌هایی که با کابل فولادی معلق هستند، را فراهم می‌آورند. رمپ نوعی از شفت با سطح شیب‌دار هستند و به طور معمول با شیب کمتر از ۱۵٪ برای استفاده وسائل نقلیه طراحی می‌شوند ب) تونل‌های زیرزمینی اتصال و ارتباط‌دهنده (گالری). در مرحله بعد سلول‌ها و مخازن دفن وجود دارند که به همراه سیستم‌های چندگانه موانع مهندسی- طبیعی ساخته و مجهز می‌شوند.

بحث و نتیجه گیری

دفع پسماندهای رادیواکتیو به دلیل اهمیت بسیار زیاد در دستور کار سیاسی بسیاری از کشورها قرار دارد و در حالی که تجربیات قابل توجهی در مخازن عملیاتی واقع در نزدیکی سطح زمین برای پسماندهای سطح پایین و متوسط به دست آمده است، هنوز دفع عمیق پسماندهای سطح بالا در کشورهای مختلف در حال بررسی و مطالعه است. سازه‌های مخازن دفن باید با توجه به برگشت‌پذیری و قابلیت استفاده آن برای حداقل ۱۰۰ سال، طراحی شود. این سازه‌ها باید قادر به مقاومت در برابر فشار زمین که در این بازه زمانی اعمال می‌شود، باشند. در عین حال این سازه‌ها باید قابلیت بسته شدن در هر زمان دلخواه (در مراحل پی در پی و زمانی که هدف بدست آوردن مزیت‌های مدیریت انعطاف‌پذیر است) را دارا باشند. از این‌رو همانگونه که کازنتساو[2] و همکاران (۲۰۱۹)، ایتو[3] (۲۰۱۹) در نتایج خود اظهار می‌کنند، این سازه‌ها باید با ایجاد محدودیت در تغییر شکل‌های مکانیکی سنگ در طولانی مدت، محدودیت گردش آب و جداسازی مخزن دفن، ایمنی بیشتر را فراهم آورد. بر این اساس مسئله اساسی در برنامه‌های مرتبط با بهره‌برداری و توسعه مخازن زیرزمینی، نیاز به ایمنی طولانی مدت است. در هر پروژه صرف نظر از عدم قطعیت‌های ممکن، می‌باید از میزان موفقیت و یا احتمال شکست پروژه تا حد معقول اطمینان حاصل کرد. از این رو ضمن فرآیندهای آمایش و تثبیت پسماندهای خطرناک، اتخاذ سیستم موانع چندگانه مهندسی- طبیعی، طراحی برنامه‌های پایش همراه با سیستم‌های قانونی و نظارتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. مدیریت پسماندهای رادیواکتیو باید توسط قوانین، مقررات و استانداردهای صحیح مورد حمایت و پشتیبانی قرار گیرد. چارچوب قانونی به منظور صدور مجوز برای طراحی تأسیسات و سایت‌های بهینه برای نشان دادن ایمنی سیستم ضروری است، بنابراین، الزامات ارزیابی ریسک، ایمنی طولانی مدت و نظارت در مقیاس‌های زمانی مناسب باید در نظر گرفته شود. مقیاس زمانی برای نظارت، تابعی از ماهیت و عمق سیستم دفن، محیط اطراف و طول عمر مواد رادیواکتیو است. در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر، عدم اطمینان بیشتر در پیش‌بینی تکامل سیستم مهندسی و سیستم‌های طبیعی مشاهده خواهد شد و بنابراین مشکلات بیشتری در اثبات ایمنی سیستم‌های دفع وجود دارد. از این‌رو لحاظ مقیاس‌های زمانی مناسب برای پیش‌بینی و نظارت از اهمیت بسزایی برخوردار است. مطابق با یافته‌های محققانی نظیر یانو (۲۰۱۸)، تانتائو و ویشانو (۲۰۲۰) میزان اطلاعات و آگاهی از خطرات، نگرش افراد، میزان حمایت‌های اقتصادی، اجتماعی، اعتقادات و دیدگاه‌ها نسبت به تکنولوژی‌های هسته‌ای همگی در مدیریت مکان‌های دفع پسماندهای رادیواکتیو بسیار حائز اهمیت است. برای تفکیک وظایف در فرآیند پردازش، مدیریت و نظارت، باید از همکاری سازمان‌ها و ارگان‌های دولتی و شرکت‌های خصوصی استفاده کرد و تشریح مسئولیت‌های مدیریتی و تقسیم کار صورت گیرد. همان‌گونه که یافته‌های لی[4] و همکاران (۲۰۱۹)، لاورنتیوا[5] (۲۰۱۹) تأکید دارند، تقویت فعالیت‌های پژوهشی،

[1]. Extrusion
[2]. Kuznetsov
[3]. Ito
[4]. Lee
[5]. Lavrentyeva

توسعه فناوری‌های مرتبط به منظور کاهش ریسک، مکان‌یابی بهینه محل‌های دفن پسماند، طراحی سازه‌های مقاوم و برنامه‌های کنترل و نظارت می‌تواند احتمال بروز آسیب‌های سلامت و بهداشت، اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی را کاهش دهد.

منابع

Beken, T., Dorn, N., & Van Daele, S. (2010) Security risks in nuclear waste management: Exceptionalism, opaqueness and vulnerability. Journal of Environmental Management, 91, 940-948.

Bromand, M., Khamechian, M., & Nikoodel, N. (2008) Site selection for hazardous material by GIS in Zanjan. In Proceedings of the Forth Civil Engineering National Conference on Tehran. Tehran: University of Tehran, 9–15.

Brunnengräber, A. (2019) The wicked problem of long term radioactive waste governance. Conflicts, participation and acceptability in nuclear waste governance. (pp. 335–355). Wiesbaden, VS: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-27107 -7_17

Chapman, N., & Hooper, A. (2012) The disposal of radioactive wastes underground. Proceedings of the Geologists' Association, 123(1), 46-63. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.pgeola.2011.10.001

Choi, S., Nam, H., & Ko, W. (2016) Environmental life cycle risk modeling of nuclear waste recycling systems. Energy, 112, 836-851.

Collier, N., Milestone, N., Gordon, L., & Ko, S.-C. (2014) The suitability of a supersulfated cement for nuclear waste immobilisation. Journal of Nuclear Materials, 452(1-3), 457-464.

Fentiman, A.W., Jorat, M.E. & Veley R.J. (2008) What Disposal Methods are being Considered for Low-Level Radioactive Waste?", http://ohioline.osu.edu/rer-fact/.

Freiesleben, H. (2013) Final disposal of radioactive waste. Paper presented at the EPJ Web of Conferences.

IAEA. (2019) Terminology used in nuclear safety and radiation protection, IAEA Safety Glossary-2019 edition.

IAEA. (2014) Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA safety standards series no. SSG-29.

IAEA. (2011) Disposal of radioactive waste, IAEA safety standards series no. SSR-5 (2011).

IAEA. (2003) Radioactive Waste Management Glossary. Vienna.

ICRP. (1977) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication No. 26). Oxford: Pergamon Press. Annals of the ICRP, 3.

Ismail, S. N. S., & Manaf, L. A. (2013) The challenge of future landfill: A case study of Malaysia. Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences, 5(6), 86-96 .

Ito, D. (2019) Considerations on reference level and assessments of radiological consequences in emergency during transport of radioactive materials.

Kuznetsov, A. Y., Azovskov, M. E., Belousov, S. V., Vereshchagin, I. I., Efremov, A. E., & Khlebnikov ,S. V. (2019) Dismantling and decontamination of large-sized radiation-contaminated equipment during Research Building B decommissioning at the Bochvar Institute site. Nuclear Energy and Technology, 5, 117 .

Lavrentyeva, G. (2019) Assessment of radiation environmental risk for the terrestrial ecosystem. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Lee, S. H., Song, J. S., Park, B. G., & Han, H. J. (2019) A Study on the Radiological Safety Assessment Method Establishment of Recycling Workers of Very Low Level Radiological Metallic Wastes in Decommissioning Nuclear Power Plants. 한국방사성폐기물학회 학술대회, 387-388 .

Ma, Z., Gamage, R. P., Rathnaweera, T., & Kong, L. (2019) Review of application of molecular dynamic simulations in geological high-level radioactive waste disposal. Applied Clay Science, 168, 436–449.

Mohamed, A. M. O., & Paleologos, E. K. (2018) Chapter 12 - Radioactive Waste Disposal: Hosting Environment, Engineered Barriers, and Challenges. In A.-M. O. Mohamed & E. K. Paleologos (Eds.), Fundamentals of Geoenvironmental Engineering (pp. 423-457): Butterworth-Heinemann

National Resource Information Centre (NRIC). (1992) A radioactive waste repository for Australia: methods for choosing the right site.

NW, I. N. E. S. N. (2018) T-1.14 Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 20-38.

Ojovan, M. I., Lee, W. E., & Kalmykov, S. N. (2019) An introduction to nuclear waste immobilisation: Elsevier.

Ojovan, M. I., & Lee, W. E. (2011) Glassy wasteforms for nuclear waste immobilization. Metallurgical and Materials Transactions A, 42(4), 837-851

Poškas, P., Kilda, R., Šimonis, A., Jouhara, H., & Poškas, R. (2019) Disposal of very lowlevel radioactive waste: Lithuanian case on the approach and long-term safety aspects. Science of the Total Environment, 667, 464–474.

Ramana, M. (2013) Shifting strategies and precarious progress: Nuclear waste management in Canada, Energy Policy, 61, 196-206.
Rempe, N. (2007) Permanent underground repositories for radioactive waste. Progress in Nuclear Energy, 49 (5), 365–374. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.04.002.
Rezaeimahmoudi, M., Esmaeli, A., Gharegozlu, A., Shabanian, H., & Rokni, L. (2014) Application of geographical information system in disposal site selection for hazardous wastes. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 12(1), 1-6 .
Salama, A., El Amin, M. F., & Sun, S. (2015) Numerical investigation of high level nuclear waste disposal in deep anisotropic geologic repositories. Progress in Nuclear Energy, 85,747-755.
Sakib, K. N., Haydar, M. A., Khalil, M. I., Ali, M. I., Paul, D., & Alam, M. S. (2020) Disposal of Low and Intermediate Levels of Radioactive Waste in Bangladesh—An Investigation on the Selection of a Suitable Site by Using a Geographic Information System and a Multi-criteria Analysis. Journal of the Korean Physical Society, 77(3), 201-212.
Sellin, P., & Leupin, O. X. (2013) The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management–a review. Clays and Clay Minerals, 61(6), 477-498.
Streimikiene, D. (2012) Comparison of carbon dioxide and nuclear waste storage costs in Lithuania. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2434-2445.
Vance, E., & Perera, D. (2009) Geopolymers for nuclear waste immobilisation. In Geopolymers (pp. 401-420): Elsevier.
Wang, S. A., Alekseev, V., Ling. J., & et al. (2010) Chemistry of Materials, 22(6), 2155-63.
Xinglai, H. L., & Sheng, G. (2006) GIS-based Hierarchy Process for the Suitability Analysis of Nuclear Waste. Disposal Site. Environ Informat Arch, 13, 286–296.
Yano, K., Mao, K., Wharry, J., & Porterfield, M. (2018) Investing in a permanent and sustainable nuclear waste disposal solution. Progress in Nuclear Energy, 108, 474-479.
Yun, J.I., Jeong, Y., & Kim, J. (2013) Republic of Korea: experience of radioactive waste (raw) management and contaminated site clean-up. Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up, 673-696
Zhang, X., Gu, P., & Liu, Y. J. C. (2019) Decontamination of radioactive wastewater: State of the art and challenges forward. Chemosphere, 215, 543–553