

## مطالعه روش های مختلف برای دفع پسماندهای رادیواکتیو

امیر حمیدی<sup>۱\*</sup>، سیروس خزاعی<sup>۱</sup>، سعید تورچی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی تهران

\*hamidi@khu.ac.ir

### چکیده

رشد صنعتی جوامع و جستجوی منابع تازه به منظور تولید انرژی جایگزین از عواملی هستند که پژوهشگران را به سمت استفاده از انرژی هسته‌ای سوق داده است. تقریباً هر فرایندی که در آن از مواد رادیواکتیو استفاده شود، باعث تولید یکی از انواع زباله‌های هسته‌ای خواهد شد که ممکن است مایع، جامد و یا گاز باشد. در این مقاله ابتدا تعاریف کلی مربوط به زباله‌های هسته‌ای و تقسیم‌بندی آن‌ها ذکر شده است. سپس با توجه به خصوصیات هر گروه، روش‌های پیشنهاد شده تا کنون برای دفع آن‌ها بررسی و فواید و مخاطرات هر یک تشریح شده‌اند.

**کلمات کلیدی: دفع پسماند، رادیواکتیو، محیط زیست، زباله های هسته ای .**

### ۱- مقدمه

سوخخت فسیلی، انرژی غالب در بسیاری از کشورهای جهان می‌باشد. فاصله میان مقدار تولید و مصرف انرژی در جهان از یک سو و وابستگی این کشورها به منابع گران انرژی از جمله نفت و گاز طبیعی از سوی دیگر در حال افزایش است. منابع جدید انرژی می‌توانند به متعادل کردن شرایط موجود کمک کنند. استفاده از انرژی هسته‌ای به عنوان یکی از انواع انرژی‌های جایگزین، علاوه بر داشتن کاربردهای زیاد در صنعت و سایر علوم مانند پزشکی، منجر به تولید پسماند های هسته‌ای نیز خواهد شد.

یافتن روشی ایمن برای دفع چنین زباله‌هایی در دراز مدت نه فقط برای امنیت جامعه و حفاظت از محیط زیست بلکه برای ادامه فعالیت نیروگاه‌های هسته‌ای اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. به همین دلیل بسیاری از کشورها مانند فرانسه، انگلستان، سوئیس و اسپانیا برنامه‌های مختص خود را برای دفع ایمن و موثر زباله‌های هسته‌ای تدوین کرده‌اند (خزاعی س.، ۱۳۸۷) چنین امری نیازمند نگهداری و بروزرسانی فن‌آوری کنونی برای بازرسی، انتقال و دفع زباله‌ها خواهد بود. هدف از این مقاله، مروری بر انواع و روش‌های مختلف دفع زباله‌های هسته‌ای و ارزیابی آن‌ها جهت استفاده در مدیریت برنامه‌های دفع اینگونه پسماندها می‌باشد.

### ۲- تشعشع‌زایی<sup>۱</sup>

تشعشع<sup>۲</sup> یکی از انواع انرژی است که به فرم ذرات و یا امواجی که می‌توانند در فضای خالی حرکت کنند، وجود دارد. این انرژی هم در طبیعت موجود بوده و هم ممکن است توسط فعالیت‌های بشر تولید شود. اتم‌های ناپایدار یا همان ذرات رادیواکتیو در خلال تغییر برای رسیدن از حالت ناپایدار به وضعیت پایدارتر، از خود امواج یا ذرات حاوی انرژی را رها می‌کنند که به نام تشعشع خوانده می‌شوند (National Safety Council, 2001). مواد رادیواکتیو می‌توانند با حرکت در هوا و آب، زنجیره غذایی را آلوده سازند. قرار گرفتن در برابر تشعشع زیاد باعث آسیب رسیدن به بافت‌های بدن، بروز بیماری‌هایی از جمله سرطان‌های خون و ریه، تغییر سلول‌ها و نیز آسیب‌های ژنتیکی می‌شود به طوری که ممکن است نسل‌های آینده را نیز به خطر اندازد. با مدیریت صحیح و مسئولانه فعالیت‌های

<sup>1</sup> Radioactivity

<sup>2</sup> Radiation

هسته‌ای و اتخاذ روشی موثر برای دفع زباله حاصل، تا حد زیادی خطر بروز مشکلات آتی در جامعه و محیط زیست مرتفع خواهد شد.

### ۳- انواع زباله‌های هسته‌ای

به هر ماده بدون استفاده (جامد، مایع و یا گاز) از قبیل کاغذ، دستکش، تجهیزات آلوده، سوخت مصرف شده و مواد پسماند تولید که شامل ذرات رادیواکتیو باشد، زباله هسته‌ای گفته می‌شود (National Safety Council., 2002). زباله‌های هسته‌ای عموماً به هفت دسته تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی بر اساس منشأ تولید زباله و نه لزوماً سطح تشعشع‌زایی آن ارائه شده است (National Safety Council., 2005). برای مثال برخی زباله‌های سطح پایین از تشعشع‌زایی بسیار بالایی برخوردارند. زباله‌های رادیواکتیو ممکن است از چند روز تا چند هزار سال خطرناک باقی بمانند که این موضوع بستگی به نیمه عمر ماده رادیواکتیو آن‌ها دارد. در ادامه، تعریف هر یک از انواع زباله‌های هسته‌ای بیان خواهد شد.

### ۳-۱- سوخت هسته‌ای مصرف شده<sup>۱</sup> و زباله سطح بالا<sup>۲</sup>

زمانی که سوخت راکتور هسته‌ای خاصیت خود برای تولید انرژی را از دست می‌دهد، آن را از راکتور خارج می‌کنند. به این زباله جامد، سوخت هسته‌ای مصرف شده اطلاق می‌شود (National Safety Council., 2005). سوخت هسته‌ای مصرف شده را پس از تولید ابتدا مدتی در مخازن بتنی حاوی آب نگهداری می‌کنند. آب علاوه بر آنکه باعث سرد شدن زباله می‌شود، نقش محافظ در برابر تشعشع آن را نیز دارد. در بسیاری از نیروگاه‌ها که ظرفیت اینگونه استخرها پر شده‌اند، از روش‌های دیگر مانند مخازن هوای فشرده<sup>۳</sup> ساخته شده از فولاد، بتن مسلح و یا مخازن بتنی با پوشش داخلی از فولاد استفاده می‌شود.

سوخت هسته‌ای مصرف شده را پیش از دفع بازیافت می‌کنند که نتیجه این کار، بوجود آمدن زباله‌ای مایع به نام زباله سطح بالا خواهد بود. بنابراین زباله سطح بالا، حاصل طبیعی<sup>۴</sup> بازیافت سوخت هسته‌ای مصرف شده است. زباله مایع حاصل از بازیافت، به‌طور موقت در مخزن‌هایی در زیر زمین و یا در سیلوهای نگهداری می‌شود که یک نمونه از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این زباله، پیش از دفع باید به‌صورت جامد دربیاید. از فرایند جامدسازی با نام شیشه‌ای کردن<sup>۵</sup> یاد می‌شود. این کار از راه مخلوط کردن ذرات رادیواکتیو بازیافت نشده با شیشه بروسیلیکات مایع<sup>۶</sup> که دارای فرمولاسیون خاصی به همین منظور می‌باشد، انجام خواهد شد (National Safety Council., 2001). مخلوط حاصل را سرد و جامد کرده در اعماق زیاد زیر زمین دفن می‌کنند.

### ۳-۲- زباله حاصل از ساخت عناصر مصنوعی<sup>۷</sup>

این زباله بیشتر در صنایع نظامی بوجود می‌آید و نتیجه ساخت عناصر مصنوعی سنگین‌تر از اورانیوم توسط انسان است (National Safety Council., 2005) به دلیل تشعشع‌زایی زیاد، دفع آن همانند زباله‌های سطح بالا در زیر زمین صورت می‌گیرد.

<sup>1</sup> Spent Nuclear Fuel (SNF)

<sup>2</sup> High Level Waste (HLW)

<sup>3</sup> Airtight Steel Canisters

<sup>4</sup> By-product

<sup>5</sup> Vitrification

<sup>6</sup> Liquid Borosilicate Glass

<sup>7</sup> Transuranic Radioactive Wastes (TRU)



شکل ۱- مخزن های مورد استفاده برای ذخیره زباله سطح بالای مایع در سایت هانفورد در آمریکا

(<http://www.ens-newswire.com/ens/jan2006/2006-01-10-06.asp>)

### ۳-۳- زباله های سطح پایین<sup>۱</sup>

زباله هایی که در تقسیمات دیگر قرار نگیرند این دسته را تشکیل می دهند و شامل چیزهایی از قبیل کاغذ، پوشش کارگران، شیشه، پلاستیک و امثال این ها می شود. زباله های سطح پایین از نظر مقدار بیش از نود درصد و از نظر تشعشع زایی کمتر از یک درصد حجم کل زباله های هسته ای را تشکیل می دهند (Nuclear Energy Institute., 2007). معمولاً ماده رادیواکتیو آن ها کم و دارای نیمه عمر کوتاه است. آن ها را بر اساس طول عمر و غلظت به چهار دسته تقسیم می کنند (A, B, C, GTCC<sup>۲</sup>) که به عنوان مثال دسته A کمترین و دسته GTCC بیشترین غلظت و طول عمر ماده رادیواکتیو را دارد (Fentiman A.W., Jorat, M.E. and Veley R.J., 2008). این زباله ها پیش از دفع بازیافت شده، مواد رادیواکتیو آن ها از بخش غیر رادیواکتیو جدا و بخش قابل دفع آن ها متراکم می شود. نتیجه این فرایند، کاهش حجم زباله و افزایش غلظت ماده دفع شونده می باشد که نیازمند دقت در زمان دفع خواهد بود. بسیاری از زباله های این دسته، با گذشت زمانی کوتاه مثلاً چند روز و یا چند سال، از نظر تشعشع زایی به حد ایمن می رسند. به همین دلیل آن ها را می توان تا آن زمان در همان محل نگهداری و سپس با روش های ساده تر دفع کرد. برخی وسایل، فلزات و شیشه ها را می توان پاکسازی و از آن ها دوباره استفاده نمود. سوزاندن<sup>۳</sup> از دیگر روش های کاهش حجم زباله می باشد اما باعث رهاشدن تشعشع زیاد در محیط اطراف خواهد شد. به همین دلیل باید از فیلترهای مناسب برای تجهیزات استفاده شود. زباله ها را سرانجام به طور کامل بسته بندی نموده و در اعماق کم زمین دفن می کنند.

### ۳-۴- پسماند حاصل از استخراج سنگ معدن اورانیوم<sup>۴</sup>

مانند همه معادن، پس از استخراج سنگ اورانیوم قطعاتی شبیه به ماسه بوجود می آید که معمولاً شامل مواد رادیواکتیو با غلظت کم هستند (National Safety Council., 2005). آن ها را در محل معدن در سدهای باطله ذخیره می کنند تا تمهیدات لازم برایشان اندیشیده شود.

<sup>1</sup> Low Level Waste (LLW)

<sup>2</sup> Greater-Than-Class-C (GTCC)

<sup>3</sup> Incineration

<sup>4</sup> Uranium Mill Tailing

### ۳-۵- زباله‌های مرکب<sup>۱</sup>

عموما ترکیبی از زباله‌های رادیواکتیو و مواد شیمیایی صنعتی هستند که مانند زباله سطح بالا در زیر زمین دفن می‌شوند (National Safety Council., 2005). پیش از دفن باید به کمک روش‌هایی از قبیل جامدسازی<sup>۲</sup> و سوزاندن، تا حد ممکن از سمی بودن آن‌ها کاسته شود.

### ۳-۶- زباله‌های یتیم<sup>۳</sup> و تجهیزات دور ریختنی آلوده<sup>۴</sup>

این زباله‌ها معمولا از دور ریختن مواد دارای رادیواکتیو که به عنوان باطله تلقی می‌شوند بوجود می‌آیند. عموما بخش کمی از مواد رادیواکتیو به جداره وسایلی که در تجهیزات هسته‌ای استفاده می‌شوند چسبیده است. اگر چنین وسایلی به‌طور کامل دفع نشوند و یا برای بازیافت مانند زباله‌های عادی با آن‌ها برخورد شود، آلودگی ممکن است به تجهیزات بازیافت نیز راه یابد. در صورتی که زباله مذکور علامت خاصی نداشته باشد که منشا اولیه آن را مشخص کند، آن را با نام زباله یتیم می‌شناسیم. راکتور هسته‌ای که خود عامل تولید سوخت هسته‌ای مصرف شده است، پس از مدتی رادیواکتیو خواهد شد. در نتیجه باید هر چند وقت خاموش و تمیز شود و یا تا زمانی که تشعشع‌زایی آن تا حد ایمن کاهش پیدا نکرده، مهر و موم گردد. از این فرایند با نام پاک‌سازی و تعلیق<sup>۵</sup> یاد می‌شود که خود باعث تولید حجمی اضافی از زباله سطح پایین و مواد آلوده‌ای که برای دفع نیازمند توجه ویژه هستند، خواهد شد. برخی از این فلزات آلوده را ممکن است بتوان بازیافت کرده در مصارف دیگر استفاده نمود. تجهیزات دورریختنی آلوده، شامل فلزات آلوده بوجود آمده در زمان تعمیر و یا باز کردن دستگاه‌ها می‌باشند.

### ۳-۷- مواد رادیواکتیو موجود در طبیعت<sup>۶</sup> و مواد رادیواکتیو حاصل از افزایش سرعت ذرات رادیواکتیو<sup>۷</sup>

مواد رادیواکتیوی در طبیعت وجود دارد که در صورت عدم دخالت انسان برای تغییر و تبدیل آن‌ها، زباله محسوب نمی‌شوند. اثر فعالیت‌های انسانی از قبیل استخراج و بهسازی، غلظت آن‌ها بالا رفته زباله هسته‌ای تلقی می‌شوند. این مواد را با نام NORM یا TENORM<sup>۸</sup> می‌شناسیم.

آن‌ها زیرمجموعه‌ای از دسته وسیع‌تری از زباله‌ها بنام NARM<sup>۹</sup> هستند که شامل زباله هسته‌ای تولید شده در خلال فعالیت سرعت‌دهنده‌های ذرات اتم می‌باشد (National Safety Council., 2005).

در کارهای تحقیقاتی از جمله پزشکی بسیاری اوقات مثلا برای از بین بردن سلول‌های سرطانی، سرعت ذرات را بالا می‌برند. نتیجه این فعالیت‌ها زباله‌ای است با طول عمر در حدود یک سال که در همان آزمایشگاه در محفظه‌هایی ذخیره می‌شود. پس از کاهش فعالیت زباله تا حد مورد نظر، به روش‌های معمول دفع خواهد شد.

<sup>1</sup> Mixed Waste

<sup>2</sup> Solidification

<sup>3</sup> Orphaned Sources Waste

<sup>4</sup> Contaminated Scrap Metal

<sup>5</sup> Decommissioning

<sup>6</sup> Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)

<sup>7</sup> Naturally Accelerator-Produced Radioactive Material (NARM)

<sup>8</sup> Technologically Enhanced NORM

<sup>9</sup> Naturally Occurring and Accelerator-Produced Radioactive Materials

#### ۴- گزینه‌های موجود برای دفع زباله‌های هسته‌ای

حجم بسیار زیاد زباله‌های هسته‌ای تولید شده در جهان نشان‌دهنده نیازی شدید برای دفع ایمن آن‌ها برای بازه زمانی طولانی می‌باشد. در این قسمت مروری بر روش‌های پیشنهادی دفع اینگونه پسماندها صورت می‌گیرد.

#### ۴-۱- تغییر ماهیت<sup>۱</sup> و یا سوزاندن زباله

این روش مانند موارد قبل یک شیوه دفع نمی‌باشد اما راهی برای از بین بردن آلاینده است که مشکلات آتی برای دفع آن را مرتفع می‌سازد. به کمک روش‌های شیمیایی، ذرات رادیواکتیو با طول عمر زیاد را از زباله جدا کرده در هسته راکتور ذخیره می‌کنند. این کار باعث می‌شود تا ذرات، واپاشی شده و یا به موادی با طول عمر کمتر تبدیل شوند. روش مزبور موثر بوده اما هزینه انجام آن بالاست و باعث تشعشع‌زایی زیاد برای کارکنان آن محل خواهد شد.

#### ۴-۲- دفن زباله‌ها در جزایر دورافتاده

قرار دادن زباله‌ها در ساختارهای زمین‌شناسی پایدار و عمیق برخی جزایر، از جمله گزینه‌های موجود است. مدفن لازم برای این کار همانند آنچه در سایر مکان‌ها لازم است خواهد بود و فقط باید زباله‌ها به جزیره انتقال یابند. بنابراین هم در محل تولید و هم در جزیره مقصد به تجهیزات کافی نیاز خواهد بود که هزینه زیادی را در بر خواهد داشت. احتمال پدیده‌ای به نام انتقال قاره‌ها<sup>۲</sup>، فعالیت‌های آتشفشانی و لرزه‌خیزی، امکان نفوذ آب در صخره‌های زیرین جزیره و در نتیجه انتقال آلاینده از مشکلات این روش هستند. از طرفی احتمال اعتراض کشورهای همسایه جزیره نیز وجود خواهد داشت. عدم وجود منابع ارزشمند، فاصله زیاد آن‌ها از قاره‌ها و جزایر مسکونی، وجود اقیانوس که می‌تواند غلظت زباله را در صورت رهایی از مدفن تا حد زیادی کاهش دهد از نکات مثبت این روش هستند. با توجه به اینکه هم‌اکنون بسیاری از کشورهای جهان از انرژی هسته‌ای به صورت‌های گوناگون استفاده می‌کنند، استفاده از یک جزیره برای همه کشورها گزینه جالبی است که می‌تواند در آینده نه‌چندان دور مفید باشد (Zikovsky, L., 1997).

#### ۴-۳- تزریق به اعماق زمین<sup>۳</sup>

روش دیگر، تزریق زباله به زیر صخره‌های واقع در هزاران متر زیر زمین می‌باشد. چنین کاری نیازمند رساندن غلظت زباله به اندازه لازم است که انجام عملیاتی دوباره را بر روی آن نیاز دارد. علاوه بر آنکه انجام چنین تزریقی در عمق مناسب بسیار گران می‌باشد، اطمینان از عدم بازگشت زباله‌ها به اعماق کمتر هم وجود نخواهد داشت (U.S. Department of Energy Office of Civilian (Radioactive Waste Management., 2003

#### ۴-۴- بازیافت<sup>۴</sup>

ممکن است بتوان ماده رادیواکتیو را از غیر رادیواکتیو در زباله جدا نمود. اگرچه بازیافت مانند روش‌هایی مثل سوزاندن و یا متراکم کردن باعث کاهش حجم زباله‌ها می‌شود اما غلظت زباله را نیز بالا می‌برد که در نتیجه دفع امن‌تری را نیاز خواهد داشت.

<sup>1</sup> Transmutation

<sup>2</sup> Ocean Transport

<sup>3</sup> Deep Well Injection

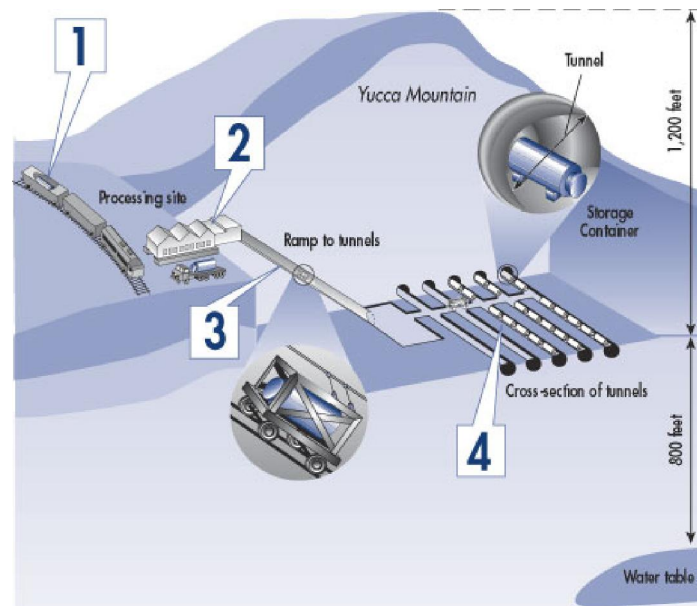
<sup>4</sup> Reprocessing

## ۴-۵- دفن در اعماق زمین<sup>۱</sup>

ساختارهای زمین شناختی با خصوصیتی از قبیل سن زیاد، نرخ تغییرات بسیار کم و عموماً پایداری درازمدت قابل توجهشان شناخته می‌شوند. دور بودن زباله‌ها از محیط و فعالیت‌های انسانی و طبیعی، وجود صدها متر ضخامت زمین به‌عنوان پوششی در برابر تشعشع زباله‌ها و شناخته شده بودن رفتار خاک و سنگ همه از فواید این روش هستند (Zikovsky, L., 1997). وجود آب‌های زیرزمینی و یا آب موجود در خلل و فرج سنگ‌ها که ممکن است در طول زمان حرکت کند و باعث انتقال آلاینده به محیط زیست انسانی و یا آب‌های زیرزمینی شود، از معایب این روش است.

### ۴-۵-۱- دفن در اعماق زیاد

ساخت هسته‌ای مصرف شده، زباله سطح بالا و زباله ناشی از ساخت عناصر مصنوعی، پس از بسته‌بندی به تونل‌هایی مهندسی ساز واقع در اعماق چند صد متری زیر زمین منتقل و در آنجا دفن می‌شوند. شکل ۲ نمایی از مدفن واقع در کوهستان یوکا<sup>۲</sup> در کشور آمریکا را نشان می‌دهند (Mark Matthews, P.E., 2002)



شکل ۲- (a) بسته‌های زباله توسط قطار یا کامیون و در واگن‌های مخصوص به سایت منتقل می‌شوند. (b) بسته‌های رسیده به سایت، باز شده تیوپ داخلی آن‌ها به همراه زباله در بسته‌های چند لایه فولادی قرار می‌گیرند. (c) بسته‌های آماده شده، توسط سیستم خودکار به تونل‌های زیرزمینی منتقل می‌شوند. (d) بسته‌ها در داخل تونل‌ها جایگذاری و ذخیره می‌شوند

(Conceptual Design of Yucca Mountain Disposal Plan., 2008)

<sup>۱</sup> Deep Geological Disposal

<sup>۲</sup> Yucca Mountain



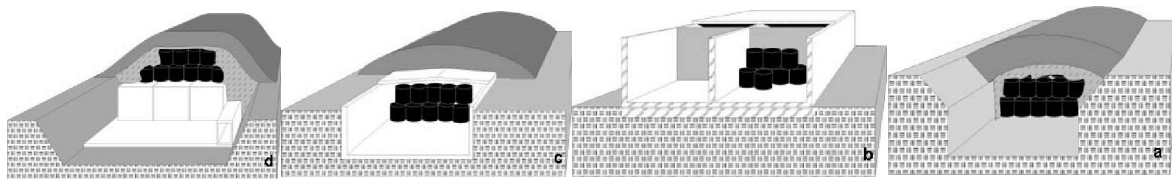
این طرح که به نام WIPP<sup>۱</sup> شهرت دارد در عمقی حدود ۶۵۵ متر زیر زمین احداث شده است. به منظور محافظت درازمدت از زباله، اطراف بسته‌ها با خاک رس متراکم پر می‌شود. وضعیت آب‌های زیرزمینی، پایداری زمین‌شناختی، ترکیب سنگ‌ها، لرزه‌خیزی، بارندگی سالانه و جمعیت منطقه از مواردی هستند که باید به آن‌ها توجه نمود. بعلاوه سایت باید قابلیت آن را داشته باشد تا پس از آنکه زباله‌ها در آن دفن شدند، هزاران سال تقریباً دست‌نخورده باقی بماند (Lerner, A.W., 2006).

#### ۴-۵-۲- دفن در اعماق کم

زباله‌های سطح پایین در مدفن‌های سطحی<sup>۲</sup> دفن می‌شوند. قرار دادن زباله در بسته‌های چوبی یا فولادی و دفن آن در ترانشه‌های بسیار بالاتر از آب زیرزمینی با عمق بین ۶ تا ۹ متر و عرض ۳۰ متر از روش‌های موجود است. کف مدفن را با ماسه، شن و یا خرده سنگ برای خشک ماندن ترانشه و روی آن را با رس متراکم می‌پوشانند. با پرشدن ترانشه، فضای خالی بین بسته‌ها با ماسه پر می‌شود. این روش در حال حاضر چندان کاربرد ندارد. حالت دیگر آن است که بسته‌های چوبی یا فولادی در داخل مدول‌های بتنی<sup>۳</sup> قرار گرفته سپس دفن شوند (شکل ۳-۲-۱).

روش دیگر، قرار دادن زباله‌ها در سازه مستطیلی از بتن مسلح، فلز یا بلاک‌های بنایی پیش‌ساخته بالای سطح زمین<sup>۴</sup> است. هر بخش دارای سیستم زهکشی مجزا خواهد بود (شکل ۳-۲-۲). این اتاقک‌ها ممکن است در زیر زمین<sup>۵</sup> واقع باشند نیز می‌توان کف آن‌ها را شیب‌دار نمود (شکل ۳-۲-۳).

همچنین می‌توان ترکیبی از بونکرهای بتنی پوشیده شده با خاک<sup>۶</sup> در اتاقک‌های بالا و زیر زمین را استفاده نمود. به این صورت که ترانشه را کاملاً با بتن می‌پوشانند و آن را توسط پانل‌هایی به بخش‌های مختلف تقسیم می‌کنند و زباله‌های هر دسته را در یک بخش قرار داده فاصله بین آن‌ها را با بتن پر می‌کنند. زباله‌های دسته A در بالای سطح زمین قرار می‌گیرند که با رس متراکم پوشانده می‌شود. برای جلوگیری از شسته شدن سطح نهایی توسط باد، ممکن است روی آن نیز گیاه کاری شود (شکل ۳-۲-۴).



شکل ۳-۲-۴- نمای شماتیک از روش‌های دفن زباله‌های سطح پایین در اعماق کم زمین (a) در زمین‌های بهبود یافته و یا به کمک مدول‌های بتنی واسط (b) در اتاقک‌های بالای سطح زمین (c) در اتاقک‌های زیر سطح زمین (d) در بونکرهای بتنی پوشیده با خاک (Fentiman A.W., Jorat, M.E. and Veley R.J., 2008).

<sup>۱</sup> Waste Isolation Pilot Plant

<sup>۲</sup> Landfill

<sup>۳</sup> Improved Shallow Land Burial/Modular Concrete Canister Site

<sup>۴</sup> Above Grade Vault

<sup>۵</sup> Below Grade Vault

<sup>۶</sup> Earth Mounded Concrete Bunkers

می توان مخزن های بتنی را در اتاقک های بتنی<sup>۱</sup> نیز قرار داد. انبار نمودن اینگونه زباله ها در دل صخره های سنگی کوه ها راه حل دیگری است که برخی کشورها مانند آلمان، نروژ، سوئد و فنلاند از آن بهره جسته اند. دفن مخزن ها در گودال های حفر شده<sup>۲</sup> بالای سطح آب زیرزمینی راه حلی دیگر است. دیواره ها با پوشش فلزی یا بتنی پوشانده می شوند. فاصله بین مخزن ها با رس یا ماسه پر می شود و سرانجام در پوشی از بتن بر روی آن قرار می گیرد.

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به آنچه گفته شد، به نظر می رسد دفن زباله ها در مدفن های مهندسی ساز در زیر زمین مناسب ترین و اقتصادی ترین راه حل در شرایط موجود است. قوانین و آیین نامه های لازم به منظور انتقال و دفن ایمن چنین زباله هایی نیاز خواهد بود. در هر روشی صرف نظر از نوع آن، باید بتوان از موفقیت و یا احتمال شکست پروژه تا حد معقول اطمینان حاصل کرد. ساختمان ها، خاک، هوا، آب های سطحی و یا زیرزمینی در نیروگاه و نیز محل دفن زباله ها همگی مستعد آلودگی هستند لذا استفاده از شیوه های کنترل آلودگی محیط زیست از نظر تشعشع زایی در فضای اطراف و نیز خروج مواد آلوده ضروری می باشد. خطر بالای زباله های هسته ای ایجاب می کند که وسایل حمل و نقل آن ها تا مدفن از استانداردهای ویژه، امکان تماس دائم با راننده و ردیابی از طریق ماهواره برخوردار باشند. زباله ها باید در بسته های مستحکم که آزمایش های مقاومت و دوام کافی بر روی آن ها صورت گرفته قرار داده شوند به طوری که حتی در صورت بروز حادثه آسیب نبینند.

## منابع

- خزاعی، س.، (۱۳۸۷)، "ارائه مدل رفتاری ترمومکانیک برای خاک های رسی اشباع"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی.
- National Safety Council (2001), "A Reporter's Guide to Yucca Mountain", Environmental Health Center, <http://www.nsc.org/ehc.htm>.
- National Safety Council (2002), "A Guide to the U.S. Department of Energy's Low-Level Radioactive Waste Low-Level Radioactive Waste", [www.nsc.org/ehc.htm](http://www.nsc.org/ehc.htm).
- National Safety Council (2005), "Understanding Radiation in our World", Guidebook, <http://www.nsc.org/issues/radisafe.htm>.
- <http://www.ens-newswire.com/ens/jan2006/2006-01-10-06.asp>
- Nuclear Energy Institute (2007), "Disposal of Low-Level Radioactive Waste", <http://www.nei.org>.
- Fentiman A.W., Jorat, M.E. and Velej R.J., (2008) "What Disposal Methods are being Considered for Low-Level Radioactive Waste?", <http://ohioline.osu.edu/rer-fact/>.
- Zikovsky, L., (1997), "Radioactive Waste Management", Nuclear Engineering Institute, Department of Mechanical Engineering, Ecole Polytechnique of Montreal, Canada.
- U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management (2003) "Managing Nuclear Waste: Options Considered" <http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0017print.shtml>.
- Mark Matthews, P.E., (2002), "The Waste Isolation Pilot Plant: A Success Story with International Cooperation", WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson, Arizona, USA.
- <http://www.epa.gov/radiation/docs/radwaste/402-k-94-001-tru.html>
- Conceptual Design of Yucca Mountain Disposal Plan (2008) <http://www.nrc.gov/waste/hlw-disposal/design.html>
- Lerner, A.W., (2006), "The Controversy – Radioactive Waste Storage", <http://esmeraldanvnuke.com/Graphics/the-controversy.pdf>.

<sup>1</sup> A Combination Concrete Canister/Concrete Vault

<sup>2</sup> Augured Holes