دفع ضایعات کشتی‌ها و زیردریایی‌های هسته‌ای و پایش و کنترل محیط زیستی مواد رادیواکتیو در بنادر نیروی دریایی

طاهره تقی‌زاده فیروزجایی

استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،

t.taghizade@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۲

کلمات کلیدی:
کشتی‌ها و زیردریایی‌های هسته‌ای
پسماند رادیواکتیو
دفع راکتور زیردریایی
پایش محیط زیست
بازیافت کشتی

چکیده

پسماندهای رادیواکتیو از پسماندهای ویژه و خطرناک هستند که باید با رعایت استانداردهای ایمنی و بهداشتی دفع شوند تا از خطرات احتمالی آن ها برای سلامت انسان ها و محیط زیست جلوگیری شود. ضایعات کشتی‌ها و زیردریایی‌های هسته‌ای از جمله این پسماندها هستند که بایست به نحو صحیح دفع آن ها مدیریت شود. کشتی‌های نیروی دریایی زمانی غیرفعال می‌شوند که توانایی نظامی آن‌ها هزینه ادامه عملیات را توجیه نمی‌کند. هنگامی‌که تصمیم برای غیرفعال کردن کشتی هسته‌ای گرفته می‌شود، باید سوخت آن تخلیه شود و اقدامات مناسب برای دفع نیروگاه راکتور و باقیمانده کشتی انجام شود. در این مقاله برنامه ای که برای دفع این ضایعات اجرا شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. این برنامه شامل مراحل سوخت‌زدایی راکتور، غیرفعال کردن کشتی، برداشتن اجزا و لوازم داخل آن، برداشتن محفظه راکتور برای دفع در زمین، بازیافت باقی‌مانده کشتی تا حداکثر ممکن و دفع مواد غیرقابل بازیافت باقی‌مانده می باشد. در بخش دوم مقاله کنترل و پایش مکان‌های با فعالیت هسته‌ای برای حفظ ایمنی، امنیت و حفاظت از محیط زیست که بسیار حائز اهمیت است مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این فعالیت‌ها توسط مراکز و سازمان‌های مختلفی انجام می‌شود و نیازمند تخصص و دانش فنی در زمینه هسته‌ای است.

Waste disposal of nuclear ships and submarines and environmental monitoring and control of radioactive materials in naval ports

Tahere Taghizade Firozjaee

Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, t.taghizade@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 06 Nov 2023
Accepted: 30 Dec 2023
Available online: 12 Jan 2024

Keywords:
Nuclear-powered ships and submarines
Radioactive waste
Disposal of submarine reactor
Environmental monitoring
Ship recycling

Up to 5 Phrases

ABSTRACT

Radioactive wastes are special and dangerous wastes that must be disposed of in compliance with safety and health standards to prevent their possible risks to human health and the environment. The waste from nuclear ships and submarines is among the waste that must be properly disposed of. Navy ships are deactivated when their military capability does not justify the cost of ongoing operations. When the decision is made to decommission a nuclear vessel, it must be defueled, and appropriate measures must be taken to dispose of the reactor plant and the remains of the vessel. This article examines the program implemented to dispose of these wastes. This program involves several steps, defueling the reactor, inactivating theship, demilitarizing components, removing the reactor compartment for land disposal, recycling the remainder of the ship to the maximum extent practical, and disposing of the remaining non-recyclable materials. In the second part of the article, the control and monitoring of locations with nuclear activity are studied to ensure safety, security, and environmental protection, which is of utmost importance. These activities are carried out by various centers and organizations that require expertise and technical knowledge in the nuclear field.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

۱ - مقدمه

دفع صحیح زباله‌های رادیواکتیو کشتی‌ها و زیردریایی‌های هسته‌ای یکی از جنبه‌های مهم مدیریت زباله‌های هسته‌ای است. هنگامی که راکتورهای هسته ای مورد استفاده برای تامین انرژی زیردریایی ها از بین می روند، وزارت دفاع وظیفه دفع صحیح این قطعات رادیواکتیو و نظارت بر آن را دارد. یکی از برنامه‌هایی که جهت اجرای صحیح این دفع صورت گرفته مربوط به وزارت دفاع ایالت متحده بوده است. در ژوئن ۱۹۵۸، کمیسیون انرژی اتمی از کمیته اقیانوس‌شناسی آکادمی علوم درخواست کرد تا مشکل دفع زباله‌های رادیواکتیو از کشتی‌های هسته‌ای را بررسی کند. کارگروه تحقیقات اقیانوس‌شناسی در مورد اثرات بیولوژیکی تشعشعات اتمی بر محیط زیست اقیانوس و شیلات مطالعه کنند. پس از اولین جلسه این کارگروه در سپتامبر ۱۹۵۸، پیش نویس بخش‌هایی از این گزارش توسط اعضای کارگروه نوشته شد. اثرات بیولوژیکی تشعشعات اتمی بر محیط زیست اقیانوس و شیلات در مارس ۱۹۵۹ تصویب شد و قوانین جداگانه ای برای هر منطقه از محیط زیست دریایی ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین نتیجه‌گیری‌های گزارش، مربوط به اهمیت انجام نظارت و نگهداری سوابق میزان و مکان دفع زباله‌های رادیواکتیو توسط کشتی‌های هسته‌ای است [۱]. در اواخر دهه ۱۹۷۰، نیروی دریایی، مطابق با قانون سیاست ملی محیط زیست، شروع به ارزیابی گزینه های جایگزین برای دفع کرد [۲]. دو گزینه اساسی تعیین شد: ۱) دفع محفظه راکتور بدون سوخت[1](بخش زیردریایی حاوی نیروگاه راکتور) به صورت دفن زمینی به همراه باقیمانده غیر رادیواکتیو زیردریایی یا غرق شدن در دریا و یا با قطعه کردن برای فروش به عنوان ضایعات. ۲) دفع با غرق کردن کل زیردریایی بدون سوخت در اعماق اقیانوس[2]می باشد. بیانیه نهایی تأثیر محیطی (EIS[3]) نیروی دریایی در سال ۱۹۸۴ نشان داد که دفع محفظه‌های راکتور در زمین یا دریا از نظر زیست محیطی ایمن و امکان پذیر است [۳]. طبق تصمیمی‌که توسط نیروی دریایی در ۶ دسامبر ۱۹۸۴ صادر شد، به این نتیجه رسیدند که می توان بعد از خنثی سازی محفظه‌های راکتور آن را در زمین دفن کرد. در سال ۱۹۸۶، اولین محفظه راکتور به محل دفن هانفورد ارسال شد. در سال ۱۹۹۶ نیروی دریایی دومین بیانیه نهایی تأثیرات زیست محیطی را تکمیل کرد که گزینه های دفع ناوهای هسته‌ای و زیردریایی‌های کلاس لس آنجلس و اوهایو را ارزیابی می‌کرد. نیروی دریایی و وزارت انرژی (DOE) در ۸ آگوست ۱۹۹۶ به این نتیجه رسید که دفن زمینی محفظه‌های راکتور در یکی از مکان های دفع دولت فدرال اثرات نامطلوب زیست محیطی قابل توجهی نخواهد داشت. اولین محفظه راکتور کلاس لس آنجلس در سپتامبر ۱۹۹۷ به مناطق دفع وزارت انرژی در هانفورد، واشنگتن ارسال شد. تا به امروز، همه ناوهای هسته‌ای به جز لانگ بیچ سابق (CGN-9) دفع و بازیافت محفظه راکتور آن ها کامل شد. در سال ۲۰۱۲، نیروی دریایی یک ارزیابی زیست‌محیطی صادر کرد که دفع رآکتور سوخت‌گیری‌شده را جداگانه ارزیابی کرد. دفع کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی به طور کلی می‌تواند به چهار فرآیند اصلی تقسیم شود که شامل غیرفعال کردن، برچیدن محفظه موشک (برای زیردریایی‌های موشک‌های بالستیک)، دفع محفظه راکتور و بازیافت می باشد. همه کشتی‌های هسته‌ای قبل از هر یک از سه فرآیند دیگر غیرفعال می‌شوند. در ابتدا، بخش‌های جلو و عقب زیردریایی‌های سوخت‌گیری‌شده و غیرفعال‌شده از هم جدا شدند تا امکان برچیدن محفظه موشک (برای زیردریایی‌های با موشک‌های بالستیک) و دفع محفظه راکتور فراهم شود و سپس دوباره به هم متصل شدند و در انبار شناور قرار گرفتند. شکل ۱ نمونه ای از قرار گیری کشتی‌های فرسوده در یک داک خشک برای جداسازی محفظه و بازیافت را نشان می‌دهد. در سال ۱۹۹۱، نیروی دریایی شروع به بازیافت این بخش‌های زیردریایی پیوسته کرد [۴]. از سال ۱۹۹۱، بازیافت بخش‌های باقیمانده کشتی به موازات کار حذف محفظه راکتور انجام شده است. در فرآیند بازیافت اجزای دارای ارزش برای نیروی دریایی را حذف و بازسازی و بقیه کشتی را جدا می‌کند تا امکان جداسازی و بازیافت فلزات و سایر مواد با ارزش را فراهم کند [۲].

هدف از این مقاله بررسی روش‌های موثر و بی‌خطر برای غیرفعال سازی کشتی ها و زیر دریایی‌های هسته‌ای است که در تاکنون اجرا شده است. در این مقاله فرآیند غیرفعال سازی، بازیافت و دفع کشتی را نشان می‌دهد که شامل برنامه ریزی و شیوه های رایج صنعتی برای دفع صحیح ضایعات کشتی‌های هسته‌ای است. یکی از نکات ضروری دفع، انجام کار به نحوی است که به نیروی دریایی، سازمان‌های تنظیم کننده و عموم مردم اطمینان دهد که دستکاری و دفع این مواد خطری برای سلامت انسان یا محیط زیست ایجاد نمی‌کند. همچنین پایش بنادر به جهت حضور موادرادیواکتیو مورد مطالعه قرار می‌گیرد که در این مقاله ارزیابی محیط زیستی موردی اجرا شده در یکی ازبنادر بررسی شده است.

[1] Disposal of the defueled reactor compartment.
[2] Disposal by sinking the entire defueled submarine in the deep ocean.
[3] Environmental Impact Statement

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]



شکل ۱ - قرار گیری زیردریایی‌های فرسوده در یک داک خشک برای جداسازی محفظه و بازیافت [۲]

۲ - مراحل برچیدن کشتی

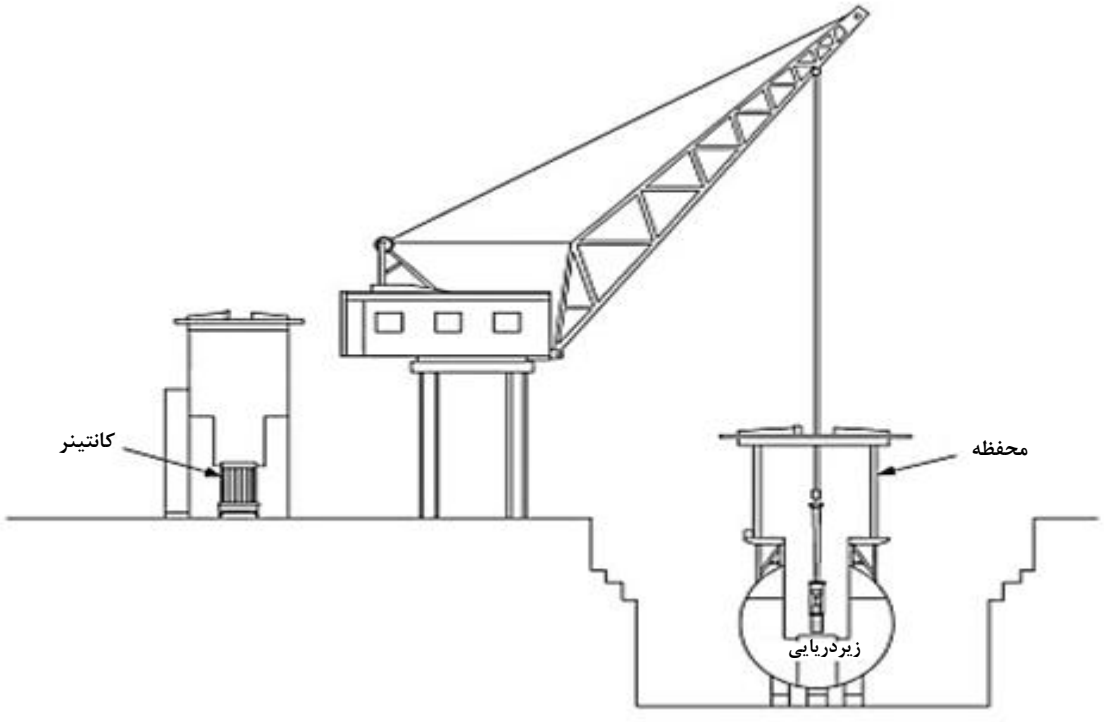
۲-۱- غیر فعال سازی

دفع کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی به طور کلی می‌تواند به چهار فرآیند عمده تقسیم شود که شامل غیرفعال کردن، برچیدن محفظه موشک (برای زیردریایی‌های موشک‌های بالستیک)، دفع محفظه راکتور و بازیافت می باشد. همه کشتی‌های هسته‌ای قبل از هر یک از سه فرآیند دیگر غیرفعال می‌شوند. در ابتدا، بخش‌های جلو و عقب زیردریایی‌های سوخت‌گیری شده و غیرفعال شده از هم جدا شدند تا امکان برچیدن محفظه موشک (برای زیردریایی‌های با موشک‌های بالستیک) و دفع محفظه راکتور فراهم شود و سپس دوباره به هم متصل شدند و در انبار شناور قرار گرفتند. در سال ۱۹۹۱، نیروی دریایی شروع به بازیافت این بخش‌های زیردریایی کرد. از سال ۱۹۹۱، بازیافت بخش‌های باقیمانده کشتی به موازات کار حذف محفظه راکتور انجام شده است. طی فرآیند بازیافت اجزای دارای ارزش برای نیروی دریایی را حذف و بازسازی و بقیه کشتی را جدا می شوند تا امکان جدا سازی و بازیافت فلزات و سایر مواد با ارزش را فراهم کند. زیردریایی‌های درای داک برای سوخت‌گیری، حذف محفظه راکتور و بازیافت عملیات دفع کشتی توسعه‌یافته توسط نیروی دریایی شامل هیچ فناوری پیچیده‌ای نیست، اما از اصول مهندسی اولیه، شیوه‌های معمول صنعتی، توجه دقیق به جزئیات و نظارت دقیق مدیریتی استفاده می‌کند. از ابتدا، اهداف اصلی برنامه به حداقل رساندن قرار گرفتن در معرض تشعشعات، رعایت مقررات زیست محیطی و ایمنی ایالتی و فدرال و کنترل هزینه است [۵]. فناوری غیرفعال سازی و بازیافت کشتی ساده می بایست به اندازه یک کارخانه کشتی‌سازی بزرگ باشد. این فرآیند شامل جداسازی، حذف قطعات، بلند کردن قطعات، بسته بندی و حمل و نقل است که با فعالیت های ساخت و تعمیر کشتی برابری می‌کند. مهم ترین بخش کار مربوط به غیرفعال سازی رآکتور و کنترل های ایمنی و محیطی است. کارهای مربوط به رادیواکتیویته، سرب، آزبست، PCB[4] یا سایر مواد خطرناک توسط پرسنلی که برای کار با این مواد آموزش دیده اند انجام می‌شود. آنها در صورت نیاز به تجهیزات حفاظت فردی مناسب مجهز هستند و کار در مناطقی انجام می‌شود که برای جلوگیری از انتشار آلاینده ها کنترل شده باشد. زباله ها طبق مقررات ایالتی و فدرال توسط پیمانکاران حمل و نقل دارای مجوز و در مکان های دفع تایید شده، کنترل و دفع می شوند. میزان قرار گرفتن در معرض تشعشع برای کارگران کارخانه کشتی سازی به تفصیل در گزارش سالانه نیروی دریایی NT-18-2 مورد بحث قرار گرفته است [۶]. این گزارش نشان می‌دهد که میانگین مواجهه شغلی هر فرد تحت نظارت در نیروی کار کارخانه کشتی سازی از سال ۱۹۵۴ کمتر از ۰/۲ رم در

[4] Polychlorinated biphenyls

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

سال است. در شرایطی که کارگران به صورت انفرادی کار می‌کنند میزان مواجهه تقریباً سه درصد است که از حد تعیین شده فدرال ۵ رم در سال کمتر است. از ژانویه ۲۰۱۹، نیروی دریایی عملیات دفع را به طور ایمن انجام داده است. ۱۱۶ زیردریایی و ۸ ناو بازیافت کرد و ۱۳۳ محفظه راکتور را برای دفع به سایت هانفورد وزارت انرژی ارسال کرد [۲].



شکل ۲- سوخت گیری زیردریایی [۲]

کشتی‌هایی که برای غیرفعال شدن برنامه ریزی شده اند، به محض ورود، راکتور کشتی خاموش می‌شود و کشتی وارد اسکله داک خشک می‌شود و طی برنامه ای سوخت گیری می‌شود (شکل ۲). مواد مصرفی، کتابچه راهنمای فنی، ابزار، قطعات یدکی، و اثاثیه، از جمله اقلامی مانند کتانی، لوازم آشپزخانه و ظروف برداشته می‌شوند. تجهیزات و مواد طبقه بندی شده حساس، از جمله تجهیزات رمزنگاری از کشتی خارج می‌شوند. گازهای صنعتی مانند مبرد و اکسیژن تخلیه می‌شوند. لوله‌کشی آب دریا، بخار، آب آشامیدنی، نفت کوره، سیستم های هیدرولیک و سایر سیستم‌هایی که برای عملیات سوخت‌گیری مورد نیاز نیستند تخلیه می‌شوند.

در یک داک خشک، دهانه ها در بدنه بریده می‌شوند و یک محفظه سوخت گیری روی کشتی بر روی راکتور آن نصب می‌شود. دسترسی به راکتور فراهم می‌شود و سوخت به یک محفظه انتقال داده می شود. سوخت در ظروف حمل و نقل با طراحی خاص قرار می‌گیرد. برای عملیات سوخت‌گیری از همان روش‌ها و تجهیزات لازم برای حذف سوخت هسته‌ای استفاده می شود که با موفقیت در بیش از ۴۰۰ تخلیه سوخت راکتور نیروی دریایی امریکا استفاده شده است. فرآیند تخلیه سوخت، سوخت هسته‌ای از جمله اورانیوم استفاده نشده و محصولات شکافت را که به طور کامل در عناصر سوخت موجود است، برداشت می‌کند. اگرچه این امر بیش از ۹۹ در صد رادیواکتیویته را حذف می‌کند، اما مقدار کمی پس از حذف سوخت هسته‌ای در راکتور باقی می ماند. این رادیواکتیویته با تابش نوترونی آهن و عناصر آلیاژی در اجزای فلزی در طول عملیات نیروگاه ایجاد شد. تقریباً ۹۹/۸ درصد از این ماده رادیواکتیو بخشی جدایی ناپذیر از فلزات ساختاری تشکیل دهنده اجزای کارخانه است. ۰/۲ در صد باقیمانده مربوط به فرآورده های فرسایشی و خوردگی رادیواکتیو است که در داخل سیستم های لوله کشی رسوب کرده اند. مخزن تحت فشار، لوله‌کشی، مخازن و اجزای سیستم سیال که در محفظه راکتور باقی می‌مانند به حداکثر میزان ممکن تخلیه می‌شوند. ماده جاذبی به مخزن تحت فشار اضافه می‌شود تا مایع باقی مانده را که ممکن است وجود داشته باشد جذب کند. روش های تخلیه سیستم تقریباً تمام (بیش از ۹۸ در صد) مایع اولیه موجود را حذف می‌کند. تنها مقدار کمی مایع در مکان‌های مجزا مانند جیب‌های دریچه‌ها، پمپ‌ها، مخازن، مخازن و سایر اجزای سیستم لوله‌کشی غیرقابل دسترس باقی می‌ماند. تمام دهانه های سیستم های رادیواکتیو مهر و موم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

شده اند. پس از اتمام غیرفعال شدن، کشتی برای برچیدن محفظه موشک (برای زیردریایی‌های موشک بالستیک)، دفع محفظه راکتور و بازیافت آماده می‌شود. کشتی‌ها معمولاً پس از غیرفعال شدن تحت یک دوره ذخیره‌سازی در آب قرار می‌گیرند که امکان پوسیدگی بیشتر مواد رادیواکتیو باقی‌مانده و کاهش قرار گرفتن در معرض تشعشع را برای کارگران کشتی‌سازی برای پیگیری کار فراهم می‌کند [۶].

۲-۲- برچیدن محفظه موشک

در راکتورهای کشتی، آب تحت فشاری که از طریق هسته راکتور در گردش است، گرمای واکنش هسته‌ای را افزایش می‌دهد. آب خنک کننده راکتور از طریق سیستم لوله کشی با گذراندن از مبدل‌های حرارتی، گرما را به آب در سیستم بخار ثانویه منتقل می‌شود و بخار تولید شده به عنوان منبع نیرو برای نیروگاه و ماشین‌آلات کمکی استفاده می‌شود. این سیستم خنک کننده برای حفظ دمای عملیاتی راکتور و جلوگیری از افزایش غیرقابل کنترل دما استفاده می‌شود. آب خنک کننده به عنوان یک ماده خنک کننده بسیار مناسب برای راکتورهای هسته‌ای است، زیرا دارای خواص حرارتی و خنک کنندگی بالا است. سیستم خنک کننده و مبدل‌های حرارتی به طور مداوم کنترل و پایش می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که دما و فشار در محدوده عملیاتی مناسب قرار دارند و هیچ نشتی یا مشکل دیگری در سیستم وجود ندارد. این کنترل و پایش به منظور حفظ ایمنی و عملکرد صحیح راکتور و سیستم خنک کننده انجام می‌شود. هنگامی‌که آب خنک کننده راکتور در نتیجه گرم شدن تا دمای عملیاتی منبسط می‌شود، خنک کننده اضافی حاصل از یک بستر رزین تبادل یونی برای تصفیه قبل از انتقال عبور می‌کند [۴و ۵].

منابع اصلی رادیواکتیویته در پساب های مایع شامل موارد زیر باشد:

رادیونوکلئیدهای با نیمه عمر کوتاه: این شامل ایزوتوپ های رادیواکتیو با نیمه عمر تقریباً یک روز یا بیشتر است.

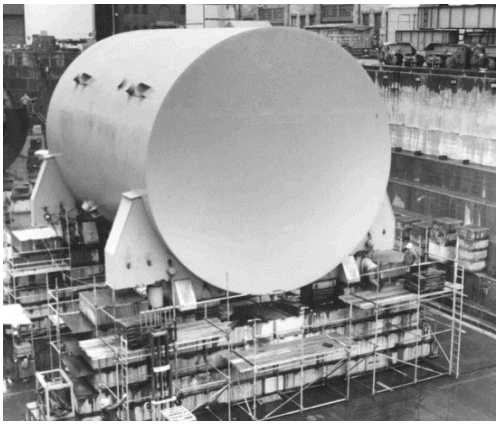
خوردگی فعال شده: در فرآیندهای صنعتی و هسته‌ای، فلزات مورد استفاده ممکن است با خوردگی فعال شده و رادیواکتیو شوند. در نتیجه، پساب های مایع حاوی مقادیر کمی‌از این فلزات رادیواکتیو می‌توانند منبع رادیواکتیویته باشند.

محصولات سایش: در فرآیندهای صنعتی، سطوح فلزی ممکن است به دلیل سایش و سایر فعالیت‌ها، محصولات سایشی تولید کنند. این محصولات سایشی ممکن است حاوی رادیونوکلئیدهای رادیواکتیو باشند و در پساب های مایع منبع رادیواکتیویته باشند.

رادیونوکلئیدهای با نیمه عمر تقریباً یک روز یا بیشتر در این محصولات خوردگی و سایش عبارتند از تنگستن-۱۸۷، کروم-۵۱، هافنیوم-۱۸۱، آهن-۵۹، آهن-۵۵، نیکل-۶۳، نیوبیم-۹۵، زیرکونیوم-۹۵، تانتالم-۱۸۲، منگنز-۵۴، روی-۶۵، آنتیموان-۱۲۵، کبالت-۵۸، و کبالت-۶۰ و ایسکوبالت-۶۰ با نیمه عمر ۵/۳ سال است.

به دلیل محدودیت های معاهده SALT II، نیروی دریایی در سال ۱۹۸۰ شروع به از کار انداختن زیردریایی‌های موشک بالستیک کرد. بر اساس شرایط این معاهده، پرتاب کننده های موشک باید از زیردریایی خارج شده و با دقت از هم جدا شوند. در ابتدا، زیردریایی‌ها غیرفعال شدند و بخش‌های محفظه موشک با استفاده از مشعل‌های برش و ابزارهای دیگر برچیده شدند. بخش‌های جلو و عقب باقی مانده کشتی به هم جوش داده شده و در انبار شناور قرار داده شدند. پس از آغاز به کار انداختن محفظه راکتور در کشتی‌سازی Puget Sound Naval در اواسط دهه ۱۹۸۰، محفظه موشک ها همزمان با برداشتن محفظه راکتور برچیده شد. بخش‌های باقی مانده از زیردریایی دوباره به هم جوش داده شد و کشتی در انبار آب قرار گرفت. با شروع بازیافت کامل کشتی در سال ۱۹۹۱، Puget Sound Naval Shipyard شروع به برچیدن محفظه موشک، حذف محفظه راکتور و بازیافت کشتی در یک داک خشک کرد. شکل ۳ جک زدن محفظه راکتور زیردریایی را برای برچیدن اجزای آن نشان می‌دهد.

برچیدن محفظه موشک شامل مراحل تمیز کردن، برش و حذف می باشد. دریچه های موشک و پوشش های لوله پرتاب کننده موشک برداشته می‌شوند. فضاهای داخلی خالی می‌شوند تا بدنه از هم جدا شود. ساختار بدنه و لوله موشک با استفاده از مشعل های برش برچیده می‌شود. تجهیزات داخل محفظه موشک که قبل و در حین برچیده شدن برداشته می‌شوند شامل تجهیزات الکتریکی، لوله کشی، فلاسک های هوا، کمدها، پارتیشن ها و اثاثیه اسکله است. مواد میرایی صدا آغشته به PCB خارج و سطوح تمیز می‌شوند. مواد عایق آزبست و سرب از کشتی خارج می‌شوند. در حال حاضر تمامی زیردریایی‌های موشک بالستیک به جز زیردریایی‌های کلاس OHIO از خدمات دریایی خارج شده اند.

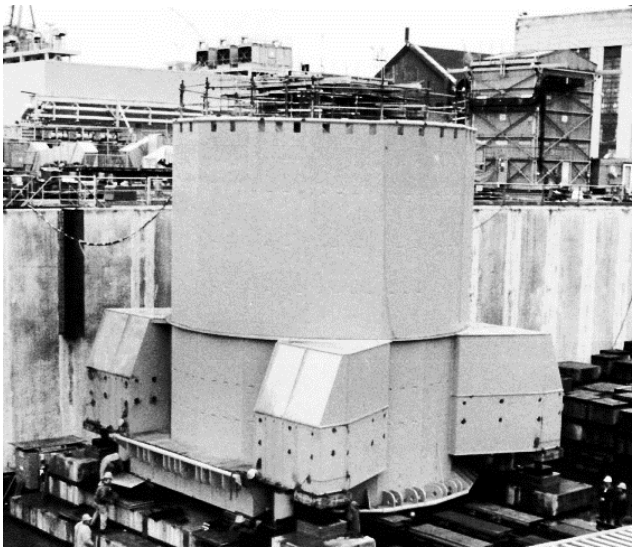


شکل ۳: جک زدن محفظه راکتور زیردریایی [۲]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

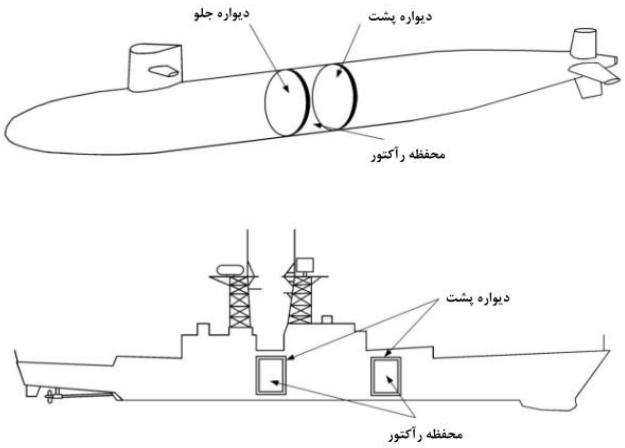
۲-۳- دور ریختن محفظه راکتور

نیروگاه‌های پیش‌ران هسته‌ای در کشتی‌های نیروی دریایی ایالات با معیارهای دقیق طراحی شده‌اند تا در برابر تغییرات شدید نیرو و شـــوک جنگی مقاومت کنند. این نیروگاه‌ها طرح‌های راکتور آب تحت فشار (PWR) هستند که از دو سیستم اولیه و ثانویه تشکیل شده‌اند نیروی دریایی ایالات متحده ۲۷ طرح مختلف نیروگاهی را برای پیشرانه هسته‌ای توسعه داده و آنها را در ۲۱۰ کشتی با موتور هسته‌ای نصب کرده است . این طرح ها در طول زمان برای بهبود ایمنی، قابلیت اطمینان و کارایی تکامل یافته اند. مطابق شـــکل ۴، راکتور ها در ناوهای هســـته‌ای توســـط یک محفظه فولادی با استحکام بالا احاطه می‌شوند و تجهیزات لازم جوش داده می‌شوند و سپس دفع مواد صورت می‌گیرد.



شکل ۴: احاطه شدن رآکتور توسط محفظه فولادی [۲]

پس از سوخت‌گیری، کبالت-۶۰ محصول اصلی خوردگی و سایش باقی مانده در نیروگاه راکتور بدون ســـوخت اســـت. کبالت-۶۰ ایزوتوپ رادیواکتیو کبالت با نیمه عمر ۵/۲۷ ســـال اســـت. این تشعشعات گاما ساطع می‌کند و منبع اصلی تشعشع در محفظه راکتور بدون ســوخت در طول آماده‌ســازی و ارســال به محل دفن اســت. مطابق شــکل ۵ ســطوح تشــعشــع خارجی در محفظه‌های راکتور معمولاً پایین (کمتر از mrem ۱ در ســـاعت) اســـت، به اســـتثنای برخی زیردریایی‌ها که دارای دو محفظه می باشـــند تشعشعات آن ها نیز از mrem ۳۰ در ساعت تجاوز نمی‌کنند [۷]. این سطوح در فاصله دو متری از بسته به mrem ۱ در ساعت یا کمتر کاهش می یابد.



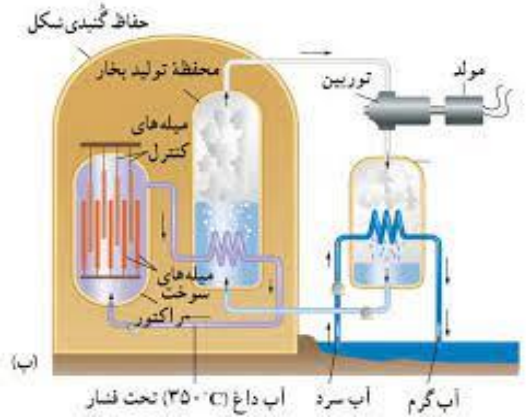
شکل ۵: محفظه دو راکتور زیردریایی معمولی و راکتور ناو (Cruiser) دریایی [۷]

مطابق شکل ۶، محصولات فرسایشی و خوردگی رادیواکتیو، از جمله کبالت-۶۰، در دو بخش در بسته دفع راکتور قرار دارند:

۱. سیستم های لوله کشی آب‌بند و عایق شده: پس از سوخت‌گیری، سیستم‌های سیال در محفظه راکتور تخلیه می‌شوند و لوله‌کشی بریده و مهر و موم می‌شود. این محفظه تضمین می‌کند که هرگونه خوردگی و فرسایش رادیواکتیو، مانند کبالت-۶۰، در سیستم های لوله کشی مهر و موم شده باقی می ماند و به محیط تراوش نمی‌کند.

۲. محفظه جوش داده و مهار شده: بسته دفع محفظه راکتور با یک بدنه جوش داده شده و با یک ساختار محفظه بسته طراحی شده است. این ساختار یک لایه اضافی برای جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو از جمله کبالت-۶۰ در طول حمل و نقل و ذخیره سازی فراهم می‌کند.

این دو بخش با هم کار می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که فرآورده های فرسایشی و خوردگی رادیواکتیو، به ویژه کبالت-۶۰، به طور موثر در بسته دفع محفظه راکتور قرار می‌گیرند. این محفظه برای جابجایی ایمن، حمل و نقل و دفع نهایی محفظه‌های راکتور بدون سوخت بسیار مهم است.



شکل ۶: شماتیک رآکتور هسته‌ای کشتی [۲]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

برنامه ریزی برای دفع محفظه راکتور در اواخر دهه ۱۹۷۰ آغاز شد و در اوایل دهه ۱۹۸۰ به یک الزام عمومی تحت قانون سیاست ملی محیط زیست تبدیل شد. طبق بیانیه نهایی تأثیر محیطی منتشر شده در سال ۱۹۸۴، دفن زمینی محفظه‌های رآکتور زیردریایی در یک مکان دفع دولت فدرال هیچ گونه تأثیر نامطلوب زیست محیطی قابل توجهی نخواهد داشت. در ۶ دسامبر ۱۹۸۴، نیروی دریایی گزارشی از تصمیم برای دفع این بخش‌های راکتور در سایت هانفورد وزارت انرژی در شرق واشنگتن صادر کرد. سایت هانفورد به این دلیل انتخاب شد که نزدیک به یک رودخانه قابل کشتیرانی، در یک بیابان، و نسبتاً نزدیک به کشتی‌سازی نیروی دریایی Puget Sound بود که در آن هشت زیردریایی سوخت‌گیری شده قبلاً در انبار شناور بودند. سایر سایت های دفع زباله های رادیواکتیو فدرال همه این ویژگی ها را نداشتند. مدت کوتاهی پس از صدور پرونده تصمیم گیری در سال ۱۹۸۴، قانون اصلاح سیاست زباله های رادیواکتیو با سطح تشعشع پایین در سال ۱۹۸۵ اجرایی شد که در آن دفع محفظه‌های رآکتور از کشتی‌های نیروی دریایی را یک مسئولیت فدرال در نظر گرفت. در آماده سازی برای از کار انداختن و از بین بردن ناوهای هسته‌ای و زیردریایی‌های کلاس جدیدتر، نیروی دریایی با وزارت انرژی به عنوان آژانس همکار، آماده سازی دومین EIS[5] را در اوایل سال ۱۹۹۵ آغاز کرد. در این بیانیه دفن زمینی محفظه‌های راکتور در یک سایت دفع دولت فدرال هیچ گونه تأثیر منفی قابل توجهی بر محیط زیست نخواهد داشت. نیروی دریایی EIS نهایی را در آوریل ۱۹۹۶ صادر کرد. پرونده تصمیم گیری اثرات زیست محیطی توسط وزارت نیرو در ۸ آگوست ۱۹۹۶ صادر شد.

محفظه‌های راکتور همچنین حاوی مقادیر تنظیم شده سرب، یک ماده خطرناک است. برای زیردریایی‌های قدیمی‌تر ترکیبات PCB در داخل بدنه، روی دیوارها، و در سایر مکان‌های خارج از محفظه راکتور که بخشی از بسته دفع هستند، یافت می‌شود.

این ماده و هر گونه باقیمانده PCB قبل از دفع مطابق با الزامات آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA) از محفظه راکتور خارج می‌شود. علاوه بر این، PCB ها در مواد جامد مانند لاستیک و عایق یافت می شوند که به طور گسترده در راکتور توزیع شده اند. مقدار کل PCB های جامد موجود از حدود ۵ پوند در برخی از زیردریایی‌های قدیمی تا مقادیر جزئی در کشتی‌های جدیدتر متغیر است. این PCB ها در ترکیب شیمیایی مواد جامد به طور محکم متصل هستند. آژانس حفاظت از محیط زیست اجازه می‌دهد تا این نوع PCB ها در محل دفن زباله جامد دفع شوند.

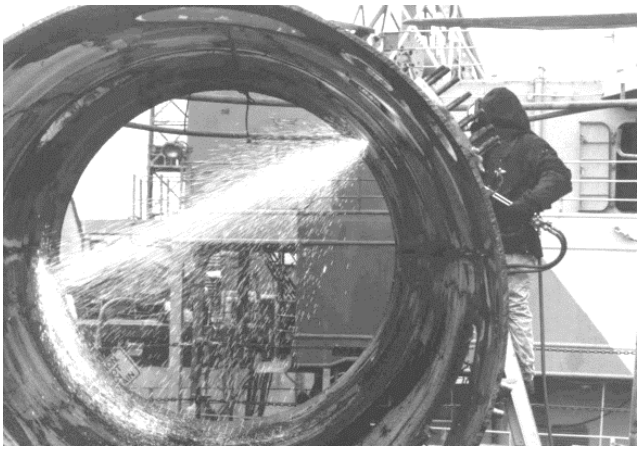
حذف این اجزا و عایق ها امکان پذیر نیست و آنها را برای دفع در محفظه راکتور رها می‌کنند. محفظه‌های راکتور برای حمل و دفن می بایست مطابق با الزامات وزارت حمل و نقل و کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای برای بسته بندی و حمل و نقل مواد رادیواکتیو با سطح تشعشعات پایین، الزامات وزارت انرژی برای دفن مواد رادیواکتیو سطح پایین، الزامات آژانس حفاظت از محیط زیست برای دفع PCB ها، و الزامات اداره محیط زیست ایالت واشنگتن برای دفع سرب بسته‌های مورد ارزیابی قرار گیرند. محفظه راکتور به دلیل محتوای رادیواکتیو خود، برای برآوردن الزامات بسته‌بندی عنوان ۴۹ آیین نامه مقررات فدرال - حمل و نقل، و آیین نامه عنوان ۱۰ مقررات فدرال - انرژی طراحی شده‌اند. بسته های محفظه راکتور در شرایط عادی حمل و نقل و همچنین شرایط فرضی مربوط به گرما، سرما، فشار، لرزش، افت و سوراخ شدن به طور موثر از عموم و محیط زیست محافظت می‌شود. مطالعات نشان داد که آسیب احتمالی به محفظه راکتور و محتویات آن در شرایط تصادفی فرضی از محدودیت های مشخص شده برای انتشار رادیواکتیویته تجاوز نمی‌کند. هنگام انجام محموله های محفظه راکتور، نیروی دریایی هماهنگی نزدیک با مقامات ایالتی و محلی را ایجاد کرده است. این ارزیابی به ایالت‌ها و عموم مردم تضمین می‌کند که این محموله ها الزامات لازم برای حمل و نقل مواد رادیواکتیو را برآورده می‌کنند و خطری ندارند.

۲-۴- عملیات در کارخانه کشتی‌سازی

لوله‌ها، کابل‌کشی‌های الکتریکی و سایر اجزایی که به دیواره‌های محفظه راکتور نفوذ می‌کنند، مواردی که در برداشتن محفظه راکتور اختلال ایجاد می‌کنند، بریده و برداشته می‌شوند. این کار با اره های دستی، آسیاب، برش لوله، برش هیدرولیک و مشعل برش انجام می‌شود. مراقبت های ویژه در مورد لوله‌های حاوی رادیواکتیو انجام می‌شود. اینها سیستم هایی با یکپارچگی بالا هستند که برای جلوگیری از هرگونه نشتی طراحی شده اند. هر لوله ای که بریده می‌شود برای حفظ یکپارچگی سیستم مهر و موم می‌شود.

[5] Environmental impact statements

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]



شکل ۷- برش لوله‌های مخزن [۲]

مواد جاذب در صورت لزوم استفاده می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که بسته های دفع محفظه راکتور با مقررات دفع محیط زیست وزارت امور خارجه واشنگتن در مورد مایعات باقیمانده مطابقت دارند. نمد بلبرینگ PCB به صورت دستی برداشته می‌شود و سطوح با انفجار ساینده یا با خراش دادن دستی و برس کشیدن سیمی تمیز می‌شوند و در برخی موارد با شستشوهای شیمیایی و شوینده پاک می‌شوند. سرب بالاست به صورت دستی برداشته می‌شود. مسیر ریلی با غلتک‌ها در زیر گهواره‌ها نصب می‌شوند تا محفظه راکتور پس از جدا شدن از کشتی خارج شود. محفظه راکتور از بقیه ساختار کشتی با تجهیزات برش استاندارد، عمدتاً مشعل ها و اره های دستی، برش لوله و آسیاب بریده شده است. برش‌های بدنه چند فوت جلوتر و عقب محفظه راکتور ایجاد می‌شوند تا امکان نصب را روی پایه ها فراهم کنند. این پایه ها حداقل دارای صفحات فولادی با ضخامت سه چهارم اینچ هستند.

زیردریایی‌ها برای عملیات در اعماق اقیانوس و برای زنده ماندن از سختی درگیری های جنگی طراحی شده اند. بنابراین، طراحی پیچیده نیروگاه راکتور زیردریایی، استحکام بدنه تحت فشار و دیوارهای محافظ کشتی، و دیوارهای انتهایی اضافی نصب شده توسط کارخانه کشتی‌سازی، یکپارچگی ساختاری را فراهم می‌کند که این موضوع انتقال مواد رادیواکتیو موجود در راکتور را سخت تر می‌کند. محفظه برای ناوها، محفظه‌های راکتور در داخل ساختار کشتی قرار گرفته‌اند و در یک محفظه ناهموار طراحی شده برای بارهای شوک جنگی قرار دارند، اما مزیت بدنه تحت فشار زیاد زیردریایی را ندارند. ساختار اطراف بریده شده و محفظه‌های راکتور در یک ساختار فولادی سنگین (حداقل سه چهارم اینچ ضخامت) قرار داده می‌شوند. ساختار فولادی و روکش دیواری مورد نیاز برای بسته بندی یک محفظه راکتور به داک خشک منتقل می‌شود، جرثقیل در موقعیت خود بلند می‌شود و در جای خود جوش داده می‌شود.

در هنگام انتقال محفظه راکتور زیردریایی بسته‌های تکمیل شده برای اطمینان از یکپارچگی بسته، آزمایش هوا می‌شوند. کارخانه کشتی‌سازی همچنین وسایل پشتیبانی فولادی سنگین را می سازد که برای تسهیل جک زدن و حمل و نقل محفظه راکتور به بسته جوش داده می‌شود. پس از تکمیل ساخت بسته، بسته‌های محفظه راکتور بر روی بارج‌ها قرار می‌گیرند. این لنج ها مطابق با استانداردهای نیروی دریایی و تجاری نگهداری می‌شوند و به طور معمول توسط اداره کشتیرانی آمریکا و گارد ساحلی ایالات متحده بازرسی می‌شوند.

بسته محفظه راکتور با استفاده از غلتک‌های با ظرفیت بالا برای حرکت افقی و جک‌های هیدرولیک بزرگ برای حرکت عمودی به بارج منتقل می‌شود. هنگامی‌که در محل قرار می‌گیرند، محفظه‌ها به عرشه بارج فولادی جوش داده می‌شوند.

۲-۵- بازیافت

برنامه بازیافت کامل کشتی مستقیماً از تجربه به دست آمده در برچیدن محفظه موشک های زیردریایی برداشت و تطبیق داده شده است. توسعه روش‌هایی برای غیرنظامی‌کردن و جابجایی مواد خطرناک نیز از این تجربه شکل گرفته است. پس از بررسی گزینه‌ها برای دفع باقیمانده کشتی‌ها، نیروی دریایی یک برنامه بازیافت کامل کشتی را در سال ۱۹۹۱ ایجاد کرد. بر اساس نمایش موفقیت‌آمیز در سال ۱۹۹۱ برای بازیافت دو زیردریایی، همه زیردریایی‌های بعدی و کشتی‌های سطحی بعدی برای دفع به کارخانه کشتی‌سازی نیروی دریایی Puget Sound آورده شدند و محفظه‌های راکتور بازیافت شدند[۲]. بازیافت ثابت کرده است که یک برنامه سازگار با محیط زیست است که به اصول به حداقل رساندن زباله و حداکثر استفاده مجدد از مواد پایبند است. پس از بررسی گسترده برنامه نیروی دریایی برای دفع زیردریایی‌های هسته‌ای، اداره حسابداری عمومی به طور مستقل مشاهده کرد که این برنامه درست است و یافته ها را در گزارشی که در ژوئیه ۱۹۹۲ منتشر شد منتشر کرد. تجهیزات، قطعات داخلی و بدنه کشتی به طور سیستماتیک با استفاده از فناوری و تجهیزات موجود برچیده می‌شوند. تجهیزاتی که دارای ارزش باقی مانده هستند و برای استفاده مجدد بازسازی می‌شوند. فلز دارای ارزش فروش مجدد، مانند آلومینیوم، مس نیکل، فولاد کربنی، فولاد ضد زنگ، برنج و سیم برق برای اطمینان از بالاترین بازده هزینه جدا شده است. مواد غیر قابل بازیافت مطابق با الزامات قانونی قابل اجرا به عنوان زباله دفع می‌شوند [۵]. بازگرداندن تجهیزات و مواد کشتی به صنعت از طریق بازیافت نیازمند فرآیندها و روش‌های مهندسی شده است تا اطمینان حاصل شود که مواد با الزامات ایالتی و فدرال برای مواد قابل بازیافت مطابقت دارند. موادی که از این کشتی‌ها برای ریختن در جریان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

زباله‌های بازیافتی یا غیر رادیواکتیو برداشته می‌شوند می بایست عاری از هر یک از مواد رادیواکتیویته قابل تشخیص و خطرناک باشد که این شامل یک برنامه دقیق و سیستماتیک است.

صرفه جویی در هزینه ها با قرار دادن چندین کشتی در یک حوض بزرگ به طور همزمان برای حذف و بازیافت همزمان محفظه راکتور حاصل می‌شود. بسته به در دسترس بودن کشتی، برخی از کارهای اولیه برای حذف تجهیزات در کنار اسکله انجام می‌شود.

حذف مواد خطرناک مانند آزبست، سرب و PCB ها، برچیدن کشتی مطابق با تمام مقررات زیست محیطی قابل اجرا یک کار چالش برانگیز است. پیچیدگی این مقررات و دامنه تلاش های بازیافت مستلزم آن است که کارخانه کشتی‌سازی به همکاری نزدیک با آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده، وزارت محیط زیست ایالت واشنگتن و آژانس کنترل آلودگی هوای Puget Sound ادامه دهد.

۳- کنترل و پایش مکان‌های با فعالیت هسته‌ای

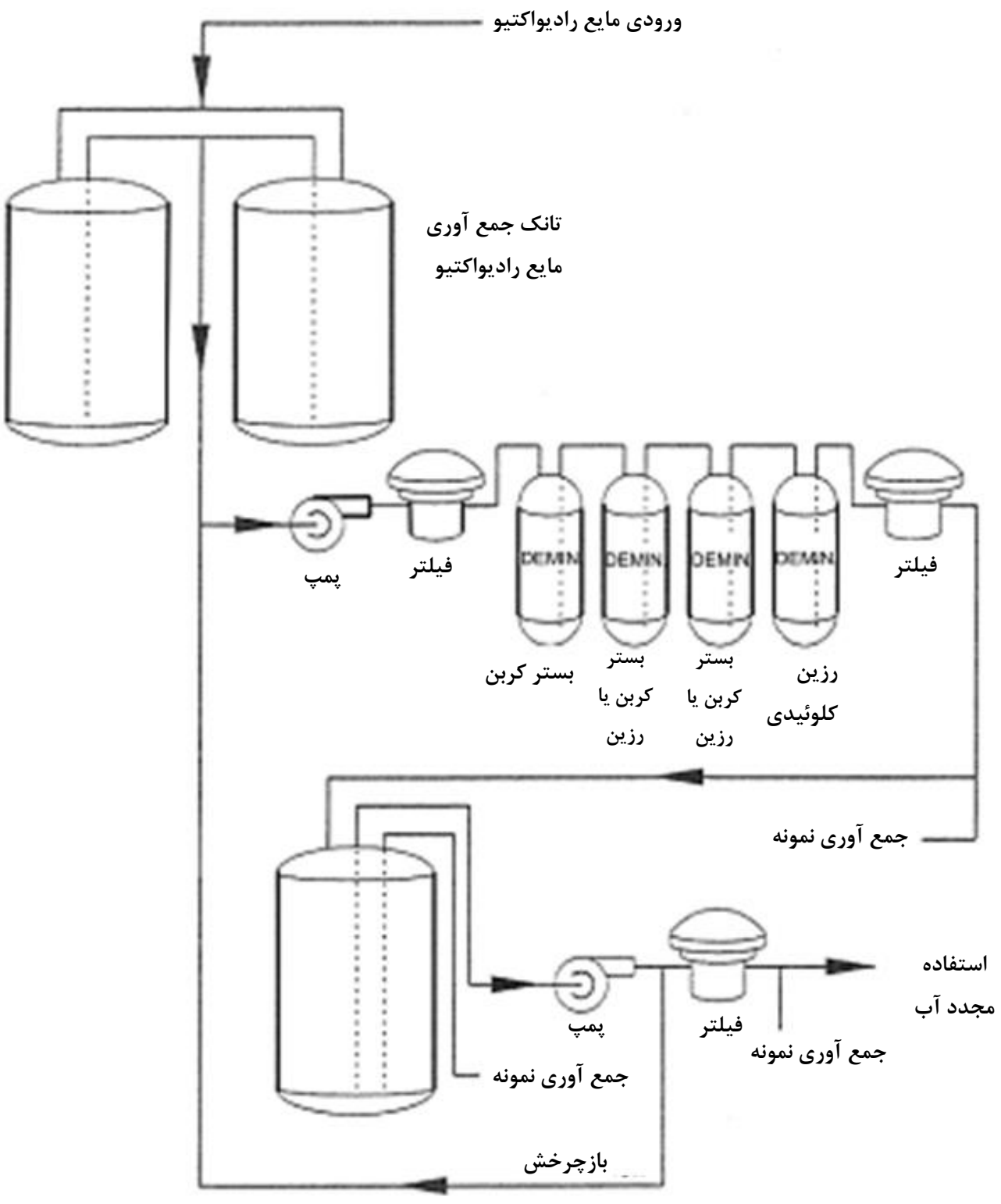
تا پایان سال ۲۰۱۸، نیروی دریایی ایالات متحده دارای ۷۱ زیردریایی هسته‌ای، ۱۱ ناو هواپیمابر هسته‌ای و ۲ کشتی آموزشی لنگردار بود. تأسیسات مربوط به ساخت، نگهداری، تعمیرات اساسی و سوخت‌گیری این نیروگاه‌های هسته‌ای شامل شش کارخانه کشتی‌سازی، دو مناقصه و شش پایگاه دریایی است [۸]. از آغاز برنامه نیروی دریایی هسته‌ای، سیاست نیروی دریایی ایالات متحده این بوده است که میزان رادیواکتیویته منتشر شده در بندرها را به حداقل ممکن کاهش دهد. در این برنامه پایش محیطی برای عناصر رادیواکتیو مرتبط با نیروگاه‌های هسته‌ای دریایی با تجزیه و تحلیل رسوبات بندرگاه، آب و موجودات دریایی و نظارت بر تشعشع در اطراف تاسیسات پشتیبانی و کنترل پساب صورت گرفت. نمونه‌های زیست‌محیطی از هر یک از این بندرها نیز برای تعیین حداقل مقدار سالیانه توسط آزمایشگاه وزارت انرژی بررسی می‌شود تا از درست و استاندارد بودن روش‌های تحلیلی اطمینان حاصل شود. نتایج آزمایش ها، تأثیر نامطلوبی از این فعالیت ها را بر سلامت انسان و محیط نشان نداده است. همچنین نظارت مستقل محیط‌زیستی توسط آژانس حفاظت از محیط زیست در بنادر ایالات متحده در چند دهه گذشته انجام شده است. نتایج این بررسی های گسترده و دقیق با نتایج نیروی دریایی مطابقت دارد. این بررسی‌ها مجدداً تأیید کردند که کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی ایالات متحده و تأسیسات پشتیبانی هیچ تأثیر قابل‌توجهی بر رادیواکتیویته محیط نداشته‌اند.

۳-۱- پردازش و کنترل مایعات رادیواکتیو سیاست و برنامه‌های به حداقل رساندن انتشار رادیواکتیویته در بندرها

سیاست نیروی دریایی ایالات متحده این است که میزان رادیواکتیویته منتشر شده در محیط، به ویژه در ۱۲ مایلی ساحل را به حداقل ممکن کاهش دهد. شورای ملی تحقیقات به حداقل رساندن مواد رادیواکتیویته را در حیات دریایی در دستور کار قرار داد. برای اجرای این سیاست برای به حداقل رساندن انتشار، نیروی دریایی دستورالعمل استانداردی را صادر کرده است که محدودیت‌ها و روش‌های مورد استفاده کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی ایالات متحده و تأسیسات پشتیبانی آن‌ها را تعیین می‌کند [۹].

شکل زیر دیاگرام ساده شده از سیستم پردازش مایع را نشان می‌دهد که شامل فیلترهای ذرات، فیلترهای بستر کربن فعال، رزین هیدروکسیل هیدروژن مخلوط و بسترهای رزین برای حذف ذرات کلوئید است. این نوع سیستم پردازش با موفقیت برای تولید آب با کیفیت بالا حاوی سطوح رادیواکتیویته بسیار پایین توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است. این آب فرآوری شده با کیفیت بالا یا به کشتی‌های هسته‌ای بازگردانده می‌شود یا تبخیر می‌شود [۸].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]



شکل ۸- سیستم پردازش مایع رادیواکتیو [۸]

نتایج نشان داد که مقدار کل رادیواکتیویته گامای طولانی مدت منتشر شده در بندرها و دریاها در فاصله ۱۲ مایلی ساحل کمتر از ۰/۰۰۲ کوری در هر یک از ۴۸ سال گذشته بوده است. عناصر موجود در رآکتور نیتروژن-۱۶ (نیمه عمر ۷ ثانیه)، نیتروژن-۱۳ (نیمه عمر ۱۰ دقیقه)، فلوئور-۱۸ (نیمه عمر ۱,۸ ساعت)، آرگون-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

۴۱ (نیمه عمر ۱,۸ ساعت) و منگنز-۵۶ (نیمه عمر ۲,۶ ساعت) است. برای یک روز پس از تخلیه از یک راکتور فعال، غلظت به یک هزارم غلظت اولیه کاهش می‌یابد. و در حدود ۲ روز غلظت به یک میلیونم کاهش می‌یابد. در نتیجه، این رادیونوکلئیدهای کوتاه مدت برای ملاحظات انتشار مایع مهم نیستند [۸].

۳-۲- رادیونوکلئیدهای محصول شکافت

محصولات شکافت تولید شده از سوخت در راکتور، از جمله ید و گازهای شکافت کریپتون و زنون، در عناصر سوخت باقی می‌مانند. با این حال، مقادیر کمی‌از ناخالصی‌های اورانیوم طبیعی موجود در مواد ساختاری راکتور، مقادیر کمی‌از محصولات شکافت را به خنک کننده راکتور آزاد می‌کند. با این حال، غلظت محصولات و حجم مایع خنک‌کننده راکتور آزاد شده به قدری کم است که رادیواکتیویته کل منتسب به رادیونوکلئیدهای محصول شکافت با عمر طولانی، بخش کوچکی از کل انتشارات رادیواکتیویته گاما با عمر طولانی را تشکیل می‌دهد [۱۰].

۳-۳- دفع زباله های رادیواکتیو جامد

در طول عملیات تعمیر و نگهداری، زباله های جامد آلوده به مواد رادیواکتیو (شامل پارچه های آلوده، کیسه های پلاستیکی، کاغذ، فیلترها، رزین تبادل یونی و مواد ضایعاتی) از کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی ایالات متحده و تأسیسات پشتیبانی آنها جمع آوری می‌شود. این مواد رادیواکتیو باید به شدت کنترل شوند تا از انتشار آلودگی جلوگیری شود [۱۱]. این کنترل‌ها شامل برچسب‌گذاری و علامت‌گذاری و امضای سریالی توسط پرسنل آموزش دیده رادیولوژیکی می‌باشد. مقدار ضایعات جامد رادیواکتیو در هر سال از تاسیسات خاص بستگی به مقدار و نوع کار پشتیبانی انجام شده در آن سال دارد. با وجود افزایش تعداد کشتی‌های هسته‌ای، حجم کل سالانه زباله‌های جامد رادیواکتیو سطح پایین به طور قابل‌توجهی در دهه ۱۹۷۰ کاهش یافت [۱۲]. این کاهش همزمان با کاهش قرار گرفتن در معرض تابش پرسنل انجام شد. استفاده از برنامه ریزی قبلی و ماکت ها برای به حداقل رساندن زباله ها، استفاده مجدد به جای دور انداختن ابزار و تجهیزات، استفاده از روش‌های پردازش مایع رادیواکتیو، استفاده از بسته‌بندی کارآمد برای استفاده کامل از فضا در ظروف دفع، استفاده از خدمات مجاز زباله سوز، فشرده سازی و بازیافت فلزات رادیواکتیو تجاری مجاز و جداسازی و تفکیک مواد زائد جامد با محتوای رادیواکتیو از سایر زباله‌ها می تواند در کاهش مواد زائد آلوده و انتشار مواد رادیوکتیو موثر باشد [۸].

اهداف چالش برانگیز توسط هر کارخانه کشتی‌سازی، مدیریت مداوم به حداقل رساندن تولید زباله در کارهای رادیولوژیکی می‌باشد. حجم کل سالانه زباله حدود ۱ درصد از حجم زباله های جامد رادیواکتیو است که هر سال در این مکان ها در ایالات واشنگتن، کارولینای جنوبی، یوتا و تگزاس دفن می‌شود. مواد زائد رادیواکتیو جامد بسته بندی می‌شوند و در کانتینرهای محکم به مکان های دفن دارای مجوز کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای ایالات متحده یا توسط یک کشور تحت توافق با کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای حمل می‌شود. از زمانی که نیروی دریایی قوانینی را وضع کرد که دفع مواد جامد رادیواکتیو در دریا را ممنوع می‌کرد، مواد رادیواکتیو جامد از کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی از سال ۱۹۷۰ در دریا دفع نشده است و کارخانه‌های کشتی‌سازی و دیگر تأسیسات ساحلی هرگز مجاز به دفع زباله‌های جامد رادیواکتیو از طریق دفن در محل‌های خود نیستند.

۳-۴- زباله های رادیواکتیو و خطرناک مخلوط

زباله هایی که هم رادیواکتیو و هم از نظر شیمیایی خطرناک هستند، تحت هر دو قانون انرژی اتمی و قانون حفظ و بازیابی منابع (RCRA) به عنوان "ضایعات مخلوط" کنترل می‌شوند. در برنامه نیروی محرکه هسته‌ای نیروی دریایی، تلاش های هماهنگ برای جلوگیری از اختلاط مواد رادیواکتیو و مواد شیمیایی خطرناک انجام می‌شود تا پتانسیل تولید زباله های مخلوط را به حداقل برسانند. این تلاش‌ها شامل اجتناب از استفاده از حلال‌های استون، رنگ‌های مبتنی بر سرب، محافظ سرب در ظروف دفع و پاک‌کننده‌های رنگ شیمیایی است. کارخانه‌های کشتی‌سازی معمولاً هر سال کمتر از ۲۰ متر مکعب زباله مخلوط ایجاد می‌کنند[۱۳].

۳-۵- حمل و نقل مواد رادیواکتیو

محموله های مواد رادیواکتیو در برنامه نیروی محرکه هسته‌ای نیروی دریایی باید مطابق با مقررات قابل اجرا وزارت حمل و نقل ایالات متحده (DOT)، وزارت انرژی (DOE) و کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای (NRC) جابجا شوند. هدف از این مقررات این است که اطمینان حاصل شود که محموله های مواد رادیواکتیو به اندازه کافی برای حفاظت از محیط زیست و سلامت و ایمنی عموم مردم کنترل می‌شود. این مقررات برای همه محموله‌های مواد رادیواکتیو اعمال می‌شود و الزاماتی را برای طراحی کانتینر، گواهی‌نامه و شناسایی مربوط به مقدار، نوع و شکل خاص رادیواکتیویته مورد حمل ارائه می‌کند. علاوه بر موارد فوق، الزاماتی برای کانتینرهای کشتی‌رانی دریایی وجود دارد. این الزامات برای تجزیه و تحلیل طراحی کانتینر، آموزش و صلاحیت کارگرانی که کانتینرها را می‌سازند، و بازرسی های کنترل کیفیت در طول ساخت را برای اطمینان از اینکه ظروف الزامات طراحی را برآورده می‌کنند، فراهم می‌کند.

کنترل نقطه ای و قابلیت ردیابی هر محموله از فرستنده تا گیرنده و گزارشی از همه محموله‌های در حال حمل و نقل به آسانی قابل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

دسترسی است تا امکان شناسایی سریع در مورد ماهیت محموله فراهم شود. گیرندگان باید رسیدهای برگشتی را به صورت کتبی تهیه کنند تا اطمینان حاصل شود که مواد رادیواکتیو در حمل و نقل گم نشده است. بازرسی ظروف مواد رادیواکتیو و مدارک همراه بلافاصله پس از دریافت الزامی‌است. گیرنده ها باید حتی مغایرت های جزئی را از مقررات دقیق حمل و نقل به فرستنده گزارش دهند تا در محموله های بعدی اصلاح شود. این برای اطمینان از رعایت مقررات حمل و نقل انجام می‌شود. بیشتر مواد رادیواکتیو توسط کامیون حمل می‌شوند. حمل و نقل هوایی فقط در مواقع ضروری استفاده می‌شود و در هواپیماهای مسافربری انجام نمی‌شود. تمامی‌محموله ها مطابق با مقررات DOT حمل می‌شوند.

۳-۶- پایش نمونه های محیطی نیروی دریایی

در برنامه پایشی در سال ۲۰۱۸ رسوبات، موجودات دریایی، هوا و آب و پساب مورد ارزیابی قرار گرفتند. نحوه ارزیابی ها به صورت زیر بوده است [۸].

هر ساله حداقل ۹ نمونه رسوب از هر بندر نظارت شده برای بررسی به آزمایشگاه ارسال می‌شود. حداقل پنج نمونه آب در هر بندر هر سه ماه یکبار در مناطقی که کشتی‌های هسته‌ای پهلو می‌گیرند و همچنین از مکان‌های بالادست و پایین دست گرفته می‌شود. این نمونه ها برای حضور رادیونوکلئیدهای ساطع کننده گاما، از جمله کبالت-۶۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. یک آشکارساز ژرمانیوم حالت جامد با یک آنالایزر چند کاناله برای اندازه گیری رادیواکتیویته گاما و تشخیص وجود کبالت-۶۰ استفاده می‌شود.

نمونه هایی از موجودات دریایی (مانند نرم تنان، سخت پوستان، و گیاهان دریایی) از همه بنادر تحت نظارت جمع آوری شده است. این نمونه‌ها با استفاده از یک آشکارساز ژرمانیوم با یک آنالایزر چند کانالی تجزیه و تحلیل می‌شوند. نتایج تجزیه و تحلیل نمونه حیات دریایی) نشان می‌دهد که هیچ تجمعی از کبالت-۶۰ مرتبط با کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی ایالات متحده در این نمونه‌های حیات دریایی شناسایی نشده است.

همه بندرهای تحت نظارت با استفاده از آشکارسازهای حساس دو بار در سال برای سطوح تشعشع بررسی می‌شوند. سطوح تشعشعات محیطی به طور مداوم با استفاده از دزیمترهای حساس که در مکان‌هایی خارج از محدوده مناطقی که کار رادیولوژیکی انجام می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. این دزیمترها همچنین در مکان‌های دور از تأسیسات پشتیبانی برای اندازه‌گیری سطوح تشعشعات پس‌زمینه ناشی از رادیواکتیویته طبیعی نصب می‌شوند.

تمام هوای خروجی از این تاسیسات از فیلترهای هوای ذرات با راندمان بالا (HEPA) عبور داده می‌شود و در هنگام تخلیه نظارت می‌شود. برای تجزیه و تحلیل پساب های معلق در هوا، برنامه کامپیوتری EPA COMPLY، مطابق مقررات EPA مورد نیاز است.

میزان عناصر رادیواکتیو پساب‌های راکتورهای انرژی هسته‌ای آب سبک باید به مقادیر مجاز محدود شوند. اگرچه این دستورالعمل‌ها برای کشتی‌های هسته‌ای و تأسیسات پشتیبانی آن‌ها قابل اجرا نیستند، اما زمینه‌ای را فراهم می‌کنند که در آن می‌توان درباره اهمیت قرار گرفتن در معرض تشعشعات ناشی از پساب‌های برنامه قضاوت کرد cحداکثر قرار گرفتن در معرض تشعشعات تخمین زده شده برای عموم از انتشار رادیواکتیویته موجود در هوا بسیار کمتر از استاندارد ۱۰ میلی‌رم در سال است.

برای پساب‌های مایع، نتایج نمونه‌های پایش محیطی نشان می‌دهد که هیچ خطری بری عموم به جهت قرار گرفتن در معرض تشعشع وجود ندارد. به عنوان مثال، نمونه‌های موجودات دریایی به‌دست‌آمده از مجاورت اسکله‌های کشتی‌سازی و اسکله‌های خشک، حتی با آنالیز حساس، هیچ کبالت-۶۰ قابل تشخیصی نداشتند.

۳-۷- حسابرسی و بررسی

الزامات و روش‌های کنترل رادیواکتیویته بخش مهمی‌از برنامه‌های آموزشی برای همه افراد درگیر با رادیواکتیویته در برنامه نیروی دریایی هسته‌ای است. چنین آموزش هایی بخشی از صلاحیت اولیه کارگران کشتی‌سازی و پرسنل نیروی دریایی است. تاکید بر این آموزش بخشی از این مفهوم است که تمامی پرسنل های کنترل و تولید با تمامی‌سطوح مدیریتی باید در کنترل رادیواکتیویته مشارکت داشته باشند. در هر کارخانه کشتی‌سازی، یک سازمان مستقل جدا از سازمان کنترل رادیولوژی، تمام جنبه های پردازش زباله های رادیواکتیو را بررسی می‌کند. پرسنل کنترل رادیولوژیک نیز بازرسی های دوره ای را از هر کارخانه کشتی‌سازی انجام می‌دهند [۱۵].

۴- نتیجه گیری

این مطالعه مروری بر مراحل دفع کشتی‌های هسته‌ای پس از پایان عمر مفیدشان ارائه می‌کند و شامل غیرفعال شدن کشتی، دفع محفظه راکتور و بازیافت بقیه کشتی است. از بین بردن زیردریایی‌های هسته‌ای نیازمند یک برنامه یکپارچه است که توسط بودجه کافی، امکانات و زیرساخت لازم پشتیبانی شود. مهم ترین بخش غیرفعال سازی مربوط به فرآیند دفع و کنترل مواد رادیواکتیویته و خطرناک است. نیروی دریایی دارای یک برنامه ایمنی و بهداشت شغلی است که محیط کار ایمن و سالم را تضمین می‌کند. ایمنی و بهداشت شغلی نیروی دریایی با مقررات وزارت کار، دستورات اجرایی و توافقنامه های کاری قابل اجرا مطابقت دارد. در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]

رابطه با پایش محیط‌زیستی مکان‌های با فعالیت هسته‌ای به طور موردی برنامه‌ای که توسط نیروی دریایی ایالت متحده به جهت کنترل انتشار رادیواکتیویته از کارخانه های کشتی‌سازی هسته‌ای نیروی دریایی مورد اجرا قرار گرفته گزارش شده است. طی این برنامه نحوه دفع مایعات رادیواکتیو، حمل و نقل و دفع زباله‌های جامد، و پایش محیط‌زیستی بر بنادر نیروی دریایی برای رسوبات و جانداران دریایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که کل رادیواکتیویته گامای طولانی مدت در مایعات منتشر شده در همه بنادر نیروی دریایی کمتر از ۰/۰۰۲ کوری در سال ۲۰۱۸ بود. هیچ افزایش رادیواکتیویته بالاتر از حد مجاز در طول نظارت نیروی دریایی و EPA در بنادری که در آن کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی ایالات متحده مستقر هستند، مشاهده نشده است. غلظت کبالت-۶۰ کمتر از غلظت های رادیونوکلئیدهای طبیعی در اطراف اسکله ها بود. انتشار مایعات از کشتی‌های هسته‌ای نیروی دریایی و تأسیسات پشتیبانی آنها سبب افزایش در رادیواکتیویته محیط نشده است. این برنامه ها تضمین کرده‌اند که هیچ یک از مردم عادی در نتیجه عملیات‌های جاری برنامه پیشران هسته‌ای نیروی دریایی، در معرض تشعشعات قابل اندازه‌گیری قرار نگرفته‌اند، بنابراین برنامه پیشران هسته‌ای نیروی دریایی تأثیر نامطلوبی بر سلامت انسان یا کیفیت محیط نداشته است. این مقاله می تواند مبنای خوبی برای نحوه‌ی دفع ضایعات کشتی‌های هسته‌ای و پایش محیط زیستی برای کارخانه‌های کشتی‌سازی باشد.

۶ - مراجع

1- Considerations on the Disposal of Radioactive Wastes From Nuclear-Powered Ships Into the Marine Environment, Washington, DC: The National Academies Press 1959, DOI: https://doi.org/10.17226/18744

2- U. S. NAVAL NUCLEAR POWERED SHIP INACTIVATION, DISPOSAL, AND RECYCLING, UNITED STATES DEPARTMENT OF THE NAVY, UNITED STATES DEPARTMENT OF THE NAVY, 2019 Edition.

3- Radioactive Waste Disposal at Sea Public Ideas, Transnational Policy Entrepreneurs, and Environmental Regimes, Lasse Ringius, 2001

4- Inactivation and Recycling of Nuclear Vessels in the USA Overview and Status, Malcolm Mackinnon III, 2003, DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-010-0209-7_5

5- Overview of Nuclear Submarine Inactivation and Scrapping/Recycling in the United States, Admiral M. MacKinnon III & J. G. Burritt, 1996, DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-009-1758-3_3

6- U.S. Navy Report, "Occupational Radiation Exposure from U.S. Naval Nuclear Propulsion Plants and Their Support Facilities," T. J. Mueller, et al. 2018

7- U.S. Navy, "Final Environmental Impact Statement on the Disposal of Decommissioned, Defueled Cruiser, OHIO-Class, and LOS ANGELES-Class Naval Reactor Plants," April 1996.

8- ENVIRONMENTAL MONITORING AND DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTES FROM U.S. NAVAL NUCLEAR-POWERED SHIPS AND THEIR SUPPORT FACILITIES, NAVAL NUCLEAR PROPULSION PROGRAM DEPARTMENT OF THE NAVY WASHINGTON, D.C. 20350, May 2019.

9- U.S. Navy, "Final Environmental Assessment on the Disposal of Decommissioned, Defueled, Naval Reactor Plants from USS ENTERPRISE (CVN 65)," August 2012.

10- U.S. Department of Energy Report, "Programmatic Spent Nuclear Fuel Management and Idaho National Engineering Laboratory Environmental Restoration and Waste Management Program's Final Environmental Impact Statement," DOE/EIS-0203-F, April 1995.

11- American Nuclear Society Report, "The Safety of Transporting Radioactive Materials". Position Statement 18, June 2002.

12- International Atomic Energy Agency Report, "Determining the Suitability of Materials for Disposal at Sea Under the London Convention 1972 and London Protocol 1996: A Radiological Assessment Procedure." International Atomic.

13- Energy Agency Report, IAEA-TECDOC-1759, 2015.

14- U.S. Environmental Protection Agency, "Federal Guidance Report No. 13 – Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides," September 1999.

15- Nuclear-Powered Ships: Accounting for Shipyard Costs and Nuclear Waste Disposal Plans, Honorable John P. Murtha Chairman, Subcommittee on Defense Committee on Appropriations House of Representatives , Washington, D.C, July1992.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.1.1]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.1]