

دانشگاه کیلان
دانشکده علوم

گروه فیزیک

(گرایش حالت هسته ای)

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تحلیلی و عددی رفتار نوترونی قلب رآکتورهای زیربحرانی

و داشته با شتابدهنده با استفاده از معادلات سینتیک نقطه ای

از

لیلا ملا سلطانی

استادان راهنما

آقای دکتر عباس قاسمی زاد

آقای دکتر مجید شهریاری

کتابخانه مرکزی
دانشگاه کیلان

۱۳۸۷ / ۱۵ / ۲۸

۱۳۸۷ / ۱۵ / ۲۸

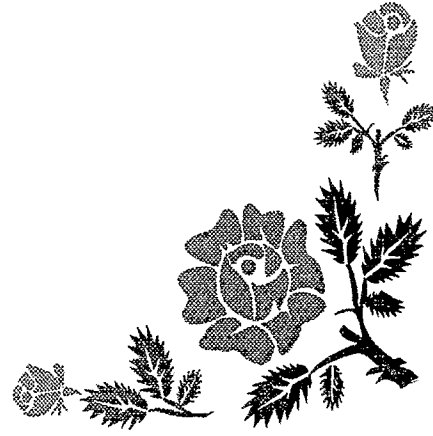
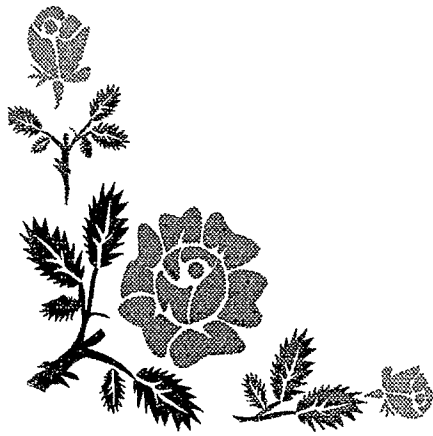
(اردیبهشت ماه ۱۳۸۷)



۱۵ ۲۷۸۶



تقدیم به
خالق بی ہمتا



سپاس و ستایش ذات بی همتایش را که با تمام وجود لطف بی کرانش را در همه مراحل زندگیم احساس نمودم.
از استادان ارجمند جناب آقای دکتر قاسمی زاد و جناب آقای دکتر شهریاری که در طول انجام پروژه یاریم نمودند، قدردانی
می کنم.

با تشکر از داوران ارجمند جناب آقای دکتر وهابی مقدم و آقای دکتر صدر ممتازو همچنین نماینده محترم تحصیلات تکمیلی که
در جلسه حضور داشتند.

هم چنین از زحمات بی دریغ مهندس رضا طالعی و به ویژه مهندس امیرحسین فقهی صمیمانه قدردانی می کنم و سپاسگذارم.
از همه دوستان خوبم که دلسوز و همراهم بودند با تمام قلبم سپاسگذارم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د	چکیده فارسی
ذ	چکیده انگلیسی
۱	مقدمه
۳	فصل اول: تبدیل ماهیت زباله های پرتوزا.....
۴	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- پسمان
۵	۳-۱- دسته بندی پسمان
۵	۱-۳-۱- پسمان های سطح پایین
۷	۲-۳-۱- پسمان های سطح بالا
۸	۳-۳-۱- پسمان فراورانیمی
۱۰	۴-۱- تکنیک های انبار پسمان هسته ای
۱۰	۱-۴-۱- انبار موقت میله های سوخت
۱۰	۱-۱-۴-۱- ترداری
۱۲	۲-۱-۴-۱- خشک داری
۱۳	۲-۴-۱- انبار دائم میله های سوخت
۱۵	۵-۱- تکنیک های بازیافت پسمان هسته ای
۱۶	۱-۵-۱- روش آبی (هیدروشیمیایی)
۱۷	۲-۵-۱- روش غیرآبی (پیروشیمیایی)
۱۸	۶-۱- نقش ADS در کاهش آلودگی ناشی از زباله هسته ای
۲۰	فصل دوم: سیستم های واداشته با شتابدهنده
۲۱	۱-۲- مقدمه
۲۳	۲-۲- مفهوم سیستم واداشته با شتابدهنده
۲۵	۳-۲- فیزیک ADS
۲۵	۱-۳-۲- فرایند تلاشی
۲۷	۲-۳-۲- هدف تلاشی
۲۷	۱-۲-۳-۲- هدف جامد
ت	

۲۸	..... هدف فلزهای ۲-۲-۳-۲
۲۹	..... گزینه درجه یا فاقد درجه ۳-۲-۳-۲
۲۹	..... سوخت ۳-۳-۲
۳۰	..... سوخت اکسیدی ۱-۳-۳-۲
۳۰	..... سوخت فلزی ۲-۳-۳-۲
۳۱	..... سوخت نیترویدی ۳-۳-۳-۲
۳۱	..... خنک کننده ۴-۳-۲
۳۲	..... سرب یا سرب- بیسموت سخت شده ۱-۴-۳-۲
۳۳	..... سدیم ۲-۴-۳-۲
۳۳	..... گاز ۳-۴-۳-۲
۳۴	..... تکنولوژی شتابدهنده ۵-۳-۲
۳۴	..... شتابدهنده های خطی ۱-۵-۳-۲
۳۸	..... شتابدهنده چرخه ای پروتون ۲-۵-۳-۲
۳۹	..... ویژگی شتابدهنده های ADS ۳-۵-۳-۲
۴۳	..... فصل سوم: روش های محاسباتی فصل سوم: روش های محاسباتی
۴۱	..... مقدمه ۱-۳
۴۱	..... روش مونت کارلو ۲-۳
۴۲	..... مونت کارلو و شبیه سازی سیستم های تصادفی ۳-۳
۴۲	..... نمونه برداری از متغیرهای تصادفی ۴-۳
۴۳	..... روش های غیرآنالوگ در ترابرد پرتوها با روش مونت کارلو (روش کاهش واریانس) ۵-۳
۴۴	..... مراحل مختلف در ترابرد پرتوها با روش مونت کارلو ۶-۳
۴۵	..... کدهای مونت کارلو ۷-۳
۴۶	..... کد MCNP ۸-۳
۴۶	..... کد FLUKA ۹-۳
۴۶	..... مقدمه ۱-۹-۳
۴۷	..... FLUKA گذرا به فیزیک و توانایی های FLUKA ۲-۹-۳
۴۷	..... اندرکنش های هسته ای غیر الاستیک هادرون ۱-۲-۹-۳
۴۸	..... پراکندگی الاستیک ۲-۲-۹-۳
۴۸	..... برهمکنش های نوکلئون- نوکلئون ۳-۲-۹-۳
۴۹	..... ترابرد هادرون های باردار و میون ها ۴-۲-۹-۳
۴۹	..... نوترون های کم انرژی ۵-۲-۹-۳
۵۰	..... الکترون ها ۶-۲-۹-۳
۵۰	..... فوتون ها ۷-۲-۹-۳
۵۰	..... فوتون های اپتیکی ۸-۲-۹-۳

۵۱	..... ۹-۲-۹-۳- نوترینوها
۵۱	..... ۱۰-۲-۹-۳- هندسه
۵۲	..... ۱۱-۲-۹-۳- ابزارهای جانبی فلوکا
۵۳	..... فصل چهارم: شبیه سازی مدل SAD با استفاده از روش مونت کارلو
۵۴	..... ۱-۴- مقدمه
۵۴	..... ۲-۴- معرفی مدل SAD
۵۷	..... ۳-۴- روش مونت کارلو برای محاسبه K_{eff}
۵۷	..... ۱-۳-۴- روش محاسبه و تعریف مسئله بحرانی
۵۸	..... ۲-۳-۴- ترابرد ذرات در هر سیکل K_{eff}
۵۹	..... ۳-۳-۴- پایان سیکل K_{eff}
۶۹	..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهاد برای ادامه کار
۶۳	..... ۱-۵- مقدمه
۶۳	..... ۲-۵- شبیه سازی هدف
۶۶	..... ۳-۵- شبیه سازی مدل آزمایشگاهی SAD
۶۸	..... ۱-۳-۵- توزیع شارحجمی نوترون در نواحی مختلف قلب
۶۸	..... ۲-۳-۵- محاسبه بهره نوترون های خارج شده از سطح هدف نسبت به تغییرات شعاع هدف
۶۹	..... ۳-۳-۵- محاسبه تغییرات توان مجموعه زیربحرانی SAD نسبت به تغییرات شعاع هدف تلاشی
۷۰	..... ۴-۳-۵- توزیع توان قلب SAD
۷۱	..... ۴-۵- جمع بندی و نتیجه گیری
۷۲	..... ۵-۵- پیشنهادها برای ادامه کار
۷۳	..... مراجع
۷۶	..... پیوست

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۵	شکل ۱-۱- زباله سطح پایین
۷	شکل ۲-۱- مقدار کل دریافتی زباله سطح بالا در ۱۹۹۸ در ایالات متحده
۷	شکل ۳-۱- زباله سطح بالا
۹	شکل ۴-۱- زباله فرااورانیمی
۱۱	شکل ۵-۱- استخر انبار میله سوخت
۱۲	شکل ۶-۱- بشکه های انبار خشک
۱۳	شکل ۷-۱- انواع سیستم انبار خشک
۱۴	شکل ۸-۱- کوهستان یوکا در ایالات متحده
۱۵	شکل ۹-۱- نمایی از یک کانال انبار و دستگاه حفر کانال (TMB) در کوهستان یوکا
۱۶	شکل ۱۰-۱- فرآیند PUREX برای تفکیک U و PU از محصولات شکافت
۱۷	شکل ۱۱-۱- روش پیروشمیایی
۱۹	شکل ۱۲-۱- شکافت هسته ای یک هسته شکافا
۱۹	شکل ۱۳-۱- تبدیل یک هسته رادیواکتیو به یک هسته پایدار
۲۱	شکل ۱-۲- محل استقرار پروژه MTA واقع در ۴۵ مایلی Berkeley
۲۱	شکل ۲-۲- مولد انرژی و محفظه خلاء در پروژه MTA
۲۳	شکل ۳-۲- نمای عرضی و جانبی سیستم ATW
۲۴	شکل ۴-۲- سیستم واداشته با شتابدهنده
۲۵	شکل ۵-۲- فرایند تلاشی
۲۶	شکل ۶-۲- روند فرایند تلاشی
۳۵	شکل ۷-۲- طرح شتابدهنده خطی اولیه
۳۶	شکل ۸-۲- طرح نمونه برای یک شتابدهنده خطی مورد استفاده در سیستم ADS
۳۸	شکل ۹-۲- نمایی طرح وار از یک شتابدهنده چرخه ای (سیکلوترون)
۵۴	شکل ۱-۴- برش عرضی قلب SAD
۶۰	شکل ۲-۴- نمودار تغییرات ضریب تکثیر نوترون در سیکل های متوالی واکنش زنجیره ای شکافت
۶۴	شکل ۱-۵- برش عرضی هدف در fluka
۶۴	شکل ۲-۵- نمای سه بعدی یک ششم هدف در simpleGeo
۶۵	شکل ۳-۵- شار سطحی نوترون در فرایند تلاشی به ازای تغییرات شعاع هدف تلاشی با استفاده از کد fluka
۶۶	شکل ۴-۵- نمودار سطح مقطع کل و الاستیک اندرکنش سرب با نوترون در MCNP
۶۷	شکل ۵-۵- قلب راکتور SAD در کد MCNP
۶۷	شکل ۶-۵- نمای جانبی قلب SAD در کد MCNP
۶۸	شکل ۷-۵- شار نوترون در ناحیه سوخت مدل SAD . در کد MCNP
۶۹	شکل ۸-۵- نمودار تغییرات بهره نوترون های خارج شده از سطح هدف برحسب شعاع هدف تلاشی

شکل ۵-۹- تغییرات توان مجموعه زیر بحرانی SAD نسبت به شعاع هدف تلاشی..... ۶۹

شکل ۵-۱۰- تغییرات توان قلب مجموعه زیر بحرانی SAD در MCNP..... ۷۰

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۶	جدول ۱-۱- طبقه بندی زباله های سطح پایین
۱۰	جدول ۱-۲- زباله های سطح بالا و فرااورانیمی
۳۲	جدول ۱-۲- مشخصات خنک کننده های مورد استفاده در سیستم های واداشته با شتابدهنده
۵۲	جدول ۱-۳- حدود ترابرد ذرات در کد FLUKA
۵۵	جدول ۱-۴- مشخصات هدف در مجموعه زیربحرانی Dubna
۵۶	جدول ۲-۴- مشخصات قلب برای مجموعه زیربحرانی Dubna
۵۷	جدول ۳-۴- مشخصات باریکه پروتون مورد استفاده در مدل SAD

بررسی تحلیلی و عددی رفتار نوترونی قلب رآکتورهای زیربحرانی واداشته با شتابدهنده با استفاده از معادلات

سینتیک نقطه ای

لیلا ملا سلطانی

سیستم واداشته با شتابدهنده (ADS) به عنوان یک سیستم امید بخش به منظور تبدیل و تغییر ماهیت پسمان هسته ای و کمینه سازی مسمومیت ناشی از سوخت هسته ای مصرف شده، مشخص گردیده است. علت اصلی این موضوع، از واداشتنگی با شتابدهنده و حالت عملکرد زیربحرانی آن ناشی می شود که بدین ترتیب ویژگی های وابسته به ایمنی مفیدی را برای کاربرد در قلب های شامل سوخت فرااورانیمی خالص و یا اکتیدهای کهنتر ایجاد می کند. بدین ترتیب این سیستم ها، آهنگ خاکسترسازی محصولات زیاله بیشتری را از خود نشان می دهند و متعاقب آن استقرار فن آوری و صنایع جداسازی و تبدیل پیشرفته و گران قیمت را به حداقل می رسانند. موضوع اصلی این پایان نامه، انجام محاسبات بحرانی و بررسی اثرات تغییرات اعمال شده به هدف تلاشی بر روی توان می باشد. در این کار شبیه سازی مجموعه زیربحرانی (SAD)، توسط دو کد MCNP 4 C و FLUKA 2006 انجام شد و بررسی های محاسباتی برای این مجموعه با انتخاب هدف سریبی صورت گرفت. محاسبات نشان داد طیف نوترون های خارج شده از سطح هدف در شعاع های کمتر از شعاع باریکه پروتون نسبتاً پایین تر از شعاع های بزرگتر است و با افزایش شعاع هدف، طیف نرم تر می شود. بعلاوه، با افزایش شعاع هدف به میزان چندین برابر پویش آزاد نوترون های تولید شده در هدف، آهنگ خروج نوترون ها از سطح هدف کاهش می یابد. هم چنین در این پایان نامه، نتیجه گرفته شد که توان مجموعه زیربحرانی SAD حساسیت بالایی را در شعاع های کم از خود نشان می دهد.

کلید واژه: سیستم واداشته با شتابدهنده، تلاشی، مجموعه زیربحرانی دوبنا

Abstract

The Analytical and Numerical Investigation of Neutronic Behaviour of Accelerator Driven Sub-critical core using point kinetic Equations

Leila molla soltani

The accelerator- driven systems (ADS) is recognized as a promising system for the purpose of nuclear waste transmutation and minimization of spent radio-toxicity fuel. The primary cause for this subject is from its accelerator-driven and sub-critical operating state, which introduces beneficial safety – related features for application of nuclear cores employing fuel systems containing pure transuranics or minor actinides. Thereby these systems to offer increased incineration rate of waste products and minimal deployment of advanced and expensive partitioning and transmutation technologies. The main theme of this thesis is the criticality calculations and study of the exerted variation effects on a spallation target for power. In this project, The Monte Carlo Codes, MCNP4C and FLUKA 2006 have been used to simulation of Sub-critical Assembly at Dubna (SAD) with lead target. It has been shown that spectrum of exited neutrons from the target surface in radius lower than proton beam radius is lower than higher radius relatively and the average energy of neutrons is decreased with increase of target radius. Moreover, neutron emission rate from target surface is decreased with increase of radius. Also, it has been shown that SAD power has high sensitivity in low radius.

Key words: Accelerator Driven Systems, spallation, Sub-critical Assembly at Dubna

مقدمه

امروزه تجمع و انباشت روزافزون پسمان های هسته ای پرتوزا توسط نیروگاه های هسته ای شکافت امروزی، به عنوان یک مسئله جدی و خطر آفرین برای نسل بشر، مورد بحث و بررسی است. در دو دهه گذشته، پروژه های مختلفی برای مواجهه و حل این معضل طرح و ارائه گردیده است که از این بین، فرآیند تبدیل پسمان های پرتوزا در سیستم های واداشته با شتابدهنده یکی از این شیوه ها است. در اصل، زیر بحرانی بودن قلب امکان وجود درصد بیشتری از اکتینید های کهنتر را در سوخت این سیستم ها فراهم و در نتیجه گامی مؤثر در جهت کاهش میزان پسمان های با نیمه عمر بالا خواهد بود. محاسبات نظری نشان می دهد که با باز یافت پلوتونیم، امرسیم و کوریم، این کاهش به میزان ۱۰٪ امکان پذیر است.

در یک سیستم واداشته با شتابدهنده، یک قلب زیر بحرانی با یک شتابدهنده پروتونی پرتوان جفت شده است. برخورد پروتون های پرنانرژی (تقریباً ۱۰۰۰ MeV) با یک هدف فلزی سنگین، منجر به تولید مقادیر معتنابهی نوترون از طریق واکنش های تلاشی^۱ می گردد. مدل های آزمایشگاهی مختلفی در دنیا برای بررسی سیستم های واداشته با شتابدهنده، طراحی و ارائه شده است که از این بین می توان به مجموعه زیر بحرانی دوبنا^۲ اشاره کرد.

در این پایان نامه، مجموعه زیر بحرانی SAD به عنوان مدل محاسباتی انتخاب و توسط کد های FLUKA^۳ و MCNP^۴ شبیه سازی و محاسبات بحرانی برای این مدل انجام شد. از میان پارامترهای مهم و مربوط به هدف تلاشی، پارامتر شعاع و اثر آن بر روی توان قلب و شار نوترونی به دست آمده در ناحیه قلب مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

فصل اول این پایان نامه، تعریف جامعی از پسمان پرتوزا و نحوه دسته بندی آن ارائه داده و هم چنین اشاره کوتاهی بر تکنیک های انبار و بازیافت پسمان های پرتوزا خواهیم داشت. در فصل دوم، به بیان ایده تاریخی، توصیف ساختار و اجزای مختلف یک سیستم واداشته با شتابدهنده و فصل سوم به روش محاسبه و کدهای محاسباتی مورد استفاده در این پایان نامه می پردازیم. در فصل چهارم مدل مورد استفاده برای انجام محاسبات، ارائه و شبیه سازی می شود و در فصل پنجم، نتایج حاصل از این محاسبات مورد بحث و بررسی قرار گرفته و پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه می گردد.

^۱ Spallation

^۲ Sub-critical Assembly at Dubna (SAD)

^۳ FLUctuating KAscade simulation program

^۴ Monte Carlo N-Particle transport code

فصل اول

تبدیل ماهیت پسمان های پرتوزا

۱-۱- مقدمه

تولید پسمان^۱، به دنبال استفاده از انرژی هسته ای امری اجتناب ناپذیر است. این پسمان می تواند در هر مرحله از چرخه سوخت هسته ای تولید گردد. با این حال می توان گفت که بیشترین میزان پرتوزایی پسمان در سوخت هسته ای مصرف شده موجود است که این مقدار به چگونگی کارکرد و عملکرد نیروگاه هسته ای وابسته است. در این فصل به مباحثی از جمله تعریف، دسته بندی، تکنیک های انبار و بازیافت پسمان به اختصار خواهیم پرداخت.

۱-۲- پسمان

پسمان ها، مواد رادیو اکتیوی هستند که در اثر برخی از فرآیندهای تجاری و آزمایشگاهی از جمله تولید الکتروسیته، تشخیص و درمان بیماریها و اهداف دیگر به جا مانده و عملاً قابل استفاده و سودمند نیستند [۱]. در صورتیکه این پسمان ها به طرز صحیح ذخیره و انبار نشوند، وارد بدن و محیط پیرامون شده و به آنها آسیب می رسانند. این در حالی است که شدت آسیب های وارد شده به میزان پرتوزایی مواد رادیو اکتیو بستگی دارد. براساس آیین نامه منتشر شده توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی^۲، « به هر ماده ای که حاوی هسته های رادیو اکتیو باشد و یا میزان پرتوزایی آن از مقادیر معینی فراتر رود، پسمان گفته می شود » [۲].

باید توجه داشت، ممکن است آنچه که توسط یک سازمان به عنوان پسمان در نظر گرفته می شود، توسط سازمانی دیگر قابل استفاده و ارزشمند باشد. به عنوان مثال، اگر سوخت هسته ای مصرف شده بدون بازآوری دفن شود، زباله پرتوزا و در صورت باز فرآوری به عنوان یک منبع قابل استفاده و مفید خواهد بود.

¹ Radioactive waste

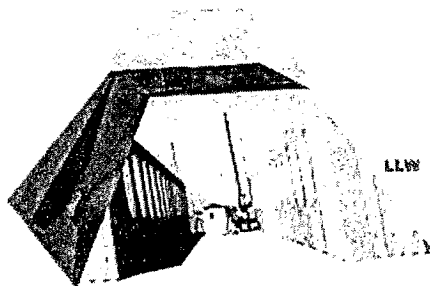
² International Atomic Energy Agency

۱-۳- دسته بندی پسمان

پسمان ها بر اساس فاکتور های متفاوتی از جمله، پرتوزایی ویژه، نیمه عمر هسته های پرتوزا، نوع تابش یونی گسیل شده حالت فیزیکی پسمان (جامد، مایع، گاز)، طبقه بندی می شوند. هم چنین به لحاظ شدت فعالیت، این پسمان ها به دو گروه پسمان های سطح پایین^۱ و پسمان های سطح بالا^۲ طبقه بندی می گردند.

۱-۳-۱- پسمان های سطح پایین

در حدود ۹۰ درصد از کل پسمان های پرتوزا، مشتمل برموادی چون البسه، پلاستیک، بطریها و موادی از این نوع که در معرض تابش تشعشع قرار گرفته اند را پسمان های سطح پایین تشکیل می دهند. این پسمان ها در مکان هایی مانند بیمارستان، آزمایشگاه های تحقیقاتی دانشگاه ها و راکتورهای هسته ای که رادیو ایزوتوپ ها بوجود می آیند و یا استفاده می شوند، تولید می گردند. مهمترین ویژگی پسمان های سطح پایین، عدم وجود گسیلنده آلفا (α) در آن ها می باشد. همان طور که می دانیم، تابش α بسیار خطرناک بوده وعلیرغم نفوذناپذیر بودن در پوست، به راحتی از طریق تنفس، خوردن و آشامیدن وارد ارگانیسم های بدن می گردد [۳]. نمایی طرح وار از موقعیت پسمان های سطح پایین در مقایسه با سایر پسمان ها در شکل ۱-۱، ارائه شده است.



شکل ۱-۱- پسمان سطح پایین [۳].

¹ Low-level waste

² High-level waste

به طور کلی پسمان های سطح پایین را به چهار گروه A, B, C, GTCC¹ که در جدول ۱-۱، به اختصار ارائه شده است، طبقه بندی می کنند.

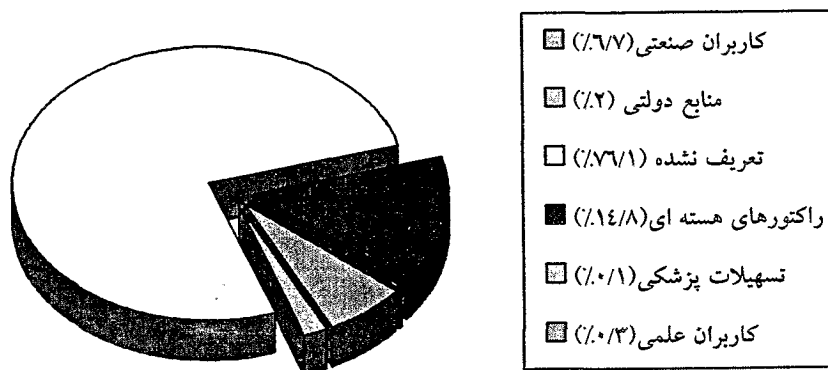
جدول ۱-۱- طبقه بندی پسمان های سطح پایین [۴].

پسمان هایی به جز پسمان های سطح بالا، سوخت هسته ای مصرف شده و پسمان های فرا اورانیمی را شامل می شود. به چهار زیر گروه A, B, C, GTCC طبقه بندی می گردد. به طور میانگین گروه A کمترین و گروه GTCC بیشترین میزان خطرآفرینی را دارا هستند.	پسمان های سطح پایین (LLW)
این گروه اساساً توسط رادیونوکلیدهای با نیمه عمر کوتاه آلوده می شوند.	گروه A
احتمالاً توسط مقادیر بیشتری از رادیونوکلیدهای با نیمه عمر کوتاه در مقایسه با گروه A آلوده می گردند.	گروه B
توسط مقادیر بسیار بالایی از رادیونوکلیدهای با نیمه عمر بالا و پایین آلوده می شوند.	گروه C
پرتوزاترین بخش پسمان های سطح پایین را در برمی گیرند.	گروه GTCC

گروه A که در حدود ۹۵ درصد از پسمان های سطح پایین را تشکیل می دهد، حاوی هسته های پرتوزا با نیمه عمر کوتاه است. گروه های B و C حاوی هسته های پرتوزا با نیمه عمر طولانی هستند و بالاخره گروه GTCC پرتوزا ترین قسمت پسمان های سطح پایین را شامل می شود. به دلیل بالا بودن میزان پرتوزایی، گروه های B, C و GTCC به سیستم های حفاظتی ویژه ای در مقایسه با گروه A نیازمند هستند [۴].

بررسی های انجام شده بر روی پسمان های سطح پایین در سال ۱۹۹۸ در آمریکا که بطور شماتیک در شکل ۱-۲، ارائه شده است، نشان داد که حدود ۱۴/۸ درصد این پسمان ها ناشی از راکتورهای هسته ای، ۶/۷ درصد کاربران صنعتی، ۲ درصد منابع دولتی، ۰/۳ درصد کاربران علمی، ۰/۱ درصد تسهیلات پزشکی بوده و بقیه تعریف نشده اند [۵].

¹ Greater Than Class C



شکل ۱-۲- مقدار کل دریافتی پسمان سطح پایین در ۱۹۹۸ در ایالات متحده آمریکا [۵].

۱-۳-۲- پسمان های سطح بالا

به طور متوسط در حدود یک سوم تا یک چهارم سوخت موجود در یک راکتور هسته ای مصرف و هر ۱۲ تا ۱۸ ماه یکبار از راکتور خارج شده و سوخت تازه جایگزین آن می گردد. در حقیقت پسمان سطح بالا، همان سوخت هسته ای مصرف شده^۱ و یا پسمان باقیمانده از بازآوری سوخت مصرفی است. سوخت هسته ای مصرف شده بشدت پرتوزا و خطرناک می باشد [۳]. در شکل ۱-۳، نمایی طرح وار از موقعیت پسمان سطح بالا در مقایسه با سایر پسمان ها ارائه شده است.



شکل ۱-۳- پسمان سطح بالا [۳].

^۱ Spent Nuclear Fuel

به دلیل میزان پرتوزایی بالای سوخت هسته ای مصرف شده، قرار گرفتن در مقابل آن بدون حفاظ ویژه، می تواند کشنده باشد. تقریباً ده سال پس از انتقال سوخت مصرفی از یک راکتور هسته ای، دز پرتودهی در فاصله ۱ متری از یک مجموعه سوخت نوعی، متجاوز از 200 Sv/h است. حال آنکه دز پرتودهی 50 Sv ، بلافاصله منجر به ناتوانی و در مدت یک هفته باعث مرگ یک انسان خواهد شد. برخی از عناصر پرتوزای موجود در سوخت مصرف شده، مانند ^{131}I نیمه عمر کوتاهی دارند. در نتیجه پرتوزایی آنها به سرعت کاهش می یابد.

در هر حال، بسیاری از عناصر پرتوزای سوخت مصرف شده مانند ^{239}Pu و ^{240}Pu نیمه عمر بالایی داشته و به دلیل وجود این عناصر، سوخت مصرف شده تا هزاران سال باید تفکیک و کنترل شود. خصوصیت زیانبار دیگر سوخت هسته ای مصرف شده علاوه بر بالا بودن میزان پرتوزایی، پایین بودن امکان وقوع حالت بحرانی^۱، شکافت خودنگهدار^۲ و شکافت اتمهای U و Pu است. گفتنی است، میزان پسمان سطح بالا در سطح جهان تقریباً ۱۲۰۰۰ تن در سال (ناچیز) است که معادل یک ساختمان دو طبقه در زمین بسکتبال می باشد.

۱-۳-۳- پسمان فرااورانیمی^۳

پسمان فرااورانیمی حاوی بیش از 3700 Bq/g عناصر با عدد اتمی بزرگتر از ۹۲ است. این گروه شامل پسمان هایی است که بدون در نظر گرفتن شکل و خاستگاه پسمان، از طریق رایو نوکلئید های فرااورانیمی گسیلنده آلفا (α) با نیمه عمر بیشتر از ۲۰ سال و تجمع بیش از 3700 MBq/kg ، به جز پسمان سطح بالا، آلوده شده اند [۳ و ۵ و ۶]. نمایی طرح وار از موقعیت پسمان فرااورانیمی در مقایسه با سایر پسمان ها در شکل ۱-۴، ارائه شده است.

¹ Criticality

² Self-sustained fissioning

³ Transuranic waste (TRUW)