

مبانی و کاربردهای فناوری هسته‌ای



خلیل کاظمی

سبز ان

سرشناسه	: کاظمی، خلیل، ۱۳۵۱-
عنوان و پدیدآور	: مبانی و کاربردهای فناوری هسته‌ای / خلیل کاظمی.
مشخصات نشر	: تهران: سبزان، ۱۳۸۸.
مشخصات ظاهری	: ۲۴۰ص: مصور، جدول
شابک	: 978-600-117-007-2
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۲۵۷.
موضوع	: انرژی اتمی
موضوع	: فیزیک هسته‌ای
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۸۸ م ۲ ک / TK۹۱۴۵
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۱/۴۸
شماره‌ی کتابشناسی ملی	: ۱۸۶۴۵۸۷



انتشارات سبزان

میدان فردوسی - خیابان فرصت - ساختمان ۵۴ تلفن: ۸۸۳۱۹۵۵۸-۸۸۸۴۷۰۴۴

مبانی و کاربردهای فناوری هسته‌ای

- نویسنده: خلیل کاظمی
- ناشر: سبزان
- حروف چینی، صفحه‌آرایی، طراحی و لیتوگرافی: مجتمع خدمات چاپ امید
۸۸۳۴۸۹۹۱
- نوبت چاپ: اول - ۱۳۸۷
- تیراژ: ۱۰۰۰ جلد
- قیمت: ۲۵۰۰ تومان
- چاپ
- صحافی: معراج

فروش اینترنتی و online از طریق سایت آی‌آی‌کتاب www.iiketab.com

ISBN: 978-600-117-007-2

شابک ۲-۰۰۷-۱۱۷-۶۰۰-۹۷۸

دیباچه کتاب

زمانی که اطلاعات انسان در مورد دنیای ریز داخل اتم گسترش یافت و توانست انرژی هسته‌ای را بشناسد، تحولی عمیق در زندگی او به وجود آمد. در سال ۱۹۲۷ میلادی، آلبرت انیشتن با طرح فرمولی ثابت نمود که اگر اتم شکافته شود، انرژی عظیمی ایجاد می‌شود. دقیقاً در آخرین ثانیه شمارش معکوس، در ساعت ۵:۳۰ دقیقه بامداد روز شنبه ۱۶ ژوئیه سال ۱۹۴۵، انرژی از هسته اتم آزاد شد. تاریخ آغاز هیچ عصر جدیدی چنین دقیق به ثبت نرسیده است. آن انفجار بزرگ در پایگاه هوایی آلاموگوردو در ۱۲۰ مایلی جنوب آلبوکوک نیومکزیکو، سر آغازی تاریخی بود که از آن پس باید آغاز آینده بشریت تعیین می‌شد. حیات بر روی زمین ناگهان و به نحوی غیرقابل برگشت تغییر یافته بود. آدمی به منبع انرژی جدید و به همراه آن به قدرتی دست یافته بود که تکامل انواع خود را بر روی کره زمین مخاطره آمیز می‌کرد و به این ترتیب عصر اتمی آغاز شد. متأسفانه اولین کاربرد این نظریه، منجر به تولید بمب‌های اتمی در سال ۱۹۴۵ توسط آمریکا شد که شهرهای هیروشیما و ناکازاکی در ژاپن را به تلی از خاک تبدیل کردند و چند صد هزار نفر افراد عادی را کشتند و تا سال‌های متمادی، افراد باقی مانده که آلوده به مواد رادیواکتیو شده بودند، به تدریج در پی سرطان‌های مختلف، با درد و رنج فراوان از دنیا رفتند. چهار سال بعد از بمباران اتمی هیروشیما و ناکازاکی، اتحاد جماهیر شوروی نیز در سال ۱۹۴۹ و به دنبال آن، انگلستان در ۱۹۵۲، فرانسه در ۱۹۶۰ و ...، اولین بمب اتمی خود را آزمودند و بدین ترتیب، ورود خود به باشگاه قدرتمندان هسته‌ای جهان را اعلام کردند. بعد از این مرحله غیرانسانی از کاربرد فرمول انشتین، انرژی عظیم آزاد شده از قلب هسته اتم دانشمندان را به این فکر انداخت که بتوانند از این انرژی در جهت تامین برق استفاده کنند و از آن پس، نیروگاه‌های اتمی متکی بر پدیده شکست اتم‌های اورانیوم برای تولید الکتریسیته ساخته شد.

امروزه تکنولوژی‌های صلح‌آمیز هسته‌ای، علیرغم تردیدهای فراوان، جای پای خود را در صحنه‌های مختلف علمی باز کرده و با گسترش استفاده از فناوری هسته‌ای بویژه در امور مختلف در جوامع امروزی، نیازمندی کشورها به این پدیده نوظهور روندی شتابان یافته و در یک حرکت کلی، بیشتر کشورها باتوجه

به مزیت‌های این تکنولوژی درصدد دستیابی به آن می‌باشند تا در تنگنای آینده بتوانند از این فناوری به‌صرفه، بیشتر بهره‌گیری نمایند. اما علیرغم پیشرفت همه‌جانبه علوم و فنون هسته‌ای در طول نیم قرن گذشته، هنوز این تکنولوژی در اذهان عمومی ناشناخته مانده است. وقتی صحبت از تکنولوژی اتمی به میان می‌آید، اکثر مردم جهان، انرژی اتمی را منحصر به یک نوع سلاح جنگی می‌دانند و ابرقارچ مانند حاصل از انفجارات اتمی را در ذهن خود مجسم می‌کنند. البته برخی نیز به راکتورهای اتمی برای تولید برق اشاره می‌کنند؛ ولی کمتر کسی را می‌توان یافت که به جنبه‌های دیگر استفاده از علوم هسته‌ای آگاهی داشته باشد. در صورتی که تکنولوژی اتمی خدمات ارزنده‌ای را برای بهبود زندگی بشر انجام داده و امروزه اکثر رشته‌ها از علم و صنعت نامحدود تکنولوژی اتمی بهره می‌برند. امروزه از رادیوایزوتوپ‌ها و پرتوهای ناشی از فرایندهای هسته‌ای جهت بهبود محصولات غذایی، نگهداری مواد غذایی، تعیین منابع آب‌های زیرزمینی، اکتشاف و استخراج منابع زیرزمینی نفت و گاز، استریزه کردن منابع و تولیدات پزشکی، آنالیز هورمون‌ها، کنترل فرایندهای صنعتی، بررسی آلودگی محیط زیست، باستان‌شناسی، کشف مینهای ضد نفر و ... استفاده فراوانی به عمل می‌آید. البته، هم‌اکنون نیز دانشمندان بسیاری در سطح جهان در تلاشند که کاربردهای بیشتری از این تکنولوژی را پیش چشم جهانیان به نمایش بگذارند. ایران هم با توجه به پتانسیل و ذخایر بالقوه و بالفعل اورانیوم می‌تواند نقشی فراتر در پهنه جهانی بازی کند، زیرا منفعت اقتصادی زیادی در این صنعت وجود دارد که می‌توان از آن جهت توسعه اقتصادی و صنعتی بهره برد.

این کتاب در ۷ فصل تنظیم گردیده است. در فصل اول، یادآوری مختصری از مبانی فیزیک هسته‌ای ارائه گردیده است. فصل دوم، به بررسی کلی واکنش‌های هسته‌ای شکافت و همجوشی و نیز عناصر شرکت کننده در این واکنش‌ها اختصاص یافته است. همچنین در این فصل، آب سنگین نیز که کاربردهای مهمی در تولید برق اتمی و نیز پزشکی، کشاورزی و ... مبتنی بر دانش هسته‌ای دارند، به طور جداگانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. فرایندهای تولید سوخت هسته‌ای تا مرحله تولید سوخت هسته‌ای، موضوع فصل سوم بوده و به دنبال آن، فرآیند تولید برق هسته‌ای در راکتورهای قدرت در فصل چهارم مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، دنباله انتهایی فرآیند سوخت هسته‌ای، تحت عنوان مدیریت پسماندهای هسته‌ای، در فصل پنجم کتاب بررسی گردیده است. بعد از آشنایی با فرایندهای تولید انرژی هسته‌ای، فصل ششم به بررسی دیگر کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای اختصاص یافته است و در نهایت، انواع استفاده‌های نظامی این تکنولوژی در فصل هفتم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این کتاب عمدتاً برای دانشجویان دوره لیسانس رشته‌های فنی - مهندسی تالیف گردیده است که البته با توجه به محتوای قابل فهم و غیر پیچیده آن، مطالعه آن برای سایر علاقمندان به مباحث فناوری هسته‌ای در تمام سطوح و رشته‌های تحصیلی نیز امکان‌پذیر خواهد بود. در خاتمه، ضمن سپاسگزاری به

درگاه ایزد منان که به من این فرصت گرانبها را اعطا فرمود که گامی هرچند ناچیز در راه اعتلای ایران عزیزم بردارم و نیز قدردانی از مساعدت و دلگرمی‌های همسر بزرگوارم که در طول نگارش این مجموعه همواره مشوق من بوده و نیز دل‌بندان عزیزم امیرحسین و امیررضا که با ورودش به جمع خانواده، امید و شادی‌هایم را دوچندان نموده‌اند، این کتاب را به نیت بندگی ساحت آقا امام زمان مهدی (ع)، به تمامی رفتگان دلداده طریقت عشق به عزت و سرافرازی وطن و بازماندگان سبزاندیش گمنام این مرز و بوم پرافتخار تقدیم می‌نمایم.

«ای پادشه خوبان داد از عم تنهایی دل بی‌تو بجان آمد، وقتست که بازآیی»

سفید

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مبانی فیزیک هسته‌ای	۱۳
مقدمه	۱۳
۱-۱- ساختار اتم	۱۴
۱-۲- بار الکتریکی و جرم اجزا اتمی	۱۶
۱-۳- جدول تناوبی و آرایش الکترونی	۱۸
۱-۴- گروه بندی عناصر شیمیایی	۲۱
۱-۵- پیوندهای شیمیایی	۲۲
۱-۶- ایزوتوپ	۲۸
۱-۷- رادیواکتیویته	۳۰
۱-۸- انواع مکانیسم واپاشی هسته ناپایدار	۳۱
۱-۹- کمیت‌ها و واحدهای پرتو	۳۳
۱-۱۰- نیمه عمر عناصر رادیواکتیو	۳۵
فصل دوم: عناصر و واکنش‌های هسته‌ای	۳۷
مقدمه	۳۷
۲-۱- واکنش شکافت هسته‌ای	۳۸
۲-۲- عناصر هسته‌ای شکافت‌پذیر	۴۴
۲-۲-۱- اورانیوم	۴۴
۲-۲-۲- پلوتونیم	۴۸
۲-۲-۳- توریم	۵۰
۲-۳- پلاسما	۵۴
۲-۴- گداخت یا همجوشی هسته‌ای	۵۶
۲-۵- عناصر قابل احتراق همجوشی	۶۰
۲-۵-۱- هیدروژن	۶۰
۲-۵-۲- لیتیم	۶۳
۲-۵-۳- هلیوم	۶۳
۲-۶- آب سنگین	۶۶
فصل سوم: فرآیندهای تولید سوخت هسته‌ای	۶۹

۶۹	..... مقدمه
۷۰	..... ۱-۳- شناخت چرخه سوخت هسته‌ای
۷۳	..... ۲-۳- ذخایر اورانیوم
۷۶	..... ۳-۳- اکتشاف کانسنگ اورانیوم
۷۸	..... ۴-۳- استخراج کانسنگ اورانیوم
۸۳	..... ۵-۳- آسیاب کردن کانسنگ برای تولید کنسانتره اورانیوم
۸۵	..... ۶-۳- تبدیل کیک زرد به هگزا فلوراید اورانیوم
۸۸	..... ۷-۳- غنی سازی اورانیوم
۹۱	..... ۱-۷-۳- غنی سازی اورانیوم با دیفوزیون یا پخش گازی
۹۳	..... ۲-۷-۳- غنی سازی اورانیوم با سانتریفوژ گازی
۹۷	..... ۳-۷-۳- جداسازی ایزوتوپی لیزری اورانیوم
۹۷	..... ۱-۳-۷-۳- جداسازی ایزوتوپی لیزری بخار اتمی
۹۸	..... ۲-۳-۷-۳- جداسازی ایزوتوپی لیزری مولکولی
۹۹	..... ۴-۷-۳- غنی سازی اورانیوم از طریق جداسازی ایزوتوپی الکترومغناطیسی
۱۰۰	..... ۵-۷-۳- غنی سازی اورانیوم از طریق تبادلات شیمیایی و یونی
۱۰۱	..... ۶-۷-۳- غنی سازی اورانیوم از طریق انتشار گرمایی
۱۰۲	..... ۷-۷-۳- غنی سازی اورانیوم به روش جداسازی آرئودینامیک
۱۰۲	..... ۸-۳- تبدیل UF_6 غنی شده به ترکیبات مورد نظر
۱۰۴	..... ۹-۳- ساخت میله‌های سوخت اورانیوم
۱۰۷	..... فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای
۱۰۷	..... مقدمه
۱۰۸	..... ۱-۴- راکتور هسته‌ای و انواع آن
۱۱۰	..... ۲-۴- ساختار راکتورهای (قدرت) شکافت
۱۱۳	..... ۱-۲-۴- مجموعه‌های سوخت و غلاف سوخت
۱۱۵	..... ۲-۲-۴- کند کننده نوترون (مدراتور یا نرم کننده)
۱۱۷	..... ۳-۲-۴- خنک کننده
۱۱۹	..... ۴-۲-۴- لایه‌های زایش و بازتابنده
۱۱۹	..... ۵-۲-۴- میله‌های کنترل یا مهار کننده
۱۲۱	..... ۶-۲-۴- سیستم‌های حفاظت و ایمنی راکتور
۱۲۳	..... ۳-۴- معیارهای طبقه بندی و انواع راکتورهای قدرت
۱۲۶	..... ۱-۳-۴- راکتورهای آب سبک

۱۲۷	۴-۳-۱-۱- راکتورهای آب تحت فشار
۱۳۱	۴-۳-۱-۲- راکتورهای آب جوشان
۱۳۴	۴-۳-۲- راکتورهای آب سنگین
۱۳۶	۴-۳-۳- راکتورهای با خنک کننده گازی یا گاز- گرافیت
۱۳۷	۴-۳-۱-۱- راکتورهای گرافیت گاز با اورانیوم طبیعی
۱۳۹	۴-۳-۳-۲- راکتورهای پیشرفته با خنک کننده گازی
۱۳۹	۴-۳-۳-۳- راکتورهای با درجه حرارت بالا
۱۴۲	۴-۳-۴- راکتورهای زاینده سریع با فلز مایع
۱۴۶	۴-۴- مقایسه مشخصه‌های فنی انواع راکتورهای اتمی قدرت
۱۴۹	۴-۵- راکتورهای تحقیقاتی
۱۵۰	۴-۶- وضعیت توزیع انواع راکتورهای قدرت در جهان
۱۵۴	۴-۷- راکتورهای همجوشی
۱۵۶	۴-۷-۱- توکامک
۱۵۷	۴-۷-۲- اسفروک
۱۵۸	۴-۷-۳- پروژه راکتور تجربی حرارتی- هسته‌ای بین المللی
۱۵۹	فصل پنجم: مدیریت زباله‌های هسته‌ای
۱۵۹	مقدمه
۱۶۰	۵-۱- زباله‌های هسته‌ای
۱۶۴	۵-۲- مخاطرات پرتوزایی زباله‌های هسته‌ای
۱۶۷	۵-۳- مراحل و فرآیندهای پسمانداری هسته‌ای
۱۶۹	۵-۴- انبارداری موقتی سوخت‌های مصرف شده
۱۷۱	۵-۵- بازفرآوری سوخت‌های مصرف شده
۱۷۴	۵-۶- دور هشت یا دفع نهایی پسمان‌ها
۱۷۶	۵-۶-۱- دفن نهایی در اعماق زمین
۱۷۹	۵-۶-۲- سایر روش‌های دفع نهایی سوخت مصرف شده
۱۸۰	۵-۷- پسمانداری هسته‌ای در جهان
۱۸۵	فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای
۱۸۵	مقدمه
۱۸۶	۶-۱- رادیوایزوتوپ‌ها
۱۸۶	۶-۲- تولید انرژی از تکنولوژی هسته‌ای
۱۸۷	۶-۲-۱- تامین نیروی محرکه وسایط نقلیه دریایی و هوایی

۱۹۱	۶-۲-۲- گرمایش و سرمایش آب و فضا
۱۹۲	۶-۲-۳- تامین انرژی فرآیند تولید سوخت و انرژی
۱۹۴	۶-۲-۴- شیرین سازی آب شور و آب دریا
۱۹۶	۶-۳- کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در پزشکی هسته‌ای
۱۹۸	۶-۳-۱- کاربردهای تشخیصی پزشکی هسته‌ای
۱۹۹	۶-۳-۱-۱- تشخیص با CT Scan
۲۰۰	۶-۳-۱-۲- تشخیص با MRI
۲۰۱	۶-۳-۱-۳- تشخیص با توموگرافی تابش پوزیترون (PET Scan)
۲۰۴	۶-۳-۱-۴- تشخیص با توموگرافی با استفاده از تابش تک فوتون (SPECT)
۲۰۵	۶-۳-۱-۵- تشخیص غیرزنده با رادیو ایمنونواسی
۲۰۶	۶-۳-۲- کاربردهای درمانی پزشکی هسته‌ای
۲۰۷	۶-۳-۲-۱- جراحی با اشعه
۲۰۸	۶-۴- استفاده از تکنولوژی هسته‌ای در صنعت و معدن
۲۱۰	۶-۴-۱- آنالیز مواد
۲۱۱	۶-۴-۲- اندازه‌گیری و کنترل
۲۱۲	۶-۴-۳- تصویربرداری و تشخیص عیوب
۲۱۳	۶-۴-۴- ردیابی در فرآیندها
۲۱۵	۶-۴-۵- سایر کاربردهای تکنیک‌های هسته‌ای در صنعت
۲۱۷	۶-۵- کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در بخش کشاورزی و تغذیه
۲۱۸	۶-۵-۱- حوزه‌های زراعی و باغبانی
۲۲۰	۶-۵-۲- حوزه‌های علوم دامی و شیلات و آبزیان
۲۲۱	۶-۵-۳- حوزه‌های علوم تغذیه و صنایع غذایی
۲۲۴	۶-۵-۴- حوزه‌های بیوتکنولوژی، تحقیقات کشاورزی و آب و خاک
۲۲۵	۶-۶- کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در باستان شناسی و زمین شناسی

فصل هفتم: کاربردهای غیرصلح‌آمیز و نظامی تکنولوژی هسته‌ای

۲۲۹	مقدمه
۲۳۰	۷-۱- بمب‌های شکافت هسته‌ای
۲۳۳	۷-۱-۱- بمب‌های اورانیومی و پلوتونیومی
۲۳۴	۷-۲- بمب‌های همجوشی یا گداخت هسته‌ای
۲۳۶	۷-۳- بمب شکافت- گداخت هسته‌ای (نوترونی)
۲۳۸	۷-۴- کلاهک و توپ هسته‌ای

۲۳۹	..... جنگ رادیولوژی (اشعه‌ای)
۲۴۱	..... بمب کثیف ۱-۵-۷
۲۴۲	..... انفجارهای هسته‌ای و آثار زیانبار آن ۶-۷
۲۴۵	..... سیمای تسلیحات هسته‌ای در کشورهای جهان ۷-۷
۲۴۷	..... ایالات متحده آمریکا ۱-۷-۷
۲۴۸	..... روسیه و انگلستان ۲-۷-۷
۲۵۰	..... فرانسه و چین ۳-۷-۷
۲۵۲	..... اسرائیل ۴-۷-۷
۲۵۳	..... هند و پاکستان ۵-۷-۷
۲۵۴	..... کره شمالی ۶-۷-۷
۲۵۷	..... منابع و مآخذ

سفید

فصل اول

مبانی فیزیک هسته‌ای

مقدمه

از مدت‌ها قبل انسان می‌دانست که تمام مواد، از ذرات بنیادی یا عناصر شیمیایی ساخته شده‌اند. وجود چنین ذراتی برای اولین بار توسط فیلسوفان یونانی همچون دموکریتوس^۱، لئوسیپوس^۲ و اپیکورینز^۳ پیشنهاد شد. بنابراین، یک اتم کوچکترین جزء اصلی غیرقابل تقلیل یک سیستم شیمیایی و اساسی‌ترین اجزاء مولکول‌ها و مواد ساده تعریف گردیده و واژه اتم نیز از کلمه یونانی atomos به معنای ناگسستگی و تقسیم‌ناپذیر گرفته شده است. اما این مفهوم در قرن ۱۸، توسط راجر بسکوویچ^۴ و بعد از آن، جان دالتون^۵ مورد تحقیق و تعریف دوباره قرار گرفت. دانشمندان با توجه به مجموعه آزمایش‌های رادفورد به این نتیجه رسیدند که اتم‌ها، برخلاف نامشان از اجزای کوچکتری هم تشکیل شده‌اند. طبق تعریف جدید، «یک اتم، کوچکترین سنگ بنای یک عنصر شیمیایی است که کلیه خصوصیات ویژه آن عنصر را دارا بوده و در صورت تقسیم آن به اجزاء کوچکتر، این خصوصیات را از دست خواهد داد». برحسب نظریه اتمی، عنصر عبارت است از یک جسم خالص ساده که با روش‌های شیمیایی نمی‌توان آن را تفکیک کرد. تعداد عناصر شناخته شده در طبیعت ۹۲ عنصر بوده، به طوری که هیدروژن اولین و ساده‌ترین عنصر و اورانیوم نیز آخرین عنصر طبیعی می‌باشد. بشر توانسته است به طور مصنوعی و به کمک واکنش‌های هسته‌ای در راکتورهای اتمی و یا به کمک شتاب دهنده‌های قوی، بیش از ۲۰ عنصر دیگر بسازد که

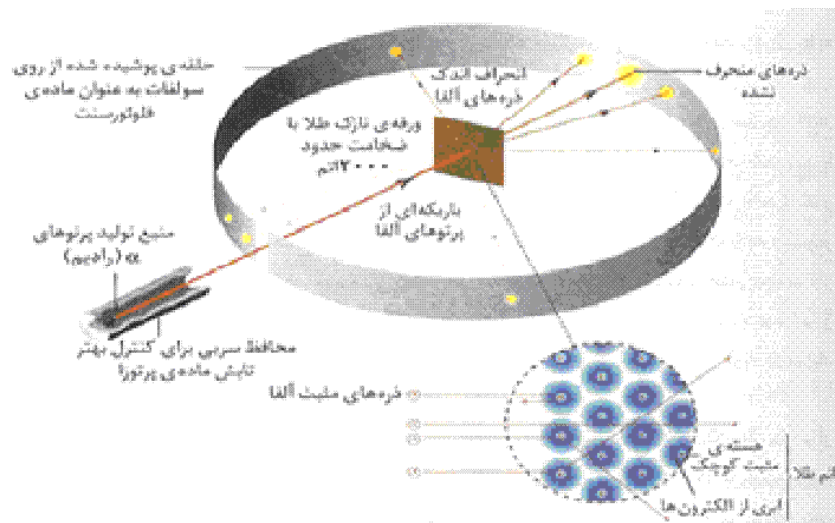
-
1. Democritus
 2. Leucippus
 3. Epicureanism
 4. Rudjer Boscovich
 5. John Dalton

تمام آنها ناپایدار بوده و عمر کوتاه داشته و به سرعت، با انتشار پرتوهای تخریب می‌شوند. همچنین با تلاش آماندو آواگادرو^۱ در قرن ۱۹ بود که دانشمندان توانستند تفاوت میان اتم‌ها و مولکول‌ها را درک نمایند. در طبیعت، اغلب اوقات اتفاق می‌افتد که اتم‌های عناصر مختلف به صورت مولکول با یکدیگر اتحاد یافته و تشکیل اجسام مرکب را می‌دهند. کوچک‌ترین ذره چنین ترکیبی، مولکول نامیده می‌شود. یکی از معروف‌ترین این اتحادها، مولکول آب است که از یک اتم اکسیژن و دو اتم هیدروژن تشکیل شده است. آب، برخلاف اکسیژن و هیدروژن، عناصر شیمیایی نبوده و ترکیبات شیمیایی می‌باشند که با عناصر متفاوت هستند. به طوری که اگر یک مولکول آب را تجزیه کنیم، خصوصیات آب از دست می‌رود و فقط ذرات تشکیل دهنده آن، یعنی هیدروژن و اکسیژن باقی می‌مانند که خصوصیتی کاملاً متفاوت با آب دارند. مولکول‌ها نیز مثل اتم‌ها، به طرز غیرقابل تصویری کوچک هستند. در یک لیوان آب معمولی، تقریباً 6×10^{24} مولکول آب وجود دارد. بایستی یادآور شد که انسان رفتار طبیعت در «قلمرو علوم اتمی» را به هرحال نمی‌تواند به طور کامل درک کند و ذهنیت ببخشد؛ بلکه قادر است فقط قسمتهایی از خصوصیات آنها را به صورت الگو و مدل و نمودار مجسم کند که البته هیچ گاه خصوصیات کامل آنها را در بر نخواهد گرفت.

۱-۱- ساختار اتم

دانشمندان برای نمایش اتم‌ها که بسیار کوچک هستند و دیده نمی‌شوند از مدل استفاده می‌کنند. تقریباً ۷۵ سال پیش، ارنست رادرفورد^۲ با کمک دو دانشجویش به نام گایگر و مارسدن، با انجام آزمایشی که «پراکندگی» نام دارد، به وجود هسته پی برد و با این کشف، در حقیقت فیزیک اتمی جدید را بنیان گذارد. این فیزیکدان بریتانیایی فکر می‌کرد که اتم‌ها مثل مدل کیک کشمش تامسون، از تعدادی الکترون تشکیل شده‌اند که در یک فضای پیوسته با بار مثبت قرار دارند. برای پی بردن به این امر، وی یک ورق نازک طلا را مورد اصابت ذرات آلفا قرار داد تا درون اتم‌ها را شناسایی کند. اگر مواد در یک چنین ورق فلزی، به طور متناسب و یکنواخت پخش بودند، ذرات آلفا در همان مسیر پرواز خود به حرکت ادامه می‌دادند؛ اگرچه در این حالت، کمی از سرعت ذرات آلفا کاسته می‌شد. تمام «ذرات آلفا»، تقریباً به همین شکل رفتار کردند. البته، تعداد کمی نیز کاملاً از مسیر خود منحرف شدند؛ درست مثل این که به یک گلوله کوچک، اما خیلی سنگین برخورد کرده باشند. رادرفورد، از این آزمایش چنین نتیجه‌گیری کرد که تقریباً تمام جرم اتم طلا در یک هسته بسیار کوچک و ناچیز متمرکز یافته است و بارهای مثبت در این ناحیه اتم متمرکز شده‌اند.

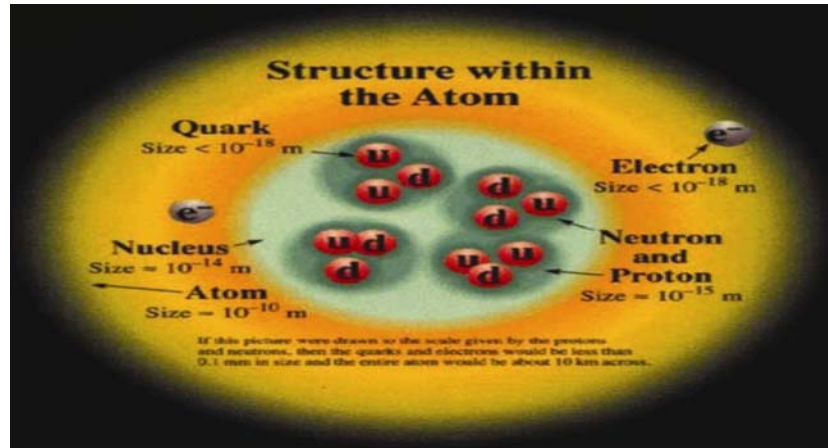
1. Amendo Avogadro
2. Ernest Raderford



شکل (۱-۱): بمباران ورقه نازکی از طلا به وسیله پرتوهای پرنرژی آلفا

بعد از آزمایشات متعدد مشخص گردید که در مرکز اتم، یک هسته بسیار کوچک مرکزی متشکل از ذرات هسته‌ای پروتون و نوترون قرار دارد که از نظر الکتریکی، دارای بار مثبت بوده و تقریباً تمام جرم اتم را تشکیل می‌دهد. وظیفه نوترون در هسته، کنار هم نگاهداشتن پروتون‌های هم بار است. پروتون‌ها یک نیروی جاذبه بسیار قوی را با نوترون‌ها درون هسته هر اتم به وجود می‌آورند. تعداد نوترون‌ها در هسته اتم‌ها نیز یا مساوی با تعداد پروتون‌ها بوده و یا اینکه از آنها بیشتر می‌باشد. به دور این هسته، در فضاهایی به نام اوربیتال (مدارهایی مجازی به نام تراز انرژی)، ذرات کوچک و بسیار سبکی با نام الکترون در حرکت بوده و به صورت پوسته‌های متموج الکترون، بقیه اتم را تشکیل می‌دهند. پروتون و الکترون یکدیگر را جذب می‌کنند و همین نیرو سبب پایدار ماندن الکترون‌ها در حرکت به دور هسته می‌گردد. پروتون، نوترون و الکترون به عنوان ذره‌های زیراتمی^۱ نیز شناخته می‌شوند. ساده‌ترین اتم، هیدروژن است. در این اتم، فقط یک الکترون به دور هسته بسیار کوچکی می‌گردد. اتم‌های سنگین‌ترین فلزات، در واقع دارای «ساختمان اسفنجی» هستند و تقریباً فقط از فضای خالی تشکیل شده‌اند. البته بایستی یادآوری کرد که هر کدام از این سه ذره پروتون، نوترون و الکترون، خود از ذرات دیگری نیز تشکیل شده‌اند. سرانجام فیزیکدانان ذرات سازنده ماده را به دو دسته لپتون‌ها^۲ و کوارک‌ها^۳ تقسیم کردند. در این تقسیم‌بندی، هادرون‌ها از جمله پروتون و نوترون ذره بنیادی نبوده و از کوارک‌ها ساخته شده‌اند.

1. Subatomic Particles
2. Leptons
3. Quarks



شکل (۱-۲): ساختار درون یک اتم

۲-۱- بار الکتریکی و جرم اجزا اتمی

پروتون حامل یک واحد بار الکتریکی مثبت ($1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$) و نوترون نیز از نظر بار الکتریکی خنثی است. هر دو ذره هسته اتم، ۱۸۳۷ بار سنگین‌تر از الکترون هستند. هر الکترون نیز حامل یک واحد بار الکتریکی منفی است که از نظر مقدار مساوی بار الکتریکی پروتون می‌باشد. تعداد الکترون‌های مدار مساوی تعداد پروتون‌ها در هسته است به نحوی که بار الکتریکی آنها دارای توازن بوده و کل اتم از نظر بار الکتریکی خنثی است. اما چنانچه اتمی یک یا چند الکترون مداری را بگیرد یا از دست بدهد، اتم باقیمانده دارای بار الکتریکی گردیده و اصطلاحاً گفته می‌شود اتم یونیزه شده است. در این راستا اگر اتمی یک الکترون از دست بدهد به یون یک بار مثبت و اگر الکترون بگیرد به یون یک بار منفی تبدیل می‌گردد. ارزش بار الکتریکی الکترون‌ها و پروتون‌ها، بار بنیادی نامیده می‌شود. با توجه به این که شعاع اتم (حدود یک آنگسترم یا 10^{-10} متر) ۱۰۰ هزار برابر شعاع هسته (حدود 10^{-15} متر) می‌باشد، بنابراین قسمت اعظم اتم فضای توخالی است. برای معرفی عناصر، از عدد جرمی و عدد اتمی استفاده می‌گردد. تعداد پروتون‌ها را عدد اتمی نامیده و با حرف Z نشان می‌دهند. تمام اتم‌های یک عنصر مشخص دارای عدد اتمی خاص آن عنصر می‌باشند. عدد اتمی عناصری که در طبیعا یافت می‌شوند از ۱ برای هیدروژن تا ۹۲ برای اورانیوم که سنگین‌ترین عنصر طبیعی است متغیر می‌باشد. عناصری که عدد اتمی بزرگتر از ۹۲ دارند (عناصر ترانس اورانیوم) به طور مصنوعی تولید شده‌اند.

از طرفی، مجموع تعداد پروتون‌ها (Z) و نوترون‌های اتم (N) را عدد جرمی (A) می‌نامند. هر جزء هسته اتم، نوکلئون و مجموع پروتون‌ها و نوترون‌ها، نوکلئون‌ها نامیده می‌شود. جرم هسته در حدود 10^{-27} kg است. اما در این مورد، یک کیلوگرم واحد جرم بسیار بزرگی بوده و بایستس واحد مناسب‌تری

فصل اول: مبانی فیزیک هسته‌ای / ۱۷

تعریف شود. این واحد جدید، واحد یکسان جرم (U) می‌باشد و بر این اساس بیان شده که جرم یک اتم کربن ۱۲ دقیقاً ۱۲u است (واحد یکسان جرم، جانشین واحد جرم اتمی قبلی شده است که مبنای آن جرم اکسیژن ۱۶ یعنی ۱۶amu بود). واحد جرم اتمی ^1amu است. در این مقیاس، جرم پروتون و نوترون تقریباً برابر با یک amu خواهد بود. اما جانشین واحد جرم اتمی گردیده است. بنابراین یک u برابر با kg 1.66054×10^{-27} خواهد بود. اگر در معادله انشتین $E=Mc^2$ ، m برحسب kg و C برحسب $(3 \times 10^8) \text{ m/s}$ بیان شود E برحسب ژول بدست می‌آید. در نتیجه یک u برابر با $1.49246 \times 10^{-10} \text{ J}$ یا 931 MeV خواهد بود. اما ژول نیز واحد بسیار بزرگی برای انرژی بوده و واحد مناسب‌تر الکترون‌ولت eV می‌باشد که برابر است با مقدار انرژی کسب شده توسط الکترون که در نتیجه اختلاف پتانسیلی معادل ۱ ولت شتاب یافته باشد. همچنین با توجه به اینکه بار الکتریکی یک الکترون $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ است یک الکترون ولت برابر با $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ و یک ژول نیز برابر $6.242 \times 10^{12} \text{ MeV}$ خواهد بود. از طرفی یک U نیز برابر با ۹۳۱ MeV خواهد بود.

جدول (۱-۱): ذره‌های زیراتمی و مشخصات آنها

ذره زیراتمی	مکان	وزن (واحد جرم اتمی)	بار الکتریکی	علامت اختصاری
پروتون	هسته	1.007276 u	+۱	p
نوترون	هسته (به جز H)	1.008665 u	۰	n
الکترون	مدارات	0.000548 u	-۱	e

۳-۱- جدول تناوبی و آرایش الکترونی

جدول تناوبی عناصر شیمیایی، نمایشی از عناصر شیمیایی است که براساس ساختار الکترونی مرتب شده است؛ به‌طوری که بسیاری از خواص شیمیایی به صورت منظم در طول جدول تغییر نماید. جدول اولیه، بدون اطلاع از ساختار داخلی اتم‌ها ساخته شد. اگر عناصر را برحسب جرم اتمی آنها مرتب کرده و آن‌گاه، نمودار خواص معین دیگر آنها را برحسب جرم اتمی رسم نماییم، می‌توان نوسان یا تناوب این خواص را به صورت تابعی از جرم اتمی مشاهده نمود. اولین کسی که توانست این نظم را مشاهده نماید، یک شیمیدان آلمانی به نام ولفگانگ دینر^۲ بود. به دنبال او، شیمیدان انگلیسی الکساندر نیولندز^۳ متوجه گردید که عناصر از نوع مشابه در فاصله‌های هشت تایی یافت می‌شوند. سرانجام، شیمیدان آلمانی لوتار

1. atomic mass unit

2. Johann Wolfgang Deiner

3. John Alexander Reina Newlands

می‌پر^۱ و شیمیدان روسی دیمتری مندلیف^۲ تقریباً بطور همزمان، اولین جدول تناوبی را با مرتب نمودن عناصر برحسب جرمشان توسعه دادند. وقتی مندلیف، عناصر شیمیایی شناخته شده را براساس تشابهاتشان در شیمی مرتب کرد، متوجه شد که قرار دادن دقیق آنها بر اساس جرم اتمی، ناهماهنگی‌های را بوجود می‌آورد. او متوجه شد که اگر ید و تلوریوم بر اساس جرم اتمی قرار بگیرند، ترتیبشان غلط خواهد بود می‌رسد و وقتی در جدول در جای مناسب قرار خواهند گرفت که جابه‌جا شوند. با قرار دادن آنها بر اساس نزدیکتر بودن خواص شیمیایی، شماره آنها در جدول تناوبی، همان عدد اتمی آنها بود.

بعداً نشان داده شد که عدد اتمی (Z) برابر با بار الکتریکی هسته (تعداد پروتون‌ها) می‌باشد و این بار الکتریکی است که خواص شیمیایی عناصر را بوجود می‌آورد نه جرم اتمی. البته به نظر می‌رسید که عدد اتمی تقریباً با جرم اتم نسبت دارد؛ اما همانطور که تفاوت جرم، خواص شیمیایی نشان داد، بازتاب خاصیت دیگری به جز جرم بود. عجیب بودن این ترتیب، بالاخره بعد از تحقیقات هنری موسلی^۳ در سال ۱۹۱۳ تشریح شد. موسلی کشف کرد که ارتباط دقیقی بین طیف بازتاب اشعه X عناصر و محل صحیح آنها در جدول تناوبی وجود دارد. شیمیدان‌ها اطلاعات هر اتم را به صورت A_ZX می‌نویسند که در آن A عدد جرمی، Z عدد اتمی و X نماد شیمیایی عنصر مورد نظر می‌باشد. در مجموع، تعداد پروتون‌ها، نام و محل قرار گرفتن عنصر را در جدول تناوبی (جدول مندلیف) مشخص می‌کند. انواع گوناگون اتم‌ها در جدول تناوبی لیست شده‌اند. اتم هیدروژن، یک پروتون داشته و در خانه شماره ۱ جدول قرار گرفته است. همین‌طور، اتم اورانیوم در خانه شماره ۹۲ قرار دارد، یعنی دارای ۹۲ پروتون است. تمام اتم‌های با عدد اتمی مشابه، دارای خصوصیات فیزیکی یکسان بوده و واکنش شیمیایی یکسان از خود نشان می‌دهند. بنابراین، عناصر در یک ستون (گروه)، از لحاظ شیمیایی دارای خواص مشابهی می‌باشند.

با توجه با اینکه خصوصیات شیمیایی یک عنصر عمدتاً توسط آرایش الکترونی اتم‌های آن عنصر و به ویژه، آرایش الکترونی لایه ظرفیت معین می‌شوند، بنابراین، با دانستن آرایش یک اتم می‌توان خواص آن را پیشگویی نمود. بایستی توجه داشت، الکترون دارای دو وضعیت حرکتی اسپینی و اوربیتالی است. گردش الکترون به دور خودش را حرکت اسپینی یا زاویه‌ای الکترون و حرکت الکترون در اطراف هسته اتم را حرکت اوربیتالی می‌نامند. اوربیتال^۴ فضایی سه بعدی در اطراف هسته اتم است که احتمال حضور الکترون در آنجا بسیار زیاد است. هر اوربیتال را با سه عدد کوانتومی n و L و m_l مشخص می‌کنند که n عدد کوانتومی اصلی و مشخص کننده شماره لایه‌ها، L عدد کوانتومی اوربیتالی و مشخص کننده زیرلایه‌ها

1. Lothar Meyer
2. Dmitry Ivanovich Mendeleev
3. Henry Gwyn Jeffries Moseley
4. orbital

فصل اول: مبانی فیزیک هسته‌ای / ۱۹

و ml مشخص کننده جهت گیری الکترون ها در اوربیتال می باشد. طبق مکانیک کوانتومی می دانیم که الکترون ماهیت موجی - ذره ای دارد، یعنی هم رفتار موجی داشته و هم به صورت یک ذره است. هر ناحیه که در آنجا تعدادی از الکترون ها به دور هسته در حرکتند، یک لایه نامیده می شود. تعداد لایه های مجاز که الکترون روی آنها حرکت می کنند و نیز تعداد الکترون های موجود در هر لایه محدود می باشند.

فصل اول: مبانی فیزیک هسته‌ای / ۲۱

لایه‌ها با حروف K, L, M, N, ... نشان داده می‌شوند و حداکثر تعداد الکترون‌ها روی هر لایه، به ترتیب ۲، ۸، ۱۸، ۳۲ و ... می‌باشد. تعداد لایه الکترون در یک اتم، تعیین کننده ردیفی است که در آن قرار می‌گیرد. هر لایه به زیرلایه‌های متفاوتی تقسیم شده و هر اندازه عدد اتمی افزایش می‌یابد، این لایه‌ها به ترتیب به صورت $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d, 7p, 8s, 5g, 6f, 7d, 8p$ و ... بر اساس ساختار جدول پر می‌شوند. از آنجایی که الکترون‌های خارجی‌ترین لایه، خواص شیمیایی را تعیین می‌نمایند، این لایه‌ها در میان گروه‌های یکسان مشابه هستند. عناصر همجوار با یکدیگر در یک گروه، علیرغم اختلاف مهم در جرم، دارای خواص فیزیکی مشابه می‌باشند. عناصر همجوار با یکدیگر در یک ردیف، دارای جرم‌های مشابه، ولی خواص متفاوت می‌باشند. برای مثال، عناصر بسیار نزدیک به نیتروژن (N) در ردیف دوم، کربن (C) و اکسیژن (O) می‌باشند. علیرغم تشابه آنها در جرم که بصورت ناچیزی در واحد جرم اتمی تفاوت دارند، دارای خواص بی‌نهایت متفاوتی هستند؛ به طوری که اکسیژن دو اتمی یک گاز بوده و سوختن را تشدید می‌نماید؛ در حالی که نیتروژن دو اتمی گازی است که سوختن را تشدید نمی‌کند و در عین حال، کربن یک جامد است که حتی می‌تواند سوزانده شود (به صورت الماس).

۱-۴- گروه بندی عناصر شیمیایی

تعداد عناصر شناخته شده در طبیعت، حدود ۹۲ عنصر است. هیدروژن، اولین و ساده‌ترین عنصر و پس از آن هلیوم، کربن، ازت، اکسیژن و ... فلزات روی، مس، آهن، نیکل و ... و بالاخره آخرین عنصر طبیعی به شماره ۹۲، عنصر اورانیوم است. بشر توانسته است به طور مصنوعی و به کمک واکنش‌های هسته‌ای در راکتورهای اتمی و یا به کمک شتاب دهنده‌های قوی، بیش از ۲۰ عنصر دیگر بسازد که تمام آنها ناپایدار بوده و عمر کوتاه دارند و به سرعت، با انتشار پرتوهایی تخریب می‌شوند. در کل، عناصر را می‌توان براساس آرایش الکترونی آنها، در چهار گروه اصلی به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

الف. گازهای نجیب: در جدول تناوبی، گازهای نجیب در انتهای هر دوره جای دارند. این عناصر، گازهایی بیرنگ بوده و از نظر شیمیایی، غیرفعال و دیامغناطیسی هستند. به استثنای هلیوم، تمام گازهای نجیب دارای آرایش الکترونی خارجی $ns^2 np^6$ هستند که آرایش‌های بسیار پایدارند.

ب. عناصر نماینده: این عناصر، گروه‌های A از جدول تناوبی را تشکیل داده و شامل فلزات و غیرفلزات می‌باشند. خواص شیمیایی و فیزیکی این عناصر بسیار متنوع است؛ به طوری که بعضی از آنها دیامغناطیس و بعضی دیگر پارامغناطیس هستند؛ با اینحال، کلیه ترکیبات این عناصر، معمولاً دیامغناطیس و بی‌رنگ خواهند بود. لایه‌های الکترونی تمام این عناصر، کامل و یا پایدار هستند؛ به استثنای لایه‌های خارجی که الکترون‌های آنها را می‌توان به عنوان الکترون‌های اضافه شده در نظر

گرفت. این لایه خارجی را لایه والانس و الکترون‌های آن را الکترون‌های والانس می‌نامند. تعداد الکترون‌های والانس هر اتم، برابر با شماره گروه آن اتم است. خواص شیمیایی این عناصر، به تعداد الکترون‌های والانس آنها بستگی دارد.

ج. عناصر واسطه: عناصر واسطه، گروه‌های B از جدول تناوبی را تشکیل می‌دهند. از ویژگی‌های این عناصر درون سازی آنهاست، یعنی آخرین الکترونی که براساس روش آفبا به آنها اضافه می‌شود، یک الکترون d درونی است. الکترون‌های دو لایه آخری عناصر واسطه، در واکنش‌های شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمام این عناصر، فلز بوده، بیشتر آنها پارامغناطیسی هستند و ترکیبات شدیداً رنگین و پارامغناطیس تولید می‌کنند.

د. عناصر واسطه داخلی: این عناصر، در پایین جدول تناوبی قرار دارند. یک سری از عناصر دوره ششم که بعد از لاتانیوم قرار دارند، سری لاتانیوم نامیده می‌شود و نظیر این سری در دوره هفتم، به سری اکتینیدها معروفند. آخرین الکترون اضافه شده به هر یک از این عناصر، یک الکترون f است. چون این الکترون به سومین لایه از آخر اضافه می‌شود، بدین جهت، سه لایه آخر این عناصر ممکن است در واکنش‌های شیمیایی آنها دخالت کنند. تمام عناصر واسطه داخلی، فلز می‌باشند. این عناصر، به طور کلی پارامغناطیس بوده و ترکیبات آنها، پارامغناطیس و به شدت رنگین هستند.

۵-۱- پیوندهای شیمیایی

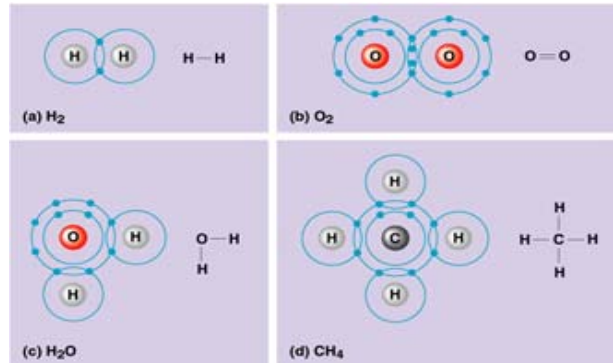
بررسی مواد ساده و مرکب در طبیعت نشان می‌دهد که اکثریت قریب به اتفاق اتمها در طبیعت به حالت آزاد وجود ندارند. مواد ساده‌ای که در طبیعت به حالت آزاد وجود دارند، به ندرت به صورت مولکول تک اتمی بوده و عمدتاً به صورت مولکولهای دو یا چند اتمی طبیعت پیدا می‌شوند. برای مثال گاز هیدروژن به صورت مولکول دو اتمی و اکسیژن به صورت مولکول دواتمی و گاهی نیز به صورت مولکول سه‌اتمی اوزون یافت می‌شود. تنها گازهای بی‌اثر در طبیعت به صورت تک اتمی یافت می‌شوند و میل ندارند با عنصرهای دیگر پیوند تشکیل دهند یا با اتمهای دیگری از نوع خود به یکدیگر پیوندند؛ ولی عنصرهای دیگر به جز گازهای بی‌اثر نمی‌توانند به تنهایی و بدون پیوستن به اتمهای عنصرهای دیگر یا اتمهای دیگری از نوع خود به بقای خود ادامه دهند و حتماً باید با اتم یا اتمهای دیگر پیوند تشکیل دهند. وقتی دو اتم هیدروژن به یکدیگر نزدیک می‌شوند، اوربیتال‌های اتمی آنها به یک اوربیتال مولکولی تبدیل می‌شود. در اوربیتال مولکولی، ابر الکترونی تحت تاثیر جاذبه دو هسته قرار دارد؛ در حالی که در اوربیتال اتمی، ابر الکترونی تحت تاثیر جاذبه یک هسته است. چون نیروی جاذبه هسته‌ها در فضای بین دو هسته از جاهای دیگر بیشتر است، در نتیجه تراکم ابر الکترونی در فاصله دو هسته از جاهای دیگر بیشتر خواهد بود. به هم پیوستن دو اتم را معمولاً تشکیل پیوند می‌گویند. انرژی پیوند،

مقدار انرژی آزاد شده به هنگام تشکیل پیوند بین یک مول اتمهای گازی شکل یک عنصر با یک مول اتمهای گازی شکل همان عنصر یا عنصر دیگر می باشد. انواع پیوند شیمیایی عبارتند از:

الف. پیوند کووالانسی: واکنش شیمیایی اتمها بطور عمده‌ای وابسته به آثار متقابل میان الکترون‌های آن می‌باشد. خصوصا الکترون‌هایی که در خارجی‌ترین لایه اتمی قرار دارند (الکترون‌های ظرفیتی)، بیشترین اثر را در واکنش‌های شیمیایی نشان می‌دهند. الکترون‌های مرکزی که در لایه خارجی نیستند، نیز موثر می‌باشند؛ ولی به علت وجود بار مثبت هسته اتمی، نقش ثانوی است. اتمها، تمایل زیادی به تکمیل لایه الکترونی خارجی خود و یا تخلیه کامل آن دارند، لایه خارجی هیدروژن و هلیوم جای دو الکترون و در همه اتم‌های دیگر، ظرفیت هشت الکترون را دارند. این عمل، با استفاده مشترک از الکترون‌های اتم‌های مجاور و یا با جدا کردن کامل الکترون‌ها از اتم‌های دیگر فراهم می‌شود. هنگامی که الکترون‌ها در مشارکت اتم‌ها قرار می‌گیرند، یک پیوند کووالانسی میان دو اتم تشکیل می‌گردد. پیوندهای کووالانسی، قوی‌ترین نوع پیوندهای اتمی می‌باشند. به طور مثال، در مولکول هیدروژن، اتم‌ها الکترون به اشتراک می‌گذارند و با استفاده از مدل بور، الکترون‌های مشترک بر روی مدار خارجی هر دو اتم گردش می‌کنند. به بیان دیگر، ابر الکترونی تحت تاثیر جاذبه دو هسته قرار دارد و تراکم ابر الکترونی در فاصله دو هسته از جاهای دیگر بیشتر است. پیوند کووالانسی بین دو اتم هیدروژن از همپوشانی اوربیتال s بوجود می‌آید و مولکول حاصل بیضوی است که هسته‌های دو اتم در دو کانون آن قرار دارند و تراکم ابر الکترونی در بین دو هسته زیاد و در اطراف هسته‌ها کمتر است. با تشکیل پیوند، اوربیتال‌های اتمی به اوربیتال مولکولی تبدیل می‌شوند. اوربیتال‌های مولکولی حاصل از تشکیل پیوند میان دو اتم هیدروژن بیضوی است که تراکم ابر الکترونی بر روی خط واصل بین هسته‌های آن از جاهای دیگر بیشتر است. این شکل اوربیتال مولکولی را اوربیتال مولکولی سیگما یا پیوند سیگما می‌نامند.

در نوع دیگر از اوربیتال‌های مولکولی، نه تنها سطح انرژی پائین نیامده و انرژی آزاد نمی‌شود؛ بلکه سطح انرژی از اتم‌های اولیه نیز بالاتر است، این اوربیتال را نمی‌توان اوربیتال پیوندی نامید؛ بلکه یک اوربیتالی ضد پیوندی است. هرچه در یک مولکول، تعداد اوربیتال‌های پیوندی اشغال شده بیشتر باشد، مولکول پایدارتر است؛ ولی هرگاه تعداد اوربیتال‌های پیوندی و ضدپیوندی برابر باشد، دو اتم از یکدیگر جدا می‌مانند و بین آنها پیوندی تشکیل نمی‌شود. تعداد پیوند میان دو اتم برابر نصف تعداد الکترون‌های موجود در اوربیتال‌های پیوندی منهای نصف تعداد الکترون‌های موجود در اوربیتال‌های ضدپیوندی است. به طور مثال اکسیژن دو اوربیتال تک الکترونی دارد. هر گاه یک اتم اکسیژن و یک اتم هیدروژن به یکدیگر نزدیک شوند، پیوند تشکیل می‌شود. در اینحالت، هیدروژن به آرایش گاز بی‌اثر می‌رسد؛ ولی اکسیژن در خارجی‌ترین سطح انرژی خود دارای هفت الکترون شده و هنوز به آرایش گاز بی‌اثر نرسیده است. یکی از راه‌های رسیدن به آرایش الکترونی گاز بی‌اثر، پیوند با یک اتم هیدروژن دیگر و پدید آمدن

مولکول H_2O می باشد.



شکل (۱-۳): پیوند کووالانسی در مولکول‌های آب و متان

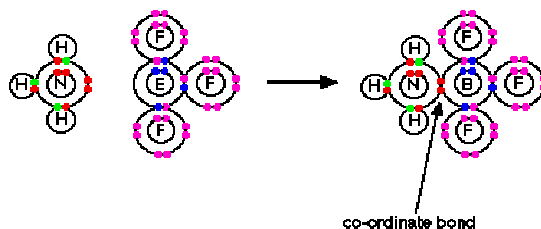
ب. پیوند کووالانسی کئوردینانسی (داتیو): پیوند داتیو در حقیقت همان پیوند کووالانسی است، فقط با کووالانسی این تفاوت را دارد که هریک از دو اتم شرکت کننده در پیوند کووالانسی یک الکترون به اشتراک می‌گذارند، به طوری که نمی‌توان تشخیص داد که الکترون‌های پیوندی متعلق به کدام اتم بوده است. ولی در پیوند داتیو (کووالانسی کئوردینانسی)، یک اتم دو الکترون پیوندی (دهنده الکترون) را تامین می‌کند و اتم دیگر که الکترون کم دارد (پذیرنده الکترون)، این دو الکترون را می‌گیرد. لازمه تشکیل پیوند کووالانسی بین دو اتم، این است که هر یک از دو اتم در آخرین تراز انرژی خود حداقل یک اوربیتال نیمه پر داشته باشند. در تشکیل پیوند داتیو نیز باید اتمی که الکترون به اشتراک می‌گذارد، در آخرین لایه، حداقل یک جفت الکترون غیرپیوندی داشته باشد و اتم دیگر نیز حداقل دارای یک اوربیتال خالی در آخرین لایه باشد. قطبیت این پیوند بیشتر از پیوندهای کووالانسی دیگر که یک الکترون از هر اتم در پیوند مشارکت دارد است. اتم الکترون دهنده قبل از تشکیل پیوند به صورت کاتیون و اتم الکترون گیرنده به صورت آنیون در نمی‌آید، بنابراین پیوند داتیو یک پیوند یونی نیست؛ اما می‌توان مولکول تشکیل شده را به عنوان ترکیبی دارای کاتیون هم در نظر گرفت.

به عنوان مثال، اتم نیتروژن با سه اتم هیدروژن، پیوند کووالانسی معمولی تشکیل می‌دهد و به آرایش الکترونی گاز بی‌اثر می‌رسد. پس از این عمل، برای نیتروژن یک جفت الکترون غیرپیوندی باقی می‌ماند که می‌تواند آن را به صورت داتیو در اختیار اتم‌هایی که به آن نیاز دارند، قرار دهد. از سوی دیگر، اتم هیدروژن که یک اتم الکترون در اوربیتال آن موجود است، هر گاه این الکترون را از دست بدهد، به یون تبدیل می‌شود که اوربیتال آن خالی است. حال هر گاه این یون به مولکول آمونیاک نزدیک شود، با آن پیوند داتیو برقرار می‌کند و خود را به آرایش الکترونی گاز بی‌اثر می‌رساند. این مجموعه که یون آمونیوم نامیده می‌شود، در بسیاری از ترکیبات مانند کلرید آمونیوم و هیدروکسید آمونیوم وجود دارد. به طور ساده

فصل اول: مبانی فیزیک هسته‌ای / ۲۵

می‌توان پیوند داتیو را به صورت یک فلش از طرف عنصر دهنده الکترون به سمت اتم گیرنده الکترون نشان داد. اندازه گیری‌های انجام شده نشان می‌دهد که انرژی و طول هر چهار پیوند نیتروژن - هیدروژن در یون آمونیوم کاملاً یکسان است؛ زیرا پیوند داتیو نیز مانند پیوند کووالانسی معمولی یک جفت الکترون است که بین هسته اتم نیتروژن و هسته اتم هیدروژن قرار گرفته است.

در پیوند یافتن مولکول NH_3 با مولکول BF_3 ، وقتی مولکول NH_3 با BF_3 مجاور شود، اتم نیتروژن آمونیاک، جفت الکترون غیریپوندی خود را در اوبیتال خالی بور در BF_3 قرار داده و با آن پیوند داتیو برقرار می‌سازد و به این ترتیب، اتم بور B نیز در لایه ظرفیت خود دارای هشت الکترون می‌شود. به شکل ساده تر با مدل خطی می‌توان این مولکول را به صورت زیر نشان داد. در شیمی به ذراتی مانند یون H^+ که برای رسیدن به آرایش الکترونی گاز بی اثر به دو یا چند الکترون نیاز دارند و یا مولکولهایی مثل BF_3 که در آنها اتم مرکزی در آخرین لایه، اوبیتال خالی وجود داشته و برای رسیدن به آرایش گاز بی اثر به الکترون محتاج بوده و در واکنشها به نقاطی متمایل می‌شوند که دارای الکترون باشند، ذرات الکترون دوست یا الکتروفیل گفته می‌شود. ذراتی مثل NH_3 که در آنها اتم مرکزی دارای جفت الکترون غیریپوندی بوده و در صورت لزوم می‌توانند جفت الکترون خود را در اختیار اتم دیگر گذاشته و پیوند داتیو برقرار نمایند و در واکنشها به سوی نقاطی که دارای بار مثبت هستند، متمایل شوند، ذرات هسته دوست یا مثبت دوست یا نوکلئوفیل نامیده می‌شوند. به این ترتیب، تمام یونهای مثبت و مولکولهایی که اتم مرکزی آنها هنوز از نظر آرایش الکترونی شبیه گاز بی اثر نشده است، الکتروفیل هستند و تمام یونهای منفی و مولکولهایی که اتم مرکزی آنها دارای حداقل یک جفت الکترون غیریپوندی است، نوکلئوفیل می‌باشند.

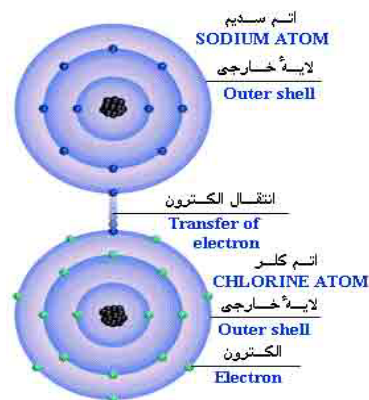


شکل (۴-۱): پیوند داتیو بین مولکولهای NH_3 و BF_3

ج. پیوند الکترووالانسی (یونی): در اتم لیتیم ۲ الکترون وجود دارد که یک الکترون در لایه والانس آن قرار دارد. به هنگام تشکیل پیوند، چون این اتم در دومین سطح انرژی دارای جفت الکترون غیریپوندی نیست و تفاوت سطح انرژی اول و دوم نیز بسیار زیاد است، نمی‌تواند الکترون خود را برانگیخته کند. بنابراین در خارجی‌ترین سطح انرژی، تنها یک الکترون خواهد داشت. هرگاه این اتم بخواهد پیوند کووالانسی تشکیل دهد، باید یک اتم تک الکترونی دیگر مانند فلئوئور پیوند تشکیل دهد.

هرچند اتم فلئور با اشتراک گذاشتن الکترون، ممکن است به آرایش الکترونی گاز بی‌اثر برسد؛ ولی لیتیم آرایش الکترونی گاز بی‌اثر پیدا نکرده است و برای رسیدن به آرایش الکترونی گاز بی‌اثر بعد از خود، باید هفت الکترون بگیرد که اگر بخواهد این هفت الکترون را با پیوند کووالانسی بدست آورد، خود نیز باید هفت الکترون در خارجی‌ترین سطح انرژی خود داشته باشد که این کار به هیچ وجه امکان پذیر نیست؛ ولی هرگاه این عنصر بخواهد آرایش الکترونی گاز بی‌اثر قبل خود را پیدا کند، باید یک الکترون موجود در اوربیتال خود را از دست بدهد تا آرایش الکترونی گاز بی‌اثر هلیوم را پیدا کند.

هنگامی که به وسیله اتم، یک یا چند الکترون از یک اتم دیگر جدا می‌گردد، یون‌ها ایجاد می‌شوند. یون‌ها، اتم‌هایی هستند که بعلت عدم تساوی تعداد پروتون‌ها و الکترون‌ها، دارای بار الکتریکی ویژه می‌شوند. اتم لیتیم به یون تبدیل شده و به آرایش گاز هلیوم می‌رسد. اتم فلئور نیز می‌تواند با گرفتن یک الکترون و تبدیل شدن به یون، خود را به آرایش الکترونی گاز بی‌اثر نئون برساند. یعنی به هنگام تشکیل پیوند بین لیتیم و فلئور، لیتیم یک الکترون به فلئور می‌دهد و با این عمل، هر دو به آرایش الکترونی گاز بی‌اثر می‌رسند. یون‌هایی که الکترون را برمی‌دارند، آنیون^۱ نامیده شده و بار منفی دارند. اتمی که الکترون را از دست می‌دهد، کاتیون^۲ نامیده شده و بار مثبت دارد. به این ترتیب اتم فلئور به یون منفی (آنیون) و اتم لیتیم به یون مثبت (کاتیون) تبدیل می‌شود. کاتیون‌ها و آنیون‌ها، به علت نیروی کولمبیک^۳ میان بارهای مثبت و منفی، یکدیگر را جذب می‌نمایند. این نوع پیوند را پیوند الکترووالانسی یا یونی می‌نامند که بین یک فلز و یک غیرفلز رخ می‌دهد. این نوع پیوند، از پیوند کووالانسی ضعیف‌تر است.



شکل (۱-۵): پیوند یونی در بلور نمک طعام

1. anion
2. cation
3. coulombic

همان طور که بیان گردید، پیوند کووالانسی در حالتی ایجاد می‌شود که در آن، الکترون‌ها به طور یکسان میان اتم‌ها به اشتراک گذارده می‌شود؛ در حالی که پیوند یونی در حالی ایجاد می‌گردد که الکترون‌ها کاملاً در انحصار آنیون قرار می‌گیرند. بجز در موارد محدودی از حالت‌های خیلی نادر، هیچکدام از این توصیف‌ها کاملاً دقیق نیست. در بیشتر پیوندهای کووالانسی، الکترون‌ها بطور نامساوی به اشتراک گذارده می‌شوند؛ به طوری که، زمان بیشتری را صرف گردش به دور اتم‌های با بار الکتریکی منفی‌تر می‌کنند که منجر به ایجاد پیوند کووالانسی با بعضی از خواص یونی می‌گردد. به طور مشابه، در پیوندهای یونی الکترون‌ها اغلب در مقاطع کوچکی از زمان به دور اتم با بار الکتریکی مثبت‌تر چرخیده و باعث ایجاد بعضی از خواص کووالانسی در پیوند یونی می‌گردند.

۱-۶- ایزوتوپ

یکی از فرض‌های بدیهی نظریه اتمی دالتون این است که هریک از اتم‌های یک عنصر، از هر لحاظ (از جمله جرم) با اتم‌های دیگر آن یکسان است؛ ولی در اوایل قرن بیستم معلوم شد که یک عنصر ممکن است شامل چند نوع اتم باشد که اختلاف آنها با یکدیگر در جرم اتمی (تعداد نوترون‌ها) خواهد بود. «فردریک سودی»، اصطلاح «ایزوتوپ» از واژه یونانی به معنای «هم مکان» را برای اتم‌های یک عنصر که که از نظر جرم با یکدیگر تفاوت دارند، پیشنهاد کرد. بنابراین، اتم‌های دارای عدد اتمی یکسان، اما با جرم اتمی متفاوت، به علت تعداد متفاوت نوترون‌های آنها، ایزوتوپ نامیده می‌شوند. در فارسی واژه‌های «همجا» و «هم‌مکان» در برابر واژه ایزوتوپ پیشنهاد شده است. برای نشان دادن ایزوتوپ‌های یک عنصر، ابتدا نام آن عنصر، سپس یک خط فاصله (-) و در آخر جرم اتمی آن ایزوتوپ نوشته می‌شود. مثلاً هیدروژن دارای سه ایزوتوپ هیدروژن-۱ (پروتیوم)، هیدروژن-۲ (دوتریوم) و هیدروژن-۳ (تری‌تیوم) است که هسته آنها به ترتیب حاوی ۰، ۱ و ۲ نوترون است. روش دیگر، نوشتن جرم اتمی ایزوتوپ در قسمت بالا و سمت چپ نماد شیمیایی عنصر است مانند ^{235}U که برای نمایش همان ایزوتوپ اورانیوم 235 است.

از آنجا که ایزوتوپ‌های یک عنصر ساختار الکترونی مشابهی دارند، بنابراین ویژگی‌های شیمیایی آنها نیز یکسان و در اغلب موارد غیرقابل تشخیص است، اما ویژگی‌های هسته‌ای آنها متفاوت است. بعضی از عناصر همچون سدیم، بریلیم و فلور، فقط به یک شکل ایزوتوپی در طبیعت وجود دارند؛ در حالی که اغلب عناصر همچون قلع بیش از یک ایزوتوپ دارند. ایزوتوپ‌ها با عدد جرمی آنها مشخص می‌شوند. اصطلاح نوکلید، به طور کلی، برای گونه‌های اتمی به کار می‌رود. در نهایت، اگر نسبت تعداد نوترون‌های موجود در یک ایزوتوپ به پروتون‌های آن خیلی کم یا خیلی زیاد باشد، هسته تمایل به متلاشی شدن پیدا می‌کند. در این حالت، به این ایزوتوپ ناپایدار و رادیواکتیو، رادیوایزوتوپ گفته می‌شود. این هسته‌ها

می‌توانند به طرق آلفا، بتا، گیراندازی اکترون و... تلاشی انجام داده و به حالت‌های پایدارتری از انرژی برسند. بایستی توجه داشت که به اتم‌هایی از یک عنصر که تعداد نوترون‌های برابری داشته باشند ایزوتون می‌گویند. در ایزوتون‌ها، تعداد نوترون‌ها برابر بوده ولی تعداد پروتون‌ها و الکترون‌ها متفاوت می‌باشند. همچنین به اتم‌هایی از یک عنصر که عدد جرمی برابری داشته باشند، ایزوبار می‌گویند. در ایزوبارها، مجموع پروتون‌ها و نوترون‌ها برابر و تعداد پروتون‌ها نابرابر هستند.

برای بررسی ایزوتوپ‌ها از طیف‌نگار جرمی استفاده می‌شود. دستگاه‌هایی از این نوع، ابتدا توسط فرانسیس استون (۱۹۱۹) و آرتور دمپستر (۱۹۱۸) با پیروی از اصول روش‌هایی که «جی.جی. تامسون» در ۱۹۱۲ ارائه کرده بود، ساخته شد. اگر عنصری شامل چند نوع اتم با جرم‌های متفاوت (ایزوتوپ) باشد، این تفاوت در مقادیر یون‌های مثبت حاصل از این اتم‌ها پدیدار می‌گردد. طیف نگار جرمی، یون‌ها را برحسب مقادیر نسبت بار به جرم از یکدیگر جدا می‌کند که در نتیجه آن، یون‌های مثبت متفاوت در محل‌های مختلف روی یک صفحه عکاسی اثر می‌کنند. وقتی دستگاه کار می‌کند، اتم‌های بخار ماده مورد مطالعه در معرض بمباران الکترونی قرار گرفته و به یون‌های مثبت تبدیل می‌شوند. این یون‌ها بر اثر عبور از یک میدان الکتریکی به قدرت چندین هزار ولت شتاب پیدا می‌کنند. اگر شدت میدان مغناطیسی و ولتاژ شتاب دهنده ثابت نگه داشته شوند، تمام یون‌هایی که مقدار بار به جرم مساوی دارند، در یک محل بر روی صفحه عکاسی متمرکز می‌شوند. این محل را می‌توان با تغییر پتانسیلی که موجب شتاب یون‌ها می‌شود، تغییر داد. ولی یون‌هایی که مقدار بار به جرم متفاوت دارند، در محل‌های مختلف روی صفحه عکاسی متمرکز می‌شوند. هرگاه یک وسیله الکتریکی که شدت اشعه یونی را اندازه می‌گیرد، جایگزین صفحه عکاسی شود، دستگاه را طیف‌سنج جرمی می‌نامند. با استفاده از طیف‌سنج جرمی جرم اتمی دقیق ایزوتوپ‌ها و ترکیب ایزوتوپی عناصر (انواع ایزوتوپ و مقدار نسبی هریک) با همدیگر تعیین می‌گردند.



شکل (۱-۶): طیف سنجی جرمی

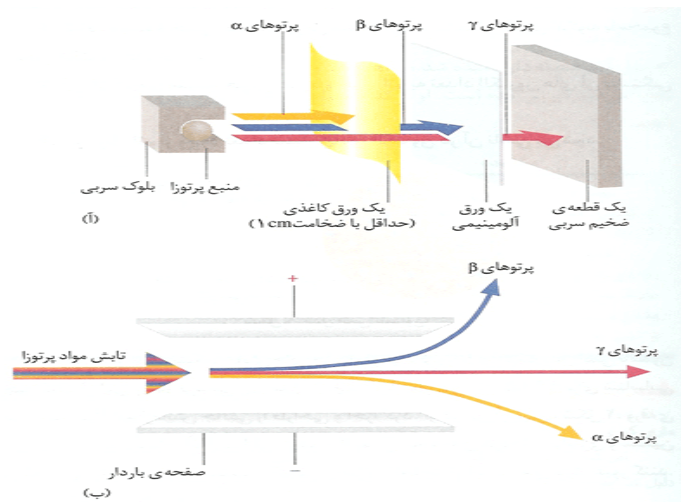
۷-۱- رادیواکتیویته

خاصیت پرتوزایی اورانیوم را آنتوان هانری بکرل^۱ کشف کرد. در سال ۱۸۹۶، این فیزیکدان فرانسوی که از کشف اشعه X به وسیله رونتگن مطلع شده بود، به دنبال یک رشته آزمایش روی سنگ معدنی به نام اورانیل، فعالیت‌های پرتوافشانی خود به خودی خاصی را کشف کرد و آن را «رادیواکتیویته» نام گذاشت. بعد از کشف خاصیت پرتوزایی اورانیوم توسط بکرل، ماری کوری فیزیکدان فرانسوی متولد لهستان که بیشترین تحقیقات خود را همراه با شوهرش پیر کوری انجام داد، بیشتر عناصر شناخته شده و خیلی از ترکیب‌ها را برای وجود خاصیت پرتوزایی مورد بررسی قرار داد. طبق نتایج آزمایش‌های پیر و ماری کوری، اورانیوم و توریم و نیز همه ترکیبات شیمیایی آنها دارای خواص پرتوزایی هستند. همچنین آنها توانستند رادیوم را که دارای خاصیت پرتوزایی بیش از میلیون برابر اورانیوم می‌باشد از پیچ بلند به عنوان اصلترین کانی معدنی اورانیوم استخراج نمایند. اما بیشتر پژوهش‌ها روی رادیواکتیویته به وسیله «لرد رادرفورد» انجام شده و در نتیجه تلاشهای وی، ماهیت خاصیت رادیواکتیویته عناصر مشخص گردید. امروزه معلوم شده است که تمام عناصر با عدد اتمی بالاتر از ۸۳ پرتوزا هستند که معمولاً به مقدار کم از ترکیب اورانیوم، رادیوم و توریم به دست می‌آیند. علاوه بر عناصر آخر جدول تناوبی، معلوم شده است که ساماریوم، سزیم و روبیدیوم نیز پرتوزا هستند. از میان این هسته‌ها، سه هسته توریم ۲۳۲ و اورانیوم ۲۳۸ و اورانیوم ۲۳۵ از دیگران پایدارترند. محصول نهایی هر سه هسته پس از متلاشی شدن، ایزوتوپ‌های سرب است. توریم به سرب ۲۰۸، اورانیوم ۲۳۸ به سرب ۲۰۶ و اورانیوم ۲۳۵ به سرب ۲۰۷ تبدیل می‌شود.

برخی از ایزوتوپ‌ها همچون توریم، اورانیوم و رادیوم، دارای هسته‌های ذاتا ناپایدار بوده و دارای نوترون و یا پروتون اضافی نسبت به یک آرایش پایدار می‌باشند که معمولاً این نوع ایزوتوپ‌ها را رادیوایزوتوپ می‌گویند. چنین هسته‌هایی با تجزیه (واپاشی)، بطور مداوم برای دستیابی به حالت پایدار در حال تبدیل به هسته‌های جدیدی هستند. در فرآیند واپاشی این عناصر، انرژی اضافی هسته به صورت تابش مرئی به خارج از هسته گسیل می‌یابد که همچون اشعه ایکس به درون حائل‌های کدر نفوذ کرده و روی فیلم‌های عکاسی اثر گذاشته و اثر یونشی به وجود می‌آورد. به ویژگی گسیل خود به خودی چنین تابشی، رادیواکتیویته یا پرتوزایی (پروتون‌زایی) و به عناصر دارای این ویژگی، عناصر رادیواکتیو و به تابشی که این عناصر گسیل می‌دارند، تابش پرتوزایی "تشعشع هسته‌ای" می‌گویند. بنابراین، رادیواکتیویته (پروتون‌زایی) تبدیل و تجزیه هسته‌ای خودبه‌خودی است که منجر به تشکیل عناصر جدید می‌شود. رادیواکتیویته از خصوصیات هسته بوده و در ویژگیهای شیمیایی و فیزیکی مثل حالت جامد، مایع

1. Becquerel

و گازی جسم تغییری نمی‌گذارد. هسته رادیواکتیو اصلی، هسته «مادر» و رادیوایزوتوپ تولید شده محصول «دختر» نامیده می‌شود. محصول دختر گاهی پایدار بوده و در شرایط ناپایدار مجدداً تجزیه می‌شود تا به ایزوتوپ پایدار برسد. مثلاً در زنجیره سری‌های رادیواکتیو، سری اورانیوم با $^{238}_{92}\text{U}$ آغاز شده و بعد از ۱۳ محصول دختر، به سرب $^{206}_{82}\text{Pb}$ منتهی می‌گردد.



شکل (۷-۱): تابش پرتوزایی آلفا، بتا و گاما از عناصر رادیواکتیو

۸-۱- انواع مکانیسم واپاشی هسته ناپایدار

قبل از پرداختن به بررسی انواع مکانیسم واپاشی در هسته‌های ناپایدار، به تعریف اکتیویته ویژه^۱ می‌پردازیم. یکی از مشخصه‌های مهم رادیوایزوتوپ‌ها، اکتیویته ویژه آنها یعنی میزان اکتیویته در هر گرم از عنصر یا ماده است که برحسب واحدهای مختلفی از جمله بکرل بر گرم (Bq/g)، میکروکوری بر گرم ($\mu\text{Ci/g}$)، واپاشی بر میلی گرم در ثانیه (dps/mg)^۲ و یا واپاشی بر میلی گرم در دقیقه (dpm/mg) بیان می‌شود.

الف. گسیل ذره آلفا (α): هنگامی که نسبت نوترون به پروتون در یک ایزوتوپ پرتوزا خیلی پایین باشد، از هسته آن ایزوتوپ، یک هسته پراثرژی هلیوم به نام ذره آلفا گسیل می‌شود. این ذره، ذره‌ای سنگین با بار الکترونیکی مثبت است که از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده است. در این نوع واپاشی، از تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های هسته پرتوزا، هریک به میزان دو واحد کم می‌شود. در این حال،

1. Specific Activity
2. Disintegration per second

از عدد جرمی آن به میزان چهار واحد کاسته می‌شود و حاصل آن یک هسته هلیوم یا به عبارت دیگر ذره آلفا می‌باشد. توانایی نفوذ ذرات آلفا در ماده، فوق‌العاده محدود است. برد پرنرژی‌ترین ذرات آلفا که از مواد پرتوزا گسیل می‌شوند، فقط در حدود چند سانتیمتر در هوا است. ضخامت لایه خارجی و مرده پوست بدن انسان برای جذب تمام ذرات آلفای حاصل از مواد پرتوزا کافی است. از این‌رو، تابش‌های آلفا که منشاء آنها در خارج از بدن قرار داشته باشند، خطر تابشی ندارند. اما وقتی که ایزوتوپ‌های گسیلنده ذرات آلفا در نواحی داخلی بدن قرار گیرند، دیگر لایه محافظت‌کننده‌ای وجود ندارد و باعث صدمه به بافت‌های زنده می‌شود.

ب. گسیل بتا (β^-): ذره بتا، یک الکترون معمولی است که از هسته یک اتم ناپایدار بتازا گسیل می‌شود. در این نوع واپاشی، یک واحد به عدد اتمی هسته پرتوزا اضافه می‌شود؛ یعنی یک نوترون به پروتون تبدیل می‌شود که حاصل آن یک الکترون است. این تبدیل‌ها نشان می‌دهند که واپاشی بتا در ایزوتوپ‌هایی رخ می‌دهد که فزونی نوترون دارند. تابش بتا که بسته به مقدار انرژی‌اش می‌تواند تا اعماق گوناگون در بافت‌ها نفوذ کند، برای انسان و موجودات زنده یک نوع خطر تابشی خارجی به شمار می‌رود.

ج. گسیل پوزیترون (β^+): در مواردی که نسبت نوترون به پروتون خیلی پایین و گسیل آلفا هم به لحاظ انرژی غیرممکن باشد، احتمال دارد که هسته تحت شرایط خاصی با گسیل پوزیترون به پایداری برسد. پوزیترون یک ذره بتاست که بار الکتریکی مثبت دارد. در واقع، در این نوع واپاشی یک واحد از عدد اتمی هسته پرتوزا کاسته می‌شود؛ یعنی یک پروتون به نوترون تبدیل می‌شود که حاصل آن یک پوزیترون است. پوزیترون‌های موجود در طبیعت فقط در اثر برهم‌کنش میان پرتوهای کیهانی و تمسفر تولید می‌شوند و در فاصله چند میکرو ثانیه پس از تولید، از بین می‌روند.

د. گیراندازی الکترون مداری (EC): در این نوع واپاشی، یک واحد از عدد اتمی هسته پرتوزا کاسته می‌شود، با این تفاوت که در این حالت، هسته به دلیل پرتون‌های اضافی، یک الکترون را از مدارهای داخلی اتم (ترجیحاً مدار K) گیر می‌اندازد و در نتیجه، یک پروتون آن به نوترون تبدیل می‌شود (بنابراین، در این نوع واپاشی، عدد جرمی همچنان ثابت می‌ماند).

ه. تابش گاما (γ): پرتوهای گاما عبارتند از تابش‌های الکترومغناطیسی تک انرژی که از هسته‌های برانگیخته حاصل از تبدیل پرتوزا گسیل می‌شوند. به عبارت دیگر، هرگاه هسته‌ای به هر علت در حالت تهییج قرار گیرد، انرژی تهییج خود را به صورت فوتون گاما ساطع می‌کند. در اغلب واپاشی‌های α و β ، هسته دختر به حالت تحریک شده قرار می‌گیرد که این انرژی تحریکی هسته به صورت فوتون‌های گاما از هسته تابش می‌شود تا هسته به تراز انرژی پایین‌تر یا پایدار برگردد.

۹-۱- کمیت‌ها و واحدهای پرتو

کمیت‌ها و واحدهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری پرتو و رادیواکتیویته به وسیله کمیسیون بین‌المللی واحدها و اندازه‌گیری پرتوها (ICRU) تعریف شده است. قبل از پرداختن به بررسی این کمیت‌ها، به تعریف «اکتیویته ویژه» می‌پردازیم. یکی از مشخصه‌های مهم رادیوایزوتوپ‌ها، اکتیویته ویژه آنها یعنی میزان اکتیویته در هر گرم از عنصر یا ماده است که برحسب واحدهای مختلفی از جمله بکرل بر گرم (Bq/g)، میکروکوری بر گرم ($\mu\text{Ci/g}$)، واپاشی بر میلی گرم در ثانیه (dps/mg) و یا واپاشی بر میلی گرم در دقیقه (dpm/mg) بیان می‌شود.

الف. انرژی پرتو: واحد انرژی در دستگاه بین‌المللی واحدها (SI)^۲، ژول^۳ می‌باشد؛ اما بکار بردن آن برای بسیاری از کمیت‌ها و اندازه‌گیری‌های مربوط به پرتوهای یون‌ساز عملی نیست و از نظر مقدار، واحد بسیار بزرگی برای دامنه ابعاد یک اتم است. لذا برای انرژی پرتوهای یون‌ساز، واحد الکترون ولت^۴ بکار می‌رود که برابر است با انرژی جنبشی کسب شده توسط یک الکترون در خلاء که هنگام عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت به دست می‌آید. لذا یک الکترون ولت (eV) برابر با $۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}$ ژول خواهد بود.

ب. کوری و بکرل: پرتوزایی یک ماده رادیواکتیویته عبارت است از تعداد تجزیه یا واپاشی که در مدت یک ثانیه انجام می‌گیرد و یا به عبارت دیگر می‌توان آن را به صورت $A = dN/dT$ نشان داد و واحد آن عکس ثانیه یا S^{-1} می‌باشد. واحد قدیم پرتوزایی، کوری^۵ می‌باشد که با Ci نشان داده می‌شود. هر کوری برابر است با تعداد $۳/۷ \times ۱۰^{۱۰}$ واپاشی در ثانیه. واحد جدید پرتوزایی، بکرل می‌باشد که با Bq نشان داده می‌شود و هر بکرل^۶ برابر است با تعداد یک واپاشی در ثانیه. بنابراین هر کوری برابر با $۳/۷ \times ۱۰^{۱۰}$ بکرل خواهد بود.

ج. رنتگن و کولمب بر کیلوگرم: اولین واحد تعریف شده برای پرتودهی، رنتگن^۷ می‌باشد که با علامت R نشان داده می‌شود. در گذشته از این واحد برای اندازه‌گیری انرژی جذب شده نیز استفاده می‌گردید. بنا به تعریف، رنتگن عبارت است از مقدار انرژی از پرتو ایکس یا گاما که می‌تواند در هر سانتی متر مکعب هوای خشک در شرایط متعارف، معادل یک واحد بار الکترواستاتیک یون منفی یا مثبت ایجاد نماید و برابر با $۲/۵۸ \times ۱۰^{-۴}$ کولمب بر کیلوگرم می‌باشد. واحد پرتودهی در سیستم بین‌المللی نیز، کولمب بر کیلوگرم^۸ است و با علامت XU نشان داده می‌شود و عبارت است از مقدار انرژی پرتو ایکس

-
1. Disintegration per second
 2. System International
 3. Jule
 4. Electron Volt
 5. Curie
 6. Bequerel
 7. Rontgen
 8. Koiemb/kg

فصل اول: مبانی فیزیک هسته‌ای / ۳۳

که در یک کیلوگرم هوا یک کولمب یون‌هایی که حامل بار الکتریکی با هر علامت باشند، ایجاد نماید. بنابراین، یک XU برابر با ۳۸۷۶ رنتگن خواهد بود. لازم به ذکر است که واحدهای پرتودهی فقط در مورد پرتو ایکس و گاما تعریف شده است و در مورد سایر پرتوها کاربرد ندارند.

د. راد و گری: سابقاً از راد^۱ به عنوان واحد «دز» جذب شده استفاده می‌شد. این واحد نشان دهنده مقدار انرژی منتقل شده از پرتوهای یون ساز به جسم تحت تابش است که معادل انتقال ۱۰۰ ارگ (واحد انرژی) انرژی در هر گرم (واحد جرم) از ماده تحت تابش می‌باشد. یک راد را می‌توان به ۱۰۰ erg/g یا ۰/۰۱ J/kg بیان نمود. دز جذب شده در واحد بین‌المللی، گری^۲ (Gy) نام دارد که معادل جذب یک ژول انرژی (J) در کیلوگرم ماده تحت تابش است. یک گری برابر با یک ژول بر کیلوگرم خواهد بود.

ه. رمو سیورت: سابقاً از «رم»^۳ به عنوان واحد «دز معادل» استفاده می‌شد. یک رم برابر بود با (فاکتور کیفی × Rad). واحد دز معادل در سیستم بین‌المللی برحسب «سیورت»^۴ بیان می‌شود. یک سیورت برابر با یک ژول بر کیلوگرم یا ۱۰۰ Rem است.

۱-۱۰- نیمه عمر عناصر رادیواکتیو

پس از اینکه رادرفورد ماهیت تشعشع رادیواکتیو را کشف کرد، دانشمندان پی بردند که رادیواکتیویته به علت تلاشی خودبه‌خود هسته‌های سنگین و تبدیل آنها به هسته‌های سبک‌تر است. در حین این تبدیل، ذرات آلفا، بتا و گاما ساطع می‌شود. در حقیقت، پس از خارج شدن این ذرات از هسته، ماهیت آن تغییر می‌کند. تعداد هسته‌هایی که در هر لحظه متلاشی می‌شوند، با تعداد هسته‌ها در آن لحظه نسبت مستقیم دارد. زمانی را که نیمی از هسته‌های ماده ابتدایی متلاشی می‌شوند، نیمه عمر ماده می‌گویند. به عبارت دیگر، نیمه عمر یک ماده، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا خاصیت رادیواکتیویته آن به نصف کاهش یابد. یعنی اگر در ابتدا یک گرم ماده رادیواکتیو داشته باشیم، پس از یک نیمه عمر، نصف و پس از دو نیمه عمر، یک چهارم و پس از سه نیمه عمر، یک هشتم مقدار اولیه را خواهیم داشت. طبق تعریفی دیگر، مدت زمان لازم برای کاهش هر ایزوتوپ پرتوزا به نصف مقدار اولیه، معیاری از سرعت تبدیل آن ایزوتوپ پرتوزا به ایزوتوبی دیگر است. این دوره زمانی را نیمه عمر می‌نامند که برای هر ایزوتوپ خاصیتی تغییرناپذیر بوده و تقریباً بطور کمی مستقل از تمام شرایط فیزیکی و شیمیایی همچون دما، فشار و شکل ترکیب شیمیایی است و با رابطه زیر تعریف می‌گردد که در آن λ ثابت واپاشی می‌باشد.

-
1. Rad (Radiation absorbed dose)
 2. Gray
 3. Rem (Rontgen equivalent man)
 4. Sievert

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

بنابراین یکی از مهمترین کمیت‌های مشخصه مواد رادیواکتیو نیم عمر آنها می‌باشد. نیمه عمر اتم‌ها معیاری از ناپایداری آنها بوده و برای مواد رادیواکتیو این پارامتر می‌تواند بین کسری از ثانیه تا چندین میلیارد سال متفاوت باشد. برای نمونه نیمه عمر اتم کربن ۱۴ که میزان آن در مواد مختلف، معیار مناسبی برای زمان در تحقیقات باستان شناسی است ۵۷۳۰ سال می‌باشد، در حالی که فروپاشی شبکه-ای زباله‌های اتمی زیانبخش حاصل از نیروگاه‌های هسته‌ای میلیون‌ها سال طول می‌کشد؛ اما بایستی توجه داشت که به طور معمول هرچه نیمه عمر بیشتر باشد، انرژی ساطع شده از تلاشی رادیواکتیو کمتر است. همچنین تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که از ۱۰۰۰۰۰۰ اتم پلوتونیوم ۲۱۸ موجود در یک نمونه تازه تهیه شده ماده رادیواکتیو، پس از ۲۰ دقیقه فقط حدود ۱۰۰۰۰ اتم پلوتونیوم باقی می‌ماند و بقیه به اتم‌های سرب ۲۱۴ و محصولات نوزاد آن مبدل می‌شوند. در مورد رادیوم ۲۲۶ نیز ۱۶۲۰ سال طول می‌کشد برای آنکه نیمی از اتم‌های رادیوم به اتم‌های رادون تبدیل شوند. از دیدگاه نظری، همه مواد رادیواکتیو نهایتاً به سرب تبدیل می‌شوند، هسته اتم سرب پایدار بوده و خاصیت رادیواکتیو ندارد. اما این امر به طور تجربی اثبات نشده است؛ زیرا نیمه عمر بعضی از عناصر بیش از عمر انسانها می‌باشد.

جدول (۱-۳): برخی عناصر متداول و نیمه عمر آنها

عنصر	نیمه عمر	عنصر	نیمه عمر
اورانیوم ۲۳۸	۵ میلیارد سال	اورانیوم ۲۳۵	۷۰۰ میلیون سال
پلوتونیوم ۲۳۹	۲۴ هزار سال	کربن ۱۴	۵۷۲۰ سال
ید ۱۳۱	۸/۰۵ روز	طلای ۱۹۸	۳ روز
سدیم ۲۴	۱۵ ساعت	فلوئور ۱۷	۱ دقیقه
پولونیوم ۲۱۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۳ ثانیه	سرب پایدار	بدون نیمه عمر
کبالت ۶۰	۵/۳ سال	سزیم ۱۳۷	۳۰ سال

فصل دوم

عناصر و واکنش‌های هسته‌ای

مقدمه

در بررسی به منظور یافتن منابع تازه‌ای برای تولید انرژی، باید به انرژی هسته‌ای اشاره کرد. انرژی عظیم و قابل ملاحظه‌ای در داخل اتم‌ها وجود دارد که عموماً آن را انرژی اتمی می‌نامند. اما چون این انرژی در داخل هسته اتم‌ها وجود دارد، در زبان علمی، نام دقیق‌تر آن را انرژی هسته‌ای انتخاب کرده‌اند. این منبع انرژی به تمامی انرژی‌های دیگر قابل تبدیل است؛ ولی هیچ انرژی به انرژی هسته‌ای تبدیل نمی‌شود. بیشتر منابع انرژی که در قرن بیستم کشف شده‌اند، نتیجه پژوهش‌های هسته‌ای و به بیان دیگر، محصول فرآیندهای هسته‌ای ساخت بشر هستند. تبدیلات خود بخودی یا مصنوعی بعضی از هسته‌های اتمی به هسته دیگر که نتیجه بهم خوردن ترکیب ساختمان هسته یا تغییر در تعداد نوکلئون‌ها (ذرات هسته‌ای) است، واکنش‌های هسته‌ای نام دارند. در مجموع، واکنش‌های هسته‌ای معمولاً به دو گونه صورت می‌گیرند:

الف. تجزیه کامل تمامی هسته‌ها، زمانی که به وسیله یک ذره یا انرژی فوق‌العاده زیاد برخورد کنند (یا ذره دیگری جذب کنند). معمولاً این ذره، نوترون می‌باشد.

ب. شکست هسته به دو هسته غیرمساوی توأم با انتشار پروتون، نوترون، ذرات آلفا و اشعه گاما (شکافت هسته‌ای)؛ یا ترکیب هسته‌ای که تشکیل یک هسته سنگین‌تر در اثر تجدید ساختمان هسته عناصر سبک‌تر صورت گرفته و با آزاد شدن مقادیر زیاد انرژی همراه است (همجوشی هسته‌ای).
اساساً دو شیوه بنیادی شکافت هسته‌ای^۱ و همجوشی هسته‌ای^۲، برای آزادسازی انرژی از یک اتم

وجود دارد که در اینجا به بررسی هر کدام از آنها می‌پردازیم. اما قبل از پرداختن به آنها، لازم است به اختصار به انرژی بستگی هسته‌ای اشاره گردد.

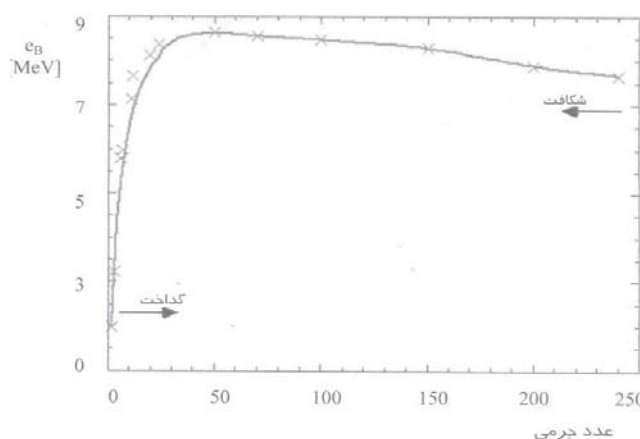
برای درک مفهوم انرژی بستگی هسته‌ای، می‌توان تصور کرد که جرم هسته M ، با جمع کردن تعداد پروتون‌ها (Z) ضربدر جرم پروتون و تعداد نوترون‌ها (N) ضربدر جرم نوترون بدست می‌آید ($M = Z \times M_p + N \times M_n$). از طرف دیگر، M همیشه کمتر از مجموع جرم‌های تشکیل دهنده‌های منزوی هسته است. این اختلاف، توسط فرمول انشتین توضیح داده می‌شود که رابطه بین جرم و انرژی «هم‌ارزی جرم و انرژی» را برقرار می‌سازد. اگر یک دستگاه مادی دارای جرم باشد، در این صورت، دارای انرژی کلی E است ($E = MC^2$) که در آن، C سرعت نور در خلاء و M جرم کل هسته مرکب از نوکلئون‌ها و E مقدار انرژی است که در اثر فروپاشی جرم M تولید می‌شود. بنابراین، اصول انرژی هسته‌ای بر آزادسازی انرژی پیوندی هسته استوار است. هر سیستمی که دارای انرژی پیوندی بیشتری باشد، پایدار می‌باشد. در واقع، جرم مفقود شده در واکنش‌های هسته‌ای طبق فرمول $E = MC^2$ به انرژی تبدیل می‌شود. پس انرژی بستگی، اختلاف جرم هسته و جرم نوکلئون‌های تشکیل دهنده آن بوده و معرف کاری است که باید انجام شود تا نوکلئون‌ها از هم جدا شوند. واکنشی که در طی آن بتوان باعث شکافت یک هسته خیلی سنگین به دو هسته با جرم متوسط گردید، در جهت افزایش انرژی پیوند بر نوکلئون می‌باشد. به این ترتیب شکافت هسته‌های خیلی سنگین، واکنش‌های مولد انرژی می‌باشند. - شکافت در عناصر سنگین‌تر از آهن انرژی تولید می‌کند و در عناصر سبکتر از آهن نیاز به انرژی دارد. از طرفی، همجوشی هسته‌ای نیز در عناصر سبکتر از آهن انرژی تولید می‌کند و همجوشی در عناصر سنگین‌تر از آهن نیاز به انرژی دارد.

۲-۱- واکنش شکافت هسته‌ای^۲

شکافت هسته‌ای، از شکستن اتم‌های سنگین به اتم‌های سبک و پایدارتر شکل می‌گیرد. شکافت هسته‌ای را می‌توان با روش‌های مختلفی القا کرد. یکی از این روش‌ها بمباران کردن هسته اتم قابل شکافت به وسیله ذره دیگری است که انرژی مناسبی داشته باشد. این ذره دوم معمولاً یک نوترون آزاد است که با سرعت بسیار بالا حرکت می‌کند. بایستی توجه داشت که شکافت با نوترون‌ها با رابطه $A(n, B)f$ قابل توضیح است که f نمایانگر شکافت، A ایزوتوپ اولیه، B پاره‌های شکافت، n نوترون گرمایشی است. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که در بین ویژه هسته‌های طبیعی، توریم ۲۳۲ و اورانیوم ۲۳۸ بارورترین هستند که قابلیت استحاله و قلب ماهیت با جذب نوترون را داشته و از توان

1. Nuclear Fusion
2. Nuclear Fission

تبدیل به عناصر دیگر بیشتری برخوردارند. فرآیند شکافت از مقایسه انرژی بحرانی شکافت با مقدار انرژی ورودی مثلا انرژی پیوندی نوترون‌ها قابل بررسی است. برای Th^{232} و U^{238} انرژی بحرانی بیشتر از انرژی پیوندی نوترونی است، لذا برای انجام عمل شکافت نیاز به انرژی اضافی است. این مقدار انرژی برحسب انرژی جنبشی نوترون‌ها بیان می‌شود که تقریباً معادل ۱ Mev انرژی جنبشی نوترون‌ها بوده و برای شروع شکافت Th^{232} و U^{238} مناسب‌تر می‌باشند. چنین نوترون‌هایی از انفجارهای همجوشی تولید می‌شوند، اما شکافت اورانیوم نمی‌تواند چنین نوترون‌های پرانرژی تولید کند. این موقعیت برای U^{233} و U^{235} و Pu^{239} کاملاً متمایز است، به طوری که انرژی پیوندی نوترونی از انرژی بحرانی شکافت آنها تجاوز می‌کند و بهتر است از نوترون‌های گرمایشی یا نوترون‌های با انرژی خیلی کمتر (مثلاً ۰/۰۲۵ eV) استفاده نمود. لذا U^{233} و U^{235} و Pu^{239} با بهره‌های نسبتاً بالا با نوترون‌های گرمایشی در راکتورهای گرمایی تناسب بهتری برای تأمین سوخت هسته‌ای دارند.

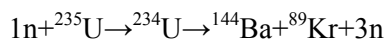


شکل (۱-۲): متوسط انرژی پیوند بازای هر نوکلئون (e_B) برای عناصر مختلف

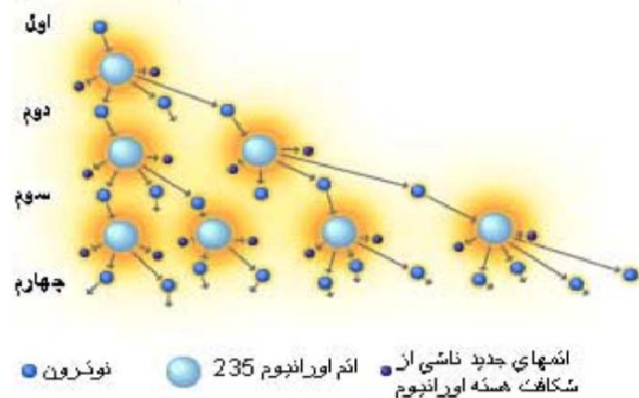
جدول (۱-۲): مشخصات ویژه هسته‌ها در فرآیند شکافت نوترونی

ویژه هسته	انرژی پیوندی نوترون اضافی (Mev)	سطح مقطع شکافت
Th^{232}	۵/۴	۰/۰۰۰۰۴
U^{238}	۵/۵	۰/۰۰۰۰۵
U^{233}	۷	۵۳۱
U^{237}	۶/۸	۵۸۲
Pu^{239}	۶/۶	۷۴۳

در این کتاب، ویژگی‌های شکافت اورانیوم ۲۳۵ توضیح داده می‌شود، ولی اساساً شکافت چهار عنصر دیگر هم به همین صورت است. در یک فرآیند شکافت هسته‌ای اورانیوم، با بمباران آرام نوترونی، اگر نوترون کند منفردی (نوترون حرارتی) به یک قطعه ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ نفوذ کند، در اثر برخورد به هسته اتم اورانیوم ۲۳۵، این ایزوتوپ به ایزوتوپ تحریک شده و کوتاه عمر اورانیوم ۲۳۶ تبدیل شده و بلافاصله، تبدیل به دو اتم کوچکتر باریوم و کریپتون می‌شود. در این حالت، به ازای هر اتم شکسته شده، ۱۷۷ الی ۲۰۰ میلیون الکترون‌ولت (MeV) انرژی (که در واقع انرژی پیوندی نیروی هسته‌ای قوی است)، دو هسته کوچکتر (باریوم و کریپتون)، ۳ عدد نوترون آزاد تند شده (سریع) و تعدادی فوتون به صورت تشعشعات آلفا یا بتا و گاما (نوترون) حاصل می‌گردد که محصولات شکافت نامیده می‌شوند. تعداد متوسط نوترون‌ها به ازای هر ۱۰۰ اتم شکسته شده ۲۴۷ عدد است. از طرفی میزان انرژی آزاد شده هرچند در سطح اتمی بسیار ناچیز است، ولی در مورد یک گرم از اورانیوم در حدود صدها هزار مگاوات خواهد بود. در مجموع، زمانی که هسته اتمی اورانیوم ۲۳۵ به دو قسمت شکسته می‌شود، از عناصری که تولید می‌شوند، استریتیوم ۹۰، کریپتون ۹۱، ایتربیوم ۹۱، زیرکونیوم ۹۵، ید ۱۲۶، سزیم ۱۳۷، باریوم ۱۴۲ و سرب ۱۴۴ قابل ذکر هستند. محتمل‌ترین فرآورده‌های شکافت دارای اعداد جرمی ۹۶ تا ۱۳۵ می‌باشند. یک نمونه از واکنش‌های شکافت اورانیوم ۲۳۵ به صورت زیر خواهد بود.



حلقه‌های واکنش زنجیره‌ای



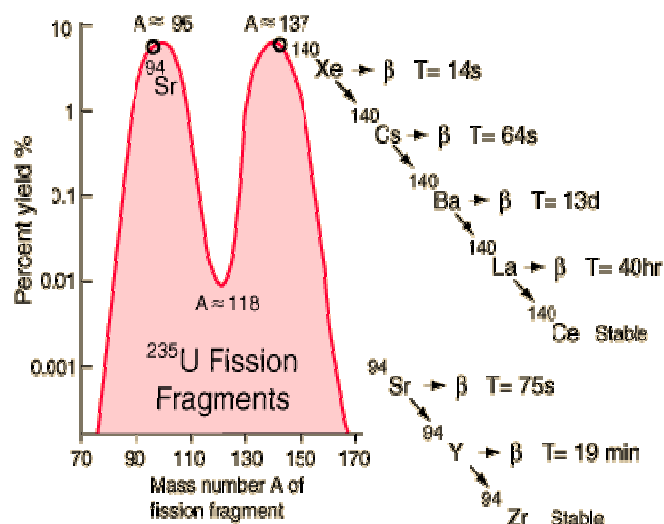
شکل (۲-۲): واکنش زنجیره‌ای شکافت هسته‌ای

جدول (۲-۲): زنجیره واپاشی U^{238}

محصول واپاشی در زنجیره	نوع واپاشی	نیمه عمر
اورانیوم-۲۳۵	آلفا	۴۵۰۰ میلیون سال
توریم-۲۳۴	بتا	۲۴/۱ روز
پروتاکتینیم-۲۳۴	بتا و گاما	۱/۱۸ دقیقه
اورانیوم-۲۳۴	آلفا	۲۴۵۰۰۰ سال
توریم-۲۳۰	آلفا	۷۷۰۰ سال
رادیوم-۲۲۶	آلفا	۱۶۰۲ سال
رادون-۲۲۲	آلفا	۳/۸۲۴ روز
پلونیوم-۲۱۸	آلفا	۳/۰۵ دقیقه
سرب-۲۲۴	بتا و گاما	۲۶/۸ دقیقه
بیسموت-۲۱۴	بتا و گاما	۱۹/۸ دقیقه
پلونیوم-۲۱۴	آلفا	۱۶۴ میکروثانیه
سرب-۲۱۰	بتا	۲۲/۳ سال
بیسموت-۲۱۰	بتا	۵/۰۱ روز
پلونیوم-۲۱۰	آلفا	۱۳۸/۳۸ روز
سرب-۲۰۶	غیرفعال	-

با وجود اینکه اغلب اوقات، ساده‌ترین شکل آغاز شکافت جذب یک نوترون آزاد توسط هسته است، واکنش شکافت را به وسیله برخورد یک هسته قابل شکافت با دیگر ذرات نیز می‌توان القا کرد. این ذرات می‌توانند پروتون، هسته‌های دیگر و یا حتی فوتون‌های با انرژی خیلی بالا مثل پرتوهای گاما باشند. شکافت القایی در عناصر سنگین آسان‌تر بوده و به طور کلی هرچه هسته سنگین‌تر باشد احتمال بیشتری وجود دارد تا شکافته شود. تولید انرژی از طریق فرآیند شکافت، معمولاً در مورد ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ و اورانیوم ۲۳۳ به کار می‌رود؛ اما برای بدست آوردن بالاترین بازدهی در فرایند زنجیره‌ای شکافت هسته‌ای، باید از اورانیوم ۲۳۵ (و یا پلوتونیوم ۲۳۹) استفاده کرد که هسته آن به سادگی شکافته می‌شود و پس‌مانده آن نیز اورانیوم ۲۳۸ خواهد بود. نکته قابل توجه اینکه، اورانیوم ۲۳۵ به وسیله هر دو نوع نوترون‌های سریع و کند شده شکسته می‌شود. بدین ترتیب، در حین مصرف اورانیوم ۲۳۵ در راکتور، مقدار معینی اورانیوم غیرقابل شکست ۲۳۸ به پلوتونیوم قابل شکست ۲۳۹ تبدیل می‌شود. در نهایت بایستی توجه داشت، مجموع جرم اتم‌های کوچکتری که از تجزیه اتم اورانیوم بدست می‌آید، از کل جرم اولیه این اتم کمتر است و این بدان معناست که مقداری از جرم اولیه که ظاهراً ناپدید شده، در واقع به

انرژی جنبشی از نوع انرژی گرمایی تبدیل شده است. این انرژی با استفاده از رابطه جرم و انرژی اینشتین $E=mc^2$ قابل محاسبه است.



شکل (۲-۳): عناصر تولید شده در واکنش زنجیره‌ای شکافت هسته‌ای

در راکتورهای هسته‌ای که با نوترون کار می‌کند، طبق واکنش‌های به عمل آمده ۲ الی ۳ نوترون سریع تولید می‌شود که حتماً این نوترون‌های سریع باید کند شوند؛ چرا که اورانیوم ^{235}U با نوترون‌های کند پیشرو واکنش نشان می‌دهد. حال اگر این نوترون‌ها توسط هسته ^{235}U دیگری جذب شوند، عملکرد حلقه هسته‌ای دوباره اتفاق افتاده و شکست هسته‌ای و آزاد شدن نوترون‌ها به صورت زنجیره‌وار به سرعت تکثیر و توسعه می‌یابد. در هر دوره، تعداد نوترون‌ها دو برابر شده و در یک لحظه، واکنش زنجیری خود بخودی شکست هسته‌ای شروع می‌گردد و اگر چیزی برای جذب نوترون‌ها وجود نداشته باشد، به حالت انفجاری درآمده و در کمتر از هزارم ثانیه مشابه بمب اتمی عمل خواهد کرد. اما اگر تعداد شکست‌ها را در توده اورانیوم و طی زمان محدود کرده به نحوی که به ازای هر شکست، اتم بعدی شکست حاصل کند شرایط یک نیروگاه اتمی به وجود می‌آید. برای روی دادن یک واکنش هسته‌ای، به تعداد کافی از اتم‌های اورانیوم ^{235}U برای امکان ادامه یافتن این واکنش‌ها به صورت زنجیری و البته خودکار مورد نیاز خواهد بود. این جرم مورد نیاز، به عنوان «جرم بحرانی» شناخته می‌شود. در واکنش‌های کنترل شده، تعداد شکست در واحد زمان و نیز مقدار انرژی تولید شده، به تدریج افزایش یافته و پس از رسیدن به مقداری دلخواه، ثابت نگهداشته می‌شود.

جدول (۲-۳): سهم انواع انرژی و ذرات آزاد شده در کل تشعشعات فرآیند شکافت اورانیوم ۲۳۵

نوع انرژی یا ذره آزاد شده	درصد
انرژی جنبشی پاره‌ها	۸۳/۵٪
اشعه گامای آنی	۲/۵٪
انرژی جنبشی نوترون‌ها	۲/۵٪
تلاشی بتا از محصولات	۳/۵٪
اشعه گامای محصولات	۳٪
نوترون‌های حاصله	۵٪

در نیروگاه‌های اتمی، از خاصیت شکافت‌پذیری اورانیوم استفاده می‌شود و حرارت ایجاد شده در اثر این شکست را تبدیل به انرژی الکتریکی می‌نمایند. در این فرآیند، بطور متوسط به ازای شکافت هسته-ای یک کیلوگرم اورانیوم ۲۳۵ حدود ۲۰ میلیارد کیلوکالری گرما آزاد می‌گردد. در این عمل مقداری پلوتونیم نیز حاصل می‌شود. ولی اگر نیروگاه سوخت‌رناور باشد و تعداد نوترون‌های موجود در نیروگاه زیاد باشند مقدار جذب به مراتب بیشتر از این خواهد بود و مقدار پلوتونیم‌های به وجود آمده از مقدار آنهایی که شکسته می‌شوند بیشتر خواهند بود. در چنین حالتی بعد از پیاده کردن میله‌های سوخت می‌توان پلوتونیم به وجود آمده را از اورانیوم و فرآورده‌های شکست رابه کمک واکنش‌های شیمیایی بسیار ساده جدا و به منظور تهیه بمب اتمی ذخیره کرد. همچنین واکنش‌های شکافت هسته‌ای، قابلیت استفاده مستقیم برای ساخت سلاح‌های هسته‌ای را نیز دارند. البته برای ساختن نیروگاه اتمی، اورانیوم طبیعی و یا اورانیوم غنی شده بین ۱ تا ۵ درصد کافی است، ولی برای تهیه بمب اتمی حداقل ۵ تا ۶ کیلوگرم اورانیوم ۲۳۵ با غنای خیلی بالاتر نیاز است. فرآیند شکافت در یک نیروگاه هسته‌ای به آهستگی و در یک سلاح هسته‌ای با سرعت بسیار روی می‌دهد؛ اما در هر دو حالت باید به دقت کنترل شوند.

۲-۲- عناصر هسته‌ای شکافت‌پذیر

عناصر پرتوزا دارای هسته‌های ناپایدار بوده و برای دستیابی به حالت پایداری، انرژی گسیل می‌کنند. این عناصر معمولاً عناصری شکافت‌پذیر هستند که جرم اتمی آنها بالای ۱۵۰ باشد. عناصر شکافت‌پذیر وقتی تحت تابش نوترون قرار می‌گیرند، انجام یک واکنش شکست هسته‌ای را ممکن می‌سازند. چنین خاصیتی در عناصر اورانیوم ۲۳۵، اورانیوم ۲۳۸، توریم ۲۳۲، پلوتونیوم ۲۳۹ و نیز اورانیوم ۲۳۳ وجود دارد.

۲-۱-۲ اورانیوم

اورانیوم یکی از عناصر شیمیایی جدول تناوبی، با نماد U و دارای عدد اتمی ۹۲ می‌باشد. اورانیوم از عناصر سنگین ناپایدار بوده و در جدول تناوبی جزو آکتینیدها قرار می‌گیرد. در شیمی، اورانیوم دارای ظرفیت‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ است که در طبیعت، عموماً با ظرفیت‌های ۴ و ۶ عمل می‌نماید. یون‌های ۴ و ۶ ظرفیتی، در پوسته خارجی خود دارای ۸ الکترون بوده و بدین جهت از نوع عناصر «لیتوفیل» به حساب می‌آید که دارای میل ترکیبی زیاد به اکسیژن بوده و در طبیعت به صورت اکسید یا نمک اسیدهای اکسیژن یافت می‌گردد. اورانیوم چهار ظرفیتی دارای قابلیت حلالی اندک است؛ حال آنکه نوع ۶ ظرفیتی آن از حلالیت بالایی برخوردار بوده و در این حالت مهاجرت می‌کند. همچنین اورانیوم، چکش خار و رسانای جریان الکتریسیته بوده و کمی از فولاد نرمتر است. اورانیوم سنگین‌ترین (چگالتین) عنصری است که در طبیعت یافت می‌شود. چگالی اورانیوم خالص حدود ۶۵ درصد بیشتر از چگالی سرب و حدود ۱۸/۷ برابر چگالی آب می‌باشد. چگالی اورانیوم جامد ۱۹۰۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت صوت در آن معادل ۳۱۵۵ متر بر ثانیه است. اگر اورانیوم به خوبی جدا شود، به شدت از آب سرد متأثر شده و در برابر هوا اکسید می‌شود. پودر فلز اورانیوم یا ورقه‌های نازک آن به طور خود به خود در هوا و یا دمای محیطی مشتعل (محترق) می‌شوند.

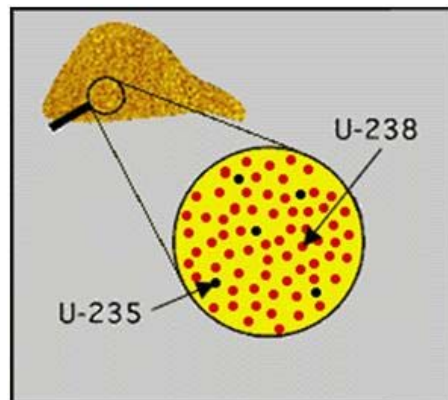
در مجموع، اورانیوم به طور طبیعی یک فلز سخت، سنگین، سمی، رادیواکتیو و براق به رنگ سفید مایل به نقره‌ای می‌باشد. دانشمندان معتقد هستند که اورانیوم بیش از ۶/۶ بیلیون سال پیش در اثر انفجار یک ستاره بزرگ بوجود آمده و در منظومه خورشیدی پراکنده شده‌است. این عنصر در سال ۱۸۹۲ توسط شیمیدان آلمانی «مارتین هنریچ کلاپروت» از نوعی اورانیت بنام پیچ‌بلند^۱ کشف شد. کشف شد. در سال ۱۸۹۶، هنری بکرل فیزیکدان فرانسوی برای اولین بار به خاصیت رادیواکتیویته آن پی برد. استحصال اورانیوم از کانسنگ در سال ۱۹۱۴ انجام گرفته و در سال ۱۹۳۹، «د. دانیلینگ» پدیده شکافت طبیعی را برای عناصر پرتوزا معرفی کرد. در سال ۱۹۴۲، با کشف پدیده تبدیل ماده به انرژی ($E=mc^2$)، اورانیوم به عنوان ماده‌ای قدرتمند برای تولید انرژی وارد میدان گردید و از آن به بعد، انرژی هسته‌ای به عنوان یکی از انواع انرژی مطرح شده و در پروژه Manhattan، نام‌های Oralloy و Tuballoy برای اورانیوم طبیعی و اورانیوم غنی شده بکار برده شد که هنوز نیز بکار برده می‌شوند.

از آنجا که اورانیوم نیمه عمر رادیواکتیوی طولانی 4.47×10^9 سال برای U-238 دارد، مقدار آن همیشه در زمین ثابت می‌ماند. به نظر می‌رسد که فروپاشی اورانیوم و واکنش‌های هسته‌ای آن با توربوم، همان منبع گرمایی عظیمی است که در هسته زمین باعث ذوب شدن قسمت خارجی هسته زمین و

ایجاد حرکت پوسته‌ای زمین می‌شود. معمولاً اورانیوم در مقادیر بسیار ناچیز، در صخره‌ها، خاک، آب، گیاهان و جانوران، از جمله انسان، یافت می‌شود و بنظر می‌رسد که مقدار آن از آنتیموان، برلیوم، کادیوم، جیوه، طلا، نقره و تنگستن بیشتر باشد و این فراوانی، در حد آرسنیک و مولیبدنوم است. این عنصر، در بیشتر کانی‌های اورانیومی از قبیل Pitchblende، Uraninite، Autunite، Uranophane، tobernite و Coffinite یافت می‌شود. استفاده از اورانیوم به شکل اکسید طبیعی آن، به سال ۷۹ میلادی برمی‌گردد؛ یعنی زمانی که این عنصر برای اضافه کردن رنگ زرد به سفال لعابدار استفاده شد (شیشه زرد با یک درصد اورانیوم در نزدیکی ناپل ایتالیا کشف شده است). در آغاز قرن بیستم، تفحص و جستجو برای یافتن معادن رادیواکتیو در ایالات متحده آغاز شد. منابع رادیوم که حاوی کانی‌های اورانیوم نیز می‌بودند، برای استفاده در رنگ ساعت‌های شب‌نما و دیگر ابزارها جستجو شدند. در طی جنگ جهانی دوم، اورانیوم از نظر اهداف دفاعی اهمیت پیدا کرد. ارتش‌ها از اورانیوم غنی شده برای سوخت ناوگان خود و زیردریایی‌ها و همچنین سلاح‌های هسته‌ای استفاده می‌کنند. سوخت استفاده شده در راکتورهای ناوگان ایالات متحده، معمولاً اورانیوم ^{235}U غنی شده می‌باشد. همچنین، فلز اورانیوم بسیار سنگین و پرچگالی می‌باشد. بنابراین، اورانیوم تخلیه شده که اندکی خاصیت رادیواکتیویته نیز دارد در هلیکوپترها و هواپیماها، به عنوان وزن متقابل بر هر بار، ساخت محافظ برای تانک‌ها و نیز ساخت گلوله‌های توپ ضد زره پوش و و اجزای برخی جنگ افزارهای دیگر از جمله منعکس کننده نوترونی در بمب اتمی استفاده می‌شود.

از اورانیوم غنی شده، در دو نوع سلاح هسته‌ای استفاده می‌شود؛ یا به صورت مستقیم در بمب‌های اورانیومی و یا طی چند مرحله، در بمب‌های پلوتونیومی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اورانیوم موجود در سلاح‌های هسته‌ای به شدت غنی می‌شوند که این مقدار به صورت تقریبی ۹۰ درصد می‌باشد. البته عملاً در صنایع نظامی، از اورانیوم غنی بیش از ۹۰ درصد غنی شده استفاده نمی‌شود و بمب‌های اتمی را از پلوتونیوم ۲۳۹ که سنتز و تخلیص شیمیایی آن بسیار ساده‌تر است، تهیه می‌کنند. ایزوتوپ ^{235}U در راکتورهای هسته‌ای Breeder به پلوتونیوم تبدیل می‌شود که در ساخت بمب‌های هیدروژنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همزمان با متنوع شدن استفاده‌های نظامی، بازار دیگری نیز در بخش غیرنظامی بوجود آمد. مهمترین کاربرد اورانیوم در بخش غیرنظامی، تأمین سوخت دستگاه‌های تولید انرژی (راکتورهای) هسته‌ای است که در آنها، سوخت ^{235}U به میزان ۲ الی ۳ درصد غنی می‌شود. همچنین فلز اورانیوم برای اهداف اشعه ایکس بمار گرفته می‌شود. در ساخت این اشعه، اورانیوم با انرژی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. اورانیوم، کاربردهای دیگری نیز دارد. لعاب ظروف سفالی، از مقدار کمی اورانیوم طبیعی تشکیل شده است که داخل فرایند غنی‌سازی نمی‌شود. این عنصر، برای اضافه کردن رنگ به لعاب، به آن افزوده می‌شود. برخی از لوازم نور دهنده، از اورانیوم و برخی در مواد شیمیایی عکاسی مانند نیترات اورانیوم استفاده

می‌کنند. نیمه عمر طولانی ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۸، آن را برای تخمین سن سنگ‌های آتشفشانی مناسب می‌سازد. این عنصر، در وسایل Interial Guidance و Gyro Compass استفاده می‌شود. استات اورانیوم نیز در شیمی تحلیلی کاربرد دارد. در نهایت، اورانیوم در صنعت به سه گونه آلفا (پایدار تا دمای ۶۶۷/۷ درجه)، بتا (پایدار از دمای ۶۶۷/۷ تا ۷۷۴/۸ درجه) و گاما (پایدار از دمای ۷۷۴/۸ درجه تا نقطه ذوب) مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع گاما، رساناترین و چکش خوارترین گونه اورانیوم می‌باشد.



شکل (۲-۴): شمایی از ترکیبات اورانیوم طبیعی

اورانیوم همانند بسیاری از دیگر مواد پرتوزا در طبیعت به صورت ایزوتوپ یافت می‌شود. اورانیوم ۱۶ ایزوتوپ دارد. سه ایزوتوپ مهم اورانیوم طبیعی، به صورت اورانیوم سنگین (U^{238})، اورانیوم نیمه سنگین (U^{235}) و اورانیوم سبک (U^{234}) می‌باشند که U^{238} فراوان‌ترین و پایدارترین آنها با ۹۹/۳ درصد از کل اورانیوم طبیعی می‌باشد. این سه ایزوتوپ رادیواکتیو بوده و نیمه عمری به ترتیب برابر با 4.5×10^9 ، 7×10^8 و 2.5×10^5 سال دارند. از بین ایزوتوپهای اورانیوم، فقط دو ایزوتوپ U^{235} و U^{238} به علت داشتن نیمه عمر نسبتاً بالا، در طبیعت و در سنگ معدن یافت می‌شوند. این دو ایزوتوپ خواص شیمیایی کاملاً یکسان داشته و برای جداسازی آنها از یکدیگر، حتماً باید از خواص فیزیکی آنها، یعنی اختلاف جرم ایزوتوپ‌ها استفاده کرد. اورانیوم طبیعی اصولاً شامل مخلوطی از این دو ایزوتوپ است. ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ که تنها ۰/۷ درصد از اورانیوم طبیعی را تشکیل می‌دهد، تنها ایزوتوپ طبیعی است که به دلیل تمایل باطنی به شکافت در واکنش‌های زنجیری و تولید انرژی حرارتی، در هر مقدار ممکن، به وسیله نوترون‌های با هر مقدار انرژی (نوترون‌های حرارتی) به خوبی شکافته می‌شود. به همین دلیل، به عنوان «ایزوتوپ شکافت» شناخته شده است. خالص‌ترین اورانیوم یعنی U^{238} ، اورانیوم خالی یا DU نام دارد. ایزوتوپ U^{238} نیز از این جهت مهم است که ۹۹/۳ درصد باقیمانده اورانیوم طبیعی را به خود اختصاص داده و فقط به وسیله نوترون‌های سریع شکسته می‌شود که البته خوب جواب نمی‌دهد. این ایزوتوپ

فصل دوم: عناصر و واکنش‌های هسته‌ای / ۴۵

اورانیوم، به طور بسیار موثری نوترون‌های کند با انرژی یک تا ده الکترون ولت را برای تولید ایزوتوپ رادیواکتیو جذب کرده و آن را به ایزوتوپ پلوتونیوم ^{239}Pu تجزیه می‌کند که به عنوان سوخت هسته‌ای مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. اورانیوم ^{235}U نیز ۰/۰۰۶ درصد اورانیوم طبیعی را به خود اختصاص داده است. در نهایت، اورانیوم ^{233}U با نیم عمر ۱۶۲ هزار سال در اورانیوم طبیعی وجود نداشته و به صورت مصنوعی و طی فرآیند هسته‌ای خاص از شکافت توریم ^{232}Th تولید می‌شود. این ایزوتوپ اورانیوم می‌تواند توسط بمباران نوترونی شکافته شده و به عنوان یک سوخت هسته‌ای شناخته می‌شود.

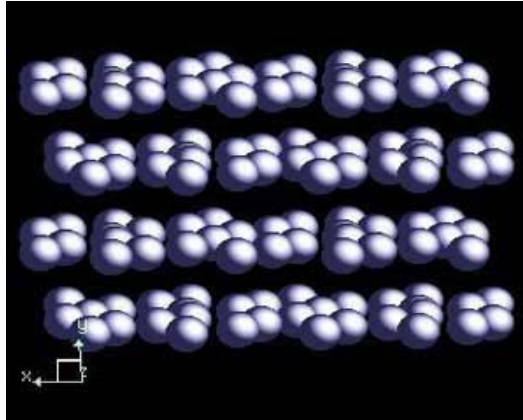
جدول (۲-۴): نیمه عمر و مد تلاشی انواع ایزوتوپ‌های پرتوزای اورانیوم

ایزوتوپ	نیمه عمر	مد تلاشی
^{230}U	۲۰/۸ روز	^{226}Th
^{231}U	۴/۲ روز	^{227}Th
^{232}U	۶۸/۹ سال	^{228}Th
^{233}U	۱۵۹۰۰۰ سال	$^{229}\text{Th}, \text{Sf}$
^{234}U	۲۴۵۰۰۰ سال	$^{230}\text{Th}, \text{Sf}$
^{235}U	۷۰۴۰۰۰۰۰۰ سال	$^{231}\text{Th}, \text{Sf}$

۲-۲-۲- پلوتونیوم

پلوتونیوم، یک عنصر شیمیایی رادیواکتیو و فلزی، با نماد Pu و دارای عدد اتمی ۹۴ می باشد. وزن اتمی این عنصر ۲۴۴/۰۶ و چگالی آن 19.84 kg/m^3 می‌باشد. پلوتونیوم شش حالت Allotropic با ساختارهای بلورین گوناگون از خود نشان می‌دهد که چگالی آنها از ۱۶ تا ۱۹/۸۶ تغییر می‌کند. همچنین پلوتونیوم چهار ظرفیت یونی Pu^{+3} (آبی کمرنگ)، Pu^{+4} ، PuO^+ و PuO^{+2} را در محلول‌های آبی از خود نشاد می‌دهد. این فلز ظاهری نقره‌ای رنگ داشته و هنگامی که اکسید می‌شود، رنگش تا حدی به زرد تیره می‌گراید. این فلز، به سرعت در اسید هیدرویدیک یا اسید پرکلریک غلیظ حل می‌شود. اگر مقدار زیادی از پلوتونیوم در جایی جمع شود، به دلیل ساطع کردن انرژی آلفا، آنقدر گرم می‌شود که نمی‌توان آن را لمس کرد، به طوری که تجمع مقادیر بیشتر پلوتونیوم، گرمای لازم را برای جوشاندن آب به وجود می‌آورد. مهمترین ایزوتوپ پلوتونیوم، Pu^{239} بوده که نیمه عمر آن ۲۴۲۰۰ سال می‌باشد و به دلیل نیمه عمر کوتاه آن، رد بسیار ناچیزی از پلوتونیوم به صورت طبیعی در معادن یافت می‌شود. ایزوتوپ پلوتونیوم ^{238}U نیز ساطع کننده اشعه آلفا با نیمه عمر ۸۷ سال است. این خصوصیات، آن را برای استفاده در تولید نیروی برق برای دستگاه‌هایی که می‌بایست بدون نگهداری مستقیم در مقیاس‌های زمانی حدودا برابر عمر انسان کار کنند، مناسب می‌کند. بنابراین، در RTGها مانند آنهایی که نیروی کاوشگرهای

فضایی Galileo و Cassini را تأمین می‌کنند، کاربرد دارد. پلوتونیوم اولین بار در سال ۱۹۴۰ توسط گلن سیبورگ^۱ و همکارانش، طی واکنش کنترل شده شکست هسته اورانیوم توسط بمباران دوترونی اورانیوم در سیکلوترون^۲ دانشگاه کالیفرنیا برکلی کشف شد؛ اما این کشف تا مدتها سری باقی ماند.



شکل (۲-۵): ساختار کریستالی پلوتونیوم جامد

امروزه پلوتونیوم ۲۳۹ را در نیروگاه‌های بسیار قوی می‌سازند که تعداد نوترون‌های موجود در آنها از صدها هزار میلیارد نوترون در ثانیه در سانتیمتر مربع تجاوز می‌کند. در این نیروگاه‌ها، اگر نوترون‌های پیرانرژی حاصل از شکست اورانیوم ۲۳۵ را به کمک کند کننده‌هایی از جمله گرافیت، آب معمولی، آب سنگین یا مواد دیگر، به مقدار انرژی در حدود ۱ تا ۱۰ الکترون ولت (eV) کند کنیم، هسته اورانیوم ۲۳۸ (که هرچند شکست‌پذیر نبوده، ولی جاذب نوترون کم انرژی با نوترون حرارتی می‌باشد)، این نوترون‌های کند شده را جذب کرده و تبدیل به اورانیوم ۲۳۹ می‌شوند. اما اورانیوم ۲۳۹ بسیار ناپایدار بوده و با واپاشی ذره بتا، در کمتر از ده ساعت تمام اتم‌های به وجود آمده تخریب می‌شوند. در درون هسته ناپایدار اورانیوم ۲۳۹، یکی از نوترون‌ها خودبه‌خود به پروتون و یک الکترون تبدیل می‌شود. بنابراین، به تعداد پروتون‌ها یکی اضافه شده و عنصر جدید را که ۹۳ پروتون دارد، نپتونیم می‌نامند. اما این عنصر نیز ناپایدار و با نیم عمر ۲/۳۵ روز بوده و با تحمل واپاشی بتا، یکی از نوترون‌های آن خود به خود به پروتون تبدیل می‌شود و در نتیجه، به تعداد پروتون‌ها یکی اضافه شده و عنصر جدید که ۹۴ پروتون دارد را پلوتونیوم ۲۳۹ می‌نامند. این تجزیه، در مدت کوتاه چندین روزه انجام می‌گیرد. پلوتونیوم ۲۳۹ نیز ناپایدار بوده؛ ولی به دلیل دارا بودن نیم عمر ۲۴۴۰۰ سال، به کندی وامی‌پاشد. بنابراین، ممکن است به مقدار نبوهی انبار شود. نپتونیم و پلوتونیوم معرف عناصر فوق اورانیوم بوده و در جدول تناوبی بعد از اورانیوم می‌آیند. رشته

1. Glenn T. Seaborg

۲. شتاب دهنده ذرات مدور Berkeley Radiation Laboratory

عناصر فوق اورانیوم، بعد از پلوتونیوم تا عنصری به عدد اتمی ۱۰۷ ادامه دارد. پلوتونیوم ۲۳۹ نیز همچون اورانیوم ۲۳۵، سوخت هسته‌ای مناسبی برای راکتورهای هسته‌ای و بمب‌های اتمی محسوب می‌گردد. پلوتونیوم یکی از مواد مهم شکافت هسته‌ای در سلاح‌های هسته‌ای پیشرفته می‌باشد. پلوتونیوم همچنین در ساخت سلاح‌های رادیولوژیکی و ساخت زهرها (نه الزاما مهلک) کاربرد دارد. عملا کلیه بمب‌های اتمی موجود در زرادخانه‌های جهان از این عنصر درست می‌شود. از طرف دیگر، توده‌های انباشته شده پلوتونیوم، توسط اتحاد جماهیر شوروی قدیم و ایالات متحده آمریکا به وجود می‌آمد و از پایان جنگ سرد، تمرکز بر نگرانی از گسترش تکنولوژی هسته‌ای بوجود آمد. تولید سوخت MOX (سوخت مخلوط اکسید) یکی از راه‌های استفاده بهینه از پلوتونیوم انبار شده به عنوان سوخت هسته‌ای می‌باشد. پلوتونیوم موجود در زباله‌های اتمی، بعد از بازپردازش می‌تواند مستقیما به سوخت MOX تبدیل شود که در آن، اورانیوم و پلوتونیوم مخلوط شده‌اند. در راکتورهایی که از سوخت MOX استفاده می‌کنند، پلوتونیوم بجای اورانیوم ۲۳۵، جانشین سوخت اورانیوم اکسید معمولی می‌شود. هم اکنون راکتورهایی در اروپا و ژاپن از این نوع سوخت هسته‌ای استفاده می‌کنند. در سال ۲۰۰۳، ایالات متحده نیز تصمیم گرفت برای خلاصی از انبار پلوتونیوم که برای ساخت سلاح‌های هسته‌ای استفاده می‌شد، به تبدیل چندین نیروگاه هسته‌ای در آمریکا، از سوخت اورانیوم غنی شده به سوخت MOX اقدام کند. آمریکا قصد دارد چنانچه استفاده از این محموله آزمایشی سوخت هسته‌ای «ام.او.ایکس» در نیروگاه‌های هسته‌ای موفقیت‌آمیز باشد، اولین کارخانه تولید سوخت هسته‌ای ماکس را در آمریکا برای تبدیل بقیه پلوتونیوم تسلیحاتی این کشور به سوخت هسته‌ای احداث کند. البته استفاده از پلوتونیوم رادیواکتیو و سوخت هسته‌ای به دست آمده از آن خطرهای بهداشتی و ایمنی بسیاری به همراه دارد.

۲-۳-۲- توریم

توریم، از جمله عناصر شیمیایی کمیاب بوده و در جدول تناوبی دارای نشان Th و عدد اتمی ۹۰ می‌باشد. توریم، فلزی طبیعی و تا حدی رادیواکتیو می‌باشد. شکل خالص این عنصر، فلزی نقره‌ای رنگ است که درخشش خود را برای چند ماه حفظ می‌کند. با این حال، اگر در معرض هوا اکسید شود، به آرامی کدر شده و به رنگ خاکستری و در نهایت سیاه درمی‌آید. اکسید توریم (ThO_2) که توریا نامیده می‌شود، دارای نقطه جوش ۳۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد که یکی از بالاترین نقاط جوش در بین تمامی اکسیدها است. اگر فلز توریم را در هوا حرارت دهند، محترق شده و با نور درخشان سفید رنگی می‌سوزد. توریم در سال ۱۸۲۸ توسط یک شیمیدان سوئدی به نام ژاکوب برزیلیوس^۱ کشف گردید. توریم در بیشتر

1. Jons Jacob Berzelius

سنگ‌ها و خاک‌ها در مقادیر بسیار کم وجود داشته و فراوانی آن سه برابر اورانیوم است. معمولاً خاک محتوی تقریباً ۶ppm توریم می‌باشد. توریم بطور طبیعی دارای یک ایزوتوپ پایدار ^{232}Th و ^{230}Th رادیوایزوتوپ می‌باشد که فراوان‌ترین یا پایدارترین آنها توریم ^{232}Th با نیمه عمر ۱۴/۰۵ میلیارد سال، توریم ^{230}Th با نیمه عمر ۷۵۳۸۰ سال، توریم ^{229}Th با نیمه عمر ۷۳۴۰ سال و توریم ^{228}Th با نیمه عمر ۱/۹۲ سال هستند. مابقی ایزوتوپ‌های آن، دارای نیمه عمری کمتر از ۳۰ روز و اکثراً کمتر از ۱۰ دقیقه می‌باشند. توریم ^{232}Th بسیار آهسته فروپاشی می‌کند (نیمه عمر آن تقریباً سه برابر عمر زمین است)؛ ولی سایر ایزوتوپ‌های آن در زنجیره فرسایش خود و اورانیوم وجود دارند. بیشتر این ایزوتوپ‌ها کم عمر هستند و لذا خیلی بیشتر از ^{232}Th رادیواکتیو می‌باشند؛ اگرچه در مقیاس‌های زیاد کم‌اهمیت هستند. همچنین، توریم دارای یک حالت متا است. ایزوتوپ‌های توریم از نظر وزن اتمی، بین ^{212}amu (توریم ۲۱۲) و ^{236}amu (توریم ۲۳۶) قرار دارند.



شکل (۲-۶): عنصر توریم

توریم در توری چراغ‌های گازی و نیز به عنوان عنصری آلیاژساز در منبیزیم بکار گرفته می‌شود. قدمت‌سنجی به وسیله اورانیوم - توریم برای تعیین قدمت فسیل‌های انسان نیز دیگر کاربرد این عنصر است. در نهایت، این عنصر به عنوان پوشش سیم‌های تنگستن در وسایل الکترونیکی و در ساخت الکترودهای جوشکاری و سرامیک‌های مقاوم در حرارت‌های زیاد بکار گرفته می‌شود. از طرف دیگر، اکسید توریم برای کنترل اندازه تنگستن موجود در لامپها، در کوره‌های گداز بسیار داغ آزمایشگاهی، به عنوان کاتالیزور در فرآیندهای تبدیل آمونیاک به اسید نیتریک، کراکینگ بنزین و تولید اسید سولفوریک و در لنزهای کیفیت بالای دوربین و ابزارهای علمی مورد استفاده قرار گرفته و موجب افزایش ضریب شکست و کاهش پراکندگی نور در شیشه می‌شود؛ اما مهمترین کاربرد توریم در تکنولوژی هسته‌ای، به عنوان یک ماده بارور کننده برای تولید سوخت هسته‌ای می‌باشد. اگرچه خود توریم ^{232}Th شکافت‌پذیر نیست؛ اما برای تولید اورانیوم ^{233}U شکافت‌پذیر، نوترون‌های کم‌سرعت را جذب کرده و همچون اورانیوم

۲۳۸، به عنوان بارور کننده عمل می‌نماید. از نظر قدرت جذب بیشتر نوترون، اورانیوم ۲۳۳ از اورانیوم ۲۳۵ و پلوتونیوم ۲۳۹ بهتر است. بنابراین می‌توان با مواد شکافت‌پذیر دیگر چون اورانیوم ۲۳۵ یا پلوتونیوم ۲۳۹، یک چرخه زاینده مشابه اورانیوم ۲۳۸ و پلوتونیوم (در رآکتورهای نوترون کم سرعت)، اما بسیار کارآمدتر ایجاد نمود. در این چرخه، توریم ۲۳۲ برای تبدیل به توریم ۲۳۳، تحت تابش سوختی نظیر پلوتونیوم ۲۳۹، یک نوترون جذب می‌کند تا به توریم ۲۳۳ تبدیل شود. توریم ۲۳۳ با نیمه‌عمر ۲۲/۲ دقیقه نیز به پروتاکتینیوم ۲۳۳ فروپاش می‌شود. در نهایت، پروتاکتینیوم ۲۳۳ با نیمه‌عمر ۲۷ روز نیز به اورانیوم ۲۳۳ تبدیل می‌شود. اورانیوم ۲۳۳ به سرعت تجزیه شده و می‌تواند نه تنها بعنوان سوخت هسته‌ای، بلکه به عنوان منبعی به منظور تابش به توریم ۲۳۲، جهت ادامه کل چرخه باشد.

در کل، برای تبدیل توریم به اورانیوم، توریم را در کوره اتمی توسط نوترون بمباران می‌کنند. این عنصر، پس از یک سری تغییرات رادیواکتیو به اورانیوم ۲۳۳ تبدیل می‌شود که مانند اورانیوم ۲۳۵ و پلوتونیوم ۲۳۹ توسط نوترونهای حرارتی شکافته می‌شود. قبل از تبدیل چرخه سوخت توریم بصورت تجاری، تلاش‌های زیادی باید انجام پذیرند و ظاهراً انجام این تلاش‌ها تا زمانی که اورانیوم فراوان وجود دارد، بعید به نظر می‌رسند. با این وجود، چرخه سوخت توریم با توانایی خود برای تولید سوخت غنی شده، بدون نیاز به رآکتورهای نوترون پرسرعت، پتانسیل بلندمدت قابل توجهی را در اختیار دارد. مشکلی که در مورد هزینه گران تولید سوخت وجود دارد، تاحدی به علت رادیواکتیویته اورانیوم ۲۳۳ است که همیشه به مقادیر کمی اورانیوم ۲۳۲ و توریم ۲۲۸ آلوده است که هر دوی آنها ساطع کننده نوترون و کاهش دهنده آثار اورانیوم ۲۳۳ به عنوان سوخت هستند. همچنین، مشکل مشابهی که در بازیافت توریم وجود دارد، به سبب خاصیت رادیواکتیو زیاد توریم ۲۲۸، خطر تکثیر اورانیوم ۲۳۳ در بعضی سلاح‌ها و مشکلات فنی در بازآفرینی می‌باشد. به این طریق، مواد با شکافت‌پذیری کم اورانیوم ۲۳۸ و توریم می‌توانند به سوخت هسته‌ای با ارزش تبدیل شوند. این امکان‌پذیری بسیار اساسی است؛ زیرا در پوسته زمین، اورانیوم ۲۳۸ و توریم خیلی بیشتر از سایر ایزوتوپ‌های شکافت‌پذیر می‌باشد. توریم، بطرز چشمگیری فراوان‌تر از اورانیوم است و این عامل بسیار مهمی در حفظ انرژی هسته‌ای به حساب می‌آید.

توریم در کانی‌های زیادی وجود دارد که رایج‌ترین آنها ماده معدنی فسفات توریم خاکی و کمیاب (مونازیت) است که حاوی تقریباً بیش از ۱۲٪ اکسید توریم می‌باشد. مهمترین معادن آن در هندوستان جنوبی و برزیل واقع است. معادن دیگری نیز در جزیره سیلان کشف شده است که وسعت آن چندان زیاد نیست؛ ولی از حیث میزان توریم بسیار غنی می‌باشد. همچنین در این اواخر، منابع مهمی شامل مونازیت نیز در جزایر ماداگاسکار کشف شده است. سنگ معدنی دیگری از توریم که توریت^۱ نام دارد، در استرالیا، برزیل، ماداگاسکار، اسکانداویا، بریتانیا، ایالت متحده و روسیه وجود دارد. بایستی توجه داشت

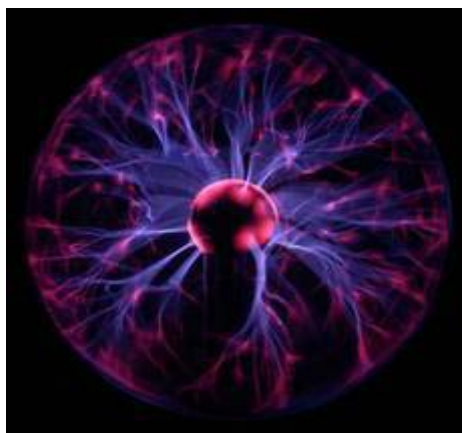
که اندوخته‌های زیادی از این عنصر در چندین کشور وجود دارد. هرچند تعیین میزان دقیق استخراج جهانی توریم در آینده برای مصرف در تأمین انرژی به هیچوجه امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ اما با تولید مصنوعی این مواد رادیواکتیو و نیز سایر مکانیزم‌های تولید انرژی هسته‌ای از جمله همجوشی‌های کنترل شده، سبب شده که دیگر مشکل جستجو و کشف معادن توریم وجود نداشته باشد و یا این نیاز از راه‌های دیگر برطرف می‌شود. هند منابع عظیمی از توریم را در اختیار دارد و لذا با پایان دادن به اورانیوم بعنوان ماده‌ای ورودی، برنامه‌های اتمی خود را برای استفاده صرفاً توریم طراحی کرده است. در حال حاضر راکتورهای 1&2 kakarapar در هند در عملیاتشان از توریم استفاده می‌کنند.

در این راستا دانشمندان می‌کوشند راه‌های استفاده از عنصر توریم به عنوان سوخت راکتور بجای اورانیوم را تکمیل کنند؛ زیرا فراوانی این عنصر در طبیعت سه برابر اورانیوم است، به علاوه زباله هسته‌ای کمتری را بر جای می‌گذارد و استفاده از زباله حاصل از آن برای تولید سلاح هسته‌ای بسیار سخت‌تر است. راکتوری که با سوخت توریم کار می‌کند، همچنین ضایعات کمتری تولید می‌کند، زیرا اتم توریم در یک واکنش زنجیره‌ای هسته‌ای نسبت به اورانیوم به اتم‌های غیرقابل استفاده کمتری تبدیل می‌شود. به علاوه در صورت طراحی صحیح، میزان اتم پلوتونیوم ۲۳۹ حاصله در راکتور توریم ۸۰ درصد کمتر است. از طرف دیگر، راکتوری که با سوخت توریم کار می‌کند، می‌تواند ذخایر پلوتونیوم را نیز به عنوان سوخت مصرف کند. البته اگرچه کل چرخه زاینده توریم در مقیاسی به اندازه کافی بزرگ و مطمئن از نظر تجاری ساخته شده اما این جهت شروع به منابع نوترونی نیاز خواهد داشت، به عبارتی راکتورهای توریم باید سوخت اولیه خودشان را از اورانیوم ۲۳۳ تأمین کنند، اما در ابتدای عمل هیچ اورانیوم ۲۳۳ وجود ندارد و تنها روش تولید آن جهت شروع، پلوتونیوم ۲۳۹ است. بنابراین پایایی این چرخه، مستلزم هر دو راکتورهای بارور حرارتی و سرعتی می‌باشد.

۲-۳- پلاسما

پلاسما امروزه نقش مهمی در توسعه منابع انرژی از راه همجوشی گرما هسته‌ای کنترل شده یافته است، بنابراین قبل از بررسی واکنشهای شکافت هسته‌ای، مختصری به شناخت پلاسما خواهیم پرداخت. از آنجا که بخش بزرگی از جرم قابل مشاهده عالم، ستارگان با دماهای بسیار زیاد هستند، امکان وجود ماده به صورت‌های جامد و مایع در این اجرام منتفی است. از سوی دیگر گاز نیز، به دلیل این حرارت بسیار زیاد، تبدیل به یک توده یونیزه شده و به صورت مخلوطی از یون‌های مثبت (هسته اتم‌ها)، یون‌های منفی (الکترون‌ها) و ذرات خنثی درمی‌آید. در این توده، به دلیل وجود نیروهای الکتریکی که بسیار قوی‌تر از نیروی گرانشی است ذرات بر روی هم تأثیر زیادی می‌گذارند، به طوری که حرکت بخشی از این توده، باعث تغییر در وضعیت حرکت و انرژی بخش‌های دیگر می‌شود که به این پدیده، اثر

جمع‌ی گفته شده و هر گاه گاز به شدت یونیزه شده دارای این خاصیت باشد، پلاسما نامیده می‌شود. حالت پلاسما در دماهای خیلی بالا بوجود می‌آید و ساختارهای مولکولی مفهوم خود را در این وضعیت از دست می‌دهند. اغلب گفته می‌شود که ۹۹٪ ماده موجود در طبیعت در حالت پلاسماست. طبق این تخمین، درون ستارگان و جو آنها، ابرهای گازی و اغلب هیدروژن فضای بین ستارگان به صورت پلاسما است. در دمای ۶۰۰۰ درجه کلوین سطح خورشید اتم‌های سنگین کربن، ازت و اکسیژن باهم پیوست کرده و عناصر سلیسیم و گوگرد و ... را به وجود می‌آورند.



شکل (۲-۷): نمونه‌ای از یک لامپ پلاسما

پلاسما به علت رفتار جمع‌ی که از خودشان نشان می‌دهد، گرایشی به متأثر شدن در اثر عوامل خارجی ندارد و اغلب طوری عمل می‌کند که گویا دارای رفتار مخصوص به خودش است. البته اگر پلاسما تا دمای زیاد حرارت داده شود، نظم موجود در پلاسما از بین می‌رود و ماده به توده درهم و برهم و کاملاً نامنظم ذرات منفرد تبدیل می‌شود. از مهمترین خواص پلاسما این است که می‌کوشد از لحاظ الکتریکی خنثی بماند. بیشتر پلاسماها در فشار معمولی داغ هستند (در حدود چندین هزار درجه سانتیگراد) بنابراین کنترل آنها مشکل استجالب این است که پلاسما ممکن است در عین حال دارای چندین دما باشد که این حالت با توجه به اینکه میزان برخورد بین خود یونها یا خود الکترون‌ها از میزان برخوردهای بین یون و یک الکترون بیشتر است می‌تواند پیش بیاید. برای ایجاد پلاسما از راکتور گرمایی استفاده می‌شد اما جدیداً از لیزر و مواد جامد هم استفاده می‌شود. جرقه رعد و برق، تابش ملایم شفق قطبی، گازهای داخل یک لامپ فلورسان یا لامپ نئون و یونیزاسیون مختصری که در گازهای خروجی یک موشک دیده می‌شود، نمونه‌هایی محدود از مشاهده پلاسما در زندگی روزمره انسان هستند. نوع پیشرفته‌تر این محیط‌های پلاسمایی، سیستم‌هایی هستند که به وسیله ترکیبی از واکنش‌های شکافت و همجوشی کنترل شده کار می‌کنند و به پلاسماهای کنترل شده مشهور هستند.



شکل (۲-۸): جرقه رعد و برق، نمونه‌ای از پلاسما در زندگی روزمره

۲-۴- گداخت یا همجوشی هسته‌ای^۱

هسته‌های خیلی سبک مثل هیدروژن یا هلیوم، انرژی بستگی کمتری نسبت به هسته‌های سنگین دارند. در فرآیند همجوشی هسته‌ای، اگر دو هسته سبک اتمی که معمولاً هیدروژن یا ایزوتوپ‌های هیدروژن همچون دوتریوم و تریتیوم هستند، با انرژی کافی برای غلبه بر نیروی دافعه کولن به هم نزدیک شوند، توسط یک نیروی جاذبه‌ای هسته‌ای قوی درهم فشرده شده و می‌جوشند تا هسته سنگین‌تر همچون هلیوم و ایزوتوپ‌های آن و حداقل یک ذره دیگر را تشکیل دهند. بایستی توجه داشت که چون بار الکتریکی تمام هسته مثبت است، هسته‌ها در حالت آزاد، همدیگر را دفع می‌کنند. بنابراین، برای انجام گداخت باید هسته‌ها را بسیار به هم نزدیک کرد. از طرفی چون دافعه الکترواستاتیکی مانع بزرگی برای این فرآیند است، باید انرژی هسته‌ها نسبت به رانش کولنی به قدر کافی زیاد باشد. بنابراین، این واکنش با افزایش انرژی جنبشی هسته‌های اولیه انجام می‌شود. دسترسی به چنین انرژی‌هایی در شتاب دهنده‌ها آسان است؛ اما برای اینکه این واکنش خودنگهدار باشد، به دمایی حدود 10^8 کلوین نیاز است. چنین وضعیتی تنها در حالت پلاسمایی ماده پیش می‌آید که در آن هسته‌ها و الکترون‌ها از هم جدا هستند. بنابراین برای تشکیل پلاسما، گاز مورد نظر باید به قدری گرم شده و به دمایی برسد که الکترون‌ها از اتم‌ها جدا شوند. همچنین، در انرژی‌های بالا احتمال برخورد دو یون با نیروی کافی برای نفوذ به سدهای کولنی رانش نسبی آنها که قادر می‌سازد تا نیروی هسته‌ای این یون‌ها را به هم جوش دهد، کوچک است. بنابراین برای همجوشی هسته‌ای، تراکم یون‌ها باید خیلی زیاد باشد. در این واکنش حداقل یک ذره دیگر نیز تشکیل می‌شود که بسته به نوع واکنش، پروتون یا نوترون خواهد بود. همچنین

1. Nuclear Fusion

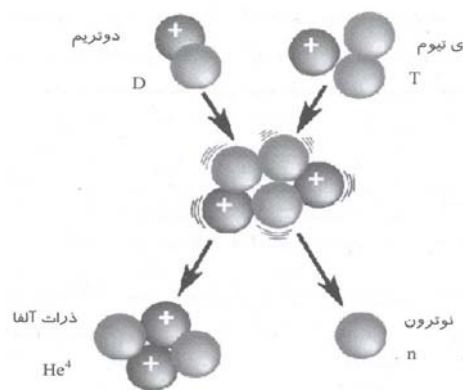
فصل دوم: عناصر و واکنش‌های هسته‌ای / ۵۳

مقدار عظیمی انرژی نیز (۸ برابر انرژی تولید شده در شکافت هسته‌ای) بصورت نور و گرما حاصل می‌شود که برابر با انرژی همبستگی هسته می‌باشد.

همجوشی هسته‌ای، فرآیند انرژی هسته‌ای در خورشید و ستاره‌هاست. واکنش کلی همجوشی که در خورشید رخ می‌دهد، عبارت است از برخورد هسته‌های چهار اتم هیدروژن و تبدیل آنها به یک اتم هلیوم. واکنش‌های گداخت هسته‌ای ۸۵ درصد از انرژی خورشید را فراهم می‌سازد. طبق فرآیند جوش هسته‌ای در خورشید، در هر ثانیه ۵۶۴ میلیون تن هیدروژن در تشکیل ۵۶۰ میلیون تن هلیوم در واکنش جوش هسته‌ای شرکت می‌کند و مابقی آن معادل ۴ میلیون تن به انرژی تبدیل می‌شود. به این ترتیب در هر ثانیه حدود ۴ میلیون تن از جرم خورشید کاسته شده و به انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی معادل $3/8 \times 10^{33}$ کیلوژول می‌باشد که از این انرژی، روزانه معادل $1/5 \times 10^{19}$ کیلوژول به سطح زمین می‌رسد. البته، تصور بر این است که این واکنش، در سایر ستارگان بزرگ نیست که باعث تولید انرژی می‌شود؛ بلکه احتمالاً چرخه کربن در آنها به کمک آمده و کوره آنها را روشن نگه می‌دارد. منظور از چرخه کربن، آن چرخه‌ای نیست که روی زمین اتفاق می‌افتد؛ بلکه به این صورت است که ابتدا یک اتم هیدروژن معمولی با یک اتم کربن C_{12} ترکیب می‌شود (همجوشی) و یک اتم N_{13} به علاوه یک واحد گاما را آزاد می‌کند. بعد، این اتم با یک واپاشی به یک اتم C_{13} به علاوه یک پوزیترون و یک نوترینو تبدیل می‌شود. سپس، این C_{13} دوباره با یک اتم هیدروژن ترکیب شده و N_{14} و یک واحد گاما حاصل می‌شود. دوباره، در اثر ترکیب این نیتروژن با یک هیدروژن معمولی، اتم O_{15} و یک واحد گاما تولید می‌شود. این اتم O_{15} نیز واپاشی کرده و N_{15} به علاوه یک پوزیترون و یک نوترینو بوجود آمده و در نهایت، با ترکیب N_{15} با یک هیدروژن معمولی، C_{12} به علاوه یک اتم هلیوم بدست می‌آید. این واکنش‌ها، به ترتیب و پشت سرهم انجام می‌شوند و واکنش اصلی، همان تبدیل چهار اتم هیدروژن به یک اتم هلیوم است.

واکنش‌های همجوشی هسته‌ای، بسته به میزان سوخت خارج شده از واکنش، انواع مختلفی دارد و مقدار انرژی حاصل از واکنش و نیز احتمال انجام واکنش، بستگی به خواص جنبشی مواد واکنش کننده دارد. واکنش همجوشی که در شرایط آزمایشگاهی انجام می‌شود، جهت تولید توان مناسب واکنش دوتریوم با تریتیوم است که از این واکنش، یک اتم هلیوم و یک نوترون و به مقدار $17/6 \text{ MeV}$ انرژی تولید می‌شود. هسته دوتریوم از یک نوترون و یک پروتون تشکیل می‌یابد. هسته تریتیوم نیز دارای دو نوترون و یک پروتون است. این واکنش (D-T) ساده‌ترین واکنش جهت دستیابی به گداخت هسته‌ای و نیز دارای بیشترین احتمال وقوع در بین دیگر واکنش‌های گداخت می‌باشد. بدین دلیل بیشترین تلاش‌های محققین تاکنون روی امکان‌پذیر ساختن واکنش D-T متمرکز گردیده است. این واکنش با آزادی یک ذره آلفا (هلیوم) و یک نوترون همراه است. تریتیوم یک ماده ناپایدار (رادیواکتیو) با واپاشی از نوع بتا و نیمه عمر $12/3$ سال بوده و به دلیل نیمه عمر نسبتاً کوتاهش تقریباً در طبیعت یافت نمی‌شود. در عمل

می‌توان آن را با قرار دادن لیتیم در برابر نوترون طبق واکنش‌های $\text{Li}^6 + n \rightarrow \text{He}^4 + {}^3_1\text{T} + 4.8 \text{ Mev}$ و $\text{Li}^7 + n \rightarrow \text{He}^4 + {}^3_1\text{T} + n - 2.47 \text{ Mev}$ بدست آورد. نوترون‌های موردنیاز برای این واکنش‌ها در یک راکتور گداخت هسته‌ای، به طور همزمان در طی واکنش D-T به صورت ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow \text{He}^4 + n$ حاصل می‌گردد. با توجه به واکنش D-T و واکنش نوترون و لیتیم-۶ خواهیم داشت: $\text{Li}^6 + {}^2_1\text{D} \rightarrow 2 \text{He}^4 + 22.4 \text{ Mev}$ این رابطه نشان می‌دهد که سوخت‌های اصلی در واکنش D-T در واقع لیتیم و دوتریم هستند و تریتیوم نقشی شبیه کاتالیزور را ایفا می‌نماید. نقش لیتیم در فرایند گداخت هسته‌ای D-T همچون اورانیوم ۲۳۸ یک ماده بارور است.



شکل (۲-۹): واکنش دوتریم- تریتیوم

واکنش همجوشی قابل دسترسی دیگر، در برگیرنده هسته دوتریوم به عنوان سوخت است. از ترکیب دو عدد دوتریوم، در یک احتمال، یک پروتون و یک تریتیوم و مقداری انرژی در حدود 4.03 Mev و در احتمالی دیگر، یک نوترون و یک ایزوتوپ هلیوم-۳ و مقداری انرژی در حدود 3.27 Mev آزاد می‌شود. بیشترین انرژی آزاد شده از واکنش ایزوتوپ لیتیم-۶ با دوتریم حاصل می‌شود که علاوه بر 22.4 Mev انرژی آزاد شده، ۲ عدد ایزوتوپ هلیوم-۴ نیز نتیجه واکنش خواهد بود. لازم به ذکر است که در روش شکافت هسته‌ای، ماده اولیه منحصر به اورانیوم، پلوتونیوم و توریوم است؛ در حالی که، در روش پیوند هسته‌ای، از هر اتم سبکی همچون هیدروژن می‌توان استفاده نمود. تابحال، این همجوشی در انفجار بمب هیدروژنی، قوی و بسیار خوب تشخیص داده شده است. در سال ۱۹۵۲ اولین انفجار آزمایشی گرماهسته‌ای باعث آزاد شدن مقدار زیادی انرژی کنترل نشده شد. این آزمایش نشان داد که اگر دمای یک گاز متشکل از ذرات باردار (پلازما) با چگالی بالا تا حد ۵۰ میلیون کلین افزایش یابد، باعث ایجاد واکنش فوژیون در گاز یونیده شده و انرژی فوژیون فوق العاده ای آزاد می‌گردد. پس از انفجار موفقیت آمیز بمب هیدروژنی، جستجو برای آزاد کردن کنترل شده انرژی فوژیون شروع شد.

جدول (۲-۵): برخی از واکنش‌های گداخت هسته‌ای

واکنش	توضیح
${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_1\text{T} + \text{H} + 4.03 \text{ Mev}$	در دسترس‌ترین سوخت
${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow \text{He}^3 + \text{n} + 3.27 \text{ Mev}$	
${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow \text{He}^4 + \text{n} + 17.6 \text{ Mev}$	ساده‌ترین واکنش جهت دستیابی
${}^2_1\text{D} + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + \text{H} + 18.3 \text{ Mev}$	ساده‌ترین واکنش بدون نوترون
$\text{He}^3 + {}^3_1\text{T} \rightarrow \text{He}^5 \rightarrow \text{He}^4 + \text{n} + \text{H} + 14.3 \text{ Mev}$	
$\text{H} + \text{Li}^6 \rightarrow \text{He}^4 + \text{He}^3 + 4.02 \text{ Mev}$	واکنش بدون نوترون
$\text{Li}^6 + {}^2_1\text{D} \rightarrow 2 \text{ He}^4 + 22.4 \text{ Mev}$	
$\text{Li}^6 + \text{n} \rightarrow \text{He}^4 + {}^3_1\text{T} + 4.8 \text{ Mev}$	واکنش جذب کننده نوترون
$\text{Li}^7 + \text{n} \rightarrow \text{He}^4 + {}^3_1\text{T} + \text{n} - 2.47 \text{ Mev}$	واکنش گرماگیر نامطلوب

از دهه ۱۹۵۰ تاکنون، دانشمندان سعی در به وجود آوردن دمایی در حدود میلیون درجه کرده تا واکنش پیوست را به نحو متوالی در این دما نگه دارند. دستگاهی که برای این کار ساخته‌اند، توکاماک^۱ نام دارد. تاکنون در آزمایشگاه‌ها توانسته‌اند به مدت حداکثر ۴ دقیقه، این واکنش را ایجاد و کنترل کنند. در این دستگاه، میدان مغناطیسی بسیار شدیدی ایجاد کرده و شدت جریان الکتریکی در حدود ۱۵ میلیون آمپر از آن عبور می‌کند. در مرکز این دستگاه، اتم‌های سبک در اثر میدان مغناطیسی و الکتریکی، حالت پلاسما را خواهند داشت. در چنین حالتی، اتم‌های سبک آنقدر تحریک و نزدیک به هم شده‌اند که درهم نفوذ می‌کنند و اتم جدیدی که هلیوم است، به وجود می‌آید. واکنش همجوشی هسته‌ای، برای انسان چندان مفید نیست و بنابراین، دانشمندان بطور جدی کوشش می‌کنند تا واکنش همجوشی را کنترل کنند، یعنی کاهش سرعت واکنش به درجه‌ای که بتواند برای مقاصد صلح جویانه مفید باشد. در مرحله اول، این واکنش‌ها بصورت کنترل شده برای تولید برق استفاده می‌شود. هرچند این روش مشکلاتی دارد، مثل ساخت محیطی که بتواند دمای مذکور را تحمل کند؛ اما سوخت اینگونه نیروگاه‌ها به سادگی قابل تهیه است مثل دوتریم یا آب سنگین که قابل استخراج از آب دریا بوده و زباله اصلی باقیمانده آن نیز رادیواکتیو نیست. بایستی اذعان داشت حاصل همجوشی هسته‌ای، یک منبع انرژی پتانسیل است که آلودگی آن نسبتاً کم، تقریباً پایان‌ناپذیر و ارزان قیمت بوده و می‌تواند در دسترس همگان قرار گیرد. استفاده از انرژی همجوشی هسته‌ای به صورت عملی و در ابعاد بزرگ، در مرحله آزمایش است. به نظر می‌رسد که به وجود آمدن ماشین‌های بزرگ در حوزه همجوشی گرما هسته‌ای

1. Tokamak

کنترل شده می‌تواند بحران انرژی سیاره زمین را حل کند.

۲-۵- عناصر قابل احتراق همجوشی

همان طور که گفته شد در روش پیوند هسته‌ای، از هر اتم سبکی همچون هیدروژن، هلیوم و لیتیم می‌توان استفاده نمود. دوتریوم و تریتیوم (ایزوتوپ‌های هیدروژن)، لیتیم ۶ و لیتیم ۷ (ایزوتوپ لیتیم) و نیز هلیوم ۳ (ایزوتوپ هلیوم) از عمده عناصر شرکت کننده در واکنش‌های گداخت هسته‌ای هستند.

۲-۵-۱- هیدروژن

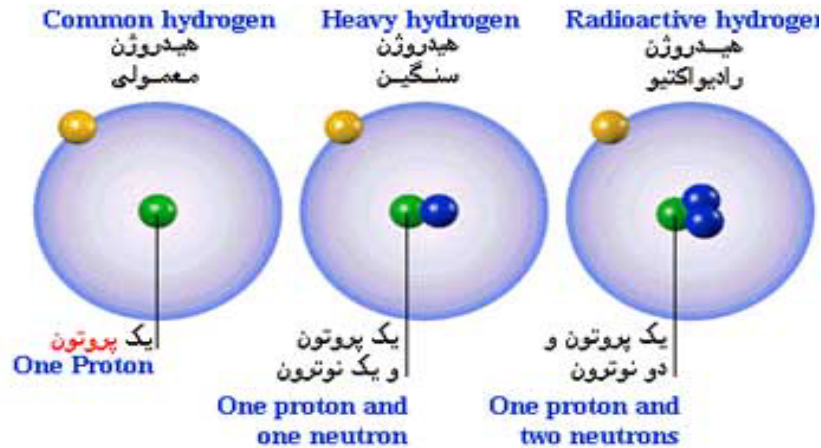
ساده‌ترین اتم شناخته شده طبیعی، اتم هیدروژن است که عدد اتمی یک داشته و دارای یک پروتون و یک الکترون می‌باشد. هیدروژن، سبک‌ترین و فراوان‌ترین عنصر شیمیایی در جهان بوده؛ به طوری که ۷۵ درصد جرم و بیش از ۹۰ درصد اتم‌های تشکیل دهنده مواد طبیعی از این عنصر می‌باشد. در شرایط فشار و دمای استاندارد، هیدروژن یک گاز دو اتمی با نقطه جوش $20/27^{\circ}\text{C}$ درجه کلوین و نقطه ذوب $14/02^{\circ}\text{C}$ درجه کلوین را می‌سازد. اگر این گاز تحت فشار فوق العاده بالایی قرار گیرد، مولکول‌ها ماهیت خود را از دست داده و هیدروژن بصورت فلزی مایع درمی‌آید؛ اما در فشارهای بسیار پایین مانند شرایطی که در فضا یافت می‌شود، به این علت که هیچ راهی برای ترکیب اتم‌هایش وجود ندارد، هیدروژن تمایل دارد تا بصورت اتم‌های مجزا درآمده، ابرهای H_2 (هیدروژنی) تشکیل دهد که به شکل گیری ستارگان نیز مرتبط می‌باشد. این عنصر، نقش بسیار حیاتی در تأمین انرژی جهان از طریق واکنش پروتون-پروتون و چرخه کربن-نیتروژن به عهده دارد. اینها فرآیندهای همجوشی هسته‌ای هستند که با ترکیب دو اتم هیدروژن به یک اتم هلیوم، مقدار بسیار عظیمی از انرژی آزاد می‌کنند. متعارف‌ترین منبع برای این عنصر در زمین، آب (H_2O) است. منابع دیگر هیدروژن عبارتند از انواع مواد آلی در اندام تمام موجودات زنده، زغال، گاز طبیعی و متان (CH_4). هیدروژن از چندین راه مختلف بدست می‌آید. عبور بخار از روی کربن داغ، تجزیه هیدروکربن بوسیله حرارت، واکنش هیدروکسید سدیم یا پتاسیم بر آلومینیوم، الکترولیز آب یا جابه‌جایی آن در اسیدها توسط فلزات خاص. هیدروژن تجاری در حجم‌های زیاد، معمولاً بوسیله تجزیه گاز طبیعی تولید می‌شود.

حجم بسیار زیادی از هیدروژن در فرآیند هابر^۱ صنعت در تولید آمونیاک، هیدروژنه کردن چربی‌ها و روغن‌ها و تولید متانول بکار می‌رود. همچنین، هیدروژن می‌تواند در موتورهای درون‌سوز سوخته شود. پیل‌های سوختی هیدروژنی، بعنوان راهکاری برای تولید توان بالقوه ارزان و بدون آلودگی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین هیدروژن مایع در تحقیقات سرماشناسی مانند مطالعات ابررسانایی بکار می‌رود.

1. Haber Process

هیدروژن در تولید اسید هیدرو کلریک، جوشکاری، سوخت‌های موشک و احیاء سنگ معدن فلزی نیز بکار گرفته می‌شود. همچنین هیدروژن ۱۴/۵ بار از هوا سبکتر بوده و سابقاً بعنوان عامل بالابرنده در بالون‌ها و کشتی‌های هوایی مورد استفاده قرار می‌گرفت؛ اما فاجعه هیندنبِرگ ثابت کرد که استفاده از این گاز برای این منظور بسیار خطرناک است. دوتریوم نیز بعنوان یک کند کننده جهت کاهش حرکت نوترون‌ها در فعالیت‌های هسته‌ای استفاده دارد. همچنین ترکیبات دوتریوم در شیمی و زیست‌شناسی، در مطالعات تأثیرات ایزوتوپ مورد استفاده واقع می‌شوند. تریتیوم نیز به عنوان یک منبع تشعشع در رنگ‌های نورانی کاربرد دارد. همچنین تریتیوم که در راکتورهای اتمی تولید می‌شود، در ساخت بمب‌های هیدروژنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، تریتیوم در صورت مخلوط شدن با مواد شیمیایی، نور تولید می‌کند و از آن می‌توان برای تابان کردن علائم و نشانه‌های راهنمایی و رانندگی بدون استفاده از برق بهره برد که معمولاً در مدارس و دیگر ساختمان‌های همگانی بکار برده می‌شود. این یک فناوری ایمن است و از آن می‌توان در بدن نیز استفاده کرد؛ زیرا ذرات دارای انرژی منتشر شده از تریتیوم نمی‌توانند به درون پوست نفوذ کنند. تریتیوم تنها ذرات دارای انرژی با بار اندک منتشر می‌کند که می‌توان جلوی این ذرات را با یک لایه بسیار نازک مانند یک ورق کاغذ سد کرد.

هسته‌های اتم هیدروژن معمولاً با صفر، یک یا دو نوترون وجود دارد که به اصطلاح «ایزوتوپ‌های هیدروژن» نامیده می‌شوند. بنابراین، هیدروژن سه ایزوتوپ دارد: پروتیوم (هیدروژن معمولی) که فقط یک پروتون داشته و فاقد نوترون است. هیدروژن سنگین که یک پروتون و یک نوترون دارد و به آن دوتریم گویند. نهایتاً تریتم T یا H^3 که از دو نوترون و یک پروتون تشکیل شده و ناپایدار است و طی زمان تجزیه می‌شود. دو ایزوتوپ پایدار هیدروژن، پروتیوم H^1 و دوتریم D یا H^2 می‌باشند. ایزوتوپ سنگین هیدروژن یعنی دوتریم، در نیروگاه‌های اتمی کاربرد دارد. این ایزوتوپ از الکترولیز آب به دست می‌آید و شامل ۰/۰۰۸۲-۰/۰۱۸۴ درصد کل هیدروژن است. از میان سه ایزوتوپ هیدروژن، ایزوتوپ‌های دوتریم و تریتیوم، تنها مواد قابل احتراق و مناسب برای سوخت راکتورهای همجوشی هسته‌ای می‌باشند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که اقیانوس‌های جهان و همچنین دریاچه‌های آب شیرین و رودخانه‌ها، در برگیرنده دوتریم کافی هستند؛ ولی تریتیوم یک ماده رادیواکتیو پخش کننده ذره بتا با نیم عمر ۱۲/۳ سال، کمیاب است. در هر حال بایستی توجه داشت که هیدروژن سنگین که نسبت به هیدروژن معمولی فوق‌العاده نایاب است، برای پیوند هسته‌ای بسیار مناسب‌تر می‌باشد و با وجودی که در هر ۶۴۰۰ اتم هیدروژن، فقط یک اتم آن هیدروژن سنگین می‌باشد؛ اما مقدار هیدروژن موجود در اقیانوس‌ها برای این امر کافی خواهد بود. موجودی تریتیوم در اقیانوس‌ها و در اتمسفر در حال تعادل که بوسیله پرتوهای کیهانی تولید می‌شود، نزدیک به ۲۰ کیلوگرم برآورد می‌شود. یک نیروگاه در هر روز حدود ۱۵۳ گرم تریتیوم مصرف می‌کند.



شکل (۲-۱۰): ایزوتوپ‌های هیدروژن

۲-۵-۲- لیتیم

لیتیم، عنصر شیمیایی است با نشان Li و عدد اتمی ۳ که در جدول تناوبی به همراه فلزات قلیایی در گروه یک قرار دارد. لیتیم از واژه یونانی lithos به معنی سنگ مشتق شده و در سال ۱۸۱۷ توسط جان آرفدسن^۱ کشف گردید. تولید تجاری فلز لیتیم در سال ۱۹۲۳، به وسیله شرکت آلمانی Metallgesellschaft AG و با استفاده از الکترولیز کلرید لیتیم و کلرید پتاسیم مذاب محقق گشت. لیتیم، یک عنصر تک ظرفیتی، سبک‌ترین عنصر جامد (فلز) و دارای چگالی به اندازه نصف چگالی آب است. بنابراین، عمدتاً در آلیاژهای انتقال حرارت در باتری‌ها بکار رفته و در بعضی از تثبیت کننده‌های حالت^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عنصر، در حالت خالص، فلزی نرم و به رنگ سفید خاکستری می‌باشد که به سرعت، در معرض آب و هوا اکسید شده و کدر می‌گردد. به عبارتی، لیتیم همانند همه فلزات قلیایی به راحتی در آب واکنش کرده و به سبب فعالیتش، هرگز در طبیعت بصورت آزاد یافت نمی‌شود و همیشه به صورت ترکیب با یک یا چند عنصر یا ترکیب دیگر دیده می‌شود. با این وجود، هنوز هم واکنش‌پذیری آن از سدیم کمتر است. وقتی لیتیم روی شعله قرار گیرد، رنگ زرشکی جالبی تولید می‌کند؛ اما اگر به شدت سوخته شود، شعله‌هایی سفید درخشان ایجاد می‌کند.

این فلز بخش کوچکی از کلیه سنگ‌های آذرین را تشکیل داده و نیز در بسیاری از شوراب‌های طبیعی وجود دارد. این فلز، در سنگ‌های آذرین از سایر عناصر جدا می‌شود و از آب چشمه‌های معدنی هم بدست می‌آید. لپدولیت، اسپادومین، پتالیت و امبلی گونیت، مهمترین مواد معدنی حاوی لیتیم هستند. این

1. Johann Arfvedson
2. mood stabilizers

فلز که همانند سدیم، پتاسیم و سایر اعضاء گروه فلزات قلیایی، ظاهری سیمگون دارد، با روش الکترولیز از یک مخلوط لیتیم و کلرید پتاسیم گداخته تولید می‌شود. لیتیم، به علت دارا بودن بالاترین گرمای ویژه در بین جامدات، عمدتاً در کاربردهای انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، این عنصر با داشتن خاصیت بالای الکتروشیمیایی، ماده مهمی برای استفاده در آند باتری‌ها محسوب می‌شود. لیتیم عاملی آلیاژساز در تولید ترکیبات آلی، تثبیت کننده حالت به صورت نمک‌های لیتیم مثل کربنات لیتیم (Li_2CO_3) و سیترات لیتیم (درمان بیماری‌های گوناگون) و جذب کننده شدید رطوبت به صورت لیتیم کلرید و لیتیم برمید (خشک کننده‌ها) بوده و در ساخت شیشه و سرامیک کاربرد زیادی دارد. همچنین استرات لیتیم یک ماده لیز کننده کلی در دمای بالا و برای تمامی مقاصد به شمار می‌رود. در فضاپیما و زیردریایی‌ها نیز، برای خارج کردن دی اکسید کربن از هوا، از هیدروکسید لیتیم استفاده می‌شود. از آلیاژ این فلز با آلومینیم، کادمیوم، مس و منگنز نیز در ساخت قطعات هواپیماهای بلندپرواز استفاده می‌گردد.

لیتیم بطور طبیعی متشکل از ۲ ایزوتوپ پایدار Li-6 و Li-7 است که در مقایسه Li-7 معمول‌ترین و فراوانتر از Li-6 است؛ به طوری که به ازای هر ۱۰۰ اتم Li-7 حدود ۸ اتم Li-6 وجود دارد. شش رادیوایزوتوپ هم برای لیتیم وجود دارد که پایداری آنها Li-8 با نیمه عمر ۸۳۸ هزارم ثانیه و Li-9 با نیمه عمر $۱۷۸/۳$ هزارم ثانیه می‌باشد. مابقی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو، نیمه عمرهایی کمتر از $۸/۵$ هزارم ثانیه داشته یا ناشناخته‌اند. ایزوتوپ‌های لیتیم از نظر وزن اتمی بین $۴/۰۲۷\text{amu}$ (Li-4) تا $۷۰۴۳۸/۱۱$ (Li-11) قرار دارند. حالت فروپاشی اولیه قبل از ایزوتوپ Li-7 ، ارسال پروتون (با یک مورد فروپاشی آلفا) و حالت اولیه بعد از آن ارسال می‌باشد (با تعدادی ارسال نوترون). محصول فروپاشی اولیه قبل از Li-7 ، ایزوتوپ‌های عنصر ۲ (هلیوم) و محصول اولیه بعد از آن، ایزوتوپ‌های عنصر ۴ (برلیوم) است. لیتیم-۶ یکی از عناصر اصلی فرآیند گداخت هسته‌ای بوده، اما استفاده از لیتیم-۷ در فرآیند گداخت، به دلیل گرماگیری و عدم تولید انرژی اصلاً مرسوم نمی‌باشد. البته لیتیم-۷ یکی از عناصر تولید شده در نوکلئوسنتز انفجار بزرگ^۱ می‌باشد. ایزوتوپ‌های لیتیم، طی یک سری فرآیندهای طبیعی مختلف، از جمله تشکیل مواد معدنی (رسوب شیمیایی)، متابولیسم، جابه‌جایی یونی^۲، hyperfiltration و دگرگونی صخره‌ها، به طور اساسی شکسته می‌شوند.

۲-۵-۳- هلیوم

هلیوم He با عدد اتمی ۲، بعد از هیدروژن، فراوان‌ترین عنصر در جهان بوده و تقریباً ۲۰ درصد ماده ستارگان را تشکیل می‌دهد. این عنصر، یک گاز بی‌اثر، بی‌رنگ و بی‌بو بوده و در دما و فشار طبیعی،

1. primordial

۲. در برخی از خاک‌های معدنی که Li-6 به Li-7 ترجیح داده شده است در مکان‌های octahedral، لیتیم جایگزین منیزیم و آهن می‌شود

بصورت گازی تک اتمی وجود داشته و فقط در شرایط بسیار غیرعادی متراکم می‌شود. هلیوم، دارای پایین‌ترین نقطه جوش و ذوب در میان عناصر بوده و تنها مایعی است که با کاهش دما به جامد تبدیل نشده و در فشار استاندارد، تا دمای صفر مطلق به حالت مایع باقی می‌ماند (تنها با افزایش فشار می‌توان آن را به جامد تبدیل نمود). ظرفیت گرمایی ویژه گاز هلیوم بسیار زیاد بوده و بخار آن بسیار متراکم می‌باشد؛ به طوری که در صورت گرم شدن در دمای اطلاق، سریعاً منبسط می‌گردد. هلیوم در جو زمین به میزان بسیار کم، بر اثر فرسایش مواد معدنی خاصی یافت شده و در بعضی از آبهای معدنی هم وجود دارد. هلیوم را می‌توان از طریق بمباران لیتیم یا بورن بوسیله پروتون‌های سریع تولید نمود. هلیوم بیشتر به عنوان گازی بالابرنده در بالون‌ها استفاده می‌شود که از آنها به ترتیب برای تبلیغات، تحقیقات جوی، شناسایی‌های نظامی و بعنوان یک چیز بدیع استفاده می‌شود. هلیوم دارای قدرت بالابردگی ۰/۹ هیدروژن است؛ اما برخلاف آن قابل اشتعال نبوده و ایمنی آن از هیدروژن بالاتر می‌باشد. همچنین، همان‌طور که اشاره شد، هلیوم دارای پایین‌ترین نقطه ذوب و جوش در میان عناصر است که این خصوصیت، مایع هلیوم را به خنک کننده‌ای ایده‌آل برای مقاصدی که دمای بسیار پایین نیاز دارند تبدیل می‌کند؛ از جمله آهن‌رباهای ابررسانا و تحقیقات سرماشناسی که در آنها دمای نزدیک به صفر مطلق نیاز است.

همچنین از این هلیوم در موشک‌های با سوخت مایع فشرده و به عنوان حفاظ گاز در جوشکاری برقی، گاز محافظ برای تولید بلورهای سیلیکون و ژرمانیوم، عامل خنک کننده برای راکتورهای اتمی و نیز برای تونل‌های بادی فراصوتی استفاده می‌شود. در نهایت، همجوشی هلیوم با دوتریوم و تریتیوم، انرژی لازم برای تهیه راکتورهای گداخت اتمی را تأمین می‌کند. همچنین در اکثر واکنش‌های گداخت هلیوم (ایزوتوپ هلیوم-۴) تولید می‌گردد که به دلیل پایدار بودن هسته آن است. معمول‌ترین ایزوتوپ هلیوم $He-4$ می‌باشد که هسته آن دارای دو پروتون و دو نوترون است. این ایزوتوپ هلیوم یکی از عناصر اصلی تشکیل دهنده اتمسفر زمین بوده و در چاه‌های گاز طبیعی نیز به وفور یافت می‌شود. بسیاری از هسته‌های سنگین‌تر، بر اثر انتشار هسته‌های $He-4$ متلاشی می‌شوند، فرآیندی که فروپاشی آلفا نامیده شده و به همین علت، هسته‌های هلیوم را ذرات آلفا می‌نامند و اکثر هلیوم موجود در زمین با این فرآیند تولید می‌شوند. دومین ایزوتوپ هلیوم $He-3$ است که هسته آن دارای دو پروتون و یک نوترون می‌باشد. تقریباً به ازای هر ۱۰ میلیون اتم $He-4$ حدود ۱۳ اتم $He-3$ موجود است. ایزوتوپ $He-3$ روی سطح ماه فراوان یافت می‌شود و از طریق واپاشی تریتیوم نیز به دست می‌آید. این ایزوتوپ همراه با دوتریم و تریتیوم در واکنش‌های گداخت هسته‌ای شرکت می‌کند. در واکنش هلیوم ۳ با تریتیوم، $He-5$ تولید می‌شود که یک ایزوتوپ ناپایدار بوده و با واپاشی به حالت پایدار $He-4$ می‌رسد. علاوه بر اینها، هلیوم چندین ایزوتوپ سنگین‌تر رادیواکتیو دارد.

۲-۶- آب سنگین

آب سنگین واژه‌ای است که معمولاً به اکسید هیدروژن سنگین D_2O یا H_2O_2 اطلاق می‌شود. هیدروژن سنگین یا دوتریوم^۱ ایزوتوپی پایدار از هیدروژن می‌باشد که به نسبت یک به ۶۴۰۰ از اتم‌های هیدروژن در طبیعت وجود دارد. هسته ایزوتوپ معمولی هیدروژن دارای یک پروتون و هسته ایزوتوپ سنگین دارای یک پروتون و یک نوترون است. این نوترون اضافی، هم سبب کاهش جذب نوترون توسط دتریوم و آب سنگین می‌شود و هم افزایش جرم آن را به همراه دارد. جرم ملکولی آب معمولی ۱۸ و آب سنگین ۲۰ است. در نتیجه یک لیتر آب سنگین دارای جرمی بیشتر از یک لیتر آب سبک است. آب سنگین در طبیعت به مقدار تقریباً یک دهم درصد وجود دارد، یعنی ۹۹/۹۹ درصد آب رودخانه‌ها و دریاها از آب معمولی و فقط مقدار بسیار ناچیزی از آن، از آب سنگین درست شده است. جانشینی هیدروژن با دوتریوم در مولکول‌های آب، سطح انرژی پیوندهای مولکولی را تغییر می‌دهد و به‌طور طبیعی خواص متفاوت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را موجب می‌شود، به‌طوری که این خواص را در کمتر اکسید ایزوتوپی می‌توان مشاهده کرد. این آب در مقایسه با آب معمولی نقطه جوش و نقطه انجماد بالاتری دارد و ویسکوزیته یا چسبندگی آن بیشتر است. آب سنگین دارای دمای جوش ۱۰۱/۴۲ درجه سانتیگراد در فشار استاندارد، نقطه انجماد ۳/۸۱ درجه سانتیگراد و چگالی نسبی ۱۰/۷۹ در دما و فشار استاندارد می‌باشد. از میان هر ۶۴۰۰ تا ۷۰۰۰ ملکول آب معمولی، یک ملکول آب سنگین وجود دارد که برای دستیابی به آن از طرق فیزیکی و شیمیایی درجه خلوص آن را بالا می‌برند. محققان برای اولین بار به طریق الکترولیز به آب سنگین خالص دست یافتند. تفاوت در نقاط جوش این دو نوع آب، امکان جداسازی آب سنگین و خالص سازی آن را تسهیل می‌کند. در این راستا، برای تولید آب سنگین، از روش تبخیر و تقطیر آب معمولی استفاده می‌شود.

تولید آب سنگین مانند اورانیوم خام، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات و تحقیقات هسته‌ای برخوردار است. آب سنگین کلید اصلی تهیه پلوتونیوم از اورانیوم طبیعی است. آب سنگین یکی از مواد اصلی برای راه‌اندازی راکتورهای تولید انرژی و تحقیقاتی موسوم به راکتورهای آب سنگین به شمار می‌رود. در این راکتورها، این ماده وظیفه خنک کردن میله‌های سوخت، همزمان با کند کردن نوترون‌های پرانرژی را به عهده دارد. اگر در راکتور آب سنگین، از آب معمولی استفاده کنیم تمامی نوترون‌های حاصل از شکافت، توسط آب جذب و واکنش زنجیره‌ای متوقف می‌شود، درحالی که آب سنگین توانایی کمی در جذب نوترون دارد. راکتورهای آب سنگین نیازی به اورانیوم غنی شده ندارد و از اکسید اورانیوم طبیعی به عنوان سوخت استفاده می‌کند. این فرایند، نیاز به اورانیوم غنی شده را مرتفع می‌کند، در حالی که در

1. Deuterium

راکتورهای قدرت آب سبک، اورانیوم غنی شده در حد ۳/۵ درصد و بیش از آن برای انجام واکنش مورد نیاز است. اما طراحی این راکتورها پیچیده و تولید آب سنگین نیز هزینه‌بر است. استفاده از اورانیوم طبیعی در راکتورهای آب سنگین، سبب ایجاد میزان بیشتری از پلوتونیوم می‌شود که این پلوتونیوم می‌تواند کاربرد نظامی داشته باشد. همچنین با کمک این نوع آب می‌توان پلوتونیوم لازم را برای سلاح‌های اتمی بدون نیاز به غنی‌سازی بالایی اورانیوم نیز تهیه کرد. به همین علت تولید و تجارت آن با نظر قوانین بین‌المللی انجام و به شدت کنترل می‌شود. همچنین از آب سنگین برای تولید رادیوایزوتوپ‌ها و نیز رادیوداروها در صنعت، کشاورزی و پزشکی استفاده می‌شود. همچنین در رادیوگرافی، نوترون تراپی و نوترون رادیوگرافی از آن بهره‌برداری می‌شود. در ضمن، آب سنگین برای تشخیص نشت آب‌های زیرزمینی یا نشت آب از سدها کاربرد زیادی دارد. علاوه بر اینها، دوتریم در تحقیقات فیوژن یا گداخت سرد نقش محوری ایفا می‌کند. در حال حاضر، تأسیسات تولید آب سنگین تاکنون فقط در ۸ کشور وجود داشته و چهار کشور آرژانتین، کانادا، هند و نروژ نیز از بزرگترین صادر کنندگان آب سنگین در جهان می‌باشند، اما خرید آب سنگین از این کشورها احتیاج به کسب مجوز مخصوص از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی دارد که به آسانی به دست نمی‌آید.

نکته مهم آن است که آب سنگین را نباید با آب سخت اشتباه گرفت. آب سخت همان آب سبک یا معمولی است که دارای املاح بسیار زیادی می‌باشد. همچنین آب سنگین یا آب تریتموم (T_2O) یا (H_2O_3) نیز متفاوت است. تریتموم، ایزوتوپ دیگری از هیدروژن است که خاصیت رادیواکتیو دارد و بیشتر برای ساخت موادی به کار برده می‌شود که از خود نور منتشر می‌کنند. بایستی توجه داشت، چنانچه در اکسید هیدروژن تنها یکی از اتم‌های هیدروژن به ایزوتوپ دوتریوم تبدیل شود نتیجه را آب نیمه سنگین (HDO) می‌گویند. در مواردی که ترکیب مساوی از هیدروژن و دوتریوم در تشکیل مولکول‌های آب وجود داشته باشند، آب نیمه سنگین تهیه می‌شود، علت این کار تبدیل سریع اتم‌های هیدروژن و دوتریوم بین مولکول‌های آب است. مولکول آبی که از ۵۰ درصد هیدروژن معمولی (H) و ۵۰ درصد هیدروژن سنگین (D) تشکیل شده‌است، در موازنه شیمیایی حدود ۵۰ درصد HDO و ۲۵ درصد آب (H_2O) و ۲۵ درصد D_2O خواهد داشت. همچنین آب با اکسیژن سنگین نیز دارای فرمول $H_2^{18}O$ بوده و بیشتر برای ردیابی به کار برده می‌شود. برای مثال، با جانشین کردن این آب (با نوشیدن یا تزریق) در یکی از عضوهای بدن می‌توان در طول زمان میزان تغییر در مقدار آب این عضو را بررسی کرد. این نوع آب به ندرت حاوی دوتریوم است و به همین علت خواص شیمیایی و بیولوژیکی خاصی نداشته و تفاوت فیزیکی این آب با آب معمولی، فقط چگالی بیشتر آن است. بایستی توجه داشت که هرچند آب سنگین، ماده سمی و زهرآلود به شمار نمی‌رود؛ اما بعضی از واکنش‌های سوخت‌سازی (متوسیز)، نیازمند آب سبک است. بنابراین، مصرف بیش از حد آب سنگین ممکن است موجب بیماری شود. آزمایشاتی که بر روی

فصل دوم: عناصر و واکنش‌های هسته‌ای / ۶۳

موش‌ها صورت گرفته، نشان داده است که آب سنگین، تقسیم غیرمستقیم سلولی بافت‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۶۴ / مبانی و کاربردهای فناوری هسته‌ای

سفید

فصل سوم

فرآیندهای تولید سوخت هسته‌ای

مقدمه

کاربردهای انرژی هسته‌ای به وسیله بشر، با اورانیوم ۲۳۵ شروع شد که مهمترین سوخت هسته‌ای بوده و در هر فناوری هسته‌ای، خواه صلح‌آمیز یا نظامی، به عنوان ماده بنیادی مورد نیاز محسوب می‌شود. اما اورانیومی که از زمین استخراج می‌شود، به صورت طبیعی عمدتاً شامل اورانیوم ۲۳۸ می‌باشد که بلافاصله قابل استفاده در نیروگاه‌های تولید انرژی، به عنوان سوخت نیست؛ چرا که با شلیک نوترونی به هسته این ایزوتوپ، احتمال به دام افتادن نوترون و تشکیل اورانیوم ۲۳۹ از احتمال شکافت هسته‌ای بسیار بیشتر است؛ درحالی‌که در اورانیوم ۲۳۵، امکان شکافت هسته‌ای و بازده اورانیوم بیشتر است. اما فقط ۰/۷ درصد اورانیوم موجود در طبیعت، ایزوتوپ ۲۳۵ است. به همین خاطر، برای تهیه مقدار مورد نیاز اورانیوم ۲۳۵ برای تهیه سوخت هسته‌ای، به مقدار زیادی از اورانیوم طبیعی نیاز است. در عین حال، ایزوتوپ‌های ۲۳۵ و ۲۳۹ اورانیوم به روش‌های شیمیایی قابل جداسازی نیستند؛ چرا که از لحاظ شیمیایی یکسانند و بایستی از روش‌های غیرشیمیایی استفاده کرد. در این روش‌ها، فرآیندهای مختلفی روی سنگ معدن اورانیوم صورت می‌گیرد تا غلظت ایزوتوپ U^{235} که قابل شکافت است، افزایش یابد. این فرآیند را چرخه سوخت اورانیوم یا چرخه سوخت هسته‌ای و دانش تبدیل اورانیوم طبیعی، از طریق شکافت اتم-ها، به اورانیوم غنی شده با انرژی بسیار زیاد را فناوری هسته‌ای می‌گویند.

۳-۱- شناخت چرخه سوخت هسته‌ای

چرخه سوخت هسته‌ای، از دو بخش انتهایی جلویی و انتهایی عقبی^۱ تشکیل شده است. انتهایی جلویی این چرخه، مرحله‌ای است که منجر به آماده سازی اورانیوم به عنوان سوخت راکتورهای هسته‌ای می‌شود و شامل استخراج از معدن، آسیاب کردن، تبدیل، غنی سازی و تولید سوخت برای راکتورهای هسته‌ای است. برای استفاده از اورانیوم به عنوان سوخت، ابتدا باید آن را از سنگ‌های معدنی استخراج و جداسازی نمود (مرحله فرآوری سنگ معدن اورانیوم). سپس با تبدیل و غنی سازی، آن را آماده برای تهیه سوخت کرد (مرحله تبدیل و غنی سازی اورانیوم). پس از آن، با روش‌های شیمیایی و فیزیکی مختلف به تولید سوخت هسته‌ای مناسب مبادرت نمود (مرحله تولید سوخت هسته‌ای). در نهایت، پس از مصرف سوخت اورانیوم، انتهایی عقبی چرخه آغاز می‌شود تا ضایعات هسته‌ای به انسان و محیط زیست آسیبی نرسانند. این بخش عقبی، شامل انبارداری موقتی، بازفرآوری کردن و انبار نهایی است. در کل، لفظ چرخه بدان جهت بکار می‌رود که عناصر شکاف‌پذیر پس از مصرف در راکتورهای هسته‌ای، تحت بازفرآوری قرار گرفته و مجدداً برای مصرف آماده می‌گردند. صنعت چرخه سوخت با فعالیت‌های صنعتی تولید آب سنگین، تولید فلز زیرکونیوم، تولید لوله زیرکالوی، مدیریت پسمان‌های غنی و دیگر پسمان‌ها و نهایتاً فعالیت‌های ترابری مرتبط با جابه‌جایی مواد از هریک از کانون‌های تولید، همراه می‌باشد.

برحسب نوع راکتور، گونه سوخت مصرفی و بازفرآوری یا عدم بازفرآوری سوخت مصرف شده، چندین چرخه سوخت هسته‌ای وجود دارد. در چرخه سوخت یکبار مصرف، مواد سوختی فقط یکبار در راکتور قرار گرفته و پس از پرتوافشانی، سوخت مصرفی در استخرهای راکتور نگهداری و پس از مدتی از آنجا دور می‌شود تا با رسیدن به شرایط مطلوب در پسمان‌گور قرار گیرد. این شیوه چرخه سوخت، در بیشتر کشورهای دارای تولید برق هسته‌ای عمل می‌شود؛ ولی هنوز پسمان‌گور نهایی برای پسمان آنها اجرا نشده است. چرخه راکتور گرمایی نیز خاص نیروگاه‌های آب سبک است که پس از دور سرد شدن کامل، سوخت مصرفی برای استحصال اورانیوم و پلوتونیوم و دیگر اکتینیدهای باقیمانده حاصل از فراگرد شکافت هسته‌ای بازفرآوری می‌شود. اورانیوم و پلوتونیوم حاصل از بازفرآوری می‌تواند مجدداً در سوخت اکسید مختلط (MOX) به همان شیوه‌ای که سوخت هسته‌ای بکار می‌رود، مصرف شود. این گونه استراتژی سوخت در معدودی از کشورها جریان دارد. در نهایت، در چرخه راکتور شتابدهنده (FBR) نیز، اورانیوم و پلوتونیوم بازفرآوری شده برای تولید سوخت راکتور FBR مصرف می‌شود. در دوره پرتوافشانی در راکتورهای FBR، تولید مواد شکافت از نرخ شکافت بیشتر است. با بهره‌برداری مناسب، چنین راکتوری می‌تواند پلوتونیوم بیشتری از مصرف تولید نماید. توسعه و کاربرد چرخه FBR اخیراً به دلیل عدم

1. Front end و Back end

مقبولیت برای مردم، بالا بودن هزینه تولید و توسعه و فراوان بودن اورانیوم طبیعی ارزان کاهش یافته است.



شکل (۳-۱): چرخه سوخت هسته‌ای

در هر حال، سیمای کلی چرخه سوخت هسته‌ای که دارای فرآیندهای بازیافت سوخت مصرف شده نیز می‌باشد (شبیه به انواع چرخه‌های راکتور گرمایی و شتابدهنده)، به شرح زیر خواهد بود:
الف. استخراج سنگ معدن اورانیوم و خردایش، جداسازی و فرآوری آن برای تولید اکسید اورانیوم (کیک زرد)،

ب. انتقال کیک زرد به کارخانه تولید میله‌های سوخت،

ج. فرآوری شیمیایی کیک زرد، غنی سازی (در صورت لزوم) و ساخت میله‌های سوخت،

د. انتقال میله‌های سوخت به نیروگاه هسته‌ای،

هـ. انبار کردن و کاربرد سوخت در راکتور (زمان حضور در قلب، نوعاً ۱ تا ۳ سال) و پس از تعویض،

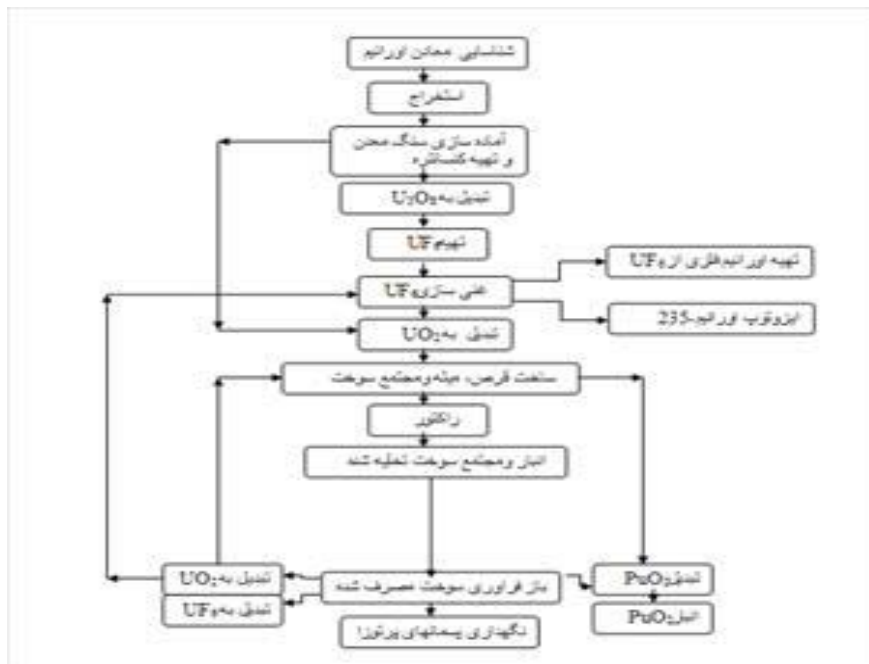
انبار کردن سوخت مصرف شده برای چندین ماه،

و. انتقال سوخت مصرف شده شدیداً پرتوزا از نیروگاه به کارخانه فرآوری،

ز. بازفرآوری و جداسازی سوخت مصرف شده به اورانیوم تهی شده، پلوتونیم و فرآورده‌های شکافت،

ح. انبار کردن فرآورده‌های شکافت به صورت مایع در کارخانه بازفرآوری برای چند سال و به دنبال

آن، فرآوری بیشتر برای تولید ماده به صورتی که نهایتاً برای دورریزی بلندمدت مناسب باشد، ط. انبار کردن اورانیوم تهی شده و پلوتونیوم و مصرف دوباره این مواد در کارخانه تولید سوخت برای باز مصرف در راکتورها، ی. انبار کردن و در نهایت، دور ریختن سوخت مصرف شده دیده بدون فرآوری. شکل زیر شمایی از چرخه سوخت هسته‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۲): شمایی دیگر از چرخه سوخت هسته‌ای

هم اکنون به لحاظ صنعتی، کشورهای فرانسه، ژاپن، روسیه، آمریکا و انگلستان دارای تمامی مراحل تکنولوژی فرآوری اورانیوم در تمامی مراحل چرخه سوخت هسته‌ای در اشل صنعتی می باشند. چنانچه اشل غیرصنعتی منظور گردد، کشورهای دیگری مثل هند نیز به این لیست اضافه خواهند شد. کشورهای کانادا و فرانسه در مجموع دارای بزرگترین کارخانه‌های تبدیل اورانیوم هستند که محصولات آنها شامل UO_2 ، UO_3 و UF_6 می‌باشند. پس از آنها، به ترتیب کشورهای آمریکا، روسیه و انگلستان قرار دارند. در زمینه غنی‌سازی، بی‌تردید آمریکا و روسیه دارای بزرگترین شبکه غنی سازی جهان می‌باشند. در اشل صنعتی، این دو کشور کار غنی سازی را از سال ۱۹۴۵ در آمریکا و ۱۹۴۹ در شوروی آغاز نموده‌اند. پس از آنها، به ترتیب فرانسه، هلند و انگلستان بیشترین غنی سازی را انجام می‌دهند. در حال حاضر، آمریکا بزرگترین تولید کننده سوخت هسته‌ای در جهان است که تمامی سوخت آن جهت استفاده در نیروگاه‌های

BWR و PWR می‌باشد. پس از آمریکا، کانادا تولید کننده اصلی سوخت هسته‌ای در جهان (برای راکتورهای PHWR) می‌باشد. به نظر می‌رسد کشور کانادا از پرسابقه‌ترین کشورها جهت تولید سوخت هسته‌ای است که فعالیت خود را در این زمینه از سال ۱۹۵۶ آغاز نموده است. پس از آمریکا و کانادا، کشورهای انگلستان، روسیه، ژاپن، فرانسه، آلمان، هند، کره جنوبی و سوئد، تولید کنندگان اصلی سوخت هسته‌ای می‌باشند. در زمینه بازفرآوری سوخت مصرف شده، آمریکا بیشترین سهم بازفرآوری سوخت هسته‌ای را در جهان داراست. پس از آن، فرانسه، انگلستان، روسیه، هند و ژاپن قرار دارند. در حال حاضر، بین کشورهای جهان سوم، هندوستان پیشرفته‌ترین کشور در زمینه دانش فنی چرخه سوخت هسته‌ای می‌باشد.

۳-۲- ذخایر اورانیوم

اورانیوم به طور طبیعی به شکل مخلوطی از اکسیدهای مختلف است که به طور وسیعی در پوسته زمین به صورتهای پراکنده یافت می‌شود. این عنصر از نظر فراوانی در میان عناصر طبیعی پوسته زمین در رده ۴۸ قرار دارد. اورانیوم در طبیعت بصورت اکسید و یا نمک‌های مخلوط در مواد معدنی (مانند اورانیت یا کارونیت) یافت می‌شود. این نوع مواد اغلب از فوران آتشفشان‌ها بوجود می‌آیند. این فلز در بسیاری از قسمت‌های دنیا در صخره‌ها، خاک و حتی اعماق دریا و اقیانوس‌ها وجود دارد. قشر جامد کره زمین بطور متوسط به ازای هر تن وزن شامل چهار گرم اورانیوم است. بعضی از انواع سنگ‌های خارا حتی دارای ۳۰ گرم اورانیوم به ازای هر تن از وزن خود می‌باشند. بایستی توجه داشت، اگرچه این عنصر به طور طبیعی در سرتاسر جهان یافت می‌شود؛ اما تنها حجم کوچکی از آن به صورت متراکم در معادن موجود است. ذخایر طبیعی اورانیوم، سنگ معدن اورانیوم است که براساس مقدار قابل استحصال از معدن محاسبه می‌شود. سنگ معدن اورانیوم معمولاً از اکسید اورانیوم (U_3O_8) تشکیل شده و غلظت آن در سنگ معدن بین ۰/۵ تا ۰/۳ درصد تغییر می‌کند. در ضمن، در سنگهای معدنی اورانیم، همیشه حدود ۱ گرم رادیوم در ۳ تن اورانیوم نیز وجود دارد. رادیوم یکی از فلزات کمیاب و بسیار گرانبها بوده و به عنوان چشمه متمرکز تابش پرتوزا ارزش زیادی دارد. عمدتاً اورانیوم در صخره‌های فسفاتی و کانی‌هایی مانند لیگنیت و مونازیت یافت می‌شود که بیشتر برای مصارف اقتصادی از همین منابع استخراج می‌شود. مهمترین ماده معدنی اورانیوم عبارتست از پیچ بلند^۱ که نام علمی آن اکسید بی‌آب اورانیوم 358 می‌باشد. البته این تنها منبع اورانیوم نیست.



شکل (۳-۳): نمونه سنگ اورانیم

اورانیوم در برخی معادن فسفات با منشاء دریایی نیز وجود دارد که البته فراوانی بسیار کمی دارد؛ به طوری که حداکثر به ۲۰۰ ذره در یک میلیون ذره می‌رسد. از آنجایی که این معادن فسفات مقادیر انبوهی تولید دارند، می‌توان اورانیوم را با قیمت معقولی استحصال کرد. در برخی معادن طلای آفریقای جنوبی نیز، بعد از استخراج طلا، از ماده معدنی باقیمانده، برای تهیه اورانیوم استفاده می‌شود. معمولاً کودهای فسفاتی نیز حاوی مقدار زیادی اورانیوم طبیعی می‌باشند؛ چرا که مواد کانی که آنها از آنجا گرفته شده‌اند، حاوی مقدار زیادی اورانیوم می‌باشند. ضریب تمرکز اورانیوم برای تشکیل کانسار ۴۰۰ یا به عبارتی عیار اورانیوم در کانسنگ قابل استخراج (به روش معمولی) حدود ۰/۱ درصد است. کانسارهای اورانیوم دارای بیش از ۱۰ هزار تن، از شمار کانسارهای بزرگ به حساب می‌آیند و کوچکترین واحد معدنی، به کانسارهای دارای حدود ۵۰۰ تن اطلاق می‌شود. گرچه انواع مختلفی از کانسارهای اورانیوم کشف گردیده و در دست بهره‌برداری است؛ اما کانسارهای جای گرفته در میزبان ماسه سنگی که مناسب استحصال درجا هستند، از انواع ارزان و اقتصادی در بازار جهانی تلقی می‌شوند. مهمترین ذخایر اورانیوم دنیا در ماسه سنگهای رودخانه‌ای تشکیل شده‌اند. حدود ۴۵ درصد ذخایر اورانیوم کشف شده کشورهای غربی و ۹۵ درصد اورانیوم امریکا از نوع ماسه سنگ است.

جدول (۳-۱): میزان متوسط اورانیوم در انواع منابع سطح زمین برحسب ppm

۲	فراوانی پوسته ای
۰/۰۰۳	آب دریا
۰/۵	سنگ چخماقی یا آتشفشانی سیاه
۲	اندزیت
۳/۲	سنگ رس

۲/۲	سنگ شنی
۱/۳	سنگ آهک
۴	گرانیت

در طبقه بندی NEA/IAEA، ذخایر اورانیوم براساس رده‌های خاصی از ذخایر برحسب درجه اطمینان از میزان ذخیره و پیشرفت عملیات اکتشافی تقسیم می‌شوند. در رده ذخیره مطمئن (RAR) آن بخش از کانسار قرار می‌گیرد که کاملاً شناخته شده باشد و ذخیره تخمینی اضافی (EAR) آن قسمتی از کانسار است که بین بخش کشف شده و کشف نشده قرار داشته و خود به دو رده EAR I و EAR II تفکیک می‌گردد. ذخیره حدسی (SR) به منابعی اطلاق می‌شود که معیارها و عوامل زمین‌شناسی و کانی‌سازی نشان از وجود ذخیره دارد، اما مقدار آن برحسب ارزیابیهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد. منابع اورانیوم شناخته شده برحسب قیمت تمام شده تولید در رده‌های مختلف به صورت؛ ذخایر اورانیوم رده RAR و EAR به قیمت ارزان کمتر از ۴۰ دلار به کیلوگرم اورانیوم، ذخایر اورانیوم رده RAR و EAR به قیمت متوسط ۴۰ تا ۸۰ دلار به کیلوگرم اورانیوم و در نهایت، ذخایر اورانیوم رده RAR و EAR به قیمت گران بیش از ۸۰ دلار به کیلوگرم طبقه‌بندی می‌شود. در تقسیم اقتصادی ذخایر، قیمت تمام شده تولید مهم‌ترین معیار است. واژه "ذخیره" عموماً به رده RAR به بهره اقتصادی قابل تولید با سود مناسب اطلاق می‌شود که قابل تولید با هزینه ۸۰ دلار به پوند اورانیوم یا کمتر باشد.

جدول (۳-۲): میزان ذخایر اورانیوم کشف شده در رده‌های RAR و EAR جهان در پایان سال ۲۰۰۶ (هزار تن)

هزینه تولید رده ارزیابی	۰-۴۰ (کیلوگرم/دلار)	۴۰-۸۰ (کیلوگرم/دلار)	۸۰-۱۳۰ (کیلوگرم/دلار)	۱۳۰-۰ (کیلوگرم/دلار)	
RAR	۱۷۶۶/۴	۸۳۱/۶	۲۵۹۸	۷۴۰/۳	۳۳۳۸/۳
EAR	۱۲۰۳/۶	۶۵۴/۹	۱۸۵۸/۵	۲۷۲/۱	۲۱۳۰/۶
کل	۲۹۷۰	۱۴۸۶/۵	۴۴۵۶/۵	۱۰۱/۴	۵۴۶۸/۹

۳-۳- اکتشاف کانسنگ اورانیوم

قدم اول جهت استخراج اورانیوم، شناسایی مناطقی است که از نظر زمین‌شناسی برای تجمع اورانیوم مناسب تشخیص داده شوند. باید توجه داشت که مناطقی به عنوان اهداف اولیه مورد توجه قرار می‌گیرند که دارای مساحت بزرگی باشند، اما مناطقی که دارای پتانسیل بیشتری برای برداشت هستند کوچکتر بوده و باید با روشهای اختصاصی بیشتری شناسایی شوند. به منظور انجام این کار از علوم زمین شناسی، حسگرهای قابل کنترل از راه دور، ژئوفیزیک، ژئوشیمی (از قبیل فلوریمتر لیزری)، ژئوشیمی گیاه شناسی و حفاری گمانه‌های متعدد از نظر سطح و عمق به صورت همزمان استفاده می‌شود. نقشه‌های

زمین شناسی و آنالیز حوزه رودخانه‌ها در انتخاب مکانهایی که از لحاظ زمین شناسی برای برداشت اورانیوم مطلوب هستند کمک شایانی می‌کند. در استخراج اورانیوم، ابتدا از حسگرهای راه دور در تهیه تصویرهای ماهواره‌ای و عکسهای منطقه‌ای استفاده می‌شود، سپس به کمک ناوگان هوایی یا طیف تابش گاما، پرتوهای پرانرژی گامای حاصل از فروپاشی مواد معدنی پرتوزا به وسیله حسگرها مشخص می‌شود. اکتشافات اولیه با هواپیما یا هلیکوپتر به وسیله وسایل اندازه گیری تابشی از قبیل اشکارساز گایگر- مولر و شمارشگرهای سنتیلاسیون صورت می‌گیرد. اکتشافات هوایی یک منطقه مشخص را تحت پوشش قرار داده و محل‌هایی را که دارای فعالیت بیشتر هستند شناسایی می‌کند.

معمولاً بررسی‌های ژئوشیمیایی لایه‌ها و رسوب دریاچه‌ها نیز به منظور شناسایی بی قاعدگی‌های گسترده شیمیایی و تهیه اطلاعات از سطوح زیرزمینی صورت می‌گیرد. بررسی‌های انجام شده بر روی رسوبات دریاچه‌ها و رودها ما را قادر می‌سازد تا بتوانیم با نمونه‌گیری‌های اصولی مقدار اورانیوم سنگهای بنیانی را مشخص کنیم. باید توجه داشت که منطقه وسیعی از رسوبهای اورانیوم- نیکل منطقه کی‌لیک کانادا که در عمق بیشتر از ۶۰ متر زیر توده‌های یخی قرار دارد از همین راه کشف شده است. اندازه گیری غلظت رادون ۲۲۲ در هوا که به وسیله آشکارسازهای آلفا و غیره انجام می‌گیرد و نیز اندازه گیری‌های ایزوتوپی مثل اندازه‌گیری غلظت سرب ۲۰۶ یا ۲۰۷ یا اندازه‌گیری غلظت هلیوم ۴ که آخرین ایزوتوپ از سری واپاشی‌های اورانیوم است نیز از دیگر روش‌های شناسایی معادن اورانیوم است. غلظت بیش از سطح معمولی این ایزوتوپ‌ها می‌تواند به کشف ذخائر اورانیوم کمک کند. زمانی که یک هدف با مشخصات معین یافت می‌شود، از انواع تکنیک‌های استخراج به منظور مکان‌یابی دقیق رسوبها استفاده می‌شود. نهایتاً با ارزیابی مناسب استخراج و جداسازی مواد امکان‌پذیر می‌گردد. این قبیل عملیات اکتشافی در محل‌های شناسایی شده با عملیات زمینی آغاز و تکمیل می‌شود و در نتیجه به کشف معادن در قشرهای بیرونی زمین یا در عمقهای ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ متر منجر می‌گردد.

پس از اکتشاف معادن اورانیوم، مرحله اکتشاف تکمیلی با هدف تعیین میزان تخمینی ذخیره اورانیوم آغاز می‌گردد. در این مرحله، نمونه‌هایی از سنگ معدن به آزمایشگاه فرستاده می‌شود. سنگ اورانیوم خام به رنگ سیاه متمایل به قهوه‌ای است که جلای فلزی نداشته و مات و کدر می‌باشد. در این مرحله با بررسیهای آزمایشگاهی مانند XRD -XRF سنگ نگاری، کانی شناسی، میکروشیمی و کانه آرایی، ساختار کانی، نوع ذخیره و نوع کانی‌های حاوی اورانیوم مشخص می‌گردد. در آنجا محلولی از سنگ معدن تهیه کرده و اورانیوم ته نشین شده را مورد بررسی قرار می‌دهند تا بفهمند چه مقدار اورانیوم و با چه هزینه‌ای از آن معدن قابل استخراج خواهد بود. با توجه به هزینه‌های استخراج، اگر غلظت اورانیوم به اندازه‌ای بود که استخراج آن به صرفه باشد آن نقطه به عنوان معدن اورانیوم شناخته می‌شود. مکانهای تمرکز اورانیوم را در اصطلاح زمین شناسی شوتر می‌نامند و تا حدود ۷۵ درصد U_3O_8 یافت شده معمولاً

فصل سوم فرآیندهای تولید سوخت هسته‌ای / ۷۳

از همین شوترها می‌باشد. تنها چند منطقه در سراسر دنیا وجود دارد که غلظت اورانیوم موجود در آنها به قدر کافی است که استخراج آن برای استفاده از نظر اقتصادی به صرفه و امکان‌پذیر است. در نهایت، مطالعات و عملیات هیدرومتالورژیکی برای استخراج اورانیوم از کانی‌ها آغاز می‌شود. ذخایری با عیار ۱٪ به عنوان ذخایر بسیار غنی‌شده محسوب گردیده، البته ذخایری با عیار ۰/۱ درصد یا کمتر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که سنگ زمینه اورانیوم ماسه‌سنگ باشد (اورانیوم نرم)، محدوده عیاری ۰/۱-۰/۲ درصد قابل قبول بوده و در مواردی که سنگ زمینه اورانیوم گرانیت باشد (اورانیوم سخت)، حد پایین عیار مورد قبول ۰/۰۲ درصد می‌باشد.



شکل (۳-۴): دستگاه آنالیز اورانیم

امروزه حدود ۵۸۲ معدن اورانیوم با ذخیره ۴۸۱۰۶۸۰ تن در رده RAR و EAR در سطح کره زمین کشف شده است. در حال حاضر ۲۴ کشور دارای معادن اورانیوم در نزد آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ثبت شده‌اند که بغیر از چین، پاکستان و هندوستان مابقی گزارش‌های رسمی منابع و معادن اورانیوم خود را ارائه می‌دهند. بزرگترین معدن اورانیوم جهان مک‌آرتور ریور نام دارد که در کانادا واقع شده، متعلق به شرکت کامکو بوده و به شیوه زیرزمینی استخراج می‌شود. از این معدن سالانه می‌تواند ۷۲۰۰ تن اورانیوم خالص استخراج کرد که ۱۷/۹ تولید اورانیوم جهان است. رنگر^۱ دومین معدن اورانیوم جهان به شمار می‌رود که در استرالیا قرار گرفته و به شرکت ای.آر.آ. تعلق دارد. این معدن به صورت روباز استخراج شده و سالانه بیش از ۴۳۰۰ تن (۱۲/۱ درصد تولید جهانی) اورانیوم تولید می‌کند. معدن مشهور «المپیک دم» سومین معدن بزرگ اورانیوم جهان است که باز هم در استرالیا قرار گرفته و متعلق به WMC است. این معدن به صورت زیرزمینی استخراج شده و سالانه بیش از ۳۷۰۰ تن (۹/۳ درصد تولید جهانی) اورانیوم خالص بدست می‌دهد. معدن شرکت روسینگ در نامیبیا نیز چهارمین معدن بزرگ جهان به شمار می‌رود. این معدن به صورت روباز استخراج می‌شود. از ده معدن بزرگ اورانیوم جهان سه معدن در استرالیا، سه معدن در کانادا، دو معدن در نیجر، یک معدن در نامیبیا و یک معدن هم در آفریقای جنوبی قرار گرفته‌اند.

1. Ranger

۳-۴- استخراج کانسنگ اورانیوم

هنگامی که معدن شناسایی شد، به روش‌های مختلفی همچون استخراج روباز از سطح زمین، استخراج زیرزمینی از معادن و بازیابی درجا (تصفیه در معدن) می‌توان اورانیوم را استخراج کرد. اگر کانی-های اورانیوم در قشرهای بیرونی زمین تا عمق ۳۰۰ متر وجود داشته باشند معدن بصورت روباز استخراج می‌گردد، اما در اعماق بین ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ متر استخراج از زیرزمین با ایجاد تونل‌ها و سیستم‌های بالابرنده برای انتقال سنگ معدن به سطح زمین انجام می‌گیرد. حفاری روزمینی نیز در مکان‌هایی به کار می‌رود که ذخیره معدنی در دسترس و سطح زمین قرار دارد. در غیر این صورت حفاری باید به طور عمقی و زیرزمینی صورت گیرد. در حفاری رو زمینی عواملی نظیر عمق باید مورد توجه قرار گیرد تا حفره‌های ایجاد شده بزرگتر از ذخیره معدنی باشد تا مانع ریزش آن شود و بر این اساس، حجم موادی که از معدن استخراج می‌شود بسیار زیاد است. خرابی‌های ناشی از حفاری‌های زیرزمینی در سطح زمین بسیار کمتر از حفاری روزمینی و میزان مواد استخراجی نیز کمتر از آن است. البته در غالب معدن‌های زیرزمینی اورانیوم، پیشگیری‌های مخصوصی که شامل افزایش تهویه هوا می‌شود، لازم است تا از پرتوافشانی جلوگیری شود.

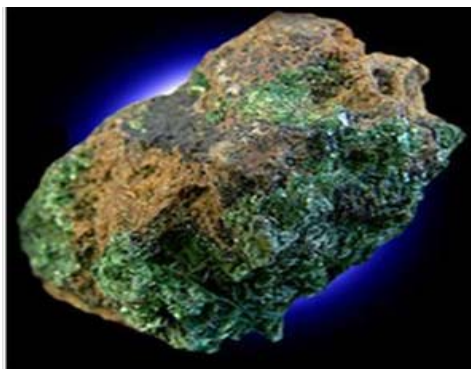


شکل (۳-۵): نمایی از استخراج اورانیوم در یک معدن

همچنین یکی از روش‌های استخراج اورانیوم، استخراج به صورت مایع است. در این روش، عملیات فروشویی در همان محل معدن با تزریق اسید یا باز از مجاری حفر شده به طرف سنگ معدن اورانیوم انجام می‌شود. این محلول‌ها به سرعت در سنگ معدن نفوذ کرده و استخراج آنها را به صورت نیمه مایع از مجاری در نظر گرفته شده امکان‌پذیر می‌سازد. این روش در صورتی کارساز است که یک قشر غیرقابل نفوذ در زیر بستر سنگ‌های معدنی وجود داشته باشد تا این کانی‌ها که به صورت نیمه مایع

درآمده‌اند خشک نشده و قابل استخراج بمانند. این روش که به روش بازیابی درجا^۱ (ISL) مشهور است، معمولاً برای توده‌های معدنی بسیار کم‌عباری به کار برده می‌شود که فرآوری آنها به روش‌های دیگر اقتصادی نباشد. مزیت اصلی این روش آن است که تنها ۱٪ از سنگ معدن توسط محلول خیس شده و استخراج می‌شود و بقیه محتوای سنگ در معدن می‌ماند. در این روش بایستی بعد از خاتمه بهره برداری از معدن و برچیدن تاسیسات، از ایمن بودن محل معدن از نظر امکان نشت و پخش مواد رادیواکتیو در خاک و آب‌های زیر زمینی مطمئن شد. به عنوان مثال رادیوم که با مواد خیس شده همراه است، باید به وسیله باریت یا کلرور باریم به صورت جامد و غیرقابل پخش درآید. همچنین حلال‌های آلی که در فرایند استخراج به کار می‌روند، باید توسط زغال فعال شده جذب شوند.

در بسیاری از مواقع نیز، اورانیوم ممکن است با مقادیر مختلف به عنوان یک محصول جانبی از معادن طلا یا فسفات بدست آید. در حال حاضر، حدود ۲۷ درصد تولید جهانی به روش روباز، ۴۰ درصد به صورت زیرزمینی، ۲۱ درصد به صورت ISL و ۱۲ درصد به عنوان محصول جانبی استخراج شده است. البته می‌توان اورانیوم را از آب دریا نیز بازیافت کرد. هرچند غلظت اورانیوم در آب دریا از حدود ۳ تا ۵ میلی‌گرم در مترمکعب فراتر نمی‌رود، اما کل مقدار تخمینی آن در آب‌های آزاد $4/5 \times 10^9$ تن است (حدود ۱۳۰۰ برابر منابع اثبات شده قطعی با هزینه استخراج کمتر از ۱۳۰ دلار بر کیلوگرم). گفتنی است دو کیلومتر مربع آب دریا دربرگیرنده اورانیوم کافی بمنظور تأمین یک تن خوراک یک راکتور می‌باشد. اورانیوم موجود در آب دریا می‌تواند به روش‌های مختلفی همچون جذب با زغال فعال مورد بازیابی قرار گیرد. حذف مرحله انحلال و نامحدود بودن منبع اولیه به عنوان مزایای اصلی این روش، توجه تولید کنندگان اورانیوم را از دهه ۱۹۶۰ به خود جذب کرده و مطالعات متعددی در این زمینه در حال انجام است.



شکل (۳-۶): سنگ معدن اورانیومی با سطح پرتوافکنی مافوق

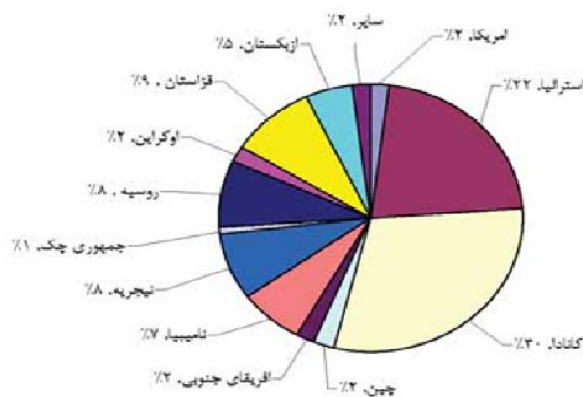
تکنولوژی استخراج اورانیوم و قیمت جهانی آن اهمیت فراوانی در استخراج و عرضه آن پیدا کرده است. ضروری است توجه شود که هزینه تولید ۱۳۰ دلار آمریکا برای هر کیلو اورانیوم زیاد محسوب و منابع با هزینه تولید کمتر که عبارت از ۸۰ دلار و ۴۰ دلار در هر کیلو هستند بسیار باصرفه‌تر هستند. برابر اطلاعات موجود، علیرغم وجود مقادیر قابل توجه این فلز در نقاط مختلف، تعدادی از کشورهای تولید کننده بدلیل هزینه بالای استخراج و همچنین عدم برخورداری از تکنولوژی پیشرفته در امر استخراج مراکز اکتشاف خود را تعطیل کرده اند و هم اکنون بدلائل فنی، مالی و مدیریتی عملا استخراج و عرضه اورانیوم جهت مقاصد تجاری در دست ممالک صنعتی بزرگ قرار دارند. همچنین بایستی متذکر شد که عیار اورانیوم نقش بسیار مهمی در شیوه استخراج ایفا می‌کند، چرا که انرژی لازم برای استخراج اورانیوم کاملا به آن وابسته است. برای عیارهای کمتر از ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ درصد، این انرژی در کل چرخه تولید شدیداً بالا می‌رود تا جایی که در بیشتر شرایط صنعتی موجود، از انرژی خروجی راکتور هسته‌ای پیشی می‌گیرد. در حال حاضر، تنها کشور کانادا دارای منابع معدنی با عیار بالاتر از یک درصد است. عیار بیشتر ذخایر باقی‌مانده در دیگر کشورها کمتر از ۰/۱ درصد و عیار دوسوم کل ذخایر جهان، کمتر از ۰/۰۶ درصد است. طبق ارزیابی‌های کارشناسان، حجم کل اورانیوم استخراج شده در جهان طی سال ۲۰۰۷ بیش از ۴۱ هزار تن بوده و بیش از ۹۰ درصد اورانیوم جهان را هشت کشور کانادا، استرالیا، قزاقستان، روسیه، نامیبیا، نیجریه، ازبکستان و آمریکا تولید کرده‌اند. امروزه حدود ۵۰٪ تولید جهانی از معادن نزدیک به سطح زمین (کم‌هزینه) و ۳۲٪ از معادن واقع در عمق زمین (پرهزینه) تامین می‌شود.



شکل (۳-۷): سنگ معدن توده‌ای؛ جعبه‌های ۵ پوندی از سنگ معدن اورانیوم

براساس اطلاعات منتشر شده از سوی مرکز اطلاعات اورانیوم که یک مرکز تحقیقاتی بین‌المللی است بیش از نیمی از تولید جهانی اورانیوم از معادن واقع در کانادا و استرالیا تامین می‌شود. کانادا بزرگترین تولیدکننده اورانیوم جهان بوده و ۲۹ درصد اورانیوم تولیدی جهان در این کشور تولید می‌شود. پس از کانادا، استرالیا با تولید سالانه ۲۱ درصد نیاز جهان در رده دوم قرار دارد. امروزه ۸۲ درصد اورانیوم جهان

توسط هشت شرکت معدنی عمده استخراج می‌شود. بزرگترین شرکت تولیدکننده اورانیوم در جهان کامکو^۱ نام دارد. کامکو یک شرکت چند ملیتی بوده و عمده سهامداران آن کانادایی و آمریکایی هستند. دومین تولیدکننده بزرگ اورانیوم جهان، کوگما^۲ نام دارد که متعلق به کانادا می‌باشد. ای.آر.آ (ERA) یا شرکت منابع انرژی استرالیا سومین تولیدکننده اورانیوم جهان به شمار می‌رود. کازاتم‌پروم^۳ یا شرکت ملی اتمی قزاقستان، چهارمین تولیدکننده بزرگ اورانیوم در جهان است. شرکت معدن غرب^۴ WMC پنجمین تولیدکننده بزرگ اورانیوم جهان است که متعلق به استرالیا می‌باشد. ششمین تولیدکننده اورانیوم جهان روسینگ^۵ است که ۱۵ درصد سهامش متعلق به دولت جمهوری اسلامی ایران است. مهمترین معدن اورانیوم این شرکت در نامیبیا در جنوب غربی آفریقا واقع شده است. ۶۹ درصد سهام روسینگ نیز به شرکت بزرگ معدنی ریوتینتو تعلق دارد. پریارگونسکی^۶ هفتمین تولیدکننده اورانیوم جهان است. این شرکت بزرگترین تولیدکننده اورانیوم روسیه به شمار می‌رود. هشتمین تولیدکننده بزرگ اورانیوم جهان، ناووی^۷ نام دارد. ناووی شرکتی ازبکستانی است که در زمان شوروی سابق تاسیس شده است.



شکل (۳-۸): مهمترین تولید کنندگان کنونی اورانیوم در جهان

۳-۵- آسیاب کردن کانسنگ برای تولید کنسانتره اورانیوم

محصول این مرحله از چرخه سوخت هسته‌ای، معمولاً به صورت کیک زرد یا دی اورانات اورانیوم با ۸۰ تا ۹۰ درصد اورانیوم می‌باشد. پس از استخراج ماده معدنی اورانیوم، باید در نزدیکی محل استخراج،

1. Cameco
2. Cogema
3. KazAtomProm
4. Western mining corporation
5. Rossing
6. Priargunsky
7. Navoi

امکاناتی برای استقرار محل آسیاب کردن در نظر گرفته شود. در آسیابها تکه سنگ‌های اورانیوم خوب خرد می‌شوند. در گام اول، توده‌هایی از ماده معدنی که حدود ۱ متر قطر دارند، از سنگ‌شکن فکی یا ژیراتوری با توان ۲۵۰-۳۵۰ کیلووات عبور داده می‌شوند. در نتیجه ماده معدنی به قطعاتی به قطر حدود ۲۰۰ میلیمتر تبدیل می‌شوند. سنگ شکنهای مخروطی با توان ۳۰-۴۰ کیلووات در مرحله بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این میزان کاهش اندازه دانه برای بیشتر کانه‌هایی مناسب است که تحت فرایند اسید سولفوریک قرار می‌گیرند. آسیا کردن این دانه‌ها و تبدیل آنها به ابعاد ریزتر فقط در مورد فرآوری قلیایی مورد نیاز است. در اینجا، آسیاهای مشبک و استوانه‌ای را بطور سری بکار می‌برند تا اندازه دانه‌های کانه را به حدود ۰/۵ میلی‌متر برسانند. پس از آن برای جداسازی اورانیم و بالابردن خلوص خاک سنگ (سنگ شویی)، کانه‌های اسیدی و فسفاتی اورانیوم را در حمامی از اسید سولفوریک، آلکالین و یا پراکسید می‌خوابانند. البته در فرآیند سنگ شویی کانه‌های قلیایی، بجای اسید سولفوریک از محلول‌های قلیایی همچون محلول آبگون دارای کربنات و بی‌کربنات سدیم استفاده می‌شود (در فرآوری قلیایی، باید کانه را خردتر و دانه ریزتر کرد. در ضمن بایستی توجه داشت، فروشویی قلیایی از فروشویی اسیدی کندتر انجام می‌گیرند).



شکل (۳-۹): اکسید اورانیوم

پس از آن، طی فرآیند شیمیایی خاصی، اکسید اورانیوم موجود در پودر اورانیوم (در حالت کانه‌های اسیدی و فسفاتی) با اسید سولفوریک ترکیب شده و اسید اورانیوم را حل کرده و آن را از زوائدی که در سنگ معدن وجود دارد جدا کرده و نهایتاً تبدیل به سولفات اورانیل می‌شود. به این سولفات اورانیل، حلال‌های مخصوصی اضافه می‌کنند تا به کمک داد و ستد یونی یا استحصال حلال، اورانیوم از حلال بازیافت شود. این مرحله را محلول سازی می‌نامند که مهمترین فرآیند تغلیظ اورانیم می‌باشد. بعد از

تصفیه و خشک کردن محلول غنی شده اورانیوم (و ته نشینی یا رسوب دادن از محلول اسیدی با آمونیاک یا $Mg(OH)_2$ و یا با ته نشینی از یک محلول قلیایی با $NaOH$)، سرانجام کنسانتره جامد اورانیوم یا اصطلاحاً کیک زرد^۱ تولید شده و در استوانه‌های ۲۰۰ لیتری بسته‌بندی می‌شوند. باقیمانده فرآیند علاوه بر سنگ معدن، دارای مواد رادیواکتیو با عمری طولانی بوده و غلظت آنها کم خاصیتی سمی دارند در محلی معین به دور از محیط معدن در امکانات مهندسی نگهداری می‌شود. هرچند مقدار کلی عناصر پرتوزا کمتر از سنگ معدن اصلی است و نیمه عمر آنها کوتاه خواهد بود اما این مواد باید از محیط زیست دور بمانند.



شکل (۳-۱۰): کیک زرد

بنابراین کیک زرد که به نام اورانیا^۲ نیز شناخته می‌شود، عمدتاً شامل ۷۰ تا ۹۰ درصد اکسیدهای اورانیوم با فرمول شیمیایی کلی U_3O_8 است. هیدراکسید اورانیوم با فرمول شیمیایی $UO_2(OH)_2$ یا $(UO_2)_2(OH)_2$ ، سولفات اورانیوم با فرمول شیمیایی UO_2SO_4 ، اکسید اورانیوم زرد یا اورانیت سدیم با فرمول شیمیایی $Na_2O \cdot (UO_3)_2 \cdot 6H_2O$ و پراکسید اورانیوم با فرمول شیمیایی $UO_4 \cdot nH_2O$ بقیه اجزای کیک زرد را تشکیل می‌دهند. این محصول نهایی، یک پودر خشن اکسید شده است که گاهی اوقات رنگ زردی دارد و نام این عنصر نیز به دلیل رنگ و شکل آن در هنگام تولید می‌باشد. امروزه روش‌های جدیدی برای تهیه این پودر اورانیوم وجود دارد که محصول آنها بیش از آن که زرد باشد به قهوه‌ای و سیاه نزدیک است. در واقع رنگ ماده به دست آمده به نوع و میزان ناخالصی‌ها در این پودر بستگی دارد. این پودر در دمایی معادل ۲۸۷۸ درجه سانتیگراد ذوب می‌شود. لازم به ذکر است که دیورانات آمونیوم، محصول جانبی تولید کیک زرد می‌باشد که رنگ آن زرد درخشان می‌باشد که گاهی

1. Yellow Cake
2. Urania

اوقات باعث اشتباه شده و کیک زرد نامیده می‌شود؛ اما این، نام درست این محصول نمی‌باشد. این ماده همچنین دارای خواص پرتوزایی بالایی می‌باشد. در حالت کلی، کیک زرد را می‌توان ترکیب پرعیار اورانیوم قابل عرضه به بازار محسوب کرد. یکی از کاربردهای کیک زرد، تهیه هگزا فلوراید اورانیوم است.

۳-۶- تبدیل کیک زرد به هگزا فلوراید اورانیوم^۱

آنچه در مرحله فرآوری سنگ معدن اورانیوم و کانه آرای می‌شود، تولید دی اورانات آمونیوم (ADU) یا دی اورانات سدیم است که نهایتاً به تولید U_3O_8 منجر می‌گردد؛ اما آنچه که در مرحله تبدیل و غنی سازی اورانیوم انجام می‌شود، وابسته به نوع سوخت هسته ای مورد نظر است. به هر حال، آنچه در مرحله تبدیل اورانیوم مدنظر است، یا تبدیل U_3O_8 به ترکیباتی همچون UO_2 ، U و در برخی موارد UO_3 است که مستقیماً به مرحله تولید سوخت هسته‌ای می‌روند و یا تبدیل آن به UF_6 برای مرحله غنی سازی است که منجر به تولید UF_6^* غنی شده می‌شود. UF_6^* نیز پس از طی فعل و انفعالاتی به UO_2^* یا U^* تبدیل شده و آماده برای تولید سوخت هسته‌ای می‌گردند. بنابراین، نتیجه مرحله تبدیل و غنی سازی اورانیوم تولید UO_3 ، UO_2 ، U و UF_6 است که اورانیوم موجود در آنها، بسته به نوع سوخت هسته ای موردنظر، طبیعی و یا غنی شده خواهد بود. برای راکتورهای با سوخت دی اکسید اورانیوم غنی شده (UO_2) (اغلب راکتورهای هسته‌ای جهان)، این مرحله به صورت تبدیل کنسانتره اورانیوم (کیک زرد) یا U_3O_8 به هگزا فلورید اورانیوم (UF_6) خواهد بود که از طریق تبدیل اورانیوم به ترکیب گازی مناسب جهت غنی سازی اورانیوم صورت می‌گیرد. بایستی توجه داشت که هدف پایه‌ای دانشمندان هسته‌ای از فرآیند غنی سازی، افزایش میزان اتم‌های اورانیوم ۲۳۵ است؛ اما تکنولوژی مورد استفاده در مرحله غنی سازی به گونه‌ای طراحی شده است که نیازمند حالت گازی اورانیوم است؛ اما خوراک کیک زرد حاصل از مرحله قبل به صورت جامد بوده و بایستی با گرم شدن تا دمای ۶۴ درجه سانتیگراد و طی فرآیندی شیمیایی به هگزا فلوراید اورانیوم تبدیل می‌شود. این محصول در دمای اتاق به صورت جامد سفید رنگ بوده؛ ولی در دمای بالای نه چندان بالای ۵۶ درجه سانتیگراد بخار می‌شود.



شکل (۳-۱۱): هگزا فلورید اورانیوم

گاز هگزا فلورید اورانیوم (UF_6)، ترکیب اورانیومی است که برای هر دو فرآیند غنی‌سازی به صورت دیفیوژن (پخش) گازی^۱ و سانتریفوژ گازی^۲ استفاده می‌شود و در صنعت، با نام ساده Hex خوانده می‌گردد. استفاده از UF_6 برای عملیات غنی‌سازی دو علت دارد. اولاً دمای تصعید این ماده حدود ۵۶/۶ درجه سانتیگراد می‌باشد. بنابراین به راحتی به حالت گازی درآمده و از پایداری خوبی در این شرایط برخوردار است. لذا می‌توان گفت که ترکیب UF_6 پایدارترین ترکیب اورانیوم فرار را تشکیل می‌دهد. ثانیاً از آنجایی که در طبیعت، عنصر فلوئور تنها به صورت F_{19} می‌باشد، لذا فرآیند غنی‌سازی تنها متاثر از اختلاف جرم U^{235} و U^{238} بوده و به فلوئور بستگی ندارد. این علل باعث شده که عملاً ماده UF_6 برای غنی‌سازی اورانیوم به روش‌های پخش گازی و سانتریفوژ گازی مورد استفاده قرار گیرد و بدین لحاظ، مرحله تبدیل اورانیوم شامل تهیه این ترکیب است. تبدیل U_3O_8 به UF_6 مراحل مختلفی دارد. اگرچه فرآیندهای گوناگونی برای این منظور وجود دارد؛ اما یک راهکار نوعی، استخراج محصول با خلوص بالای اورانیوم، توسط تری‌بوتیل فسفات (TBP) از محلول HNO_3 است. ابتدا کیک زرد در اسید نیتریک یا مخلوطی از اسید نیتریک و اسید سولفوریک حل شده و به محلول آبی نترات اورانیل ($UO_2(NO_3)_2$) تبدیل می‌گردد. بعد از تنظیم غلظت و اسیدیته آن، نترات اورانیل توسط محلول ۳۰ درصدی تری‌بوتیل فسفات (TBP) محلول در کروزن یا هگزان استخراج می‌گردد. کمپلکس $UO_2(NO_3)_2(TBP)_2$ محلول در فاز آلی بوده و با تکرار عملیات فوق می‌توان تمامی اورانیوم موجود را با خلوص بالا از فاز آبی به فاز آلی برد. پس از استخراج اورانیوم در یک فاز آلی می‌توان مجدداً اورانیوم را به فاز آبی منتقل نمود تا واکنشهای مورد نظر بدون حضور ناخالصی‌ها در این فاز انجام گیرد.

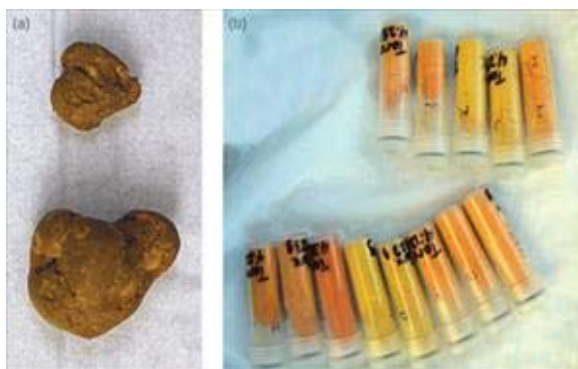
1. Gaseous Diffusion
2. Centrifuge

پس از اتمام استخراج، محلول نیترات اورانیل خالص بوسیله تبخیر کننده ها تا غلظت موردنظر تغلیظ می‌شود. با ادامه تغلیظ محلول نیترات اورانیل، ترکیب نیترات اورانیل هگزا هیدرات $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ بدست می آید. این ماده را با روشهایی می‌توان به UO_3 تبدیل نمود. برای تولید UO_2 ، طبیعتاً باید UO_3 را احیا نمود. بدین منظور، UO_3 را در راکتور بستر سیال یا کوره دوار تحت اتمسفر احیا کننده هیدروژن و با دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد تا ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده تا UO_2 بدست آید. بدین ترتیب UO_2 و UO_3 که از مهمترین ترکیبات بدست آمده در مرحله تبدیل اورانیوم هستند، حاصل می‌شوند. از دیگر مواد بدست آمده در این مرحله، اورانیوم فلزی است. فلز اورانیوم را می‌توان از طریق احیاء اکسیدهای اورانیوم UO_2 و UO_3 که در طی فرآوری شیمیایی کیک زرد در مرحله تبدیل اورانیوم بدست آمده اند تهیه کرد. چنانچه غنی سازی مطرح نباشد UO_2 و UO_3 ترکیباتی هستند که نتیجه نهایی مرحله تبدیل اورانیوم بوده و مستقیماً به مرحله تهیه سوخت هسته‌ای می‌روند. چنانچه غنی سازی اورانیوم مدنظر قرار گیرد، مرحله تبدیل اورانیوم شامل تهیه UF_4 و UF_6 خواهد بود. برای این منظور، UO_2 در ابتدا با هیدروفلوریناسیون به UF_4 (تترا فلوروئید اورانیوم یا نمک سبز) و سپس با فلوریناسیون به UF_6 تبدیل می‌شود. اما UF_6 خشک که اینگونه حاصل آمده است را باید با تقطیر خالص کرد. بایستی توجه داشت که هگزافلوروئید اورانیوم، بسیار خورنده و دارای خواص پرتوایی بالایی بوده و باید با دقت جابه‌جا شود. لوله‌ها و پمپ‌ها در کارخانه‌های تبدیل کننده، به صورت ویژه‌ای از آلیاژ آلومینیوم و نیکل ساخته می‌شوند. گاز تولیدی همچنین، باید از نفت، روغن و مواد چرب کننده دیگر، به جهت جلوگیری از واکنش‌های ناخواسته شیمیایی دور نگه داشته شود. نهایتاً اینکه، در فشار زیاد این ترکیب به راحتی به بیرون از منبع نشت می‌نماید و لذا سبب بروز حوادث غیرمترقبه هسته‌ای خواهد شد.

۳-۷- غنی سازی اورانیوم^۱

در بین ایزوتوپ‌های اورانیوم تنها ایزوتوپ ۲۳۵ شکست‌پذیر است که به آن ایزوتوپ شکافت نیز می‌گویند، اما این ایزوتوپ فقط ۰/۷ درصد سنگ معدن اورانیوم طبیعی را به خود اختصاص داده و ۹۹/۳ درصد مابقی از نوع ایزوتوپ غیرقابل شکست اورانیوم ۲۳۸ است. در برخی راکتورها از نوع آب سنگین و تحت فشار و نیز گرافیتی که با گاز خنک می‌شوند، تنها بکارگیری همان اورانیوم طبیعی که شامل ۰/۷ درصد U^{235} است، کفایت خواهد کرد؛ اما ۸۵ درصد نیروگاه‌های قدرت از نوع راکتورهای آب سبک، راکتورهای پیشرفته خنک شونده با گاز و راکتورهای نوع چرنوبیل (RBMK) می‌باشد که مقدار غنای اورانیوم در سوخت مصرفی آنها حدود ۲-۴ درصد جرمی است. در این حالت، طبیعی خواهد بود که غنی

سازی اورانیوم از مهمترین مراحل تهیه سوخت هسته‌ای باشد. فرآیند غنی سازی شامل جداسازی ایزوتوپ U^{235} و U^{238} است؛ به نحوی که غلظت U^{235} در محصول بیش از غلظت آن در اورانیوم طبیعی شود. در این راستا، برای آن که UF_6 به دست آمده در مرحله تبدیل، به عنوان سوخت هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد، باید ایزوتوپ قابل شکافت آن را غنی کرده و در نهایت به اورانیوم هگزا فلورید غنی شده دست یافت. البته سطح غنی سازی، بسته به کاربرد سوخت هسته‌ای متفاوت است.



شکل (۳-۱۲): نمونه‌های سنگ معدن اورانیوم و اورانیوم غنی شده

در راکتورهای هسته‌ای، دستیابی به شرایط بحرانی مستلزم کاربرد اورانیوم غنی شده طور متوسط ۲ تا ۳ درصد است. اما اورانیوم مورد نیاز در تسلیحات اتمی اورانیوم با غنای بیش از ۹۰ درصد خواهد بود. تاسیساتی که عملیات غنی سازی سوخت اورانیوم را انجام می‌دهند تاسیسات تغلیظ اورانیوم یا UCF نام دارد. بایستی توجه داشت، پس از غنی‌سازی، هگزا فلورید اورانیوم را با آب و هیدروژن ترکیب کرده و آن را دوباره به UO_2 تبدیل می‌کنند که در نهایت این محصول UO_2 پرس شده و به صورت قرص درآمده و از اجتماع آنها، میله‌های سوخت تولید می‌گردد. از اجتماع این میله‌ها در کنار همدیگر نیز، زیرمجموعه‌ها یا مجتمع‌های سوخت به وجود می‌آید. لازم به ذکر است، اورانیوم غنی شده را Tuballoy و اورانیوم طبیعی را Oralloy نیز می‌نامند. بایستی توجه داشت که بخاطر ماهیت خوردگی UF_6 ، تمام اجزایی که در تماس با این ماده هستند باید از مواد مقاوم در برابر خوردگی ساخته شوند. امروزه، روش‌های مختلفی همچون پخش گازی^۱، سانتریفوژ گازی، جداسازی الکترومغناطیسی، تبادل شیمیایی^۲، فتوونیواسیون و فتودیاسیون لیزری، نازل جداسازی^۳ (آبرودینامیکی نازل) و جداسازی ایزوتوپ رزونانس سیکلوترونی برای غنی سازی اورانیوم ایجاد شده‌اند. البته برخی از این روش‌ها در حال حاضر کاربرد عملی و صنعتی نداشته

1. Gaseous Diffusion
2. Chemical Exchange
3. Separation Nazzle

و تنها اهمیت تاریخی پیدا کرده‌اند و برخی نیز به طور محدود بکار گرفته شده و یا فرآیندهای آزمایشگاهی هستند و در مقیاس صنعتی به کار گرفته نمی‌شوند.

جدول (۳-۳): ظرفیت انواع روش‌های غنی سازی اورانیوم در کشورهای مختلف جهان (1000 kg SWU/yr)

کشور	روش غنی سازی	ظرفیت تولید
فرانسه	پخش گازی	۱۰۸۰۰
آلمان، هلند و بریتانیا	سانتریفوژ گازی	۵۸۵۰
ژاپن	سانتریفوژ گازی	۹۰۰
آمریکا	پخش گازی	۸۰۰۰
روسیه	سانتریفوژ گازی	۲۰۰۰۰
چین	بیشتر سانتریفوژ گازی	۱۳۰۰-۱۰۰۰
پاکستان	سانتریفوژ گازی	۵
مجموع	-	۴۷۰۰۰

از بین تمامی این روش‌ها، تنها پخش گازی و سانتریفوژ گازی است که در مقیاس های بزرگ تجاری اهمیت داشته و کاربردهای عملی وسیع پیدا کرده‌اند. هر دوی این روش‌ها بر مبنای جدا سازی ایزوتوپی کار کرده و از خواص فیزیکی مولکولی، مخصوصا با ۱۰ درصد اختلاف جرم برای جداسازی ایزوتوپ‌ها استفاده می‌کنند. بایستی توجه داشت که در این دو روش غنی سازی، مقدار زیادی انرژی برای پمپ کردن گاز از مراحل بسیار زیاد غشاها و نیز برای راندن دستگاه‌های مرکز گریز لازم است، البته انرژی لازم در فرآیند مرکز گریز، حدود یک دهم مقدار انرژی لازم در فرآیند پخش همان مقدار محصول است و این امر، منجر به قیمت کمتر اورانیوم غنی شده در فرآیند مرکز گریز می‌شود که اکنون روش غنی سازی مبتنی بر پخش گازی را تا حد زیادی کنار زده است. در حال حاضر، تحقیقات وسیعی نیز در برخی کشورهای پیشرفته مثل آمریکا، فرانسه و ژاپن در زمینه جداسازی ایزوتوپ بخار اتمی^۱ در جریان می‌باشد و به نظر می‌رسد که این فرآیند از هزینه پایین‌تری نسبت به دو فرآیند مطرح پخش گازی و سانتریفوژ گازی برخوردار است. نتیجه عمل غنی سازی به هر کدام از روش‌ها، تولید اورانیوم با غنای بیشتری از U^{235} به صورت ترکیب UF_6 می‌باشد. مرسوم است که برای کار جداسازی جهت غنی سازی از واحد SWU که دارای دیمانسیون جرم است و با وزن ماده غنی شده، ماده اولیه، تفاله و درجه غنای هریک ارتباط دارد، استفاده می‌کنند. غنی سازی اورانیوم برای اولین بار در اواسط دهه ۱۹۴۰ میلادی در آمریکا به روش پخش گازی انجام شد.

1. Atomic Vapor Laser Isotope Separations (AVLIS)

جدول (۳-۴): ظرفیت غنی‌سازی اورانیوم در کشورهای جهان (KSEU/a)

وضعیت	در دست بهره برداری	بهره برداری در آینده	بسته شده
آرژانتین	۲۰	-	-
بزریل	-	۵۰۰	-
فرانسه	۱۰۸۱۰	۱۰۰	-
آلمان	۶۰۰	-	۵۰
ژاپن	۸۷۵	-	۲
هلند	۱۵۰۰	-	-
پاکستان	۵	-	-
روسیه	۱۵۰۰۰	-	-
آفریقای جنوبی	-	۳۰	۳۱۰
انگلستان	۱۲۰۰	۷۰۰	۳۵۰
آمریکا	۱۹۲۰۰	-	۸۵۰۰
کل	۴۹۲۱۰	۱۳۳۰	۹۲۱۲

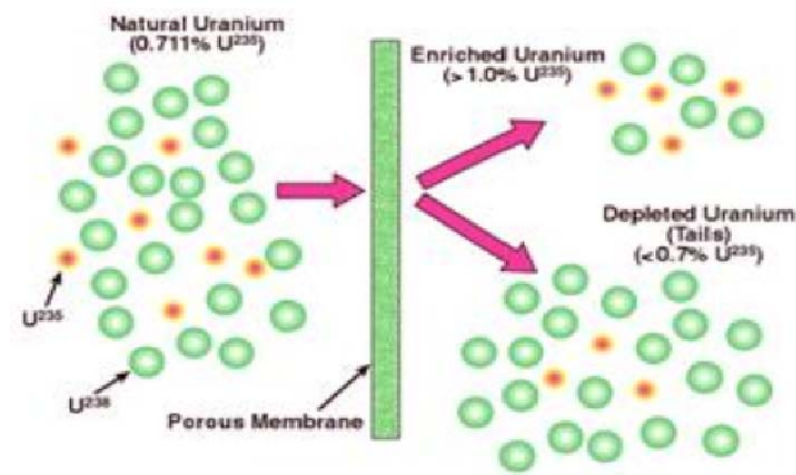
۳-۷-۱- غنی‌سازی اورانیوم با دیفوزیون یا پخش گازی^۱

در این روش، محفظه‌ای با مخلوطی از گازها پر شده و با محیط در حال تعادل گرمایی است. در این محفظه انرژی جنبشی تمام مولکول‌های گاز موجود در محفظه مساوی، ولی سرعت مولکول‌های سبکتر بیشتر از مولکول‌های سنگین‌تر است. در نتیجه مولکول‌های سبک بیشتر از مولکول‌های سنگین به جداره محفظه برخورد می‌کنند. مبنای فیزیکی فرآیند پخش گازی بر پایه این حقیقت است که سرعت عبور مولکول‌ها از یک جدار منفذدار با جرم ذرات عبوری متناسب بوده و مولکول‌های سبک با سرعت کمی بیشتر از مولکول‌های سنگین از جدار نفوذپذیر می‌گذرند. این مسئله اساس قانون Knudsen را تشکیل می‌دهد که بر اساس آن، آهنگ پخش هریک از ایزوتوپ‌ها از جدار نفوذپذیر بصورت معکوس با توان دوم جرم مولکولی متناسب است. البته این در حالتی است که مولکول‌ها تنها به جدار منفذها برخورد کنند؛ چرا که اگر مولکول‌ها با یکدیگر برخورد داشته باشند، بازده جداسازی کم می‌شود. شرط افزایش بازده آن است که قطر منفذها از مسافت آزاد متوسط بیشتر نباشد، به گونه‌ای که مولکول‌ها بتوانند تک تک از آن عبور کرده و جریان توده‌ای گاز امکان‌پذیر نباشد. بر این اساس، در فرآیند پخش گازی، گاز هگزا فلورید اورانیوم را وامی‌دارند تا در اثر اختلاف فشار در دو سوی جدار موردنظر، با فشار بالا از یک رشته غشاهای متخلخل عبور کند. این غشاهای نیمه تراوا به صورت ستون‌هایی هستند که جداره‌های

1. Gaseous Diffusion Method

آن از اجسام متخلخل تشکیل شده‌اند.

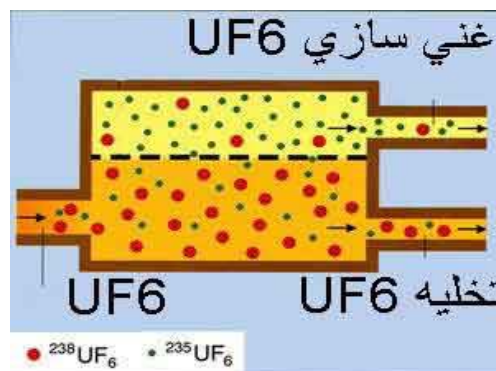
غشاء مورد نظر معمولاً از آلیاژ Ag/Zn یا ورقه آلومینیم و به‌طور مثال همراه با 10^6 در هر سانتیمتر ساخته می‌شود. سوراخ‌های موجود در جسم متخلخل باید قدری بیشتر از شعاع اتمی یعنی در حدود $2/5$ آنگسترم (25×10^{-7} سانتیمتر) باشد. بدین منظور، از آنجایی که در فشار یک اتمسفر و حرارت 20 درجه سانتیگراد، مسافت آزاد طی شده بر اساس اطلاعات ویسکوزیته 20 nm است، لذا باید قطر منافذها برای بازده قابل قبول کارخانه کمتر از این مقدار باشد. در عمل، قطر منافذها از 10 nm تجاوز نمی‌کند. در این حالت، ضریب جداسازی متناسب با اختلاف جرم مولکول‌ها گردیده و اتم‌های سبکتر $\text{UF}_6^{(235)}$ با سرعت بیشتری نسبت به $\text{UF}_6^{(238)}$ از منافذ عبور کرده و گازی که از منافذ عبور می‌کند بیشتر دارای مولکول‌های سبک خواهد بود تا مولکول‌های سنگین و این باعث جدایی تدریجی آنها می‌شود. به این ترتیب، در گاز عبوری از غشاء، غنی‌شدگی اندکی به وقوع می‌پیوندد. این فرآیند به دفعات زیاد بصورت پشت سر هم که آبشار نامیده می‌شود انجام می‌گیرد. در این زنجیره، هر مرحله به‌صورت یک سری با مرحله دیگر در تماس بوده و اورانیوم پس از عبور از هر مرحله بر میزان غنی‌شدگی آن افزوده می‌گردد. تقریباً هر دوازده مرحله، واحد بزرگتری مرسوم به سلول^۱ را تشکیل می‌دهند و به همین ترتیب، چندین سلول یک مجموعه تاسیسات پخش گازی (GDP)^۲ را می‌سازند. در این روش، غنای سوخت مورد احتیاج برای رآکتورهای نیروگاه‌های قدرت در 20 مرحله حاصل می‌شود، اما به علت ظرفیت پایین هر کدام از این دستگاه‌ها، در هر مرحله تعداد زیادی از این دستگاه‌ها به صورت موازی به یکدیگر متصل می‌شوند.



شکل (۳-۱۳): غنی‌سازی اورانیوم به روش انتشار گازی

1. Cell
2. Gaseous Diffusion Plant

در جنگ جهانی دوم این فرآیند برای تهیه اورانیوم بسیار غنی از ایزوتوپ ^{235}U جهت مصارف نظامی، توسعه قابل توجهی یافت. اما جداسازی ایزوتوپ‌های سبک در هر مرحله به دلیل اختلاف جرم کم ^{235}U و ^{238}U بسیار کم بوده و به لحاظ تئوری فاکتور جداسازی تنها برابر با ۱/۰۰۴۳ می‌باشد. لذا برای رسیدن به سطح غنی‌سازی مطلوب، مراحل بسیاری مورد نیاز بوده و باید این فرآیند را به دفعات زیادی تکرار کرد. این امر نیازمند امکانات زیاد و مصرف بالای انرژی الکتریکی بوده و هزینه عملیات را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. به‌طور مثال، برای غنی‌سازی اورانیوم طبیعی از ۰/۷ درصد ^{235}U به ۴ درصد، بیش از ۱۰۰۰ مرحله جداسازی مورد نیاز می‌باشد. همچنین برای تهیه و تغلیظ اورانیوم تا حد ۵ درصد، حداقل ۲۰۰۰ برج از اجسام خلل و فرج‌دار با ابعاد نسبتاً بزرگ و پی‌درپی لازم است تا نسبت ایزوتوپ‌ها از برجی به برج دیگر، به مقدار ۰/۰۱ درصد تغییر پیدا کند. در نهایت، موقعی که نسبت ^{235}U به ^{238}U به ۵ درصد رسید، باید برای تخلیص کامل از سانتریفوژهای بسیار قوی استفاده نمود. از طرف دیگر، از آنجایی که عبور مولکول‌ها از منفذها به فشار گاز بستگی زیاد دارد، لذا باید فشار گاز را در هر مرحله بوسیله کمپرسور افزایش داد و از طرف دیگر، از آن جایی که کمپرسور گاز را بیش از حد لازم گرم می‌کند، گرمای ناشی از کمپرسورها را می‌بایست با مبدل‌های حرارتی خنک نمود. تمامی این مجموعه باعث می‌شود که تاسیسات پخش گازی (GDP) از حجم بزرگی برخوردار بوده و مقادیر معتابهی انرژی مصرف نمایند و بدین لحاظ، این روش شامل هزینه‌های هنگفتی خواهد بود. لذا در طی چند دهه اخیر، برخی کشورها برای غنی‌سازی اورانیوم در اشل صنعتی به روش‌های دیگری متوسل شده‌اند.

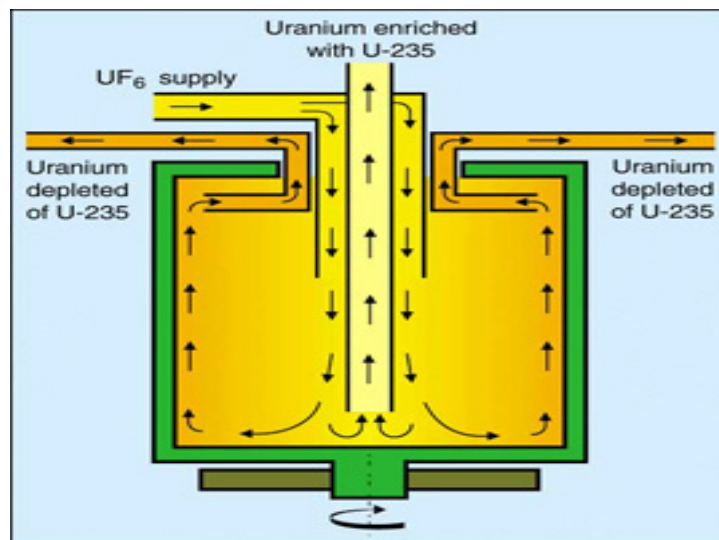


شکل (۳-۱۴): نمایی دیگر از غنی‌سازی اورانیوم به روش انتشار گازی

۳-۷-۲- غنی‌سازی اورانیوم با سانتریفوژ گازی^۱

فرآیند سانتریفوژ گازی که اخیراً در مقیاس تجارتي گسترش یافته است، شامل دستگاه‌های سانتریفوژ

سریع برای جداسازی $^{235}\text{UF}_6$ از $^{238}\text{UF}_6$ است. این روش غنی سازی حدوداً ۵۰ سال پیش توسط فردی به نام زیپر آلمانی طراحی شد. ابتدا سانتریفوژ با جریان همسو^۱ طراحی و مورد استفاده قرار می‌گرفت که به علت پایین بودن فشار در نزدیک محور مرکزی (خارج کردن مولکول‌های سبکتر با اشکال مواجه می‌شد) و نیز بازده ناچیز جداسازی، و با طراحی سانتریفوژ با جریان مخالف^۲، استفاده از این نوع سانتریفوژها کنار گذاشته شد. سانتریفوژ با جریان مخالف از اتاقکی سیلندری شکل تشکیل شده که با سرعت بسیار زیاد حول محور خود می‌چرخد. مواد مناسب برای سانتریفوژها شامل آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیوم، فولاد ماراژین^۳ یا فیبرهای کربنی هستند. در حال حاضر، فولاد ماراژین متداول‌ترین ماده گردنه است. در این روش، گاز UF_6 از وسط محور چرخشی به مخزنهایی استوانه‌ای دستگاه تزریق شده و طی حرکت در طول محور و جداره در دو جهت مخالف، موجب ایجاد اختلاف غلظت ایزوتوپی در طول محور می‌شود. در این دستگاه‌ها فرآیند جداسازی با توان چهارم سرعت دورانی متناسب بوده و لذا برای افزایش بازدهی باید به سرعت دورانی آنها توجه خاصی مبذول گردد.

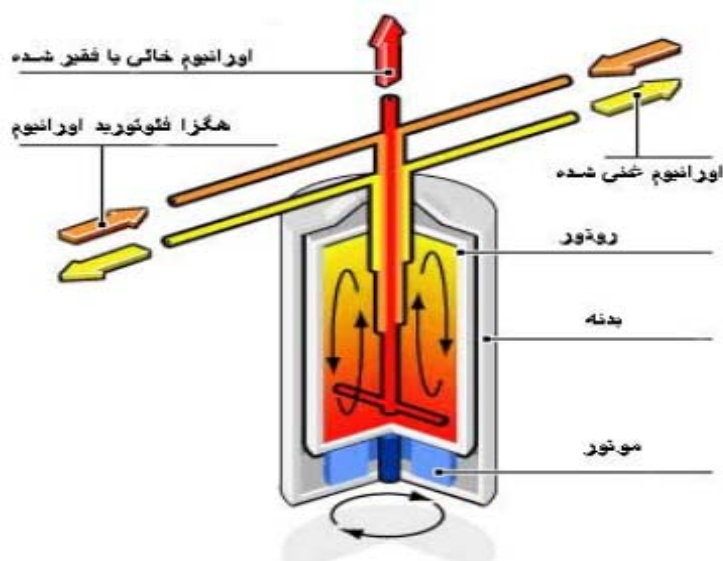


شکل (۳-۱۵): فرآیند غنی سازی اورانیوم در روش سانتریفوژ گازی

در سرعت دورانی خیلی بالا، نیروی گریز از مرکز موجب می‌شود ایزوتوپ $\text{UF}_6^{(235)}$ که اندکی از ایزوتوپ $\text{UF}_6^{(238)}$ سبک‌تر است، از مولکول سنگین‌تر جدا گشته و در نزدیک محور سانتریفوژ متراکم شوند. در ادامه، $\text{UF}_6^{(238)}$ از مرکز به سمت پائین محفظه کشیده شده و خارج می‌شوند. اتم‌های سبکتر

-
1. Concurrent
 2. Countercurrent
 3. maraging steel

$Uf_6^{(235)}$ نیز از بخش میانی محفظه جمع‌آوری و جدا می‌شود. در این سانتریفیوژها، چون فشار در در نزدیک محور مرکزی زیاد است، بنابراین برداشت ایزوتوپ سبک‌تر مشکلی ایجاد نمی‌کند. به این ترتیب، گازی که از نزدیک محور دستگاه گرفته می‌شود، از نظر مقدار ^{235}U غنی خواهد بود. در مرحله بعدی، این گاز به داخل سانتریفیوژ دیگری دمیده می‌شود تا درجه خلوص آن باز هم بالاتر رود، ضمن اینکه جریان گازی کم تهی شده نیز در مرحله پایین‌تر قبلی مجدداً بازیابی می‌شود. این فرآیند، بارها در مجموعه‌ای از مخزن‌ها و در میان زنجیری از دستگاه‌های گریز از مرکز که به صورت سری و موازی در کنار هم چیده شده‌اند، تکرار می‌شود تا اورانیوم با سطح غنی شده و درصد خلوص مطلوب (بسته به کاربرد آن) به دست آید. در این روش، غالباً سانتریفیوژ نوع زیپ^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنچه که پس از جداسازی اورانیوم ۲۳۵ باقی می‌ماند به نام اورانیوم خالی یا فقیر شده شناخته می‌شود که اساساً از اورانیوم ۲۳۸ تشکیل یافته است. اورانیوم تهی شده در وسایل هدایت خودکار، قطب نماهای ژيروسکوپی، وزنه‌های تعادل برای سطوح فرمان هواپیما، به عنوان بالاست برای وسایل ورودی موشک و نیز به عنوان مواد حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۳-۱۶): نمایی دیگر از فرآیند غنی سازی اورانیوم در روش سانتریفیوژ گازی

بنابراین، در روش سانتریفیوژ گازی نیز، برای رسیدن به غنی شدگی قابل ملاحظه، به مراحل بسیاری نیاز بوده و همانند روش پخش گازی، برای رسیدن به غنای بالا باید تعداد سانتریفیوژهای بسیار زیادی

1. Zippe-type centrifuge

بکار برد. اما این روش غنی سازی اورانیوم به دو علت از مزیت بیشتری به نسبت روش پخش گازی برخوردار می‌باشد؛ اولاً این روش از کارایی بیشتری برخوردار است، به عبارتی، میزان غنی سازی اورانیوم ۳۳۵ حاصل از یک مرحله تک واحدی سانتریفوژ گازی، بسیار بیشتر از میزان آن در یک مرحله تک واحدی غنی سازی پخش گازی است. ثانیاً انرژی لازم در این فرآیند حدود یک دهم مقدار انرژی لازم در فرآیند پخش گازی برای همان تعداد محصول می‌باشد. برای مثال، مصرف برق در این سیستم یک پنجاهم مصرف دیفیوژن گازی و حدود ۵۰ کیلووات ساعت برای یک SWU است. این عوامل باعث شده که غنی سازی اورانیوم به روش سانتریفوژ هزینه کمتری داشته و اقتصادی‌تر گردد؛ اما علیرغم این مزیت‌ها، این روش از خوردگی بالایی برخوردار بوده و به تبع آن، نگهداری از دستگاه‌ها بسیار هزینه‌بر خواهد بود. در مجموع، با اینکه روش سانتریفوژ گازی نیازمند تجهیزات گرانبه‌ای است؛ اما هزینه انرژی آن نسبت به روش قبلی کمتر است. بایستی توجه داشت، از زمان راه اندازی، یک سانتریفوژ مدرن به مدت بیش از ۱۰ سال بدون نگهداری به کار خود ادامه می‌دهد. این سانتریفوژ هنوز اهمیت خود را حفظ کرده و با به کار گرفتن مواد؛ استقامت و خواص بهتر، افزایش بازده و رقابت اقتصادی آن در سطح وسیع ممکن شده است.



شکل (۳-۱۷): شمایی از زنجیره آبشاری طبقه‌های چرخان در روش سانتریفوژ گازی

۳-۷-۳- جداسازی ایزوتوپی لیزری اورانیوم

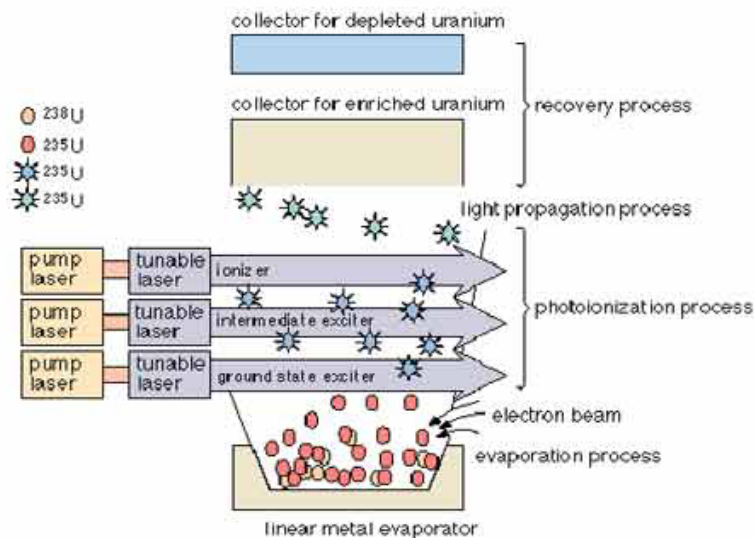
توسعه لیزر از دهه ۶۰ به بعد توجه کشورهای جهان را درباره غنی سازی با این روش جلب کرد. قابلیت تنظیم طول موج در لیزرهای رنگی، امکان استفاده از این روش برای جداسازی ایزوتوپ‌های مختلف را فراهم ساخت. اساس این فناوری، کاربرد پرتوهای لیزری برای برانگیختن گزینشی اتم‌ها یا

مولکول‌های گازی حاوی یک ایزوتوپ اورانیومی به حالت‌های یونیزه و سپس جمع‌آوری آنها در یک میدان الکتریکی است. در حال حاضر دو فرآیند مختلفی که برای جداسازی ایزوتوپی با لیزر توسعه یافته‌اند شامل جداسازی اتمی ایزوتوپ لیزری با بخار اتمی^۱ (AVLIS) در محیط بخار اورانیومی اتمی و جداسازی ایزوتوپی لیزری مولکولی^۲ (MLIS) در محیط بخار یک ترکیب اورانیومی (مولکول‌های حاوی یک ایزوتوپ اورانیومی) می‌باشند. این روش‌ها می‌توانند مواد خام بیشتری را در هر مرحله غنی کنند و سطح غنی سازی آنها نیز بالاتر است.

۳-۷-۳-۱- جداسازی ایزوتوپی لیزری بخار اتمی (AVLIS)

سیستم AVLIS از یک سیستم لیزری و یک سیستم جداساز متشکل از یک بخارساز و یک کلکتور تشکیل شده است. در این بخارساز اورانیوم متالیک ذوب و بخار می‌شود تا یک جریان بخاراتمی ایجاد شود. این جریان از کلکتور عبور کرده و در معرض تابش نور لیزری قرار می‌گیرد. سیستم لیزری AVLIS از یک سیستم لیزری متشکل از یک لیزر تشکیل شده که برای تولید نور مورد استفاده در فرایند جداسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. لیزرهای نوسانگر رنگی نیز فرکانس‌های اشعه‌ای لیزری بسیار دقیق را ایجاد می‌کنند. با عبور از یک آمپلی‌فایر لیزری، نور لیزری خارج شده از لیزر نوسانگر از نظر انرژی تقویت می‌شود. در فرایند جداسازی ایزوتوپی لیزری بخار اتمی (AVLIS)، اتم‌های U^{235} و U^{238} نورهای با فرکانس‌های مختلف (رنگ‌های مختلف) را جذب می‌کنند. هرچند فرکانس‌های جذب این دو ایزوتوپ به مقدار بسیار کم با یکدیگر تفاوت دارند، از لیزرهای رنگی در این تکنیک استفاده می‌شود، بنابراین تنها اتم‌های U^{235} نور لیزر را جذب می‌کنند. توجه داشته باشید که از مجموع سه رنگ مختلف برای یونیزه سازی اتم‌های U^{235} استفاده می‌شود. با جذب نور لیزر توسط اتم U^{235} ، الکترون‌ها به سطح انرژی بالاتر می‌روند. با جذب انرژی کافی، یک الکترون از اتم U^{235} خارج شده و به یون مثبت مبدل می‌شود. این یون‌ها در مرحله بعد، در یک میدان مغناطیسی به سمت کلکتور منحرف می‌شود. اتم‌های U^{238} نیز به صورت خنثی باقیمانده و با عبور از کلکتور در قسمت انتهایی آن جمع می‌شود.

1. Atomic Vapor Laser Isotope
2. Molecular Laser Isotope Separation



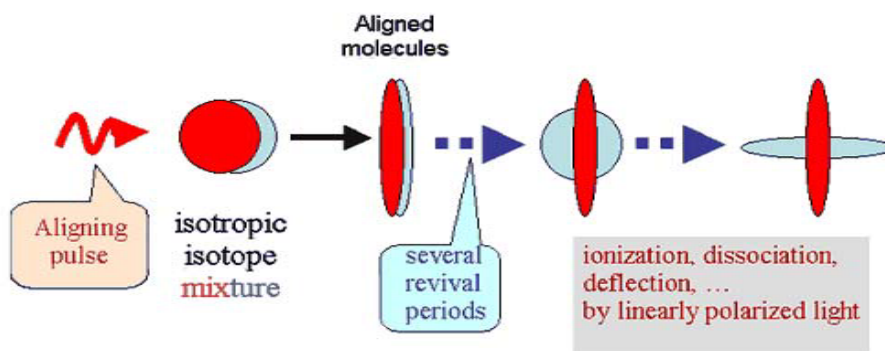
شکل (۳-۱۸): جداسازی ایزوتوپی لیزری با استفاده از بخار اتمی

از مزایای اصلی فرایند AVLIS می‌توان به قابلیت جداسازی بالا، مصرف انرژی پایین و حجم پایین زباله‌های ایجاد شده اشاره نمود. بسیاری از کشورها، تحقیقاتی را در زمینه AVLIS انجام دادند و به پیشرفتهایی در این زمینه دست پیدا کردند، لیکن برنامه‌های اصلی که در این زمینه انجام شده بیشتر توسط ایالات متحده، فرانسه، ژاپن، روسیه دنبال شده است. فرایند جداسازی لیزری ایزوتوپ‌های بخار اتمی (AVLIS) در ایالات متحده در حال گسترش بوده و روش مشابهی نیز در بریتانیا در دست مطالعه است. با این همه، فرایند AVLIS هنوز به سطح تجاری توسعه نیافته و ظرفیت ایالات متحده و کشورهای اروپای غربی از حیث تسهیلات غنی‌سازی موجود چنان بالا است که ممکن است چندین سال طول بکشد تا غنی‌سازی تجاری به روش AVLIS شروع بشود. این روش، به مقدار زیادی ارزان‌تر از روش مرکز گریز باشد.

۳-۷-۲- جداسازی ایزوتوپی لیزری مولکولی (MLIS)

استفاده از فرایند جداسازی ایزوتوپی لیزری مولکولی (MLIS) در سال ۱۹۷۱ توسط جمعی از دانشمندان در آزمایشگاه ملی Los Alamos مطرح شد. فرایند جداسازی مولکول‌ها به روش ایزوتوپی لیزری در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله نخست، UF_6 تحت تابش‌های یک سیستم لیزری مادون قرمز با طول موج تابشی ۱۶ میلیمتر قرار می‌گیرد که بر اثر آن UF_6^{235} به طور انتخابی تحریک شده و UF_6^{238} تقریباً به همان صورت اولیه باقی می‌ماند. در مرحله دوم نیز فوتون‌های خارج شده از یک سیستم لیزری ثانویه (مادون قرمز یا ماوراء بنفش)، UF_6^{235} را جدا می‌نماید تا UF_5^{235} و اتم‌های فاقد فلورین

ایجاد شود. ترکیبات UF_5^{235} ایجاد شده بر اثر جداسازی به صورت یک پودر از گاز جدا می‌شود که در مرحله بعد طی فرایند فیلتراسیون جدا می‌شود. در مرحله نخست، از لیزرهای دی‌اکسید کربن برای تحریک UF_6^{235} و در مرحله دوم از لیزر XeCl excimer برای جداسازی UF_6^{235} استفاده می‌شود. در این تکنیک، UF_6 گازی با یک گاز حامل مخلوط شده و نوعی گاز رباینده نیز در یک نازل مافوق صوت انتشار می‌یابد که این امر موجب سرد شدن گاز تا حد دماهای پایین می‌گردد. استفاده از گاز هیدروژن یا گازهای نجیب به عنوان گاز حامل مناسب‌تر است. از گاز رباینده در واقع برای گرفتن اتم‌های فلورین که بر اثر جداسازی مولکولهای UF_6^{235} ایجاد شده استفاده می‌شود. در کل از مزایای تکنیک MLIS می‌توان به مصرف انرژی بسیار پایین و استفاده از UF_6 به عنوان گاز پردازشی اشاره نمود.

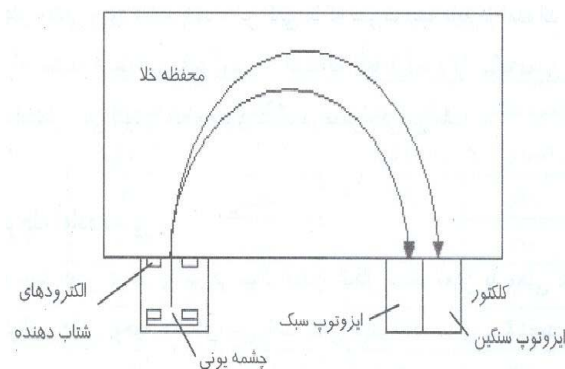


شکل (۳-۱۹): جداسازی ایزوتوپی لیزری مولکولی در محیط بخار یک ترکیب اورانیومی

۳-۷-۴- غنی‌سازی اورانیم از طریق جداسازی ایزوتوپی الکترومغناطیسی (EMIS)

یکی دیگر از روش‌های غنی‌سازی اورانیم، استفاده از میدان مغناطیسی بسیار قوی ایجاد شده توسط آهن‌رباهای بزرگ می‌باشد. روش الکترومغناطیسی در سال‌های جنگ جهانی دوم به علت اینکه از روش‌های دیگر آسان‌تر و قابل دسترس‌تر بود، توسعه داده شد. این روش بر جداسازی مسیر اتم‌های هگزا فلوروید اورانیوم یونیده شده در یک میدان مغناطیسی قوی مبتنی است. بایستی متذکر شد که اصول فرایند غنی‌سازی اورانیوم به شیوه جداسازی ایزوتوپی الکترومغناطیسی مشابه با طیف سنجی جرمی است که در آن یک ذره باردار در حین عبور از یک میدان مغناطیسی یکنواخت، مسیر دایره‌ای را طی می‌کند. این روش غنی‌سازی در دستگاهی به نام کلکتور انجام می‌گیرد. در این روش، ابتدا اورانیم هگزا فلوروید را حرارت می‌دهند تا تبخیر شده و اتم‌های اورانیم و فلوروید از هم تفکیک گردد. این مولکول‌های بخار شده در مرحله بعد با استفاده از الکترون‌ها بمباران می‌شود. سپس یون‌های اورانیم ایجاد شده توسط پتانسیل الکتریکی الکتریکی شتاب می‌گیرند و با سرعت به میدان مغناطیسی بسیار قوی هدایت می‌شوند تا مسیر دایره‌ای شکلی را در محفظه‌ای خالی از هوا طی کنند. میدان مغناطیسی، بر هسته‌های باردار اورانیم

نیرو وارد کرده (نیروی لورنتس) و و اتم‌های UF_6 را از مسیر مستقیم خود منحرف می‌کند. هسته‌های سنگین اورانیوم (UF_6^{238}) نسبت به هسته‌های سبکتر (UF_6^{235})، انحراف کمتری داشته و شعاع بیشتری را طی می‌کنند، ولی مولکول‌های UF_6^{235} که سبکتر هستند دایره‌های کوچکتری را می‌پیمایند. سپس مولکول‌های UF_6^{238} و UF_6^{235} در کلکتورهای جداگانه جمع‌آوری می‌شوند. پس از جنگ جهانی دوم تا به حال، روش الکترومغناطیسی به علت پایین بودن بازده نسبت به سرمایه‌گذاری اولیه و مصرف صرف مقادیر بالای انرژی، فقط در موارد استثنایی بکار گرفته شده است.



شکل (۳-۲۰): غنی سازی اورانیوم به روش الکترومغناطیسی در دستگاه Calutron

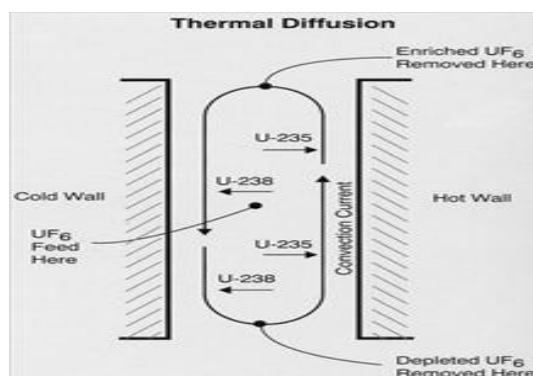
۳-۷-۵- غنی سازی اورانیوم از طریق تبادلات شیمیایی و یونی

غنی‌سازی اورانیوم می‌تواند از طریق تبادلات شیمیایی یا تبادل یونی نیز انجام پذیرد. اختلاف کم در جرم اتمی ایزوتوپ‌های اورانیوم می‌تواند موجب تغییرات اندک در تعادل واکنش شیمیایی شده و این خود، مبنای جداسازی ایزوتوپی گردد. دو فرآیند تبادل شیمیایی مایع-مایع و نیز تبادل یونی جامد-مایع در این رابطه با موفقیت اجرا گردیده است. در تبادل شیمیایی مایع-مایع، فازهای مایع غیرقابل امتزاج در راستای یکدیگر قرار گرفته و اثر آبشاری (سلسله‌ای) در هزاران گام جداسازی بوجود می‌آورد. در فراگرد تبادل یونی جامد-مایع، غنی‌سازی با جذب یا عدم جذب در یک رزین تبادل یونی سریع‌العمل مخصوص انجام می‌گیرد.

۳-۷-۶- غنی سازی اورانیوم از طریق انتشار گرمایی

در این تکنیک غنی سازی اورانیوم، برای جداسازی ایزوتوپ‌ها از انتشار گرما در سرتاسر یک لایه مایع یا گازی استفاده می‌شود. با سردسازی یک لایه نازک از یک سمت و گرمایش آن از سمت دیگر، جریان‌های همرفتی ایجاد شده موجب حرکت جریانی به سمت بالا در امتداد سطح داغ و جریان دیگری به سمت پایین در امتداد سطح سرد می‌گردد. تحت این شرایط، مولکول‌های گازی سبکتر U^{235} ، به

سمت سطح داغ انتشار یافته و مولکول‌های U^{238} سنگین‌تر به سمت سطح سرد انتشار می‌یابند که بر اثر ادغام این جریان‌های انتشاری با جریان‌های همرفتی، مولکول‌های U^{235} در قسمت بالایی فیلم و مولکول‌های سنگین‌تر U^{238} نیز در قسمت پایین متمرکز می‌شوند. از ویژگی‌های تکنیک انتشار حرارتی می‌توان سادگی، کم هزینه بودن و مصرف بالایی سوخت را نام برد. در طول جنگ جهانی دوم از این تکنیک در UF_6 مایع برای آماده‌سازی مواد تغذیه‌ای طی فرایند EMIS استفاده می‌شد. در تاسیسات این نوع غنی‌سازی، تعداد بسیار زیادی ستون بکار گرفته می‌شود که هریک از آنها از سه تیوپ تشکیل شده‌اند و آب سرد بین تیوپ‌های خارجی و میانی حرکت کرده و تیوپ داخلی نیز حاوی جریان است. در ضمن فضای بین تیوپ‌های داخلی و میانی نیز با UF_6 مایع پر شده است.

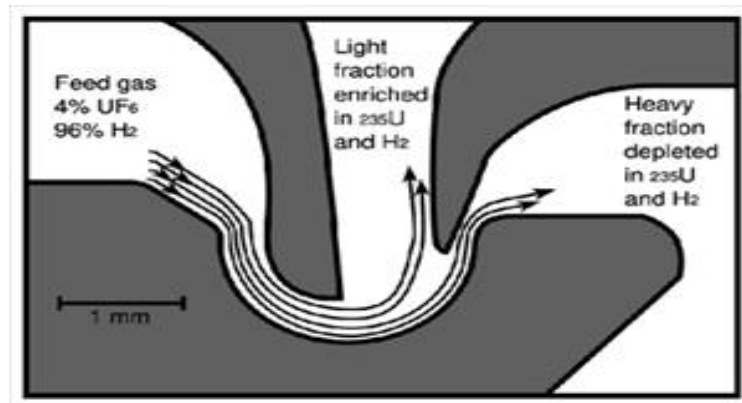


شکل (۳-۲۱): غنی‌سازی اورانیوم به شیوه انتشار گرمایی

۳-۷-۷- غنی‌سازی اورانیوم به روش جداسازی آرتودینامیک

در فرایندهای غنی‌سازی آرتودینامیک، مخلوطی از اورانیوم گازی و هیدروژن یا هلیوم فشرده شده، سپس از درون عناصر جداکننده در سطوح خمیده که جدایش ایزوتوپی به نیروهای توبی سانتریفیوژ مجهز است، عبور داده شده و ایزوتوپ‌های اورانیوم جدا می‌گردند. در تاسیسات غنی‌سازی آرتودینامیک نیز مراحل غنی‌سازی زیادی لازم است. دو فرایند از این نوع به نام‌های Vortex tube و Jet nozzle با موفقیت آزمایش شده‌اند. در روش آرتودینامیکی نازل، UF_6 را با گاز کمی سبکی همچون He و H_2 به نسبت ۹۵٪، تا سرعت صوت نزدیک می‌کنند. در ادامه به وسیله تفنگ الکترونی، فلز اورانیوم بخار می‌شود. بخار اتمی اورانیومی به قسمت جداسازی جریان یافته و پالس‌های لیزر به اتم‌ها برخورد می‌کنند که باعث یونیزه شدن اتم‌ها می‌شود. سپس به وسیله یک میدان الکترومغناطیسی، یون‌های تولید شده به طرف صفحه‌های باردار فرستاده شده و در آنها جمع‌آوری می‌شوند. توان بالای جداسازی ایزوتوپی در هر مرحله، امکان پذیری از لحاظ تکنولوژی، سرمایه‌گذاری اولیه کم و مصرف انرژی پایین سیستم و نیز

فضای مورد نیاز بسیار کم و در نهایت، راه اندازی و توقف کار سیستم در مدت زمان کمتر، از مزایای این روش محسوب می‌شوند.



شکل (۳-۲۲): غنی سازی اورانیوم به روش ائرودینامیک

۳-۸- تبدیل UF_6 غنی شده به ترکیبات مورد نظر

استفاده مستقیم از UF_6 غنی شده برای تولید انرژی هسته‌ای تنها در محدودی از راکتورها مثل راکتور فاز گازی همگن انجام می‌شود و در انواع دیگر سوخت هسته‌ای، اورانیوم غنی شده اکثراً بصورت ترکیبات UO_2 ، UO_2/PuO_2 و UO_2 می‌باشد. بنابراین بعد از اتمام مرحله غنی سازی اورانیوم، محصول UF_6 غنی شده بایستی به UO_2 یا U غنی شده تبدیل شود تا قابل استفاده به عنوان سوخت هسته‌ای گردد. با تولید UO_2 و U غنی شده از UF_6 غنی شده، مرحله تبدیل و غنی سازی اورانیوم پایان می‌یابد. برای تبدیل UF_6 غنی شده به UO_2 غنی شده، از دو فرآیند تر و خشک استفاده می‌شود. در فرآیند تر، معمولاً از دو محصول میانی دی‌اورانات آمونیم (ADU) و کربنات آمونیم اورانیل (AUC) استفاده می‌شود. در فرآیند تر با دی‌اورانات آمونیم، UF_6 تولید شده بوسیله کارخانه غنی سازی ابتدا هیدرولیز گردیده و سپس در یک محفظه رسوب‌گیری، آمونیاک به محصولات فوق اضافه می‌شود تا رسوب دی‌اورانات آمونیم تولید شود. پس از جداسازی ADU توسط فیلتراسیون، سانتریفوژ، استخراج و رسوب مجدد، رسوب ADU در ۲۰۰ درجه سانتیگراد خشک شده و ضمن واکنش با مخلوطی از H_2O/H_2 در ۵۰۰ درجه سانتیگراد به U_3O_8 تبدیل گردیده و در نهایت این محصول نیز در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به وسیله هیدروژن به محصول نهایی UO_2 غنی شده احیا می‌شود. در فرآیند تر با کربنات آمونیم اورانیل نیز، UF_6 غنی شده ضمن واکنش با مخلوطی از دی‌اکسید کربن و آمونیاک، رسوب AUC را ایجاد کرده و این رسوب نیز پس از فیلتراسیون و شستشو با کربنات آمونیم و متانول، در ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد با آب و هیدروژن واکنش داده و UO_2 حاصل می‌گردد.

اما فرآیند خشک نیز، UF_6 غنی شده مستقیماً به UO_2 غنی شده تبدیل می‌گردد و بسته به نوع محصولات میانی یا تجهیزات مورد استفاده، این روش می‌تواند شامل فرآیندهایی مرسوم به GEICO، DCI، IDR و ... باشد. به عنوان مثال، در فرآیند Integrated Dry Route که به وسیله شرکت انگلیسی BNFL و خصوصاً برای ساخت سوخت راکتورهای اتمی AGR توسعه یافت، UF_6 غنی شده در یک واکنش دو مرحله‌ای که در مناطق جداگانه یک کوره چرخان انجام می‌گردد، بطور پیوسته به پودر خالص UO_2 غنی شده تبدیل می‌شود. در خاتمه، بعد از دستیابی به UF_6 غنی شده از هر کدام از روش‌های تر یا خشک، برای تبدیل UF_6 غنی شده به اورانیوم فلزی غنی شده (U) نیز، ابتدا UF_6 غنی شده توسط هیدروژن به UF_4 غنی شده احیا گردیده و سپس توسط فلزات الکتروپوزیتیو قوی همچون Ca و Mg، اورانیوم فلزی غنی شده تولید می‌گردد. بایستی توجه داشت، اورانیوم فلزی تنها در راکتورهای Magnox و برخی راکتورهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته و به عنوان سوخت هسته‌ای از اهمیت پایین تری نسبت به UO_2 برخوردار است.

۳-۹- ساخت میله‌های سوخت اورانیوم

تولید میله سوخت که در بعضی مواقع به فرآوری اورانیوم اطلاق می‌گردد، آخرین مرحله انتهای جلویی در چرخه سوخت هسته‌ای بوده و از مرحله تبدیل مجدد و یا به عبارتی از مرحله تولید اکسید اورانیوم آغاز می‌گردد. در این مرحله، اورانیوم غنی شده که هنوز به شکل UF_6 است، به کارخانه ساخت مجتمع سوخت منتقل می‌شود تا در آنجا به پودر دی اکسید اورانیوم (UO_2) تبدیل شود تا به عنوان سوخت هسته‌ای قابل استفاده باشد. سپس، پودر UO_2 فشرده شده و به شکل قرص درمی‌آید. قرص‌ها در معرض حرارت با دمای بالای حدود ۱۴۰۰ درجه قرار می‌گیرند تا به قرص‌های سرامیکی سخت تبدیل شوند. پس از طی چند فرآیند فیزیکی، قرص‌هایی سرامیکی با ابعاد یکسان حاصل می‌شود. در نهایت، متناسب با طراحی راکتور و نوع سوخت مورد نیاز، این قرص‌های کوچک را دسته دسته کرده و با روش‌های خاصی درون یک سری لوله‌های نازک (غلاف سوخت) که معمولاً از جنس آلیاژ زیرکونیوم یا فولاد ضدزنگ می‌باشد، قرار می‌دهند. این لوله‌ها که کاملاً آب‌بندی شده‌اند، در برابر خوردگی بسیار مقاوم بوده و در عین حال، از رسانایی حرارتی بسیار بالایی برخوردار است. از طرفی نیز، از خارج شدن نوترون‌هایی که باعث ایجاد زنجیره واکنش‌های هسته‌ای می‌شوند، جلوگیری کند. در راکتورهای مختلف شکل میله سوخت از نظر قطر و طول و ظاهر آن متفاوت است. میله‌های سوخت بعد از آماده شدن به صورت انفرادی یا مجتمع سوخت درآمده، برای استفاده در قلب راکتور، به نیروگاه فرستاده می‌شود. در بعضی از راکتورها میله‌ها بصورت انفرادی در راکتور جاگذاری می‌شوند (راکتورهای گازی)؛ در حالی که در بعضی دیگر از راکتورها تعدادی از میله‌ها در کنار هم قرار گرفته و ساختاری به نام مجتمع سوخت را تشکیل

می‌دهند.

پایه مجتمع سوخت از یک قاب چهارگوش از فولاد ضدزنگ که صفحه مشبکی در ۴ گوشه به آن جوش خورده است تشکیل می‌شود. این پایه ۴ زانو داشته و دارای سوراخ‌های متمرکز کننده‌ای است که به وسیله آنها می‌توان مجتمع سوخت را به منظور یکنواخت کردن میزان سوخت ۹۰ درجه چرخانید. کلاhek مجتمع نیز از فولاد ضدزنگ ساخته شده و دارای یک قاب چهارگوش است که صفحه‌ای به آن جوش داده شده است. در قاب کلاhek، ۴ سوراخ متمرکز کننده وجود دارد که دوبه‌دو به طور مورب روبه‌روی یکدیگر قرار گرفته و میل‌هایی از صفحه تکیه‌گاه بالایی مجتمع‌های سوخت وارد این سوراخ‌ها می‌شوند. بدین ترتیب، امکان حرکت‌های افقی و شعاعی مجتمع‌های سوخت محدود است. فنرهای ورقه‌ای به وسیله پیچ در روی چهار ضلع قاب محکم شده‌اند. این فنرها از حرکات عمومی میله‌های سوخت که به علت شناور بودن آنها در آب به وسیله نیروی ارشمیدس نیروی حرکت آب و غیره بوجود می‌آید جلوگیری می‌کنند. بر روی صفحه کلاhek شماره مجتمع حک شده است. از این شماره برای شناسایی مجتمع، چرخاندن و نقل و انتقال آن استفاده می‌شود. همچنین برای انتقال مجتمع، قلابی در روی کلاhek وجود دارد. همچنین نقش شبکه‌های نگهدارنده که به فواصل حدود ۵۰ سانتیمتر از یکدیگر در طول مجتمع‌های سوخت قرار می‌گیرند، جلوگیری از حرکت شعاعی و خم شدن میله‌های سوخت در اثر تنش‌های ناشی از درجه حرارت و تابش پرتوها در رآکتور است.

هر واحد شبکه دارای فنرهای تیغه‌ای است که میله‌های سوخت را که از میان واحد می‌گذرند، به دکمه‌های روبه‌رویی می‌فشارد. بدینوسیله از ارتعاش میله‌های سوخت جلوگیری شده و فواصل میله‌ها ثابت می‌ماند. زائده‌های دیگری نیز در شبکه برای هدایت جریان آب خنک کننده وجود دارد که جهت آب را برای نیل به تعادل حرارتی در شبکه تنظیم می‌کند. در جدارهای بیرونی شبکه نیز زائده‌هایی به نام زائده ردکننده پیش‌بینی شده است. وجود این زائده‌ها سبب می‌شود که در موقع خارج کردن مجتمع‌های سوخت از داخل رآکتور از به هم چسبیدن بسته‌های مجاور جلوگیری به عمل آید. تثبیت میله‌های سوخت و تنظیم موقعیت آنها در شبکه، به وسیله فنرها و دگمه‌های اتکایی تأمین می‌شود. فنرها تنها نیروی لازم برای جلوگیری از تکان خوردن میله‌ها را ایجاد می‌کنند. نیروی فنر بگونه‌ای تنظیم می‌شود که کمترین مقدار آن بتواند از حرکت مماسی میله سوخت و شبکه جلوگیری کند و بیشترین مقدار آن به وسیله نیروی اصطکاک که در اثر انبساط محوری میله سوخت به وجود می‌آید، محدود می‌گردد. از طرفی، در داخل هر مجتمع سوخت تعدادی لوله هدایت کننده میله‌های کنترل جهت کنترل توان حرارتی رآکتور قرار دارند. تعداد این لوله‌ها در مجتمع‌های مختلف متفاوت و حدود ۲۴-۲۰ است. لوله‌های هدایت کننده به کلاhek، پایه و شبکه نگهدارنده متصل شده‌اند. جنس لوله‌های هدایت کننده از فولاد ضدزنگ است. اتصال لوله هدایت کننده به کلاhek مجتمع سوخت با بکارگیری یک بوش که در انتهای لوله هدایت

کننده قرار گرفته است تأمین می‌شود.

در نهایت، کلاهک و پایه، شبکه‌های نگهدارنده و لوله‌های هدایت کننده اسکلت مجتمع سوخت را تشکیل می‌دهند. اسکلت سبب می‌شود که از وارد شدن نیروهای خارجی به مجتمع سوخت در حین عملیات جاگذاری و جابه‌جایی آن در رآکتور به عمل آید. همچنین وجود اسکلت، سقوط آزاد میله‌های کنترل را در شرایط اضطراری تضمین می‌کند. باید توجه داشت که اجزاء تشکیل دهنده مجتمع سوخت قبل از سوار شدن به صورت مجتمع باید مورد بازبینی دقیق و کنترل کیفی قرار گیرند. ابعاد، خواص مکانیکی و ناخالصی‌های شیمیایی هر یک از اجزاء باید کنترل گردد. اندازه‌گیری، ارزیابی و ثبت اطلاعات به وسیله دستگاه‌های مجهز به کامپیوتر صورت می‌پذیرد. اندازه‌گیری نیروی فنر در شبکه نگهدارنده میله‌های سوخت بوسیله یک مدل میله و بلورهای پیزوالکتریک که در طول محور قرار گرفته‌اند انجام می‌شود. پس از خاتمه عملیات کنترل کیفی، اجزاء مجتمع‌های سوخت برای مراحل لاک زدن میله‌های سوخت، پیش مونتاژ میله‌های سوخت، ساخت اسکلت مجتمع سوخت، کنترل کیفی اسکلت مجتمع سوخت، مونتاژ مجتمع سوخت و لاک زدایی میله‌های سوخت آماده می‌شوند.

۱۰۰ / مبانی و کاربردهای فناوری هسته‌ای

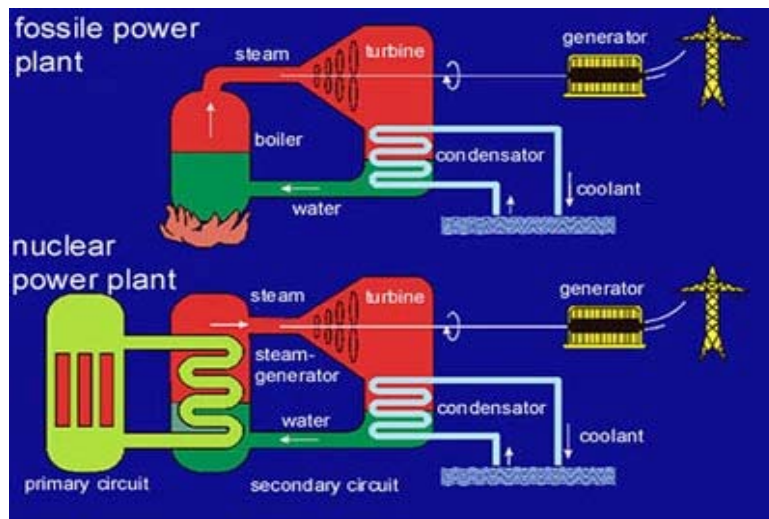
سفید

فصل چهارم

راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای

مقدمه

نیروگاه‌های هسته‌ای نیز از نوع نیروگاه‌های حرارتی محسوب می‌شوند، با این تفاوت که در نیروگاه-های تولید برق کلاسیک، انرژی حرارتی مورد نیاز از طریق فرآیندهای شکافت یا گداخت هسته‌های اتم و در یک محیط واکنش به نام راکتور هسته‌ای به دست می‌آید. بدین منظور، نیروگاه‌های اتمی نیز مشابه نیروگاه‌های فسیلی کلاسیک، از یک سیکل ترمودینامیکی آب-بخار یا سیکل گازی (توربین بخار / توربین گاز) استفاده کرده و تنها در تولید انرژی حرارتی، فرآیند متفاوتی را نسبت به نیروگاه‌های فسیلی طی می‌کنند. وظیفه اصلی قسمت هسته‌ای نیروگاه، شامل راکتور و یک مدار خنک کننده برای برداشت حرارت، در واقع تولید بخار یا گاز مورد نیاز سیکل ترمودینامیکی است که بعضاً آن را مولد بخار هسته‌ای^۱ (NSSS) می‌نامند. سایر قسمت‌های نیروگاه شامل سیستم توربین و ژنراتور، اجزاء سیکل ترمودینامیکی، سیستم خنک کننده و سایر قسمت‌های کمکی مربوطه، کاملاً مشابه یک نیروگاه کلاسیک است. بنابراین، طبقه‌بندی انواع نیروگاه‌های اتمی، به طبقه‌بندی انواع راکتور یا محیط واکنش هسته‌ای و نحوه برداشت حرارت از آن برمی‌گردد. در این نیروگاه‌ها، گرمای تولید شده توسط شکافت یا همجوشی در راکتورها، توسط خنک کننده به بیرون از راکتور منتقل می‌شود. دمای خنک کننده درون چرخه تحت فشار، گاهی به چندین برابر نقطه جوش می‌رسد. در بیرون از راکتور، گرمای حاصله آب موجود در منبع دیگر را بخار کرده و بخار آب تولید شده با انرژی زیادی که دارد، توربین‌های بخار را به حرکت درآورده و با انتقال این انرژی مکانیکی به ژنراتورها، برق تولید می‌شود.



شکل (۴-۱): شماتیک مقایسه‌ای یک نیروگاه هسته‌ای با نیروگاه سوخت فسیلی

۴-۱- راکتور هسته‌ای و انواع آن

برای انجام واکنش‌های هسته‌ای شکافتی و همجوشی در نیروگاه‌های اتمی، نیاز به دستگاهی است که این ابزار راکتور نام دارد. در مهندسی هسته‌ای، راکتورها سیستم‌هایی هستند که واکنش‌های شکافت یا گداخت هسته‌ای در آنها به صورت کنترل شده رخ می‌دهد. در طی این فرایند، انرژی زیادی به صورت گرما و مقدار متناهی نوترون آزاد می‌گردد. بنابراین راکتورها برای تولید انرژی الکتریکی و نیز نوترون‌ها بکار می‌روند. اندازه و طرح راکتور برحسب کار آن متغیر است. راکتورهای هسته‌ای برای اهداف فراوانی طراحی و ساخته شده و عمدتاً کاربردهای کاملاً دوگانه دارند. در مصارف صلح‌آمیز راکتورهای هسته‌ای، برحسب کاربرد به راکتورهای تولید حرارت و برق (راکتورهای قدرت)، راکتورهای کاشنده، راکتورهای تحقیقاتی و راکتورهای اختصاصی برای مقاصدی همچون ساخت زیردریایی، فضاپیما، آب شیرین کن و ... تقسیم می‌شوند. در این میان، عمدتاً راکتورهای قدرت و راکتورهای تحقیقاتی مطرح می‌باشند. راکتورهای تحقیقاتی برای تحقیقات هسته‌ای پایه، مطالعات کاربردی تجزیه‌ای و تولید ایزوتوپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راکتورها عمدتاً از باریکه نوترون پرنرژی استفاده می‌شود تا مواد ساده را به عناصر کمیاب و جدیدی تبدیل کنند. اما هدف از راکتور هرچه باشد، برای به دست آوردن این محصولات لازم است یک واکنش هسته‌ای زنجیره‌ای به طور پیوسته ادامه یابد. برای ادامه یک واکنش زنجیره‌ای نیز راکتور بایستی در حالت بحرانی یا فوق بحرانی قرار داشته باشد.

در راکتورهای قدرت نیز که برای نیروگاه‌های اتمی طراحی شده‌اند، اتم‌های اورانیوم و پلوتونیوم توسط نوترون‌ها شکافته می‌شوند و انرژی آزاد شده، گرمای لازم را برای تولید بخار ایجاد کرده و بخار آب

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۰۳

حاصله برای چرخاندن توربینهای بخار ژنراتورهای الکتریکی بکار گرفته می‌شوند. استفاده‌های دیگر می‌تواند شامل تولید گرمای مورد نیاز برای فرآیندهای صنعتی، نمک‌زدایی (شیرین سازی) آب دریا، تأمین حرارت منطقه‌ای در شهرهای بزرگ و کوچک، حرکت کشتی‌ها و مخصوصاً در زیردریایی‌ها باشد. از طرفی، راکتورهای قدرت در کل از دو نوع شکافتی و همجوشی تشکیل شده‌اند و خود اینها نیز، با توجه به شرایط حاکم و اهداف مورد نظر به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. در اهداف نظامی نیز، برای ساخت بمب‌های پلوتونیومی، اورانیوم غنی شده را به راکتورهای هسته‌ای منتقل کرده و پلوتونیوم تولید می‌کنند. راکتورهای هسته‌ای دارای کارایی بین ۲۹ درصد تا ۳۸ درصد هستند. امروزه نوع رایج راکتورهای آب سبک کارایی حدود ۳۴ درصد دارند. در یک تقسیم‌بندی مهم، راکتورهای هسته‌ای از لحاظ سرعت عمل به دو دسته راکتورهای گرمایی و سریع تقسیم می‌شوند. راکتوری که از کند کننده استفاده می‌کند، راکتور گرمایی یا راکتور کند نامیده می‌شود. در مقابل راکتوری که از کند کننده استفاده نمی‌کند، راکتور سریع خوانده می‌شود.

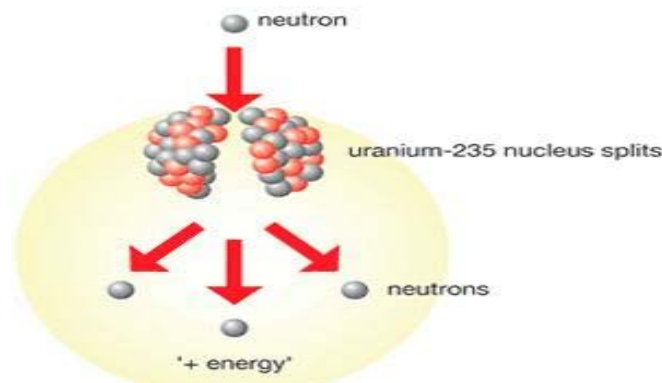
در راکتورهای سریع، فشار ذرات نوترون بسیار بالا بوده و از این‌رو می‌توان برخی واکنش‌های هسته‌ای را در آنها انجام داد که ترتیب دادن آنها در راکتور کند بسیار مشکل است. در راکتورهای گرمایی، برخلاف راکتورهای سریع، سرعت عمل کم بوده و فرآیند شکافت در آنها به آرامی صورت می‌گیرد. این راکتورها کاملاً جنبه صلح آمیز دارند، در حالی که هدف اصلی در راکتورهای سریع، تولید سوخت لازم برای سلاح‌های هسته‌ای است. شرایط خاصی که در راکتورهای سریع وجود دارد، سبب می‌شود بتوان هسته اتم تورنیوم و برخی ایزوتوپ‌های دیگر را به‌عنوان سوخت هسته‌ای استفاده نمود. چنین راکتوری می‌تواند سوختی بیش از حد نیاز خود تولید کند و به همین دلیل به آن راکتور سوخت ساز هم گفته می‌شود. در نهایت بایستی توجه داشت، حداکثر عمر مفید راکتورها ۲۴ سال است، اما بیشتر راکتورها دارای عمری کمتر از مدت مذکور بوده که طی این مدت به تعمیرات منظم نیاز داشته و نزدیک به پایان عمر به یک تعمیر عمده نیاز دارند؛ ولی به سبب خوردگی و رادیواکتیویته شدید، تعمیرات به‌طور صددرصد غیرممکن می‌گردد. در نهایت، در پایان عمرشان راکتورها پیاده و قطعات آنها منفصل می‌گردد تا بتوان در کانتینرها جهت انهدام نهایی جمع‌آوری نمود.

خورشید نیز نوعی راکتور هسته‌ای طبیعی محسوب می‌شود که در آن، عناصر سبک هسته‌ای به هم جوش خورده (همجوشی هسته‌ای) و تولید انرژی می‌کنند. در طبیعت نیز می‌توان نشانه‌هایی از راکتور هسته‌ای پیدا کرد، البته به شرطی که تمام عوامل مورد نیاز به طور طبیعی در کنار هم قرار گرفته باشند. تنها نمونه شناخته شده یک راکتور هسته‌ای طبیعی، ۲ میلیارد سال پیش در منطقه اوکلو در کشور گابون (قاره آفریقا) فعالیتش را آغاز کرده است. البته دیگر چنین راکتورهایی روی زمین شکل نمی‌گیرند، زیرا واپاشی رادیواکتیو این مواد (بخصوص اورانیوم ۲۳۵) در این زمان طولانی ۴/۵ میلیارد ساله (سن زمین)،

فراوانی اورانیوم ۲۳۵ را در منابع طبیعی این راکتورها بسیار کاهش داده است، به طوری که مقدار آن به پایین‌تر از حد مورد نیاز آغاز یک واکنش زنجیره‌ای رسیده است. این راکتورهای طبیعی زمانی شکل گرفتند که معادن غنی از اورانیوم به تدریج از آب زیرزمینی یا سطحی پر شدند. این آب به صورت کند کننده عمل کرده و واکنش‌های زنجیره‌ای شدیدی به وقوع پیوست. با افزایش دما، آب کند کننده بخار شده و راکتور خاموش می‌گردد. پس از مدتی، دوباره این بخارها به مایع تبدیل شده و دوباره راکتور به راه می‌افتاد. این سیستم خودکار و بسته، یک راکتور را کنترل کرده و برای صدها هزار سال، این راکتور را فعال نگاه می‌داشت. مطالعه و بررسی این راکتورهای هسته‌ای طبیعی بسیار ارزشمند است، زیرا می‌تواند به تحلیل چگونگی حرکت مواد رادیواکتیو در پوسته زمین کمک کند. اگر زمین‌شناسان بتوانند راز این حرکت‌ها را شناسایی کنند، می‌توانند راه حل‌های جدیدی برای دفن زباله‌های هسته‌ای پیدا کنند.

۴-۲- ساختار راکتورهای (قدرت) شکافت

پس از تکمیل و ساخت میله سوخت، میله‌های سوخت برای واکنش شکافت در راکتور قرار گرفته و انرژی آزاد می‌شود. مدت پرتوافشانی هر محموله سوخت بین سه تا چهار سال می‌باشد. در فرآیند سوختن اورانیوم در داخل راکتور شکافت اتمی، ورود یک نوترون کم انرژی به داخل هسته ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵، ناپایداری در هسته به وجود آمده و بعد از لحظه بسیار کوتاهی، هسته اتم شکسته شده و تبدیل به دو تکه شکست و دو یا سه نوترون می‌شود. این نوترون‌ها با سایر اتم‌های اورانیوم ۲۳۵ برخورد کرده و باعث شکافت آنها و تولید نوترون‌های جدید می‌شود. ورود نوترون به درون هسته اتم اورانیوم و شکسته شدن آن، توام با انتشار انرژی معادل با 200Mev میلیون الکترون ولت است. این مقدار انرژی، در سطح اتمی، بسیار ناچیز می‌باشد؛ ولی در مورد یک گرم از اورانیوم، در حدود صدها هزار مگاوات است. البته اگر کنترلی در مهار کردن تعداد آنها نباشد، واکنش شکست در داخل توده اورانیوم به صورت زنجیره‌ای انجام می‌شود که در زمانی بسیار کوتاه، منجر به انفجار شدیدی خواهد شد. اگر تعداد شکست‌ها را در توده اورانیوم و طی زمان محدود نماییم؛ به نحوی که به ازای هر شکست، اتم بعدی شکست حاصل کند، شرایط یک نیروگاه اتمی به وجود می‌آید. البته مقدار انرژی آزاد شده تابع نوع راکتور و درجه سوختن و دیگر متغیرها است. برای تولید انرژی گرمائی از طریق فرایند شکافت هسته‌ای، اورانیومی که در هسته راکتور قرار داده می‌شود باید از جرم بحرانی^۱ بیشتر (فوق بحرانی) باشد، یعنی اورانیوم مورد استفاده باید به حدی غنی شده باشد که امکان آغاز یک واکنش زنجیره‌ای مداوم وجود داشته باشد.

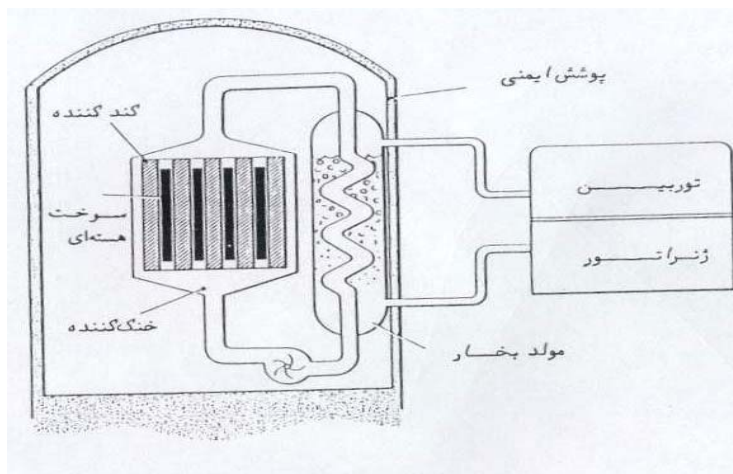


شکل (۴-۲): نمودار شماتیک شکافت

با وجود تنوع در راکتورهای شکافت، تقریباً همه آنها از اجزای یکسانی تشکیل شده‌اند. ساختمان راکتور از مجموعه‌ای از میله‌های سوخت تشکیل می‌شوند که سطح آنها توسط یک سیال خنک کننده پوشیده می‌شود. این اجزا شامل سوخت، پوشش برای سوخت، کند کننده نوترون‌های حاصله از شکافت، خنک کننده‌ای برای حمل انرژی حرارتی حاصله از فرآیند شکافت و ماده کنترل کننده برای کنترل نمودن میزان شکافت می‌باشد که همه آنها نقش اساسی و مهم در تعادل و ادامه حیات آن دارند. لازم به ذکر است، خواص فیزیکی مواد، اهمیت ویژه‌ای در کاربرد آنها در راکتورهای هسته‌ای دارد. خواصی چون استحکام، سختی، قابلیت کششی، نقطه ذوب، نقطه جوش، چگالی و رسانندگی گرمایی همه مواردی هستند که در انتخاب ماده برای اجزای مختلف راکتور دارای اهمیت می‌باشد. در راکتورهای قدرت با نوترون حرارتی، ماده قابل احتراق شامل ماده شکافتی (معمولاً اکسید اورانیوم کم و بیش غنی شده در ایزوتوپ ۲۳۵) اغلب به صورت گلوله‌هایی در یک غلاف فلزی قرار داده می‌شود. اگر راکتور با نوترون حرارتی باشد، این میله‌ها در داخل کند کننده بطور منظم توزیع می‌شوند. سیال خنک کننده ممکن است آب معمولی، آب سنگین یا یک گاز باشد. کند کننده نیز آب معمولی، آب سنگین یا گرافیت خواهد بود. این مجموعه، قلب راکتور^۱ را تشکیل می‌دهد و توسط بازتاب کننده‌ای احاطه می‌شود که از همان ماده کند کننده تشکیل شده و فرار نوترون‌ها را به حداقل می‌رساند.

در یک راکتور با نوترون‌های سریع نیز همان تشکیل دهنده‌های اساسی به استثنای کند کننده وجود دارد. در این راکتورها، ماده قابل احتراق از پلوتونیوم می‌باشد که معمولاً به صورت مخلوط $\text{PUO}_2\text{-UO}_2$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. میله‌های سوخت با فولاد زنگ‌نزن پوشانده شده و توسط سدیم مذاب سرد می‌شوند. در این راکتورها، منطقه‌ای به نام غلاف (از اکسید اورانیوم UO_2) و بطور مستقیم واقع در

اطراف قلب، تولید تازه را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین بازتاب‌کننده راکتورهای با نوترون‌های سریع معمولاً از قطعات فولادی تشکیل می‌شود. در نهایت، در یک نیروگاه هسته‌ای قلب راکتور و تجهیزات مرتبط با آن معمولاً درون یک ساختمان بتونی تعبیه می‌شود که این ساختمان به عنوان یک سد حفاظتی در برابر تابش رادیواکتیو عمل می‌کند. این ساختمان نیز درون یک مخزن بزرگتر فولادی قرار می‌گیرد. وظیفه این مخزن فولادی، جلوگیری از نشت هرگونه گاز یا مایع رادیواکتیو از درون سیال است. در نهایت این مخزن فولادی هم به وسیله یک ساختمان بتونی خارجی محافظت می‌شود. این ساختمان به قدری محکم است که در برابر اصابت یک هواپیمای جت مسافری هم تخریب نمی‌شود. وجود این ساختمان حفاظتی دوم نیز برای جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو در اثر هرگونه نشت از حفاظ اول ضروری است. در حادثه انفجار چرنوبیل، فقط یک ساختمان حفاظتی وجود داشت و همان موجب شد مواد راکتیو در سطح اروپا پخش شود. علاوه بر این در نیروگاه‌های جدید دستگاه‌های جدیدی زیر بدنه راکتورها تعبیه می‌شود که اصطلاحاً «تله» نام دارد و محیط اطراف راحتی در صورت نشت مواد رادیواکتیو در زمان حادثه از اشعه حفظ می‌کند. البته در راکتورهای قدرت علاوه بر اجزاء فوق، تجهیزات کنترل و مشاهده سیستم راکتور نیز وجود دارند.



شکل (۴-۳): شماتیک اجزاء یک راکتور قدرت

۴-۲-۱- مجموعه‌های سوخت و غلاف سوخت

سوخت راکتورهای قدرت یا از عناصری شامل اتم‌های قابل شکافت تامین می‌شوند و یا از اتم‌های ایزوتروپ عناصری که قابلیت تبدیل به اتم‌های قابل شکافت را دارند. بنابراین اتم‌های قابل شکافت شامل نوکلئیدهای اورانیوم ۲۳۵، پلوتونیوم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳ و اتم‌های مستعد با قابلیت تبدیل به اتم-

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۰۷

های قابل شکافت نیز به صورت نوکلئیدهای اورانیوم ۲۳۸ و توریم ۲۳۲ خواهند بود. برخی از این نوکلیدها، برای شکافت حاصله از نوترون‌های حرارتی (کند) و برخی نیز برای شکافت حاصل از نوترون‌های سریع بکار گرفته می‌شوند. بایستی توجه داشت که در یک راکتور قدرت، تمام واکنش‌های شکافت در داخل سوخت انجام می‌شود. ماده سوخت، هم عامل ایجاد حالت بحرانی راکتور بوده و هم انرژی شکافت آزاد می‌کند. سوخت راکتورهای هسته‌ای، بایستی به گونه‌ای باشد که متحمل شکافت حاصله از نوترون بشود. در کنار قابلیت شکافت، سوخت بکار رفته در راکتور هسته‌ای باید بتواند نیازهای دیگری را نیز تأمین کند. سوخت باید از نظر مکانیکی قوی، از نظر شیمیایی پایدار و در مقابل تخریب تشعشعی مقاوم باشد تا تحت تغییرات فیزیکی و شیمیایی محیط راکتور قرار نگیرد. هدایت حرارتی ماده باید بالا باشد، به طوری که بتواند حرارت را خیلی راحت جابه‌جا کند. همچنین، امکان بدست آوردن، ساخت راحت، هزینه نسبتاً پایین و خطرناک نبودن از نظر شیمیایی، از دیگر مشخصات این نوع سوخت است.

پلوتونیوم به عنوان سوخت راکتور، معمولاً به صورت PuO_2 بکار گرفته می‌شود. نقطه ذوب این ترکیب ۲۴۰۰ درجه سانتیگراد است. البته چون فلز پلوتونیوم تا رسیدن به نقطه ذوب ۶۴۰ درجه سانتیگراد دارای تعداد زیادی فاز بلوری است، سوخت مناسبی برای راکتور نمی‌باشد. همچنین به علت پایداری بهتر، عنصر توریم برتر از اورانیوم است؛ اما نمی‌تواند به صورت خالص به عنوان سوخت بکار گرفته شود و حتماً باید به صورت دی اکسید توریم ThO_2 و یا کربوتریوم ThC_2 مورد استفاده قرار گیرد. نقطه ذوب فلزات توریم خالص حدود ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد است. توریم بجز در چند راکتور با خنک کننده گازی دما بالا، به عنوان سوخت راکتور کاربرد زیادی نداشته است. اما اورانیوم در شکل‌های مختلف، متداولترین ماده سوخت برای راکتورهای هسته‌ای است که می‌تواند به صورت خالص یعنی اورانیوم فلزی و یا به صورت ترکیب مثل اکسید اورانیوم و یا کربور اورانیوم بکار برود. نقطه ذوب اورانیوم نیز ۱۱۳۳ درجه سانتیگراد است. به نظر می‌رسد در حال حاضر اورانیوم بهترین گزینه برای تولید انرژی هسته‌ای باشد. البته در کشورهایی که منابع اورانیوم در آنها محدود می‌باشد، جایگزینی عنصر توریم یا پلوتونیوم گریزناپذیر خواهد بود، البته بهتر است این عنصر به صورت ترکیب اورانیوم و پلوتونیوم (پورکس ۱۴ و ماکس ۱۵) و ترکیب اورانیوم و توریم (تورکس ۱۶) بکار گرفته شوند. بر همین اساس نیز چرخه سوخت به سه نوع متمایز؛ چرخه کندو (HWR)، چرخه پورکس (اورانیوم/ پلوتونیوم) (LWR) و چرخه تورکس (LWR) طبقه بندی می‌شود.

همچنین سوخت راکتورها از نظر فرآیندهای استفاده در راکتورها بر اساس استراتژی کشور ممکن است به یکی از سه روش شامل؛ یکبار استفاده از اورانیوم و ارسال سوخت مصرف شده به انبار موقت و سپس دفن همیشگی آن، استفاده چندباره از اورانیوم و برقراری سیکل اورانیوم- پلوتونیوم با اعمال عملیات

باز فراوری روی آن و در نهایت، استفاده از سیکل اورانیوم-توریم (توریم ۲۳۲ ابتدا تبدیل به اورانیوم ۲۳۳ شده و سپس اورانیوم ۲۳۳ به عنوان سوخت در راکتورها مورد استفاده قرار گیرد) عمل گردد. در کل، سوخت راکتور، غالباً به شکل گلوله‌ای سرامیکی است. این گلوله‌ها، از دی اکسید اورانیوم که در دمایی بسیار بالا پخته شده است، شکل می‌گیرند. سپس گلوله‌ها در لوله‌های فلزی از میله سوختی پوشانده می‌شوند که در مجتمع‌های سوختی برای استفاده در راکتورها آماده هستند. در نوع خاصی از راکتورهای قدرت نیز، از اورانیوم غنی شده به شکل قرص‌هایی با سطح مقطع به اندازه یک سکه معمولی و ضخامت حدود دو و نیم سانتیمتر بهره می‌گیرند. این قرصها روی هم قرار داده شده و کپسول‌های میله‌ای شکلی یا میله‌های سوخت را تشکیل می‌دهند. این میله‌های سوخت در غلاف مخصوصی نگه داشته می‌شوند. میله‌های سوخت ممکن است به صورت انفرادی در جاهای مخصوص خود گذاشته شود و یا ممکن است در بسته‌های چندتایی دسته بندی و تحت فشار و در محفظه‌ای عایق‌بندی شده نگهداری شده و به صورت مجموعه‌های سوخت درون قلب راکتور به طور منظم قرار گیرند. بسته به درصد غنای اورانیوم مورد استفاده، از یک تا سه سال می‌توان از میله‌های سوخت در راکتور استفاده کرد، ولی پس از این مدت، با خاموشی موقت راکتور، سوخت مصرف شده از نیروگاه خارج می‌شود.

در نهایت اینکه، سوخت‌های هسته‌ای مستقیماً در داخل راکتور قرار داده نمی‌شوند؛ بلکه همواره بصورت پوشیده شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوشش یا غلاف سوخت، کند کننده و یا خنک کننده را از آن جدا می‌سازد. این امر از خوردگی سوخت محافظت کرده و از گسترش محصولات شکافت حاصل از سوخت پرتو دیده به محیط اطراف جلوگیری می‌کند. بنابراین غلاف میله سوخت به عنوان اولین جدار بازدارنده، باید طوری طراحی و ساخته شود که امکان پخش پاره‌های شکاف رادیواکتیو را به کند کننده و خنک کننده ندهد. همچنین این غلاف می‌تواند پشتیبان ساختاری سوخت بوده و در انتقال حرارت به آن کمک کند. ماده غلاف همانند خود سوخت، باید دارای خواص خوب حرارتی و مکانیکی بوده و از نظر شیمیایی نسبت به برهم‌کنش با سوخت و مواد محیط پایدار باشد. همچنین لازم است غلاف دارای سطح مقطع پایینی نسبت به برهم‌کنش‌های هسته‌ای حاصل از نوترون بوده و در مقابل تشعشع مقاوم باشد. غلاف (میله‌های) سوخت معمولاً از جنس زیرکالوی می‌باشد. زیرکالوی ۲ تا ۴ یک آلیاژ زیرکونیوم با عیار کمی از قلع، آهن، کرم و نیکل است.

۴-۲-۲- کند کننده نوترون (مدراتور یا نرم کننده)

در راکتورهای شکافت، نوترون‌ها تحریک کننده شکافت هستند. فرآیند شکافت معمولاً نوترون‌های سریع با سرعت 10000000 m/s تولید می‌کند؛ اما برای اینکه یک هسته اورانیوم شکافته شود، به یک نوترون کند با انرژی $1-10 \text{ eV}$ و سرعت در حدود 2000 m/s نیاز است. برای این کار از کند کننده-

های نوترونی استفاده می‌شود. بنابراین، کند کننده یا نرم کننده که فقط در راکتورهای حرارتی وجود دارد، ماده‌ای است که برای کند یا حرارتی کردن نوترون‌های سریع شکافت بکار می‌رود تا به راحتی جذب هسته‌های اورانیوم در شکافت زنجیره‌ای شوند. چنین نوترون‌هایی آن قدر کند می‌شوند تا با هسته راکتور به تعادل گرمایی برسند. در این حالت، میله‌های سوخت درون کند کننده‌ها غوطه‌ور می‌شوند. هسته‌هایی که دارای جرمی نزدیک به جرم نوترون هستند، بهترین کند کننده می‌باشند. کند کننده برای آن که بتواند در راکتور مورد استفاده قرار گیرد، بایستی دارای سطح مقطع جذبی پایینی نسبت به نوترون باشد. به عبارتی دیگر، نوترون‌ها نباید با کند کننده واکنش نشان دهد وگرنه بازدهی تولید نوترون کاهش یافته و راکتور به سمت خاموشی می‌رود. همچنین نوترون‌ها باید در محیط کند کننده‌ها در فاصله‌های کوتاهی پس از چند برخورد کند شوند و در غیر اینصورت، نوترون توسط اورانیوم ۲۳۸ گیر افتاده و موجب تشدید ناخالصی‌های کند کننده می‌شود که این وضعیت اقتصادی نیست. کند کننده همچنین بایستی با سایر مواد ساختاری راکتور سازگار باشد و نباید خواص خوردگی، ساینده‌گی و یا تحت تاثیر پرتوهای رادیواکتیو قرار گیرد. در ضمن، کند کننده طی فرآیند دایمی بمباران‌های نوترونی نباید تحت تاثیرات و تغییرات نامطلوب فیزیکی یا شیمیایی قرار گیرد. همچنین یک کند کننده خوب باید به طور مؤثر نوترون‌های سریع حاصل از شکافت را به نوترون‌های حرارتی تبدیل کند. نهایتاً اینکه، گرچه کند کننده‌ها باید ارزان باشند، ولی در عین حال خواص ساختاری آنها نیز باید رضایت بخش باشد. گاهی اوقات کند کننده‌ها عمل خنک کنندگی راکتور را هم انجام می‌دهند.

ویژگی‌های لازم برای کند کننده‌های راکتورهای حرارتی، یعنی عدد جرمی پایین، سطح مقطع جذب نوترون خیلی پایین، سطح مقطع پراکندگی بالا و گزینش را به چند ماده محدود می‌کنند. هیدروژن به صورت آب سبک، دوتریم به صورت آب سنگین، بریلیوم و کربن به شکل گرافیت، تنها عناصری هستند که برای کند کنندگی مناسب می‌باشند. از آنجا که بریلیوم سمی است، این ماده خیلی کم به عنوان کند کننده در راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب یک انتخاب بدیهی برای کند کننده راکتورهای حرارتی بوده و می‌تواند همزمان به عنوان خنک کننده نیز بکار گرفته شود. آب دارای سطح مقطع جذب نسبتاً بالایی است؛ اما چون نوترون جذب می‌کند یا قابلیت جذب نوترون دارد، راکتورهایی که آب سبک مصرف می‌کنند، برای بحرانی شدن باید از اورانیوم غنی شده بجای اورانیوم طبیعی استفاده کنند. همچنین نوعی از راکتورهای اتمی با آب سنگین کار می‌کنند. بسیاری از خواص فیزیکی و ترمودینامیکی آب سنگین نیز شبیه آب معمولی است. فرق اساسی آب سنگین با آب معمولی در این است که دوتریم سطح مقطع جذب خیلی کمتری نسبت به هیدروژن دارد. گرافیت نیز به عنوان یک کند کننده مناسب برای راکتور شکافت محسوب می‌شود. ویژگی‌های هسته‌ای این ماده، مثل قدرت کند کنندگی و سطح مقطع جذب، به خوبی ویژگی‌های آب سنگین نیست؛ اما نوع خالص آن دارای خواص ساختاری و رسانندگی

گرمایی مناسبی می‌باشد؛ هرچند در دماهای بالا و هوا ترکیب می‌شود. به طور کلی هرچه ماده کندکننده دارای قابلیت کندکنندگی بهتری برای نوترون‌ها باشد درجه کمتری از سوخت غنی شده مورد نیاز خواهد بود. آب سنگین بهتر از گرافیت و گرافیت بهتر از آب دارای خاصیت کندکنندگی است، ولی تولید آب سنگین نسبتاً گران است و گرافیت هم تأثیرات نامطلوبی در نتیجه پرتوگیری از خود بروز می‌دهد.

۴-۲-۳- خنک کننده

نوترون‌های آزاد شده در عمل شکافت، بر اثر برخورد با کند کننده، انرژی جنبشی خود را تحویل ذرات کند کننده می‌دهند و در ضمن گرم کردن آن، خود تبدیل به نوترون‌های آهسته می‌گردند. با گذشت زمان کند کننده گرم می‌گردد و با دور شدن ذرات آن از یکدیگر، از تعداد تصادم نوترون‌ها با آن کاسته می‌گردد. لذا سرعت نوترون‌ها به اندازه کافی کاهش نمی‌یابد و در نتیجه تعداد عمل شکافت رو به کاهش می‌گذارد. از طرفی گرمای حاصله از شکافت در محیط راکتور، باید از منطقه سوخت زدوده شود و گر نه این گرما بقدری زیاد شود که میله‌های سوخت را ذوب کند. برای برطرف کردن این عیب باید کند کننده را دائماً خنک کرد. در راکتورهای با کند کننده مایع از همان کند کننده برای خنک کردن راکتور استفاده می‌شود. در این صورت ممکن است خنک کننده در قلب راکتور جاری باشد و یا از کند کننده جدا بوده و در لوله‌های فشار بین کند کننده و سوخت جاری باشد. در راکتورهای با کند کننده جامد، خنک کننده با کند کننده متفاوت بوده و در مانال‌های استوانه‌ای بین سوخت و کند کننده جاری می‌شود. خنک کننده به کمک پمپ یا دهنده در داخل قلب و مبادله کن‌های گرما جریان می‌یابد، جهت معمول جریان خنک کننده در درون قلب به سمت بالا است. در کل، ماده خنک کننده حرارت حاصل از شکست اورانیوم را از داخل قلب راکتور و دیگر قسمت‌هایی که حرارت در آنها تولید می‌شود، به خارج از راکتورهای حرارتی انتقال داده و توربین‌های مولد برق را به حرکت درمی‌آورند و پس از خنک شدن، مجدداً به داخل راکتور برمی‌گردند. این مواد در مدار بسته و محدودی عمل کرده و با خارج از محیط راکتور تماسی ندارند.

از ویژگی‌هایی که ماده خنک کننده باید داشته باشد، خواص ترمودینامیکی خوب همچون رسانندگی گرمایی، گرمای ویژه بالا و چسبندگی پایین آن است تا اینکه بتواند در انتقال حرارت مؤثر باشد. با بالا بودن ضریب انتقال حرارتی، حرارت به سهولت به خنک کننده انتقال یافته و جابه‌جا خواهد شد. بالا بودن گرمای ویژه خنک کننده نیز بدین منظور است که دارای توانایی نگهداری درجه حرارت‌های بالا به صورت مایع، حتی در شرایط فشار بالا باشد. از طرفی ویسکوزیته (چسبندگی) یا غلظت کم خنک کننده سبب کاهش مصرف کمتر برق برای پمپ کردن آن می‌شود. همچنین پایداری شیمیایی برای عدم برهم‌کنش شیمیایی با قسمت‌های دیگر راکتور و نیز سطح مقطع جذب نوترونی خیلی پایین، دو خاصیت

عمده ماده دیگر خنک کننده‌ها است. در این راستا، خنک کننده بایستی غیرخورنده یا خوردگی کمی داشته باشد، چون لوله‌ها و ساختارهای دیگر که با آن در تماس هستند باید سالم بمانند. همچنین با پایین بودن سطح مقطع جذب نوترونی خنک کننده، میزان تابش رادیواکتیویته در حین کارگردانی اپراتوری کاهش می‌یابد. نکته دیگری که باید به آن اشاره شود، این است که این ماده نباید در هنگام عبور از قلب راکتور، در اثر واکنش‌های گاما - نوترون رادیواکتیو شوند. نهایتاً اینکه یک ویژگی مهم ماده خنک کننده فراوان و ارزان بودن آن می‌باشد.

معمولاً از مایعات و گازها به عنوان خنک کننده در راکتورهای قدرت استفاده می‌شود. خنک کننده‌های گازی شامل اتانول، پروپان، پنتان، هلیوم و دی اکسید کربن می‌باشند که از این میان، عمدتاً دی اکسید کربن و هلیوم به عنوان خنک کننده مطرح هستند. هلیوم گازی است بی‌اثر، که دارای خواص ترمودینامیکی مناسبی بوده و خطر تابش هم ایجاد نمی‌کند. بنابراین ظاهراً می‌توان آن را به عنوان خنک کننده ایده‌آل راکتورهای گازی تلقی کرد؛ اما متأسفانه به سهولت قابل دسترسی نبوده و تهیه آن پرهزینه خواهد بود. در حال حاضر، کاربرد این گاز به عنوان خنک کننده راکتور، محدود به چند راکتور دمابالای گازی در آمریکا و آلمان است. فلزات مایع نیز، به دلیل داشتن خواص ترمودینامیکی مناسب، بخصوص رسانندگی گرمایی بالا، خنک کننده‌های بالقوه خیلی خوبی برای راکتورها هستند. سدیم، پتاسیم، لیتیم، جیوه و نیز آلیاژهای سدیم-پتاسیم همه مناسب هستند؛ ولی از میان آنها، سدیم مذاب به مقدار قابل ملاحظه‌ای، منحصراً در راکتورهای سریع زاینده مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت، آب سبک (معمولی) و آب سنگین نیز به عنوان خنک کننده‌های مایع مطرح می‌باشند. امروزه در اکثر راکتورهای تجاری آب به عنوان سردکننده مورد استفاده قرار گرفته و کپسول‌های میله‌ای شکل اورانیوم غنی شده جهت خنک شدن درون آب غوطه‌ور می‌باشند. البته در مواردی که آب و آب سنگین به عنوان خنک کننده بکار می‌روند، اغلب عمل کند کردن را نیز انجام می‌دهند. بایستی توجه داشت، در راکتورهای سریع نمی‌توان از آب سنگین و آب، حداقل به صورت مایع، به عنوان خنک کننده استفاده کرد. همچنین با توجه به این‌که برای جلوگیری از جوشیدن آب سبک فشار زیادی لازم است، بنابراین این ماده نمی‌تواند خنک کننده ایده‌آلی محسوب گردد.

۴-۲-۴- لایه‌های زایش و بازتابنده

اطراف بعضی از راکتورها، بویژه راکتورهای زاینده یک لایه ماده زاینده قرار دارد که طبقه زایش نامیده می‌شود. این ناحیه عمدتاً برای تبدیل یا زایش بکار می‌رود. نوترون‌هایی که از قلب راکتور فرار می‌کنند، وارد طبقه زایش شده و واکنش‌های تبدیلی مختلفی انجام می‌دهند. به علت وجود نوترون‌های سریع در این لایه، شکافت‌های متعددی انجام گرفته و حرارت ایجاد می‌نماید. از طرفی، اگر در

راکتورهای قدرت، قلب یا لایه زایش بدون حفاظ بوده و در معرض هوا باشد، تمام نوترون‌هایی که از قلب راکتور خارج می‌شوند، از دست رفته محسوب شده و هیچکدام به راکتور برنمی‌گردد. این پراکندگی نوترون‌ها در اطراف به عنوان تلفات راکتور محسوب می‌شود. در این حالت سعی می‌شود با قرار دادن یک لایه از کند کننده (گرافیت یا برلیوم) که دورتادور قلب راکتور را پوشانده، نوترون‌های منحرف شده را بدون جذب آنها مجدداً به داخل راکتور منعکس کرد. این ناحیه که مجاور قلب راکتور یا لایه زایش قرار دارد، لایه بازتابنده نامیده می‌شود. البته بایستی توجه داشت که تمام نوترون‌های خروجی به داخل راکتور برنمی‌گردند. در راکتورهایی که با مدراتور مایع کار می‌کنند، مدراتور خود عمل انعکاس را نیز انجام می‌دهد. در نهایت، برای اینکه بتوان گرمای محفظه راکتور که در نتیجه جذب اشعه گاما ایجاد می‌شود را کاهش داد، لازم است که در بعضی از راکتورها یک لایه ضخیم جاذب اشعه گاما، معمولاً از جنس آهن یا فولاد، به نام حفاظ حرارتی در بین بازتابنده و دیوار داخلی محافظ قرار داده شود. سطح مقطع جذب نوترون خیلی پایین، رسانندگی گرمایی بالا، استحکام خوب در دماهای بالا برای مقاومت در مقابل تنش حرارتی و در نهایت، تغییر شکل سوخت و فشار ناشی از انباشت پاره‌های شکافت در داخل حفاظ، از ویژگی‌های مواد محافظ (حفاظ‌های راکتور) محسوب می‌شوند.

۴-۵- میله‌های کنترل یا مهار کننده

میله‌های کنترل برای تنظیم توزیع قدرت در راکتور در زمان اپراتوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تولید کنترل شده انرژی باید تعداد عمل شکافت در داخل راکتور در واحد زمان ثابت بماند. برای دستیابی به فرآیند شکافت کنترل شده و یا متوقف کردن یک سیستم شکافت پس از شروع، لازم است که موادی قابل دسترس باشند که بتوانند نوترون‌های اضافی را جذب کنند. بنابراین، برای تنظیم و کنترل نرخ فرآیند شکافت، میله‌های کنترل کننده با قابلیت جذب نوترون‌های درون راکتور وارد محفظه می‌شوند. در راکتورهای هسته‌ای دو نوع کنترل آرام و سریع وجود دارد. هدف کنترل آرام جلوگیری از به وجود آمدن قدرت زیاد و برقراری قدرت متعادل راکتور است. از آنجا که میله‌های کنترل جاذب نوترون هستند، هر حرکت جزئی آنها باعث تغییر ضریب تکثیر دستگاه می‌شود. به عبارتی، این میله‌ها با جذب نوترون‌ها و ممانعت از افزایش ناگهانی تعداد نوترون‌ها در قلب راکتور، باعث کاهش شدت فرآیند شکافت می‌شوند. بیرون کشیدن میله‌ها باعث افزایش ضریب تکثیر و فرو بردن میله‌ها به داخل قلب راکتور و بین میله‌های سوخت، ضریب تکثیر را افزایش می‌دهد. اگر این میله‌ها کار اصلی خود را انجام ندهند، در زمانی کمتر از چند هزارم ثانیه، قدرت راکتور چند برابر شده و حالت انفجاری یا دیورژانس راکتور پیش می‌آید.

در نتیجه، با قرار دادن جذب کننده‌های نوترونی بین اورانیوم می‌توان میزان فرآیند شکافت و سرعت

آن و در نتیجه شدت گرمای تولید شده را کنترل کرد. این کار با تنظیم تعداد میله‌های کنترل درون راکتور هم امکان‌پذیر است. البته با استفاده از کند کننده‌های نوترون یا تغییر دادن نحوه قرارگیری میله‌های سوخت نیز می‌توان انرژی خروجی راکتور را کنترل کرد. در حالت کنترل سریع نیز، برای کاهش سریع قدرت راکتور و یا خاموش کردن راکتور از مجموعه میله‌های کنترل که ممکن است به صورت دستی توسط اپراتور یا از طریق کنترل اتوماتیک باشند استفاده می‌شود. در مواقع اضطراری، میله‌های کنترل با شتاب به صورت اتوماتیک، تا انتها به داخل میله‌های سوخت سقوط کرده و سبب خاموشی راکتور می‌گردند. راکتور به طور کلی در شرایط کاری خود در یکی از سه حالت فوق بحرانی، بحرانی و زیربحرانی قرار دارد. در حالت فوق بحرانی، عمل شکافت رو به افزایش است، در حالت بحرانی تعداد عمل شکافت ثابت می‌ماند و در حالت زیربحرانی نیز تعداد عمل شکافت رو به کاهش است. در این شرایط، میله‌های کنترل شرایط کاری و توان خروجی راکتور را کنترل می‌کنند.

اما مواد جاذب نوترون، برخلاف مواد دیگر مورد استفاده در محیط راکتور، باید سطح مقطع جذب بالایی نسبت به نوترون داشته باشند. مواد زیادی وجود دارند که سطح مقطع جذب آنها نسبت به نوترون بالاست؛ ولی ماده مورد استفاده باید دارای چند خاصیت مکانیکی و شیمیایی باشد که برای این کار مفید واقع شود. این میله‌ها می‌توانند از جنس عنصر کادمیم و یا بور باشند. بور متداول‌ترین ماده کنترل است. از بور به تنهایی نمی‌توان استفاده کرد؛ اما می‌توان آن را با فولاد درآمیخت، یا به صورت کربور محبوس در کپسول‌های فولادی (کاربید بور) مورد استفاده قرار داد. ایندیوم و کادمیوم نیز می‌توانند به عنوان مواد جاذب در میله‌های کنترل بکار گرفته شوند. ایندیوم و کادمیوم هر دو سطح مقطع جذب بالایی دارند؛ اما نقطه ذوب آنها پایین‌تر از آن است که بتوان از آنها در راکتورهای قدرت استفاده کرد. در نهایت، هافنیوم و گادولینیم نیز جاذب‌های نوترونی هستند. هافنیوم، دارای استحکام مکانیکی کافی و مقاومت خوبی در برابر خوردگی بوده و ماده کنترل کننده مناسبی است. گادولینیم نیز، در بعضی راکتورهای گازی پیشرفته به عنوان جاذب نوترونی بکار می‌رود. بایستی توجه داشت که در مرکز راکتورهای هسته‌ای، میله‌های سوخت و میله‌های کنترل به صورت یک در میان چیده می‌شوند.

۴-۲-۶- سیستم‌های حفاظت و ایمنی راکتور

عملیات اجرایی راکتور بر اساس نیازهای فیزیکی، شیمیایی، فرآیندهای مهندسی و اپراتوری، به عهده دستگاه‌ها و سیستم‌های کنترل (I&C) گذاشته شده است. وظایف سیستم‌های ایمنی I&C در راکتورهای هسته‌ای اندازه‌گیری، کنترل، تنظیم، چک کردن و حفاظت بوده و معمولاً به دو بخش ایمنی و اپراتوری یا کارگردانی تقسیم می‌شوند. حفاظت راکتور و محیط زیست به عهده سیستم‌های ایمنی گذاشته شده است. این سیستم‌ها غالباً در مواقع ضروری کار کرده و در دوران بهره‌برداری و خارج از

وضعیت اضطراری اکثراً غیرفعال هستند. قابلیت عملکرد این دستگاه‌های نصب شده اضافی دایماً به‌طور خود مونی‌تورینگ و تست‌های دوره‌ای بررسی می‌شوند. کنترل قدرت راکتور معمولاً در بخشی از I&C ایمنی ملحوظ و منظور می‌گردد. کنترل و دستگاه‌های اپراتوری نیز شامل تمام سیستم‌هایی است که کارگردانی و یا عملکرد طبیعی و بدون خطر یک راکتور هسته‌ای را تضمین و مطمئن می‌سازد. به همین دلیل ممکن است آن را به گروه‌های اجرایی و کارهای پیچیده‌ای که در خط فرآیند است تقسیم نمود. به عنوان مثال، یکی از اشکالات راکتورهای شکافت، این است که حتی پس از توقف واکنش شکافت، هنوز هم واپاشی‌های رادیواکتیوی انجام شده و حرارت زیادی آزاد می‌شود که می‌تواند راکتور را ذوب کند. البته سیستم‌های حفاظتی و پشتیبانی متعددی برای جلوگیری از این واقعه وجود دارند، با این حال ممکن است در اثر پیچیدگی‌های این سیستم، برهمکنش‌های پیش بینی نشده یا خطاهای عملیاتی مرگ آفرینی در شرایط اضطراری روی دهند.

وظیفه سیستم حفاظت از راکتور، اطمینان از آشکارسازی تمام حوادث پیش‌بینی شده در طراحی و اعتماد از امکان انجام عملیات حفاظتی می‌باشد. این برنامه و تمهیدات باید اطمینان دهد راکتور همیشه بطور ایمن کار می‌کند. حوادث بخش‌هایی از یک حادثه بزرگتر هستند که به کارگردان راکتور دیکته می‌کند که به دلایل ایمنی کار راکتور باید قطع شود. بنابراین داده‌های آنالوگ سیستم ارزیاب، فرآیندهای ویژه منجر به حادثه احتمالی را شناسایی کرده و از طریق یک سیستم دیگر علایمی را تولید می‌کند که نشان می‌دهد حدود آن نارسایی‌ها و یا اشکالات از حد معینی فراتر رفته است. این علایم واقعی آغاز انحراف یا لغزش راکتور از حالت طبیعی است که ترجیحاً تمام عملیات کارگردانی را تحت کنترل درآورده و متعاقباً فعال شدن تمام سیستم‌های مهندسی ایمنی را برای کنترل حادثه باعث می‌گردد. در تمام موارد، شناسایی و آشکارسازی مبتنی بر فرآیندهای متفاوتی است که هر نوع ابهامی را در رابطه با سیستم آشکارسازی حادثه و قصورهای رایج در سیستم ارزیابی داده‌ها رفع می‌کند. وسایل و ابزارهای اضافی تکمیلی چنان اطمینانی را فراهم می‌آورند که با حفاظت به موقع راکتور، آثار سوء حادثه‌های احتمالی کاهش یابد. وسایل اضافی مبتنی بر انجام وظیفه‌های انحصاری، به طور فیزیکی از نظر محل قرارگیری طوری از یکدیگر جدا شده‌اند که در مقابل حوادث بیرونی بتوانند سالم باقی بمانند. یک تابلو وضعیت سیستم حفاظت راکتور را در تمام زمان‌های کار عادی راکتور و شرایط اضطراری به طور بسیار روشن و واضح به پرسنل کارگردانی اعلام می‌نماید. تست‌های دوره‌ای با دستگاه‌های مخصوص تست کردن انجام می‌شوند. قصورهای آشکار و نهان در کانال‌های مربوطه توسط خود گزارشگر اعلام می‌شوند.

نوع دیگر حفاظت با نام حفاظت رادیولوژیکی و کنترل پرتوگیری وجود دارد که وظیفه آن عبارتست از کاهش پرتوگیری و آلودگی داخل راکتورها و محیط زیست در کمترین حد ممکن. سیستم‌های مختلف کنترل پرتوگیری، اندازه گیری و ثبت پرتوها را در تمام مناطق کنترل شده انجام می‌دهد. سیستم‌های

مختلف کنترل پرتوگیری امکان بررسی میزان دز تابش محلی، منطقه‌ای، محیط زیست، پرتوگیری پرسنلی و همچنین میزان نشت پسمان‌های مایع، گاز و جامد را فراهم می‌کند. سیستم‌های کنترل پرتوگیری، دستگاه‌های نصب شده دائمی هستند که بخشی از مجموعه سیستم I&C محسوب می‌شوند. مونیتورهای ثابت بررسی نمونه‌های محلی را بطور دائم و یا متناوب انجام می‌دهند و مونیتورهای متحرک شامل دستگاه‌های اندازه‌گیری پرتو در محل‌های متفاوت نصب هستند. در نهایت بایستی به این نکته اشاره نمود که مهمترین خاصیتی که راکتورهای جدید باید داشته باشد، قابلیت از کارافتادن خودکار به صورت «ایمن» است. این مطلب در یک راکتور بدین معنی است که اگر سیستم‌های کنترلی از کار افتاد، راکتور به صورت خودکار خاموش شود، به صورت ایمن حرارت ایجاد در هسته راکتور در حین فعل و انفعالات هسته‌ای خارج شده و راکتور بتواند جلوی نشت سوخت و زباله‌های رادیواکتیو موجود در هسته را از طریق ذخیره‌سازی در نوعی مخزن، بگیرد. راکتورهایی که مراحل فوق را اجرا کنند منفعل^۱ نامیده می‌شوند.

۴-۳- معیارهای طبقه بندی و انواع راکتورهای قدرت

راکتورهای قدرت برحسب نوع فرآیند شکاف، مصرف سوخت، نوع و درجه غنای سوخت، نوع خنک کننده، فاز سوخت کند کننده و نوع کاربرد، در انواع مختلفی می‌توانند طبقه‌بندی شوند. در این راستا، راکتورها برحسب نوع فرآیند شکافت (عملکرد) به راکتورهای حرارتی، سریع و میانی (واسطه)؛ برحسب مصرف سوخت به راکتورهای سوزاننده، مبدل و زاینده؛ برحسب نوع و درجه غنای سوخت به راکتورهای اورانیوم طبیعی و راکتورهای اورانیوم غنی شده با اورانیوم ۲۳۵؛ برحسب خنک کننده به راکتورهای گاز CO₂، مایع (آب) و فلز Be و بالاخره برحسب فاز سوخت کند کننده‌ها به راکتورهای همگن، ناهمگن تقسیم می‌شوند. یکی از این طبقه بندی، نوع سیال خنک کننده بکار گرفته شده در راکتور قدرت است. در کل، راکتورهای قدرت برحسب خنک کننده به راکتورهای گاز CO₂، مایع (آب) و فلز تقسیم می‌شوند. راکتورهای آب سبک (LWR) همچون راکتورهای BWR، WWER و PWR از آب سبک به عنوان خنک کننده استفاده می‌کنند. راکتورهای گازگرافیت همچون راکتورهای HTGR، AGR و GCR نیز از گاز به عنوان خنک کننده بهره می‌گیرند. در نهایت، راکتور PHWR که نوع کانادایی آن CANDU است، از آب سنگین به عنوان خنک کننده استفاده می‌کند. همچنین، سدیم مایع در راکتورهای FBR، آب سبک در راکتورهای LWGR به عنوان خنک کننده بکار می‌روند. البته راکتورهایی نیز وجود دارند که دارای سیستم خنک شونده با مواد آلی هستند که در آنها از یک سری مواد آلی مایع مخصوصاً از مخلوط‌هایی از دی‌فنیل و دی‌فنیل اکسید به عنوان یک عامل انتقال حرارت مناسب استفاده شده است. البته به دلایلی همچون عدم آشنایی کامل از خاصیت انتقال حرارت این دسته

1. passive

مواد، خواص انتقال حرارت ضعیف‌تر این مواد در مقایسه با آب، حساسیت مواد آلی مخصوصاً نسبت به تابش، این نوع راکتورها عمومی نشده‌اند. همچنین یکی از مهمترین طبقه‌بندی‌های مطرح در راکتورهای ثدرت، تقسیم‌بندی آنها برحسب عملکرد و سرعت فرآیند شکافت می‌باشد. در این راستا، راکتورهای هسته‌ای برحسب عملکرد و سرعت فرآیند شکافت، به راکتورهای حرارتی^۱، سریع و میانی (واسطه) تقسیم می‌شوند.

راکتورهای گرمایی یا حرارتی، سرعت کمی داشته و فرآیند شکافت و تولید گرما در آنها به آرامی انجام می‌شود. در راکتورهای حرارتی، از نوترون کند شده که نوترون حرارتی نامیده می‌شود، برای شکافت هسته‌ای استفاده می‌شود. در شکافت اورانیوم ۲۳۵، در اثر واکنش نوترون کند یا حرارتی، ۲ الی ۳ تا نوترون سریع ایجاد می‌شود که این نوترون‌های سریع حتماً باید کند شوند. برای برقراری واکنش زنجیره‌ای از موادی به نام کند کننده نوترون استفاده می‌کنند که وظیفه آنها، کاهش انرژی نوترون‌های پرانرژی (سریع) حاصل از شکافت هسته (انرژی متوسط ۲Mev) تا سطح انرژی تعادل گرمایی نوترون‌ها با محیط واکنش (انرژی متوسط ۰/۰۲ev) است. بنابراین در راکتورهای حرارتی، از کند کننده و خنک کننده استفاده می‌شود؛ در حالی که در راکتورهای سریع، ماده کند کننده لازم نیست؛ اما ماده خنک کننده لازم است. موادی که به عنوان کند کننده در راکتورهای با نوترون حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً آب سبک (H₂O)، آب سنگین (D₂O) و گرافیت (C) می‌باشند. با توجه به خواص کند کنندگی و هسته‌ای بسیار متفاوت مواد فوق، نسبت حجم کند کننده مورد نیاز به حجم سوخت (نسبت کند کنندگی) برای سه ماده یاد شده، تقریباً به ترتیب ۲/۵، ۲۵ و ۵۰ است. بدین ترتیب انتخاب نوع کند کننده در طرح و مشخصات فنی این نوع راکتورها نقش کلیدی دارد. در این راستا، راکتورهای حرارتی را میتوان به سه خانواده راکتورهای آب سبک شامل راکتورهای PWR، BWR و D₂G، راکتورهای آب سنگین شامل راکتورهای SGHWR و CANDU و راکتورهای گرافیتی شامل راکتورهای Magnox، AGR، RBMK و PBMR تقسیم نمود. راکتورهای حرارتی که اکثراً برای استفاده‌های صلح‌آمیز بکار گرفته می‌شوند، اکثریت راکتورهای تجارتي موجود را تشکیل می‌دهند.

لازم به یادآوری است که در راکتورهای با نوترون‌های حرارتی نمی‌توان اورانیوم طبیعی را مورد استفاده قرار داد، مگر آن‌که مواد ساختاری و سیال خنک کننده که گرمای تولیدی را برای راه اندازی توربین آلترناتور انتقال می‌دهد، جذب‌های اتلافی بسیار زیادی را سبب نشوند. در بسیاری از راکتورهای حرارتی نوع ماده ساختاری و سیال خنک کننده، یک غنای سبک (در حدود ۳ درصد) از ماده قابل احتراق را الزام می‌دارد. در مقابل، راکتورهای سریع^۲ دارای فرآیند شکافت و تولید گرمای با سرعت زیاد هستند.

1. Termal Reactor
2. Fast Reactor

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۱۷

در راکتورهای تند (سریع)، برخلاف راکتورهای حرارتی از نوترون سریع، برای فرآیند شکافت هسته‌ای استفاده شده و بالطبع، به کند کننده احتیاج نخواهد بود. راکتورهای سریع نیز معمولاً به دو دسته راکتورهای سریع LMFR و راکتورهای سریع BFR تقسیم می‌شوند. در راکتورهای LMFR، ماده کند کننده لازم نیست؛ ولی خنک کننده فلز مذاب سدیم است. در این راکتور، پلوتونیوم ۲۳۹ به عنوان سوخت استفاده شده و دارای تکنولوژی خیلی پیشرفته‌ای می‌باشد. در راکتورهای BFR نیز، اورانیوم ۲۳۸ به عنوان سوخت استفاده می‌شود. در این راکتور، معمولاً هدف تولید پلوتونیوم یا اورانیوم ۲۳۳ از اورانیوم طبیعی است. در این حالت، در اطراف راکتور یک لایه می‌گذارند برای اینکه هم حفاظ باشد و هم در اثر برخورد نوترون‌های سریع به اورانیوم، آن را به پلوتونیوم تبدیل کند و پس از مدتی، دیواره‌ها را خراب کرده و پلوتونیوم را استخراج می‌کنند. پلوتونیوم تولید شده، برای مصارف صنعتی یا بمب‌های هسته‌ای یا به عنوان سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای بکار گرفته می‌شود. در نهایت، راکتورهای میانی یا واسطه نیز دارای عملکردی مابین عملکرد راکتورهای حرارتی و سریع می‌باشند.

در نهایت، بسته به راکتورهای حرارتی از کانال‌های سوخت فشرده شده، مخزن بزرگ بخار یا خنک کننده گازی استفاده کنند، نیز می‌توان آنها را به سه دسته تقسیم کرد. الف) کانال‌های تحت فشار در راکتورهای RBMK و CANDU استفاده می‌شوند و می‌توان آنها را در حال کار کردن راکتور سوخت-رسانی کرد. ب) مخزن بخار پرفشار داغ، که رایج‌ترین نوع راکتور بوده و در اغلب نیروگاه‌های هسته‌ای و راکتورهای دریایی (کشتی، ناو هواپیمابر یا زیردریایی) از آن استفاده می‌شود. این مخزن می‌تواند به عنوان لایه حفاظتی نیز عمل کند. ج) خنک سازی گازی: در این راکتورها بجای آب، از یک سیال گازی شکل برای خنک کردن راکتور استفاده می‌شود. این گاز در یک چرخه گرمایی با منبع حرارتی راکتور قرار می‌گیرد و معمولاً از هلیوم برای آن استفاده می‌شود، هرچند که نیتروژن و دی‌اکسید کربن نیز کاربرد دارند. در برخی راکتورهای جدید، راکتور به قدری گرما تولید می‌کند که گاز خنک‌کن می‌تواند مستقیماً یک توربین گازی را بچرخاند، در حالی که در طراحی‌های قدیمی‌تر گاز خنک‌کن را به یک مبدل حرارتی می‌فرستادند تا در یک چرخه دیگر، آب را به بخار تبدیل کند و بخار داغ یک توربین بخار را بگرداند. در مجموع، از ترکیب کند کننده‌های سه‌گانه و سیالات خنک کننده، طرح‌های متنوعی از راکتور به دست می‌آید که نمونه‌های متداول امروزی در جدول (۴-۱) خلاصه شده‌اند و در بخش بعدی به معرفی آنها اختصاص دارد. در این جدول، همچنین نوع سوخت مورد استفاده در راکتورها از نظر فرم شیمیایی (اکسید، کربید و فلز) و غنای آن ذکر شده است.

جدول (۴-۱): طبقه بندی انواع راکتور قدرت

نوع نوترون	نوع راکتور	غناي سوخت	نوع سوخت	سیال خنک کننده	کند کننده
راکتورهای با نوترون حرارتی	آب سبک تحت فشار PWR	۳/۵	UO ₂	H ₂ O	H ₂ O
	آب سبک جوشان BWR	۲/۵	UO ₂	H ₂ O	H ₂ O
	آب سنگین تحت فشار PHWR (CANDU)	طبیعی	UO ₂	D ₂ O	D ₂ O
	آب سنگین با خنک کننده آب سبک جوشان HWBWR	۱/۷-۲/۳	UO ₂	H ₂ O	D ₂ O
	آب سنگین با خنک کننده گازی HWGCR	۱/۳	U و UO ₂ فلزی	CO ₂	D ₂ O
	گرافیت - گاز با اورانیوم طبیعی UnGG/Magnox	طبیعی	U فلزی	CO ₂	Gr
	گرافیت - گاز پیشرفته AGR	۱/۷-۲/۲	UO ₂	CO ₂	Gr
	گرافیت - گاز با درجه حرارت بالا HTR	۷-۱۰	UC, UC ₂ , UO ₂ , ThC ₂	He	Gr
	گرافیت - آب سبک LWGR* (RBMK)	۲/۴	UO ₂	H ₂ O	Gr
	زاینده سریع با فلز مذاب LMFBR	۱۵-۲۰	PuO ₂ /UO ₂	Na, K	-
با نوترون سریع FBR	زاینده سریع گازی GCFBR	۱۵-۲۰	PuO ₂ /UO ₂	He	-

۴-۳-۱- راکتورهای آب سبک

راکتورهای آب سبک (LWR)^۱ متداول‌ترین نوع راکتور در سطح جهان هستند. این راکتورها حدود ۷۵ درصد راکتورهای موجود در سطح بین‌المللی را تشکیل داده و دارای بیشترین تجربه بهره‌برداری هستند (بالغ بر ۴۵۰۰ راکتور-سال). در این راکتورها، از آب معمولی (سبک) توأمان به عنوان مدراتور (کند کننده) و خنک کننده استفاده می‌شود که مهمترین مشخصه عمومی این راکتورها محسوب می‌شود. این راکتورها نسبت به ابعاد خود، در مقایسه با سایر راکتورهای حرارتی، توان تولید قدرت بیشتری دارند که این امر، به معنای قابلیت طراحی در ابعاد کوچکتر این راکتورها برای تولید قدرت مساوی با سایر

1. Light Water Reactors

راکتورهای حرارتی بوده و کاهش هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه را به دنبال خواهد داشت. بایستی توجه داشت، هرچند آب سبک علاوه بر ارزان و فراوان بودن، یک سیال شناخته شده صنعتی با ظرفیت برداشت حرارت خوب و سهولت استفاده محسوب می‌گردد؛ اما استفاده از آن در این راکتورها، منجر به بروز برخی اشکالات خواهد شد. اولاً جذب نوترونی بالای آب سبک نسبت به سایر کاندیدها (حدود ۱۰ برابر ظرفیت و ۶۰۰ برابر آب سنگین) موجب می‌شود بازدهی نوترونیک در این راکتورها پایین‌ترین مقدار را داشته و استفاده از اورانیوم غنی شده با غنای ۳ تا ۴ درصد را الزامی نماید. بنابراین، این راکتورها از اورانیوم ۲۳۵ با غنای ۳ تا ۴ درصد به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. ثانیاً، آب سبک (همچنین آب سنگین)، به دلیل داشتن نقطه جوش بالا، در مقایسه با سیالات گازی، دارای بازده ترمودینامیکی نامناسب‌تری می‌باشد. بویژه با توجه به اینکه نیروگاه‌های آبی اکثراً با بخار اشباع (سیکل رانکین) کار می‌کنند، بازدهی ترمودینامیکی این نیروگاه‌ها بسیار پایین و حدود ۳۳-۳۲ درصد است. راکتورهای آب سبک عمدتاً در دو طرح راکتورهای با آب تحت فشار (PWR) و راکتورهای با آب جوشان (BWR) توسعه یافته‌اند.

۴-۱-۱-۳-۱- راکتورهای آب تحت فشار^۱ (PWR)

راکتور آب تحت فشار از یک ساختار فلزی بنام دیگ فشار^۲ تشکیل شده که در آن، آب به عنوان کاندید و سیال خنک‌کننده، از پایین وارد مجتمع‌های سوخت شده، بخشی از انرژی گرمایی میله‌های سوخت را جذب کرده و در یک مدار بسته و تحت فشار حدود ۱۲۰ الی ۱۶۰ اتمسفر به نام مدار اولیه یا مدار خنک‌کننده گردش کرده و حرارت برداشت شده از راکتور قدرت را به یک مبدل حرارتی (مولد بخار^۳) منتقل می‌کند. درجه حرارت آب در مدار اولیه که اصطلاحاً به آن «آب اولیه» گفته می‌شود، حدود ۳۰۰ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد است، در این شرایط آب به جوش نرسیده و بصورت مایع باقی می‌ماند. انرژی گرمایی در مولد بخار، به آبی که با فشار حدود ۶۰ اتمسفر در مدار ثانویه (سیکل ترمودینامیکی) این مولد در جریان می‌باشد و اصطلاحاً «آب ثانویه» نامیده می‌شود، انتقال می‌یابد. به این ترتیب آب ثانویه به جوش آمده و با بخار خود توربین و ژنراتور را به حرکت در می‌آورد. آب اولیه که همواره به صورت مایع است، دوباره بوسیله پمپ‌هایی به داخل راکتور رانده شده و مجدداً از طریق شکافت‌های هسته‌ای تا حدود ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد داغ می‌گردد. طراحی این راکتور طوری است که ۱۵-۱۲ درصد آب در بالای قلب به صورت بخار وجود دارد، لذا در این منطقه، خاصیت کاندگی و راندمان نوترون‌های موثر کمتر خواهد بود. برای تنظیم فشار در مدار اولیه راکتور از دستگاهی بنام فشارنده یا

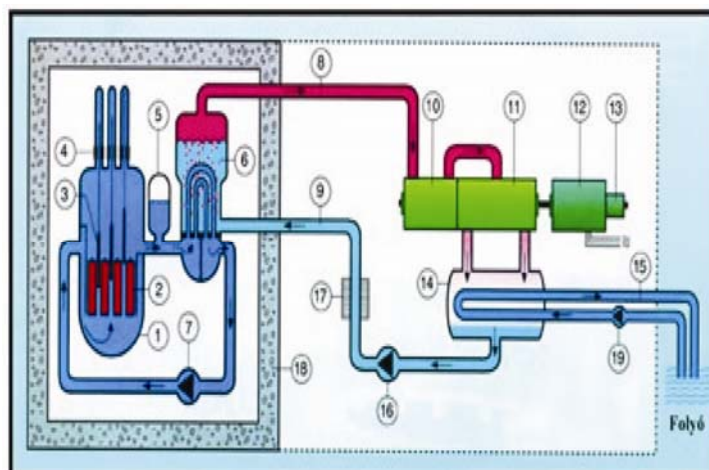
1. Pressurized Water Reactors

2. Reactor Vessel

3. Steam generator

منبع انبساط^۱ استفاده می‌شود که با تولید حرارت بوسیله مقاومت‌های الکتریکی و سرمایه‌ش بوسیله دوش‌های آب سرد، فشار آب را در سطح یکنواختی ثابت نگاه می‌دارد.

- | | | |
|------------------------|----------------------------|-------------------|
| ۱- محفظه راکتور | ۲- سوخت | ۳- میله‌های کنترل |
| ۴- هادی میله‌های کنترل | ۵- فشارنده | ۶- مولد بخار |
| ۷- پمپ چرخشی | ۸- بخار تازه | ۹- تزریق کننده آب |
| ۱۰- توربین فشار بالا | ۱۱- توربین فشار پایین | ۱۲- ژنراتور |
| ۱۳- محرک | ۱۴- چگالنده | ۱۵- خنک کننده آب |
| ۱۶- پمپ تغذیه آب | ۱۷- پیش گرم کننده آب تغذیه | ۱۸- حفاظ بتونی |
| ۱۹- پمپ آب خنک کننده | | |



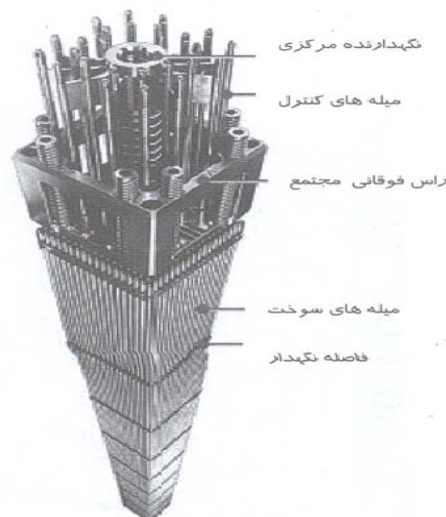
شکل (۴-۴): ساختمان یک راکتور آب تحت فشار

مزیت عمده این طرح، حفظ چگالی فیزیکی و قدرت کند کنندگی آب است که همواره در فاز زیراشباع باقیمانده و موجب می‌شود که علاوه بر برداشت مناسب حرارت از قلب، این راکتور دارای بالاترین قدرت ویژه (معادل 100 MW/m^3) در میان راکتورهای حرارتی باشد. آب داخل این راکتور نیز مانند راکتور آب جوشان، به عنوان مدراتور به کار می‌رود. در یک PWR، نوترون‌ها در پی برخورد با مولکول‌های آب خنک ساز، انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند؛ به طوری که پس از ۸ تا ۱۰ برخورد (البته به طور متوسط) با محیط هم‌دم می‌شوند. ضمناً این آب مسئولیت تنظیم حرارت را نیز برعهده دارد. اگر راکتور بیش از حد گرم شود، غلظت آب اولیه کاهش یافته و تمام سیستم دوباره خنک می‌شود. پس خود سیستم

PWR دارای یک سیستم خود تعادلی در راکتور است و تضمین می‌کند توان راکتور در کمترین میزان مورد نیاز برای تأمین گرمای سیستم بخار ثانویه است. همچنین مدار اولیه بسته در این راکتور، خود به عنوان یک حصار ایمنی اضافی در مقابل نشت مواد رادیواکتیو به محیط عمل کرده و مزایای دیگری از قبیل کنترل بهتر راکتور و کنترل مستقل شیمی آب را نیز دارا می‌باشد. این راکتورها همچنین به دلیل استفاده از آب زیراشباع و منفی بودن کلیه عکس‌العمل‌های حرارتی، از پایداری و ایمنی خوبی برخوردارند. مشکل اصلی راکتورهای آب تحت فشار، فشار بالای آب در مدار اولیه است، به طوری که کلیه تجهیزات این مدار از جمله مجتمع‌های سوخت که در قلب راکتور قرار دارند باید بتوانند این فشار را تحمل کنند. برای این منظور علاوه بر جمع‌آوری ۳۵ سال تجربه بهره‌برداری از این راکتورها، تحقیقات زیادی در زمینه متالوژی مواد و جوش دادن تجهیزات و لوله‌ها انجام گرفته است.

در این راکتورها، سوخت هسته‌ای بصورت مجتمع‌های سوخت^۱ چهار وجهی که کنار هم چیده شده و از میله‌های سوخت^۲ با ضخامت حدود یک سانتیمتر تشکیل یافته‌اند، در قلب راکتور قرار گرفته است. در این راکتورها معمولاً از اکسید اورانیوم به غنای ۳-۴ درصد و برخی اوقات از مخلوط اورانیوم و پلوتونیوم (MOX) استفاده می‌شود. آلیاژی از زیرکونیم غلاف این میله‌ها را تشکیل می‌دهد. مجتمع سوخت راکتورهای BWR هریک شامل ۹۰-۱۰۰ میله سوخت و تعداد مجتمع‌های سوخت ۷۵۰ مجامع می‌باشد. بنابراین اورانیم بارگذاری شده در قلب این راکتورها حدود ۱۴۰ تن می‌باشد. سوخت‌گیری این راکتورها در حال توقف و به میزان سالانه حدود یک‌سوم سوخت اولیه صورت می‌گیرد. تنظیم قدرت این راکتورها و خاموش‌سازی آنها با روش‌هایی همچون بالا و پایین بردن میله‌های کنترل کادیم‌دار در داخل مجتمع‌های سوخت، غنی‌سازی کم‌شدت یا پرشدت آب اولیه با محلول بورون در شکل اسید بوریک (که جذب‌کننده قوی نوترون‌ها می‌باشد) و نیز به وسیله اکسید گادولینوم که بصورت مخلوط همگنی با سوخت همراه است، انجام می‌شود. در این راکتور، ساختارهای بتنی دیگ فشار، مولدهای بخار و سایر تجهیزات را از یکدیگر جدا می‌کند. کلیه این ساختارها و تجهیزات در ساختار دیگری بنام پوشش ایمنی^۳ قرار دارند. این پوشش موجب می‌شود که در صورت بروز حادثه مواد رادیواکتیو به محیط پخش نشود.

1. Fuel assembly
2. Fuel rod
3. Reactor containment

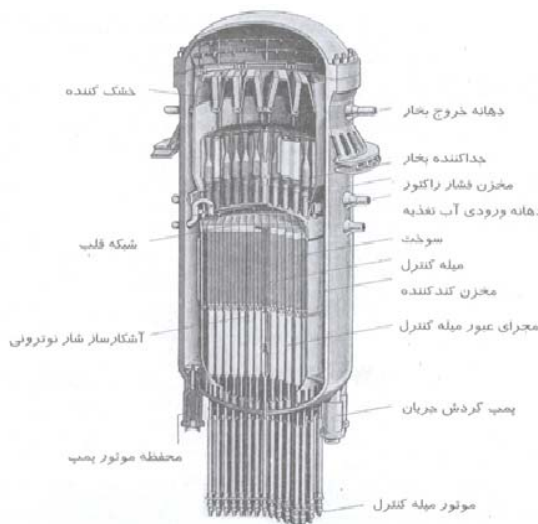


شکل (۴-۵): نمایی از یک مجتمع سوخت راکتور آب سبک تحت فشار

راکتورهای PWR که حدود ۸۵ درصد راکتورهای آب سبک را تشکیل می‌دهند، تا امروز در اندازه‌های ۳۰۰ تا ۱۴۰۰ مگاواتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای پیشرانس زیردریایی، ناوهای دریایی و کشتی‌ها نیز از این نوع راکتورها استفاده می‌گردد. یک نوع از این راکتورها، راکتور هسته‌ای نسل دوم ویژه ناوهای جنگی ساخت جنرال الکتریک یا اصطلاحاً راکتور D2G می‌باشد. این راکتور برای تولید حداکثر ۱۵۰ مگاوات انرژی الکتریکی و عمر مفید ۱۵ سال مصرف معمولی طراحی شده است. در این راکتور برای مخزن بخار دو راکتور وجود دارد و طوری طراحی شده که بتوان هر دو اتاق توربین را با یک راکتور به راه انداخت. اگر هر دو راکتور فعال باشند، ناو به سرعت ۳۲ گره می‌رسد. اما اگر یک راکتور فعال بوده و توربین‌ها نیز متصل به هم باشند، سرعت ناو به ۲۵ تا ۲۷ گره خواهد رسید و نهایتاً اگر فقط یک راکتور فعال بوده، ولی توربین‌ها جدا باشند، سرعت فقط ۱۵ گره خواهد بود. البته راکتورهایی که برای پیشرانس کشتی‌ها و زیردریایی‌ها طراحی می‌شوند به اورانیوم با غنای بالا احتیاج دارند. بنابراین سوخت این راکتورها دارای حجم کمتری بوده و تعداد تعویض‌پذیری سوخت آنها نیز کمتر می‌باشد. همچنین از گرمای تولیدی در راکتور PWR به عنوان سیستم گرم کننده درنواحی قطبی نیز استفاده شده است. این نوع راکتور، رایجترین نوع راکتورهای هسته‌ای است و در حال حاضر، بیش از ۲۳۰ عدد از آنها در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید برق و صدها راکتور دیگر برای تأمین انرژی تجهیزات دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. راکتور روسی VVER نیز که قرار است در نیروگاه بوشهر مورد استفاده قرار گیرد، از نوع راکتورهای آب سبک می‌باشد و تفاوت عمده آنها با PWR غربی در مولد بخار آن می‌باشد که به شکل افقی است.

۴-۱-۲- راکتورهای آب جوشان^۱ (BWR)

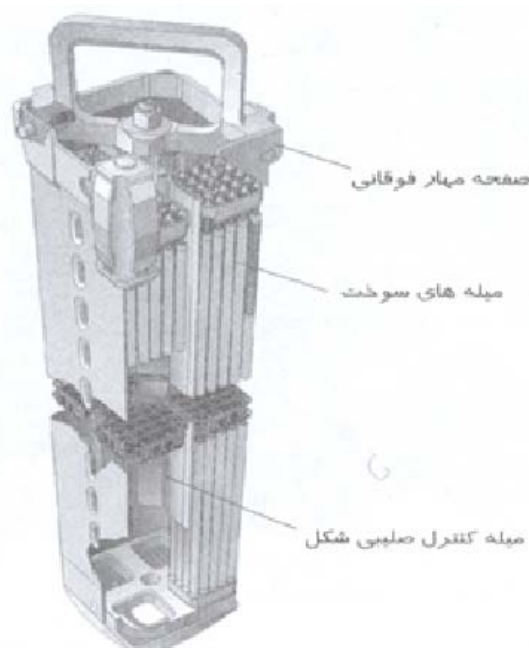
طراحی این نوع راکتور (BWR) شباهت زیادی به PWR دارد، بجز اینکه در این طرح، با توجه به یکسان بودن سیال خنک کننده راکتور و سیال سیکل ترمودینامیکی (آب سبک)، مدار اولیه و ثانویه تلفیق شده است. در این راکتور، فشار آب در BWR کمتر از PWR است، به طوری که در بیشترین مقدار به ۷۵ برابر فشار جو می‌رسد (۷/۵ مگاپاسکال) و بدین ترتیب آب در دمای ۲۸۵ درجه سانتیگراد، به حالت اشباع بین فاز آب و بخار درمی‌آید. به این ترتیب نیاز به مولد بخار نبوده و بخار اشباع تولید شده در راکتور مستقیماً وارد توربین می‌شود. در این راکتورها تعداد پمپ‌های اصلی که آب و بخار در آنها جریان دارند کمتر از راکتورهای آب تحت فشار است. حذف اجزاء مدار اولیه در این راکتور، در مقایسه با راکتورهای PWR موجب سادگی طرح راکتور و همچنین ساختمان نیروگاه می‌شود. در مقابل این مزیت، ورود بخار رادیواکتیو به توربین و سیکل ترکیبی، اعمال ملاحظات حفاظت شدیدتری در برابر اشعه را نسبت به سایر نیروگاه‌های اتمی ایجاب می‌کند. در همین راستا، برای جلوگیری از آسیب به ساختار بتنی اطراف راکتور و پخش مواد رادیواکتیو هنگام بروز حادثه، فضاهایی بنام اطاق پایین آورنده فشار^۲ در پایین ساختمان راکتور پیش بینی شده‌اند. این اطاق‌ها که نیمی از آنها مملو از آب است می‌تواند فشار بخار جمع شده در اطراف راکتور را بطور سریع کاهش دهد. راکتورهای آب جوشان از نظر قدرت نصب شده قابل بهره‌برداری در مقام دوم بعد از راکتورهای آب تحت فشار قرار دارند.



شکل (۴-۶): نمایی از داخل یک راکتور آب جوشان

1. Boiling Water Reactors
2. Pressure Suppression Chamber

مجموعه‌های سوخت راکتور آب جوشان از ساختارهایی تشکیل می‌شود که در آنها 7×7 یا 8×8 میله سوخت در نزدیکی هم قرار گرفته‌اند. همچنین در یک راکتور BWR، حدود ۸۰۰ مجموعه سوخت در کنار همدیگر قرار داده می‌شود. بنابراین حدود ۱۴۰ تن اورانیوم در قلب این نوع راکتور ذخیره می‌شود. برای جلوگیری از نوسانات مکانیکی میله‌های سوخت، این میله‌ها در یک ساختار فلزی بصورت قوطی قرار می‌گیرند. سوخت این راکتورها را نیز اکسید اورانیوم غنی شده تشکیل می‌دهد. در حالت کلی دو مکانیسم شامل، استفاده از میله‌های کنترل و تغییر جریان آب درون راکتور، برای کنترل BWR وجود دارد. بالا بردن یا پایین آوردن میله‌های کنترل، روش معمولی کنترل توان راکتور در حالت راه اندازی راکتور تا رسیدن به ۷۰ درصد حداکثر توان است. تغییرات جریان آب درون راکتور نیز زمانی برای کنترل راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد که راکتور بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد توان خود کار می‌کند. اگر جریان آب درون راکتور افزایش یابد، حباب‌های بخار در حال جوش سریع‌تر از قلب راکتور خارج شده و آب درون قلب راکتور بیشتر می‌شود. افزایش مقدار آب به معنی افزایش کندسازی نوترون و جذب بیشتر نوترون‌ها از سوی سوخت و به تبع آن، افزایش توان راکتور می‌باشد. با کاهش جریان آب درون راکتور، حباب‌های بیشتری در راکتور باقی مانده، سطح آب کاهش می‌یابد و به دنبال آن، کندسازی نوترون‌ها و جذب نوترون هم کاهش یافته و در نهایت توان راکتور کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۷): نمایی از یک مجتمع سوخت راکتور آب جوشان

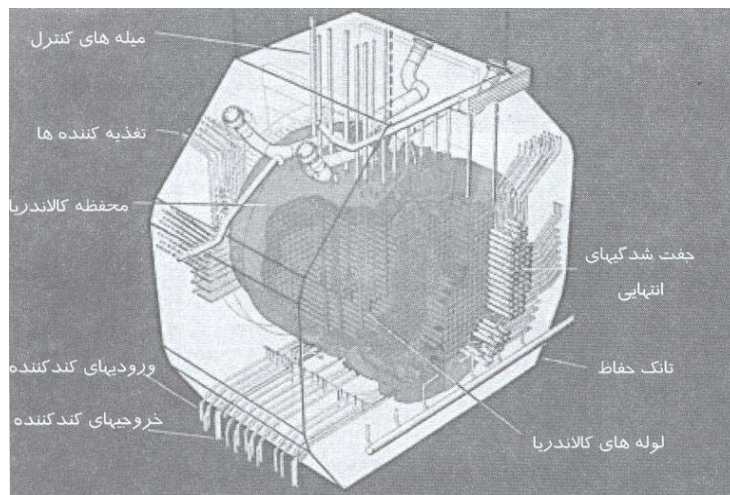
بخار تولید شده در قلب راکتور از شیرهای جدا کننده بخار و صفحات خشک کن (برای جذب هرگونه قطرات آب داغ) عبور کرده و مستقیماً به سمت توربین‌های بخار که بخشی از مدار راکتور محسوب می‌شوند، می‌رود. آب اطراف راکتور همواره در معرض تابش و آلودگی رادیواکتیو است و از آنجا که توربین هم در تماس مستقیم با این آب است، باید پوشش حفاظتی داشته باشد. اغلب آلودگی‌های درون آب عمر کوتاهی دارند (مانند N^{16} که بخش اعظم آلودگی‌های آب را تشکیل می‌دهد و نیمه عمرش تنها ۷ ثانیه است)، بنابراین مدت کوتاهی پس از خاموش شدن راکتور می‌توان به قسمت توربین وارد شد. در راکتور BWR، افزایش نسبت بخارآب به آب مایع درون راکتور، موجب کاهش گرمای خروجی می‌شود. با این حال، یک افزایش ناگهانی در فشار بخار، سبب بروز یک کاهش ناگهانی در نسبت بخار به آب مایع درون راکتور شده که خود، سبب افزایش توان خروجی می‌شود. این شرایط و دیگر حالت‌های خطرناک موجب شده است از سیستم کنترلی اسید بوریک (بورون) نیز استفاده شود، بدین شکل که در سیستم پشتیبان خاموش کننده اضطراری، محلول اسید بوریک با غلظت بالا به چرخه خنک کننده تزریق می‌شود. خوبی این سیستم این است که اسید بوریک یک خورنده قوی است و معمولاً در PWR سبب می‌شود تلفات ناشی از خوردگی قابل توجه باشد. در بدترین شرایط اضطراری که تمام سیستم‌های امنیتی از کار افتاد، هر راکتور به وسیله یک ساختمان حفاظتی از محیط اطراف جدا شده است.

۴-۳-۲- راکتورهای آب سنگین^۱ (HWR)

این راکتورها از آب سنگین توأمان به عنوان کد کننده و سیال خنک کننده استفاده می‌کنند. ویژگی جذب نوترونی بسیار کم آب سنگین، موجبات بهترین استفاده از سوخت اورانیوم طبیعی را در یک چرخه سوخت یکبار گذر و بدون نیاز به عملیات بازفرآوری سوخت مصرف شده بعد از راکتور فراهم می‌آورد. این مشخصه همچنین اجازه می‌دهد که این راکتور، علاوه بر سوخت اورانیوم طبیعی، قابلیت انعطاف منحصر به فردی در استفاده از انواع چرخه سوخت هسته‌ای، همچون اورنیوم کمی غنی شده یا اورانیوم مصرف شده سایر نیروگاه‌ها، چرخه U/Pu با بازگردانی Pu در راکتور و نیز چرخه توریم زاینده داشته باشد. همچنین، سوخت‌گیری در حال کار^۲ در این راکتور موجب می‌شود که علاوه بر کنترل بهتر توزیع قدرت در راکتور و امکان تعویض سوخت‌های معیوب (ایمنی بهتر در بهره‌برداری)، این راکتور از ضریب ظرفیت بسیار بالاتری (بیشتر از ۹۰ درصد) در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها برخوردار باشد. در طرح این راکتورها، دو تکنولوژی متفاوت؛ راکتورهای با لوله‌های تحت فشار^۳ در کانادا و هند و با دیگ تحت فشار^۴ در آلمان

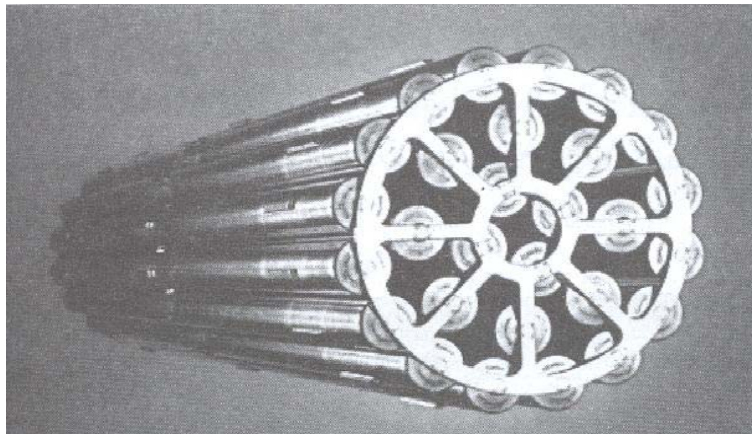
1. Heavy Water Reactors
2. On-load refueling
3. Pressure Tube
4. Pressure Vessel

و آرژانتین بکار گرفته شده‌اند. این نوع راکتورها به راکتورهای آب سنگین تحت فشار^۱ PHWR مشهورند. در ضمن، با توجه به نزدیک بودن مشخصه‌های ترمودینامیکی آب سبک و آب سنگین، بازدهی ترمودینامیکی این راکتورها نیز بسیار پایین و در حدود ۳۰ درصد است.



شکل (۴-۸): نمایی کلی از راکتور CANDU برای تامین بخار یک نیروگاه آب سنگین تحت فشار

چند نوع از این راکتورها ساخته شده‌اند ولی نوع کانادایی آن که Candu نامیده می‌شود، به دلیل داشتن کارایی بالا، بیشتر از انواع دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. در راکتورهای Candu از نوع راکتورهای آب سنگین تحت فشار است، بجای دیگ تحت فشار از لوله‌های تحت فشار استفاده می‌شود. لوله‌های تحت فشار با ضخامت جداره ۵ میلیمتری می‌توانند فشار زیادی را تحمل کنند در حالی که در دیگ‌های تحت فشار، جدار دیگ از فولادی به ضخامت حدود ۲۸۰ میلیمتر ساخته می‌شود. فشار آب سنگین در داخل لوله‌ها که انرژی حرارتی میله‌های سوخت را به مولد بخار انتقال می‌دهد ۸۰ اتمسفر است. این لوله‌ها بصورت افقی در داخل قلب راکتور قرار گرفته‌اند. در این راکتورها، مجتمع‌های سوخت در داخل یک مخزن مملو از آب سنگین قرار دارند. آب سنگین این مخزن برای کند کردن نوترون‌ها بکار می‌رود. علاوه بر این در CANDU بجای آنکه سوخت را فقط در یک محفظه ویژه نگهداری کرد، می‌تواند در تعداد زیادی محفظه قرار دارد و به همین خاطر این نوع راکتورها می‌توانند در حین فعالیت سوخت‌گیری کنند و در نتیجه در مقایسه با راکتورهای آب‌سبک بهینه‌تر هستند. در این نوع راکتورها، از اورانیوم طبیعی به عنوان سوخت و از آب سنگین به منظور کند کننده و خنک کننده راکتور استفاده می‌شود.



شکل (۴-۹): نمایی از یک مجتمع سوخت راکتور CANDU

راکتورهای آب سنگین، پس از راکتورهای آب سبک، دومین خانواده راکتورهای با نوترون حرارتی هستند که تکنولوژی آزموده و مطمئن و تجربه بهره‌برداری زیادی دارد. در حال حاضر، حدود ۷ درصد نیروگاه‌های هسته‌ای موجود دنیا از این نوع راکتورها هستند. این راکتورها عمدتاً در کانادا و پس از آن در آلمان، هند و آرژانتین بیشترین توسعه را یافته‌اند. ولی تهیه آب سنگین تکنولوژی پیچیده و هزینه سنگینی دارد. در این راستا، در برخی کشورها، ضمن حفظ مزایای آب سنگین به عنوان کند کننده، سیالات خنک کننده دیگری از قبیل CO_2 در فرانسه و آب سبک در ایتالیا و ژاپن مورد استفاده قرار گرفته‌اند که البته توسعه گسترده‌ای نیافته‌اند آمریکا به طور عمده، از این دسته راکتورها برای تهیه پلوتونیم برای بمب‌های هسته‌ای خود استفاده می‌کند.

۴-۳-۳- راکتورهای با خنک کننده گازی^۱ یا گاز - گرافیت (GCR)

راکتورهای گازی اولین راکتورهایی بودند که در سال‌های ۶۲-۱۹۵۶ در کشورهای انگلستان و فرانسه مورد استفاده قرار گرفتند. در این نوع راکتورها، گرافیت به عنوان کند کننده و گاز دی اکسیدکربن یا هلیوم به عنوان خنک کننده استفاده می‌شود. در راکتورهای گازی نیز اورانیوم طبیعی برای سوخت بکار می‌رود و نیاز به مصرف اورانیوم غنی شده نیست. دلیل استفاده از این راکتورها در کشورهای اروپایی در اواخر دهه ۵۰ این بود که در آن زمان کارخانجات غنی‌سازی اورانیوم (غیر از غنی‌سازی برای مصارف نظامی) وجود نداشت و در نتیجه این کشورها برخلاف آمریکا نمی‌توانستند از راکتورهای آبی با اورانیوم غنی شده استفاده کنند. وجه مشترک این راکتورها، ابعاد بزرگ قلب راکتور و به عبارت دیگر، قدرت ویژه بسیار کم در مقایسه با سایر راکتورهای حرارتی است که از کاربرد گرافیت به عنوان کند کننده ناشی می‌شود.

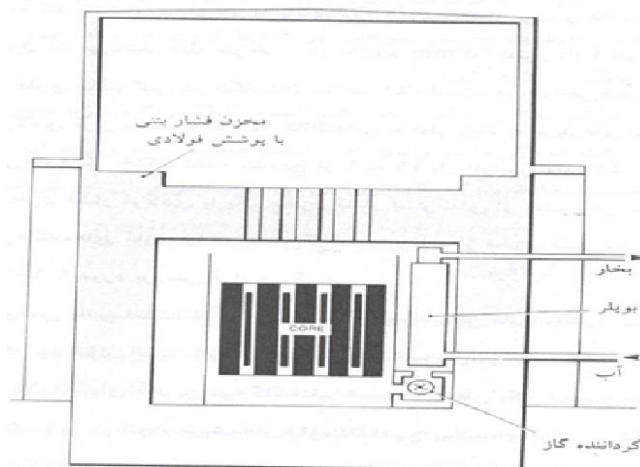
استفاده از سیال خنک کننده گازی در این راکتورها، در مقایسه با راکتورهای آبی، موجبات رسیدن به دمای بالا با فشار نسبتاً کم سیال و به تبع آن، بازدهی ترمودینامیکی بالاتر را فراهم می‌نماید. در راکتورهای GCR، گرافیت به عنوان کند کننده و دی اکسید کربن به عنوان خنک کننده در مدار اول نقش انتقال حرارت را برعهده دارند. این حرارت به مدار بعدی که آب است منتقل و بخار حاصل توربین را به حرکت درمی‌آورد. این راکتورها از نظر ایمنی هسته‌ای نیز، دارای مشخصه‌های بهتری نسبت به راکتورهای آبی هستند که دلیل عمده آن در چگالی قدرت بسیار پایین این راکتورها، اینرسی حرارتی گرافیت و همچنین، عدم تغییر فاز سیال گازی در شرایط حادثه نهفته است. راکتورهای گرافیت تجاری در سه طرح مختلف؛ راکتورهای گرافیت گاز با اورانیوم طبیعی (Magnox)، راکتورهای گازی پیشرفته^۱ (AGR) و راکتورهای با درجه حرارت بالا^۲ (HTR) ساخته شده‌اند.

۴-۳-۱- راکتورهای گرافیت گاز با اورانیوم طبیعی (Magnox)

در این راکتور که نسل اول راکتورهای گرافیتی و حتی راکتورهای هسته‌ای بوده و تاریخچه ساخت آن به دهه ۱۹۴۰ برمی‌گردد، تلاش شده تا بیشترین استفاده از مواد طبیعی و بویژه سوخت اورانیوم طبیعی به عمل آید. این انتخاب، استفاده از سوخت طبیعی به صورت فلز و با غلاف از جنس اکسید منیزیم به صورت آلیاژ با بریلیوم (Magnox) را به منظور محدود کردن جذب نوترونی در سازه سوخت و امکان برقراری واکنش زنجیره‌ای با اورانیوم طبیعی الزامی ساخته است. در این راکتور، قلب راکتور یک مکعب مستطیل بوده که از گرافیت بصورت بلوک‌هایی که در کنار هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده و در یک مخزن فلزی به شکل کره قرار دارد. در قلب راکتور، میله‌های سوخت به طور عمودی در کانال‌های تعبیه شده در بلوک‌های گرافیتی قرار گرفته‌اند. قطر این کانال‌های استوانه‌ای شکل ۹۸ میلی‌متر است. میله‌های سوخت بقطر ۲۹ میلی‌متر و ارتفاع ۸۵۰ میلی‌متر می‌باشند. به منظور افزایش انتقال گرما، پره‌های بر روی میله‌های سوخت نصب شده است. در این راکتور، سیال خنک کننده (CO_2) تحت فشار با عبور از کانال‌های حاوی میله‌های سوخت، حرارت آن را برداشت کرده و بطرف مولدهای بخار جریان پیدا می‌کنند. در مدار ثانویه مولد بخار، آب بصورت بخار درآمده و به طرف توربین می‌رود. شکل (۱)، ساختارهای اصلی یک نیروگاه با راکتور Magnox را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های حرارتی سوخت فلز (تغییر فاز در دمای بیشتر از ۶۶۰ درجه سانتیگراد) و مسائل ناشی از واکنش شیمیایی سوخت با CO_2 در صورت ترک غلاف در این راکتورها موجب می‌شود، علی‌رغم استفاده از سیال گازی، دمای خروجی سیال پایین (حدود ۴۱۰ سانتیگراد) بوده و در نتیجه بازدهی

ترمودینامیکی نیروگاه پایین و در حدود ۳۱ درصد باشد. این راکتورها که در دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی بیشترین توسعه را در انگلستان و فرانسه یافتند، امروزه به دلیل محدودیت‌های فنی و عدم قابلیت رقابت اقتصادی، عملاً در برنامه‌های توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای قرار ندارند. با اینحال، این راکتورها به دلیل عدم وابستگی به اورانیوم غنی شده، یکی از انتخاب‌های مهم برای تولید انرژی الکتریکی در مقیاس کوچک حدود ۳۰۰ مگاوات و با تکنولوژی مطمئن محسوب می‌شود.



شکل (۴-۱۰): شمای راکتورهای ماگنوس جدیدتر

۴-۳-۲- راکتورهای پیشرفته با خنک‌کنندگی گازی^۱ (AGR یا AGCR)

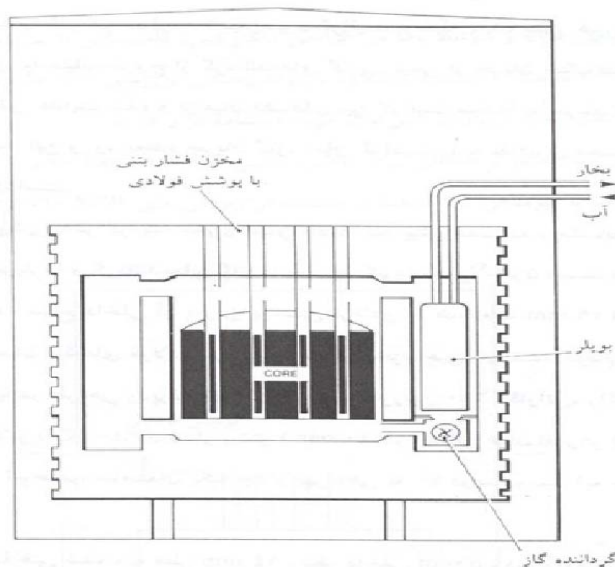
این راکتورها، نسل دوم راکتورهای خنک‌شونده با گاز و نسل تکامل یافته راکتورهای ماگنوکس محسوب می‌شوند که عمدتاً در انگلستان مورد استفاده قرار گرفته است. در این دسته از راکتورها هم گرافیت به عنوان کندکننده و دی‌اکسید کربن به عنوان ماده خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است. در طرح این راکتور، سعی شده است که محدودیت‌های حرارتی ماگنوکس که عمدتاً از بکارگیری سوخت فلزی ناشی می‌شود، با انتخاب سوخت سرامیکی (اکسید اورانیوم UO_2 با غنای تا ۳/۵-۲/۵ درصد) با قطر کمتر و غلاف فولادی یا استیل زنگ‌نزن (SS) برطرف شده و بدین ترتیب، دمای خروجی سیال تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد. دستیابی به این دمای بالا، امکان تولید بخار بسیار داغ با دمای تا ۵۶۰ درجه سانتیگراد را فراهم می‌آورد که در نتیجه، سیکل ترمودینامیکی این نیروگاه با بازدهی بالا (بیشتر از ۴۰ درصد) با بهترین نیروگاه‌های کلاسیک برابری می‌کند. این مزیت، علاوه بر سایر مزایای این راکتور از قبیل ایمنی، قابلیت اعتماد بالا و سوخت‌گیری در حال کار (قابلیت دسترسی بالا)، موجب شده است که

1. Advanced Gas-Coaled Reactor

این راکتور از کارآمدترین راکتورهای هسته‌ای قدرت باشد. البته استفاده از سوخت اکسید و غلاف SS در این راکتور مستلزم استفاده از اورانیوم کمی غنی شده حدود ۲/۲ درصد و از دست دادن مزیت اصلی راکتور ماگنوکس است. مخزن تحت فشار این راکتورها از بتن و به صورت مکعب ساخته شده است. علی‌رغم اینکه ساخت این راکتورها تا دهه ۸۰ نیز ادامه داشته و آخرین نیروگاه از این نوع در سال ۱۹۸۸ در انگلستان وارد شبکه شده است؛ ولی در حال حاضر، برنامه توسعه‌ای برای آن پیش‌بینی نمی‌شود.

۳-۳-۳-۴- راکتورهای با درجه حرارت بالا (HTR)

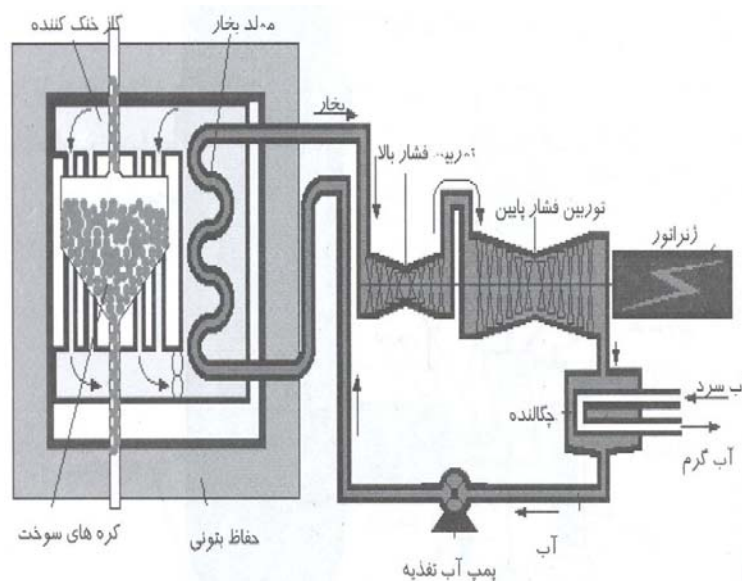
راکتورهای HTR، حد بالای پیشرفت در تکنولوژی راکتورهای گرافیت گاز است. در طرح این راکتورها سعی شده است تا با استفاده از سوخت ذره‌ای تمام سرامیک، کلیه محدودیت‌های حرارتی راکتورهای Magnox و AGR به کنار گذاشته شده و حداکثر استفاده مهندسی از مزایای راکتورهای گرافیت گاز به عمل آید. در این راستا، استفاده از هلیوم به عنوان سیال خنک کننده در این راکتور اجازه می‌دهد که مشکلات ناشی از خوردگی فلزات و گرافیت توسط CO_2 حذف شده و امکان دستیابی به دماهای بسیار بالای تا حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد و همچنین، شار نوترونی و چگالی قدرت بیشتر فراهم آید. عنصر سوخت در این راکتورها به صورت ذرات اکسید یا کربید اورانیوم و توریوم، با چند لایه محافظ از پیروکربن و سیلیسیوم است که ابعاد آن ۰/۷-۰/۳ میلیمتر بوده و این ذرات با پخش شدن در



شکل (۴-۱۱): شمای راکتور و سیستم محافظ و نگهدارنده راکتور AGR

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۳۱

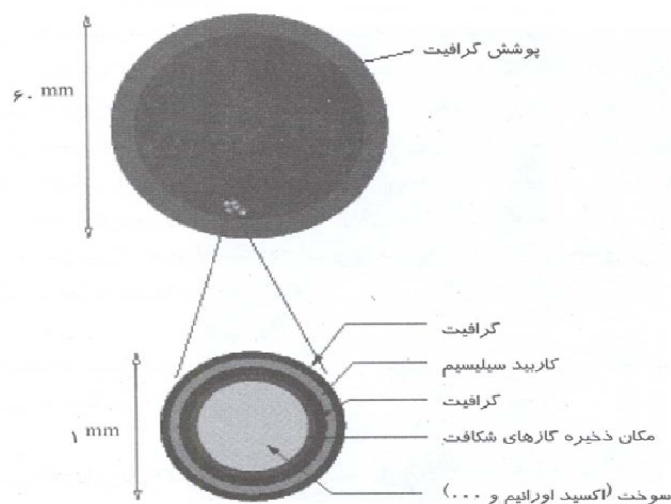
یک ماتریس گرافیتی، یک ترکیب هموژن با کند کننده را می‌سازند. غنای مورد نیاز سوخت برای برقراری واکنش زنجیره‌ای در این ترکیب حدود ۱۰-۷ درصد است. دو طرح مختلف برای عنصر سوخت و ساختمان قلب راکتور در سطح بین‌المللی توسعه یافته‌اند. در نوع آمریکایی-انگلیسی، عناصر سوخت به صورت بلوک‌های گرافیتی منشوری^۱ و در طرح آلمانی، به صورت گلوله‌هایی به قطر ۶۰ mm هستند که در یک محفظه فلزی روی هم انباشته و گاز هلیوم از بین آنها عبور می‌کند.



شکل (۴-۱۲): چرخه قدرت یک نیروگاه بخار با راکتور درجه حرارت بالا

این راکتورها در مقایسه با سایر راکتورهای گرافیت گاز و در حالت کلی‌تر در میان سایر راکتورهای هسته‌ای، دارای مزایای استثنایی بسیاری هستند. بازدهی ترمودینامیکی بسیار بالا (بیشتر از ۴۰ درصد) در تولید قدرت، توسعه کاربردهای آن به کاربردهای دوگانه تولید برق و حرارت صنعتی در گام‌های مختلف درجه حرارت و بویژه دماهای بالا، امکان استفاده از هلیوم خروجی راکتور در سیکل مستقیم توربین گاز و یا سیکل ترکیبی با بازدهی بسیار بالا، ضریب تبدیل بالا و امکان دستیابی به زاینده‌گی با استفاده از سوخت توریم، امکان استفاده از ترکیب‌های مختلف سوخت در چرخه‌های مختلف و بویژه چرخه توریم، بدون نیاز به تغییر در طرح راکتور، چگالی قدرت بیشتر نسبت به سایر راکتورهای راکتورهای گرافیتی، و در نهایت، ایمنی ذاتی استثنایی به دلایل پایین بودن چگالی قدرت سوخت، اینرسی حرارتی و هدایت خوب گرافیت، منفی بودن عکس‌العمل‌های حرارتی و عدم تغییر فاز هلیوم بر اثر افت فشار در شرایط حادثه از جمله

این مزایا هستند. راکتورهای هسته‌ای بادمای بالا (HTR) می‌توانند در دماهای بسیار بالا گرما تولید کنند. کاربرد این راکتورها بیشتر برای تولید گرما و بویژه برای تولید هیدروژن یا ماده قابل احتراق ترکیبی و به این ترتیب، تغییر تمام عادات مصرف انرژی است. اگرچه این راکتور، علیرغم مشخص بودن مزایای نسبی آن از دهه ۱۹۵۰ و تکامل تکنولوژیک، در حال حاضر گسترش تجاری چشمگیری پیدا نکرده و در حد چند نمونه نیمه صنعتی باقی مانده است؛ ولی به دلیل مزایای استثنای آن (عمدتاً دمای بالا و کاربردهای دوگانه، زاینده‌گی و ایمنی ذاتی بالا)، در ردیف راکتورهای پیشرو در قرن آینده خواهد بود که کارایی آن، تنها با راکتورهای زاینده سریع، قابل مقایسه است.



شکل (۴-۱۳): نمایی از کره سوخت یک راکتور با درجه حرارت بالا

۴-۳-۴- راکتورهای زاینده سریع^۱ با فلز مایع (LMFBR/FBR)

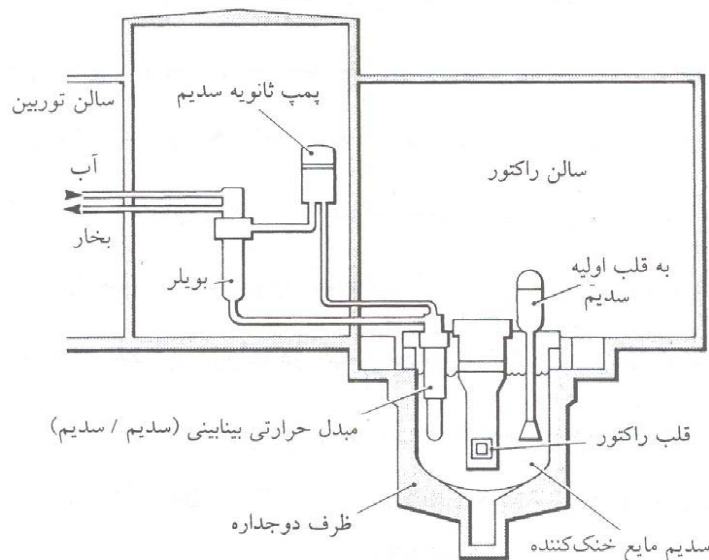
در راکتورهای PWR و BWR و دیگر انواع راکتورها، بخش عمده‌ای از واکنش شکافت بر روی ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ اتفاق می‌افتد. در راکتورهای زاینده سریع، دو فرایند تولید انرژی و ساخته شدن هسته‌های جدید پلوتونیم باهم اتفاق می‌افتند. قبلاً از بررسی این نوع راکتورها، ابتدا به بررسی زاینده‌گی در راکتورهای هسته‌ای پرداخته می‌شود. همانطور که اشاره شد، از میان سه هسته شکافت پذیر مورد استفاده در راکتورهای اتمی، یعنی اورانیوم ۲۳۵، پلوتونیوم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳، تنها اورانیوم ۲۳۵ در مخلوطی با اورانیوم ۲۳۸ به صورت طبیعی یافت می‌شود. دو هسته دیگر، رادیوایزوتوپ‌هایی هستند که در اثر واکنش‌های هسته‌ای در راکتور تولید می‌شوند. به هسته‌های اورانیوم ۲۳۸ و توریوم ۲۳۲ که قادرند

1. Fast Breeder Reactors

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۳۳

در اثر جذب نوترونی، پس از مدتی به هسته‌های شکافت‌پذیر^۱ تبدیل شوند، هسته‌های بارور^۲ گفته می‌شود. سوخت راکتورها نیز معمولاً از ترکیب یک هسته شکافت‌پذیر و یک هسته بارور با غنای مناسب تشکیل می‌شود. ماده شکافت‌پذیر تولید شده در راکتور می‌تواند پس از بازفرآوری سوخت مصرف شده، مجدداً در همان راکتور یا راکتورهای دیگر بازگردانده شود. نسبت تعداد هسته‌های شکافت‌پذیر تولید شده در راکتور به هسته‌های شکافت‌پذیر مصرف شده، ضریب تبدیل^۳ نامیده می‌شود که یکی از مشخصه‌های مهم راکتورهای هسته‌ای است. این ضریب در راکتورهای حرارتی عموماً کوچکتر از واحد است؛ ولی در مواردی می‌تواند بیشتر از یک شود که در این صورت به آن ضریب زاینده‌گی^۴ گفته می‌شود. در یک راکتور زاینده^۵، مقدار هسته‌های شکافت‌پذیر تولید شده در درازمدت بیش از هسته‌های شکافت‌پذیر اولیه می‌باشد و به عبارت دیگر، راکتور پس از مدت زمانی که پریود نامیده می‌شود (۳۰-۱۰ سال)، از نظر سوخت شکافت‌پذیر خودگردان شده و می‌تواند مازاد تولید نیز داشته باشد. به همین دلیل به این راکتورها سوخت ساز هم گفته می‌شود. راکتورهای HTR با چرخه توربوم، در میان راکتورهای با نوترون حرارتی و راکتورهای زاینده سریع FBR از این نوع محسوب می‌گردند. در این راکتورها، واکنش زنجیره‌ای در طیف نوترون‌های سریع حاصل از شکافت برقرار می‌شود. این امر، اگرچه به دلیل پایین بودن احتمال واکنش شکافت در این ناحیه، مستلزم بکارگیری سوخت با غنای ۲۰-۱۵ درصد است؛ ولی دارای مزایای مهمی نسبت به راکتورهای با نوترون حرارتی است. در این راستا، عدم نیاز به ماده کند کننده نوترون و در نتیجه کاهش حجم قابل ملاحظه راکتور (افزایش قدرت ویژه)، افزایش بازدهی نوترونیک و ضریب تبدیل به دلیل عدم جذب نوترون‌ها در کند کننده و شکافت‌پذیر بودن تعداد بیشتری از هسته‌ها در ناحیه سریع از جمله این مزایا محسوب می‌شوند. شرایط خاصی که در راکتورهای سریع وجود دارد، سبب می‌شود بتوان هسته اتم توربوم و برخی ایزوتوپ‌های دیگر را به سوخت هسته‌ای قابل استفاده تبدیل کرد. سوخت ایده‌آل مورد استفاده در این راکتور، پلوتونیوم ۲۳۹ است (به دلیل دارا بودن بیشترین بازدهی شکافت در ناحیه نوترون‌های سریع) که با ترکیبی از اورانیوم ۲۳۸، قلب راکتور را تشکیل می‌دهد. بنابراین در این راکتورها از سوخت اکسید اورانیوم و اکسید پلوتونیوم ($\text{PuO}_2\text{-UO}_2$) استفاده می‌شود.

-
1. Fissile
 2. Fertile
 3. Conversion Factor
 4. Breeding Factor
 5. Breeder



شکل (۴-۱۴): شمای راکتور و سیستم محافظ نگهدارنده راکتور سریع خنک شونده با سدیم

با توجه به چگالی قدرت بسیار بالای این راکتورها ($450-600 \text{ MW/m}^3$)، برداشت حرارت از قلب راکتور مستلزم بکارگیری سیالات خاص با دمای عملیاتی بالا است. در راکتورهای FBR فعلی از سدیم و پتاسیم مذاب یا نمک‌های آنها استفاده می‌شود که در مقابل مشخصه‌های ترموهیدرولیکی خوب (سیالیت خوب در گام درجه حرارت مورد استفاده $700-200$ درجه سانتیگراد، هدایت حرارت بالا و بویژه امکان استفاده از آن در فشار اتمسفری)، مشکلات کاربردی عدیده‌ای را از قبیل واکنش شیمیایی شدید با آب (انفجار)، اشتعال با هوا و اکتیو شدن در بردارد. این امر استفاده از یک مدار واسطه‌ای سدیم بین مدار اولیه و سیکل ترمودینامیکی را ایجاد می‌نماید. در حال حاضر، دو طرح متفاوت در ساخت راکتور و نحوه برداشت حرارت از قلب توسعه یافته است؛ راه حل یکپارچه^۱ که در آن، قلب راکتور، مبدل‌های حرارتی واسطه‌ای و پمپ‌های گردش سیال، تماماً در سدیم مذاب غوطه‌ور هستند (راه‌حل فرانسوی) و راه‌حل مداری^۲ که در آن، مبدل‌های حرارتی و اجزاء مدار اولیه در خارج از دیگ راکتور قرار دارند (راه‌حل آلمانی). استفاده از سیال گازی (هلیوم) نیز، به عنوان سیال خنک کننده، مورد مطالعه قرار گرفته و به طرح راکتورهای زاینده سریع گازی (GCFBR) منجر شده است. استفاده از هلیوم، امکان دستیابی به دماهای بالا و همچنین افزایش ضریب زاینده‌گی را فراهم می‌آورد؛ ولی در مقابل، برداشت حرارت از قلب به دبی سیال بیشتری نیاز خواهد داشت. انواع مختلف راکتورهای زاینده بقدرت‌های تا 1200 مگاوات

1. Integrated type
2. Loop type

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۳۵

الکتریکی ساخته شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. این راکتورها در حال حاضر بیشتر در کشورهای صنعتی پیشرفته متداول است. راکتورهای سوپوفونیکس در فرانسه، دونری در انگلستان و منجو در ژاپن از نوع راکتورهای سریع هستند.



شکل (۴-۱۵): نمای بیرونی یک راکتور زاینده سریع

جاذبه اصلی راکتورهای زایا این است که می‌توانند با سوخت U^{238} کار کنند که در زباله‌های عمل‌آوری اورانیوم یا در سوخت مصرف شده راکتورهای شکافت یافت می‌شود. در اطراف قلب راکتور، نواحی پوششی^۱ شعاعی و محوری با ضخامت زیاد از اورانیوم ۲۳۸ قرار داده می‌شود که نقش عمده آن، تولید پلوتونیوم ۲۳۹ اضافی در اثر جذب نوترونی اورانیوم ۲۳۸ و ایجاد خاصیت زاینده‌گی در راکتور است. این خاصیت، یعنی تولید ماده شکافت پذیر جدید به میزانی بیش از ماده شکافت پذیر اولیه در درازمدت، جزء مزایای استثنایی این راکتورهاست که موجب می‌شود از ذخایر سوخت هسته‌ای استفاده انرژی‌تیک ۵۰ تا ۶۰ برابر، بیش از حالت استفاده در راکتورهای حرارتی به عمل آید و از این‌رو، توسعه تجارتی این راکتورها در قرن آینده، به عنوان یکی از راه‌حل‌های اساسی جایگزینی منابع سوخت فسیلی مطرح است. در این راستا، راکتورهای زایا با استفاده از اورانیوم ۲۳۸ به عنوان سوخت، علاوه بر تأمین یکی از منابع دیرپای تولید برق، می‌توانند نیاز بشر به معدن کاری، عمل‌آوری و خرد کردن سنگ اورانیوم را برطرف کنند. اما توسعه راکتورهای FBR در حال حاضر، علاوه بر رکود کلی حاکم بر صنعت هسته‌ای، عمدتاً به دلایلی همچون مشکلات تکنولوژی سدیم مایع، ایمنی راکتور و بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری (۴ تا ۸

1. Blanket

میلیارد دلار) و بهره‌برداری از این راکتورها و نیز پایین بودن قیمت اورانیوم طبیعی، کمتر از مقدار پیش‌بینی شده است. اصلی‌ترین مشکل این راکتورها این است که حدود ۳۰ سال طول می‌کشد تا راکتور سربه سر شود، یعنی همان قدر Pu^{239} تولید کند که مصرف می‌کند. بنابراین سرنوشت راکتورهای زایا بستگی زیادی به کوتاه شدن فاحش دوره زمانی جبران در آنها دارد. مشکل بعدی، کمیت زیاد پلوتونیومی است که در راکتورهای زایا جای می‌دهند. بایستی توجه داشت که پلوتونیوم عمری طولانی داشته و اگر استنشاق شود بسیار سمی و کشنده است. بنابراین نشت پلوتونیوم و نیز سدیم مذاب در سیستم خنک‌ساز می‌تواند در راکتور زایا به رویدادی فاجعه‌بار منجر شود. به علاوه، بسیاری از مشکلات بهره‌برداری راکتورهای آب سبک در راکتور زایا نیز پیش می‌آیند.

۴-۴- مقایسه مشخصه‌های فنی انواع راکتورهای اتمی قدرت

برخی مشخصه‌های فنی راکتورهای تجارتي قدرت که در بالا مورد بحث قرار گرفت، در جدول (۲) خلاصه شده‌اند. با بررسی مقایسه‌ای این مشخصه‌ها می‌توان ملاحظه کرد که اولاً از نظر استفاده از مواد طبیعی و بویژه سوخت، تنها دو راکتور گرافیت گاز مگنوکس (UnGG) و راکتور آب سنگین (CANDU)، قادر به استفاده از اورانیوم طبیعی بوده و سایر راکتورها به اورانیوم غنی شده نیاز دارند. تکنولوژی تهیه آب سنگین نیز در سطح بین‌المللی در اختیار کشورهای معدودی بوده و مشمول محدودیت‌های سیاسی بین‌المللی است. ثانیاً از نظر بازدهی ترمودینامیکی، راکتورهای گازی، عمدتاً راکتورهای گازی پیشرفته (AGR) و بویژه راکتورهای با درجه حرارت بالا (HTR)، نسبت به راکتورهای آبی (اعم از آب سبک و سنگین) دارای مزیت نسبی هستند. ثالثاً از نظر ضریب تبدیل، راکتورهای حرارتی دارای بالاترین ضریب تبدیل بوده و با چرخه توربین، امکان زاینده‌گی در ناحیه حرارتی وجود دارد. این خاصیت قابل مقایسه با راکتورهای زاینده سریع (FBR) است که دارای ضریب تبدیل بیشتر از واحد زاینده‌گی در ناحیه سریع هستند. در راکتورهای آب سنگین نیز، امکان استفاده از توربین در یک چرخه خودگردان وجود دارد. این مشخصه در استفاده بهینه از ذخایر سوخت هسته‌ای در درازمدت نقش اساسی دارد. رابعاً از نظر ایمنی هسته‌ای، اگرچه تمامی انواع راکتورهای تجاری متداول، امروزه درجه ایمنی بسیار بالایی دارند؛ ولی در مجموع، راکتورهای گرافیت گاز به دلیل چگالی قدرت کم، اینرسی حرارتی گرافیت و عدم تغییر فاز سیال خنک‌کننده، از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار هستند و در این میان نیز، راکتورهای HTR در راس راکتورهای با ایمنی ذاتی قرار دارند. در نهایت، از نظر کاربردی، نیروگاه‌های هسته‌ای علاوه بر تولید انرژی الکتریکی، در تأمین حرارت صنعتی در گام‌های مختلف درجه حرارت نیز می‌توانند کاربرد داشته باشند. از این نقطه نظر، راکتورهای HTR در آینده بیشترین کارایی را خواهند داشت.

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۳۷

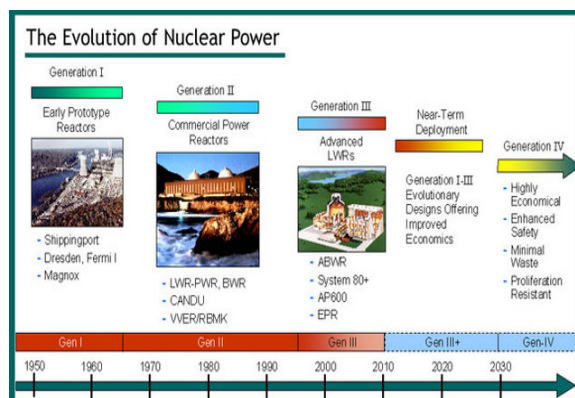
جدول (۴-۲): مقایسه برخی مشخصه‌های فنی راکتورهای تجاری متداول

مشخصات فنی راکتور	UnGG	AGR	HTR	CANDU	BWR	PWR	FBR
غناي سوخت (%)	طبیعی	۱/۷-۲/۲	۷-۱۰	طبیعی	۲/۵	۳/۵	۱۰-۲۰
ضریب تبدیل / زاینده‌گی	۰/۸۵	۰/۸	۰/۸۵-۱/۲*	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۱/۲
قدرت ویژه متوسط سوخت (MWth/m ³)	۱	۲	۸	۹-۱۲	۵۵	۱۰۰	۳۰۰-۶۰۰
حدف‌سایش متوسط سوخت یا Burnup (GWD/M ³)	۴-۵	۱۸	۱۰۰	۷/۵	۲۸	۳۳	۸۰-۱۰۰
فشار سیال خنک‌کننده (at.)	۳۰	۴۰	۵۰	۱۱۰	۷۰	۱۵۵	اتمسفری
دمای خروجی سیال خنک کننده (°C)	۴۱۰	۷۰۰	۷۵۰-۱۰۰۰	۳۱۰	۲۸۵	۳۳۰	۶۰۰
بازدهی ترمودینامیکی (%)	۳۲	۴۲	۴۲-۵۰	۲۹	۳۲	۳۲	۴۲

* با چرخه توربوم

بایستی توجه داشت، اگر واکنش زنجیره‌ای از کنترل خارج شود، دما به حدی افزایش می‌یابد که تجهیزات مورد استفاده در واکنش ذوب شده و حادثه‌ای ناگوار رخ می‌دهد و حتی در شرایط بسیار بد، ممکن است واکنش منجر به انفجار شود گرچه مورد اخیر بسیار بعید است از آنجایی که درجه غلظت مواد مورد استفاده در راکتور بسیار کمتر از مواد مورد نیاز جهت یک انفجار هسته‌ای است. در بسیاری از طراحی‌های جدید راکتورها، دانشمندان موفق شده‌اند نوترون‌ها و واکنش زنجیره‌ای را از طریق کاستن از سرعت آن با استفاده از آب تحت کنترل درآورند و جالب آنکه نوترون‌های با سرعت کمتر نسبت به نوترون‌های سریع‌تر موجب شکافت هسته‌ای بیشتر می‌شوند. آب مورد استفاده در این فرآیند تحت فشار حدود ۱۵۰ اتمسفر قرار دارد و این فشار باعث می‌شود تا در دماهای بسیار بالا، آب همچنان به حالت مایع باقی بماند. سیستم طراحی شده به این صورت عمل می‌کند که در حین واکنش هسته‌ای وقتی که دما به اندازه مشخصی افزایش می‌یابد، چگالی آن کاهش پیدا کرده و دیگر موجب کاهش سرعت نوترون‌ها نمی‌شود. عدم کاهش سرعت نوترون‌ها از وقوع شکافت‌های بیشتر جلوگیری می‌کند و باعث می‌شود که درجه شکافت در اندازه مشخصی باقی بماند. هم‌اکنون اکثر راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده در آمریکا از سیستم آب تحت فشار استفاده می‌کنند. در نیروگاه اتمی اولکیلوتو^۱ در فنلاند هم علاوه بر سیستم آب تحت فشار چندین تدبیر دیگر هم برای مقابله با حوادث احتمالی اندیشیده شده است. این

تدابیر عبارتند از ۱- چهار سیستم خنک‌کننده اضطراری مجزا که هر کدام قادرند به تنهایی حرارت زیاد ناشی از توقف ناگهانی سیستم‌های کنترلی را از مجموعه خارج کنند. ۲- دیواری بتونی که برای تحمل ضربات بعد از وقوع حادثه طراحی شده و مقاومت آن به حدی است که ضربه یک هواپیما را می‌تواند تحمل کند.



شکل (۴-۱۶): روند تکامل تاریخی انواع رکتورهای هسته‌ای

۴-۵- راکتورهای تحقیقاتی

راکتورهای تحقیقاتی با هدف اولیه تهیه چشمه نوترون برای تحقیقات هسته‌ای پایه، مطالعات کاربردی تجزیه‌ای و تولید ایزوتوپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دسته از راکتورها در دماهای پایین‌تری کار کرده، به سوخت کمتری نیاز داشته و متعاقبا با این مصرف سوخت پایین، محصولات شکافت کمتری نیز به وجود می‌آورند. از طرف دیگر سوخت آنها میزان غنای بالاتری را می‌طلبد که معمولا اورانیوم ۳۳۵ با درجه غنای ۲۰ درصد است. در این گونه راکتورها، مثل راکتور قدرت، قلب راکتور نیاز به خنک‌کننده داشته و معمولا باید از یک کند کننده برای کاهش سرعت نوترون‌ها و نیز افزایش واکنش‌های شکافت استفاده شود. راکتورهای با این مشخصات، بر مبنای دامنه وسیعی از توان گرمایی، از چند کیلووات تا صدمگاوات می‌توانند کار کنند. بالاترین قدرت برای یک راکتور تحقیقاتی معمولا تا ۱۰۰ مگاوات است. این نوع راکتورها از راکتورهای قدرت و یا آن دسته که در کشتی‌ها بکار می‌روند بسیار کوچکتر بوده و بسیاری از آنها در دانشکده‌ها فعال هستند. آرایش به کار رفته در طراحی راکتورهای تحقیقاتی بسیار وسیع‌تر و متنوع‌تر از راکتورهای قدرت است و حالات کارکرد و بهره‌برداری متفاوتی مثلا به صورت مداوم یا پالسی دارند. راکتورهای تحقیقاتی برای تحقیقات و آموزش، آزمایش مواد با کاربردهای ویژه، تولید رادیوایزوتوپ برای کاربردهای مختلف در پزشکی، صنعت و کشاورزی، اهداف نظامی و استفاده‌های چندمنظوره بکار گرفته می‌شوند.

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۳۹

راکتورهای تحقیقاتی معمولاً به راکتورهای استخری، راکتورهای تانکی، راکتور تریگا، راکتور آب سنگین، راکتور همگن و راکتورهای زاینده سریع طبقه بندی می‌شوند. یکی از مرسوم ترین راکتورهای تحقیقاتی، راکتور نوع استخری است که قلب آن را دسته ای از عناصر سوختی تشکیل داده و در زیر استخر بزرگی از آب قرار دارد. در میان عناصر سوختی میله های کنترل قرار داشته و همچنین کانال هایی خالی برای مواد آزمایشی تعبیه شده است. هر عنصر سوخت دارای تعداد زیادی صفحات سوخت با غلاف آلومینیومی است که در جعبه ای عمودی قرار دارد. آب وظیفه خنک کنندگی و نیز کند کنندگی را در راکتور به عهده دارد و از گرافیت و برلیم نیز به عنوان بازتابنده استفاده می‌شود. برای دستیابی به پرتوهای نوترون منفذهایی در دیواره استخر تعبیه شده است. از طرفی استفاده از راکتورهای تحقیقاتی تانکی آسان تر است، زیرا کنترل عبور آب پمپاژ شده در این سیستم به سهولت صورت می‌گیرد، البته راکتورهای با توان پایین که مخصوص آموزش هستند نیز ممکن است تانکی باشند. طرز قرار گرفتن قلب و بازتابنده راکتور در نوع تانکی با سوخت ورقه‌ای، همانند سیستم‌های نوع استخری بوده و متغیرهای یکسانی نیز دارند با این تفاوت که در آن بجای محافظ آب، از بتن جامد به دور قسمتهایی از آن بهره گرفته می‌شود.

قلب راکتور تحقیقاتی تریگا نیز که تاکنون ۴۰ واحد از آن در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است، شامل ۶۰ الی ۱۰۰ عنصر سوختی استوانه‌ای با قطر ۳۶ میلیمتر و غلاف آلومینیومی و حاوی ترکیبی از سوخت اورانیم و هیدرید زیرکونیم (به عنوان کند کننده) می باشد. قلب این راکتور در استخر آب قرار داشته و معمولاً از گرافیت و برلیم به عنوان بازتابنده استفاده می کنند. این نوع راکتور در ایمنی کامل و در کسر کوچکی از ثانیه می‌تواند به درجات بالای قدرت برسد. سوخت راکتور تریگا به آن، ضریب حرارتی منفی بالایی عرضه میدارد و افزایش سریع قدرت آن هم به وسیله اثر فعالیت منفی ناشی از هیدرید کند کننده به سرعت متوقف می‌شود. راکتور تحقیقاتی آب سنگین نیز نوع دیگری از راکتور تحقیقاتی است که نوترون‌ها به وسیله آب سنگین یا گرافیت کند می‌شوند. راکتور تحقیقاتی همگن نیز دارای قلبی شامل نمک‌های حل شده اورانیم به صورت مایع درون تانکری با قطر ۳۰۰ میلیمتر هستند. طرح‌های اولیه پایلوت استفاده از آنها را رایج ساخت و لیکن امروزه ۵ واحد از این راکتورها در حال کار هستند. در نهایت، راکتور تحقیقاتی زاینده سریع BFS، دارای ده‌ها هزار دیسک یا صفحه سوختی شامل پلوتونیم و اورانیم بسیار غنی شده، با کاربردهای نظامی می‌باشد.

۴-۶- وضعیت توزیع انواع راکتورهای قدرت در جهان

اولین راکتوری که منحصراً جهت تولید برق مورد استفاده قرار گرفت در شوروی سابق (ژوئن ۱۹۵۴ میلادی) نزدیک مسکو احداث گردید که قدرت آن ۵۰۰۰ کیلووات بوده و بیشتر جنبه نمایشی داشت.

تولید برق صنعتی از راکتورهای اتمی در سال ۱۹۵۶ در انگلستان آغاز شد. در حال حاضر در حدود ۴۳۹ راکتور هسته‌ای با مجموع ۳۷۲۱۰۰ مگاوات در ۳۰ کشور جهان در حال فعالیت است و این تعداد راکتور، ۱۷ درصد الکتریسیته جهان را تامین می‌کند. هم اکنون آمریکا با داشتن ۱۰۴ نیروگاه هسته‌ای فعال و مجموع ظرفیت ۱۰۰۵۸۲ مگاوات، بالاترین آمار نیروگاه‌های هسته‌ای جهان را در اختیار دارد. بعد از آن، در حال حاضر فرانسه ۷۵٪ از برق مورد نیاز خود را توسط نیروگاه‌های هسته‌ای فراهم می‌کند که از این بابت در صدر کشورهای جهان قرار دارد. علاوه بر این، ۴۰۰ راکتور اتمی در کشتی‌ها و زیردریایی‌ها نیروی محرکه لازم را جهت پیش رانش ایجاد می‌کنند. در ضمن ۲۸۰ راکتور تحقیقاتی مقیاس کوچک در ۵۶ کشور دنیا، در زمینه پژوهش و تولید رادیوایزوتوپ‌ها در پزشکی و صنعت به کار گرفته می‌شوند.

جدول (۳-۴): تعداد و ظرفیت کل راکتورهای در حال کار در کشورهای جهان

کشور	تعداد راکتور فعال	ظرفیت کل (مگاوات)	کشور	تعداد راکتور فعال	ظرفیت کل (مگاوات)
ایالات متحده آمریکا	۱۰۳	۱۰۰۵۸۲	سوئیس	۵	۳۳۲۰
فرانسه	۵۹	۶۳۲۶۰	جمهوری اسلواکی	۵	۲۰۳۴
ژاپن	۵۵	۴۷۵۸۷	فنلاند	۴	۲۶۹۶
فدراسیون روسیه	۳۱	۲۱۷۴۳	مجارستان	۴	۱۸۲۹
کره جنوبی	۲۰	۱۷۴۵۱	بلغارستان	۲	۱۹۰۶
انگلستان	۱۹	۱۰۲۲۲	آفریقای جنوبی	۲	۱۸۰۰
کانادا	۱۸	۱۲۶۲۱	برزیل	۲	۱۷۹۵
آلمان	۱۷	۲۰۴۷۰	مکزیک	۲	۱۳۶۰
هند	۱۷	۳۷۸۲	رومانی	۲	۱۳۰۰
اوکراین	۱۵	۱۳۱۰۷	آرژانتین	۲	۹۳۵
چین	۱۱	۸۴۳۸	پاکستان	۲	۴۲۵
سوئد	۱۰	۹۰۱۴	جمهوری لیتوانی	۱	۱۱۸۵
اسپانیا	۸	۷۴۵۰	اسلوانی	۱	۶۶۶
بلژیک	۷	۵۸۲۴	هلند	۱	۴۸۲
جمهوری چک	۶	۳۶۱۹	ارمنستان	۱	۳۷۶
جمع کشورها			۴۳۹		۳۷۲۱۰۰

در حال حاضر، چهار نوع مختلف راکتور هسته‌ای در مقیاس تجاری وجود دارد. در این میان، راکتورهای PWR و پس از آن، به ترتیب PHWR، VVER (راکتور آب سبک تحت فشار مربوط به روسیه) و BWR، فراوانترین راکتورهای قدرت در حال کار جهان بوده و در مقابل، راکتورهای FBR و LWGR، از فراوانی کمتری برخوردار می‌باشند. بیشترین تعداد راکتورهای آب سنگین از نوع PHWR

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۴۱

در کشور کانادا قرار دارد. علاوه بر کانادا، کشورهای آرژانتین، چین، هند، پاکستان، کره جنوبی و رومانی نیز از این نوع نیروگاه استفاده می‌کنند. از راکتورهای RBMK (راکتورهای آب-گرافیت) فقط در کشور روسیه به تعداد ۱۱ عدد و همچنین لیتوانی به تعداد یک نیروگاه استفاده می‌شود. راکتورهای AGR هم فقط در اوکراین به تعداد ۱۴ عدد وجود دارد که جهت تولید برق استفاده می‌شود. نیروگاه‌های تولید برق با راکتور آب جوشان (BWR) بیشتر در کشورهای آمریکا و ژاپن و سوئد مورد بهره‌برداری است که تعداد آنها در این کشورها به ترتیب ۳۵، ۳۱ و ۸ عدد می‌باشد. از نیروگاه‌هایی با راکتور از نوع FBR فقط کشورهای روسیه، ژاپن و فرانسه استفاده می‌کنند.

جدول (۴-۴): انواع راکتورهای در حال کار جهان

نوع راکتور	تعداد راکتور	ظرفیت کل (مگاوات)
BWR	۹۴	۸۵۲۸۷
FBR	۲	۶۹۰
GCR	۱۸	۹۰۳۴
LWGR	۱۶	۱۱۴۰۴
PHWR	۴۴	۲۲۳۹۰
PWR	۲۶۵	۲۴۳۲۹۵
جمع	۴۳۹	۳۷۲۱۰۰

همچنین نوع دیگری از راکتور اتمی هم وجود دارد که آفریقای جنوبی مبدع آن است و «pubble-bed» (پوشش سنگ‌ریزه‌ای) نامیده می‌شود. این نوع راکتور کاملاً منفعل است. در روش مورد استفاده در «pubble-bed» بجای آب از گرافیت برای کنترل سرعت نوترون‌ها استفاده شده و حرارت حاصل از واکنش‌های هسته‌ای بجای گرم کردن آب گازهایی نظیر هلیوم، نیتروژن و دی‌اکسید را گرم می‌کند و با استفاده از توربین‌های گازی الکتریسیته تولید می‌شود. نام «pubble-bed» برگرفته از این واقعیت است که گرافیت مانند پوششی برای شکل گوی مانند سوخت اتمی قرار می‌گیرد. راکتورهای «pubble-bed» مانند CANDU از این قابلیت برخوردار است که در حین واکنش سوخت‌گیری شود. هم‌اکنون چین در تلاش است تا راکتورهای «pubble-bed» تولید کند. از سوی دیگر، در کنار ۴۳۹ راکتور یادشده، ۳۹ راکتور جدید با مجموع ظرفیت ۳۳۹۸۸ مگاوات، عمدتاً در هند، چین و همسایگان این کشورها در حال ساخت است. این نیروگاه‌های جدید هسته‌ای به نسل جدیدی از راکتورها تعلق دارند که «نسل سوم» نامیده می‌شوند.

جدول (۴-۵): انواع راکتورهای در حال ساخت جهان

نوع راکتور	تعداد در حال ساخت	ظرفیت کل (مگاوات)
BWR	۳	۳۹۲۵
FBR	۲	۱۲۲۰
LWGR	۱	۹۲۵
PHWR	۴	۱۲۹۸
PWR	۲۹	۲۶۶۲۰
جمع	۳۹	۳۳۹۸۸

در حال حاضر، شرکت‌های بزرگ و مختلفی در زمینه ساخت نیروگاه‌های اتمی در دنیا فعالیت می‌کنند. از شرکت‌های آمریکایی می‌توان به شرکت‌های WGI، Bechtel، Westinghouse Electric و General Electric اشاره نمود که مورد آخر بیشتر روی ساخت نیروگاه‌های BAR و ABWR فعالیت می‌کند. البته شرکت‌های معروفی مانند AIT و Wilcox & Babcock از آمریکا سازندگان تجهیزات اصلی نیروگاه‌های اتمی هستند. از شرکت‌های معروف روسی فعال در ساخت نیروگاه‌های اتمی می‌توان به OMZ، Zio-Podolsk، Atommash، LMZ، OKBM اشاره کرد. فرانسه هم جزو سازندگان بزرگ نیروگاه‌های اتمی بوده و ۲ شرکت معروف Areva و Framatome Anp دلیل این مدعا هستند. البته شرکت Framatome Anp، از ادغام شرکت‌های Framatome و Siemens تشکیل شده است. ژاپن هم دارای ۲ شرکت مهم با نام‌های MHI و IHI است. در زمینه ساخت نیروگاه‌های اتمی آب سنگین از نوع Candu و همچنین راکتورهای ACR، کانادا دارای ۲ شرکت مهم به نام‌های AECL و SNC-LAVALIN.Nuclear است. اسپانیا هم دارای ۲ شرکت معروف Empresarios Agrupados و Equipos Nucleares می‌باشد. در کره جنوبی هم معروف‌ترین شرکت سازنده تجهیزات هسته‌ای، Doosan است. باید به این فهرست جمهوری چک، برزیل، چین و ایتالیا را هم افزود. آرژانتین هم در حال حاضر سازنده راکتورهای تحقیقاتی است.

جدول (۴-۶): سن، ظرفیت و تعداد راکتورهای در حال کار جهان

سن	تعداد	ظرفیت کل (مگاوات)	سن	تعداد	ظرفیت کل (مگاوات)	سن	تعداد	ظرفیت کل (مگاوات)
۱	۳	۱۷۸۵	۱۵	۹	۹۰۲۳	۲۹	۷	۶۵۳۷
۲	۲	۱۴۲۳	۱۶	۶	۴۸۰۶	۳۰	۱۴	۱۲۹۹۷
۳	۴	۳۸۵۵	۱۷	۴	۳۶۶۸	۳۱	۱۴	۱۰۴۶۵
۴	۵	۴۷۸۵	۱۸	۱۰	۱۰۶۳۲	۳۲	۱۶	۱۲۶۲۷
۵	۲	۱۶۴۵	۱۹	۱۱	۱۰۲۸۴	۳۳	۱۱	۸۲۱۳

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۴۳

۱۵۹۲۷	۲۳	۳۴	۱۳۸۶۸	۱۴	۲۰	۵۰۹۲	۶	۶
۱۰۰۶۹	۱۵	۳۵	۲۲۲۳۷	۲۲	۲۱	۲۷۳۶	۳	۷
۵۹۹۰	۱۰	۳۶	۲۴۱۳۱	۲۴	۲۲	۳۱۴۴	۶	۸
۵۸۶۱	۱۲	۳۷	۳۱۳۰۳	۳۲	۲۳	۲۷۸۷	۴	۹
۲۸۴۸	۵	۳۸	۳۱۸۴۶	۳۳	۲۴	۳۰۷۳	۴	۱۰
۲۷۴۳	۷	۳۹	۱۶۹۷۵	۲۱	۲۵	۳۶۷۸	۳	۱۱
۲۱۷	۱	۴۰	۱۵۲۳۰	۱۸	۲۶	۷۰۲۸	۶	۱۲
۲۱۷	۱	۴۱	۱۹۶۶۴	۲۲	۲۷	۳۳۲۷	۴	۱۳
۳۷۳۱۰۰	۴۳۹	جمع	۱۵۱۱۱	۲۰	۲۸	۴۲۵۳	۵	۱۴

اما جدیدترین نسل راکتورها، راکتورهای به اصطلاح مینیاتوری هستند که می‌توانند در زیرزمین یک ساختمان قرار گرفته و انرژی مورد نیاز آن را تأمین کنند. کارشناسان جهت تأمین انرژی آینده دنیا پیشنهاد کرده‌اند که صدها نیروگاه اتمی کوچک در مناطق دورافتاده جهان ساخته شود. برای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای کوچک (مینی مایلرها) بودجه بسیار کمی لازم است، اما این نیروگاه‌ها قادرند انرژی موردنیاز یک منطقه بزرگ را تأمین کنند. امتیاز دیگر مینی مایلرها این است که دیگر نیازی به کشیدن خطوط برقی هوایی گران قیمت ندارند و اگر هم نیاز منطقه بالارود می‌توان نیروگاه کوچک دیگری ساخت. در این حال، منتقدین این فناوری معتقدند که اگر صدها منطقه کوچک مجهز به نیروگاه اتمی شوند تصور آن شبیه یک کابوس می‌شود. با وجود این باید خاطرنشان کرد که سامانه مینی مایلرها به یک ایمنی مخصوص مجهز خواهد بود که امکان دزدی مواد هسته‌ای را از آنها امکان ناپذیر خواهد کرد. محققین لابراتور ملی «آرگوم» در «الی نویز» آمریکا، تابستان گذشته این نوع مینی مایلرها را معرفی کردند. یکی از محققین این مرکز می‌گوید که «مینی مایلرها» به یک سامانه خنک کننده غیرمستقیم مجهزند که حتی با رفتن برق هم کار می‌کنند؛ بدون این که به مواد اتمی جدید نیاز داشته باشد و بدین ترتیب کسی نمی‌تواند به این نیروگاه‌ها حمله کند و حتی در زمان اولیه فعالیت این نیروگاه‌ها، مواد اتمی آن را خیلی مشکل می‌توان از محل استانداردش خارج کرد. آرژانتین و برزیل در حال حاضر به دنبال ساخت این نوع نیروگاه‌های اتمی کوچک هستند و ضمناً شرکت توشیبا نیز به تازگی پیشنهاد ساخت یکی از این نیروگاه‌های اتمی کوچک را در آلاسکا داده است. این راکتورها به مراقبت زیادی نیاز نداشته و به همین دلیل برای مناطق دور افتاده مناسب هستند. کارشناسان می‌گویند که با ساخت تعداد زیادی مینی مایلر در سراسر دنیا، این نیروگاه‌ها هم اقتصادی خواهد شد. مینی مایلر فناوری جدیدی نیست؛ بلکه با تغییر فناوری موجود، از آن بهتر استفاده می‌شود.

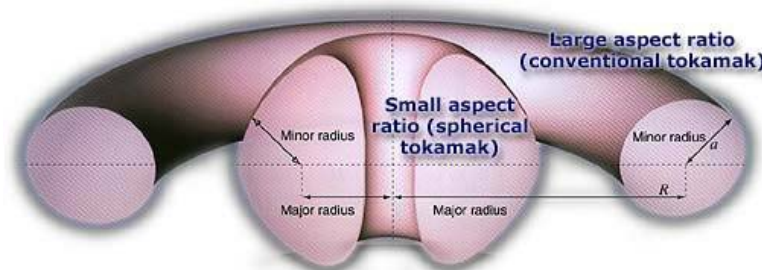
۴-۷- راکتورهای همجوشی

در آغاز نیمه دوم قرن بیستم، کشورهای غربی (آمریکا، فرانسه و انگلستان و...) و اتحاد جماهیر شوروی، از پدیده گداخت هسته‌ای برای مصارف نظامی و تولید بمب هیدروژنی استفاده کرده و به علت ارزان بودن فرآورده‌های نفتی، کشورهای پیشرفته کمک مالی چندانی به دانشمندان برای یافتن وسیله کنترل بمب هیدروژنی نکردند و اکنون که قسمت اعظم ذخایر نفت و گاز مصرف شده، به فکر ساخت نیروگاهی براساس پدیده پیوست اتم‌ها افتاده‌اند. به اعتقاد اکثر کارشناسان، گداخت هسته‌ای را سرچشمه انرژی فردا می‌دانند و گمان می‌رود سوخت یک راکتور گداخت هسته‌ای، مخلوطی از دو تریوم و تریتیوم باشد. واکنش همجوشی بین این دو ماده در دمای حدود 10^7 درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد و گرمای تولید شده بواسطه همجوشی آنها باعث واکنش‌های گداخت دیگر نیز خواهد گردید و این امر، یک سری واکنشهای زنجیره‌ای را بوجود خواهد آورد که می‌توان با استفاده از انرژی بسیار زیاد تولید شده، توربین‌های مولد برق را بکار انداخت. از محسنات راکتورهای گداخت، درجه بالای ایمنی آنهاست و برخلاف راکتورهای شکافت هسته‌ای که پسمان‌های رادیواکتیو بسیاری تولید می‌کنند، پسمان راکتورهای گداخت مقدار کمی هلیوم غیررادیواکتیو است. البته در واکنش همجوشی هسته‌ای، نوترون نیز تولید می‌شود که می‌تواند به مرور راکتور را رادیواکتیو کند؛ ولی با انتخاب مواد مناسب می‌توان به جذب نوترون‌ها اقدام نمود و در نتیجه، این مسئله نیز مرتفع خواهد گردید.

بایستی توجه داشت که یک راکتور همجوشی ایده‌آل راکتوری است که در آن واکنش‌ها به صورت زنجیره‌ای اتفاق بیفتند. در واقع، هدف اساسی در راه ساخت راکتور همجوشی هسته‌ای، زنجیره‌ای کردن آن است. دانشمندان این رشته مفهومی به نام گیرانش را تعریف کرده‌اند که به معنی این است که مقداری انرژی صرف شروع واکنش گردیده و انرژی بیشتری از سلسله واکنش‌ها گرفته شود، در واقع در شرایط گیرانش واکنش زنجیره‌ای می‌شود. در این حالت، نه تنها انرژی تولیدی یک واکنش برای انجام واکنش بعد کافیهست، بلکه مقدار زیادی از آن هم اضافه بوده و می‌تواند برای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد. اما برای اینکه احتمال برخورد ذرات (یون‌های) در فرآیند همجوشی بالا برود، باید شرایط خاصی در راکتور مهیا گردد، به طوری که اولاً دمای خیلی بالایی درون آن تولید گردد تا بتوان از سد محکم پتانسیل کولنی هسته‌ها عبور کرد، البته راکتور نیز بایستی بتواند به‌خوبی این دمای بالا را تحمل کند (این دما در محدوده 10^7 درجه کلونین می‌باشد). در مرحله بعدی، راکتور بایستی این توانایی را داشته باشد که چگالی زیادی از یون‌ها را در درون خود وارد کند تا احتمال برخوردهای کاراً بالاتر رود. نهایتاً اینکه زمان محصورسازی در آن طولانی باشد.

برای رسیدن به شرایط مطلوب در واکنش‌های گرما هسته‌ای که در آنها از سوخت دوتریم-تریتیوم استفاده می‌شود، دمای پلاسما (T) باید در محدوده $10^8 \times 3-1$ درجه کلونین و زمان محصورسازی T_E

باید در حدود ۱-۳ ثانیه و چگالی (n) حوالی $10^{20} \times 1-3$ ذره بر مترمکعب (طبق معیار لاوسون) باشد. برای آغاز بکار راکتور، یعنی برای رسیدن به کمینه دمای حدود 10^8 کلوین، بایستی از وسیله گرماساز کمکی استفاده کرد. بعد از محترق شدن سوخت، مخلوط پلاسما با ذرات آلفایی که در اثر احتراق اولیه بوجود آمده‌اند گرم شده و می‌توان دستگاه کمکی را از مدار خارج کرد. از آن به بعد، سرعت فعالیت‌های همجوشی با افزایش دادن چگالی پلاسما افزایش پیدا می‌کند. با این وجود، افزایش چگالی به بالای مرزهای تعیین شده و به تبع آن، به هم خوردن پایداری پلاسما، باعث سختی شرایط کار راکتور شده و در نهایت، منجر به خاموشی راکتور و یا حتی بروز یک فاجعه خواهد شد. به حالت تعادل در آوردن این مستلزمات، با شکل بندی راکتور در کوچکترین اسپکت ریتو که به شکل بندی مغناطیسی آن بستگی دارد مقدور می‌شود (نسبت R به a را اسپکت ریتو می‌گویند).



شکل (۴-۱۷): شکل بندی راکتور توکامک با اسپکت ریتوهای مختلف

۴-۷-۱- توکامک

یکی از انواع راکتورهای همجوشی هسته‌ای، راکتور توکامک است. طرح توکاماک در دهه پنجاه میلادی توسط روس‌ها پیشنهاد شد. کلمه توکاماک از کلمات *magnitnaya*, *kamera*, *toroidalnaya* به معنی «تاقک مغناطیسی چنبره‌ای» گرفته شده است. در این راکتور، ذرات در کنار هم گردآوری می‌شوند تا تشکیل یک گاز دارای بار الکتریکی را بدهند که این گاز باردار پلاسما نامیده می‌شود. بایستی توجه داشت، مهمترین و حیاتی‌ترین وظیفه یک ابزار همجوشی، پایدار نگه داشتن پلاسما است. اما اگر بخواهیم، بردارهای میدان در سراسر اطراف یک محفظه کره‌ای شکل یکنواخت و منظم بوده و همگی در یک جهت باشند، این کار غیرممکن بوده و نامنظمی در دو طرف کره، باعث عدم پایداری محصورساز می‌شود؛ ولی در یک محصورساز چنبره‌ای، چنین مشکلی وجود ندارد و یکنواختی میدان سراسر محصورساز (توکاماک)، باعث پایداری آن می‌شود. این نوع راکتور، عمل محصورسازی را به خوبی انجام می‌دهد و گاز باردار را به وسیله سیم‌پیچ‌های مغناطیسی در درون خود نگهداری می‌نماید. میدانهای مغناطیسی توکاماک به وسیله کوئل سیم‌پیچ‌های بیرونی بسیار بزرگ که چنبره راکتور را کاملاً احاطه

می‌کنند، تولید می‌شوند. توکاماک با دمای بالایی که در آن قابل دسترسی است (بیشتر از ۱۰۰ میلیون درجه سلسیوس که بارها بیشتر از دمای مرکز خورشید است) فعلاً برنده جریان رهبری پروژه‌های همجوشی به حساب می‌آید. اما این کویل‌های بسیار بزرگ، هزینه بسیار زیاد و بی‌نظمی و اختلالاتی در کار راکتور خواهند داشت. همچنین یکی از این مشکلات اجرای فرایند همجوشی هسته‌ای، وجود پدیده «ئی.ال.ام»ها (ELMs) است. این اصطلاح به پدیده جریان‌ات ناگهانی یا چرخشی در حاشیه بیرونی پلاسما اطلاق می‌شود که موجب خردگی جداره داخلی توکاماک می‌گردد. توکاماک دارای یک پوسته فلزی بسیار گران است که نوترون‌های ساطع شده از پلاسما را جذب می‌کند. خردگی این پوسته به این معنا است که جداره داخلی توکاماک باید هر از گاهی تعویض شود که این امر هزینه پروژه‌های همجوشی هسته‌ای را بسیار بالا می‌برد. ذرات خرده شده همچنین تاثیر زیادی بر عملکرد پلاسما داشته و میزان انرژی قابل تحویل توسط آن را کاهش می‌دهند. در این راستا، ایجاد یک میدان مغناطیسی تشدید شده کوچک ناشی از سیم پیچ‌های مخصوص قرار گرفته در درون مخزن راکتور، موجب ایجاد اختلالات «آشفته ساز» در حاشیه پلاسما گردیده و این امر از ایجاد و تشکیل جریان‌ها جلوگیری می‌کند.

۴-۷-۲- اسفرومک

اسفرومک، نوع دیگری از راکتورهای همجوشی است که بر خلاف توکاماک که چنبره‌ای می‌باشد، شکلی کروی دارد. تفاوت اسفرومک با توکاماک در این است که در مرکز اسفرومک، هیچ جسم مادی وجود ندارد. اسفرومک‌ها، پلاسمای بسیار داغ را در یک سیستم میدان مغناطیسی ساده و فشرده که فقط از یک سری ساده از کویل‌های کوچک پایدار کننده استفاده می‌کند، بوجود می‌آورد. میدان‌های مغناطیسی قوی لازم درون پلاسما با چیزی که دینام مغناطیسی نامیده می‌شود، تولید می‌شوند. در هرحال، راکتور همجوشی طوری طراحی می‌شود که دور دیواره بیرونی آن، لیتیم مایع تحت فشار، به عنوان خنک کننده، جریان داشته باشد. این لیتیم مایع، گرمای تولیدی اضافی را از واکنش گرفته و به آب منتقل کرده و با تبدیل آن به بخار باعث می‌شود که توربین و ژنراتور به حرکت درآمده و برق تولید بشود. این جریان لیتیم همچنین نقش مهم کندکنندگی را بازی خواهد کرد؛ به این صورت که با نوترون اضافی تولید شده در واکنش ترکیب شده و سوخت گران‌قیمت و بسیار کمیاب راکتور را که همان تریتم است، تولید می‌کند. البته در این مورد، باید ضخامت لیتیم مایع در جریان حداقل یک متر باشد. اسفرومک، متأسفانه با بی‌مهری مواجه شد و به اندازه توکاماک مورد توجه واقع نشد؛ در حالی که اسفرومک مدت زیادی بعد از توکاماک اختراع شد. در دهه گذشته، اغلب تحقیقات در بخش انرژی همجوشی مغناطیسی روی توکاماک چنبره‌ای شکل برای رسیدن به واکنش‌های همجوشی در سطح بالا متمرکز شده است. البته در حال

فصل چهارم: راکتورهای قدرت و تولید برق هسته‌ای / ۱۴۷

حاضر تحقیقات فعالی در لاورنس لیورمور در گروهی به نام (SSPX)^۱ در مورد راکتورهای اسفرمک متمرکز شده است. پروژه SSPX شامل یک‌سری آزمایشات طراحی شده برای ارزیابی توانایی اسفرمک برای نگهداری پلاسماهای داغ سوخت همجوشی در درون خود می‌باشد.

۴-۷-۳- پروژه راکتور تجربی حرارتی - هسته‌ای بین‌المللی (ITER)

دانشمندان با جدیت فراوان مشغول پژوهش و آزمایش بر روی پدیده پیوست اتم‌های سبک هستند. پروژه «راکتور تجربی حرارتی - هسته‌ای بین‌المللی»^۲ (ITER)، اسم مجموعه‌ای است که اولین راکتور همجوشی جهان را که از نوع توکامک خواهد بود. این پروژه، با مشارکت کنسرسیومی از کشورهای اتحادیه اروپا، روسیه، ژاپن، کانادا، چین، آمریکا، کره جنوبی و هند، و با هزینه ۱۰ میلیارد یورو (۱۲/۸ میلیارد دلار)، در منطقه کاداراش در جنوب فرانسه ساخته خواهد شد. اتحادیه اروپا قرار است نیمی از هزینه اجرای پروژه ایترا را تامین کند و نیم دیگر آن را نیز سایر شریکان پروژه تامین خواهند کرد. در این پروژه، فرآیند گداخت هسته‌ای در راکتوری با ایزوتوپهای دیوتریوم و تریتیوم اجرا شده و ماده زائد این فرایند نیز هلیوم خواهد بود. توان خروجی این توکامک ۴۱۰ مگاوات خواهد بود. طبق برنامه‌ریزی‌های انجام گرفته، قرار بوده است اجرای این پروژه از سال ۲۰۰۷ آغاز شود. گفته شده است، اگر «ایترا» به نتیجه برسد و فناوری آن عملی شود، در آن صورت، جامعه بین‌المللی یک راکتور تجاری نمونه به نام Demo در ژاپن خواهد ساخت. گام نهایی، گسترش فن آوری گداز یا همجوشی هسته‌ای به سراسر زمین خواهد بود.

1. Sustained Spheromak Physics Experiment
2. International Thermonuclear Experimental Reactor

فصل پنجم

مدیریت زباله‌های هسته‌ای

مقدمه

تمدن جدید مقادیر معتنا بهی پسمان صنعتی تولید می‌کند که باید به دقت کنترل و نابود شود. در میان این پسماندها، پسماندهای هسته‌ای وجود دارند که هرچند مقدار آنها در مقایسه با سایر زباله‌ها بسیار ناچیز و قابل کنترل است، اما مهمترین مسئله‌ای که امروزه فکر دستاوردکاران و متخصصین هسته‌ای و نیز محیط زیست را به خود مشغول داشته است، برخورد منطقی و علمی با این پسمان‌های هسته‌ای می‌باشد. اصولاً موضوع تولید زباله‌های هسته‌ای از زمان کشف مواد رادیواکتیو مورد توجه قرار گرفت، ولی پس از کشف شکافت بود که دانشمندان به خطرهای زباله‌ها پی بردند، چرا که دریافتند کلیه راکتورهای شکافت هسته‌ای ایزوتوپ‌های رادیواکتیو تولید می‌کنند. در مدتی که سوخته‌های هسته‌ای در راکتور قرار گرفته‌اند، در اثر واکنش‌های زنجیره‌ای شکافت تولید انرژی حرارتی می‌نمایند. در عین حال، پرتوگیری بسیار زیادی نیز بر آن تحمیل شده و پس از مدتی به اصطلاح سوخته شده و رادیواکتیویته آن کاهش مییابد. با گذشت زمان، اورانیوم آن مصرف شده و غلظت قطعات و عناصر سنگین شکافته شده مانند پلوتونیوم، در مجموعه سوخت افزایش خواهد یافت. این مواد از این پس برای اتم‌های اورانیوم ۲۳۵، به دلیل جذب نوترون‌های حاصل از شکافت، مواد مسموم کننده محسوب شده و سبب کاهش ضریب ازدیاد نوترون و رادیواکتیویته می‌شوند. لذا پس از گذشت ۱۲ الی ۲۴ ماه، بخش اعظم مجموعه‌های سوخت مصرف شده از راکتور خارج می‌شوند. بایستی توجه داشت، راکتورهای هسته‌ای به میزان سوخت داده شده، زباله‌های هسته‌ای تولید می‌کنند.

حدود ۹۵ درصد سوخت مصرف شده در راکتور هسته‌ای اورانیوم ۲۳۸، یک درصد اورانیوم ۲۳۵

شکافته نشده، یک درصد پلوتونیوم، سه درصد محصولات شکافته شده بسیار پرتوزا و دیگر عناصر ترانس اورانیک (فرا اورانیومی) با عدد اتمی بیشتر نسبت به اورانیوم هستند که در قلب راکتور تولید شده‌اند و می‌توان آنها را خاکستر حاصل از سوخت اورانیوم دانست. این مواد، به شدت رادیواکتیو و داغ بوده و از خود پرتو یا تشعشعات هسته‌ای ساطع می‌کند که اساساً بیشتر از شکافتن قطعات و حرارت آن است. در این میان، تولید زباله‌های هسته‌ای با طول عمر بالا، بدون در نظر گرفتن راهی برای انهدام آن می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به حیات بشری و نیز محیط زیست انسان وارد کند. بنابراین مسئله جداسازی، انبار کردن و دفن ایمن آنها با زیاد شدن تعداد راکتورها و سطح انرژی آنها، سال به سال مباحث گسترده‌ای را دربر می‌گیرد. در این مرحله، انتهای عقبی چرخه سوخت هسته‌ای که مدیریت زباله‌های هسته‌ای است، آغاز می‌گردد. مدیریت پسماند هسته‌ای، کاهش حجم مواد رادیواکتیو برجا مانده با فرآیندهای جداسازی یا رقیق کردن زباله‌های هسته‌ای است؛ به طوری که میزان یا تراکم هرگونه رادیو نوکلئیدی که به بیوسفر برگردانده می‌شود، بی‌ضرر باشد. در این راستا، در صورتی که فناوری‌های جدید راه‌هایی را برای استفاده مجدد از مواد یا تسریع زوال رادیو اکتیویته ارائه دهند، پسماندهای هسته‌ای را نیز می‌توان بازیافت کرد. در نهایت بایستی توجه داشت نیروگاه‌های اتمی نیز عمر محدودی داشته و وقتی عمرشان به پایان رسید باید نابود شوند. اما به علت آلوده بودن دیواره‌های ساختمان به مواد رادیواکتیو، فقط آدم‌های مصنوعی قادر به انجام عمل نابودسازی آنها هستند.

۵-۱- زباله‌های هسته‌ای

ضایعات هسته‌ای^۱ به عنوان پسماندهای آزمایشات تحقیقاتی در کشاورزی، صنعت، پزشکی و محصول فرعی فرایند تولید انرژی هسته‌ای همواره ناخواسته تولید می‌شوند. به طور کلی اصطلاح پسماند پرتوزا شامل همه موادی است که بطور مستقیم با محیط پرتوزا تماس پیدا کرده باشند و دارای فعالیتی بیش از مقدار تعیین شده مجاز توسط مقامات قانونی بوده و هیچ گونه استفاده بعدی برای آنها در نظر گرفته نشده و رفع آلودگی آنها، اقتصادی و مقرون به صرفه نمی‌باشد. در این راستا، این پسمانها چون خطرهای زیستی برای سلول‌های زنده ایجاد می‌کنند باید از محیط خارج شده و به‌طور مناسب دفن شوند. البته در صورتی که فناوری‌های جدید راه‌هایی را برای استفاده مجدد از مواد یا تسریع زوال رادیواکتیویته ارائه دهند، پسماندهای هسته‌ای را نیز می‌توان بازیافت کرد. اما در مجموع، این مواد شامل هسته‌های پرتوزا و یا موادی می‌باشند که با هسته‌های پرتوزا تماس داشته و اصطلاحاً در غلظت‌های مشخصی آلوده به مواد پرتوزا شده‌اند. میزان پرتوزایی پسماندهای پرتوزا از مقادیر کم (در حد مقادیر پرتوزایی طبیعی) تا مواد با پرتوزایی بالا که در بازفرآوری سوخت مصرف شده حاصل می‌شوند، تغییر

1. Nuclear waste

می‌کند. این پسماندها به اشکال جامد، مایع و گاز وجود دارند. برای راحتی کار با این مواد آنها را دسته‌بندی می‌کنند. پسمان‌های پرتوزا در تأسیسات مختلف با غلظت‌های بسیار متفاوت و با ماهیت‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی تولید می‌شوند. هدف از طبقه‌بندی پسمان‌های پرتوزا، تقسیم یا گروه‌بندی آنها به گونه‌ای است که جابه‌جایی، نگهداری، آمایش، تثبیت، بسته‌بندی و دفع آنها را آسان نماید. این طبقه‌بندی می‌تواند براساس منبع تولید، درجه سمیت، حالت فیزیکی، پرتوزایی و نیمه عمر پسمان‌های پرتوزای موجود انجام پذیرد.

براساس حالت فیزیکی، پسمان‌های پرتوزا به سه دسته مایع، جامد و گازی طبقه‌بندی می‌شوند. هریک از سه دسته فوق نیز برحسب میزان پرتوزایی به چند گروه تقسیم می‌شوند که در زیر به آنها اشاره می‌گردد. آژانس بین‌المللی انرژی اتمی میزان پرتوزایی پسمان‌های مایع را طبق مقررات خود برحسب کوری در مترمکعب (Ci/m^3) یا بکرل در لیتر (Bq/l) بیان می‌کند. اما طبقه‌بندی پسمان‌های جامد در مقایسه با پسمان‌های مایع پیچیده‌تر است. این نوع پسمانها ممکن است برحسب نوع پرتوزایی (بتا، گاما یا آلفا) یا برحسب قابل اشتعال بودن و نیز تراکم پذیری طبقه‌بندی شوند. برای سنجش میزان پرتوزایی بتا و گاما در پسمان‌های جامد معمولاً مقدار تشعشع آنها را در سطح خارجی محفظه‌های حاوی آنها اندازه‌گیری می‌نمایند. در مواردی نیز میزان دز واقعی را می‌توان در سطح خود پسمان اندازه‌گیری نمود. در نهایت، پسمان‌های گازی را نیز برحسب میزان پرتوزایی در واحد حجم هوا دسته‌بندی می‌نمایند. البته عوامل دیگری از قبیل فشار، درجه حرارت، میزان رطوبت و روغن موجود در گاز نیز باید مشخص باشند. در این میان، تنها نیروگاه‌های هسته‌ای هستند که مسئولیت کامل پسمان‌های تولید شده خود را به عهده می‌گیرند.

جدول (۵-۱): طبقه‌بندی پسمان‌های مایع، جامد و گازی

نوع پسمان	گروه پسمان	میزان پرتوزایی (A برحسب Ci/m^3 و D برحسب R/h)	توضیحات
مایع	۱	$A < 10^{-6}$	معمولاً آمایش نمی‌شوند
	۲	$10^{-6} < A < 10^{-3}$	نیاز به حفاظ ندارند
	۳	$10^{-3} < A < 10^{-1}$	احتمالاً نیاز به حفاظ دارند
	۴	$10^{-1} < A < 10^4$	نیاز به حفاظ دارند
	۵	$A > 10^4$	نیاز به سرد کردن دارند
جامد	۱	$D < 0.2$	دارای پرتوهای گاما و بتا (پرتو آلفا ناچیز)
	۲	$0.2 < D < 2$	
	۳	$2 < D$	

دارای پرتو آلفا (پرتو گاما و بتا ناچیز)	میزان پرتوزایی آلفا بر حسب Ci/m^3 ، کلیه پسمان‌های جامد که پرتوگیری خارجی آنها ناچیز است ولی آلودگی آنها با پرتوهای آلفا قابل توجه است در این گروه قرار می‌گیرند	۴	
معمولا آمایش نشده و به محیط وارد می‌شوند	$A < 10^{-10}$	۱	گازی
معمولا بوسیله عبور از صافی آمایش می‌شوند	$10^{-10} < A < 10^{-6}$	۲	
علاوه بر عبور از صافی با روش‌های مکمل دیگری آمایش می‌شوند	$A < 10^{-6}$	۳	

همچنین زباله‌های رادیواکتیو بر اساس مقدار و نوع ماده رادیواکتیو به ۳ گروه عمده تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی بر اساس قوانین بین‌المللی صورت گرفته و برای هر کدام از این دسته‌ها شرایط خاص جمع‌آوری و دفن تدبیر شده است. گروه اول، زباله‌های با رادیواکتیو سطح پایین^۱ (LLW) است که در بیمارستان‌ها، صنعت و نیز در چرخه سوخت هسته‌ای تولید شده و شامل لباس‌های حفاظتی، لوازم، تجهیزات، فیلتر و غیره است که به مقادیر کمی از رادیواکتیویته آلوده بوده و اغلب طول عمر کوتاه دارد. این نوع از زباله‌ها، نیازی به محافظت‌های مخصوص در حین کار کردن یا انتقال ندارند؛ اما آن‌گونه هم نیستند که مانند زباله‌های عادی با آنها برخورد شود. دفن کم‌عمق در دریا یا زمین (چاله‌های کم عمق) برای آنها مناسب است. به منظور کاهش حجم، اغلب این مواد قبل از انهدام فشرده یا سوزانده می‌شوند. این نوع پسمان‌ها ۹۰٪ از حجم پسمان‌های رادیواکتیو دنیا را تشکیل می‌دهند، در صورتی که رادیواکتیویته آنها تنها ۱٪ مقدار کل است. گروه دوم، زباله‌های با رادیواکتیو سطح متوسط^۲ (ILW) است که حاوی مقدار بیشتری رادیواکتیویته است. رزین‌ها، پسماندهای شیمیایی، پوشش میله سوخت و مواد راکتورهای هسته‌ای جزو زباله‌های سطح متوسط طبقه‌بندی می‌شوند. این نوع مواد دارای عمر کوتاه تشعشع هستند؛ اما به دلیل تشعشع قابل توجه در عمر محدود خود، لازم است که توسط پوشش‌های مخصوص محافظت شوند. این زباله‌ها را می‌توان برای دور ریختن با بتن یا قیر به صورت جامد درآورده و در مکان‌های مخصوص انبار نمود. این زباله‌ها نیز از نظر حجم ۷٪ و از نظر رادیواکتیویته ۴٪ از مقدار کل پسمان‌های رادیواکتیو دنیا را تشکیل می‌دهند.

-
1. Low-Level Wastages
 2. Intermediate-Level Wastages

فصل پنجم: مدیریت زباله‌های هسته‌ای / ۱۵۳

در نهایت، زباله‌های با رادیواکتیته سطح بالا^۱ (HLW) هستند که تشعشعات رادیواکتیو بیشتری داشته؛ اما فضای کمتری اشغال می‌کنند. این نوع زباله‌ها شامل سوخت مصرف شده راکتورها و یا موادی که طی فرآیند بازیافت از آن تولید می‌شوند، می‌باشند که شرایط نگهداری آنها بسیار سخت و پرهزینه بوده و نیاز به پوشش حفاظتی داشته و به دلیل تولید گرمای زیاد نیاز به خنک شدن دارند. این نوع زباله‌ها بایستی با پوشش‌های مخصوص محافظت شوند و سپس در دماهای زیر صفر در انبارهایی در عمق حداقل ۱/۵ کیلومتری زمین نگهداری شوند. اینها با مقدار ۳٪ از حجم کل پسمان‌های هسته‌ای دنیا ۹۵٪ از رادیواکتیویته آنها را دارا می‌باشند. پسمان‌های سطح بالا حاوب محصولات فروپاشی با رادیواکتیو بالا و فلزات سنگین با نیمه عمر طولانی هستند. این پسمان‌های هسته‌ای ممکن است به مدت ۴۰ تا ۵۰ سال در این پسمان‌گورها نگهداری شوند تا اکتیویته آنها به کمتر از یک درصد میزان اولیه کاهش یابد. بنابراین، برای این نوع زباله‌ها مدیریت ضایعات رادیواکتیو لازم می‌باشد که شامل انبارداری موقتی، بازفرآوری و انبار نهایی می‌باشد که در ادامه فصل، هرکدام از این مراحل مورد بررسی قرار خواهند گرفت. برطبق استانداردهای بین‌المللی، بین ۵ تا ۱۰ درصد از مخارج کل راکتورهای قدرت به مسئله پسمانداری هسته‌ای تعلق می‌گیرد. لازم به ذکر است، تمامی رادیوایزوتوپ‌های موجود در زباله نهایتاً به عناصر غیررادیواکتیو واپاشی کرده و بعد از چند سال، تابش ناشی از سوخت هسته‌ای مصرف شده بتدریج از بین می‌رود. اما خطر عمده ناشی از این واقعیت است که بعضی نیم عمرها، زمان فعال زباله‌های رادیواکتیوی را حتی به هزاران سال نیز می‌رسانند. اگرچه هرچه یک رادیوایزوتوپ سریع‌تر متلاشی شود، رادیواکتیو شدیدتر خواهد بود.

جدول (۵-۲): میزان تابش انواع پسمان‌های هسته‌ای

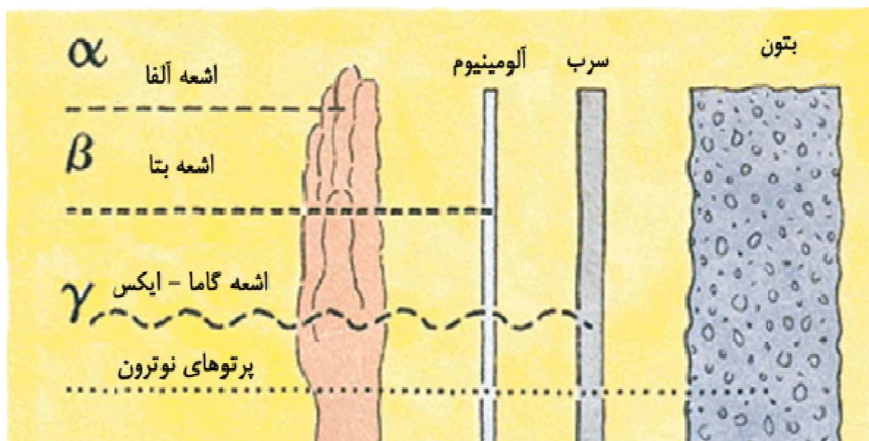
نوع پسمان پرتوزا	میزان پرتوزایی
پسمان سطح پایین (LLW)	کمتر از ۰/۱ کوری بر مترمکعب
پسمان سطح متوسط (ILW)	بین ۰/۱ تا ۱۰۰۰۰ کوری بر مترمکعب
پسمان سطح بالا (HLW)	بزرگتر از ۱۰۰۰۰ کوری بر متر مکعب

۵-۲- مخاطرات پرتوزایی زباله‌های هسته‌ای

همان طور که در فصل اول گفته شد، تولید پرتوهای رادیواکتیو پدیده‌ای است که از تبدیل ایزوتوپ‌ها به یکدیگر بوجود آمده و دارای سه قسمت پرتوهای آلفا، بتا و گاما می‌باشد که هرکدام دارای قدرت و نفوذ متفاوتی هستند. به این موارد پدیده انتشار نوترون‌ها را نیز می‌توان اضافه نمود که تنها در داخل

1. High-Level Wastages

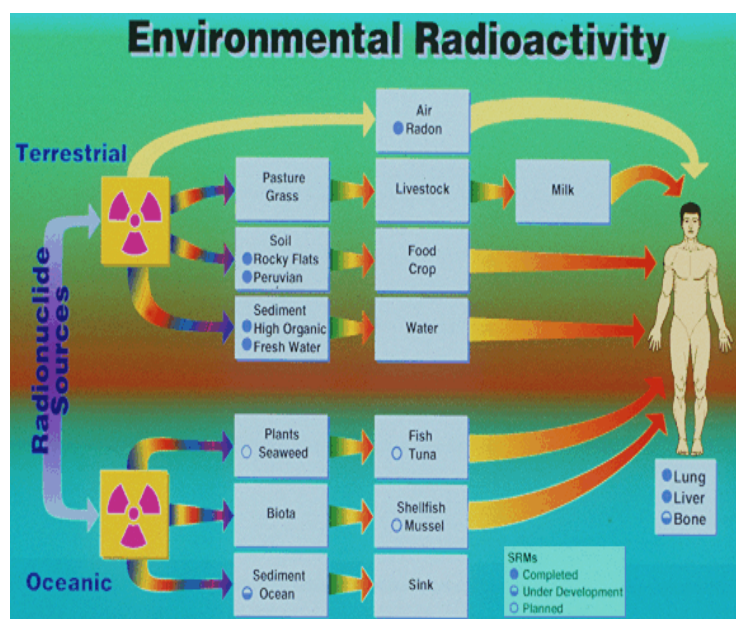
راکتورها اتفاق می‌افتد. بسته به نوع پرتوهای موجود در پسمان بایستی روش‌های متفاوتی برای حفاظت در برابر آنها اتخاذ کرد. در این راستا، مدیریت، دانش و تکنیک‌هایی که در رابطه با حفاظت انسان در برابر پسمان‌های رادیواکتیو بکار گرفته می‌شود، مدیریت پسمانداری هسته‌ای^۱ نامیده می‌شود. آثار قطعی بیولوژیکی پرتوها معمولاً زمانی بروز می‌کند که پرتوگیری از حد آستانه مجاز تعریف شده، بیشتر باشد. بافت‌های بدن از نظر آسیب‌پذیری در مقابل پرتو، به دو گروه بافت‌های حساس و بافت‌های مقاوم به پرتو تقسیم‌بندی می‌شوند. بافت‌های حساس به پرتو عبارتند از مغز استخوان، سلول‌های جنسی، بافت‌های لنفاوی، مخاط دستگاه گوارش و گلو، اپیدرم پوست و فولیکول‌ها. بافت‌های مقاوم به پرتو نیز عبارتند از استخوان‌ها و بافت‌های استخوانی، عضلات و بافت‌های عضلانی و بافت عصبی. ایجاد وقفه در تقسیم سلولی، جهش ژنی، شکست کروموزومی و مرگ سلولی، از جمله آثار مستقیم پرتو بر سلول است. از خاصیت مرگ سلولی در اثر پرتو در رشته پرتودرمانی برای از بین بردن سلول‌های سرطانی و درمان تومورهای بدخیم استفاده می‌شود. اثر رادیوشیمی هم از آثار غیرمستقیم پرتو بر سلول است که موجب تغییرات در اجزای شیمیایی آن می‌شود، به نحوی که مولکول‌های یونیزه شده با عناصر شیمیایی مشابهی که قبلاً یونیزه شده‌اند، وارد عمل می‌شوند.



شکل (۵-۱): مقایسه قدرت نفوذ قسمت‌های مختلف اشعه رادیواکتیو در مواد مختلف

از طرفی، پرتوگیری با دوز زیاد در مدت زمان بسیار کم که در فاصله زمانی کوتاه باعث بروز آثار بیولوژیکی نظیر سرخی پوست، التهاب و سرخی شدید پوست یا تاول مرطوب می‌شود را پرتوگیری حاد و آثار ناشی از آن را آثار زودرس می‌گویند. این آثار زودرس عبارتند از اثر سرخی ملایم، اثر تاول مرطوب، مرگ سلولی، اثرات روی عناصر خونی، آثار روی سلول‌های جنسی و آثار دوره جنینی. به طور مثال

برخورد پرتو با سلول‌های جنسی می‌تواند باعث کاهش تعداد آنها شده، عقیمی موقت و حتی عقیمی دائمی را نیز به دنبال داشته باشد. همچنین پرتوهای یون ساز در جنین می‌تواند موجب سقط جنین، عقب ماندگی ذهنی، لوسمی، ایجاد فتق، نقص کلیه، ناموزون بودن دندان‌ها، ناهنجاری‌های اسکلتی، کوتاهی قد و سایر ناهنجاری‌ها شود. بایستی توجه داشت، کودکان بیش از بزرگسالان در معرض خطر قرار دارند و جنین انسان بی‌نهایت به تابش اشعه حساس بوده و آثار اشعه در مواجهه‌های مکرر به صورت جمع شونده^۱ می‌باشد. علاوه بر این، پرتوگیری درازمدت با دوز کم که ممکن است آثار آن بعدها مشاهده شود را پرتوگیری مزمن و اثر ناشی از آن را آثار تاخیری نظیر بروز سرطان می‌نامند. در نهایت، اگر تمام بدن تحت تاثیر پرتو با دوز بالا قرار گیرد، ممکن است آثار آن بر هریک از اعضای بدن، یکجا بروز کند. اثر عمومی پرتو روی اعضای مختلف بدن تقریباً متفاوت بوده و در برخی از اعضای بدن شدید و در برخی خفیف‌تر است. ملتهب شدن پوست، تغییرات خونی، آب مروارید و... از آثار قطعی پرتوها هستند. اما آثار احتمالی پرتوها اثرهایی هستند که برای بروز آنها معمولاً آستانه مجاز مشخصی وجود ندارد، نظیر سرطان‌های مختلف و عوارض سوء آن روی نسل‌های آینده. این آثار همان گونه که از نامشان پیداست به صورت تصادفی پدیدار می‌شوند و حتی ممکن است در شخصی که در معرض تابش پرتوها قرار نگرفته است، هم مشاهده شوند.



شکل (۵-۲): چرخه تاثیر تشعشعات پسمان‌های پرتوزا بر انسان و طبیعت

در این میان، فاکتوری که تعیین می‌کند آثار یک ماده رادیواکتیو خالص چقدر بر سلامت انسان خطرناک است، میزان و فاصله انرژی تابشی می‌باشد. در برخورد پرتو به تمام بدن با دوز کمتر از حدود ۰/۲۵ گری ممکن است اثر کلینیکی مشاهده نشود و تنها با انجام آزمایش‌های اختصاصی از جمله بررسی‌های کروموزومی، آثار احتمالی قابل تشخیص است. از دوز حدود ۱ گری به بالا، فرد پرتو دیده علایم کلینیکی از خود نشان می‌دهد که شامل بی‌اشتهایی، تهوع، استفراغ و اسهال است. پس از پرتوگیری حدود ۴ گری، بیماری Radiation sickness با علایمی چون سردرد، استفراغ، اسهال، اختلالات آب و الکترولیت و عفونت و تب بروز کرده و پس از چند روز، جوش‌های کوچکی در دهان و گلو مشاهده می‌شود که با کم شدن تدریجی وزن بدن همراه است. در طول دومین هفته، معمولاً بهبودی وضع ظاهری و از بین رفتن علایم ذکر شده قبلی، یا کاهش وزن با دامنه‌های متفاوت مشاهده می‌شود. در طول سومین هفته، بروز علایم قبلی با شدت بیشتر همراه با عقیمی است. ثبات وزن در این دوره علامت بهبودی بیمار است، اما شخص پرتو دیده‌ای که در سومین هفته نیز به تدریج وزنش کم شود در طول چهارمین هفته به احتمال قوی خواهد مرد. همچنین، طبق یک طبقه‌بندی دیگر، آثار اشعه بر سلامت انسان مطابق جدول (۳-۵) خواهد بود.

جدول (۳-۵): آثار تشعشعات رادیواکتیویته بر سلامت انسان

میزان تشعشعات رادیواکتیویته	تأثیرات بر سلامتی انسان
۰/۰۱ گری	عدم وجود علائم بارز
۰/۱ گری	تغییرات در لمفوسیت
۱ گری	تهوع و استفراغ و کاهش فعالیت مغز استخوان و کاهش موقت گلبول سفید
۱۰ گری	تخریب مغز استخوان، افت پلاکت، علائم سندروم حاد اشعه و مرگ در ۳۰ روز
۱۰۰ گری	بی‌هوشی، اغماء و مرگ در چند ساعت

۳-۵- مراحل و فرآیندهای پسمانداری هسته‌ای

همان طور که گفته شد، ذخیره کردن و از بین بردن زباله‌های زباله‌های با رادیواکتیو سطح بالا که همان سوخت مصرف شده راکتورها هستند، نیاز به مدیریت و تکنولوژی بالا دارد، اما مشخص‌ترین و ساده‌ترین کار ایزوله کردن به منظور جلوگیری از انتشار تشعشع و نیز سرد کردن آنها است. بایستی

متذکر شد، پس از استفاده از اورانیوم برای تولید انرژی در راکتور هسته‌ای، این سوخت دیگر قابل استفاده نیست و در نهایت، سوخت مصرف شده یا باید دوباره پردازش شود و یا برای دفع نهایی آماده شود. اما سوخت مصرف شده که از راکتور خارج می‌شود، بسیار داغ و رادیواکتیو بوده و تشعشع و یون‌های فراوانی را می‌تاباند؛ از این رو باید آن را سرد کرد و از تابیدن پرتوهای رادیواکتیو آن به محیط جلوگیری کرد. اگر یک گروه تروریستی بخشی از این مواد آلوده کننده و پرتوزا را به صورت بمب منفجر نماید، می‌تواند باعث مرگ و میر گسترده و اختلال در زندگی همه مردم جهان شود. در هر حال، مسئله جداسازی، انبار نمودن و دفن ایمن آنها با زیاد شدن تعداد راکتورها و سطح انرژی آنها، سال به سال مباحث گسترده‌ای را در برمی‌گیرد. اما جدای از چالش‌های حل این مسایل، پسماندهای هسته‌ای غیرنظامی در صورتی که به‌طور موثر و مفیدی مورد محافظت و نگهداری قرار بگیرند، هیچ‌گاه برای هیچ‌کس و برای محیط‌زیست زیانبار نخواهد بود. از طرفی، نابودی این پسماندها به این دلیل که از حجم کمی برخوردارند، مزیتی نسبی برای انرژی هسته‌ای محسوب می‌شود.

در مجموع، مدیریت ضایعات رادیواکتیو شامل انبارداری موقتی، بازفرآوری و انبار نهایی می‌باشد. روش کار بدین صورت است که معمولاً سوخت مصرف شده را در حوضچه‌هایی برای سرد شدن اولیه نگهداری می‌کنند. به این ترتیب، علاوه بر سرد شدن، تاحدی از شدت تشعشع آنها کاسته می‌شود. این حوضچه‌ها به‌گونه‌ای ساخته شده‌اند که اجازه وارد کردن آسیب به طبیعت را از این مواد می‌گیرند. در واقع می‌توان برای مدت‌های طولانی این زباله‌ها را در این حوضچه‌ها نگهداری کرد، اما به دلایل بسیاری، از جمله موارد اقتصادی، این کار ممکن نیست. لذا باید روی سوخت فرآیندهایی انجام گیرد تا بتوان آن را در انبارهای نهایی ذخیره کرد. این فرآیندها شامل فعالیت‌هایی است که توسط آنها اورانیوم و پلوتونیوم از سایر مواد جدا می‌شوند. در این حال، اورانیوم و پلوتونیوم بازیافت شده، به ابتدای چرخه سوخت بازمی‌گردند تا قابل استفاده شوند و مازاد تفاله‌های سوختی را برای دفع نهایی آماده می‌کنند. این پسماندها که به‌شدت رادیواکتیو نیز هستند، نیاز به انبار کردن طولانی با طراحی مناسب دارند تا شدت رادیواکتیویته آنها به سطوح طبیعی تنزل کند. این مواد به مدت ۴۰ تا ۵۰ سال در آنجا دفن می‌شوند که در این مدت کلیه مواد رادیواکتیو بجز آنهایی که نیم عمر بلند دارند (همچون سزیم ۱۳۷ و استرونیسم ۹۰)، به طور کامل فروپاشی می‌نمایند. البته این فضولات پرتوزا را می‌توان در راکتورهای مخصوص با نوترون بمباران کرد تا قسمتی از آن به مواد کم زیان‌تر تبدیل شوند، اما راکتورهای موجود در تبدیل سزیم ۱۳۷ به استرونیسم ۹۰، به عنوان دو محصول فرعی خطرناک شکافت هسته‌ای، کارایی ضعیفی دارند.

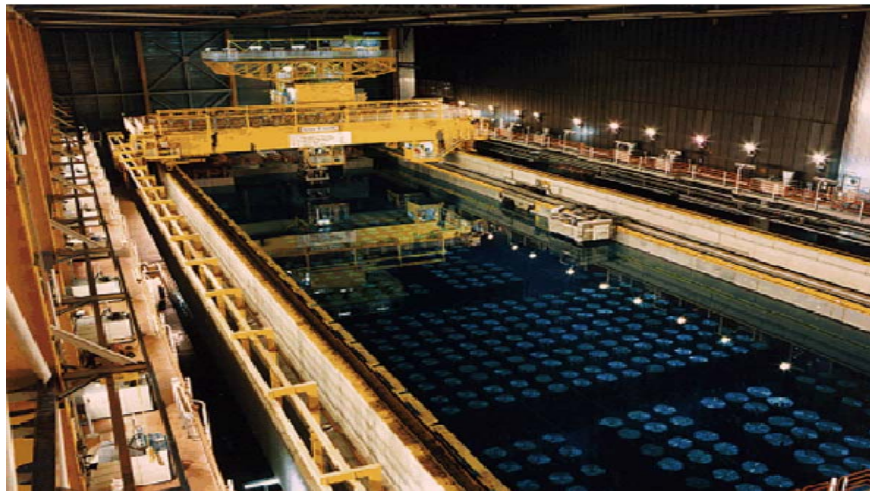
۵-۴- انبارداری موقتی سوخت‌های مصرف شده

مجموعه‌های سوخت مصرف شده که از راکتور خارج می‌شود، به دلیل داشتن مقدار فراوان از عناصری چون رادیوم و کریپتون، بسیار داغ و رادیواکتیو بوده و اشعه و پرتوهای فراوانی را از خود ساطع می‌کند. به طوری که حتی لمس آنها برای چند ثانیه می‌تواند عوارض مرگباری به بار آورد. بنابراین مجموعه‌های سوخت مصرف شده بایستی سرد شده و از تابش رادیواکتیو آنها نیز جلوگیری شود. به این منظور، این مجموعه‌ها برای انبار موقت، به طور حفاظت شده در حوضچه‌های بزرگی شبیه استخرهای شنا موسوم به «حوضچه‌های سوخت مصرف شده»^۱ یا استخرهای انبار که در اطراف راکتورها تعبیه شده‌اند نگهداری می‌شوند. برای خارج کردن میله‌های سوختی از درون راکتور و قرار دادن آنها در استخرهای انبار از روبات و دوربین مدار بسته استفاده می‌گردد. این سوخت‌ها برای ماه‌ها و یا سال‌ها در این استخرها نگهداری می‌شوند. این استخرها مخزن‌هایی بتنی مسلح به لایه‌های فولاد زنگ‌نزن هستند که ۸ متر عمق داشته و پر از آب می‌باشند. آب هم حرارت را به خود جذب کرده و میله‌های سوخت مصرف نشده را خنک می‌کند و هم به عنوان پوشش حفاظتی در برابر تابش رادیواکتیو عمل کرده و جلوی پرتوزایی را می‌گیرد. بایستی توجه داشت تا زمانی که این میله‌های سوخت هسته‌ای مصرف شده در حوضچه‌های آب نگهداری می‌شوند، در برابر حملات تروریستی بسیار آسیب‌پذیر بوده و وقوع یک انفجار می‌تواند به خشک شدن حوضچه‌های آب و ایجاد آتش سوزی و تشعشعات رادیواکتیو منجر شود.

پس از گذشت چند ده سال سوخت‌ها را که حالا از خاصیت تشعشع پراکنی آنها در حد قابل توجهی کم شده، از حوضچه‌ها خارج کرده و به انبارهای خشک انتقال می‌دهند. در این انبارها، سوخت‌ها را در داخل محفظه‌های فلزی یا بتنی نگه می‌دارند. در این مرحله نیز تشعشعات ایجاد شده توسط سوخت‌ها هنوز خطرناک است. مدت نگهداری سوخت‌ها در این مرحله، بسته به نوع سوخت می‌تواند از چند سال تا دهها سال متغیر باشد، ولی به هر ترتیب سوخت‌ها باید آنقدر در این مرحله بمانند تا میزان تشعشعات آنها به حد استاندارد برسد. بایستی توجه داشت، چنانچه این سوخت‌های مصرف شده پس از مدتی مورد بازفرآوری جهت استفاده مجدد از اورانیوم باقیمانده و پلوتونیم تولیدشده، قرار گیرند سیکل سوخت بسته نام می‌گیرد. اما چنانچه این پسماندها و سوخت‌های مصرف شده برای همیشه دفن شوند به آن سیکل سوخت باز گفته می‌شود. بنابراین در سیکل سوخت بسته، سوخت‌های مصرف شده به تأسیسات بازفرآوری سوخت انتقال می‌یابند. این مرحله آنقدر پرتوزا است که حتی از خود گذشته‌ترین تروریست‌ها نیز به آن نزدیک نمی‌شوند؛ اما بروز حوادثی در هنگام حمل و نقل ممکن است باعث رها شدن مواد پرتوزا به محیط گردد. ظروف فولادی با آستر سربی که سوخت مصرف شده در آنها حمل می‌شود، طوری طراحی

1. spent fuel pools

شده‌اند که در برابر هر حادثه قابل پیش بینی مقاوم باشند و نسبت به سخت‌ترین آزمون‌ها شامل آتش‌سوزی، برخورد و سقوط آزمایش شده‌اند.



شکل (۵-۳): تصویری از استخر نگهداری سوخت مصرف شده برای استفاده در مرحله بازیافت در انگلستان

البته بایستی توجه داشت، طبق یک دیدگاه که در ایالات متحده از آن حمایت می‌شود، تا زمانی که سوخت مصرف شده فرآوری نشده باقی بماند، پلوتونیم موجود در آن از دسترس کشورهایی که توانایی بازفرآوری ندارند دور باقی خواهد ماند. در نتیجه خطر ازدیاد گسترده پلوتونیم برای مقاصد نظامی کاهش می‌یابد. بایستی توجه داشت، به طور معمول، این پلوتونیم از درجه راکتوری و شامل مخلوطی از Pu^{239} (بسیار مناسب برای ساخت سلاح‌های اتمی) و Pu^{240} (آلودگی نامطلوب و به شدت رادیواکتیو) است؛ البته جداسازی این دو ایزوتوپ مشکل است. این طرح اشکالاتی دارد که عمده آن این است که با عدم بازفرآوری، جلو امکان استفاده مجدد از پلوتونیم و اورانیوم تهی شده گرفته می‌شود. علاوه بر این، پلوتونیم برای همیشه دسترس ناپذیر باقی نمی‌ماند زیرا پس از چند سال پرتوزایی فرآورده‌های شکافت به سطوح بسیار پایینی افت کرده و این نواحی توانایی بالقوه تبدیل شدن به معدن پلوتونیم را دارند، به طوری که می‌توان از آنها با مشکلات نسبتاً کمی سلاح اتمی ساخت. بنابراین انتخاب منع بازفرآوری از دید حامیان آن، اگرچه در عدم گسترش پلوتونیم شاید موثر باشد، اما نمی‌تواند کشورهای دارای راکتورهای هسته‌ای را که مصمم به دستیابی به پلوتونیم هستند از ساخت کارخانه‌های بازفرآوری خود باز بدارد. اما از طرفی، توان بازفرآوری سوخت مصرف شده، بازده تولید انرژی هسته‌ای را چندین برابر می‌سازد، به طوری که می‌توان اورانیوم بازفرآوری شده را به منظور تولید سوخت تازه دوباره غنی کرده و بدین‌وسیله بازده استفاده از منابع محدود موجود بر روی زمین را به نحو بسیار قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. در این راستا،

انگلستان و فرانسه با ایجاد مراکز بازفرآوری مواد هسته‌ای، به دنبال استفاده مجدد از مواد هسته‌ای هستند.

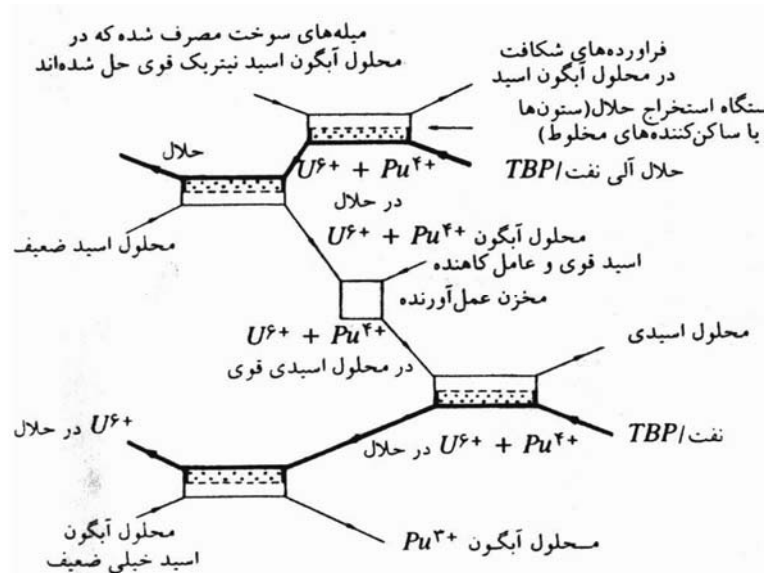
۵-۵- بازفرآوری سوخت‌های مصرف شده

یکی از ویژگی‌های سوخت هسته‌ای نسبت به سوخت‌های دیگر، وجود مقدار زیادی از مواد قابل استفاده در سوخت مصرف شده پس از پایان یک دوره بهره‌برداری از آن است. به عنوان نمونه از اورانیوم با غنای ۲ تا ۴ درصد که ماده اصلی سوخت اکثر راکتورهای قدرت را تشکیل می‌دهد، تنها ۱ تا ۲ درصد برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گرفته است، ولی بقیه آن حاوی مقادیر قابل توجهی ^{235}U ، ^{239}Pu و ^{238}U و دیگر مواد رادیواکتیو (پاره‌های شکافت) است؛ به طوری که ۹۶ درصد این سوخت مصرف شده به صورت اورانیوم و یک درصد آن نیز پلوتونیوم است. این مواد را می‌توان با روش‌های شیمیایی از یکدیگر جدا کرد و اگر شرایط اقتصادی و قوانین حقوقی اجازه دهد، می‌توان سوخت مصرف شده را برای تهیه سوخت هسته‌ای جدید بازیافت کرد. اورانیوم حاصل از دوباره سازی که تا حدی تهی از ^{235}U بوده و معمولاً غلظتی کمی بیشتر از اورانیوم ۲۳۵ در اورانیوم طبیعی دارد، در صورت نیاز می‌تواند پس از تبدیل و غنی سازی، و یا مخلوط شدن با اورانیوم غنی شده، به عنوان سوخت استفاده شود. پلوتونیوم نیز می‌تواند مستقیماً به سوخت MOX (سوخت مخلوط اکسید) تبدیل شود که در آن، اورانیوم و پلوتونیوم مخلوط شده‌اند. در راکتورهایی که از سوخت MOX استفاده می‌کنند، پلوتونیوم بجای اورانیوم ۲۳۵، جانشین سوخت اورانیوم اکسید معمولی می‌شود. همچنین پلوتونیوم را می‌توان برای کاربرد نهایی در راکتورهای سریع انبار کرد. بایستی توجه داشت، حدود ۳۰ گرم از یک زباله اتمی سطح بالا می‌تواند حدود ۸۰۰۰ کیلووات ساعت انرژی تولید کند. در نهایت، ۳ درصد سوخت مصرف شده در یک راکتور آب سبک را نیز ضایعات بسیار خطرناک رادیواکتیو تشکیل می‌دهد که تا دورریزی نهایی انبار می‌شوند.

رایج‌ترین شیوه بازفرآوری، فرآیند پورکس^۱ نام دارد که مخفف عبارت جداسازی اورانیوم و پلوتونیوم است. در این روش، بازفرآوری سوخت مصرف شده با خرد کردن میله‌های سوخت و حل آنها در محلول آبگون اسید نیتریک آغاز می‌شود. در این عملیات، میله سوخت غلاف بیرونی فلزی خود را در قبال حل شدن در اسید نیتریک داغ از دست می‌دهد. سپس این مایع با استفاده از روش استخراج به کمک حلال در چندین مرحله به جداسازی مواد مختلف می‌انجامد. حلال آلی به کار رفته، عموماً محلولی از TBP در نفت سفید است. در این فرآیند، یک محلول آبگون را در تماس با یک حلال آلی درمی‌آورند که علیرغم مخلوط نشدن با آب، میل ترکیبی زیادی با بعضی نمک‌های موجود در محلول آبگون دارد. این نمک‌ها به حلال آلی منتقل می‌شوند. برای بازفرآوری سوخت هسته‌ای مصرف شده معلوم شده است که حلال

آلی تری‌باتیل فسفات (TBP) دارای میل ترکیبی با یون‌های U^{6+} و Pu^{4+} در محلول آبگون اسیدی قوی می‌باشد. علاوه بر این، فرآیند برگشت‌پذیر است؛ زیرا U^{6+} و Pu^{4+} در محلول‌های اسیدی ضعیف، به فاز آبگون برمی‌گردند. بالاخره، میل ترکیبی TBP با پلوتونیوم، اگر پلوتونیوم بجای Pu^{3+} به شکل Pu^{4+} باشد، کمتر است. بنابراین، با این فرآیندها در اولین مرحله استخراج کسر قابل توجهی از محصولات حاصل از شکافت و در مرحله بعد نیز ایزوتوپ‌های سنگین اورانیوم و پلوتونیوم از فرآورده‌های شکافت جدا می‌شوند. در آخرین مرحله، اورانیوم از پلوتونیوم جدا گردیده و سپس اورانیوم باریایی شده به اکسید یا هگزافلوئور اورانیوم تبدیل شده و به عنوان سوخت جدید در راکتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در کارخانه‌های استخراج، به کمک حلال صنعتی، فازهای آلی و آبگون در دو طرح مختلف شامل مخلوط کن‌های رسوب کننده یا ستون‌ها باهم تماس داده می‌شوند. در مخلوط کن‌های رسوب کننده، دو فاز مختلف متناوباً به شدت مخلوط می‌شوند و سپس اجازه می‌یابند رسوب کنند. در استخراج به کمک حلال مبتنی بر مخلوط کن‌های رسوب کننده، یک رشته از این واحدها به کار گرفته می‌شوند، با این توضیح که فازهای آلی و آبگون در خلاف جهت هم جریان دارند. در روش ستون‌ها، فاز آلی سبک‌تر به قسمت تحتانی یک ستون پمپ می‌شود و حال آن‌که فاز آبگون سنگین‌تر به قسمت فوقانی پمپ می‌گردد. داخل ستون را با حلقه‌های مخصوصی به نام «رشیگ» پر می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که دو فاز کاملاً باهم مخلوط می‌شوند. در هر دو روش مخلوط کن‌های رسوب کننده و ستون‌ها، از جریان‌های مختلف‌الجهت برای کمینه کردن حجم مایع‌های لازم استفاده می‌شود. قابل ذکر است، برای دفن نهایی پسماندها، جداسازی آنها در قالب عملیات فرآوری ضروری بوده و دفن پسماندها بدون انجام فرایند جداسازی بسیار خطرناک است. در جریان عملیات بازفرآوری، حجم پسمان‌ها به میزان قابل توجهی کاهش داده می‌شود. به عبارتی یکی از بهترین راه‌های کاهش حجم زباله‌های هسته‌ای، بازفرآوری سوخت هسته‌ای است. ناخالصی‌ها و پاره‌های شکافت در مرحله بازفرآوری به شکل پسمان-های جامد، مایع و یا گازی جدا و به شیوه‌های مناسب انبار و یا دفع می‌شوند. محصولات شکافت که به صورت گاز می‌باشند به منظور برداشت جزء خاصی از آنها فیلتر می‌شوند و پسمان‌های محلول و اکتینیدها نیز تغلیظ شده و سپس در تانکرهای ضدزنگ فولادی خنک شده‌ای که در سلول‌های بتنی جاگذاری شده، برای جامدسازی احتمالی این مواد ذخیره می‌شوند.



شکل (۴-۵): بازفرآوری سوخت هسته‌ای مصرف شده با استفاده از فرآیند پورکس

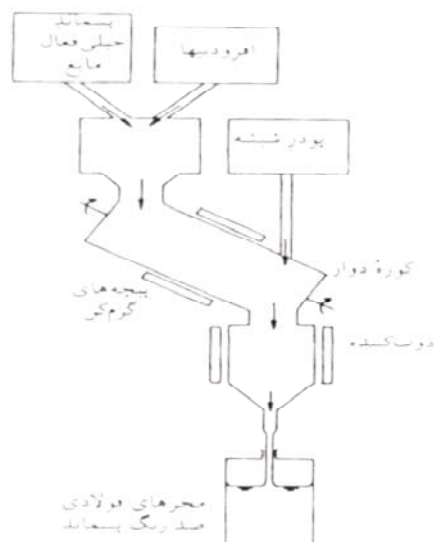
مهمترین کارخانه‌های بازیافت سوخت مصرف شده در فرانسه و انگلستان هستند که ظرفیت آنها مجموعاً ۵۰۰ تن و برابر با حداقل یک سوم کل تولید سوخت مصرف شده دنیا است. مقدار کل بازیافت سوخت مصرف شده طی ۳۵ سال گذشته در دنیا ۵۵۰۰۰ تن گزارش شده است. در نهایت بایستی متذکر شد، ترکیب سوخت‌های انتقال یافته به کارخانه بازفرآوری به عواملی چون ترکیب اولیه سوخت راکتور، طیف انرژی نوترون‌ها در قلب راکتور، آهنگ تولید حرارت در سوخت، مدت زمان تابش‌دهی سوخت در راکتور و مدت زمان خنک شدن و نگهداری سوخت مصرف شده قبل از شروع عملیات بازفرآوری بستگی دارد. امروزه روش‌های بسیاری همچون فشردن سازی^۱، پردازش شیمیایی^۲، شیشه سازی^۳، محفوظ سازی^۴ و ذخیره سازی^۵ برای پردازش و دفع ضایعات هسته‌ای پرمیاری بکار گرفته می‌شوند.

۵-۶- دوره‌شت یا دفع نهایی پسمان‌ها^۶

برای دفع پسماندهای هسته‌ای پرمیاری بسته به تاثیر مخرب آنها روی محیط زیست، راه‌های مختلفی در حال بررسی و تحقیق است که بسیاری از این روش‌ها فاقد ارزش و کیفیت لازم هستند. در حال

1. Compaction
2. Chemical treatment
3. Verification
4. Canning and sealing with concrete
5. Storage
6. Waste Disposal

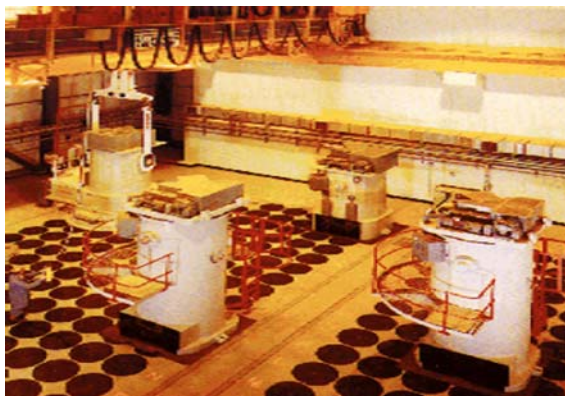
حاضر، بسیاری از کشورها از جمله بریتانیا و فرانسه در این فکر هستند که زباله را به صورت جامد درآورده و با شیشه‌ای که دارای ترکیب مناسب است، درآمیزند (فرآیند محصورسازی یا جامدسازی). در این روش، پسمان‌های مایع سطح بالا باقیمانده از عملیات بازفرآوری را حرارت می‌دهند تا تبخیر گردیده و نیز به پودر تبدیل شود. پس از این فرآیند که آهی کردن خوانده می‌شود، پودر را با بروسلیکات مخلوط می‌نمایند تا در حرارت بالا، پس از ذوب در کوره‌های مخصوصی به صورت شیشه مایع درآمده و برای ذخیره‌سازی درون تیوپ‌های فولادی ضدزنگ ریخته شوند. در نهایت، منفذ این تیوپ‌ها با جوشکاری مسدود می‌شود. این فرآیند، شیشه‌سازی نام دارد. تحقیقات قابل ملاحظه‌ای پیرامون خواص شیشه‌های مناسب در جریان است. زباله‌ای که به صورت شیشه درآمده است، برای ذخیره‌سازی، احتمالاً در شکل قطعه‌های استوانه‌ای به طول حدود ۲m و قطر ۵/۰m، در محفظه‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن که دارای غلافی از یک فلز خیلی مقاوم در برابر خوردگی، مثل سرب، مس یا تیتانیوم است، قرار خواهند گرفت. این قطعه‌ها را می‌توان سال‌ها در انبارهای مناسب تحت کنترل نگهداری کرد و سرانجام آنها را در سازندهای زمین شناختی پایدار در چند هزار متری زیر زمین یا کف یا زیر اقیانوس دفن کرد. البته لازم است اطمینان حاصل شود که هیچ آبی از زمین به محل‌های دفن پیشنهادی جریان پیدا نکند؛ زیرا اگر شسته شدن زباله تبدیل به شیشه شده خیلی پیشرفت کند، ممکن است باعث انتقال مواد پرتوزا به سطح زمین گردیده و منابع آب آشامیدنی را آلوده کند.



شکل (۵-۵): فرآیند AVM فرانسه برای تبدیل زباله مایع شدیداً پرتوزا به شیشه

همین طوری که گفته شد، خاصیت رادیواکتیو سوخت مصرف شده ۴۰ سال بعد از خروج از راکتور به

شدت کاهش یافته و به میزان ۱/۱۰۰۰ مقدار اولیه آن می‌رسد که در این حالت جابه‌جایی آن خیلی آسان‌تر می‌شود. به همین دلیل پسمان‌های شیشه شده و یا مجتمع‌های سوخت مصرف شده برای طی این زمان در استخرهای مخصوص آب و تسهیلات ذخیره شبکه خشک^۱ نگهداری می‌شوند. یک روش دیگر جامدسازی پسمان‌های سطح بالا که نسبتاً پیچیده‌تر بوده و به نام سنگ‌های مصنوعی^۲ نامیده می‌شود در استرالیا مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن مواد رادیواکتیو در شبکه کریستال کانی‌هایی که در شرایط طبیعی پایدار هستند قرار داده می‌شوند. یکی از روش‌های تدفین، فشردن پسمان‌های با استفاده از روبات‌های کنترل از راه دور است که باطله‌های مذکور به داخل مخازن بسیار ایمن پوشیده شده با سرب، فولاد و الکترولیت مس خالص قرار می‌گیرد و می‌توان طی میلیون‌ها سال در مناطق خاصی از زمین‌شناسی دفن کرد. البته برای اینکار نیاز به انرژی خیلی زیادی خواهد بود. بایستی توجه داشت، دفع زباله‌های هسته‌ای اولاً نیازمند دقت و توجه زیاد و بکاربردن روش‌ها و آزمایشات فراوانی است و دیگر اینکه هزینه بسیار بالایی دارد که از عهده هر کشوری برنمی‌آید. از طرفی، دفن این زباله‌ها تابع مقررات بسیار سخت و بسیار پیچیده‌ای است. امروزه مراکز محدودی در دنیا که عمدتاً چندملیتی هستند قادرند زباله‌های هسته‌ای را انبار و دفع نمایند. در حال حاضر، تعدادی از کشورها، در حال انجام مطالعاتی در زمینه تصمیم‌گیری بهترین راه برای دفع سوخت مصرف شده و پسمان‌های حاصله پس از فرایند بازپردازش هستند.



شکل (۵-۶): سیلوهای نگهداری تیوب‌های پسمان‌های سطح بالای شیشه شده
هر دیسک در کف حاوی یک سیلو با ده تیوب داخل آن

۵-۶-۱- دفن نهایی در اعماق زمین

هم اکنون بهترین گزینه‌ای که توسط برخی از کشورها همچون آمریکا و بریتانیا و فرانسه مورد

1. Dry Cask Storage
2. Synroc

فصل پنجم: مدیریت زباله‌های هسته‌ای / ۱۶۵

استفاده قرار می‌گیرد، دفع زباله در یک مخزن سنگی است. در این روش، زباله را در یک مخزن در نزدیکی سطح زمین^۱ NSR نگهداری می‌کنند تا امکان مراقبت بیشتری فراهم باشد. هرچند این روش به محافظت بیشتری نیاز دارد، ولی با ایجاد تونل‌های کم عمق در کوه‌ها و بررسی‌های انجام شده، بسیار قابل اطمینان‌تر از دیگر روش‌ها است. روش دیگر، نگهداری این نوع زباله‌ها در پسمان‌گورهای عمیق^۲ DGR است. در این حالت، زباله‌ها در محفظه‌های خاصی که در مقابل ضربه خوردگی مقاومت هزاران ساله دارند، قرار گرفته و سپس به پسمان‌گورها منتقل می‌شوند. مرحله عملیاتی برای دفن زباله هسته‌ای بستگی به قدرت تشعشع و خطر حاصل از آنها دارد. براساس مقررات آژانس حفاظت از محیط زیست EPA، این مناطق دفع و انبار زباله‌های هسته‌ای بایستی توانایی قرنطینه و دور نگهداری زائدات هسته‌ای از محیط زیست را به مدت ۱۰ هزار سال داشته باشد، زیرا این مدت حداقل زمانی است که مواد هسته‌ای به صورت خطرناک باقی می‌مانند. بنابراین ایجاد این نوع پسمان‌گورها از پیچیدگی و هزینه‌های بسیار بالایی برخوردار هستند. انبارهای زیرزمینی می‌توانند در بسترهای نمکی، رسی و صخره‌ای ایجاد شوند. البته هنوز تصمیم نهایی درباره بهترین روش دفن نهایی گرفته نشده است، و فوریت آنی هم وجود ندارد زیرا بیش از ۱۰ سال دیگر برای حل این مساله وقت باقی است.



شکل (۵-۷): نمای شماتیک از مراحل دفن پسمان‌های رادیواکتیو در اعماق بیش از ۳۰۰ متر

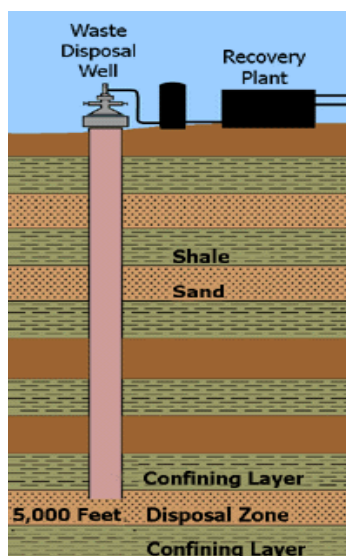
1. Near Surface Repository
2. Deep Geological Repository

یکی از روش‌های دفع نهایی زباله‌ها، دفن آنها در چاه‌های عمیق است که در این روش، چاه عمیقی حفر می‌کنند تا در نتیجه ادغام گرمای حاصل از فرآیندهای زمین گرمایی و نیز پرتوزایی سنگ‌های اطراف، زباله‌ها ذوب شده و از بین بروند. با توجه به متغیرهای فراوان و مسائل ناشناخته دیگر، این روش بسیار نظری جلوه می‌کند و قابل اعتماد نیست. البته هنوز تصمیم نهایی درباره بهترین روش دفن نهایی گرفته نشده است. در روش دیگری زباله‌ها را در یک مخزن زیرزمینی که در یک توده سنگ مناسب حفر شده است، قرار می‌دهند. این توده سنگ باید یک سد نهایی در برابر مهاجرت زباله هسته‌ای از مخزن باشد، به نحوی که بتوان امکان ایجاد هرگونه شکاف در سیستم‌های نگهداری زباله را کاهش داد. هم-اکنون این روش در کشورهایی همچون آلمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از نشت هیدرولیکی، یک روش پیشنهادی دیگر برای دفع زباله‌های هسته‌ای است. در این روش، حفره‌هایی در سنگ‌ها ایجاد کرده و با استفاده از فشار هیدرولیکی، سنگ رس را به صورت افقی قطع می‌کنند. سپس زباله‌های رادیواکتیو، در داخل مایع سیمانی پخش شده و در این لایه‌ها قرار داده می‌شوند. یکی دیگر از پیشنهادهای محتمل، استفاده از معدن نمک است. دفع نهایی به هر طریق که صورت گیرد، روش آماده سازی برتر زباله‌ها این است که آنها را در سرامیک‌هایی که عناصر رادیواکتیو از آنها قابل نشت هستند، به صورت متبلور درآورند. انتخاب مکان مناسب برای احداث پسمان‌گور از مسائل مهمی است که بایستی به دقت مورد توجه قرار گیرد. این مطالعات معمولاً در سه مرحله ارزیابی ناحیه‌ای، ارزیابی تفصیلی و تایید محل صورت می‌پذیرد.

بایستی توجه داشت، تاریخچه پایداری زمین شناسی، وضعیت تکتونیکی، وضعیت منطقه از لحاظ آتشفشانی بودن، سطح آب‌های زیر زمینی و وضعیت مناطق عبور، وضعیت لایه بندی و سطوح تماس لایه‌های زمین شناسی در محیط اطراف، خواص شکاف‌های بسته شده و تاریخچه آنها، خواص شکاف-های پر شده و تاریخچه آنها، خواص و تاریخچه دگرگونی سنگ، شیمی سنگ و قابلیت جریان سیال در آن، میدان فشار سیال در محیط، میدان تنش و حرارت در سنگ، وضعیت توپوگرافی منطقه، وضعیت و پراکنش خاک در منطقه، آب و هوای اقلیمی منطقه و تغییرات آن، شناخت آب‌های سطحی و بیولوژی زمینی و آبی، معیارهای اقتصادی، سیاسی و فرهنگی منطقه، میزان بارندگی، حیات وحش و پوشش گیاهی منطقه، شناخت درزها و شکاف‌ها، ژئوشیمی محیط، فاصله از مناطق مسکونی و مردم، دسترسی به راه‌های ارتباطی و دسترسی به امکانات جهت احداث محل دفن و تهیه مایحتاج سایت، از معیارهای مهم انتخاب محل دفن نهایی در اعماق زمین می‌باشند. در این راستا، تحقیقات بسیاری در چند کشور جهان برای تست کردن چینه‌های زمین شناختی اعماق زمین به منظور پی بردن به تناسب آنها به عنوان محل دفن نهایی زباله‌ها جریان دارد. هدف این تحقیقات این است که اطمینان حاصل گردد صخره‌هایی که زباله در آنها قرار می‌گیرد، از نظر زمین شناختی برای دوره‌های چند میلیون سالی پایدار هستند و

فصل پنجم: مدیریت زباله‌های هسته‌ای / ۱۶۷

می‌توانند دماهای بالایی حاصل از واپاشی در محل دفن را تحمل کنند. اگر در گذر زمان و تغییرات خاص مثلاً تکتونیکی و یا انفجارات اتمی و... آسیب‌پذیری به پسمان‌های مدفون میسر گردد، در این صورت حوضه‌های آبی و یا حوضچه‌های جانبی و زیرآبی‌ها و زهکشی‌های طراحی و ساخته شده باید آن‌چنان باشند که در یک مدار بسته این چرخه اتفاق بیفتد و باز تحلیل ریسک در این شرایط از ایمنی لازم برخوردار خواهد شد.



شکل (۵-۸): برشی از یک انبار ذخیره زباله سوخت هسته‌ای

۵-۶-۲- سایر روش‌های دفع نهایی سوخت مصرف شده

از سایر روش‌های دفع زباله‌های هسته‌ای، دفن زباله‌های پرتوزا در ورقه‌های یخی است. چنانچه زباله در مرکز ورقه‌های یخی در قطب قرار داده شود، تجمع و حرکت یخسار به اندازه کافی کند هست و تا پیش از رسیدن زباله به حاشیه یخ، هزاران سال طول می‌کشد. طی این زمان بلندمدت، زباله‌های پرتوزا بی‌زیان خواهند شد. این راه حل چندین مشکل دارد. به طور مثال، امکان حرکت ناپایدار یخ که ظرفیت پذیرش زباله را تعیین می‌کند و همچنین افزایش گرمای زمین را نباید دست‌کم گرفت. از طرف دیگر، در صورتی که سلول‌های نگهداری زباله آسیب ببینند امکان دارد زباله‌ها در سطح گسترده‌ای پراکنده شود که نکته بسیار مهمی است. هرچند این پیشنهاد برای بسیاری از سیاستمداران خوشایند است، ولی ممکن است آسیب‌های شدیدی به بشر وارد آورد. همچنین برای دفع زباله‌های هسته‌ای می‌توان زباله‌ها را در تابوت‌هایی در اعماق دریاها و اقیانوس‌ها دفن کرد، زیرا تصور می‌شود که زباله در نهایت طی فرآیندهای

فرورانش^۱ می‌تواند به درون گوشته زمین انتقال یابد. دفن و دفع زباله‌های اتمی را یک بار امریکا و کشورهای اروپایی در بستر دریاها و اقیانوس‌ها انجام دادند، اما این کار حالا ممنوع شده است. البته هنوز هم بعضی دانشمندان پیشنهاد می‌کنند که بستر دریا محل مناسبی برای دفن فضولات پرتوزاست، ولی شناخت کافی در مورد وضعیت کلی رسوبات این ژرفناها وجود ندارد تا بتوان اطمینان داشت که این زباله‌ها به مرور زمان و بر اثر فعالیت‌های شدید دریایی از آنجا فرار کرده و بیرون رانده نمی‌شوند، بنابراین پیش‌بینی آثار این عمل دشوار است. هرچند که پاکستانی‌ها از این روش استفاده کرده‌اند.

روش دیگری که بررسی می‌شود، دفع زباله‌های اتمی در فضا است، به طوری که مواد پرتوزا در یک راکت قرار گرفته و به فضا فرستاده شود تا بدین ترتیب این مشکل از زمین دور شود. یکی از پیشنهادها دفن زباله‌های هسته‌ای در فضا، پرتاب فضولات با پرتوایی بالا به درون خورشید است تا در آنجا از بین بروند. اما این عمل هم با اعتراضاتی مواجه شد و نیز شبهه‌هایی وجود دارد که در صورت شکست پرتاب موشک‌ها، این زباله‌ها از جو زمین خارج نشود. به علاوه، هرگاه کپسول‌های محتوی مواد پرتوزا به فضا پرتاب شوند، روزی به زمین باز خواهد گشت. درنهایت، هزینه، انرژی و مواد مورد نیاز برای انجام آن ارقام نجومی خواهد بود. در نهایت، محققان در تلاش هستند که از پسمان‌های هسته‌ای در ساخت بتن خاص با مقاومت‌های مناسب استفاده نمایند. در این فرآیند ترکیبات هیدراتاسیون و سایر واکنش‌های شیمیایی بتن تا حدود ۶۰ درصد از تشعشعات این مواد می‌کاهد. بتن سبک تولیدی از پسمان‌های هسته‌ای را با توجه به ویژگی‌های خاص آن در ساخت دیوارهای برشی و تیرهای فرعی در بخش‌های مختلف سازه‌های عمرانی می‌توان به کار گرفت. در نهایت بایستی متذکر شد، برای رفع معضل زباله‌های اتمی، راکتورهای پیشنهاد شده‌اند که زباله هسته‌ای را مصرف و آن را به زباله هسته‌ای کم‌ضررتر تبدیل می‌کنند. راکتورهای Integral Fast که هیچ زباله فرااورانیومی تولید نکرده و در واقع می‌توانست زباله فرااورانیومی را مصرف کند، نمونه بارز تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بود. این طرح تا مرحله آزمایش وسیع و گسترده پیش رفت؛ اما بعداً توسط دولت ایالات متحده لغو شد. البته عده‌ای عقیده دارند بهترین راه حل ممکن در حال حاضر انباشتن زباله‌های هسته‌ای در انبارهاست چرا که احتمالاً در آینده با پیشرفت تکنولوژی راهی برای استفاده از این مواد پیدا خواهد شد به این ترتیب این مواد می‌توانند خیلی با ارزش‌تر از آن باشند که دفن شوند.

۵-۷- پسمانداری هسته‌ای در جهان

در این بخش، وضعیت مدیریت زباله‌های هسته‌ای در برخی از کشورهای مطرح جهان مورد بررسی قرار گرفته است. در حال حاضر فقط حدود یک سوم سوخت مصرف شده بازفرآوری می‌شود تا انرژی

1. Sub duction

فصل پنجم: مدیریت زباله‌های هسته‌ای / ۱۶۹

باقیمانده آن اخذ شود. فرانسه، انگلیس، روسیه، هند و ژاپن، بیشترین سهم بازفرآوری سوخت مصرف شده هسته‌ای در جهان را دارا هستند. کارخانه‌هایی در فرانسه و انگلستان وجود دارند که مرحله بازفرآوری سوخت نیروگاه‌های کشورهای اروپایی و ژاپن را انجام می‌دهند. اما برای حجم قابل توجهی از سوخت‌های هسته‌ای مصرف شده در راکتورهای جهان، هنوز هیچ‌گونه تصمیم‌گیری خاصی گرفته نشده و اکثر این سوخت‌ها، به‌ویژه در کشورهای اروپایی، در مخازن مخصوصی در راکتورها نگه داشته می‌شوند. بنابراین، اپراتورهای نیروگاه‌ها تا زمان یافتن راهکاری اساسی جهت مهار زباله‌های هسته‌ای بایستی مبالغ هنگفتی را خرج کنترل رادیواکتیو متصاعد شده کنند. در این راستا، در سال ۱۹۹۷ در ۲۰ کشور که عمده انرژی اتمی جهان در آنها تولید می‌شود، ظرفیت ذخیره‌سازی سوخت مصرف شده در راکتورها ۱۴۸ هزار تن بود که ۵۹ درصد آن مورد استفاده قرار گرفت. البته ظرفیت ذخیره‌سازی جدا از راکتورها نیز ۷۸ هزار تن بود که ۴۴ هزار تن آن به کار گرفته شد. در حال حاضر، برخلاف امکانات انبارسازی، هیچ‌گونه امکاناتی برای دفن این سوخت‌های مصرف شده وجود نداشته و بسیاری از مناطق جهان نیز که خصوصیات نگهداری زباله‌های اتمی را دارند، هنوز به طور کامل قابل اطمینان نیستند و لازم است که از محل‌های مطمئن‌تر برای این منظور استفاده شود، هرچند بعضی از کشورها مطالعات فنی و زیست‌محیطی زیادی برای انتخاب مکان‌های دفن نهایی زباله‌های هسته‌ای انجام داده‌اند.

یکی از کشورهایی که در آن سوخت هسته‌ای بازفرآوری نشده و به همان صورت انبار می‌شود، ایالات متحده آمریکا است. در حال حاضر، در ایالات متحده آمریکا، به دلایل سیاسی و اقتصادی، آخرین مرحله از بین بردن زباله‌های هسته‌ای، دفن کردن سوخت‌های هسته‌ای استفاده شده می‌باشد. در این کشور تا سال‌های ۱۹۶۰، زباله‌های پرتوزای ضعیف و متوسط را غالباً با بتن آمیخته و در داخل بشکه می‌ریختند و به دریا می‌انداختند. در این راستا، هزاران بشکه از این زباله‌ها به داخل خلیج ماساچوست در نزدیکی بوستن انداخته و قسمتی از آنها را هم در خود بندرگاه انباشتند. بنابر یک برآورد، ۴۷۰۰۰ بشکه زباله‌های پرتوزا در فاصله ۴۸ کیلومتری ساحل سانفرانسیسکو در نزدیکی جزایر فارالون (که اکنون پناهگاه آبیان و پرندگان است) و تعداد بیشماری هم در داخل اقیانوس در نزدیکی نیویورک سیتی انباشته شده‌اند. البته این فرآیند از سال ۱۹۷۰ در آب‌های ایالات متحده ممنوع شد. در سال‌های ۱۹۸۰، کنگره قانونی را تصویب کرد که موجب آن وزارت انرژی آمریکا (DOE) ملزم شد محل مناسبی برای احداث تسهیلات دورریزی این زباله‌ها ایجاد کند. در حال حاضر، تقریباً چهار میلیون مترمکعب زباله‌های پرتوزای ضعیف از راکتورها و سایر تسهیلات و تجهیزات هسته‌ای همچون بیمارستان‌ها و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، بعد از بسته بندی و به سه جایگاه دفع و دفن زباله نوادا، ایالت واشنگتن و کارولینای جنوبی حمل و در آنجا در بستر کم عمق زمین دفن شده است. همچنین پسمان‌های هسته‌ای نیز که از چرخه سوخت در نیروگاه هسته‌ای و یا تولید سلاح هسته‌ای تولید شده‌اند، در استخرهای ویژه جهت ذخیره سازی موقت و نیز در

صحراهای جنوب غرب ایالات متحده همانند لایه‌های عمیق نمکی در نیومکزیکو دفن می‌شوند. تا سال ۲۰۰۳، بیش از ۴۹۰۰۰ تن از انواع سوخت‌های مصرف شده انبار شده بودند.



شکل (۵-۹): ورودی یکی از منفذهای تعیین شده در کوه یاکا

در حدود ۲۰ سال قبل کنگره آمریکا، کوهستان یوکا^۱ واقع در ایالت نوادا را به عنوان مناسب‌ترین منطقه برای نگهداری زباله‌های هسته‌ای پرعیار تعیین کرد. این پروژه بزرگترین محل دفن عمیق زباله‌های هسته‌ای سطح بالای جهان خواهد بود. کوهستان یوکا دارای ظرفیت ۷۷ هزار تنی برای نگهداری زباله‌های اتمی بوده و تا سال ۲۰۳۰ میلادی به طور کامل پر نخواهد شد، البته قرار است برای نگهداری زباله‌ها به مدت چند صدسال دیگر نیز گسترش و تکامل یابد. از طرفی، مقدار بارش در این منطقه در حدود ۱۵ سانتیمتر بوده و مقدار ناچیزی از این بارش به زمین نفوذ می‌کند و آبی هم که در سطح زمین قرار دارد قبل از نفوذ کردن بخار می‌شود. در نتیجه سنگ‌هایی که در اعماق مخزن این کوهستان قرار گرفته‌اند، خشک و بدون رطوبت هستند که این مسئله باعث افزایش طول عمر این مخزن می‌شود. این کشور امیدوار است تمام زباله‌اش را در این صحرا دفن کند. روسیه نیز در حال حاضر توانایی نگهداری ۱۶ هزار تن پسمان سوخت هسته‌ای را دارا بوده و برای این امر بیش از ۱۰۵ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری را مصرف کرده است. تاسیسات نگهداری سوخت هسته‌ای در سبیریا، بهترین مکان برای نگهداری پسمان‌های هسته‌ای معرفی شده است. همچنین این کشور، در صد ایجاد یک مرکز بین‌المللی نگهداری سوخت مستعمل هسته‌ای در در استان «چیتا» و در شهر «کراسنو کامنسک» سبیری است. در

1. Yucca

این منطقه، زمین مناسب، تاسیسات لازم و چاه‌های عمیق برای نگهداری سوخته‌های مستعمل هسته‌ای وجود دارد. این مرکز قادر خواهد بود به کشورهای مصرف کننده سوخت اتمی روسیه در منطقه جنوب شرق آسیا همچون ژاپن، کره جنوبی و تایوان، خدمات کامل ارایه دهد. البته گفته شده است، مقامات اتحاد شوروی سابق مقادیر عظیمی زباله‌های پرتوزا را در آب‌های دور از سواحل کشور خود تخلیه کرده‌اند.

در انگلستان نیز از زمان آغاز به کار اولین نیروگاه هسته‌ای «سلافیلد» در سال ۱۹۵۶، تاکنون حدود ۴۷۰ هزار مترمکعب سوخت هسته‌ای مصرف شده و سایر مواد رادیواکتیو حاصل از صنعت انرژی هسته‌ای انگلیس انباشته شده است که این حجم پنج برابر ظرفیت انبار هسته‌ای «رویال آلبرت هال» است. در بریتانیا سالانه چیزی در حدود ۲۵۰۰ متر مکعب از ضایعات با رادیواکتیویته متوسط و ۲۵۰۰۰ مترمکعب از ضایعات با اکتیویته پایین در مقایسه با فقط ۱۱۰۰ مترمکعب از ضایعات با اکتیویته بالا در مدت متجاوز از ۳۰ سال تولید می‌شود. بایستی توجه داشت که دفن مواد زائد هسته‌ای در انگلیس، از سال ۱۹۹۷ تاکنون متوقف شده است. در حال حاضر، بسیاری از مواد زائد هسته‌ای نیروگاه‌های اتمی انگلیس در محل نیروگاه انبار می‌شوند؛ اما این راه‌حلی موقتی است. البته گفته می‌شود این کشور هر ساله مقادیر زیادی از زباله‌های پرتوزای خود را حتی بدون آنکه آنها را در بشکه قرار دهد، در دریای ایرلند تخلیه می‌کند. در هرحال، هم اکنون ۱۲ محل (۷ محل در انگلیس و ۵ محل در اسکاتلند) به عنوان مکان‌های احتمالی دفن مواد خطرناک رادیواکتیو این کشور مشخص گردیده است. از طرف دیگر، دولت انگلیس با تغییر سیاست ۳۰ سال گذشته خود، با دفن مواد زائد هسته‌ای «سطح متوسط» کشورهای خارجی، پس از بازفرآوری در انگلیس، در خاک این کشور موافقت کرده است. «سازمان ملی سوخت» انگلیس اعلام کرده است که براساس این تصمیم، سه هزار مترمکعب مواد زائد هسته‌ای با سطح متوسط در خاک انگلیس دفن خواهد شد. این مواد زائد هسته‌ای به طور عمده از ژاپن و برخی کشورهای اروپایی مانند آلمان، اسپانیا و ایتالیا برای فرآوری وارد انگلیس می‌شوند.

فرانسه نیز در زمینه آماده‌سازی برای دفع زباله‌های هسته‌ای با رادیواکتیویته سطح بالا (HLW) پیشتاز است. این کشور، در ۱۹۸۹ و ۱۹۹۲، کارخانه‌های تجاری را مکلف کرد تا HLW باقی‌مانده از عمل‌آوری مجدد سوخت اکسید را تبدیل به شیشه کنند. همچنین، فرانسه زائدات هسته‌ای کشورهای دیگر همچون آلمان را در تاسیسات بازفرآوری خود بازپردازش کرده و پس از بازفرآوری، این مواد را برای دفن به کشور مبدأ بازپس می‌دهد. ژاپن نیز برای افزایش امنیت انرژی این کشور، از بازفرآوری سوخت مصرفی در راکتورهای هسته‌ای حمایت می‌کند. تاسیسات بازفرآوری سوخت مصرفی ژاپن سالانه ۹۰ تن سوخت هسته‌ای مصرفی را بازفرآوری می‌کنند. در سال ۱۹۹۳، ژاپن ۸ میلیارد دلار برای فعالیت‌های بازفرآوری سوخت هسته‌ای هزینه کرد. همچنین قرار است تاسیسات عظیم کرواشو-مورا نیز برای

بازفرآوری سالانه ۸۰۰ تن سوخت مصرفی احداث گردد. سوئد نیز از نظر برنامه‌های دفع مستقیم سوخت مصرف شده بسیار پیشرفته است. در آلمان نیز، بحث سیاسی در مورد یافتن یک مخزن نهایی برای زباله رادیواکتیو وجود دارد. البته آلمان تأسیسات بازفرآوری زباله‌های هسته‌ای نداشته و این مواد برای بازفرآوری به تأسیسات بازفرآوری «لاهاگ» در شمال غربی فرانسه فرستاده می‌شود. همچنین، فنلاند نیز تصمیم به ساخت مرکزی برای دفن نهایی سوخت‌های مصرف شده در اعماق زمین دارد. کار ساخت این مرکز در سال ۲۰۱۱ شروع شده و تا سال ۲۰۲۰ ادامه می‌یابد. همچنین اوکراین نیز که در حال حاضر به ازای دفن هر کیلوگرم زباله هسته‌ای در خاک روسیه ۷۲۰ دلار پرداخت می‌کند، به دنبال ساخت مراکز دفن نهایی این زباله‌ها در خاک خود است، چرا که از سال ۲۰۱۲، زباله‌های هسته‌ای که در خاک روسیه نگهداری می‌شوند، به اوکراین بازگردانده خواهند شد.



شکل (۵-۱۰): عملیات آماده سازی زباله های اتمی برای انبار کردن در کشور ژاپن

فصل ششم

کاربردهای صلح آمیز تکنولوژی هسته‌ای

مقدمه

در دهه اول و دوم قرن بیستم، نظریه‌های نسبیت انشتین، امکان تبدیل جرم به انرژی را به بشر آموخت. متأسفانه اولین کاربرد این نظریه، منجر به تولید بمب‌های اتمی در سال ۱۹۴۵ توسط آمریکا شد که شهرهای هیروشیما و ناگازاکی در ژاپن را به تلی از خاک تبدیل کردند و چند صد هزار نفر افراد عادی را کشتند و تا سال‌های متمادی، افراد باقی مانده که آلوده به مواد رادیواکتیو شده بودند، به تدریج در پی سرطان‌های مختلف، با درد و رنج فراوان از دنیا رفتند. بعد از این مرحله غیرانسانی از کاربرد فرمول انشتین، دانشمندان راه مهار کردن بمب‌های اتمی را یافته و از آن پس، نیروگاه‌های اتمی متکی بر پدیده شکست اتم‌های اورانیوم برای تولید الکتریسیته ساخته شد. اما علیرغم پیشرفت همه جانبه علوم و فنون هسته‌ای در طول نیم قرن گذشته، هنوز این تکنولوژی در اذهان عمومی ناشناخته مانده است. وقتی صحبت از تکنولوژی اتمی به میان می‌آید، اکثر مردم جهان انرژی اتمی را منحصر به یک نوع سلاح جنگی می‌دانند و ابر قارچ مانند حاصل از انفجارات اتمی را در ذهن خود مجسم می‌کنند. البته برخی نیز به راکتورهای اتمی برای تولید برق اشاره می‌کنند؛ ولی کمتر کسی را می‌توان یافت که به جنبه‌های دیگر استفاده از علوم هسته‌ای آگاهی داشته باشد. در صورتی که علوم و فنون هسته‌ای جزء فناوری‌های پیشرفته و برتر در عصر کنونی بوده و خدمات ارزنده‌ای را برای بهبود زندگی بشر ارائه نموده است. تکنولوژی هسته‌ای یک تکنولوژی فراگیر بوده و تقریباً تمام رشته‌های علوم و فنون را در برمی‌گیرد. امروزه تأثیر تکنولوژی هسته‌ای در گسترش دانش بشری، تسلط بر طبیعت، تأمین رفاه و پیشرفت زندگی بشر غیرقابل تردید بوده و به درستی می‌توان آن را از عناصر و محورهای اصلی توسعه پایدار و از عوامل

مهم اقتدار یک کشور به شمار آورد.

از طرفی، طبق تحقیقات صورت گرفته، در ژاپن، سهم درآمدهای ناشی از کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در مواردی غیر از تولید انرژی ۵۲٪ و برای فراوری انرژی ۴۸٪ است. همچنین در آمریکا، حجم درآمد حاصل از کاربرد پرتوهای هسته‌ای در سال ۱۹۹۵ میلادی ۳۳۱ بیلیون دلار بوده؛ در حالی که، درآمد ناشی از نیروگاه‌های هسته‌ای ۹۰ بیلیون دلار بوده است. این ارقام حاکی از اهمیت فزاینده جنبه‌های دیگر کاربرد تکنولوژی هسته‌ای می‌باشد. بنابراین، استفاده از تکنولوژی هسته‌ای، یکی از اقتصادی‌ترین شیوه‌ها در دنیای صنعتی است که گستره عظیمی از کاربردهای مختلف را در برمی‌گیرد. امروزه از رادیوایزوتوپ‌ها و پرتوهای ناشی از فرایندهای هسته‌ای جهت بهبود محصولات غذایی، نگهداری مواد غذایی، تعیین منابع آب‌های زیرزمینی، استرلیزه کردن بانداژها، نخ بخیه، پارچه‌های جراحی، مواد آرایشی، پستانک بچه، حلقه‌های لاستیکی مخصوص گاز گرفتن کودک و ...، آنالیز هورمون‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری و دستگاه‌های تصویربرداری، کنترل فرایندهای صنعتی، کشف معادن اورانیوم، مس، روی، نیکل و آهن، بررسی آلودگی محیط زیست به‌ویژه تعیین منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی و اقیانوس‌ها، باستان‌شناسی و سنجایی صخره‌ها استفاده فراوانی به عمل می‌آید. البته هم‌اکنون نیز دانشمندان بسیاری در سطح جهان در تلاشند که کاربردهای بیشتری از این تکنولوژی را پیش چشم جهانیان به نمایش بگذارند.

۶-۱- رادیوایزوتوپ‌ها

یکی از نتایج ارزشمندی که در چرخه سوخت مورد توجه مراکز تحقیقاتی، صنعتی و کشاورزی و حتی پزشکی و بهداشت عمومی قرار گرفته است، تهیه و تولید رادیوایزوتوپ‌های حاصله در مراحل مختلف چرخه سوخت است که تقریباً در اکثر شاخه‌های مختلف از علوم به نحوی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تابحال بیش از ۲۰۰ رادیوایزوتوپ تهیه شده است که ۵۰ مورد آنها کاربردهای صلح آمیز بسیار گسترده‌ای یافته‌اند. رادیوایزوتوپ‌ها عمدتاً به وسیله فرایند شکافت هسته‌ای در راکتورهای قدرت و نیز راکتورهای تحقیقاتی قابل تهیه می‌باشند، البته برخی از رادیوایزوتوپ‌ها، به‌ویژه رادیوایزوتوپ‌های مورد نیاز پزشکی نیز می‌توانند در سیکلوترون‌ها (شتاب دهنده‌ها) به کمک ذرات آلفا و بتا و نیز نوترون تولید شوند. تکنولوژی تهیه و تولید رادیوایزوتوپ‌ها درآمد شایانی را نصیب صاحبان این صنایع ساخته است، به طوری که هندوستان با صادرات حدود ۹۵/۱۲ pBq از این چشمه‌های متعدد پرتوزا برای استفاده در صنایع مختلف و نیز ۶/۷۰ TBq با مصارف دارویی، به کشورهای صنعتی همچون انگلستان و آلمان، سود قابل ملاحظه‌ای کسب کرده است. همچنین سالانه بیش از دو میلیون بسته مواد پرتوزا فقط در اروپا جابه‌جا می‌شوند که بیانگر نقش عمده رادیوایزوتوپ‌ها در رشته‌های مختلف علوم و فنون است. در حال حاضر،

فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای / ۱۷۵

حدود نیمی از رادیو ایزوتوپ‌های عرضه شده در جهان توسط راکتور فرسوده NRU در تاسیسات چاک ریور در شرق اونتاریو تولید می‌شود که شرکت انرژی اتمی کانادا AECL آن را اداره می‌کند. راکتورهای اتمی، ابزار اصلی ساخت رادیوایزوتوپ‌های مصنوعی بوده و به عنوان منابع تولید نوترون در فرایند شکافت هسته‌ای محسوب می‌شوند. همچنین بسیاری از رادیوایزوتوپ‌ها یا رادیونوکلئیدهای مفید نظیر ید ۱۳۱، مولیبدن ۹۹، زنون ۱۳۳ و سزیم ۱۳۷ در اکثر واکنش‌های شکافت اورانیوم ۲۳۵ حاصل می‌گردند. در روش بمباران نوترونی برای تولید رادیوایزوتوپ‌ها نیز، هسته‌ای پایدار مورد هدف یک نوترون جذب کرده و حاصل این برهمکنش، تولید یک رادیوایزوتوپ غنی شده از نوترون می‌باشد. لذا رایج‌ترین واکنش طی فرایند فوق، واکنش گاما n است. بسیاری از رادیوایزوتوپ‌های مهم در صنعت مثل کبالت ۶۰ و ایریدیم ۱۹۲ از طریق همین واکنش روی هسته‌های پایدار کبالت ۵۹ و ایریدیم ۱۹۱ انجام می‌پذیرد. در حال حاضر، از ۲۸۴ راکتور تحقیقاتی در ۵۶ کشور دنیا جهت تولید انواع رادیوایزوتوپ-ها استفاده می‌شود. شتابدهنده‌ها نیز امکان تولید رادیوایزوتوپ‌های زیادی را از طریق تعدادی از واکنش-های هسته‌ای و عمدتاً به کمک ذرات پروتون‌ها، نوترون‌ها و ذرات آلفا می‌توانند به وجود آورند. این رادیو ایزوتوپ‌های تولیدی اکثراً ساطع کننده پرتوهای پوزیترون می‌باشند. برخی از رادیوایزوتوپ‌های تولید شده در سیکلوترون همچون تالیم ۲۰۱، گالیوم ۶۷، فلئوئر ۱۸ و ید ۱۲۳ دارای استفاده‌های پزشکی هستند. سیکلوترون رادیو ایزوتوپ‌هایی با نوترون کم، ولی راکتور رادیوایزوتوپ‌هایی غنی از نوترون تولید می‌کنند و در برآورد نیازهای کامل یک جامعه به رادیوایزوتوپ‌ها مکمل یکدیگر می‌باشند، به طوری که به ندرت ممکن است یکی از این دو بتواند جای دیگری هم کار کند. البته سیکلوترون‌ها نسبت به راکتورها دارای محدودیت‌های بیشتری همچون تولید کمتر و کنترل مشکل‌تر در هدایت واکنش‌ها می‌باشند.

جدول (۶-۱): رادیوایزوتوپ‌های حاصل از راکتور

ذرات واپاشی	نیمه عمر (سال)	نام عنصر	علامت اختصاری و عددجرمی	ذرات واپاشی	نیمه عمر (سال)	نام عنصر	علامت اختصاری و عددجرمی
β^-	۵۷۳۰ سال	کربن	C-14	β^-	۲۸/۸ سال	استرانسیم	Sr-90
β^-	۱۴ روز	فسفر	P-32	β^-	۶ ساعت	تکتیم	Tc-99
β^-	۵/۲۷ سال	کبالت	Co-60	ϵ	۱۷ روز	پالادیم	Pd-103
ϵ	۵۹/۴ روز	ید	I-125	β^-	۳۰/۲ سال	سزیم	Cs-137
β^-	۸/۰۲ روز	ید	I-131	β^-	۷۴/۲ روز	ایریدیم	Ir-192
β^-	۵/۲ روز	زنون	Xe-133	β^-	۲/۷ روز	طلا	Au-198

Kr-85 (0/83%)	کریپتون	۱۰/۸ سال	β^-	H-3 (0/09%)	تریتیم	۱۲/۳ سال	β^-
Sr-90 (14/65%)	استرانسیم	۲۸/۸ سال	β^-	Co-60 (0/23%)	کبالت	۵/۲۷ سال	β^-
Y-90 (14/65%)	یوتریم	۶۴/۱ ساعت	β^-	Ni-63 (0/13%)	نیکل	۱۰۰ سال	β^-
Sm-151 (0/12%)	ساماریوم	۹۰/۰ سال	β^-	Sb-125 (0/04%)	آنتیموان	۲/۷۶ سال	β^-
Eu-154 (0/84%)	یورویوم	۸/۵۹ سال	β^-	Cs-134 (0/08%)	سزیم	۲/۰۶ سال	β^-
Eu-155 (0/7%)	یورویوم	۴/۹ سال	β^-	Cs-137 (23/15%)	سزیم	۳۰/۲ سال	β^-
Pu-238 (1/26%)	پلوتونیوم	۸۷/۷۴ سال	α	Ba-137m (21/90%)	باریم	۲/۵ دقیقه	γ
Pu-239 (0/12%)	پلوتونیوم	۲۴۱۰۰ سال	α	Pm-147 (0/18%)	پروماتیم	۲/۶۲ سال	β^-
Am-241 (1/08%)	آمرسیم	۴۳۳ سال	α	Pu-240 (0/18%)	پلوتونیوم	۶۵۷۰ سال	α
Cm-244 (0/96%)	کوریم	۱۸/۱ سال	α	Pu-241 (19/25%)	پلوتونیوم	۱۴/۴ سال	β^-

۶-۲- تولید انرژی از تکنولوژی هسته‌ای

تولید انرژی هسته‌ای، یکی از کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای است که در فصول قبل به تفصیل به آن پرداخته شد. البته استفاده از انرژی هسته‌ای به تولید الکتریسیته محدود نمی‌شود. نیروگاه‌های هسته‌ای دارای این پتانسیل می‌باشند که نه تنها از آنها برای تولید برق استفاده شود، بلکه قابلیت تولید انرژی حرارتی در رنج وسیعی از درجه حرارت را برای صنایع مختلف دارا هستند. از دیگر موارد استفاده کاربردی از انرژی هسته‌ای می‌توان به استفاده از انرژی هسته‌ای برای حرکت درآوردن زیردریایی‌هایی، یخ‌شکن‌ها، ناوهای عظیم جنگی و دیگر کشتی‌ها، هواپیماهای اتمی، موشک‌های قاره‌پیما، سفینه‌های فضایی و راکت‌ها، همچنین ایجاد تونل‌های عظیم باد جهت تست هواپیماهای مسافربری و جنگی، چاه-پیمای هسته‌ای، شیرین کردن آب شور و آب دریا در مقیاس گسترده، تهیه آب گرم مناطق مسکونی، تامین انرژی فرآیند تولید سوخت هیدروژنی و... و نیز، افزایش بازیافت نفت و گاز در میادین نفتی اشاره کرد. همچنین فناوری هسته‌ای نقش بسیار مهمی در اکتشافات فضایی دارد. با مطالعه علوم هسته‌ای و بکارگیری این دانش در تولید نیروی محرکه می‌توان ماهواره‌ها، ایستگاه فضایی بین‌المللی و مسافران فضا را تقویت و حفاظت کنیم. در این بخش تلاش می‌گردد تا حدامکان برخی از این کاربردها مورد بررسی قرار گیرند.

۶-۲-۱- تامین نیروی محرکه وسایط نقلیه دریایی و هوایی

با استفاده از انرژی هسته‌ای می‌توان زیردریایی‌هایی، یخ‌شکن‌ها، ناوهای عظیم جنگی و دیگر کشتی‌ها را با استفاده از میزان کمی اورانیوم غنی شده، هزاران کیلومتر بدون نیاز به تجدید سوخت به حرکت درآورد. زیردریایی هسته‌ای یک زیردریایی است که توسط انرژی اتمی تغذیه شده و عمدتاً در زیر آب و گاهی اوقات بر روی سطح اقیانوس‌ها حرکت می‌کند. انقلاب صنعت ساخت زیردریایی‌ها را می‌توان بکارگیری سوخت هسته‌ای دانست. در گذشته، زیردریایی‌های غیراتمی از موتور دیزلی و نیز موتور الکتریکی داشتند. محدودیت زمانی باتری‌های الکتریکی سبب می‌شد که پیشرفته‌ترین زیردریایی‌های غیراتمی تنها بتوانند برای چند روز و با سرعت پایین و تنها چند ساعت با بالاترین سرعت در زیر آب باقی بمانند، در صورتی‌که زیردریایی هسته‌ای می‌تواند برای چندین ماه در زیر آب بماند. همچنین زیردریایی هسته‌ای احتیاج به هوا نیز نداشته و پایایی سوخت هسته‌ای نیز بسیار طولانی‌تر از سوخت دیزلی بوده و زیردریایی هسته‌ای مجبور نیست برای سوخت‌گیری مجدد به سطح آب بیاید یا به بندرگاه برود. این توانایی‌ها، به‌همراه تکنولوژی سلاح‌های پیشرفته، زیردریایی هسته‌ای را از بهترین زیردریایی‌های جنگی که تا بحال ساخته شده است می‌سازد. اولین زیر دریایی هسته‌ای به نام ناتیلوس در سال ۱۹۴۵ به آب انداخته شد و اولین راکتور آب سبک تحت فشار نیز برای ناتیلوس به کار رفت که با اورانیم فلزی کار می‌کرد. همچنین در پنجم دسامبر ۱۹۵۷، نخستین کشتی اتمی یخ‌شکن به نام «لنین» در قطب شمال به حرکت درآمد. در دوازدهم ژوئن ۱۹۶۴ نیز، نخستین کشتی اروپایی که با سوخت اتمی حرکت می‌کرد، در بندر «کیل» آلمان غربی به آب انداخته شد.

در یک زیردریایی هسته‌ای، تمام نیروی مورد نیاز برای حرکت و سایر وظایف مربوط به آن، توسط یک راکتور هسته‌ای تولید و تأمین می‌گردد. معمولاً سه گونه راکتور تحت فشار آب، چرخش طبیعی و فلزات روان، برای کار در زیردریایی‌ها وجود دارد. معمولاً در راکتورهای معمول، سوخت آن ترکیبی از اورانیم با غنای ۹۰ درصد به صورت UC_2 است. این نوع سوخت با غنای بالا سبب می‌شود راکتور هسته‌ای به اندازه کافی کوچک شود تا در یک زیردریایی فضای زیادی اشغال نکند. هلیوم به عنوان سرد کننده و میله‌های کادمیم وظیفه کنترل شکافت زنجیره‌ای را به‌عهده دارند. چنین راکتورهایی به راکتور با درجه حرارت بالا موسوم می‌باشند. راکتورها برای به وجود آمدن بخار که توربین را به حرکت درمی‌آورد، تولید گرما می‌کنند. توربین نیز مستقیماً پروانه‌های زیردریایی را به حرکت درمی‌آورد. طبیعی است که راکتورهای هسته‌ای کشتی‌ها و یخ‌شکن‌ها تا اندازه زیادی با راکتورهای فوق تفاوت دارند. همان‌طور که در فصل چهارم اشاره شد، راکتور هسته‌ای مورد استفاده در ناوهای دریایی ایالات متحده راکتورهای D2G می‌باشد. راکتور راکتور هسته‌ای نسل دوم ویژه ناوهای جنگی ساخت جنرال الکتریک^۱ (D2G)

1. Destroyer-sized reactor Second Generation General-Electric built

برای تولید حداکثر ۱۵۰ مگاوات انرژی الکتریکی و عمر مفید ۱۵ سال مصرف معمولی طراحی شده است. در این راکتور، برای مخزن بخار دو راکتور وجود داشته و طوری طراحی شده که بتوان هر دو اتاق توربین را با یک راکتور به راه انداخت. اگر هر دو راکتور فعال باشند، ناو به سرعت ۳۲ گره می‌رسد، اما اگر یک راکتور فعال بوده و توربین‌ها نیز متصل به هم باشند، سرعت ناو به ۲۵ تا ۲۷ گره خواهد رسید و در نهایت، اگر فقط یک راکتور فعال باشد، ولی توربین‌ها جدا باشند، سرعت فقط ۱۵ گره خواهد بود.

در سال ۱۹۹۵، چند زیردریایی به عنوان زیردریایی استراتژیک هسته‌ای شناخته شدند که موشک‌های هسته‌ای حمل می‌کردند. نوع دیگر زیردریایی هسته‌ای، زیردریایی جنگی است که برای غرق کردن کشتی‌ها و زیردریایی‌های دشمن طراحی شده است. زیردریایی استراتژیک و زیردریایی جنگی، قسمت‌های اساسی نیروی دریایی در سرتاسر جهان را تشکیل می‌دهند. در حال حاضر، در اقیانوس‌های جهان راکتورهای هسته‌ای نیروی محرکه بیش از ۴۰۰ کشتی را بدون اینکه به خدمه آن و یا محیط زیست آسیبی برسانند، تأمین می‌کنند. همچنین در هواپیماهای اتمی، موشک‌های قاره‌پیما، سفینه‌های فضایی مانند کاسینی و گالیله و راکت‌ها که میزان وزن سوخت اهمیت فوق العاده‌ای در طراحی و ساخت این سیستم‌ها دارد نیز، این انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل، راکتورهای هسته‌ای که می‌توانند با سوخت ناچیز، مسافت بسیار زیادی را طی نمایند، برای مسافرت‌های فضایی مورد استفاده قرار گرفته است. جدیدترین طرح استفاده از انرژی هسته‌ای توسط پنتاگون ارائه شده است که طی آن پنتاگون می‌خواهد یک جت هسته‌ای تولید کند. در نهایت بایستی متذکر شد، زیردریایی‌های هسته‌ای و ناوهای هواپیمابر که توسط راکتور هسته‌ای تغذیه می‌شوند تقریباً با راکتورهایی که در نیروگاه تجاری استفاده می‌شوند، مشابه هستند. در عین حال، راکتورهای هسته‌ای زیردریایی‌ها کوچکتر بوده و درجه غنای سوخت مورد استفاده نیز بسیار بالا می‌باشد.

۶-۲-۲- گرمایش و سرمایش آب و فضا

در تمام نیروگاه‌های هسته‌ای فرایند اولیه در قلب راکتور هسته‌ای عبارت است از تبدیل انرژی ناشی از شکافت اتم‌ها به انرژی حرارتی. در مرحله بعدی از این انرژی حرارتی می‌توان برای تولید برق و یا مستقیماً به صورت انرژی حرارتی استفاده کرد. بنابراین اصولاً تمام راکتورهای هسته‌ای می‌توانند برای تولید انرژی اعم از الکتریکی و غیرالکتریکی مورد استفاده قرار بگیرند. انرژی مورد نیاز صنایع شامل رنج وسیعی از درجه حرارت، از درجه حرارت کم برای تولید آب گرم مناطق مسکونی همچنین تهیه آب آشامیدنی از آب دریا تا درجه حرارت ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد برای فرایندهای مختلف صنعتی نظیر ازدیاد برداشت از چاه‌های نفت، پالایشگاه‌ها، صنایع شیمیایی، تبدیل زغال سنگ به سوخت مایع، تولید هیدروژن و ... است. تمام راکتورهای هسته‌ای با توجه به دو اصل درجه حرارت و فشار بخار تولیدی می‌توانند برای تولید انرژی مورد نیاز صنایع مورد استفاده قرار بگیرند. در ارتباط با درجه حرارت انرژی

فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای / ۱۷۹

تولیدی، راکتورهای هسته‌ای آبی (LWR) توانایی تامین انرژی حرارتی تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را دارا هستند. این راکتورها شامل راکتورهای آبی تحت فشار (PWR)، راکتورهای آبی جوشان (BWR) و راکتورهای آب سنگین (HWR) هستند. راکتورهای هسته‌ای با کند کننده گرافیتی نیز تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند حرارت تولید کنند، درحالی که راکتورهای سریع زاینده (FBR) تا ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌توانند گرما تولید کنند. در نهایت، راکتورهای هسته‌ای با خنک کننده گازی می‌توانند درجه حرارت بالاتری تولید کنند، به طوری که راکتورهای هسته‌ای گازی پیشرفته (AGR) تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و راکتورهای هسته‌ای گازی با درجه حرارت بالا (HTGR) تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌توانند حرارت تولید کنند.

در این راستا، با توجه به قابلیت راکتورهای هسته‌ای بخصوص راکتورهای HTR می‌توان از آنها علاوه بر تولید برق، در تهیه آب گرم مناطق مسکونی بخصوص در نواحی سردسیری نیز استفاده کرد. این امر، باعث صرفه‌جویی زیادی در مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی محیط زیست و جلوگیری از اتلاف انرژی می‌شود. در کشور چین دو راکتور هسته‌ای به قدرت ۵ و ۲۰۰ مگاوات جهت تولید حرارت مورد نیاز صنایع ساخته شده است. یک راکتور هسته‌ای به قدرت ۲۰۰ مگاوات مذکور، توانایی تغذیه انرژی حرارتی مورد نیاز ۵ میلیون مترمربع از مناطق شهری را دارد. برای تولید چنین حرارتی بایستی معادل ۲۵۰ هزار تن زغال‌سنگ در سال مصرف کرد که در این صورت مقادیر زیادی گازهای آلوده کننده وارد محیط زیست می‌شود. یکی از بزرگترین پروسه‌های تولید حرارت توسط انرژی هسته‌ای جهت مناطق مسکونی و صنایع در کشور کانادا قرار دارد. در این کشور راکتور آب سنگین کندو علاوه بر تولید برق، وظیفه تولید بخار و انرژی حرارتی مورد نیاز صنایع و مناطق مسکونی را نیز به عهده دارد. همچنین در کشور اسلواک، راکتورهای هسته‌ای با طرح روسی به قدرت ۴۴۰ و ۲۳۰ مگاوات الکتریکی علاوه بر تولید برق، تامین آب گرم مناطق شهری و صنایع کشاورزی را نیز برعهده دارند. در کشور روسیه نیز از نیروگاه‌های هسته‌ای جهت تولید همزمان برق و تامین آب گرم مناطق شهری و صنایع به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. از طرفی از نیروگاه‌های هسته‌ای در مناطق گرمسیری جهت تأسیسات سرمایشی و تهویه مطبوع نیز می‌توان استفاده کرد. به عنوان نمونه، طرح ارائه شده توسط موسسه فناوری هسته‌ای چین این امکان را می‌دهد تا با استفاده از انرژی هسته‌ای و فناوری موجود در چیلرهای جذبی، سیستم سرمایش و تهویه مطبوع طراحی نمود. طبق برآوردها، یک نیروگاه هسته‌ای با قدرت ۲۰۰ مگاوات ترمال، توانایی تامین انرژی مورد نیاز برای تهویه مطبوع شهری به مساحت ۳ تا ۳/۵ میلیون متر مربع را دارا باشد.

۶-۲-۳- تامین انرژی فرآیند تولید سوخت و انرژی

با توجه به محدودیت منابع نفتی و اینکه روز به روز در اثر مصرف سوخت‌های مایع به انتهای منابع نفتی نزدیک می‌شویم، مسئله تبدیل زغال‌سنگ به سوخت مایع و گاز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که امکان استفاده از زغال‌سنگ در صنایع حمل و نقل تقریباً غیرممکن بوده و همچنین با توجه به اینکه سوختن زغال‌سنگ آثار زیست محیطی مخربی دارد، بنابراین فرایند تبدیل آن به سوخت مایع و گازی می‌تواند کمک بزرگی در این زمینه بکند. از تبدیل زغال‌سنگ به سوخت مایع می‌توان موادی نظیر گاز و نفت گاز بدست آورد. در فناوری تبدیل زغال‌سنگ به سوخت مایع از بخار آب با درجه حرارت بالا (حدوداً ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده می‌شود. برای تامین این درجه حرارت می‌توان از راکتورهای هسته‌ای با خنک کننده گازی استفاده کرد. حرارت تولید شده در قلب این نوع راکتورها توسط گاز هلیوم برداشت شده و به بخش مایع‌سازی زغال‌سنگ منتقل می‌شود. درجه حرارت خروجی راکتورهای گازی تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند افزایش یابد که کاندید بسیار خوبی برای این نوع فرایندهای با درجه حرارت بالا هستند. از طرفی، در مخازن گاز به همراه گاز طبیعی، معمولاً مقادیر زیادی گاز دی اکسید کربن وجود دارد. پس از جداسازی گازهای مفید از دی اکسید کربن، مسئله‌ای که در اینجا وجود دارد مدیریت مقادیر زیاد گاز دی اکسید کربن به گونه‌ای است که آثار زیست محیطی کمتری داشته باشد. یک راه ممکن تزریق گاز دی اکسید کربن به چاه‌های نفت است که این ممکن است از نظر اقتصادی به صرفه نباشد.

راه دیگر این است که گاز دی اکسید کربن را در مجاورت کاتالیزورها حرارت داده و محصولات مفید دیگری تولید کرد. دو روش جالب در این زمینه به شرح زیر است: الف) اکسیژن + متانول = آب + الکتريسيته + حرارت + گاز مخلوط با دی اکسید کربن. ب) اسید فورمیک = آب + حرارت + گاز مخلوط با دی اکسید کربن. با توجه به اینکه فرایندهای فوق نیازمند درجه حرارت بالایی (تقریباً ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) است، می‌توان از راکتورهای هسته‌ای گازی برای تولید حرارت و الکتريسيته مورد نیاز در فرایندهای فوق استفاده کرد. در نهایت، هیدروژن نیز یکی از سوخت‌های مورد توجه در جهان می‌باشد. هیدروژن به عنوان یک سوخت پاک قابل ذخیره و انتقال بوده، همچنین قابل استفاده در صنایع حمل و نقل، منازل، صنایع شیمیایی، پالایشگاه‌ها، داروسازی، ژنراتورها و موتورهای بزرگ و ... می‌باشد. هیدروژن در اثر سوختن، آسیدی به محیط زیست وارد نمی‌کند. در حال حاضر عمدتاً هیدروژن از طریق سوخت‌های فسیلی و فرایندهای حرارتی تولید می‌شود. این روش، علاوه بر مصرف سوخت‌های فسیلی (عمدتاً گاز)، آلودگی محیط زیست را نیز به دنبال دارد. روش دیگر، تولید هیدروژن از آب معمولی است. تولید هیدروژن از آب به روش‌های الکترولیز، ترمولیز، ترموشیمیایی و فتولیز امکان‌پذیر است. در روش ترمولیز، درجه حرارتی بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد لازم است تا بتوان مولکول‌های آب را به

هیدروژن و اکسیژن شکست. با استفاده از سیکل‌های ترموشیمیایی می‌توان این عمل را در کمتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد انجام داد. بنابراین راکتورهای هسته‌ای بخصوص راکتورهای HTGR دارای پتانسیل خوبی در این زمینه می‌باشند. در این مورد می‌توان هم از الکتریسیته تولید شده توسط این نوع راکتورها برای الکترولیز آب استفاده نمود و هم از حرارت تولیدی در فرایند ترمولیز استفاده کرد.

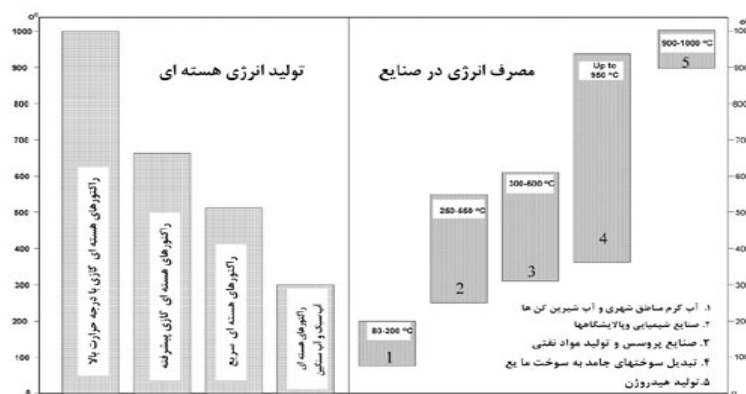
همچنین در زمان برداشت نفت از مخازن نفتی، معمولاً مقادیر قابل توجهی از مواد نفتی در چاه‌های نفتی باقی می‌ماند. به طور معمول، جهت ازدیاد برداشت از چاه‌های نفت از متدهایی استفاده می‌شود که در آنها با تغییر مشخصات مواد نفتی باعث ازدیاد برداشت می‌شود. این روش‌ها معمولاً شامل تزریق گاز به چاه‌های نفت، تزریق آب به همراه پلیمرها به منظور افزایش ویسکوزیته، تزریق بخار آب با درجه حرارت بالا و استفاده از میکروارگانیسم‌ها می‌باشند. روش حرارتی افزایش راندمان چاه‌های نفت، بخصوص استفاده از بخار آب با درجه حرارت بالا یک فناوری تایید شده است که می‌توان از آن برای افزایش میزان برداشت نفت از چاه‌های نفت استفاده کرد. این روش بخصوص برای مخازنی که شامل مواد نفتی سنگین است، بسیار مناسب است. از طرفی همان‌طور که در بالا اشاره شد، دو اصل کلی درجه حرارت تولیدی و فشار بخار تولیدی در مورد تولید انرژی مورد نیاز صنایع از طریق راکتورهای هسته‌ای بایستی در نظر گرفته می‌شوند که بحث فشار بخار تغذیه شده عمدتاً در ازدیاد برداشت از چاه‌های نفت مطرح می‌باشد. برای تامین بخار مورد نیاز در این روش می‌توان از راکتورهای هسته‌ای HTR استفاده کرد. به عنوان نمونه یک راکتور هسته‌ای HTR با قدرت ۲۰۰ مگاوات حرارتی می‌تواند بخاری با فشار ۷۵ بار و حداقل درجه حرارت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت تزریق به چاه‌های نفت و ۲۵ تا ۳۰ مگاوات قدرت الکتریکی جهت پمپ‌ها و سایر تجهیزات سرچاهی تامین کند. در این‌گونه کاربردها، علاوه بر راکتورهای گازی با درجه حرارت بالا، استفاده از راکتورهای سریع زاینده و راکتورهای گازی پیشرفته نیز مزیت نسبی دارند.

۶-۲-۴- شیرین سازی آب شور و آب دریا

در تمام نقاط دنیا، به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه، مسئله تامین آب سالم مسئله مهمی است. افزایش جمعیت، افزایش آلودگی آب‌های سطحی و نیز کاهش منابع آب‌های زیرزمینی، باعث بوجود آمدن مشکلاتی در تهیه آب سالم برای مصارف خانگی، صنایع و کشاورزی شده است. از سال ۱۹۸۰ میلادی، آژانس بین‌المللی انرژی اتمی توجه بخصوصی به استفاده از انرژی هسته‌ای جهت تامین آب سالم نموده است. همچنین کمبود منابع آبی بخصوص در کشورهای عربی، باعث حرکت وسیعی در ارزیابی امکان استفاده از انرژی هسته‌ای جهت تامین آب سالم از آب دریا شده است. آب شیرین‌کن‌ها تاسیساتی هستند که با استفاده از آنها می‌توان آب دریا را به آب آشامیدنی و نیز آب مورد نیاز صنایع و

کشاورزی تبدیل کرد. مطالعات اقتصادی انجام شده نشان دهنده مزیت استفاده از انرژی هسته‌ای برای آب شیرین‌کن‌ها در مقایسه با استفاده از سوخت‌های فسیلی برای این منظور است. پارامترهای حرارتی انرژی تولید شده توسط راکتورهای هسته‌ای جهت استفاده در آب شیرین‌کن‌ها بسیار مناسب است. با توجه به اینکه پروسه‌های استفاده شده در آب شیرین‌کن‌ها نیازمند مقادیر زیادی حرارت است، راکتورهای هسته‌ای کاندید بسیار مناسبی جهت تامین انرژی مورد نیاز آب شیرین‌کن‌ها هستند.

هم‌اکنون در بسیاری از کشورها از انرژی هسته‌ای جهت تولید آب سالم از آب دریا استفاده می‌شود. به عنوان نمونه در کشور چین، از یک راکتور هسته‌ای با قدرت ۲۰۰ مگاوات ترمال برای تولید ۱۴۴ هزار متر مکعب آب در روز استفاده می‌شود. راکتور آب سبک موسسه تحقیقات هسته‌ای کره جنوبی نیز با قدرت ۳۳۰ مگاوات ترمال، توانایی تولید همزمان ۱۰۰ مگاوات برق و ۴۰ هزار متر مکعب آب را در روز دارد. همچنین در کشور کانادا از یک راکتور آب سنگین جهت تولید همزمان برق و آب سالم استفاده می‌شود. در این راکتور بدون اینکه در تولید برق اختلالی ایجاد شود، مقادیر زیادی از حرارت اضافی که بایستی به محیط بازگردانیده شود، جهت تولید آب آشامیدنی سالم در آب شیرین‌کن استفاده می‌شود. در کشور قزاقستان نیز یک راکتور سریع نوع BN-350 و یک مجتمع آب شیرین‌کن، کار تهیه آب سالم مورد نیاز صنایع مختلف و انرژی حرارتی مورد نیاز شهری را برعهده دارند. در نهایت، در روسیه نیز از یک راکتور استخری به قدرت ۵۵ مگاوات ترمال جهت تهیه آب سالم و نیز تامین انرژی حرارتی مناطق مسکونی استفاده می‌شود.



شکل (۱-۶): محدوده درجه حرارت تولیدی توسط راکتورهای هسته‌ای و مصرف انرژی در صنایع مختلف

۳-۶- کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در پزشکی هسته‌ای

یکی از مهمترین و گسترده‌ترین موارد استفاده صلح آمیز از تکنولوژی هسته‌ای، بخش پزشکی است که از آن به پزشکی هسته‌ای یاد می‌شود. بعد از فاجعه هیروشیما و ناکازاکی، قدرت تکنولوژی هسته‌ای

بر جهانیان نمایان شد و ضایعات انهدامی و تابشی آن، قربانیان زیادی به جامعه بشری تحمیل نمود. علم طب، شناخت خود را جهت درمان و پیشگیری از بیماری اشعه وسعت داد و همزمان، از اشعه به صورت مختلف در تشخیص و درمان بیماری‌ها از جمله سرطان استفاده نمود. رادیوتراپی، جایگاه ویژه در درمان سرطان‌ها پیدا نمود و طب هسته‌ای، به عنوان یک رشته تخصصی در پزشکی روز وارد شد. پزشکی هسته‌ای، شاخه‌ای از پزشکی است که در آن تشعشع خواص هسته‌ای نوکلیدهای رادیواکتیو و نوکلیدهای پایدار، هم برای تشخیص و هم برای درمان امراض بکار می‌روند، به طوری که پیشگیری و شناسایی برخی بیماری‌ها و درمان آنها بدون استفاده از رادیوایزوتوپ‌ها امکان‌پذیر نیست. از رادیوایزوتوپ‌ها ۶۰ سال است که در شیوه‌های شناسایی و درمان استفاده می‌شود. موارد زیر از مصادیق تکنیک‌های هسته‌ای در علم پزشکی است؛ تهیه و تولید کیت‌های رادیودارویی جهت مراکز پزشکی هسته‌ای، تهیه و تولید رادیودارویی جهت تشخیص بیماری تیروئید و درمان آنها، تهیه و تولید کیت‌های هورمونی برای استفاده در تست هورمونی در آزمایشگاه‌ها، تشخیص و درمان سرطان پروستات، تشخیص سرطان کولون، روده کوچک و برخی سرطان‌های سینه، تشخیص تومورهای سرطانی و بررسی تومورهای مغزی، سینه و ناراحتی وریدی، تشخیص و درمان بیماری‌ها در سطح سلولی و مولکولی، تصویربرداری بیماری‌های قلبی، تشخیص عفونت‌ها و التهاب مفصلی، آمبولی و لخته‌های وریدی، موارد دیگری چون تشخیص کم خونی، کنترل رادیوداروهای خوراکی و تزریقی و ...

پزشکی هسته‌ای و رادیولوژی همگی تکنیک‌های پزشکی هستند. رادیوتراپی، براکی‌تراپی، سی‌تی‌اسکن، PET و SPECT روش‌های متعددی هستند که در پزشکی کاربرد گسترده دارند و برای تشخیص یا درمان بسیاری از بیماری‌های مغزی، قلبی، ریوی، استخوان و سرطان با استفاده از رادیوایزوتوپ‌هایی چون ^{60}Co ، ^{201}Tl ، ^{67}Ga ، ^{81}mKr ، ^{131}I ، ^{98}Mo و ... بکار گرفته می‌شوند. همچنین از ید-۱۳۱ برای تشخیص محل تومورهای مغزی و تعیین میزان فعالیت غده تیروئید و کبد استفاده می‌شود، ضمن اینکه ^{51}Cr برای تحقیقات خون شناسی، ^{75}Se برای بررسی لوزالمعده، ^{57}Co برای تشخیص کم‌خونی، ^{14}C برای تحقیقات بیولوژیکی و داروسازی، ^{137}Cs جهت درمان غدد سرطانی، ^{67}Cu برای از بین بردن غدد سرطانی، از رایج‌ترین رادیوداروها در امر پزشکی می‌باشند. در این میان، یکی از مهمترین رادیوداروهایی که در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته و ۸۰ تا ۸۵ درصد بیماری‌های سرطانی، پوکی استخوان و امراض قلبی به‌وسیله آن شناخته می‌شود، یک رادیوداروی ارزشمند به نام تکنسیوم-۹۹ است. در حال حاضر در دنیا هر روز ۴۰ تا ۵۰ هزار بیمار برای شناسایی بیماری خود از این رادیودارو استفاده می‌کنند. در ایران نیز ۱۰ هزار نفر در هفته از این رادیودارو در مراکز پزشکی هسته‌ای استفاده می‌کنند. عمده رادیوایزوتوپ‌هایی که در پزشکی هسته‌ای به کار می‌رود، مصنوعی بوده و از عناصر رادیواکتیو موجود در طبیعت، استفاده چندان در این بخش نمی‌شود. بایستی

توجه داشت، مواد رادیواکتیو مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای، نیمه عمر خیلی کوتاهی دارند و خیلی زود از بین می‌روند. میزان پرتو تابش شده از این مواد، پائین‌تر از اشعه X معمول و یا اشعه CT اسکن است و به راحتی از طریق ادرار یا کیسه صفرا حذف و دفع می‌شود. در حالی که رادیولوژی تقریباً نزدیک به یک قرن است مورد استفاده قرار گرفته، پزشکی هسته‌ای حدوداً ۵۰ سال پیش آغاز شد.

در دهه گذشته، پیشرفت عمده‌ای در درمان بیماری از طریق ایزوتوپ‌ها صورت گرفته است. در این درمان، ایزوتوپ‌های پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از آن برای مقابله با بسیاری از انواع سرطان در اعماق بدن استفاده می‌شود. این شیوه درمانی هر سال پیشرفت‌های زیادی کرده و بعضی پژوهشگران پیش‌بینی می‌کنند که بیش از ۸۰ درصد از انواع سرطان‌ها با این ایزوتوپ‌ها قابل درمان هستند. در حال حاضر، معمول‌ترین موارد استفاده ایزوتوپ‌های پزشکی، درمان تیروئید، سرطان پروستات و سرطان استخوانی است. در اروپا مهمترین مورد استفاده آن درمان آرتروز است؛ اما در آمریکا، این شیوه هنوز برای درمان آرتروز تأیید نشده است. همچنین در سال‌های اخیر، آژانس انرژی هسته‌ای تلاش فراوانی جهت کشف شیوه‌های درمانی هسته‌ای نوین برای ریشه‌کن کردن مالاریا و سل کرده است. سایر فعالیت‌های انجام گرفته در این حوزه، شامل کشف شیوه‌های تشخیص جدید برای انواع بیماری‌ها از سرماخوردگی تا جراحی‌های تخصصی و همچنین استفاده از ایزوتوپ‌ها جهت بالا بردن میزان جذب انواع ویتامین‌ها و مواد معدنی از طریق بدن است. در این میان، سلول‌های خونی، پوست، مو و سلول‌های پوششی معده که سریع‌تر تقسیم می‌شوند، بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. به همین جهت، اکثر بیمارانی که در حال درمان سرطان هستند، دچار ریزش مو و کم خونی می‌شوند. همچنین اگر تجهیزات پزشکی توسط پرتوهای گاما پرتودهی و ضد عفونی شوند تا وقتی در بسته‌ها باز نشده است، تا مدت زمان بالایی می‌توان آنها را در حالت ضد عفونی حفظ کرد، در حالی که مواد شیمیایی ضد عفونی کننده خاصیت ماندگاری کمی دارند. در کشورهای پیشرفته تعداد تست‌های پزشکی هسته‌ای ۱/۹ درصد در سال و تعداد درمان با رادیو ایزوتوپ‌ها حدود ۰/۱ رقم فوق است. استفاده از رادیوداروها نیز سالانه ۱۰٪ در حال افزایش می‌باشد.

۶-۳-۱- کاربردهای تشخیصی پزشکی هسته‌ای

در کلیه روش‌های تشخیصی، نحوه عملکرد صحیح اندام‌های بدن در مقایسه با یک فرد سالم مقایسه می‌شود. روش‌های تشخیص در پزشکی هسته‌ای مبتنی بر استفاده از ردیاب‌های رادیواکتیو است که در درون بدن از خود پرتو گاما ساطع می‌کنند. رادیوهای تشخیصی جهت بررسی‌های جریان خون در مغز، عملکرد کبد، شش‌ها، قلب و کلیه‌ها یا جهت بررسی رشد استخوان و تایید شیوه‌های دیگر تشخیص به کار گرفته می‌شوند. رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده برای منظورهای تشخیصی، باید ساطع کننده پرتو

فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای / ۱۸۵

گاما با انرژی کافی باشند که بتوانند از بدن خارج شوند و نیمه عمر آنها به اندازه کافی کوتاه باشد که بلافاصله بعد از تصویربرداری آثاری از آن وجود نداشته باشد. مواد رادیواکتیو مورد استفاده برای این روش نیز یا بصورت گاز ($^{133}\text{Xenon}$ و $^{81}\text{Krypton}$) و یا بصورت مایع (^{99}Tc , $^{12}\text{Iodine}$, $^{201}\text{Thallium}$ و $^{67}\text{Gallium}$) می‌باشند. در پزشکی تشخیصی، همچنین تمایل زیادی وجود دارد که بیشتر از ایزوتوپهای تولید شده در سیکلوترون مثل فلئور-۱۸ برای PET و CT/PET استفاده شود. این مواد ممکن است به صورت خوراکی یا از طریق تزریق و یا استنشاق به بیمار داده شده و به دلیل جذب شدن در بعضی ارگان‌ها و بخش‌هایی از استخوان و بافت، به تشخیص و شناسایی پرتوهای تابش شده و اندازه‌گیری آنها کمک کرده و می‌تواند اطلاعات مهم و حیاتی درباره نوع خاصی از سرطان یا بیماری ارائه کند. بایستی توجه داشت، در اکثر روش‌های تشخیصی پزشکی هسته‌ای، معمولاً پرتوهای ساطع شده از ماده رادیواکتیو داخل بدن، توسط دوربین‌های گاما تشخیص داده می‌شوند. اطلاعاتی که توسط این تکنیک پزشکی هسته‌ای جمع‌آوری می‌شود، جامع‌تر از دیگر فرآیندهای تصویربرداری است؛ زیرا علاوه بر ساختار، عملکرد آن ارگان از بدن را هم نشان می‌دهد. در نتیجه، بسیاری از بیماری‌ها و سرطان‌ها در مراحل اولیه قابل تشخیص خواهند شد. تقریباً صد نوع مختلف از روش‌های تصویربرداری در پزشکی هسته‌ای وجود دارد و هیچ عضو اصلی بدن نیست که قابلیت تصویربرداری از آن از طریق پزشکی هسته‌ای میسر نباشد.

جدول (۶-۲): رادیوداروهای تشخیصی در پزشکی هسته‌ای

کاربرد	شکل شیمیایی	رادیو نوکلید
مغز، تیروئید، غدد بزاقی، عکس برداری استخر خونی، مکان‌یابی و جفت جنین	پرتکتات سدیم	Tc-99m
جگر، طحال و عکسبرداری مغز استخوان	کلوئید آلبومین	Tc-99m
عکسبرداری استخوان	اتی درونات EHDP	Tc-99m
عکسبرداری مغز، ریزش کلیوی و عکسبرداری تنفس شش	پنتتات DTPA	Tc-99m
عکسبرداری استخوان و عکسبرداری آرواره	پیروفسفات PPI	Tc-99m
تشخیص کار تیروئید و عکسبرداری تیروئید	یدید سدیم	I-131
تعیین حجم خون و پلاسما و بررسی‌های تیروئید	آلبومین	I-125
تشخیص کار تیروئید و عکسبرداری تیروئید	یدید سدیم	I-123
عضلات قلب و گردش خون	کلرید تالوس	Tl-201
عکسبرداری تنفسی و مطالعات جریان خون	گاز	Xe-133
عکسبرداری تومور	سیتراک گالیم	Ga-67

۶-۳-۱-۱- تشخیص با CT Scan

سی تی اسکن، در پزشکی هسته‌ای به عنوان روشی تشخیصی کاربرد دارد و روشی است که طی آن، یک سری تصاویر دوبعدی به دست آمده با اشعه X، به تصاویر سه بعدی تبدیل می‌شوند. اولین نوع اسکنرها در انجام اسکن از مغز محدودیت‌هایی داشتند و در آنها، منبع اشعه X به صورت یک امتداد باریک مداد مانند بود که روی یک یا دو آشکارساز ثابت شده بود. در نسل دوم اسکنرها، تغییراتی در شکل منبع اشعه X و تعداد آشکارسازها بوجود آمد. منبع اشعه X به شکلی شبیه پنکه تغییر پیدا کرد و زمان اسکن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. در نسل سوم اسکنرها، تغییر اساسی در زمان اسکن به وجود آمد و امکان تشکیل تصویر نهایی همزمان با اسکن ایجاد شد. در نسل چهارم اسکنرها نیز، زمان اسکن نسبت به قبل تغییری نکرد، با این تفاوت که یک حلقه ۳۶۰ درجه از آشکارسازها دور بدن بیمار را فراگرفته و منبع اشعه X نیز در وضعیتی غیرمتناسب با آشکارسازها به دور بیمار می‌چرخید. در حالت مدرن اسکنرها که واجد چندین آشکارساز و چند ردیف اسکنر هستند، اسکن از قفسه سینه به مدت یک دم و بازدم زمان می‌برد. به طور کلی، هرگونه بیماری را می‌توان با CT اسکن از نقاط مختلف بدن تشخیص داد. معمول‌ترین موارد انجام CT اسکن در تشخیص سنگ‌های مثانه و کلیه، عفونت آپاندیس، عفونت پانکراس و عدم عملکرد کیسه صفرا است. همچنین اسکن جمجمه، قفسه سینه و قلب از دیگر کاربردهای CT اسکن می‌باشد. در نهایت بایستی توجه داشت، هرچند پیشرفت و فناوری CT اسکن باعث شده که دوز تابش اشعه X و زمان اسکن کاهش پیدا کند؛ اما هنوز هم دوز اشعه تابشی در این روش بسیار بالاتر از رادیوگرافی معمولی با اشعه X است.

۶-۳-۱-۲- تشخیص با MRI^۱

ام‌آر‌آی (MRI)، روشی است که با استفاده از میزان آب معدنی متصل به مولکول‌ها، تصویری از داخل بدن ایجاد می‌کند. این روش، معمولاً برای تشخیص هرگونه بیماری یا اختلال در عملکرد ارگان‌ها و یا هر آسیبی در بافت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اسم اصلی این روش Nuclear MRI است که کلمه هسته‌ای به علت بار منفی که روی بیمار ایجاد می‌کند، به طور کلی حذف شده است. یکی از نکات مثبت در مورد MRI، نداشتن اثر منفی بر روی بیمار است. این روش، با استفاده از میدان مغناطیسی و تابش غیریونیزه انجام می‌گیرد؛ در حالی که CT اسکن با اشعه X معمولی که واجد تابش-های یونیزه است، انجام می‌شود و تابش‌های یونیزه می‌توانند احتمال ایجاد بدخیمی را بخصوص در بچه‌ها افزایش دهند. اساس کار MRI معمولاً براساس خصوصیات آزاد شدن اتم برانگیخته هیدروژن در مولکول آب است. در مجموع، انواع MRI عبارتند از:

الف. MRI انتشاری: این نوع از MRI، میزان انتشار آب را در بافت‌های بدن مشخص می‌کند. از این طریق می‌توان انتشار مولکول‌های متفاوت را در ارگان‌ها و سلول‌های مختلف بررسی کرد. نوع جدید MRI انتشاری (DT1) می‌تواند میزان انتشار را در جهات مختلف مشخص کند و این روش، در تشخیص بیماری‌هایی مثل MS که نوروها طی آن از بین می‌روند، به کار گرفته می‌شود.

ب. MRA (MR angiography): روشی است که از طریق آن، اشکالات عروقی بررسی می‌شود. اصلی‌ترین مورد استفاده از MRA، بررسی عروق گردن و نابجایی آنورت و عروق کلیوی است. یک مورد استفاده دیگر از MRI، در تصویربرداری از بافت‌های نرم و تعیین دقیق محل تومور در بدن است که با تعیین دقیق محل آن می‌توان رادیوتراپی را آغاز کرد. در این حال، محل دقیق و اندازه تومور مشخص شده و محل آن خال کوبی یا نشانه‌گذاری می‌شود و درمان در آن محل، به طور خاص آغاز می‌گردد.

۳-۱-۳-۶- تشخیص با توموگرافی تابش پوزیترون (PET Scan)^۱

دستگاه PET یا به عبارتی دستگاه برش نگاری با نشر پوزیترون، یکی از سیستم‌های پیشرفته تصویربرداری می‌باشد که توانمندی‌های بی‌نظیری در تشخیص بیماری‌های سرطان، مغز و اعصاب و قلب و عروق از خود نشان داده است. اصول تصویربرداری PET بر مبنای آشکارسازی فوتون‌های حاصله از نابودی جفت‌های پوزیترون و الکترون می‌باشد. در این روش، ابتدا مواد رادیواکتیوی همچون کربن-۱۱، نیتروژن-۱۳، اکسیژن-۱۵ و فلوئور-۱۸، که به ترتیب دارای نیمه عمرهای ۲۰، ۱۰، ۲ و ۱۱۰ دقیقه هستند، به صورت تزریق و یا به صورت گاز از طریق تنفسی به بیمار داده می‌شوند. سپس بیمار روی تختی که یک محفظه دونات مانند دارد، قرار می‌گیرد. این رادیوداروها جذب ارگان و یا محل مورد تصویربرداری شده و با توجه به شرایط بیماری در ارگان مورد بررسی، توزیع و جذب می‌شود. این رادیوداروها از خود پوزیترون ساطع کرده و پوزیترون‌ها با الکترون‌ها جفت شده و نابود می‌شوند که حاصل نابودی هر جفت پوزیترون و الکترون، دو پرتوی پرنرژی (۵۱۱ کیلو الکترون ولت) در جهت مخالف می‌باشند. بنابراین تعداد زیادی از جفت پرتوهای وابسته در جهات مختلف از بدن بیمار ساطع می‌شود. داخل محفظه دونات مانند، آشکارسازهای گاما قرار دارند که از یک سری کریستال‌های فعال یدید سدیم (بین ۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰) که هر کدام به یک تشدید کننده نوری متصل هستند، تشکیل شده‌اند. این کریستال‌ها پرتوهای ساطع شده را به فوتون‌های نوری تبدیل کرده و تشدید کننده نوری نیز این فوتون‌های نوری را به پیام‌های الکتریکی تبدیل شده و سپس با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری به تصویری سه بعدی از توزیع رادیوداروها در ارگان مورد بررسی تبدیل می‌شوند که با استفاده از آن می‌توان به وجود نارسایی و یا بیماری پی برد.

با توجه به رادیونوکلئیدهای مورد استفاده در PET می‌توان متابولیسم اکسیژن را اندازه‌گیری نمود. همچنین با برچسب نمودن گلوکز به فلورین، رادیوداروی FDG18 بدست می‌آید که در بررسی‌های متابولیسم گلوکز بافت و یا ارگان مورد مطالعه استفاده می‌شود. در بیشتر نارسایی و بیماری‌ها، قبل از اینکه تغییرات آناتومیک در بافت ایجاد شود تغییراتی در متابولیسم رخ می‌دهد، از این‌رو برخلاف سیستم‌های تصویربرداری مرسوم CT و MRI که تغییرات آناتومیکی و یا SPECT که تغییرات فیزیولوژیکی را اندازه‌گیری می‌کند، با استفاده از سیستم PET قادر خواهیم بود بیماری را در مراحل اولیه تشخیص داده و از پیشرفت بیماری جلوگیری و به درمان آن بپردازیم. از طرفی، معمولاً پس از جراحی تومور سرطانی مغز، تومور دوباره رشد کرده و مجدداً بیمار را دچار مشکل می‌کند. این وضعیت به این دلیل پیش می‌آید که با استفاده از سیستم‌های تصویربرداری موجود فقط می‌توان توده تومور را تشخیص داد و جراح با استفاده از تصاویر مزبور تنها توده تومور را خارج می‌سازد، در صورتی که با استفاده از PET، نه تنها موضع تومور، بلکه جهت و شرایط پیشروی آن نیز مشخص می‌گردد. همچنین، نرخ متابولیسم گلوکز در بافت‌های سرطانی بالا رفته و بافت‌هایی که مبتلا به سلول‌های سرطانی شده‌اند، هرچند ممکن است با سیستم‌های تصویربرداری دیگر قابل تشخیص نباشند با سیستم PET و بررسی متابولیسم قابل تشخیص خواهند بود و لذا جراح امکان می‌یابد تا به موقع بافت‌های مزبور را نیز خارج سازد. سیستم PET در تشخیص انواع سرطان‌ها و بخصوص سرطان‌های ثانویه (متاستازها) نسبت به دیگر سیستم‌های تصویربرداری برتری قابل توجهی دارد.

همچنین با استفاده از سیستم PET می‌توان صحت روش درمان انتخاب شده برای بیماران سرطانی را نیز ارزیابی نمود. مشاهده آثار درمان‌های رادیوتراپی و شیمی‌درمانی به صورت تغییرات آناتومیک در تومور نیازمند مدت زمانی طولانی است تا بتوان با روش‌های مرسوم تصویربرداری آنها را تشخیص داد، در حالی که چنانچه روش درمان تجویز شده مناسب باشد پس از مدت زمان کوتاهی می‌توان کاهش متابولیسم گلوکز تومور را توسط PET مشاهده نمود. در مقابل چنانچه کاهش متابولیسم وجود نداشته باشد نشانه این است که روش درمان تجویز شده موثر نبوده و باید روش دیگری را جهت درمان انتخاب نمود. همچنین با استفاده از PET می‌توان جریان خون و متابولیسم ماهیچه قلب را بررسی نمود. سیستم PET دقیق‌ترین سیستم برای تشخیص وجود و یا عدم وجود بیماری کرونر بوده و در عین حال، با مطالعه متابولیسم ماهیچه قلب می‌توان به زنده بودن بافت پی برد. چه بسیار بیمارانی که بخشی از بافت ماهیچه قلب آنها مرده است و عمل بای‌پس و خون‌رسانی به آن موضع هیچگونه منفعتی برای بیمار ندارد و چنانچه متابولیسم ماهیچه قلب این بیماران قبل از عمل جراحی توسط سیستم PET بررسی شود می‌توان از یک عمل جراحی عمده جلوگیری نمود. از طرفی، به دلیل کاهش متابولیسم در بخش‌هایی از مغز در مراحل اولیه بیماری، اسکن PET قادر است چندین سال قبل از اینکه پزشکی

بتواند توسط روش‌های مرسوم بیماری فراموشی را تشخیص دهد، نارساییهایی را که شاخص این بیماری است را نشان دهد. سیستم PET بیماری پارکینسون (لقمه) را نیز بهتر از بقیه سیستم‌های تصویربرداری نشان می‌دهد. در کانون‌های حمله‌ای صرع در مغز کودکان، متابولیسم گلوکز کاهش یافته و فقط در تصاویر PET می‌توان تغییرات متابولیسم را مشاهده نمود. جراح مغز فقط با کمک تصاویر PET می‌تواند محل دقیق کانون‌های حمله صرع در مغز را مشخص نموده و برای خارج نمودن آنها و مداوای بیمار اقدام نماید.

قدرت تفکیک مکانی سیستم PET که همانا قابلیت سیستم در نشان دادن جزئیات ارگان مورد مطالعه در تصویر می‌باشد در حدود ۴ الی ۵ میلی‌متر می‌باشد. بهره‌وری بالای PET باعث وضوح و کنتراست بیشتر تصاویر می‌باشد. به دلیل امکان تصحیح برای جذب پرتوها در PET، آنالیز کمی اطلاعات امکان‌پذیر می‌شود که کاربردهای زیادی در تعیین مرحله بیماری دارد. در PET، علاوه بر امکان مطالعه فرآیند فیزیولوژیکی بافت و یا ارگان مورد مطالعه امکان مطالعه متابولیسم و بیوشیمی بافت مورد بررسی وجود دارد که این قابلیت برجسته‌ترین مزیت این سیستم است که آن را از دیگر سیستم‌های تصویربرداری متمایز می‌سازد. البته به دلیل استفاده از تعداد زیادی از کریستال‌های آشکارساز و قطعات الکترونیک مربوطه، سیستم PET نسبت به دیگر سیستم‌های تصویربرداری گرانتر بوده و با توجه به تعداد حلقه‌های آشکارسازهای کریستالی، قیمت این سیستم بین ۸۰۰ هزار تا ۱/۶ میلیون دلار می‌باشد. همچنین به دلیل نیم عمر بسیار کم مواد رادیواکتیو مورد استفاده در PET، این مواد باید توسط سیکلوترون در مرکز PET و یا در نزدیکی آن تولید شوند. چنانچه در نزدیکی PET (حدود ۲ ساعت از نظر فاصله زمانی)، سیکلوترونی جهت تولید این رادیوایزوتوپ‌ها موجود نباشد، مرکز PET باید همراه با سیستم PET یک سیکلوترون نیز خریداری نماید. اما خرید سیکلوترون یک هزینه اضافی به مرکز PET تحمیل می‌کند و یکی از دلایل گسترده نشدن مراکز PET در دنیا، علیرغم قابلیت‌های تشخیصی بی‌نظیر آن، همین هزینه خرید سیکلوترون می‌باشد که قیمت نوع پزشکی آن در حدود ۱/۸ میلیون دلار می‌باشد. در حال حاضر، بیش از ۵۵۰ مرکز PET در دنیا ایجاد شده که به ارائه خدمات کلینیکی مشغول می‌باشند. بیشترین مراکز PET جهان در آمریکا، آلمان و ژاپن و در منطقه، عربستان سعودی، ترکیه و اسرائیل قرار گرفته‌اند. ایران یکی از نادر کشورهای است که علیرغم دارا بودن سیکلوترون، دارای مرکز PET نمی‌باشد.

۳-۱-۴- تشخیص با توموگرافی با استفاده از تابش تک فوتون (SPECT)^۱

روش Spect در توموگرافی کامپیوتری، با رادیو نوکلئیدها، یک یا چند آشکارساز و یک کامپیوتر

1. Single Photon Emission Computed Tomography

صفحه نمایش دهنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. آرایه آشکارسازها در اطراف بیمار حرکت کرده و تغییرات میزان شمارش اکتیویته با توجه به جذب‌های بخشی از تابش توسط بدن، به عنوان تغییرات ژئومتری به وسیله نرم افزار کامپیوتری محاسبه شده و نهایتاً تصویر مربوطه در صفحه نمایش نشان داده می‌شود. این روش متعاقباً در جهات دیگر بدن هم تکرار می‌شود، بنابراین یک تصویر سه بعدی حاصل خواهد شد. شفافیت و درجه تفکیک در این تصویر حدود یک میلیمتر خواهد بود. در واقع یک روش بسیار مشابه به یک تصویر برداری اشعه ایکس، ولی در مورد اخیر هم منبع تابش و هم آشکارسازی در اطراف بیمار حرکت می‌کند. این روش که متداول‌ترین سیستم در پزشکی هسته‌ای می‌باشد، همچنین مشابه PET است؛ با این تفاوت که ماده رادیواکتیو مورد استفاده $^{133}\text{Xenon}$ ، ^{99}Tc و ^{123}I است؛ با این تفاوت که نیمه عمر طولانی‌تری داشته و بجای تابش ۲ اشعه گاما فقط یک اشعه گاما تابش می‌کند. کاربرد رادیونوکلئیدها برای Spect ترجیحاً باید همراه با ساطع کردن فوتون گامای منفرد باشد و بهترین تصویر شفاف آن با گامای کم انرژی حاصل می‌گردد. با استفاده از SPECT می‌توان اطلاعاتی در مورد گردش خون و نحوه پخش ماده رادیواکتیو در بدن به دست آورد. با استفاده از این روش، تصاویر سه بعدی با دقت و حساسیت بالا از ارگان‌های مختلف بدن از جمله قلب تهیه می‌شود. البته تصاویر حاصل، جزئیات کمتری را نسبت به تصاویر PET نشان می‌دهند. و اما مزیت مهم این روش نسبت به PET این است که به گرانی آن نیست. در ضمن تعداد مراکز Spect زیادتر است، زیرا در این روش نیازی نیست که مراکز در کنار یک شتاب دهنده ساخته شوند.

در اوایل از روش Spect برای تصویربرداری امراض قلبی و مغزی استفاده می‌شد. مثال خوب برای این تکنیک، آزمایش تنش تالیوم است. در این آزمایش، یکی از ترکیبات رادیواکتیو تالیوم به بیمار تزریق می‌شود. بیمار یک سری نرمش انجام داده و به وسیله دوربین‌های پرتو گاما از قلب بیمار عکس برداری می‌شود. پس از یک استراحت، مطالعات دوباره تکرار می‌شود، اما این بار بدون فعالیت بدنی. تصاویر گرفته شده قبل و بعد از نرمش باهم مقایسه می‌شوند تا تغییرات جریان خون مشاهده شود. این روش برای تشخیص تصلب شراین در قلب و دیگر اعضا مناسب است. همچنین تزریق پرتکنات سدیم در ورید در رابطه با تومورهای مغزی، رفتار متفاوتی از سکنه مغزی ظاهر می‌نمایند، زیرا چنین تومورهایی تمایل زیادی در جذب تکنسیوم مولیبدن-۹۹ ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) و سرعت کمی در آزاد کردن آن از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، در صورت سکنه مغزی جذب TC (تکنسیوم) خیلی کند بوده، در حالی که خروج یا رها شدگی آن در قسمت‌های سالم مغز هنوز سریع‌تر است. در حال حاضر نیز، یکی از مهمترین اسکن از این نوع، اسکن استخوان است. در این اسکن، مواد رادیواکتیو تزریق شده به بدن که به صورت تکنسیوم پی‌پی متیل دی‌سولفات^۱ هستند، در بافت استخوان تجمع پیدا می‌کنند. بافت استخوان ترکیبات فسفر را

1. Technetiumpp Methyl diphosphate

به خوبی در خود جمع می‌کند. این مواد در نقاطی که فعالیت‌های متابولیک بالایی دارند، تجمع بیشتری پیدا می‌کنند. بنابراین تصویر گرفته شده یک سری نقاط روشن که نشان دهنده فعالیت بالا بوده و یک سری نقاط تاریک که نشان دهنده مناطقی با فعالیت متابولیک پایین هستند را نشان می‌دهد. اسکن استخوان روش خوبی برای تشخیص تومورهاست. تومورها بطور کلی فعالیت متابولیک بالایی دارند.

۶-۳-۱-۵- تشخیص غیرزنده با رادیو ایمنونواسی

روش‌های غیرزنده یا خارج از بدن، آنهایی هستند که روی نمونه‌های برداشته شده از یک مریض انجام می‌گیرد. این آزمایش‌ها به دلیل آن که بیمار در معرض ماده رادیواکتیو قرار نمی‌گیرد، منحصر به فرد هستند. در این روش، بجای آن که آزمایش‌ها در مایعات بدن (معمولاً سرم یا پلاسما) انجام شود، نمونه‌ای از این مایعات از بیمار گرفته شده و به روش «داخل لوله آزمایش»^۱ با رادیو نوکلید خاصی ترکیب می‌شود. رشته‌ای موسوم به رادیو ایمنونواسی (RIA)، در این مقوله جای می‌گیرد که امکان اندازه‌گیری دقیق مقادیر ناچیز هورمون‌های بدن را فراهم می‌کند. رادیوایمنونواسی، نوعی تجزیه بطریق رقیق کردن ایزوتوپی (IDA)، جزو روش‌های استوکیومتری است که در آن، عنصر مورد تجزیه نشاندار و غیرنشاندار برای پیوند با مقادیر محدود مولکولی که بطور خاص با عنصر مورد تجزیه پیوند می‌دهد، رقابت می‌کند. روش RIA، بطور گسترده در آزمایشگاه‌های پزشکی برای تعیین هورمون‌ها، داروها، ویروس‌ها و دیگر گونه‌های آلی در سطح جهان بکار می‌رود. شروع بکارگیری RIA به سال‌های ۱۹۵۰، با بررسی S. Berson و R. Yalow بر روی متابولیسم انسولین BII در مریض‌های دیابتی برمی‌گردد. اینان دریافتند که مریض‌های دیابتی، موادی در سرم خون دارند که با انسولین پیوند می‌دهند. آنها مشاهده کردند که انسولین نشاندار و غیرنشاندار با این ماده پیوند دهنده رقابت کرده و این مقدار انسولین غیرنشاندار موجود، مقادیر انسولین نشاندار را که پیوند داده، متاثر می‌کند. آنها در این مطالعه، به توانایی این روش جهت ارزیابی انسولین پی بردند. تکنیک RIA، از آن زمان تاکنون، پیشرفت‌های گسترده‌ای را در روش‌های پزشکی با کاربردهای وسیع برای اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم بسیاری از بیومولکول‌های مهم داشته است.

۶-۳-۲- کاربردهای درمانی پزشکی هسته‌ای

کاربردهای درمانی تشعشع و رادیوداروها نسبت به کاربردهای تشخیص محدودتر هستند. زمانی که تشعشع برای درمان بکار می‌رود، مقصود نابود نمودن یک قسمت خاص از نسوج مریض با تشعشع است. چشمه تشعشع مورد استفاده برای درمان می‌تواند داخلی و خارجی باشد. چشمه‌های خارجی تشعشع در حال

1. in vitro

حاضر اساساً در شکل باریکه‌های الکترونی یا اشعه ایکس است. بسیاری از دستگاه‌ها می‌توانند برای تولید این تشعشعات بکار روند؛ ولی شتاب‌دهنده‌های خطی کوچک بیشترین کاربرد را دارند. الکترون‌های با انرژی‌های ۴ تا ۱۵ میلیون الکترون ولت برای درمان سرطان‌هایی که نزدیک سطح بدن هستند، مانند سرطان‌های پوست، سینه، سر و گردن بکار می‌روند. زمانی که نفوذ بیشتری از تشعشع لازم باشد، اشعه گاما از یک چشمه بسته رادیونوکلید مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا، کبالت-۶۰ به طور گسترده‌ای برای این منظور بکار رفته است؛ ولی در حال حاضر سزیم-۱۳۷ ترجیح داده می‌شود. علاوه بر تشعشع خارجی یک عضو، می‌توان یک سوزن یا دانه رادیواکتیو را در داخل بدن مریض کاشت و لذا تنها مقاطع خاصی را که باید نابود شوند، پرتو دهی نمود. در این رابطه، کاشت‌های $Au-198$ و $I-125$ متداول است.

تحقیقات اخیری که در جریان است، بعضی از هیجان‌انگیزترین درمان‌های سرطان با استفاده از ایزوتوپ‌های پزشکی را به دست می‌دهد. با افزایش آزمایش این شیوه‌های درمانی مبتنی بر رادیوایزوتوپ در بیمارستان‌های تحقیقاتی و دانشگاه‌ها، رفته‌رفته صدور مجوز و تأییدیه مراکز معتبر برای انجام این آزمایشات اجباری شده است. بعضی از این درمان‌های تجربی، به چنان موفقیت چشمگیری رسیده‌اند که مبتلایان کنونی سرطان را بیشتر از قبل به زندگی امیدوار کرده است. در بسیاری از موارد، بیماران با تومورهای مرگبار مغزی و غده‌های سرطانی، با همین شیوه از مرگ نجات یافته‌اند. همچنین، اختراع «سیستم‌های مؤثر و منحصر به فرد تزریق و وارد کردن»، در پیشرفت شیوه‌های درمانی جدید ایزوتوپی تأثیر بسیاری داشته است. این سیستم‌های منحصر به فرد و مؤثر به پزشکان کمک می‌کند تا ایزوتوپ‌ها را به طور دقیق و مستقیم به بافت بدن بیمار وارد کنند. یکی از امیدوار کننده‌ترین این شیوه‌ها، «رادیو مونوترابی» است. در این تکنیک، رادیوایزوتوپ‌ها به پادتن‌هایی که مخصوص سلول‌ها و بافت‌هایی خاص در بدن هستند، جذب می‌شود. این پادتن‌ها ایزوتوپ را به سمت سلول‌های سرطانی هدایت کرده و رادیوایزوتوپ‌ها این سلول‌های سرطانی را نابود می‌کنند. شیوه‌های درمانی انواع سرطان با استفاده از رادیو ایزوتوپ‌ها، آینده جدیدی پیش روی میلیون‌ها نفر در سراسر دنیا قرار می‌دهد.

۶-۳-۱- جراحی با اشعه^۱

روشی است که اجازه می‌دهد یک سری از جراحی‌های مغز، بدون باز کردن جمجمه انجام شود. در این روش، از تابش‌های جهت‌گیری شده پرتوهای یونیزه استفاده می‌شود. در این روش، از جراحی به کمک دهنده‌های بالای پرتوها، یک سری تومورهای داخل جمجمه‌ای و یا عوارض دیگری که به راحتی با جراحی معمولی قابل رفع شدن نیستند، از بین برده می‌شوند. در بیست سال اخیر، جراحی پرتوی اولین

راه درمان پس از استفاده از شیمی درمانی، پرتودرمانی و جراحی بوده است. همچنین، درمان با اعمال جراحی در بسیاری از موارد برای بیمار مشکلاتی ایجاد کرده و به بسیاری از بافت‌های سالم نیز آسیب می‌رساند؛ اما پرتوهای مورد استفاده در جراحی پرتوی، از یک منبع خارجی تامین میشوند که تحت شرایط بسیار دقیق و با دستگاه خاصی، پرتوها و اشعه‌های مختلف در یک نقطه که تومور یا آسیب بافتی وجود دارد، متمرکز می‌شوند و به این ترتیب، درمان صورت گرفته و بافت‌های سالم اطراف محل مورد درمان نیز آسیبی نمی‌بینند. به این ترتیب، بیمار با یک روز بستری شدن در بیمارستان درمان شده و از عوارضی مانند خونریزی و عفونت بعد از عمل نیز خبری نخواهد بود. البته زمان لازم برای بهبود کامل بیشتر است. کلا پنج نوع تابش در جراحی پرتوی مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از امواج الکترومغناطیسی (اشعه گاما و اشعه X) و ذرات اتمی (پروتون، نوترون و یون‌های کربن). جراحی پرتوی اصولاً در مواردی که تومورهای مغزی و مشکلات عروقی مغزی تشخیص داده شده باشد، کاربرد دارد و باید نوع آسیب، مکان آن و سن بیمار و کلا سلامت کلی بیمار برای انجام این عمل در نظر گرفته شود. در این راستا، چاقوی گاما در درمان مریض‌هایی که اختلال‌های مغزی دارند به کار گرفته می‌شود. در واقع، چاقوی گاما وسیله‌ای است شبیه کلاه خود که از آن ۲۰۱ باریکه پرتو گاما به طور همزمان در یک نقطه دقیقاً تعیین شده در محل اختلال مغز بیمار به هم رسیده و درمان با کمترین اثر روی بافت‌های طبیعی و جانبی اطراف و بدون ریسک‌های معمول در جراحی‌ها و یا بریدگی صورت می‌پذیرد. در این حالت که مریض بی‌تحرك دراز کشیده، گروه متخصصین ابتدا به عکس‌برداری از مغز او اقدام می‌کنند؛ بعد این دستگاه پزشکی بر سر بیمار قرار می‌گیرد. از منفذهای این دستگاه باریکه‌های بسیار دقیق اشعه گامای کبالت ۶۰ به تومور تابانده می‌شود. کار با تابش‌دهی ملایم آغاز می‌شود تا در نهایت مکان دقیق تومور هدف گیری شود. نقطه کانونی باید حدود اندازه تومور باشد. این عمل که به دفعات انجام می‌شود "شوت" نام دارد و مریض دریافت اشعه را احساس نمی‌کند. دز تابشی بسته به عمق، اندازه و پیشرفت تومور متفاوت است تا برای بافت‌های اطراف تومور حداقل خطر را داشته باشد. چاقوی گاما روشی جدید برای درمان صرع، پارکینسون و سردرد است. چاقوی گاما برای از بین بردن دردهایی نظیر تیک‌های عصبی دردناک، درمان ناهنجاری وریدی و اختلالات عصبی مغز و نیز برای درمان تومورهای مغزی خوش خیم همچون التهاب اعضای شنوایی که در آن اعصاب شنوایی و اعصاب صورت بیمار به وسیله تومور تحت تاثیر قرار گرفته‌اند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اینکه چاقوی گاما تحولی در تکنولوژی است، اما هنوز از درمان پیشرفته و قطعی مشکلات عصبی فاصله دارد و هر نوع بدخیم از تومورهای مغزی به‌وسیله چاقوی گاما قابل درمان نیست. به عنوان مثال ضایعات بزرگتر از ۴ سانتیمتر را نمی‌تواند درمان کند. این روش به صورت سرپایی بوده و نیازی به جراحی و بی‌هوشی ندارد و حدود ۲-۳ ساعت به طول می‌انجامد. همچنین دوره نقاهت نداشته و مریض می‌تواند به کارهای روزانه‌اش بپردازد.

۴-۶- استفاده از تکنولوژی هسته‌ای در صنعت و معدن

طی نیم قرن گذشته، تکنولوژی هسته‌ای کاربردهای بسیاری در صنعت و معدن یافته است. کاربرد دانش و فناوری هسته‌ای در زمینه صنعت و معدن و تحقیقات مربوطه به این بخشها گسترده بوده و کاربرد مواد رادیواکتیو و تکنیکهای هسته‌ای در صنعت و معدن امروزی با تنوع خاص و ویژه‌ای همراه است، به طوری که در کلیه بخش‌های صنعتی و معدنی از این تکنولوژی و دانش هسته‌ای استفاده می‌شود. از جمله مهمترین کاربردهای تکنولوژی هسته‌ای در صنعت می‌توان به نشتیابی سیالات در لوله‌ها و مخازن با اشعه، دبی‌سنجی پرتویی (سنجش شدت تشعشعات، نور و فیزیک امواج)، سنجش پرتویی میزان سائیدگی قطعات در حین کار، سنجش پرتویی میزان خوردگی قطعات، چگالی سنج مواد معدنی با اشعه، اندازه‌گیری دقیق قطرسنجی، ضخامت سنجی و سطح سنجی، تعیین فرسودگی غشاء داخلی کوره‌های صنعتی، کشف عناصر نایاب در معادن، تسهیل عملیات اکتشاف و استخراج معادن زیرزمینی نفت و گاز، استفاده از آثار متقابل پرتوها با مواد جهت بهینه سازی عملکرد آنها در صنعت و ... اشاره کرد. همچنین، یکی از طرح‌های مهم سازمان انرژی هسته‌ای، استفاده از تکنیک‌های هسته‌ای جهت احیای مجدد معدن‌های رها شده است. در ضمن، کاربرد سیستم‌های هسته‌ای در رادیو گرافی‌های صنعتی و به خصوص کنترل جوش‌ها و همچنین نشتیابی خطوط انتقال نفت نیز، در حفظ ایمنی انسان-ها و محیط زیست مؤثر است. در مجموع، آنالیز مواد، اندازه‌گیری و کنترل، تست‌های غیرمخرب (NDT)، تصویربرداری با استفاده از پرتوهای ایکس، ردیابی تعیین مسیر لوله‌ها و پرتو فرآوری برای استریل کردن محصولات یکبار مصرف پزشکی، از جمله زمینه‌های کاربرد فناوری هسته‌ای در بخش صنعت محسوب می‌شود.

سیستم‌های رادیوایزوتوپی که در کارخانجات مورد استفاده قرار می‌گیرند، از یک چشمه رادیواکتیو حفاظت شده، یک دتکتور یا آشکارساز و قسمت‌های الکترونیکی تشکیل شده‌اند. انعطاف پذیری، دقت عمل و صرفه اقتصادی سیستم‌های رادیوایزوتوپی، سبب توسعه سریع کاربرد آنها در صنایع شده است. در این راستا، گسترش روزافزون موارد استعمال رادیوایزوتوپ‌ها در رشته‌های مختلف علوم و صنعت، پژوهشگران را بر آن داشته است تا روز به روز در تهیه، تولید و کاربرد رادیوایزوتوپ‌ها، روش‌های عملی‌تر و دقیق‌تری را جستجو کنند؛ به طوری که اکنون بسیاری از کشورها مشغول تحقیق و بررسی در مورد استفاده بیشتر و کارایی بهتر رادیوایزوتوپ‌ها هستند. از مهم‌ترین مزایای سیستم‌های رادیوایزوتوپی بایستی به این موارد اشاره کرد: اندازه‌گیری‌ها بدون تماس با ماده انجام می‌شود، بنابراین هیچ‌گونه تغییری در ماده مورد نظر در خط تولید ایجاد نمی‌شود. همچنین به وسیله سیستم‌های رادیوایزوتوپی می‌توان اندازه‌گیری‌های موردنظر را در ظروف سر بسته و در داخل لوله‌هایی که تحت فشار و یا حاوی مواد سمی و خطرناک هستند، بدون تماس با آنها انجام داد. در این روش، اندازه‌گیری مستقل از فشار، درجه

حرارت، ترکیب شیمیایی و یا مشخصات فیزیکی جسم مورد نظر است و در هنگام اندازه‌گیری ضخامت یا دانسیته مواد، نیاز به قطع خط تولید نیست. این مزایا به اضافه پایین‌تر بودن مخارج و هزینه نگهداری چنین سیستم‌هایی سبب شده است که کاربرد رادیوایزوتوپ‌ها، نه تنها در صنایع، بلکه در سایر رشته‌ها نیز به سرعت رشد پیدا کند. اما بایستی متذکر شد، رادیوایزوتوپ‌هایی که کاربرد صنعتی دارند نیز گاهی مشمول ملاحظات سیاسی-اقتصادی می‌شوند؛ در حالی که محروم کردن کشورها از این مواد و امکانات می‌تواند ضررهای جبران ناپذیری در پی داشته باشد.

۶-۴-۱- آنالیز مواد

آنالیز مواد در بخش صنعت با استفاده از روش‌های هسته‌ای، شامل آنالیز نمونه‌های کوچک، بزرگ و آنالیز فوری و در محل است. با بکارگیری تکنیک‌های هسته‌ای نظیر NAA، PIXE و PIGE می‌توان نمونه‌های محیطی، شامل نمونه‌های خاکی، آبی و ذرات معلق موجود در هوا را اندازه‌گیری کرد. این روش‌ها همچنین در باستان‌شناسی و آنالیز اجزاء موجودات زنده نیز کاربرد دارد. در این میان، روش فعال‌سازی نوترونی (NAA) روش نسبتاً جدید و کارآمد برای تجزیه کمی و کیفی عناصر و ایزوتوپ‌های موجود در نمونه‌های مختلف است. نوترون ذره‌ای خنثی است که در درون هسته اتم‌ها با پیوندهای هسته‌ای قوی در کنار پروتون‌ها قرار دارد. این ذره در صورتی که خارج از هسته و به صورت آزاد باشد (مانند تابش نوترون از چشمه‌های نوترونی)، میل برهمکنشی زیادی با هسته اتم‌های هدف مقابل خود دارد. این برهمکنش باعث برانگیختگی هسته هدف (نمونه) شده و هسته‌های برانگیخته تابش گاما گسیل می‌کنند. با توجه به این که عناصر مختلف دارای سطح مقطع برهمکنش و انرژی برانگیختگی متفاوت دارند، لذا از روی طیف‌سنجی تابش گامای گسیل شده از نمونه می‌توان اطلاعات بسیار دقیق در مورد نوع و درصد عناصر و نوع ایزوتوپ‌های نمونه به دست آورد. از مزیت‌های تجزیه فعال‌سازی نوترونی می‌توان مطالعه و تجزیه انواع نمونه‌ها به هر شکل و مقدار، تغییرناپذیری نمونه تجزیه شده، زمان کوتاه این آزمایش در مقایسه با روش‌های متداول گذشته، تجزیه عنصر و ایزوتوپی به طور همزمان، کم بودن هزینه تجزیه و آلودگی زیست محیطی کمتر نسبت به روش‌های استفاده از مواد شیمیایی است.

روش‌های هسته‌ای دیگری نظیر PGNAA نیز می‌توانند برای آنالیز فوری نمونه‌های بزرگ و همچنین آنالیز در محل مورد استفاده قرار گیرند. اندازه‌گیری ترکیب مواد معدنی، تعیین مقدار رطوبت، اندازه‌گیری ترکیب مواد معدنی، تعیین مقدار رطوبت و خاکستر موجود در زغال سنگ و همچنین تشخیص جنس و خصوصیات مختلف کانی‌ها از کاربردهای PGNAA است. در دهه‌های اخیر این روش در صنعت سیمان نیز به کار گرفته شده است. از حدود ۱۵ سال پیش، امکان استفاده از روش‌های آنالیز

هسته‌ای جهت تشخیص مواد منفجره نیز مورد مطالعه قرار گرفت و امروزه روش‌های آنالیز هسته‌ای در ورودی برخی فرودگاه‌ها برای تشخیص مواد منفجره جاسازی شده در چمدان‌ها و همچنین کشف میادین مین استفاده می‌شود. دو سال پیش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی از تکنیک هسته‌ای در کروواسی به صورت آزمایشی برای شناسایی مین‌های ضدنفر استفاده نمود و نتیجه این بود که اندازه‌های خاصی از این مین‌ها با توجه به نوع عملکرد و در شرایط خشکی خاک زمین شناسایی شدند؛ اما کار بیشتری نیاز است تا منجر به کشف مین‌های ضد نفر کوچکتر و در شرایط رطوبت خاک زمین گردد.

۶-۴-۲- اندازه‌گیری و کنترل

اندازه‌گیری و کنترل از دیگر کاربردهای دانش هسته‌ای در بخش صنعت و معدن است و امروزه در کشورهای پیشرفته دنیا در بسیاری از صنایع بزرگ و کوچک، از این دانش برای اندازه‌گیری ضخامت دقیق ورقه‌های فلزی، چگالی و سطح سیال در یک مخزن، سرعت جریان سیال و کنترل آلودگی استفاده می‌شود. همچنین در بسیاری از موارد که امکان تماس مستقیم حساسه^۱ با موادی که قرار است اندازه‌گیری شوند، وجود ندارد و یا حساسه لازم بسیار گران قیمت است، ساده‌ترین روش برای اندازه‌گیری، استفاده از مواد رادیواکتیو است. کافی است مقدار بسیار کمی از مواد رادیو اکتیو را با فلز مخلوط کرده و میزان یا در واقع سطح مایع آن را بدون تماس مستقیم اندازه‌گیری نمود. در بسیاری از صنایع نیز که در آنها از مخازن بزرگ و مسدود استفاده می‌شود تشخیص سطح ماده در مخزن و کنترل آن تنها با استفاده از پرتوهای هسته‌ای و سیستم‌های الکترونیکی وابسته امکان‌پذیر است. این روش که به نام سطح سنجی معروف است اکنون در بسیاری از کارخانجات سیمان، ذوب آهن، صنایع شیمیایی و ... بکار گرفته می‌شود. همچنین، استفاده از مقادیر بسیار کم و ضعیف از مواد رادیواکتیو در کنترل فرآیندهای تولید محصولات، تقریباً کاری عادی در تمامی کشورهای صنعتی جهان است. برای مثال افزودن مقدار کمی از این مواد به مایعی که از درون شبکه لوله‌ای به هم پیچیده عبور می‌کند، اجازه می‌دهد تا به‌سادگی بتوان با اندازه‌گیری تشعشعات از بیرون لوله، پی به سرعت مایع درون لوله و از آنجا دبی مایع پی برد.

کاربرد بسیار جالب دیگر تکنولوژی هسته‌ای برای کنترل کیفی است. به طور مثال، اگر دو مایع که از لحاظ فیزیکی کاملاً مشابه هم هستند، با یکدیگر به‌صورت کاملاً یکنواخت و یا با هر نسبتی مخلوط گردند. برای حصول اطمینان از این که این دو ماده خوب با یکدیگر مخلوط شده‌اند، کافی است به یکی از آنها مقدار کمی ماده رادیواکتیو اضافه کرده و در انتهای مسیر تولید نمونه‌گیری نمود. حال اگر میزان مواد رادیواکتیو در نمونه‌ها یکی باشد، این دو ماده به‌صورت یکنواخت با یکدیگر مخلوط شده‌اند. همچنین کارخانه‌های فولاد، شیشه، کاغذ و ...، برای تولید محصولات با کیفیت بالا نیازمند استفاده از سیستم‌ها و

1. Sensor

دانش هسته‌ای هستند. با توجه به اینکه عبور پرتوهای رادیواکتیو از مواد، به تدریج باعث کاهش انرژی آنها می‌شود، با ساخت دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق انرژی می‌توان ضخامت اجسامی را که این پرتوها به آن تابیده می‌شود، اندازه‌گیری کرد. به طور مثال، تولید مواد فلزی نازک، پلاستیکی و کاغذ با ضخامت یکنواخت با یک «گیج» ضخامت‌سنج هسته‌ای قابل کنترل است (ضخامت سنجی). در صنعت اتومبیل سازی نیز از مواد رادیواکتیو برای کنترل کیفیت ورق استیل استفاده می‌شود. در این راستا، در ژاپن بیش از سه هزار دستگاه پرتوآرئیند برای ارتقای کیفی محصولات صنعتی نصب شده است. همچنین استفاده از مواد رادیواکتیو برای تمیز کردن و زدودن آلودگی در بسیاری از لوازم مانند لنزهای چشم یا برخی مواد آرایشی نیز از دیگر مباحث مطرح در این حوزه محسوب می‌شود.

۶-۴-۳- تصویربرداری و تشخیص عیوب

تصویربرداری با استفاده از پرتوهای ایکس و تشخیص عیوب داخلی قطعات صنعتی، از کاربردهای دیگر دانش هسته‌ای در صنعت است. از این روش‌ها در بررسی جوش‌های صنعتی و جوش لوله‌های نفت و گاز نیز استفاده شده و می‌تواند عیوبها و نقایص جوش‌های صنعتی را در تمامی موارد مشخص کند. برای مشخص کردن کیفیت جوشکاری در لوله‌هایی که در زیر زمین کار گذاشته شده‌اند نیز، استفاده از مواد رادیواکتیو در قالب رادیوگرافی صنعتی راه‌حل مناسبی است. رادیوگرافی صنعتی با استفاده از رادیوایزوتوپ‌ها انجام می‌شود. استفاده از سی.تی. اسکن (CTscan) جزو شناخته شده‌ترین و متداول‌ترین این روش‌ها است. از همین خاصیت می‌توان برای مشخص کردن کیفیت برخی از مواد یا اجناس از نظر وجود ترک و شکستگی نیز استفاده کرد. همچنین در صنعت ساخت و نگهداری هواپیما، برای کنترل وجود شکاف یا نشتی در موتورهای جت و سایر قسمت‌ها از این تکنیک استفاده می‌شود. در این راستا، پس از انجام چند ساعت پرواز مشخص توسط هر هواپیما بایستی داخل موتور، بدنه و بال آن رادیوگرافی و کنترل شود. این کار برای حفظ ایمنی پرواز ضروری است. این جنبه از کاربرد رادیوایزوتوپ‌ها واقعا حیاتی است. بایستی توجه داشت، عدم کنترل و اندازه‌گیری دقیق در صنایع، نه تنها به محصولات صنعتی و کارخانجات صدمه وارد می‌کند؛ بلکه در مواردی از جمله جوش‌های صنعتی، می‌تواند به فجایعی انسانی منجر گردد.

بایستی توجه داشت، روش‌های استفاده از مواد نافذ، آزمایش مغناطیسی با استفاده از براده‌های آهن و جریانهای گردابی که مانند گیت‌های فرودگاه عمل می‌کند، در کنترل‌های صنعتی کاربرد داشته و در بعضی موارد هنوز هم کاربرد دارد. هر کدام از روش‌ها در کنار ارجحیت خاص خود، ضعف‌هایی نیز دارند. مثلا در روش مغناطیسی فقط تا عمق ۲ تا ۳ میلیمتری روی سطح را می‌توان عیب‌یابی کرد. در روش مواد نافذ هم، فقط عیب‌هایی قابل شناسایی هستند که به سطح راه داشته باشند. روش استفاده از

رادیوایزوتوپ‌ها، بهترین روش برای پیدا کردن عیوب یا سنجش در صنایع به شمار می‌رود. یکی از مزایای آن، وجود فیلم حاصل از این روش عنوان می‌شود که می‌تواند به صورت یک مدرک در پرونده کاری بماند و امکان اخذ نظرهای مختلف را در زمان‌های دیگر فراهم کند. گرچه سیستم‌های رادیوایزوتوپی به علت مزایای خاصی که دارند، توانسته‌اند به سرعت جایگزین سیستم‌های الکترونیکی یا مکانیکی مشابه شوند؛ اما این سیستم‌ها تنها روش اندازه‌گیری و کنترل در صنایع نیستند. یکی از روش‌های متداول، استفاده از سیستم آلتراسونیک است. این سیستم به دستگاه سونوگرافی شباهت دارد. در این روش، با استفاده از دستگاه آلتراسونیک، موجی به داخل قطعه فرستاده و موج برگشتی روی دستگاه ثبت می‌شود. از روی نقطه تضعیف موج متوجه مکان عیب می‌شوند. به این صورت که بلندتر شدن موج نشانه وجود ترک و کوتاه‌تر شدن آن دلیل وجود مواد زائد یا گرفتگی مسیر است. روش آلتراسونیک نیز روش خوبی است، اما در ضخامت‌های کمتر از میلی‌متر جواب نمی‌دهد.

۴-۴-۶- ردیابی در فرآیندها

ردیابی نیز، از جمله کاربردهای این دانش هسته‌ای در بخش صنعت محسوب می‌شود. مطالعه فرآیندهای شیمیایی، تعیین مسیر آب‌های زیرزمینی، تشخیص نشت مایعات در خطوط لوله و همچنین مقدار خوردگی فلزات، از جمله حوزه‌های بکارگیری دانش هسته‌ای برای ردیابی است. همچنین، از تکنیک‌های هسته‌ای ردیابی در تعیین جریان‌های زیرزمینی و عملیات اکتشاف و استخراج معادن زیرزمینی بخصوص نفت و گاز و نیز تعیین مشخصات و تشکیلات زیرزمینی برای تعیین محل دقیق حفاری‌ها استفاده می‌شود. هنگام کشف و استخراج نفت، دانشمندان میله‌های رادیواکتیو را داخل چاه‌های آزمایشی فرو برده، سپس میزان انتشار تشعشع رادیواکتیو را در طبقات مختلف اندازه می‌گیرند. زمین‌شناسان میزان بازتاب اشعه رادیواکتیو را ثبت نموده و یک تصویر واضح و دقیق از طبقات زیرین جهت حفاری بیشتر برای رسیدن به نفت در آن منطقه یا متوقف کردن کار به دست می‌آورند. در این ارتباط، شرکت «شلمبرگر» به طور عمده دانش فنی اکتشاف از طریق این تکنیک‌های هسته‌ای را در اختیار دارد. همچنین از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو می‌توان برای دنبال کردن مسیر مواد متحرکی که از دید پنهان هستند، همچون مطالعه جریان مایعات در تاسیسات شیمیایی استفاده کرد. آهنگ فرسودگی و میزان خوردگی قطعات متحرک از جمله پیستون‌ها در موتورها و سیستم‌های متحرک و ماشین‌آلات صنعتی را نیز می‌توان با استفاده از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو اندازه گرفت. در این حال، مقادیر اندکی از ایزوتوپ‌ها رادیواکتیو به بخش‌های فلزی ماشین‌آلات، مانند یاتاقان‌ها و رینگ پیستون‌ها اضافه شده، سپس سرعت فرسودگی با اندازه گرفتن رادیواکتیویته روغنی که برای روغنکاری این بخش‌ها به کار رفته است، محاسبه می‌شود. در تاسیسات تصفیه و پالایش نیز از ردیابی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو جهت دنبال کردن مواد پتروشیمی

و آماده سازی آنها در قسمت‌های مختلف استفاده می‌شود. همچنین در مرحله نهایی، محصولات مواد نفتی تصفیه شده جهت تعیین درجه خالص بودن آنها با استفاده از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو آزمایش می‌شوند در هنگام انتقال مواد نفتی در فاصله‌های زیاد نیز، چون شرکت‌های مختلف نفتی از لوله‌های نفت مشترک استفاده می‌کنند، ردیابی ایزوتوپی مختلف جهت علامت گذاری ابتدای انتقال هر محموله نفتی به کار برده می‌شوند. همچنین یکی از کاربردهای مهم رادیوایزوتوپ‌ها در صنعت، نشت‌یابی در خطوط لوله‌های انتقال نفت است. این کار، نه تنها از لحاظ مسائل اقتصادی مهم است، بلکه نشت نفت با آلوده کردن منطقه می‌تواند مشکلات زیست محیطی را سبب شود. فرسودگی و خوردگی لوله‌ها و مخازن به علت وجود مواد خورنده یا سیالات ساینده، عوامل محیطی مثل سرما، یخبندان و گرما، خسارت‌های عمدی و سهوی همچون عملیات خرابکارانه، برخورد اشیاء و نیز حفاری و در نهایت عملیات خارج از محدوده طراحی ممکن است به لوله‌ها و مخازن آسیب برساند. بایستی توجه داشت، هر خط لوله برای محدوده خاصی از دما و فشار طراحی می‌شود و اگر عملیات خارج از این محدوده انجام شود، باعث ایجاد خرابی در خط لوله می‌شود. بنابراین با توجه به وسعت عواملی که می‌توانند نشتی را ایجاد کنند و همچنین هزینه‌ها و مخاطراتی که این پدیده در بردارد، نشت‌یابی و جلوگیری از تداوم نشت، مساله‌ای بسیار مهم خواهد بود، اما تشخیص نشتی به طور دقیق و سریع کار بسیار مشکلی است. نشت‌یابی در خطوط انتقال نفت با روش‌های مختلف انجام می‌شود. یکی از این روش‌های با دقت بسیار بالا (نیم لیتر نشت در یک ساعت)، استفاده از سیستم P/G با رادیوایزتوپ برم-۸۲ به عنوان ردیاب است. یکی از دلایل ارجحیت روش رادیوتریسر، دقت بسیار بالای آن است.

در سیستم P/G، خطوط لوله‌های نفت در قطره‌های مختلف نشت‌یابی می‌شوند. این سیستم، از یک سری قطعات الکترونیکی، مکانیکی، یک باتری و یک دتکتور (جستجوگر) تشکیل شده که طول آن حدود ۱۲۰ سانتی‌متر بوده و قطر آن نیز با توجه به قطر خطوط لوله، به وسیله هدایت کننده‌های لاستیکی تغییر می‌کند. در شروع عملیات، این دستگاه در ابتدای مسیر خط و داخل لوله قرار می‌گیرد و با فشار حدود ۵ کیلومتر در ساعت، یعنی با سرعتی برابر با سرعت ماده نفتی درون لوله تا مقصد حرکت می‌کند و در این مرحله، تنها به شناسایی خط لوله می‌پردازد. در مرحله بعد، ماده رادیواکتیو برم ۸۲، پس از تزریق، داخل خط لوله حرکت کرده و هر جا که کوچکترین نشتی وجود داشته باشد، این ماده به خارج از لوله نفوذ و دور لوله را آلوده به مواد رادیواکتیو می‌کند. در نهایت، دوباره سیستم به داخل لوله فرستاده می‌شود و در محل‌هایی که ماده به خارج از لوله نفوذ کرده است، دتکتور محل دقیق آن را شناسایی می‌کند. این سیستم، دوجداره بوده و از ورود نفت به داخل قطعات جلوگیری می‌کند، ضمن آن‌که انجام هر آزمایش حدود ۳۰ ساعت به طول می‌انجامد و اطلاعات کسب شده در قسمت ماکرو کامپیوتر سیستم ضبط می‌شود. از آنجا که در این سیستم و در هر آزمایش آن، به طور متوسط ۵۰۰ میلی کوری ماده اکتیویته به

داخل لوله تزریق می‌شود و نیمه عمر ماده برم ۸۲، حدود ۳۶ ساعت است، پس از گذشت ۳ تا ۴ برابر زمان مذکور، مواد موجود در نفت کاملاً از بین رفته و امکان استفاده از نفت برداشت شده از این لوله‌ها در پالایشگاه فراهم می‌شود. در این زمان، امکان هرگونه آلودگی محیط زیست به مواد رادیواکتیو نیز از بین می‌رود. البته قبل از انجام عملیات، بایستی منطقه مورد نظر به طور دقیق بررسی شده و از عدم وجود منابع دیگر رادیواکتیو در آن مطمئن گردید تا دستگاه دچار خطا نگردد. به جز روش رادیوتریسر (استفاده از برم-۸۲)، روش آلتراسونیک نیز در دنیا مرسوم است.

۶-۴-۵- سایر کاربردهای تکنیک‌های هسته‌ای در صنعت

امروزه دانش هسته‌ای همچنین در استریل کردن محصولات یکبار مصرف پزشکی نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و آلودگی‌های موجود در این محصولات، با استفاده از تابش گاما یا الکترون از بین می‌رود. یکی از کاربردهای دیگر تکنیک اشعه گاما، اندازه‌گیری توزیع اشباع سیالات در مغزه‌های نفتی در آزمایشات سیلاب‌زنی ازدیاد برداشت از مخازن نفت است. با استفاده از این تکنیک می‌توان درصد اشباع فازهای سه‌گانه آب و نفت و گاز را در داخل نمونه سنگ مخزن به کار برده شده در مدل‌های فیزیکی آزمایشگاهی در شرایط فشار و دمای مخزن با دقت بسیار زیادی اندازه‌گیری کرد. همچنین برای برآورد میزان سنگ‌های معدنی در معادن یا مواد نفتی در چاه‌های نفت یا حفاری‌ها از این مواد استفاده می‌کنند. در ضمن، بسیاری از دستگاه‌های فتوکپی برای جلوگیری از به‌هم چسبیدن کاغذها بر اثر الکتریسیته ساکن و در نهایت جمع شدن در دستگاه، از مقادیر بسیار کمی مواد رادیواکتیو استفاده می‌کنند. تست‌های غیرمخرب (NDT)، کاربرد دیگر دانش هسته‌ای در صنعت است. در بسیاری از موارد لازم است که یک قطعه یا اثر تاریخی و هنری، بدون نمونه برداری و تخریب مورد بررسی قرار گیرد که برای این امر، از روش تست‌های غیرمخرب استفاده می‌شود. همچنین تاباندن اشعه رادیواکتیو به ماده می‌تواند باعث بالا رفتن کیفیت یا میزان برخی ویژگی‌های مواد شود. به‌عنوان مثال، خصوصیتی چون سختی، مقاومت و چگالی از جمله شاخص‌هایی هستند که اشعه رادیواکتیو می‌تواند روی آن تأثیر بگذارد. کاربرد تکنیک هسته‌ای در مدیریت منابع آب هم قابل توجه بوده و برای شناسایی حوزه‌های آب‌خیز زیرزمینی، هدایت آب‌های سطحی و زیرزمینی، کشف و کنترل نشت و ایمنی سدها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر پروژه‌های ذخیره‌سازی آب موجود، می‌توان با استفاده از هیدرولوژی ایزوتوپ، سفره‌های زیرزمینی برای دستیابی ثابت به منابع آبی ایجاد کند. کاربرد دیگر تکنیک هسته‌ای، حفاظت از محیط زیست و پاک‌سازی آن است. در این راستا، استفاده از تشعشعات یونیزه برای تصفیه گازهای متصاعد از کارخانجاتی که انرژی خود را از سوخت‌های زغالی می‌گیرند، هم اکنون در بلغارستان، چین، ژاپن و لهستان متداول است. در نهایت، از این تکنیک می‌توان برای ردیابی آلودگی هوا و همچنین

آلودگی دریا توسط نفت کش‌ها نیز استفاده کرد. با آزمایش ۴۰ نوع نفت مختلف که در نقاط مختلف جهان استخراج می‌شوند دانشمندان به این نتیجه رسیدند که در تمام مواد نفتی، ۷ نوع عنصر مشترک وجود دارد. اما مقدار آنها در نفتی که در یک نقطه استخراج می‌شود با نفت نقطه دیگر دنیا متفاوت است. هنگامی که مواد نفتی در جایی مشاهده می‌شوند نمونه‌ای از آن به آزمایشگاه برده شده و در معرض تابش نوترونی قرار می‌گیرد. به این ترتیب، عناصر مختلف و مقدار آنها مشخص شده و می‌توان به طور دقیق اعلام کرد که کدام کشتی مسئول آلوده سازی بوده است. یک روش ساده و سریع برای تجزیه هوای آلوده نیز وجود دارد. ابتدا به وسیله صافی‌هایی، آلودگی هوا گرفته شده، سپس به وسیله همان روشی که در بالا توضیح داده شد، نوع و مقدار عناصر زیان آور موجود در آن مشخص می‌شود. با تهیه نقشه-های برای آلودگی هوا مشابه نقشه‌های تغییرات جوی، می‌توان پیش‌گویی‌هایی در مورد آلودگی هوا انجام داده و اقدامات لازم را در رابطه با پاکیزه نگه داشتن هوا انجام داد.

۶-۵- کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در بخش کشاورزی و تغذیه

دانش هسته‌ای به عنوان یک دانش پیشرو، علاوه بر اینکه برای پژوهش‌های کشاورزی به عنوان یک ابزار موثر و سریع محسوب می‌شود، می‌تواند همگام با سایر روش‌های کلاسیک، نقش مهم و تعیین کننده‌ای در توسعه کشاورزی و منابع طبیعی، افزایش تولیدات و ایجاد امنیت غذایی و نیز سالم سازی، کنترل آفات و بیماری‌های محصولات کشاورزی داشته باشد. امروزه دانش هسته‌ای در زمینه‌های موتاسیون هسته‌ای ژن‌ها در کشاورزی، تولید گونه‌های با حاصل‌خیزی بیشتر، افزایش بازدهی محصولات، ایجاد تنوع ژنتیکی در گیاهان زراعی، به تأخیر انداختن زمان رسیدن محصولات، ایجاد بذره‌های جدید و مقاوم به آفات و کم‌آبی، استفاده مؤثر و بهینه از کودهای شیمیایی، کاهش مصرف سموم و کنترل آفات، آلودگی‌های گیاهی و حشرات مضر از طریق روش سترون‌سازی و یا ضد عفونی، بهینه سازی مصرف آب و حفظ خاک، مبارزه با آفات انباری، جلوگیری از جوانه زدن محصولات غذایی در هنگام انبارداری، کاهش ضایعات و افزایش زمان نگهداری محصولات کشاورزی و غذایی، کشت بافت، اندازه‌گیری و ردیابی عناصر ناپایدار (رادیوایزوتوپ) و پایدار در اندام‌های مختلف گیاهی و نیز خاک و آب، افزایش نیتروژن و فسفات خاک توسط گیاهان، مدیریت داشت کشاورزی در زمین‌های خاکی، افزایش کارایی چرخه‌های نیتروژن و کربن، تعیین نیاز آبی در گیاهان و مدیریت تغذیه گیاهی، حرکت املاح و آلودگی‌های زیست محیطی در خاک و گیاه، باروری مجدد خاک، اندازه‌گیری ضخامت و غلظت لایه‌های رسوبی، ردیابی آنها و تعیین دقیق ذخیره سفره‌های آب زیرزمینی، اندازه‌گیری آب رودخانه‌ها و کانال‌ها، استفاده موثرتر از منابع آبی و جمع‌آوری آنها و بسیاری از زمینه‌های دیگر کاربرد دارد. همچنین، تکنیک‌های هسته‌ای در حوزه‌های دام و طیور و نیز دامپزشکی، موارد مصرفی چون پیشگیری، کنترل،

تشخیص و درمان بیماری‌های دام و طیور و نیز تولید مثل، اصلاح نژاد، تغذیه، بهداشت و ایمن‌سازی محصولات و خوراک دام و طیور دارد.

پیمانی که بین سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (FAO) و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) در سال ۱۹۶۴ در زمینه استفاده از این فناوری در عرصه کشاورزی و فرآورده‌های غذایی منعقد شده است، نقطه عطفی برای پیشرفت کشاورزی از طریق این فناوری می‌باشد. در این راه، پرتوهای یون‌ساز، ایزوتوپ‌ها و رادیوایزوتوپ‌ها به کمک بررسی‌های کشاورزی شتافته و انقلاب عظیمی در کشاورزی به وجود آوردند. استفاده عملی از روش‌های هسته‌ای جهت افزایش تولیدات کشاورزی و بهبود کیفیت آنها در زمینه‌های ذکر شده، در کشورهای پیشرفته بیش از ۴۰ سال و در کشورهای نظیر هندوستان و پاکستان بیش از ۳۰ سال سابقه دارد. از کشورهایی که کاربرد رادیو ایزوتوپ‌ها را برای اولین بار در کشاورزی تجربه کردند، ژاپن و آلمان بود که در حال حاضر در این بخش پیشرو هستند. از طرفی بسیاری از متخصصان کشاورزی هسته‌ای در آژانس انرژی اتمی نیز عمدتاً از دو کشور هند و پاکستان هستند. بنگلادش، فیلیپین، کره، ترکیه، یونان، دانمارک و فرانسه نیز در زمینه بکارگیری فنون هسته‌ای در بخش کشاورزی موفقیت‌های چشمگیری داشته‌اند. در ایران نیز، بخش تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی پتانسیل لازم به منظور جذب و توسعه این دانش را دارد و در این زمینه گام‌های عملی مطلوبی را پشت سر گذاشته است. این تکنولوژی، کاملاً پاک بوده و استفاده از آن در مصارف کشاورزی، هیچ‌گونه اثر سوئی ندارد؛ به طوری که طبق بررسی‌های انجام شده، استفاده از رادیوداروها روی وارپته‌های مختلف گیاهی تولید شده، تاکنون دارای هیچ‌گونه اثر منفی نبوده است. امروزه کشورهای زیادی مجوز پرتودهی برای نگهداری طولانی مدت مواد غذایی را گرفته‌اند. همچنین، استفاده از فناوری هسته‌ای در بخش کشاورزی، موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش تولید می‌شود که ارزش اقتصادی بسیار بالایی دارد، حتی با رونق این روش، روستاییان کمتر به سمت شهرها هجوم خواهند آورد؛ زیرا درآمد ناشی از آن روش در روستا، نیازهای زیستی آنان را تامین خواهد کرد.

۶-۵-۱- حوزه‌های زراعی و باغبانی

از موارد کاربرد این فناوری در بخش کشاورزی می‌توان به اصلاح نباتات از طریق پرتودهی گاما در بذر آنان نام برد که از این طریق، تغییرات ژنتیکی بر روی بذر گیاه اعمال می‌شود تا با از بین بردن صفات نامطلوب گیاهان با جهش ژنتیکی، در طول چند سال بتوان به بذری با صفات برتر و مطلوب و تولید ارقام جدید گیاهی دست یافت. همچنین تولید گونه‌هایی از محصولات غذایی با حاصلخیزی بیشتر به منظور افزایش عملکرد محصول در واحد سطح و استفاده بهینه از منابع آب و خاک، یکی دیگر از مهمترین کاربردهای انرژی هسته‌ای است. در این حالت، بجای اینکه سطح زیر کشت افزایش داده

فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای / ۲۰۳

شود، می‌توان با استفاده از پرتودهی گاما ارقام بومی کم محصول را به ارقام مقاوم پرمحصول تبدیل نمود. به طور مثال، با استفاده از فناوری هسته‌ای ساقه غلاتی نظیر ذرت و گندم کوتاه‌تر و ضخیم‌تر شده و به این ترتیب، ضایعات محصول کاهش و تولید محصول در هر هکتار افزایش می‌یابد. در ضمن، با پرتودهی بذرها می‌توان آنها را در برابر آب و خاک شور و مناطق سرد مقاوم کرد و از این طریق در مناطق شور و مناطق خشک کویری نیز گیاهان مقاومت را کاشت و بارور کرد. از این دانش برای اصلاح بذر با دستیابی به شرایط مقاوم به خوابیدگی، کم‌آبی و بیماری‌های قارچی نیز استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از روش پرتوتابی گاما به بذر مرکبات یا میوه‌های هسته‌دار می‌توان با اصلاح ژنتیک میوه‌های با هسته کوچک یا بی‌هسته تولید کرد که علاوه بر خوش خوراک بودن می‌تواند در جذب بازارهای بین‌المللی و ارتقای کیفیت محصول مرکبات و میوه‌های هسته‌دار موثر باشد. از طرفی، با استفاده از انرژی هسته‌ای می‌توان با اصلاح و بهبود ارقام بومی، این گونه‌ها را که به عنوان میراث طبیعی کشور است، حفظ و از اختلاط آنها با ارقام غیربومی و نابودی گونه‌های بومی جلوگیری کرد.

همچنین برای افزایش سلامت محصولات کشاورزی در مقابل آفات و حشرات مضر می‌توان از فناوری پرتودهی هسته‌ای برای آفت زدایی از محصولات بدون استفاده از انواع سموم و کودهای شیمیایی بهره برد. حفاظت از محصولات کشاورزی از گزند آفات معمولاً در دو مرحله کشت در مزرعه و باغ و ذخیره‌سازی در انبار مطرح می‌باشد. تکنولوژی هسته‌ای در هر دو جنبه قابل کاربرد است. در مرحله مزرعه و باغ، با استفاده از پرتوهای نافذ گاما و ایجاد جهش‌های مرگ‌آور در کروموزوم‌ها، آفات و حشرات عقیم می‌شوند. سپس نرهای عقیم در مناطقی که بتوانند در جفت‌یابی با حشرات نر بارور رقابت کنند رها می‌شوند. بدین ترتیب نتاجی تولید نشده و به میزان قابل توجهی آفات کنترل می‌گردند. استفاده از این روش، درصد انتقال بیماری‌های انسانی و حیوانی را تا حد فراوانی کاهش داده و علاوه بر این، باعث بالا رفتن میزان تولیدات کشاورزی نیز می‌شود. همچنین حشرات و آفت‌هایی نیز که در مقابل سموم مقاوم شده باشند، با استفاده از این روش به‌سادگی از بین می‌روند. بایستی توجه داشت، استفاده از مواد شیمیایی و سموم در مبارزه با انواع آفات و قارچ‌ها، علاوه بر کاهش سلامت محصول، سبب آلودگی محیط زیست منابع آب و خاک می‌شود. در مدیریت آفات انباری نیز یکی از ترکیبات شیمیایی عمده‌ای که برای کنترل آفات انباری مورد استفاده قرار می‌گیرد، متیل بروماید است که در مدت زمان کوتاهی به‌راحتی آفت را از بین می‌برد، ولی متأسفانه به دلیل آثار مخربی که بر محیط زیست دارد، بایستی مصرف آن تا سال ۲۰۱۵ میلادی ممنوع شود. یکی از روش‌های جایگزین برای ترکیب متیل بروماید در واقع همین روش پرتوتابی است. به طور مثال برای حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری سیب زمینی و پیاز در انبارها می‌توان جوانه زدن آنها را با استفاده از پرتوتابی به تأخیر انداخت.

همچنین با استفاده از پرتودهی گاما و افزایش عمر ماندگاری محصولات باغی با حفظ طعم و تازگی

میوه‌ها به ویژه مرکبات در سردخانه‌ها می‌توان ضایعات میوه را کاهش داده و زمان بیشتری برای بازاریابی و صادرات این محصولات به بازارهای بین‌المللی برای تولیدکنندگان و صادرکنندگان فراهم کرد. روش دیگر کنترل آفات، ایجاد گیاه‌های مقاوم در مقابل بیماری‌های آفات، بجای بیابیم استفاده از سم و کود است. در این شیوه، هزینه‌های تولید حشرات عقیم در سطح انبوه نیز به شدت کاهش می‌یابد. از طرفی، از موارد کاربرد غیرمستقیم فناوری هسته‌ای در تولید محصولات کشاورزی می‌توان به تعیین میزان مصرف آب و کود به وسیله اندازه‌گیری به روش‌های هسته‌ای نام برد. این نوع استفاده از فناوری هسته‌ای می‌تواند به تولید انبوه و صرفه‌جویی مناسب در کشاورزی منجر شود. به طور مثال، با استفاده از پرتودهی می‌توان مصرف کود در تولید سویا را تا ۷۵ درصد کاهش داد و از این طریق، کشت آن را افزایش داد. همچنین با بکارگیری این روش، هزینه مصرف کود برای کشاورزی پایین می‌آید که از نظر اقتصادی، آلودگی زیست محیطی و سالم ماندن آب‌های زیرزمینی بسیار اهمیت دارد. همچنین با استفاده از مواد رادیواکتیو می‌توان خاصیتی در گیاهان ایجاد کرد که آنها از حداکثر آب موجود در خاک استفاده کنند. به این ترتیب، علاوه بر کاهش میزان آب مصرفی و هزینه‌های تولید، مانع از به هدر رفتن آب خواهیم شد. در نهایت بایستی متذکر شد، مهمترین ویژگی تکنیک موتاسیون در اصلاح نباتات ایجاد تنوع ژنتیکی می‌باشد، این در حالیست که تکنیک‌های کلاسیک و سنتی نمی‌توانند این سطح از تنوع را که از طریق پرتودهی بر روی بذرها صورت می‌گیرد ایجاد کنند. برای موتاسیون یا جهش در گیاهان از اشعه ایکس، پرتوهای گامای حاصل از کبالت یا سزیم، پرتوهای ماوراء بنفش و یا محلول‌های ایزوتوپی مانند فسفر و یا گوگرد استفاده می‌شود.

۶-۵-۲- حوزه‌های علوم دامی و شیلات و آبزیان

در حوزه علوم دامی، تکنولوژی هسته‌ای توانایی تاثیر بر تمامی گرایش‌های تخصصی از جمله تغذیه دام، اصلاح نژاد و تولید مثل دام و طیور را دارا می‌باشد. در مطالعات تغذیه دام، از مواد خوراکی نشان‌دار رادیواکتیو برای بررسی قابلیت هضم مواد خوراکی استفاده می‌گردد. به منظور تعیین ترکیبات بدن که در مطالعات تغذیه‌ای مورد نیاز می‌باشد از روش‌هایی موسوم به آنالیز کل بدن با استفاده از اشعه ایکس و گاما استفاده می‌شود. همچنین از بین بردن قارچ‌های مسمومیت‌زای موجود بر روی مواد غذایی دام‌ها، به‌ویژه آفات توکسین‌ها به کمک پرتوتابی رادیواکتیو نیز، از دیگر کاربردهای فناوری هسته‌ای در زمینه تغذیه دام می‌باشد. در اصلاح نژاد دام نیز، کاربرد دانش هسته‌ای شامل نشان‌دار نمودن مواد توارثی (مشمتمل بر DNA، RNA و تک نوکلئوئیدها) جهت مطالعه ژنوم دام و طیور به‌ویژه تعیین توالی ژن‌های مهم اقتصادی، ساخت کاوشگرهای ژنومی رادیواکتیو به منظور مطالعاتی همچون تعیین جنسیت، تعیین انساب، شناسایی انفرادی دام‌ها (انگشت نگاری DNA)، تست‌های تشخیصی برای بیماری‌های ژنتیکی،

فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای / ۲۰۵

مطالعات سیتوژنتیکی (تکنیک FISH) و تکنولوژی ساخت تراشه‌های ژنی به منظور مطالعه همزمان بیان چندین ژن می‌گردد. تاثیر پرتوهای رادیواکتیو بر باروری دام و طیور، عمده‌ترین کاربرد فناوری هسته‌ای در حوزه تولید مثل دام می‌باشد. همچنین بهره‌گیری از رادیوایزوتوپ‌ها به شیوه‌های تزریق و خوراک، در درمان و تشخیص بیماری‌های دامی و نیز تشخیص عفونت، تومورها و شناسایی مویرگ‌های آسیب دیده دام، یکی از مهمترین و موثرترین روش‌ها در دنیا محسوب می‌شود.

همچنین استفاده از دانش هسته‌ای، به‌ویژه کاربرد اشعه‌های ایکس و گاما در زمینه‌های مختلف شیلاتی روز به روز افزایش می‌یابد، به طوری که در برخی موارد مانند استریل کردن و سم‌زدایی برخی محصولات دریایی، دستکاری‌های ژنتیکی و پرورش اقتصادی موجودات دریایی و بسیاری از موارد دیگر، بدون استفاده از دانش هسته‌ای مقرون به صرفه نبوده و در برخی موارد امکان‌پذیر نخواهد بود. کاربرد دانش هسته‌ای در فعالیت‌ها و فرآورده‌های شیلاتی می‌تواند جهش بزرگی در زمینه‌های ارزیابی ذخایر، تولید فرآورده‌های شیلاتی بازار پسند، دستکاری‌های ژنتیکی (اصلاح نژاد) آبزیان، افزایش میزان تکثیر و پرورش آبزیان دریایی همچون جلبک، صدف، ماهی، خیاردریایی و میگو در پساب‌های گرم نیروگاه‌های هسته‌ای، مدیریت علمی صید شیلاتی، ردیابی موجودات در زنجیره‌های غذایی و بسیاری موارد دیگر را در پی داشته باشد. همچنین تعیین سن ماهیان با استفاده از اتولیت، تولید فرآورده‌های بیولوژیک از آبزیان، نشانه‌گذاری رادیواکتیو^۱ جهت ردیابی نحوه تغذیه، رشد و مهاجرت آبزیان، پیشگیری و ضدعفونی آب ورودی و خروجی اینکوباتورهای تکثیر لارو ماهی و نیز آب استخرهای پرورش ماهی و میگو نیز در دیگر کاربردهای مهم فناوری هسته‌ای در بخش آبزی‌پروری محسوب می‌شوند. در نهایت، برای گسترش دانش هسته‌ای در علوم شیلاتی، بررسی آثار ذرات و اشعه‌های هسته‌ای در اکوسامانه و موجودات زنده امری لازم به‌نظر می‌رسد تا حین رشد و توسعه بخش شیلات، بهترین نحوه بکارگیری از دانش هسته‌ای در کنار محیط زیست سالم و فرآورده‌های سالم‌تر مهیا شود.

۶-۵-۳- حوزه‌های علوم تغذیه و صنایع غذایی

تغذیه مناسب برای سلامت و بهبود کیفیت زندگی امری ضروری است. ریزمغذی‌ها از جمله آهن، روی و ویتامین A نقش اساسی در فرایندهای متابولیسمی بدن انسان ایفا می‌کنند، اما فقط در مقادیر اندک مورد نیاز هستند. از آنجا که نقش این مواد مغذی بسیار ضروری است، در صورتی که حتی به همان میزان اندک نیز در رژیم غذایی به اندازه کافی وجود نداشته باشند، مشکلات مهمی برای سلامت افراد ایجاد می‌شود. بایستی توجه داشت، فقر آهن مهمترین کمبود تغذیه‌ای رایج در سراسر جهان است که نتایج وخیمی را به‌ویژه برای زنان باردار و کودکان به دنبال دارد. کمبود آهن کافی در بدن، به کاهش

1. Tagging

تولید گلبول‌های قرمز و به تبع آن، کاهش ظرفیت جابه‌جایی اکسیژن توسط خون منجر شده (کم‌خونی) و عواقب ناگواری همچون خستگی و ناتوانی در تمرکز، رشد ناقص فیزیکی و ادراکی کودکان و نیز مشکلات دوران بارداری همچون خطر وضع حمل‌های زود هنگام و یا حتی مرگ مادر یا نوزاد را به دنبال خواهد داشت. روی نیز یک ماده مغذی مهم و ماده اصلی بسیاری از آنزیم‌ها بوده و نقش مهمی در سنتز پروتئین و تقسیم سلولی ایفا می‌کند. عملکرد ضعیف سیستم ایمنی بدن، کندی رشد و به تاخیر افتادن بلوغ جنسی در کودکان، از عواقب جدی فقر روی در انسان محسوب می‌شود. در نهایت، ویتامین A یکی دیگر از مواد مغذی در رژیم غذایی انسان است که در عملکرد قرنیه، رشد استخوان‌ها و واکنش‌های ایمنی بدن نقش دارد. کمبود این ویتامین، نه تنها موجب نابینایی قابل پیشگیری می‌شود، بلکه کارایی سیستم ایمنی بدن را نیز کاهش می‌دهد که پیامد آن افزایش خطر بروز بیماری‌های شدید عفونی و کم‌خونی است. این کمبود همچنین خطر مرگ مادر یا جنین در هنگام بارداری و یا مرگ نوزاد پس از تولد را افزایش می‌دهد. در این راستا، دانش هسته‌ای می‌تواند ابزاری ارزشمند برای ارزیابی فاکتورهای مانند ریز مغذی‌ها، ترکیبات بدن و مصرف شیر مادر که تغذیه را تحت تاثیر قرار می‌دهند، ارایه می‌کند.

از طرفی، بدن انسان از انرژی (کالری) موجود در غذا برای به حرکت انداختن ماهیچه‌ها و فرایندهای متابولیکی استفاده می‌کند. کاهش بیش از حد کالری نیروی مورد نیاز بدن را برای انجام فعالیت‌های روزانه تحلیل می‌برد و با گذشت زمان تهدیدات جدی برای سلامت انسان به همراه دارد، ضمن اینکه مصرف زیاد از حد کالری نیز می‌تواند منجر به افزایش وزن شده و مشکلاتی برای سلامت افراد و از جمله ابتلا به بیماری‌های دیابتی و قلبی را در پی داشته باشد. در این راستا نیز، از تکنیک‌های هسته‌ای و ایزوتوپیک می‌توان برای مطالعه پارامترهای مهم در شرایط تغذیه‌ای انسان مانند مصرف کلی انرژی، چگالی لاغری بدن و مصرف شیر مادر استفاده کرد. نتایج این مطالعات می‌تواند به متخصصان راهنمای تغذیه در تهیه برنامه‌های تغذیه برای ارایه کالری‌ها و مواد مغذی در یک رژیم غذایی متعادل و سالم برای پاسخگویی به نیازهای ویژه کمک کند. همچنین، پوکی استخوان که آسیب‌پذیری استخوان‌ها و احتمال شکستگی‌های استخوانی را افزایش می‌دهد، یکی از مشکلات شایع در سنین کهنسالی است. اگرچه تراکم معدنی استخوان‌ها به چندین فاکتور بستگی دارد، تغذیه نامناسب نقش کلیدی در پیشرفت عارضه پوکی استخوان ایفا می‌کند. کلسیم، ویتامین D و C و سایر مواد معدنی مانند فسفر، منیزیم، مس، منگنز، فلوراید و روی برای رشد سالم استخوان‌ها در طول زندگی ضروری هستند و می‌توانند به جلوگیری از بروز پوکی استخوان کمک کنند. در نهایت بایستی متذکر شد که داشتن تغذیه مناسب برای بهره‌مندی از یک سلامت مطلوب و یک آینده پایدار امری حیاتی بوده و برای دستیابی به این هدف، دانش هسته‌ای می‌تواند راهنمایی برای توسعه یک خط مشی قوی تغذیه‌ای باشد.

در حوزه صنایع غذایی نیز استفاده از دانش هسته‌ای در کشورهای پیشرفته بسیار متداول است.

فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای / ۲۰۷

فناوری پرتودهی مواد غذایی فرایندی است که طی آن اشعه‌های گامای (از چشمه‌های رادیوایزوتوپ کبالت ۶۰ یا سزیوم ۱۳۷)، ایکس و الکترون‌های شتابدار، برای تازه نگهداشتن غذا، کشتن از بین بردن باکتری‌هایی بیماری‌زا یا حتی مرگبار و طول عمر بیشتر غذا مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین افزایش نیافتن درجه حرارت در ماده غذایی، عدم تغییر رنگ ادویه، عطر و رنگ ادویه، از بین رفتن باکتری‌های گرمادوست، کپک‌ها و حشرات، تغییر نکردن ترکیب شیمیایی و خواص مواد، قابل قبول بودن بسته بندی‌های رایج آنها برای پرتودهی، دوام بیشتر مواد پرتودهی شده در شرایط انبار و بی‌خطر بودن مواد پرتودهی شده برای سلامت انسان از دیگر مزایای عمده پرتودهی مواد غذایی محسوب می‌شوند. در این روش می‌توان ماده غذایی را با بسته بندی نهایی پرتودهی کرده و از آلودگی ثانویه آن جلوگیری کرد. بایستی توجه داشت، پرتودهی مواد غذایی، به دلیل این‌که در آن بجای انرژی گرمایی از انرژی تشعشع مواد رادیواکتیو ضعیف برای از بین بردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا استفاده می‌شود، با عنوان پاستوریزاسیون سرد نیز شناخته می‌شود. لازم به ذکر است که شروع پرتودهی مواد غذایی در دنیا براساس پذیرش استاندارد پرتودهی مواد غذایی در سال ۱۹۸۳ بود. روش پرتودهی در مقایسه با تکنولوژی‌های معمول ضد عفونی نظیر روش‌های سنتی موجود از نظر اقتصادی و سرعت در انجام کار از مزیت‌های بیشتری برخوردار است. در نهایت باید متذکر شد که پرتودهی نمی‌تواند فساد ایجاد شده در ماده غذایی را از بین ببرد. بنابراین فقط مواد غذایی که از کیفیت خوب بهداشتی برخوردارند، باید پرتودهی شوند و در ضمن پرتودهی برای هر ماده غذایی مناسب نمی‌باشد.

۶-۵-۴- حوزه‌های بیوتکنولوژی، تحقیقات کشاورزی و آب و خاک

پیشرفت علوم زیستی و بیوتکنولوژی نیز در بسیاری از موارد مدیون استفاده از تکنیک‌های رادیواکتیو بوده است. در تکنیک‌هایی همچون لکه‌گذاری سادرن، لکه‌گذاری نوردن، روش دورگه سازی در محل و ...، به نوعی از خواص رادیواکتیویته برای شناسایی، مطالعه و ردیابی مولکول‌های زیستی استفاده می‌شود. همچنین بکارگیری مواد هسته‌ای در تحقیقات کشاورزی، امکان ردیابی دقیق‌تر رشد و نمو را در گیاهان فراهم می‌نماید. همان‌طور که کود به گیاه داده شده و سپس تغییرات آن بررسی می‌گردد، ایزوتوپ و رادیوایزوتوپ‌ها را نیز می‌توان به همان روش به گیاه داده و مطالعات مربوط به فیزیولوژی و تغذیه‌ای آن را بررسی کرد. برای ردیابی یک مولکول زیستی در داخل و خارج از سلول به کاوشگری که به نوعی با مولکول مورد نظر برهمکنش داشته و با مواد رادیواکتیو و یا غیر رادیواکتیو نیز نشاندار شده باشد، نیاز است. همچنین در مواردی که ایجاد موتاسیون به روش‌های متداول از طریق پرتوتابی مشکل باشد، می‌توان از تکنیک‌های کشت بافت گیاهی استفاده کرد. پس از بهینه کردن محیط کشت، برای جداکشت موردنظر در گیاه خاص و بدست آوردن باززایی مطلوب، می‌توان پرتودهی را در یکی از مراحل کشت

بافت بر روی نمونه اعمال کرد. مزیت چشمگیر این روش نسبت به روش‌های دیگر، در انتخاب موتانت-های سازگار به استرس‌ها، با توجه به توانایی اعمال شرایط کنترل شده در محیط کشت می‌باشد. پس به راحتی این امکان وجود دارد که یک انتخاب اولیه در محیط‌های استرس‌دار همچون شوری و خشکی در شرایط *in vitro* انجام داده و آنالیزهای تکمیلی نیز در مزرعه بر روی گیاهان انتخاب شده از طریق کشت بافت ادامه خواهد یافت. در نهایت، برخی تحقیقات کشاورزی برای رسیدن به نتیجه مطلوب زمان زیادی طلب می‌کند، در حالی که با استفاده از فناوری هسته‌ای این زمان به نصف کاهش می‌یابد. به طور مثال، در روش معمولی برای تولید بذر گندم اصلاح شده مقاوم به خشکی یا شوری، حداقل به ۱۴ سال زمان نیاز است، در حالیکه با استفاده از پرتودهی گاما می‌توان در مدت ۵ تا ۶ سال بذر اصلاح شده گندم را تولید کرد.

از طرفی، با گسترش فناوری هسته‌ای، کاربرد ردیاب‌های ایزوتوپی از جایگاه ویژه‌ای در علوم آب و خاک نیز برخوردار گردیده است. باید توجه نمود که خواص فیزیکی هسته عناصر رادیواکتیو تعیین کننده ارزش آنها به عنوان ردیاب می‌باشد. استفاده از ردیاب‌های شیمیایی و ایزوتوپی در چهار دهه اخیر به منظور منشاء یابی رسوبات، آب‌های زیرزمینی، زیر قشری، آب‌های سطحی، آلودگی‌ها و نیز سایر تحقیقات مدیریتی در حوضه‌های آبخیز متداول بوده است. در این طرح‌ها، از مواد شیمیایی و ایزوتوپی متعددی استفاده می‌شود، ولی برای ردیابی آب‌ها عمدتاً از ایزوتوپ‌های مولکول آب استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، از روش‌های ردیابی برای مشخص کردن پارامترهای فصلی و گذشته بیلان آب حوضه در مناطق اقلیمی خشک و معتدل، بررسی مسیر حرکت آب در محیط‌های متخلخل، ارزیابی سرعت جریان آب زیرزمینی، تخمین ضریب نفوذپذیری لایه‌های آبدار، تعیین سن، منشاء و محل تغذیه آب‌های زیرزمینی، ارتباط لایه‌های آبدار با یکدیگر، میزان اختلاط توده‌های مختلف آب زیرزمینی، مطالعه حرکت آلوده کننده‌ها و تعیین آلوده کننده نیز استفاده شده است. همچنین روش استفاده از ایزوتوپ در تعیین میزان فرسایش خاک نیز گویای این واقعیت است که استفاده از تکنیک‌های ایزوتوپی به سهولت و دقت قابل قبولی می‌تواند سریعاً میزان فرسایش سطحی خاک را در یک شیب محاسبه نماید. مطالعات انجام گرفته نشان داده است که تکنیک‌های استفاده از اندازه‌گیری‌های سزیم-۱۳۷ در برآورد سرعت و نحوه فرسایش سطحی خاک روشی کمی و دقیق می‌باشد که صرفنظر از دیدگاه‌های کیفی و تجربی، از طریق اندازه‌گیری سزیم-۱۳۷ در نمونه‌های خاک، امکان برآورد شدت فرسایش خاک را در دوره‌های چندین ساله نیز میسر می‌سازد.

۶-۶- کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در باستان شناسی و زمین شناسی

پدیده فروپاشی رادیواکتیو بطور گسترده برای تعیین فواصل زمانی در تاریخ موجودات زنده، آب‌های

طبیعی، سیستم‌های صخره‌ای شهاب‌ها و تکامل منظومه شمسی مورد استفاده قرار گرفته است. فروپاشی رادیونوکلئید یک سنجش بسیار دقیق است که مدت زمان آن در اثر تغییرات شکل شیمیایی، دما، فشار یا دیگر پدیده‌های فیزیکی طبیعی تغییر نمی‌کند. ثابت فروپاشی و لذا نیمه عمر رادیو نوکلید، تنها برای چند رادیو نوکلید محدود که از طریق جذب الکترون فروپاشی می‌کنند، با شکل شیمیایی تغییر می‌یابد. چنانچه در یک زمانی در گذشته t_0 مقدار یک رادیو نوکلید موجود N_0 بوده و بعد از یک مدت زمان، t_1 مقدار رادیو نوکلید باقی مانده N_1 باشد، قانون فروپاشی زیر در آن بکار خواهد رفت: $N_1 = N_0 - e^{\lambda(t_0-t_1)}$ که در آن λ ثابت فروپاشی برای رادیو نوکلید مادر است. این معادله همچنین می‌تواند برای فواصل فروپاشی (t_0-t_1) بصورت زیر حل می‌گردد: $t_0-t_1 = (1/\lambda) \ln(N_0/N_1)$. چنانچه مقادیر رادیونوکلید در هر دو زمان و ثابت فروپاشی λ معلوم باشد، فواصل زمانی t_0-t_1 می‌تواند محاسبه گردد. چنانچه t_1 زمان حال ($t_1=0$) باشد، واضح است که N_1 می‌تواند مستقیماً در نمونه‌ای قابل دسترس اندازه گیری شود. مساله در اینجا دانستن مقدار رادیو نوکلید N_0 در زمان قبل t_0 است. برای تعیین عمر آثار باستانی، فسیل‌ها و حتی سن سنگ‌ها و صخره‌ها نیز از ویژگی خاص مواد رادیواکتیو (نیمه عمر) استفاده می‌شود. در این میان، تاریخ سنجی به وسیله کربن ۱۴ (کربن اکتیو)، یک روش شناخته شده و متداول برای تعیین قدمت و سن مواد آلی و بقایای موجودات زنده و دست‌سازهای باستانی با منشاء زیست شناختی است. البته چون نیمه عمر کربن ۱۴ حدود ۵۷۰۰ سال است، تعیین عمر اجسام با استفاده از کربن ۱۴ فقط در مواردی معتبر است که نمونه حداکثر متعلق به ۶۰ هزار سال قبل باشد. پس از این مدت، مقدار کربن ۱۴ بسیار ناچیز می‌شود.

هر روزه مقدار زیادی از پرتوهای کیهانی^۱ وارد جو زمین می‌شود. برخورد پرتوهای کیهانی با مولکول‌های اتمسفر، پدیده غیرمعمولی نیست. در اثر این برخورد، پرتو کیهانی دیگر به شکل نوترون‌های پرنرژری به وجود می‌آید که این نوترون‌های پرنرژری، به اتم‌های نیتروژن برخورد کرده و اتم نیتروژن ۱۴ (با ۷ پروتون و ۷ نوترون) به اتم کربن ۱۴ (با ۶ پروتون و ۸ نوترون) و یک اتم هیدروژن (یک پروتون و بدون نوترون) تبدیل می‌شود. اتم‌های کربن ۱۴ که در اثر پروتون‌های کیهانی به وجود می‌آیند، با اتم‌های اکسیژن ترکیب شده و گاز دی اکسید کربن را به وجود می‌آورند. این کربن دی‌اکسیدها، در فرآیند فتوسنتز به طور طبیعی جذب گیاه شده و بخشی از الیاف گیاه را می‌سازند. جانوران و انسان‌ها هم این گیاهان را خورده و کربن ۱۴ را جذب می‌کنند. اتم‌های کربن ۱۴ همیشه در حال واپاشی هستند (حدود ۱۵ واپاشی در دقیقه در گرم کربن)، اما همیشه تا زمانی که موجود زنده است، به دلیل تبادل مداوم گازهای اکسیژن و دی‌اکسید کربن بین موجودات زنده و جو زمین، اتم‌های واپاشیده شده با اتم‌های جدید کربن ۱۴ جایگزین شده و نسبت کربن ۱۲ به کربن ۱۴ تقریباً ثابت می‌ماند. وقتی یک گیاه یا حیوان می‌میرد، این تبادل متوقف شده و کربن ۱۴ شروع به فروپاشی با آهنگ ثابتی می‌کند و

پس از گذشت ۵۶۰۰ سال، جسم مرده دقیقاً نصف تشعشع رادیواکتیو زمان زندگی خود را ساطع می‌کند. بنابراین با اندازه‌گیری میزان تابش می‌توان زمان مرگ موجود مورد نظر را تعیین کرد. از طرف دیگر، نسبت کربن ۱۲ به کربن ۱۴ برای این موجود در لحظه مرگ برابر این نسبت در سایر جانداران است؛ اما کربن ۱۴ با نیمه عمر ۵۷۰۰ سال، بدون هیچ‌گونه جایگزینی واپاشی می‌کند؛ در حالی که مقدار کربن ۱۲ موجود در نمونه بدون تغییر باقی می‌ماند. با بررسی نسبت کربن ۱۲ به کربن ۱۴ در نمونه و مقایسه آن با مقدار استاندارد این نسبت در موجودات زنده می‌توان سن جسد یک موجود زنده را با دقت نسبتاً بالایی اندازه گرفت.

البته اصول تاریخ‌سنجی کربن ۱۴ و قوانین مربوط به آن، برای سایر ایزوتوپ‌ها هم به کار گرفته می‌شود. مواد دیگری هم وجود دارند که هم به صورت رادیواکتیو و هم غیرفعال در طبیعت وجود داشته و نسبت آنها هم مقدار ثابتی است، ضمن اینکه نیمه عمر طولانی‌تری هم دارند. به طور مثال، پتاسیم ۴۰ یک عنصر رادیواکتیو با نیمه عمر حدود ۱۰۳ میلیون سال است که دو ایزوتوپ فعال و غیرفعال آن در بدن موجودات زنده به طور طبیعی یافت می‌شود. از سایر رادیوایزوتوپ‌های مفید برای تاریخ‌سنجی رادیواکتیو می‌توان به اورانیوم ۲۳۵ (نیمه عمر ۷۰۴ میلیون سال)، اورانیوم ۲۳۸ (نیمه عمر ۴/۵ میلیارد سال)، توریم ۲۳۲ (نیمه عمر ۱۴ میلیارد سال) و روییدیم ۸۷ (نیمه عمر ۴۹ میلیارد سال) اشاره کرد. در این میان، عمرسنجی به روش اورانیوم ۲۳۸ و سرب ۲۰۶ متداول‌تر است. بایستی توجه داشت که سرب طبیعی چهار ایزوتوپ ۲۰۴، ۲۰۶، ۲۰۷ و ۲۰۸ دارد. این چهار ایزوتوپ جز سرب ۲۰۴، جملگی محصولات نهایی واپاشی ایزوتوپ اورانیوم یا توریم می‌باشند. اگر نمونه‌ای از یک سنگ یا صخره که حاوی اورانیوم و نیز سرب است، ایزوتوپ سرب ۲۰۴ نداشته باشد، به احتمال قریب به یقین، سرب موجود در آن نمونه حاصل واپاشی اورانیوم و توریمی است که در ابتدای تشکیل آن وجود داشته و اینکه در زمان زمین‌شناختی دور، این صخره کلاً فاقد هر سربی بوده است. بنابر این نسبت اورانیوم ۲۳۸ به سرب ۲۰۶ و یا نسبت توریم ۲۳۲ به سرب ۲۰۸ معیاری از عمر زمین‌شناختی صخره به شمار می‌آید. البته همانطور که اشاره شد، برخلاف ایزوتوپ‌های رادیواکتیو ^{238}U ، ^{235}U ، ^{232}Th و ^{235}Rb که از زمان تشکیل این عناصر تابحال بر جای مانده‌اند، کربن ۱۴ بطور مداوم از طریق نوترون‌گیری ازت ۱۴ در اتمسفر بالایی تولید می‌شود.

گرمالیانی روش دیگری برای سن‌یابی هسته‌ای آثار باستانی است. اگر یک نمونه کوچک از سفال باستانی را به صورت پودر درآورده و آن‌گاه تا حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد گرم شود، علاوه بر تابش جسم سیاه، مقدار کمی هم نور که به سهولت قابل اندازه‌گیری است، از آن گسیل می‌شود. اگر همین نمونه مجدداً گرم شود، فقط تابش جسم سیاه مشاهده می‌شود. وقت خاک رس گرم می‌شود، بعضی از کانی‌های خاک رس با جذب انرژی از واپاشی ناخالصی‌های پرتوزا نظیر اورانیوم، توریم و پتاسیم ۴۰ در سفال یا احتمالاً از خاک اطراف برانگیخته می‌شوند. این حالت‌های برانگیخته با عمر خیلی طولانی با

فصل ششم: کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای / ۲۱۱

گسیل نور به حالت پایه وامی‌پاشند که نور حاصل را گرمایی می‌گویند. در مقیاسهای زمانی باستان‌شناسی، اکتیویته ناخالصی‌های پرتوزا عملاً ثابت است، در نتیجه تراکم مراکز گرمایی برانگیخته در یک تکه سفال به نوع گل رس سفال و زمانی که از آخرین گرم کردن سفال گذشته است بستگی دارد. بنابراین عمر سفال در سه مرحله تعیین می‌شود. اول غلظت کانون‌های گرمایی فعال شده موجود در سفال با اندازه‌گیری نورسنجی حساس و گرمایش مهار شده دقیق تعیین

۲۱۲ / مبانی و کاربردهای فناوری هسته‌ای

سفید

فصل هفتم

کاربردهای غیر صلح آمیز و نظامی تکنولوژی هسته‌ای

مقدمه

یکی از پراهمیت‌ترین کاربردهای علوم هسته‌ای، ساخت انواع سلاح‌های هسته‌ای است که به طور تقریبی از هفتاد سال پیش آغاز شد. اولین تلاش برای ساخت بمب اتمی جهان، توسط آمریکا در پروژه مانهتن صورت گرفته و نخستین آزمایش با بمب پلوتونیوم نیز در صحرای آلاموگوردو در نیومکزیکو، در ۱۶ ژوئیه ۱۹۴۵ انجام شد. در اواخر جولای ۱۹۴۵، رئیس جمهور آمریکا دستور به کار بردن این سلاح جدید را علیه ژاپن برای تاریخ بعد از ۲ اگوست صادر می‌کند؛ ۵ شهر ژاپن شامل توکیو، کیوتو، هیروشیما، ناگویا، ناکازاکی به ترتیب اولویت برای واشنگتن در لیست قرار می‌گیرند. اولین بمب در روز ششم اوت سال ۱۹۴۵ میلادی در شهر هیروشیما انداخته شد. سه روز بعد نیز بمب دیگری که قوی‌تر از بمب هیروشیما بود، روی بندر ناکازاکی انداخته شد. همین فجایع، به جنگ بین آمریکا و ژاپن خاتمه داد. در حال حاضر، سلاح‌های هسته‌ای پس از گذشت سال‌ها از اختراعاتشان، همچنان به عنوان قوی‌ترین نیروی موجود محسوب شده و همچنان نیز با جدیت و سرمایه‌گذاری بسیار کلان در حال گسترش و تکامل هستند. این سلاح‌ها را می‌توان با استفاده از پلوتونیوم یا اورانیوم غنی شده (بالای ۲۰ درصد) تهیه کرد. اغلب سلاح‌های هسته‌ای با تلفیق شکافت و همجوشی عمل می‌کنند، یعنی واکنش شکافت اولیه که در هسته‌ای از جنس اورانیوم یا پلوتونیوم انجام می‌شود، واکنش همجوشی عنصرهای سبک‌تر را آغاز می‌کند. عمده‌ترین کاربردهای نظامی انرژی اتمی به صورت تولید انواع سلاح‌های اتمی، بمب هیدروژنی، بمب تشعشعی (کثیف)، بمب نوترونی، موشک‌های دوربرد، بمب‌های خوشه‌ای، بمب‌های سنگین و ترکش‌ها می‌باشد.

در این میان، بمب‌های هسته‌ای تاکنون قوی‌ترین و مخرب‌ترین بمب‌های جهان محسوب شده و دارندگان این نوع بمب‌ها، جزء قدرت‌های هسته‌ای جهان می‌باشند. بایستی توجه داشت که بمب اتم نمایانگر نخستین گام در انقلاب هسته‌ای بود. بمب اتمی در زمان خود، پیشرفتی بی‌همتا در جنگ‌افزار مدرن بود، سلاحی بود که قاموس کاملاً نوینی آفرید. بمب اتمی فقط یک «بمب دیگر» نیست، سلاحی است با قدرت انهدامی بی‌مثال که نه فقط می‌تواند کل مراکز جمعیتی را یکسره نیست و نابود نماید؛ بلکه قادر است در کوتاه مدت و بلندمدت، ضایعات هولناکی بر محیط زندگی برجای گذارد. بمب اتمی، ماهیت جنگ مدرن را یکسره دگرگون کرد، جنگ متعارفی را به پدیده‌ای کهنه تبدیل کرده و ابزاری در اختیار صاحبانش قرار داده است که می‌توانند به مدد آن، تمدن آدمی را به اعصار مقابل تاریخ بازگردانند. با توجه به مزیت‌های سیاسی و نظامی که بمب اتمی در بردارد، چنین سلاحی شالوده یک مسابقه تسلیحاتی گسترده را بنا نهاد که نشانه‌های زیادی از فروکش کردن آن دیده نمی‌شود. اما در مجموع، بمب‌های هسته‌ای دو نوع هستند. یک نوع آنها از همجوشی هسته‌ای تولید می‌شود. در این فرایند معمولاً هسته‌های سبک باهم ترکیب شده و هسته سنگین را ایجاد می‌کنند. در این هنگام مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. نوع دوم بمب‌های هسته‌ای، براساس فرایند شکافت هسته‌ای ساخته می‌شود. در این حالت هسته‌های سنگین شکسته شده و به هسته‌های سبک‌تر تبدیل می‌شوند. همزمان با این شکافت هسته‌ای، مقدار قابل توجهی انرژی آزاد می‌شود. در اولین بمب‌های اتمی، از روش شکافت استفاده می‌شد؛ اما امروزه، بمب‌های همجوشی از فرایند همجوشی به عنوان ماشه آغازگر استفاده می‌کنند. در حالی که جزئیات این بمب‌ها محرمانه است؛ ولی نکات اساسی آنها قابل دسترس است.

۷-۱- بمب‌های شکافت هسته‌ای^۱

اساس کارکرد بمب شکافت هسته‌ای، وقوع واکنش‌های خودبه‌خودی و زنجیره‌ای شکست هسته اورانیوم ۲۳۵ یا پلوتونیوم ۲۳۹ و آزادسازی حجم بالای انرژی می‌باشد. البته برای آغاز پدیده شکافت، بایستی مقدار عنصر قابل شکافت از اندازه بحرانی بیشتر باشد. طبق تعریف، توده در وضعیت «آستانه بحران»، حداقل توده لازم از یک ماده با قابلیت شکافت برای رسیدن به واکنش شکافت هسته‌ای می‌باشد. دریک بمب شکافتی، برای جلوگیری از انفجار نارس و زود هنگام، بایستی سوخت در وضعیت «زیر آستانه بحران» نگه داشته شوند. به عبارت دیگر، از آنجایی که بمب باید در لحظه دلخواه منفجر شود، مقداری از اورانیوم ۲۳۵ یا پلوتونیوم ۲۳۹ خالص با حجم کل بیش از اندازه بحرانی را به چند قسمت مجزا با حجم کمتر از اندازه بحرانی تقسیم کرده و این قسمت‌ها را در محفظه‌ای طوری قرار می‌دهند که نوترون‌های آزاد شده از هریک، در قسمت دیگر نفوذ نکنند. در این حالت، هرگاه به هر دلیلی

1. Nuclear Bomb

در یکی از اجزای بمب پدیده شکافت شروع شود، در لحظه‌ای که انفجار باید صورت گیرد، رخداد پدیده شکافت، زنجیری و مداوم نخواهد بود. این جداسازی مشکلات زیادی را برای طراحی یک بمب شکافتی با خود به همراه می‌آورد. اولاً دو یا بیش از دو توده «زیر آستانه بحران» برای تشکیل توده «ورای آستانه بحران» باید در کنار هم آورده شوند که در این صورت، در زمان موقع انفجار، به تعداد نوترون بیشتری برای رسیدن به یک واکنش شکافتی نیاز خواهد بود.

از طرفی، نوترون‌های آزاد باید در یک توده «ورای آستانه بحران» القاء شوند تا شکافت آغاز شود. در نهایت، برای جلوگیری از ناکامی در انفجار بمب، باید مقدار بیشتری از ماده شکافت‌پذیر پیش از انفجار وارد مرحله شکافت شود. حال اگر مواد با جرم‌های زیر جرم بحرانی به آهستگی به هم نزدیک شوند تا مجموع آنها از جرم بحرانی بیشتر شود، یک سری واکنش‌های زنجیره‌ای و یک انفجار هسته‌ای به وقوع خواهد پیوست. در این حال، پیشرفت واکنش زنجیری بسیار سریع بوده و انفجار اتمی در قطعات اورانیوم فقط در حدود یک میلیونم ثانیه طول می‌کشد. برای تبدیل توده‌های «زیر آستانه بحران» به توده‌هایی «ورای آستانه بحران»، از دو تکنیک «رها کردن گلوله یا چکاندن ماشه» و «انفجار از درون» استفاده می‌شود. تکنیک «چکاندن ماشه»، ساده‌ترین راه برای آوردن توده‌های «زیر بحران» به نزدیک همدیگر است، بدین صورت که یک تفنگ، توده‌ای را به توده دیگر شلیک می‌کند. یک کره تشکیل شده از اورانیوم ۲۳۵ به دور یک مولد نوترون ساخته می‌شود. گلوله‌ای از اورانیوم ۲۳۵ در یک انتهای تیوپ درازی که پشت آن مواد منفجره جاسازی شده، قرار داده می‌شود. کره یاد شده در انتهای دیگر تیوپ قرار می‌گیرد. یک حسگر حساس به فشار، ارتفاع مناسب را برای انفجار چاشنی تشخیص می‌دهد. هنگامی که این بمب به زمین اصابت می‌کند، مواد منفجره پشت گلوله منفجر شده و گلوله به پایین می‌افتد. سپس، گلوله به کره برخورد کرده و یک جرم فوق بحرانی تولید شده و واکنش شکافت هسته‌ای آغاز گردیده و به دنبال آن، بمب منفجر خواهد شد.

در بمب «پسر بچه»^۱ که در سال‌های پایانی جنگ جهانی دوم بر شهر هیروشیما انداخته شد، تکنیک «چکاندن ماشه» به کار رفته بود. این بمب ۱۴/۵ کیلوتنی، دارای ۱/۵ درصد کارایی و معادل ۱۴/۵۰۰ تن TNT بازده داشت؛ یعنی پیش از انفجار، فقط ۱/۵ درصد از ماده مورد نظر شکافت پیدا کرد. نکته اساسی که حتماً باید رعایت شود، این است که این توده‌ها باید در زمانی کوتاه‌تر از حفاصل بین شکافت‌های خود به خودی، در کنار هم نگه داشته شوند. به محض اینکه دو توده اورانیوم در کنار هم قرار گرفتند، ناگهان چاشنی، توده‌ای از نوترون‌ها را تولید کرده و زنجیره واکنش‌ها آغاز می‌شود. با ادامه این زنجیره، انرژی مدام افزایش می‌یابد تا بمب به سادگی و خودبه خود منفجر شود. در نهایت، در تکنیک «انفجار از درون» نیز، دستگاه انفجار درونی شامل یک کره از جنس اورانیوم ۲۳۵ و یک بخش به عنوان

1. Little boy bomb

هسته است که متشکل از پلوتونیوم ۲۳۹ بوده و با مواد منفجره احاطه شده و انفجار در داخل گوی صورت می‌گیرد. هنگامی که چاشنی بمب به کار افتاده و مواد منفجره داخلی آتش گرفت، مواد منفجره روشن شده و یک موج ضربه‌ای ایجاد می‌کنند. این شوک، پلوتونیوم را به داخل کره می‌فرستد. سپس، هسته مرکزی منفجر شده و واکنش شکافت هسته‌ای آغاز می‌شود و به دنبال آن، بمب منفجر می‌شود. در بمب «مرد گنده»^۱ نیز که در سال‌های پایانی جنگ جهانی دوم بر شهر ناکازاکی انداخته شد، تکنیک «انفجار از درون» به کار رفته بود. بازده این بمب ۲۳ کیلوتن و کارایی آن نیز ۱۷ درصد بوده است.

بایستی توجه داشت که طرق مختلف نزدیک کردن قطعات اورانیوم یا پلوتونیوم به یکدیگر، هنوز یک موضوع سری نظامی است، ولی واقعیت این است که هرچه سرعت اتصال قطعات زیادتر باشد، واکنش زنجیره‌ای سریع‌تر و مقدار بیشتری از هسته‌های اورانیوم موجود شکافته شده و کارایی و بازده سلاح اتمی بیشتر می‌شود. اصولاً اتصال سریع قطعات است که انفجار مهیب بمب اتمی را به وجود می‌آورد. اگر منعکس کننده‌ای به دور ماده اتمی قرار داده شود، از فرار نوترون‌ها جلوگیری نموده و شکافت زنجیری تسریع می‌گردد. از طرف دیگر، جرم بحرانی نیز از اسرار نظامی است و ممالکی که آن را می‌دانند، به شدت از فاش شدن آن جلوگیری می‌کنند، اما از مطالبی که در این باره منتشر شده است، چنین برمی‌آید که جرم بحرانی باید بین یک و ۱۰ کیلوگرم باشد. وجود جرم بحرانی افزایش قدرت بمب اتمی را محدود می‌کند، زیرا برای آنکه بتوان انفجاری ایجاد کرد؛ اولاً نباید مقدار سوختی کمتر از جرم بحرانی به کار برد. بنابراین، مقدار جرم بحرانی حد پایین بمب اتمی را تعیین می‌کند. ثانیاً وزن هریک از قطعات اورانیوم درون بمب نمی‌تواند بیش از وزن بحرانی باشد، زیرا در آن صورت، هر قطعه خود به خود منفجر خواهد شد. همچنین بایستی توجه داشت که اگر قبل از تماس تدریجی اندازه‌های زیربحرانی به هم، واکنش زنجیری شروع شود، شدت گرمای حاصل از شکافت‌های اولیه به حدی خواهد رسید که قبل از انفجار واقعی، ماده قابل شکافت متلاشی شده و واکنش زنجیری به خاموشی می‌گراید. برای رفع این مشکل، اولاً اتصال قطعات اورانیوم به وسیله یک ماده منفجره قوی نظامی صورت گرفته، ثانیاً محفظه ماده اتمی بسیار ضخیم و محکم ساخته می‌شود تا در آغاز واکنش زنجیری، از متلاشی شدن ماده مزبور جلوگیری نماید.

۷-۱-۱- بمب‌های اورانیومی و پلوتونیومی

بمب‌های اورانیومی، از اورانیوم ۲۳۵ برای خلق یک انفجار هسته‌ای استفاده می‌کنند. اورانیوم ۲۳۵ ویژگی منحصر به فردی دارد که آن را برای تولید انرژی هسته‌ای و نیز بمب هسته‌ای مناسب می‌کند. اورانیوم ۲۳۵ یکی از نادر موادی است که می‌تواند زیر شکافت القایی قرار بگیرد. در فرآیند شکافت

القایی، احتمال اینکه اتم اورانیوم ۲۳۵ نوترونی را که به سمتش پرتاب می‌شود، جذب کند بسیار بالا است. در این حالت، هرگاه یک نوترون آزاد با هسته این عنصر برخورد کند، هسته به سرعت نوترون را جذب کرده و بی‌ثبات می‌شود و به تبع آن نیز به سرعت متلاشی می‌شود. این امر، باعث پدید آمدن دو اتم سبک‌تر و آزادسازی دو یا سه عدد نوترون می‌شود که تعداد این نوترون‌ها بستگی به چگونگی شکسته شدن هسته اتم اولیه اورانیوم ۲۳۵ دارد. نوترون‌های حاصله خود سبب وقوع فرآیندهای شکافت بعدی می‌شوند. این وضعیت، اصطلاحاً «ورای آستانه بحران» نامیده می‌شود. فرآیند جذب نوترون و شکسته شدن متعاقب آن بسیار سریع و در حد پیکو ثانیه (10^{-12} ثانیه) رخ می‌دهد. دو اتم جدید نیز به محض اینکه در وضعیت جدید تثبیت شدند، از خود پرتو گاما ساطع می‌کنند. بنابراین، حجم عظیم و خارق‌العاده‌ای از انرژی به‌صورت گرما و پرتو گاما به‌هنگام شکسته شدن هسته آزاد می‌شود. انرژی آزاد شده از یک فرآیند شکافت به این علت است که محصولات شکافت و نوترون‌ها وزن کمتری از اتم اورانیوم ۲۳۵ دارند. البته برای اینکه این ویژگی‌های اورانیوم ۲۳۵ به کار آید، باید اورانیوم را غنی کرد. اورانیوم به‌کار رفته در سلاح‌های هسته‌ای، حداقل باید شامل ۹۰ درصد اورانیوم ۲۳۵ باشد. نخستین بمب از این نوع، در سال ۱۹۴۵ میلادی در ایالات نیومکزیکو در ایالات متحده آمریکا آزمایش شد. این بمب انفجاری با قدرت ۱۹ کیلوتن ایجاد کرد.

در یک بمب پلوتونیومی نیز، یک گوی پلوتونیومی وجود دارد که اطراف آن را پوسته‌ای به‌نام منعکس‌کننده نوترونی فراگرفته است. این پوسته که معمولاً از ترکیب برلیوم و پلونیوم ساخته می‌شود، نوترون‌های آزادی را که از فرایند شکافت هسته‌ای به بیرون می‌گریزند، به داخل این فرآیند بازمی‌تاباند. این مسئله باعث می‌شود مقدار کمتری پلوتونیوم برای رسیدن به جرم بحرانی و ایجاد یک واکنش شکافت زنجیره‌ای مورد نیاز باشد. یک انفجار هسته‌ای از این نوع می‌تواند با نیروی معادل ۱۰۰ تن TNT منفجر شود. البته شکافت خود به‌خودی پلوتونیوم ۲۳۹ آن‌قدر سریع است که بمب تفنگی (پسریچه) نمی‌تواند دو توده پلوتونیوم را در زمانی کوتاه‌تر از حدفاصل شکافت‌ها کنار هم نگه دارد. بنابراین برای پلوتونیوم باید نوع دیگری از بمب طراحی شود. در این ارتباط، ایده استفاده از چاشنی‌های انفجاری برای کمپرس بسیار سریع کره پلوتونیوم مطرح گردیده است. با این روش، کره پلوتونیوم به چگالی مناسب بحرانی رسیده و انفجار هسته‌ای رخ می‌دهد. در این حالت، قبل از سوار کردن بمب، چند نوترون سرگردان رها می‌شوند تا زنجیره واکنش پیش‌رس را آغاز کنند. این زنجیره موجب کاهش عظیم انرژی منتشر شده می‌شود. بایستی توجه داشت، پلوتونیوم مزیت‌های متعددی نسبت به اورانیوم به عنوان جزیی از سلاح‌های اتمی دارد. تنها حدود ۴ کیلوگرم پلوتونیوم برای ساخت یک بمب با قدرت انفجار ۲۰ کیلوتن موردنیاز است. در عین حال، با تاسیسات بازفرآوری نسبتاً کوچکی می‌توان چیزی حدود ۱۲ کیلوگرم پلوتونیوم در سال تولید کرد. بنابراین برای کشور یا گروه تروریستی که بخواهد بمب اتمی

بسازد، تولید پلوتونیوم با کمک راکتورهای هسته‌ای غیرنظامی از تهیه اورانیوم غنی شده آسان‌تر خواهد بود.

۷-۲- بمب‌های همجوشی یا گداخت هسته‌ای

بمب‌های شکافت هسته‌ای، کارایی بالایی نداشته و چندان قوی نبودند. بنابراین دانشمندان به دنبال آن بودند که میزان انرژی آزاد شده ناشی از شکافت هسته‌ای را به کمک یک فناوری تقویتی افزایش دهند. در این راستا نتیجه تحقیقات نشان داد، عمده پرتو به دست آمده از یک واکنش شکافت هسته‌ای، اشعه X است که می‌تواند با ایجاد درجه حرارت بالا و فشار زیاد، مقدمات همجوشی را آماده کند. بنابراین با بکارگیری بمب شکافتی در بمب همجوشی، بمب هسته‌ای شکافتی به عنوان چاشنی شروع کننده واکنش عمل نموده و با ایجاد یک انفجار شکافت هسته‌ای در داخل، فشار و حرارتی معادل ده میلیون درجه کلوین در مرکز توده سوخت ایجاد می‌شود. این دمای بالا سبب تحریک اتم‌های سبک شده و آنها را باهم گداخت داده و بدین ترتیب، انفجار گداخت هسته‌ای شکل می‌گیرد. به عبارتی دیگر، اگر یک بمب اتمی (شکافتی) در وسط توده‌ای از هسته‌های سبک منفجر شود، حرارت فوق‌العاده‌ای که از انفجار بمب حاصل می‌شود، دمای هسته‌های سبک را به قدری بالا می‌برد که پیوند آنها را امکان‌پذیر ساخته و و آن‌گاه انفجار مهیب‌تری انجام می‌گیرد. بایستی توجه داشت، بعد از انفجار یک بمب اتمی معمولی، عمل سرد شدن به سرعت انجام می‌گیرد. بنابراین، باید فعل و انفعالاتی را در نظر گرفت که در آنها عمل پیوند به سرعت انجام گیرد. اگر یک بمب اتمی را در مخلوطی از دوتریوم و تریتیوم محصور کرده و مجموعه را در یک محفظه با مقاومت مکانیکی زیاد قرار دهیم، پس از انفجار بمب اتمی محیط مساعدی برای یک فعل و انفعال هسته‌ای گرمازا به وجود می‌آید و در اثر آن، عمل پیوند هسته‌ها انجام شده و هلیوم به وجود می‌آید.

در نتیجه این فعل و انفعال، حدود ۱۷ میلیون الکترون ولت انرژی آزاد می‌شود. این میزان انرژی، نسبت به واحد وزن ماده قابل انفجار، در حدود ۴ برابر انرژی است که از شکسته شدن اورانیوم حاصل می‌شود. از سوی دیگر، همجوشی هسته‌ای سبب تولید نوترون‌های بیشتر و تغذیه واکنش شکافت شده و انفجار بزرگ‌تری را ترتیب می‌دهد. این است که در موقع انفجار بمب هیدروژنی، دو قارچ مشاهده می‌شود. قارچ اول، مربوط به شکست اتم‌های اورانیوم یا پلوتونیوم و قارچ دوم مربوط به پدیده پیوست اتم‌های سبک با یکدیگر است که به مراتب از قارچ اول بزرگ‌تر و مخرب‌تر است. البته در بمب‌های همجوشی بایستی دوتریوم و تریتیوم را به حالت مایع به کار برد. اما چون این دو عنصر در حالت معمول به صورت گاز می‌باشد، امکان ذخیره‌سازی آنها مشکل خواهد بود. همچنین در حرارت فوق‌العاده زیاد نیز با کندی به هم پیوند می‌خورند. بنابراین این دو سوخت باید در دمای بالا، تحت فشار زیاد قرار گیرند تا عمل

همجوشی هسته‌ای در آنها صورت بگیرد و برای این امر بایستی آنها را در حرارتی معادل ۲۵۰ درجه سانتیگراد زیر صفر (به صورت مایع) نگهداری کرد. در این حالت، وزن سیستم و تجهیزات مربوطه فوق‌العاده سنگین شده و بمب با زحمت زیاد حمل گردیده و پرتاب آن به وسیله هواپیما نیز بسیار مشکل خواهد بود. از طرف دیگر، اگرچه تهیه دوتریوم راحت است، اما تریتیوم کمیاب بوده و نیمه عمر کوتاهی نیز دارد. بنابراین، تهیه آن فوق‌العاده مشکل و پرهیز بوده و برای تولید آن بایستی عنصر لیتیم را در کوره اتمی به وسیله نوترون بمباران کنند. در این حالت، از تجزیه متوالی آب به وسیله جریان الکتریکی، آب سنگین به دست می‌آید که دوتریوم یکی از عناصر مرکب آن می‌باشد و از تجزیه آب سنگین نیز دوتریوم تهیه می‌شود.

همجوشی هسته‌ای، بنیاد اصلی بمب هیدروژنی را تشکیل می‌دهد. هیدروژن موجود در تمام آب‌های اقیانوس‌ها یکی از مواد اولیه روش پیوند هسته‌ها را تشکیل می‌دهد. همجوشی را می‌توان در محیط پلاسمایی بوجود آورد و اخیراً با لیزر هم این کار را می‌کنند. در این همجوشی، قرص‌های کوچکی از ایزوتوپ‌های سنگین هیدروژن، یعنی دوتریم و تریتیوم را به وسیله فوج‌های لیزری پر قدرت گرم می‌کنند. اگر توان لیزرها کم باشد، فقط موجب ایجاد انفجارهای کوچک در این قرص‌ها خواهد شد؛ اما اگر قدرت لیزرها بالا بوده و در زمان کوتاه اثر کنند، فرایند همجوشی آغاز خواهد شد. بایستی توجه داشت که توان این نوع لیزرها بیش از توان نیروی برق کشورها بوده و بنابراین، تهیه آن بسیار سخت می‌باشد. در طراحی بمبی که در ایسلند بصورت آزمایشی در سال ۱۹۵۲ منفجر شد، از این شیوه استفاده شده بود. لازم به ذکر است، در ۳۱ ژانویه ۱۹۵۰، هانری ترومن ساخت بمب هیدروژنی را که قدرت تخریبی غیرقابل تصویری داشت، اعلام کرد و در ۱۲ آوریل ۱۹۵۱، نخستین بمب هیدروژنی آزمایش گردید. در اول نوامبر ۱۹۵۲ نیز، اولین بمب هیدروژنی آمریکا منفجر شد. در ۸ ژوئیه ۱۹۵۳، شوروی نیز ادعا کرد که بمب هیدروژنی در اختیار دارد. در نهایت بایستی متذکر شد، بمب‌های گداخت هسته‌ای، بمب‌های حرارتی (ترمونوکلئار) نیز نامیده شده و بازدهی و قدرت تخریب (کارایی) به مراتب بالاتری نسبت به بمب‌های شکافت هسته‌ای دارند.

۷-۳- بمب شکافت - گداخت هسته‌ای (نوترونی)

بمب نوترونی، یک نوع بمب شکافت گداختی است که در آن، واکنش هسته‌ای شکاف با استفاده از اورانیوم ۲۳۵ یا پلوتونیم ۲۳۹ به عنوان چاشنی آغاز می‌شود (یک انفجار شکافتی بسیار کوچکی در حد ۲۵۰-۴۰۰ تن). این واکنش شکافت به طور خود به خود، واکنش گداخت هسته‌ای را سبب شده و لذا نوترون‌های زیادی را با سرعت و انرژی خیلی زیاد تولید می‌کند. شار نوترون تولید شده شامل نوترون‌های بسیار نافذ با انرژی ۱۴/۷ مگاالکترون ولت می‌باشد. در این نوع خاص از سلاح گرما هسته‌ای کوچک،

انفجار نوترون‌های تولید شده توسط واکنش گداخت به طور عمدی به درون سلاح جذب نمی‌شود، بلکه اجازه فرار می‌یابد. این نوع بمب‌ها با نام «سلاح‌های تشعشع افزوده»^۱ (ER) نیز شناخته می‌شود. اصطلاح تابش افزایش یافته فقط به انفجار تابش یونیزه کننده که در لحظه انفجار آزاد می‌شود، اشاره دارد و به افزایش تابش باقیمانده در ریزش اتمی ربطی ندارد. تنها سوخت گداختی مورد استفاده در این نوع بمب‌ها، مخلوط گاز دتریم-تریتیم می‌باشد. در واکنش‌های گداختی با این نوع سوخت، ۸۰ درصد انرژی آزاد شده واکنش به صورت انرژی جنبشی نوترون بوده و تنها ۲۰ درصد انرژی گداختی برای تولید انفجار و تابش حرارتی بکار گرفته می‌شود. در این حالت، برای تولید بازدهی گداختی یک کیلو تنی به ۱۲/۵ گرم تریتیم و ۵ گرم دتریم نیاز است. البته اگر سوخت مورد استفاده در این نوع بمب به صورت دتریم-لیتیم باشد اولاً میزان بزرگتری انفجار شکافتی برای انفجار آن مورد نیاز خواهد بود. از طرفی میزان بزرگتری انفجار و تابش حرارتی برای هر میزان از شار نوترون تولید می‌کند. اشکال استفاده از سوخت دتریم-تریتیم این است که تریتیم بسیار گران بوده و آهنگ واپاشی آن نیز ۵/۵ درصد در سال است. انفجار شدید نوترون‌های پرانرژی اصولاً یک مکانیزم مخرب و ویرانگر است. این نوع بمب‌ها، حداقل انفجار و حرارت را تولید کرده، اما در مقابل مقدار زیادی تابش کشنده آزاد می‌کند. آثار حرارتی و انفجاری بمب نوترونی محدود به ناحیه‌ای حداکثر با شعاع چند صد یارد دارد، ولی در ناحیه‌ای نسبتاً بزرگتر، موج گسترده‌ای از نوترون و تابش گاما رها می‌شود که قادر است در زره یا چند فوت در خاک نفوذ کند. بایستی توجه داشت که نوترون‌ها نسبت به سایر تابش‌ها بیشتر نفوذ می‌کنند، بنابراین اکثر مواد محافظی که عملکرد خوبی در مقابل اشعه‌های گاما دارند، تقریباً کارکرد خوبی در برابر نوترون‌ها ندارند. به طور مثال، بمب‌های نوترونی تاکتیکی اساساً جهت کشتن سربازانی که توسط زره پوش محافظت می‌شوند در نظر گرفته شده‌اند. اما خودروهای زرهی در برابر انفجار و حرارت تولید شده سلاح‌های هسته‌ای بسیار مقاوم هستند، ولی در مقابل تابش نوترونی تقریباً بی‌دفاع بوده و تنها قادرند آثار آن را به میزان کمی کاهش دهند. بنابراین برد کشندگی نوترون‌ها در این حالت بسیار بیشتر از سایر آثار سلاح خواهد بود. بنابراین به دلیل برد کوتاه تخریب و فقدان اثر درازمدت، بمب نوترونی در مقابله با تانک و تشکیلات پیاده نظام در میدان نبرد بسیار مؤثر است، ولی شهرها یا مراکز جمعیتی که چند مایل دورتر هستند را به خطر نمی‌اندازد. لذا این بمب، "بمب کشنده تمیز" نیز نامیده می‌شود. این تابش برای بافت زنده بی‌نهایت مخرب است. تابش‌های نوترونی ظرف ۵ دقیقه انسان را فلج ساخته و طی ۲ تا ۳ روز نیز همه را از پای درمی‌آورند. در نهایت، به دلیل ترکیب بسیار پیچیده بمب‌های نوترونی (و نیز ترکیب سوخت دتریم-تریتیم)، هزینه ساخت و نگهداری این نوع بمب‌ها نسبت به دیگر سلاح‌های هسته‌ای تاکتیکی بسیار بالا می‌باشد.

1. enhanced- radiation weapon

۷-۴- کلاهک^۱ و توپ هسته‌ای^۲

به آن قسمت از موشک، راکت، اژدر، مرمی و یا هر سلاح دیگری که حاوی سیستم هسته‌ای و یا گرماهسته‌ای باشد، کلاهک هسته‌ای گویند. تکنولوژی کلاهک هسته‌ای به دنبال نگ جهانی دوم، همراه با انبوهی از سیستم‌های تسلیحاتی که هر لحظه پیچیده‌تر می‌شوند، با گام‌هایی شتابان به پیش رفته است. پیشرفت‌های عمده در طراحی کلاهک‌های هسته‌ای به کاربردهای کارآمدتر مواد قابل شکافت هسته‌ای و تهیه کلاهک‌های هسته‌ای کوچک انجامیده است. ساختن کلاهک‌های کوچک همراه با پیشرفت‌های مهمی که در عرصه سیستم‌های پرتاب کلاهک‌ها صورت گرفته، راه را برای پذیرش وسیع سلاح‌های هسته‌ای در نیروهای مسلح هموار کرده است. ویژگی‌های طرح‌های تازه کلاهک‌ها، کنترل، کارایی و ایمنی بیشتر و در نتیجه تحرک بهتر، دقت بیشتر، برد زیادتر و قدرت کشندگی افزون‌تر آنها می‌باشد. از ۵۰۰۰ کلاهک فعال در زرادخانه هسته‌ای آمریکا، ۱۵۰۰ کلاهک از نوع W-76 است. این نوع کلاهک در اوایل دهه ۱۹۷۰، برای تخریب اهداف بزرگ همچون پایگاه‌های نظامی تولید شد و اکنون می‌تواند به صورت مجموعه‌ای تا هشت کلاهک روی صدها موشک قرار گرفته و در زیردریایی‌ها حمل شود. هریک از این کلاهک‌ها، هفت برابر قویتر از بمب هسته‌ای است که هیروشیما را نابود کرد. این کلاهک‌ها که زاییده دوران جنگ سرد هستند، هیدروژنی و موسوم به سلاح‌های گرماهسته‌ای بودند. بمب اتم منفجر شده در این سلاح، گرمایی با حرارت داغتر از سطح خورشید تولید می‌کند. این کلاهک‌ها که ارتفاعی کوتاه‌تر از قد انسان داشتند، طی سال‌های بعد کوچکتر هم شدند. با افزایش وابستگی روزافزون قوای هسته‌ای آمریکا به زیردریایی‌ها و عدم وابستگی به بمب افکن‌ها و موشک‌های زمین به هوا، این کلاهک‌ها اهمیت بیشتری یافته‌اند؛ به طوری که این کلاهک فشرده و قدرتمند، در دو دهه گذشته کانون و نقطه اتکای زرادخانه هسته‌ای آمریکا بود.

توپ هسته‌ای نیز توپی است بسیار نیرومند و مجهز به گلوله با کلاهک هسته‌ای که قادر است در بردهای کوتاه، متوسط و بلند، ضایعاتی بس عظیم وارد کند. البته توپ‌های هسته‌ای بازده انفجاری پایینی داشته و قابلیت انفجار آنها از حدود ۰/۰۱ کیلوتن تا حدود ۱۲ کیلوتن است. توپ هسته‌ای برحسب دقت عمل، اتکاپذیری، هدف‌یابی و صدا، به سرعت به حداکثر امکانات خود نزدیک می‌شود. مرمی‌های توپ هسته‌ای هم‌اکنون از ویژگی‌هایی همچون قطعات حافظه‌ای و زمانی، ترکیبات فرعی ماسوره، برنامه‌ریزی‌های الکترونیکی و ... برخوردارند. پیش‌بینی می‌شود، توپ‌های هسته‌ای آینده، از قابلیت‌های مهمی برای واکنش سریع و دقیق در برابر مأموریت‌های آتش و زمان راه‌اندازی کوتاه‌تری برخوردار باشند. برخلاف ابزارهای انفجاری که محتوای مواد هسته‌ای آن پلوتونیوم یا اورانیوم است، یک توپ

1. Nuclear War Head
2. Nuclear Artillery

می‌تواند تنها با اورانیوم غنی‌شده سطح بالا ساخته شود، زیرا انتشار همزمان نوترون‌ها توسط پلوتونیوم، احتمالاً پیش از این که محتوای هسته‌ای کاملاً جاسازی، جایگیر و نصب شود، موجب حساسیت زودرس شده و به این ترتیب تا حد قابل توجهی از بار و فشار نهایی مورد نظر می‌کاهد. به طور کل، طراحی و ساخت توپ‌ها، به دلیل آن که سیستم انفجاری سطح بالای به کار گرفته شده برای جاسازی و نصب توده مواد حساس پیچیدگی کمتری دارد، آسان‌تر از سایر ابزارهای انفجاری است، با این حال، برای همان مقدار بار و فشار که از یک طرح انفجاری حاصل می‌شود، بایستی اورانیوم غنی شده سطح بالای بیشتری (تا حد سه برابر) بکار گرفت. امروزه حدود ۵۰۰۰ گلوله توپ در زرادخانه تسلیحاتی ایالات متحده وجود دارد. این کشور سه نوع کلاهک ۸ اینچی W33 با قدرت انفجاری ۱۲-۱ کیلوتن، ۱۵۵ میلیمتری W48 با قدرت ۰/۰۱ کیلوتن و کلاهک نوترونی ۸ اینچی W79 با قدرت ۲-۱ کیلوتن را در توپ‌های هسته‌ایش به کار گرفته است.

۷-۵- جنگ رادیولوژی (اشعه‌ای)

جنگ رادیولوژی، آلوده کردن بناها، زمین‌ها، افراد، مراکز صنعتی یا بندری، مواد غذایی و مخصوصاً آب و کلیه مایحتاج زندگی دیگر به وسیله مواد رادیواکتیو با هدف ایجاد ضایعه و یا مجبور ساختن دشمن به ترک یک منطقه مهم مثل شهر، کارخانه، تأسیسات یا مناطق نظامی می‌باشد. در این وضعیت، اکتیویته مواد آلوده به مرور زوال پیدا کرده (زوال رادیواکتیو) و منطقه مورد حمله پس از مدتی می‌تواند مجدداً قابل سکونت گردد. موادی که برای آلوده کردن بکار می‌روند، به نام عامل جنگ اشعه نامیده می‌شود.^۱ چهار نوع تشعشع هسته‌ای مهم گاما، نوترون، آلفا و بتا برای بدن انسان زیان‌آور هستند. اما تهیه و انتشار نوترون‌ها تنها از طریق بمب‌های اتمی میسر است، لذا آنها را نمی‌توان در رده جنگ‌های رادیولوژی به حساب آورد. ارزش ذرات آلفا از جنبه عوامل جنگ‌های رادیولوژی نیز ناچیز است، چون از خارج بدن آسیب‌چندانی نمی‌رساند، مگر اینکه از طریق دستگاه تنفس یا گوارش وارد بدن گردند. بنابراین عوامل مهم جنگ اشعه عواملی هستند که بتوانند از خود ذرات بتا و اشعه گاما صادر کنند. در این حالت، انرژی تشعشع باید به اندازه کافی باشد تا قدرت نفوذ قابل ملاحظه داشته باشد، ضمن اینکه نیم عمر آنها نیز نباید خیلی کوتاه باشد، زیرا اگر نیم‌عمر مواد رادیواکتیو خیلی کوتاه باشد، زوال رادیواکتیو به‌دردی سریع صورت می‌گیرد که عوامل مزبور قبل از استعمال، خاصیت خود را از دست می‌دهند. اما چنانچه نیم عمر آنها خیلی طولانی باشد، چون خاصیت رادیواکتیو به همان نسبت ضعیف است، باید مقدار زیادی بکار برد تا موثر باشد (نیم عمر مناسب بین ۱۴ روز تا ۶ ماه است). غیر از سلاح هسته‌ای که می‌تواند جنگ رادیولوژی غیرمستقیم باشد، عوامل جنگ رادیولوژی به دو

طریق شکافت هسته‌ای اتم‌های سنگین و تابش نوترون در کوره اتمی تهیه می‌شوند، البته در هر دو طریق، باید از کوره اتمی یا پیل اتمی استفاده گردد. اولین روش، بکار بردن محصولات حاصل از شکافت هسته‌ای اتم‌های سنگین است که به طور مستقیم از کوره اتمی بدست می‌آیند. این محصولات مخلوط پیچیده‌ای از چندین عنصر است که نیم عمر هریک از آنها متفاوت بوده و می‌توان آنها را مستقیماً برای منظوره‌ای نظامی استعمال کرد. عیب این روش آن است که چون از مخلوطی از عناصری درست شده که نیم عمرهای مختلف دارند، بعضی از آنها به سرعت خاصیت رادیواکتیویته خود را از دست می‌دهند و بعضی دیگر سالها این خاصیت را دارا هستند. البته این عیب را به روش مخصوصی می‌توان برطرف کرد، به طوری که از بین عناصر مخلوط باید ایزوتوپ‌هایی را جدا کرد که دارای خواص مورد دلخواه باشد. لیکن عمل جدا کردن بسیار مشکل و مستلزم صرف هزینه زیادی است. از طرفی، تعداد عناصر مخلوط آنقدر زیاد است که مقدار هیچ یک از سه درصد تجاوز نمی‌کند. روش دوم، رادیواکتیو کردن یک عنصر معین بوسیله تابش نوترون در کوره اتمی است. در این روش، با انتخاب صحیح عنصر معینی می‌توان عامل جنگ اشعه مورد نظر را تهیه کرد. باید توجه داشت که هزینه راکتوری که منحصر به این منظور ساخته می‌شود، خیلی گران بوده و از جنبه اقتصادی زیاد مقرون به صرفه نیست.

عوامل جنگ اشعه با سلاح‌های هسته‌ای دو اختلاف اساسی دارند. کلیه سلاح‌های هسته‌ای از قبل تهیه شده‌اند و ممکن است بدون اینکه فاسد شوند، مدت‌های طولانی در انبار بمانند تا اینکه روزی مورد استفاده قرار گیرند، در حالی که در مورد تهیه عوامل جنگ رادیولوژی، به سبب زوال خود به خودی و کاهش رادیواکتیویته، انبار کردن آنها غیرمقدور است. همچنین تهیه عوامل مزبور در کوره اتمی به کندی صورت گرفته و کم شدن مداوم و غیرقابل اجتناب رادیواکتیویته آنها یک زیان جبران‌ناپذیری را فراهم می‌کند. علاوه بر اینها، سلاح‌های دیگر را می‌توان با اطمینان و بدون اینکه خطری را ایجاد کنند، جابه‌جا و دستکاری کرد، لیکن در مورد عوامل جنگ‌های رادیولوژی، به سبب نشر اشعه گاما که قدرت نفوذ زیادی دارند، این کار به سختی انجام گرفته و مراحل مشکلی دارد و افرادی که با آنها سروکار دارند، باید از حفاظ‌های سنگین و قوی استفاده کنند. حسن بزرگی که عوامل رادیولوژی دارند، این است که مقدار کمی از آنها می‌تواند منطقه وسیعی را آلوده سازد، اما احتیاج به حفاظ سنگین و قوی دارند، بخصوص هنگامی که عوامل با هواپیما حمل و نقل می‌گردند. این مشکل امتیاز مزبور را خنثی می‌کند. مشکل بزرگ دیگری که عوامل جنگ اشعه بوجود می‌آورند، این است که مقدار زیادی از انرژی آنها به صورت حرارت آزاد شده و ظرف محتوی را به شدت گرم می‌کنند و باید به روشی حرارت را از ظرف خارج ساخت (دستگاه‌های سرمایش قوی لازم است). گرچه با تمام اشکالات فوق، بکار بردن عوامل رادیولوژی امکان‌پذیر و عملی است، لذا بعید به نظر می‌رسد که کشوری در حین جنگ یا صلح از آنها استفاده نماید.

۷-۵-۱- بمب کثیف

بمب کثیف نوعی ماده منفجره است که به منظور پراکنده کردن مواد خطرناک رادیواکتیو در سطحی وسیع طراحی شده است. بمب کثیف بیشتر از آن که شبیه به یک بمب هسته‌ای با قدرت تخریب بالا باشد، به یک بمب با مواد منفجره معمولی شبیه است، ولی ترس از ترکیبات آن می‌تواند مردم را به سرحد مرگ بکشاند. از نظر تئوری این بمب از یک ماده منفجره معمولی مانند TNT و مواد رادیواکتیو که در یک محفظه قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. طرح‌های مختلفی برای ساختن یک بمب کثیف وجود دارد. انواع مختلف مواد انفجاری در مقادیر متنوع، بمب‌هایی در ابعاد مختلف و با قابلیت‌های انفجاری متنوع پدید می‌آورند و انواع و مقادیر مختلف مواد رادیواکتیو می‌تواند موجب آلودگی مناطق مختلف تا اندازه‌های مختلف شود. برخی از این طرح‌ها به صورت؛ یک بمب کوچک شامل یک تکه دینامیت و مقدار بسیار کمی ماده رادیواکتیو، یک بمب متوسط همانند یک خودروی کوچک پر از مواد منفجره و مقدار بیشتری ماده رادیواکتیو و یک بمب بزرگ همانند یک کامیون پر از مواد منفجره و مقادیر زیاد مواد رادیواکتیو می‌باشند. به دست آوردن مواد منفجره معمولاً کار سختی نیست، ولی دستیابی به مواد رادیواکتیو کار بسیار سختی است، زیرا فقط در مرکزهای حفاظت شده و اماکن تحقیقاتی وجود دارند. با این حال برخی منابع در سراسر جهان، همچون رادیوایزوتوپ‌های پزشکی هسته‌ای (همچون سزیم ۱۳۷) در بیمارستان‌ها، رادیوایزوتوپ‌های تحقیقاتی در دانشگاه‌ها، رادیوایزوتوپ‌های سترون‌سازی (همچون کبالت ۶۰) در مراکز پرتوتابی غذایی، رادیوایزوتوپ‌های باتری‌های هسته‌ای مصرف شده (همچون استرونیوم ۹۰) و سوخت‌های هسته‌ای مصرف شده راکتورهای روسی قدیمی در زبردیایی‌های قدیمی از کارافتاده هسته‌ای یافت وجود دارند که از حفاظت خوبی بهره مند نبوده و ممکن است در آینده خطر ساز شوند.

مواد منفجره از طریق گاز بسیار داغی که به سرعت منبسط شده و موجب آسیب‌های تخریبی فراوانی می‌شوند. ایده اصلی بمب کثیف هم این است که بجای آنکه از این قدرت انبساطی گاز در جهت تخریب استفاده شود، به عنوان پخش کننده مواد خطرناک رادیواکتیو در سطحی وسیع استفاده شود. هنگامی که انفجار پایان یافت، مواد رادیواکتیو به صورت ابری از غبار در فضا پخش می‌شود که همراه با وزش باد، در سطحی وسیع‌تر از محل انفجار پراکنده می‌شود. اثر تخریبی طولانی مدت بمب، تشعشع یونیزه کننده مواد رادیواکتیو است. این پدیده در بدن انسان بسیار خطرناک است، زیرا جریان الکتریکی ناشی از حرکت یون‌ها می‌تواند واکنش شیمیایی غیرطبیعی را در سلول‌ها آغاز کند، ضمن اینکه این یون‌ها ممکن است مولکول‌های DNA را که حاوی کدهای ژنتیکی انسان هستند، مورد حمله قرار داده و آن را بشکنند. سلول با رشته DNA شکسته، یا می‌میرد و یا مولکول DNA خودش را به شکل دیگری ترمیم می‌کند که با شکل پیشین خود متفاوت بوده و به آن جهش ژنتیکی می‌گویند. اگر بسیاری از سلول‌ها بمیرند،

بدن دچار بیماری‌های مختلف می‌شود، ولی اگر DNA جهش کند، سلول ممکن است سرطانی شده و سرطان در بدن پخش شود. تابش رادیواکتیو همچنین می‌تواند در کارکرد سلول اختلال ایجاد کند که منجر به بروز علائمی می‌شود که از آن به بیماری تشعشع یاد می‌شود. بیماری تشعشع می‌تواند مرگ آور باشد، ولی مبتلایان به آن می‌توانند با درمان‌های پیشرفته از آن نجات پیدا کنند، بخصوص اگر پیوند مغز استخوان روی آنها صورت پذیرد. در مجموع، یک بمب کثیف بلافاصله تعداد زیادی از انسان‌ها را نمی‌کشد، بلکه موجب می‌شود تعداد زیادی از انسان‌ها در چند نسل به دلیل ابتلاء به بیماری‌های لاعلاج جان بدهند.

۶-۷- انفجارهای هسته‌ای و آثار زیانبار آن

انفجار، اعم از عادی یا هسته‌ای عبارتست از رهایی مقداری انرژی در مدت زمان بسیار کوتاه و در فضای محدود. در انفجار هسته‌ای، حرارت و فشار حاصل از آن به اندازه‌ای است که جرم بمب و همه مواد موجود در اطراف آن را فقط در یک لحظه، به صورت توده‌ای از گاز داغ، ملتهب و فشرده درآورده و تشکیل گوی آتشی می‌دهد که دارای چند میلیون درجه حرارت است. این گوی از فاصله یک صد کیلومتری نیز از نور خورشید در وسط روز درخشنده‌تر است. حتی در پاره‌ای از آزمایش‌ها که در طبقات بالای جو انجام گرفته، نور حاصله از فاصله ۱۰۰۰ کیلومتری محسوس بوده است که تحت بعضی شرایط این نور می‌تواند موجب کوری موقتی یا سوختگی دائمی شبکه چشم شود. گوی آتشین، همان‌طور که به سرعت بزرگ شده و صعود می‌کند، تغییر شکل داده و پهن‌تر می‌شود. در این راستا، قطر کره آتشین از بمب هسته‌ای یک مگاتنی در یک هزارم ثانیه به حدود ۱۵۰ متر رسیده و در هر ثانیه به حداکثر اندازه خود که حدود ۲۰۰۰ متر است می‌رسد. در حین انبساط، هوا، خاک و عناصر دیگر را از پایین به داخل خود مکیده و دنباله‌ای از غبار تشکیل می‌دهد که گوی آتشین را به زمین وصل می‌کند. انبساط سریع گوی آتشین، فشار اطراف خود را بالا برده و موج انفجاری یا ضربه‌ای بسیار شدیدی را در زمین، آب و یا زیر زمین ایجاد می‌کند که آثار تخریبی بالایی را به همراه دارد. در نزدیکی انفجار، سرعت موج از یک کیلومتر در ثانیه بیشتر است. پس از یک دقیقه کره آتشین به تدریج سرد شده و بصورت ابری متلاطم درمی‌آید که ابتدا سرخ رنگ بوده و سپس سفید می‌شود. این زمانی است که انفجار ۷ کیلومتر صعود کرده باشد. در این حال، با دنباله خود شکل قارچی به خود می‌گیرد.

در مجموع، یک انفجار هسته‌ای چهار اثر مرگ‌آفرین بر جای می‌نهد. نخست، حرارت و نور بسیار شدید که از آزاد شدن انرژی اتم‌های تجزیه شده به دست می‌آید. حدود ۳۵ درصد انرژی حاصل از یک انفجار هسته‌ای به صورت تشعشع حرارتی ظاهر می‌شود که معمولاً به چندین هزار میلیارد کالری حرارت در چند میلیونوم ثانیه می‌رسد. در انفجارهای معمولی، درجه حرارت در مرکز انفجار به حدود ۵۰۰۰ درجه

سانتیگراد و در انفجارهای هسته‌ای به ده‌ها میلیون درجه می‌رسد. در کانون زلزله انفجار اتمی و در فاصله ۱۲۰۰ متری از مرکز انفجار، همه چیز تحت دمای ۳۰۰ میلیون درجه سانتی‌گراد تبخیر و ذوب می‌شود. در خارج از کانون زلزله، اغلب تلفات به خاطر سوزش ایجاد شده توسط گرما می‌باشد. مثلاً کسانی که در فاصله ۱۱ کیلومتری یک انفجار یک مگاتنی واقع شده باشند، دچار سوختگی درجه یک می‌شوند که شبیه آفتاب سوختگی پوست است. در فاصله ۹ کیلومتری، پوست تابش دیده تاول می‌زند. در شعاع ۷ کیلومتری نیز، پوستی که در معرض تابش‌های انفجار هسته‌ای واقع شده باشد، دچار سوختگی می‌شود. دوم، فشار بیش از اندازه ناشی از انفجار که تغییراتی شگرف در فشار اتمسفر به وجود می‌آورد و این پدیده، بادهای سهمگینی که از منطقه انفجار سرچشمه می‌گیرند، تولید می‌کند که ضایعات مادی عظیمی در پی دارند. حدوداً ۵۰ درصد انرژی حاصل از یک انفجار هسته‌ای به صورت موج انفجاری یا موج مکانیکی، آثار مخربی را روی ساختمان‌ها، بناها و تأسیسات می‌گذارد. در نزدیکی انفجار هسته‌ای، سرعت موج از یک کیلومتر در ثانیه بیشتر است. بایستی توجه داشت، قدرت انفجارهای هسته‌ای برحسب TNT (تری نیتروتولون) بیان می‌شود. به طور مثال، انرژی حاصل از انفجار یک بمب هسته‌ای ۲۰ مگاتنی، برابر انرژی حاصل از ۲۰ مگاتن TNT است (یک کیلوتن برابر است با انرژی اتمی آزاد شده ۱۹۰ تن ماده منفجره TNT).

سوم، تشعشعات هسته‌ای که ۱۵ درصد بقیه انرژی انفجار را به خود اختصاص داده، موج بسیار نیرومند پرتوهای شدید به صورت «ذره آلفا، ذره بتا، اشعه گاما و نوترون» در محیط پخش می‌کند که به علت بالا بودن نیم عمر آنها، مدت‌های طولانی در محیط اکوسیستم باقی می‌ماند. بایستی توجه داشت که برحسب شدت تشعشع ایجاد شده، آثار بیولوژیکی تشعشعات هسته‌ای وخیم یا کشنده در موجودات زنده بوجود می‌آورند. دانشمندان با بررسی آثار مواد رادیواکتیو روی بازماندگان بمباران ناکازاکی و هیروشیما دریافتند که این مواد باعث ایجاد تهوع، آب مروارید چشم، ریزش مو و کم شدن تولید خون در بدن می‌شود. در موارد حادتر، مواد رادیواکتیو باعث ایجاد سرطان و نازایی هم می‌شوند. همچنین، مواد حاصل از انفجارهای هسته‌ای به شدت رادیواکتیو بوده و منطقه وسیعی را بطوری آلوده می‌سازد که برحسب نزدیکی یا دوری از مرکز انفجار، تا مدتی غیرقابل سکونت خواهند بود. همچنین انفجارهای هسته‌ای یک تک پالس لحظه‌ای تابش الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند که در تمام جهات منتشر می‌شود. این انرژی شبیه به سیگنال الکتریکی ناشی از آذرخش، اما بسیار قدرتمندتر از آن بوده و گیرنده‌هایی رادیویی، کامپیوتری و سایر تجهیزات الکتریکی، از جمله سیستم‌های تلفن را برای عملیات امدادی ضروری هستند از کار می‌اندازد. چهارم، ریزش گرد و غبار هسته‌ای حاوی ایزوتوپ‌هایی همچون استرونیوم ۹۰ است که دارای رادیواکتیویته بالایی می‌باشد. در بلندمدت، ابرهای رادیواکتیو توسط باد در مناطق دور ریزش کرده و باعث آلوده شدن موجودات، آب و محیط زندگی می‌شود. به دلیل تولید گرد و غبار هسته‌ای، این نوع

انفجار با معیارهای امروزی «کثیف‌ترین» نوع انفجار محسوب می‌گردد. در خلال یک انفجار هسته‌ای، احتمالاً صد میلیون تن غبار در هوا پراکنده خواهد شد. در این فرایند، قسمت اعظم این خاک و غبار رادیواکتیو و پرتوزا می‌شوند. قسمتی از ذرات غبار پرتوزا ممکن است فوراً فرو ریخته و در خود محل انفجار به زمین نشسته و آن ناحیه را به شدت رادیواکتیو کنند. قسمتی از فروریزه رادیواکتیو هم به طبقات بالاتر جو منتقل شده و چندین روز بعد به زمین فرو می‌ریزد. در نهایت، قسمتی از این فروریز نیز ممکن است به ارتفاع بالاتری انتقال یافته و ده‌ها سال در لایه‌های فوقانی جو مستقر شود. همچنین، میزان ۳۰۰ میلیون تن دوده حاصل از آتش‌سوزی جنگل‌ها، مراتع و شهرها، با غبار معلق در هوا ترکیب خواهد شد. دوده در جلوگیری از رسیدن نور به زمین، ۱۰۰ برابر مؤثرتر از غبار عمل می‌کند. نتیجه عبارت است از تاریکی مطلق و فراگیر برای روزها یا هفته‌ها و پس از آن نیز طلوع یک نور خفیف برای ماه‌ها یا حتی بیش از یک سال. در این حال، دمای زمین ۱۵ درجه سانتیگراد یا بیشتر کاهش یافته و نهایتاً منجر به زمستان هسته‌ای در کره زمین خواهد شد. همچنین از دیگر آثار تخریبی بمبهای هسته‌ای، ایجاد اکسید نیتروژن است. طوفان ناشی از انفجارات هسته‌ای، نیتروژن موجود در اتمسفر را خواهد سوزاند. بی‌شک، این مسئله بخش عمده‌ای از لایه اوزون را نابود خواهد کرد. بنابراین، پایان تاریکی مطلق هم‌زمان خواهد بود با شروع داغ شدن زمین به وسیله اشعه‌های فرابنفشی ناشی از ورود اشعه‌های خورشید به زمین. در نهایت بایستی توجه داشت، در انفجارهای زیرآبی، مقدار زیادی آب بخار خواهد شد، به طوری که یک صدم انرژی انفجاری سلاح یک مگاتنی کافی است که ۲۰ هزار تن آب را بخار کند. انفجار زیرزمینی اتمی نیز ایجاد تکان‌هایی مانند زمین‌لرزه می‌نماید. در اثر این لرزش و جابه‌جا شدن قسمتی از سطح زمین، خرابی‌های گسترده‌ای بوجود می‌آید.

۷-۷- سیمای تسلیحات هسته‌ای در کشورهای جهان

استفاده از اولین بمب اتمی جهان در هیروشیما و ناکازاکی توسط آمریکا در اثنای جنگ دوم جهانی، آغازگر عصری نو در بکارگیری و دستیابی کشورهای مختلف جهان به انرژی هسته‌ای بود، به طوری که چهار سال بعد از بمباران اتمی هیروشیما و ناکازاکی، شوروی نیز در سال ۱۹۴۹ و به دنبال آن، انگلستان در ۱۹۵۲، فرانسه در ۱۹۶۰ و ... اولین بمب اتمی خود را آزمودند. طی جنگ سرد، آمریکا و شوروی هریک دهها هزار بمب را انبار نمودند. زرادخانه‌های آنها یک میلیون بمب را نظیر آنچه در هیروشیما فرو افتاد، ساخته‌اند. گرچه به علت فروپاشی اتحاد جماهیر شوروی، تعداد زرادخانه‌ها مقداری کاهش یافت، اما همچنان عرضه ترکیبات اساسی بمب‌های هسته‌ای و نیز عرضه پلوتونیم، به طور پیوسته رو به افزایش است، به گونه‌ای که میزان عرضه این ترکیبات اکنون به بیش از دو هزار تن رسیده است. امروزه در هر پایگاه هسته‌ای، ۲۰۰ تا ۳۰۰ تن از بهترین نوع پلوتونیم وجود دارد. طبق برآوردها در مجموع

۲۷۶۰۰ سلاح هسته‌ای در سراسر جهان وجود دارد. اغلب سلاح‌های هسته‌ای پیشرفته امروزی قدرت تخریبی بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ هزار تن دارند. از طرف دیگر، تولید انواع مختلف سلاح‌های هسته‌ای، تاکنون با پیشرفت شگرفی همراه بوده است. این پیشرفت‌ها در مواردی نظیر کاهش مقدار اورانیوم و پلوتونیوم بکار رفته در سلاح هسته‌ای، استفاده از فناوری‌های مدرن‌تر در ساخت سلاح هسته‌ای ترکیبی و نسل جدید از نوع شکافت و همجوشی دیده می‌شود. طراحی و ساخت سلاح‌های هسته‌ای با وزن بسیار کم، ساخت سلاح‌های هسته‌ای نوترونیک که در آن نیازی به اورانیوم غنی شده نیست و تولید سلاح‌های هسته‌ای با قدرت نسبتاً کم، به عنوان سلاح‌های تاکتیکی در انهدام صنایع و کارخانه‌ها نیز از دیگر موارد هستند.

در هرحال، با بررسی توانمندی کشورهای مختلف جهان برای ساخت سلاح‌های هسته‌ای و رویکرد آنان به پیمان‌های بین‌المللی برای منع آزمایش تسلیحات هسته‌ای، می‌توان آنها را به پنج گروه تقسیم کرد: کشورهای دارنده فناوری هسته‌ای، شامل آمریکا، روسیه (شوروی سابق)، فرانسه، انگلستان و چین که قرارداد منع آزمایش‌های هسته‌ای را امضا کرده‌اند؛ کشورهای دارنده فناوری هسته‌ای مانند هند، پاکستان و اسرائیل که این قرارداد را امضا نکرده‌اند؛ کشورهایی همچون لیبی، عراق و کره شمالی که مظنون به دستیابی به فناوری سلاح‌های اتمی بوده‌اند؛ کشورهایی همچون آفریقای جنوبی، آرژانتین، برزیل و الجزایر که قصد داشتن سلاح اتمی را داشته‌اند، اما آن را نیمه‌کاره رها کرده‌اند. در نهایت، کشورهایی که توانایی لازم را برای ساختن بمب اتمی دارند؛ اما تمایلی به این کار نشان نمی‌دهند. در این راستا، ۱۸ کشور صنعتی و توسعه یافته شامل: کانادا، ژاپن، استرالیا، کره جنوبی، اتریش، بلژیک، جمهوری چک، دانمارک، فنلاند، آلمان، مجارستان، ایتالیا، هلند، نروژ، جمهوری اسلواکی، اسپانیا، سوئد و سوئیس با وجود اینکه دانش و فناوری پایه لازم را دارا می‌باشند، اما تمایل به تولید سلاح‌های هسته‌ای نداشته‌اند. بدیهی است که این دسته از کشورها نسبت به کشورهای انصراف داده، از توانایی و آمادگی بیشتری برای تولید سلاح هسته‌ای را برخوردار می‌باشند. این دسته از کشورها که عمدتاً با کمک قدرت‌های هسته‌ای به این سطح از دانش و فناوری رسیده‌اند، در وضعیتی قرار گرفته‌اند که علیرغم نداشتن سلاح هسته‌ای، اما امکانات و توانایی کافی را برای ساخت سلاح هسته‌ای در حداقل زمان ممکن دارند. تعدادی از این کشورها پایگاه‌هایی دارند که زیرنظر و در کنترل سازمان انرژی اتمی جهان فعالیت می‌کنند.

در نهایت، طبق آمارهای بولتن دانشمندان اتمی جهان، تخمین زده می‌شود ۹ کشور دارنده تسلیحات هسته‌ای حدود ۲۷ هزار کلاهک در اختیار داشته باشند که حدود ۹۷ درصد آن در آمریکا و روسیه است. حدود ۱۲ هزار و ۵۰۰ عدد از این کلاهک‌ها عملیاتی محسوب می‌شود. بیش از ۱۲ هزار و ۸۰۰ کلاهک هسته‌ای از سال ۱۹۴۵ تاکنون ساخته شده و همه این ۹۷ درصد توسط آمریکا (حدود ۵۵ درصد) و روسیه (حدود ۴۳ درصد) تولید شده است. آمریکا حدود ۱۰ هزار کلاهک هسته‌ای در اختیار دارد که از

فصل هفتم: کاربردهای غیر صلح آمیز و نظامی تکنولوژی هسته‌ای / ۲۲۹

این تعداد ۵۷۳۵ عدد عملیاتی بوده و بقیه به عنوان غیرفعال یا ذخیره طبقه‌بندی شده‌اند. از ۷۰ هزار کلاهک هسته‌ای که آمریکا از سال ۱۹۴۵ تولید کرد، بیش از ۶۰ هزار کلاهک تا اواسط ۲۰۰۶ منهدم شد. تخمین زده می‌شود روسیه نیز از سال ۱۹۴۹ تاکنون حدود ۵۵ هزار کلاهک اتمی تولید کرده است. روسیه بیش از هزار کلاهک را در جریان دهه ۱۹۹۰ منهدم کرده و از حدود ۱۶ هزار کلاهک هسته‌ای که تخمین زده می‌شود در روسیه باقی مانده باشد، ۵ هزار و ۸۳۰ کلاهک عملیاتی هستند. انگلیس نیز از سال ۱۹۵۳ تاکنون حدود ۱۲۰۰ کلاهک تولید کرده است. همچنین ذخایر کلاهک‌های اتمی فرانسه در حال حاضر به ۳۵۰ کلاهک می‌رسد. تخمین زده می‌شود این کشور تا سال ۱۹۶۴ بیش از ۱۲۶۰ کلاهک تولید کرده باشد. چین نیز احتمالاً دارای حدود ۲۰۰ کلاهک هسته‌ای است. گفته می‌شود چین حدود ۶۰۰ کلاهک هسته‌ای از سال ۱۹۶۴ تولید کرده باشد. همچنین هند و پاکستان نیز حدود ۱۱۰ کلاهک در اختیار دارند که ممکن است برخی از آنها عملیاتی نباشند. اسرائیل تاکنون در اختیار داشتن یا نداشتن کلاهک‌های اتمی را تایید نکرده اما تخمین زده می‌شود این رژیم مواد شکافت‌پذیر کافی برای تولید بین ۱۱۵ تا ۱۹۰ کلاهک هسته‌ای داشته باشد. در نهایت، ارزیابی شده که شمالی حدود ۴۳ کیلوگرم پلوتونیم جدا شده در اختیار داشته باشد.

۷-۱-۷-ایالات متحده آمریکا

آمریکا نخستین بار در جولای ۱۹۴۵ و آخرین بار در سال ۱۹۹۲ و در مجموع ۱۰۳۰ آزمایش اتمی انجام داده است. این کشور آخرین سلاح هسته‌ای خود را در سال ۱۹۸۹ ساخت. همچنین آمریکا در نوامبر سال ۱۹۵۲ اولین انفجار هیدروژنی مایع و سپس در بهار سال ۱۹۵۴ انفجار هیدروژنی لیتیم دو تراید خود را آزمایش کرد. این کشور در حال حاضر، حداقل ده هزار سلاح هسته‌ای دارد. عمده سلاح‌های هسته‌ای این کشور در زیردریایی‌های Trident نصب شده است. باقی سلاح‌ها نیز روی موشک‌های بالستیک قاره‌پیما یا بمب‌افکن‌های B-52 و B-2 نصب شده است. در این راستا، ۱۰۰۰ موشک و هواپیمای آمریکا به ۶۵۰۰ سلاح اتمی استراتژیک مجهز هستند. مطابق ارزیابی‌ها، ایالات متحده آمریکا از سال ۱۹۴۵ تا ۱۹۹۰، در سایت‌های مختلف خود حدود ۷۰ هزار سلاح اتمی از ۷۰ نوع مختلف برای بیش از ۱۲۰ سیستم تسلیحاتی تولید کرده است. در حال حاضر، آمریکا حدود ۷۸۰ سلاح هسته‌ای غیراستراتژیک و آماده عملیات شامل ۵۸۰ بمب B61 و ۲۰۰ موشک کروز زمین پرتاب با کلاهک توماهاوک دارد. ۱۰۰ کلاهک توماهاوک دیگر نیز به صورت رزرو یا غیرفعال نگهداری می‌شوند. از تعداد ۵۸۰ بمب عملیاتی B61، ۴۸۰ عدد در هشت پایگاه واقع در شش کشور اروپایی برای استفاده آمریکا و ناتو استقرار یافته است. ۱۰۰ بمب دیگر نیز برای استقرار سریع در هر نقطه از جهان، توسط اسکادران‌های ویژه نیروی هوایی آمریکا در نظر گرفته شده است. آمریکا تنها کشوری است که تسلیحات

هسته‌ایش را در خارج از این کشور مستقر کرده است. آمریکا از دوران جنگ سرد به ذخایر عظیم سلاح هسته‌ای برای مقابله با حملات تکیه کرده و این در حالی است که اکنون درصدد ارتقا و ساخت بمب‌های جدید به مقابله برمی‌خیزد. آمریکا ادعا می‌کند نگهداری بمب‌های قدیمی از لحاظ فنی و مالی به صرفه نیست.

همچنین ایالات متحده سه کلاهک نوترونی را توسعه داده و تولید کرده است، چهارمی نیز قبل از تولید منسوخ شده است. همگی این کلاهک‌ها کنار گذاشته شده و غیرمسلح می‌باشند. کلاهک اولی (مدل W-66) برای موشک Sprint طراحی شده بود که اولین کلاهک ER می‌باشد. کلاهک مذکور طی سال‌های ۱۹۷۴-۱۹۷۵ تولید شد و در آگوست ۱۹۷۵ بعد از اینکه تنها چند ماه در خدمت ارتش بود و هنگامی که سیستم موشک Sprint غیرفعال شد، کنار گذاشته شد (۷۰ کلاهک از این نوع ساخته شد). بازدهی آن ۲۰ کیلوتن گزارش شده و احتمالا در آن سوخت D-T استفاده شده بود. دومین کلاهک (مدل W-70 مد 3) برای موشک Lance طراحی شده و بازدهی کل آن در حدود یک کیلوتن با ۶۰٪ گداخت و ۴۰٪ شکافت بود. این کلاهک طی سال‌های ۱۹۸۱-۱۹۸۳ تولید شده و در سال ۱۹۹۲ کنار گذاشته شد (۳۸۰ کلاهک از این نمونه ساخته شد). سومین کلاهک نیز (مدل W-79 مد 0) برای گلوله توپ ۸ اینچی طراحی شده بود و بازدهی متغیری از ۱۰۰ تن تا ۱/۱ کیلوتن داشت. در پایین‌ترین بازدهی، یک سلاح شکافتی محض بود و در بالاترین بازدهی، ۸۰۰ تن آن سهم گداخت (۷۳٪) و ۳۰۰ تن آن سهم شکافت بود. این کلاهک طی سال‌های ۱۹۸۱-۱۹۸۶ تولید شد. از رده خارج کردن این نوع کلاهک از اواسط دهه ۸۰ آغاز و تا سال ۱۹۹۲ به‌کل کنار گذاشته شد (۳۲۵ کلاهک از این نوع ساخته شد). در نهایت، چهارمین کلاهک (مدل W-82 مد 0) گلوله توپ ۱۵۵ میلیمتری است که دارای بازدهی متغیر شبیه به کلاهک مدل W-79 بود. این کلاهک در اکتبر ۱۹۸۳، بدون اینکه تولید شود، منسوخ شد.

۷-۷-۲- روسیه و انگلستان

اتحاد شوروی سابق بین ۱۹۴۹ و ۱۹۹۰، حدود ۷۱۵ بار سلاح‌های هسته‌ای را آزمایش کرد. همچنین این کشور اولین بمب هیدروژنی جامد خود را در اوت ۱۹۵۳ آزمایش کرده بود. در حال حاضر، روسیه به تنهایی فعالیت‌های هسته‌ای شوروی را به عنوان دولتی هسته‌ای و مطابق با NPT ادامه داده، در حالی که دیگر جمهوری‌ها به عنوان دولت‌های غیرهسته‌ای به NPT پیوسته‌اند. روسیه یکی از بنیانگذاران منع گسترش سلاح‌های اتمی بوده است که در مارس ۱۹۷۰ اجرا شد. همچنین این کشور CTBT را امضا کرده و به مرحله اجرا گذاشته است. این کشور بیش از ۱۸ هزار سلاح اتمی دارد. از این تعداد، ۵۰۰۰ سلاح اتمی استراتژیک هستند که با هزار موشک و هواپیما و کشتی جنگی حمل می‌شود. در حال حاضر، سه راکتور هسته‌ای در روسیه پلوتونیوم درجه تسلیحاتی تولید می‌کنند. دو مورد از این راکتورها در منطقه

فصل هفتم: کاربردهای غیر صلح آمیز و نظامی تکنولوژی هسته‌ای / ۲۳۱

«تومسک» در غرب سیبری و راکتور دیگر در منطقه «کراسنویارسک» در جنوب سیبری قرار دارند. البته این کشور اعلام کرده بود که تا پایان ۲۰۱۰ تولید پلوتونیوم با کاربرد تسلیحاتی را متوقف خواهد کرد. از طرفی روسیه از مقدار تجهیزات و سلاح‌های هسته‌ای خود به شدت کاسته و بسیاری از سیستم‌های قدیمی این کشور به پایان دوره خدمت‌رسانی خود نزدیک می‌شوند. روسیه مجتمع‌های هسته‌ای عظیمی، از جمله ده شهرک سری هسته‌ای دارد که در آنها صدها تن از مواد هسته‌ای در شرایط امنیتی ناکافی نگهداری می‌شوند. در عین حال، این کشور به تلاش‌های خود برای گسترش تجهیزات هسته‌ای «ورود مجدد» ادامه می‌دهد. این تجهیزات ورود مجدد به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در آخرین مرحله پرواز مانورهای انجام داده و مانع تلاش آمریکا برای گسترش دفاع موثر در مقابل موشک‌های بالستیک شود. اولین آزمایش انفجار انگلستان نیز در ۳۰ اکتبر ۱۹۵۲ در جزیره مونته‌بلو در فاصله ۵۰ مایلی از ساحل استرالیا انجام شد. این آزمایش بریتانیا را به عنوان سومین کشور دارای تسلیحات هسته‌ای، بعد از آمریکا و شوروی معرفی کرد. متعاقب آن، در ۱۶ می ۱۹۵۷، انگلستان نخستین بمب اتمی خود را در جزایر کریسمس منفجر کرد. آخرین آزمایش هسته‌ای انگلستان در ۲۶ نوامبر ۱۹۹۱ انجام گرفته است. این کشور در این مدت ۴۴ بار سلاح‌های هسته‌ای را امتحان کرده است. این کشور، بین سال‌های ۱۹۵۲ و ۱۹۹۲، حدود ۸۳۴ سلاح هسته‌ای تولید کرد. انگلیس یکی از بنیانگذاران قرارداد منع گسترش سلاح‌های اتمی است و نخستین کشوری بود که این قرارداد را در نوامبر ۱۹۶۸ امضا کرده و به آن جنبه قانونی بخشید. همچنین این کشور قرارداد کامل منع آزمایش‌های اتمی (CTBT) را در سال ۱۹۹۸ به امضا رسانده و به مرحله اجرا گذاشته است. در حال حاضر، انگلیس ۱۸۵ سلاح اتمی دارد. ۴۸ عدد از این سلاح‌ها در چهار کشتی اتمی ثابت و ۳ عدد دیگر در سه کشتی متغیر جاسازی شده‌اند. هم اکنون این کشور چهار زیردریایی حامل موشک بالستیک مجهز به سلاح هسته‌ای دارد. هر کدام از این زیردریایی‌ها را می‌توان با ۱۶ موشک Trident II و در مجموع به ۴۸ سلاح هسته‌ای مجهز کرد. بایستی متذکر شد، انگلستان کاملاً به تجهیزات آزمایش هسته‌ای آمریکا وابسته بوده و به تنهایی قادر به آزمایش یا تأیید تجهیزات هیچ‌گونه سلاحی نیست، مگر آن که آمریکا آزمایش سلاح‌های خود را از سر بگیرد.

۷-۷-۳- فرانسه و چین

فرانسه نخستین آزمایش اتمی را در ۲۴ فوریه ۱۹۶۰ در صحرای مراکش و آخرین آن را در ۲۷ ژانویه ۱۹۹۷ و در مجموع حدود ۲۱۰ بار سلاح هسته‌ای را آزمایش کرده است. فرانسه چهارمین کشوری بود که به سلاح هسته‌ای دست یافت. این کشور بین ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۲، حدود ۱۱۱۰ سلاح هسته‌ای تولید کرد. در ۲۴ اوت ۱۹۶۸ نیز، نخستین بمب هیدروژنی فرانسه منفجر شد. فرانسه بخشی از قرارداد عدم گسترش سلاح‌های اتمی را در سال ۱۹۹۲ پذیرفت و در سال ۱۹۹۸ نیز به طور کامل به قرارداد منع آزمایش

هسته‌ای (CTBT) پیوسته و به اجرا گذاشت. البته از سال ۱۹۹۵ که پیمان منع جامع آزمایشات هسته‌ای تصویب شد و پیمان منع گسترش بطور نامحدود تمدید گردید، فرانسه ۶ آزمایش هسته‌ای انجام داده است. در حال حاضر، این کشور حدود ۳۴۸ کلاهک هسته‌ای استراتژیک دارد که آنها را روی ۸۴ هواپیمای حامل سلاح هسته‌ای و چهار زیردریایی نصب کرده است. از این چهار زیردریایی، سه زیردریایی هرکدام توانایی حمل ۱۶ موشک را داشته و قادر هستند دو کشتی را به طور همزمان روی دریا حفاظت کنند. البته فرانسه در نظر دارد سیستمهای موشکی حامل سلاح هسته‌ای را که پیشرفته‌تر می‌باشند، جانشین موشک‌های بالستیک نصب شده در زیردریایی‌ها کند که لازمه آن، تجهیز موشک‌های جدید به سلاح‌های هسته‌ای موجود می‌باشد. در این راستا گفته می‌شود، در آینده موشک‌های بالستیک M51 جانشین موشک‌های M45 خواهند شد که در نوع اول خود، به کلاهک‌های تی.ان.۷۵ و در نوع دوم به کلاهک‌های تی.ان.او (معروف به کلاهک هسته‌ای اقیانوس) مجهز خواهند شد.

نیروی دریایی فرانسه از طریق نیروی اس.اس.بی.ان و نیروهای باربر، ۸۰ درصد زرادخانه فرانسه را می‌گرداند. همچنین این کشور، حدود ۶۰ سلاح هسته‌ای نیز دارد که روی هواپیما نصب می‌شود. فرانسه از سه اسکادران میزهای بمب افکن ۲۰۰۰N که هرکدام حدود ۲۰ هواپیما دارد و یک ناوگان باربری کوچکتر هواپیماهای فوق استاندارد برخوردار است، این امر باعث می‌شود که نحوه عملکرد فرانسه از دیگر متفقیین خود در ناتو متمایز باشد. میز ۲۰۰۲N و هواپیمای فوق استاندارد «موشک مافوق صوت هوا به زمین شتاب متوسط» (ای.اس.ام.پی) را حمل می‌کند. جانشین ای.اس.ام.پی، موشک‌های ای.اس.ام.پی.ای پیشرفته است که این بهبودی بیشتر در مورد طرح این موشک‌ها انجام گرفته است. البته این موشک‌ها بهتر از نوع قبلی خود عمل کرده و به کلاهک‌های تی.ان.ای (معروف به کلاهک هسته‌ای هوایی) تجهیز شده‌اند و موشک‌های رافائل، جایگزین موشک‌های میز ۲۰۰۰N و موشک‌های فوق استاندارد خواهد شد. برد موشک‌های M4 نیز ۴۰۰۰ کیلومتر است که دارای ۶ کلاهک تی.ان.۷۱ هستند و هرکدام از این کلاهک‌ها ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوتن وزن دارند. موشک‌های ام.اس.ام.پی که ۳۰ کیلومتر برد دارند، کلاهک تی.ان.۸۱ که ۳۰۰ کیلوتن وزن دارند را حمل می‌کنند. بنابر برآوردها، فرانسه ۴۸ موشک اس.ال.بی.ام و حدود ۶۰ هواپیما مجهز به سلاح‌های اتمی دارد.

چین نیز نخستین آزمایش اتمی را در شانزدهم سپتامبر سال ۱۹۶۴ در "لوپ نور" و آخرین آن را در ۲۹ جولای ۱۹۹۶ و در مجموع ۴۵ آزمایش اتمی انجام داده است. چین در ۲۸ دسامبر ۱۹۶۶ نیز نخستین آزمایش انفجار بمب هیدروژنی خود را با قدرتی حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوتن انجام داد. این کشور در سال ۱۹۹۲ به قرارداد منع گسترش سلاح‌های اتمی مصوب سال ۱۹۶۸ پیوسته و در سال ۱۹۶۳ نیز بخشی از قرارداد منع آزمایش‌های اتمی مبنی بر آزمایش نکردن در زیر آب، اتمسفر و فضای کیهانی را به‌طور رسمی پذیرفته است. همچنین در سال ۱۹۹۶ نیز قرارداد کامل منع آزمایش‌های اتمی (CTBT) را پذیرفته، اما تاکنون به آن جنبه قانونی نداده است. لازم به ذکر می‌باشد که از سال ۱۹۹۵ که پیمان منع

فصل هفتم: کاربردهای غیر صلح‌آمیز و نظامی تکنولوژی هسته‌ای / ۲۳۳

جامع آزمایشات هسته‌ای تصویب شد و پیمان منع گسترش بطور نامحدود تمدید گردید، چین ۲ آزمایش هسته‌ای انجام داده است. در حال حاضر، چین دارای ۴۰۰ کلاهک اتمی، ۲۰ موشک دوربرد و ۶۰ موشک میان‌برد مجهز به کلاهک‌های هسته‌ای و انواع مختلفی از سکوها‌ی پرتاب می‌باشد. همچنین، این کشور ۱۵۰ هواپیما و کشتی جنگی مجهز به سلاح‌های اتمی دارد. چین همچنین به‌طور آهسته تلاش‌هایی را برای نوسازی این سلاح‌ها انجام می‌دهد در این راستا، این کشور به تلاش‌های خود برای توسعه موشک‌های دوربرد قابل اطمینان ادامه داده و گمان می‌رود در جستجوی سیستم‌هایی است که آسیب پذیری کمتری نسبت به حمله پیشگامانه سایر قدرت‌های هسته‌ای داشته باشد. البته شواهد قاطعی نیز مبنی بر آن که چین درصدد دستیابی به انواع جدید سلاح است وجود ندارد، اما این کشور هیچ محدودیتی را نیز برای دانشمندان خود برای توقف فعالیت‌هایشان قائل نشده است.

۷-۴- اسرائیل

اسرائیل توانست با جداسازی پلوتونیوم میله سوخت راکتور در پایان سال ۱۹۶۶ یا ۱۹۶۷، اولین سلاح هسته‌ای خود را بسازد و به این ترتیب، ششمین کشوری بود که موفق به انجام چنین کاری شد. برنامه تقویت و گسترش نیروی هسته‌ای اسرائیل با کمک فرانسوی‌ها و تحت نظر مستقیم شیمون پرز انجام گرفته است. طی سال‌های ۹۸-۱۹۹۷، نخست‌وزیر اسرائیل بنیامین نتانیاهو به اتفاق وزیر دفاع و وزیر امور خارجه اسرائیل در جلسه‌ای تصمیم می‌گیرند که تسلیحات کشتار جمعی و موشکی اسرائیل همچنان اعلام نشده باقی بماند. این کشور تاکنون نیز به داشتن سلاح هسته‌ای اقرار نکرده است، اما هیچ شک و شبهه‌ای وجود ندارد که این کشور دارای سلاح هسته‌ای است. گفتنی است، اسرائیل قرارداد منع گسترش سلاح اتمی را امضا نکرده است. این کشور قرارداد منع بخشی از آزمایش‌های اتمی را در سال ۱۹۶۴ امضا کرد. همچنین قرارداد منع کامل آزمایش‌های اتمی را نیز در سال ۱۹۹۶ امضا کرد، ولی این قرارداد به تصویب قانونی نرسیده است. برآورد شده است اسرائیل ۷ مرکز هسته‌ای داشته باشد. در این میان، از مرکز «ناچال سورک» به‌عنوان محل طراحی تسلیحات هسته‌ای اسرائیل یاد می‌شود. در حال حاضر، هرچند تعداد دقیق سلاح‌های هسته‌ای اسرائیل مشخص نیست؛ اما به احتمال زیاد این کشور مقدار کافی مواد هسته‌ای برای تولید ۱۰۰ تا ۱۷۰ سلاح هسته‌ای را در اختیار داشته باشد. برخی از کارشناسان نیز متعقدند، برنامه تقویت و گسترش نیروی هسته‌ای اسرائیل تا تولید بیش از ۲۰۰ کلاهک هسته‌ای متعارف و ۳۵ کلاهک هسته‌ای-حرارتی پیش رفته است.

طبق اعترافات مردخای وانونو، تکنسین سابق راکتور دیمونا در ساندی تایمز لندن در ۵ اکتبر ۱۹۸۶، اسرائیل دارای بیش از ۲۰۰ بمب هسته‌ای، بمب‌های نوترونی، کلاهک‌های هسته‌ای قابل حمل توسط F-16 و کلاهک‌های هسته‌ای تعبیه شده بر موشک‌های «جریکو» است. از طرفی، احتمالاً اسرائیل در مجموع ۵۳۰ تا ۶۸۴ کیلوگرم پلوتونیوم قابل استفاده در سلاح هسته‌ای را از زمان آغاز به کار راکتور

تحقیقاتی دیمونا در سال ۱۹۶۴ تولید کرده است. این کشور می‌تواند سلاح‌های هسته‌ای را به وسیله هواپیما، موشک‌های بالستیک، کشتی و موشک‌های کروز که از زیردریایی پرتاب می‌شود، حمل کند. گفته می‌شود، رژیم صهیونیستی ۱۰۰ موشک و ۳ کشتی اتمی دارد. در حال حاضر، کلاهک‌های هسته‌ای اسرائیل در ایلابون^۱ نگهداری می‌شود که در غرب دریای گاليله و در نزدیکی شهری به همین نام واقع است. ایلابون یکی از دو مرکز نگهداری سلاح‌های استراتژیک اسرائیل است. همچنین دومین مرکز نگهداری سلاح‌های استراتژیک اسرائیل در تیروش^۲ قرار دارد که مرکز نگهداری موشک‌های بالستیک اسرائیل از جمله موشک‌های جریکو-۲^۳ و جریکو-۱^۴ است. اسرائیل به احتمال بسیار، در جستجوی طرح‌های پیشرفته‌تر سلاح‌های هسته‌ای است؛ اما جزئیات فعالیت آنان آشکار نشده است. مسئولیت تولید سلاح‌های هسته‌ای اسرائیل برعهده مجتمع تحقیقاتی سلاح‌های پیشرفته رافائل است که تحت نظر مستقیم وزارت دفاع اسرائیل قرار دارد.

۷-۵- هند و پاکستان

شکست هند در جنگ با چین در سال ۱۹۶۲ و آزمایش هسته‌ای چین در سال ۱۹۶۴ باعث شد تا بحث دستیابی این کشور به سلاح هسته‌ای مطرح شود. هند در مه سال ۱۹۷۴، نخستین آزمایش اتمی خود را انجام داده و پنج آزمایش دیگر را در مه ۱۹۹۸ انجام داد. از آن زمان تاکنون، روند برنامه‌های تسلیحاتی هند متعادل‌تر شده است. در سال ۱۹۶۸، هند از پیوستن به معاهده عدم گسترش سلاح هسته‌ای (NPT) خودداری نمود. همچنین این کشور بخشی از قرارداد منع آزمایش‌های اتمی را در سال ۱۹۶۳ امضا کرده است، اما قرارداد کامل «پیمان منع فراگیر آزمایش هسته‌ای» (CTBT) را تبعیض‌آمیز دانسته و از امضای آن خودداری کرده است. هند استدلال کرده است که این معاهده قصد از میان برداشتن یا منع سلاح‌های هسته‌ای را ندارد، بلکه به کشورهای دارای سلاح هسته‌ای اجازه می‌دهد از طریق آزمایش‌های شبیه‌سازی شده، زرادخانه‌های خود را بهسازی و پالایش کنند. این کشور در حال حاضر احتمالاً ۳۰ تا ۳۵ سلاح اتمی کامل دارد و گفته می‌شود میزان پلوتونیوم این کشور قابلیت تولید ۷۵ تا ۱۱۰ سلاح هسته‌ای را دارد. این کشور همچنان به تولید مواد هسته‌ای برای استفاده در سلاح ادامه می‌دهد، اما تاکنون رسماً اعلام نکرده است که چند سلاح تولید کرده یا تصمیم به تولید چه تعداد سلاح دارد. هندوستان هواپیماهای جنگی و موشک بسیاری برای استفاده و پرتاب این سلاح‌ها را در اختیار دارد. هند سرمایه‌گذاری فراوانی را برای توسعه موشک‌های بالستیک قابل حمل کلاهک هسته‌ای

1. Elabun
2. Tirosh
3. Jericho-2
4. Jericho-1

فصل هفتم: کاربردهای غیر صلح‌آمیز و نظامی تکنولوژی هسته‌ای / ۲۳۵

برنامه‌ریزی کرده که به عنوان مثال می‌توان به آزمایش موفقیت آمیز موشک Agni II با ۴۸ تن وزن و سوخت جامد، ۱۶ متر ارتفاع و ۳۰۰۰ کیلومتر برد، در ۱۲ آوریل ۲۰۰۷ توسط "سازمان تحقیق و توسعه دفاعی هند" و در واکنش به آزمایش موشکی دوربرد (هاتف-۶) پاکستان و تغییر سوخت موشک‌های چین از مایع به جامد اشاره کرد که قابل نصب بر روی زیردریایی‌ها می‌باشد.

بی‌تردید آزمایش اتمی هند را باید نقطه عطفی در تحولات هسته‌ای پاکستان دانست. ۲۸ ماه مه ۱۹۹۸ پاکستان در پاسخ به آزمایش‌های هسته‌ای هند به نخستین آزمایش بمب اتمی در Chagai Hills واقع در صحرای بلوچستان مبادرت کرد. میزان شدت انفجار اولین آزمایش پاکستان ۴/۳ Magnitube (واحد سنجش انفجار هسته‌ای) قدرت داشت. پاکستان هم مثل هند از امضای NPT خودداری کرده است. دولت پاکستان علت عدم تمایل خود را تهدید رو به رشد هسته‌ای هند و عدم تعهد آن به NPT عنوان کرده است. با این همه، این کشور CTBT را امضا کرده است، اما از اجرای آن خودداری می‌کند. در حال حاضر پاکستان احتمالاً ۲۴ تا ۴۸ عدد سلاح اتمی دارد، البته گفته شده است این کشور می‌تواند توانایی تولید مقدار کافی اورانیوم قابل استفاده در ساخت ۵۰ تا ۱۱۰ سلاح هسته‌ای را به دست آورده است. این کشور نیز از امکانات لازم برای حمل و توزیع تعداد کمی سلاح هسته‌ای در چند روز یا چند هفته برخوردار بوده و بدین منظور، هواپیماهای حمل سلاح‌های اتمی و موشک‌های پرتاب دارد. طبق گزارش‌ها، بخش مرکزی شکافت‌پذیر این بمب‌ها، جدا از سایر مواد منفجره غیرهسته‌ای نگهداری می‌شود، هرچند که مکان دقیق نگهداری این تجهیزات عموماً ناشناخته است. ارتش پاکستان در ۱۹ آوریل ۲۰۰۸ موشک قابل حمل (هاتف-۶) و یا (شاهین-۲) را برای بازدارندگی هسته‌ای در زمان جنگ با موفقیت آزمایش کرد. این موشک با برد ۱۲۰۰ مایل می‌تواند هر نقطه در خاک هند، ایران، افغانستان و یا آسیای مرکزی را هدف قرار دهد. به احتمال بسیار، دانشمندان پاکستانی نیز سرگرم یافتن طرح‌های پیشرفته‌تری هستند و به محض آن که مجوز آزمایش این سلاح‌ها را به دست آورند، سریعاً به امتحان این سلاح‌ها می‌پردازند.

۷-۶- کره شمالی

کره شمالی با اعلام رسمی نخستین آزمایش اتمی خود به صورت انفجار زیرزمینی در ۱۶ مهر ۱۳۸۵، هشتمین کشوری است که پس از آمریکا، روسیه، فرانسه، چین، انگلیس، هند و پاکستان به بمب اتم دست پیدا می‌کند. البته منابع خبری اعلام کرده بودند که کره شمالی از ماه مارس ۲۰۰۵، به‌طور مخفیانه خود را برای آزمایش یک بمب اتمی آماده کرده است و احتمال دارد این آزمایش در ماه مه یا ژوئن ۲۰۰۵ انجام شود. در این آزمایش، کره شمالی با حفر تونل به طول صدها فوت در صخره‌ها به اطاق صفر رسیده، محلی که در آن انفجار انجام می‌شده است. دانشمندان کره شمالی به وسیله کابل‌های

ارتباطی که به سطح زمین انتقال داده شده بود، تمامی اطلاعات و فرآیندهای انفجاری را بررسی و آنالیز می‌نمودند. پس از موفقیت‌آمیز بودن آزمایش، این تونل سپس مسدود گردیده که از انتقال و انتشار مواد حاصل از انفجار هسته‌ای جلوگیری به عمل آید. جلوگیری از انتشار مواد آلوده کننده هسته‌ای در این انفجار زیرزمینی این امکان را به امریکایی‌ها نمی‌دهد که با استفاده از نمونه‌گیری هوایی، به نوع بمب و چگونگی عملکرد آن پی ببرند. اگرچه امریکا، ژاپن و کره جنوبی قدرت آزمایش هسته‌ای کره شمالی را به بزرگی $4/2$ واحد مغناطیسی اندازه‌گیری نموده و قدرت آنرا برابر 550 تن ماده منفجره TNT برآورد می‌نمایند اما روسیه اعلام کرده که قدرت این انفجار برابر 15 هزار تن TNT و برابر قدرت بمب اتمی امریکا در هیروشیما ژاپن می‌باشد. یادآور می‌شود، تاکنون بیشترین قدرت آزمایش بمب هسته‌ای مربوط به فرانسه و به میزان 120 هزار TNT بوده که در سال 1996 در 750 مایلی جنوب شرقی مستعمره هائیتی آزمایش گردیده است.

با تأیید این آزمایش، کره شمالی کره شمالی با این آزمایش ثابت نمود که تکنولوژی بکارگیری پلوتونیوم برای جدا سازی کامل و ساختن بمب پلوتونیومی را دارد، هرچند سازمان‌های جاسوسی آمریکا معتقدند، کره شمالی در اواسط دهه 1990 ، یک یا احتمالاً دو سلاح هسته‌ای تولید کرده است. این کشور دستیابی به سلاح‌های هسته‌ای را در جهت حقوق مشروع این کشور برای دفاع از خود و حراست از نظام و ایدئولوژی این کشور و تلاشی برای مقابله با تهدیدهای فزاینده هسته‌ای آمریکا و جلوگیری از حملات پیش‌دستانه هسته‌ای آن کشور می‌داند و ادعا کرده است تحت هر شرایطی سلاح‌های هسته‌ای را به عنوان عاملی بازدارنده برای دفاع از خود حفظ خواهد کرد. یادآور می‌شود، نماینده کره شمالی در سازمان ملل در ژانویه 2003 ، با اعلان اینکه آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و NPT به وسیله آمریکا برای اجرای سیاست ضد کره شمالی مبدل شده، از این پیمان خارج شد. در حال حاضر، کره شمالی برنامه پیشرفته‌ای برای تولید سلاح‌های هسته‌ای داشته و به احتمال زیاد، پیش از این توانسته است مقدار کافی پلوتونیوم را برای ساخت 9 سلاح هسته‌ای تولید کند. البرادعی رئیس سازمان بین‌المللی انرژی اتمی در 7 دسامبر 2004 گفت، کره شمالی سوخت لازم برای تولید 4 تا 6 بمب اتم را در اختیار دارد. از طرفی گفته می‌شود شمار کلاهک‌های اتمی این کشور، از پاکستان بیشتر و به اندازه کلاهک‌های هند نزدیک است. آمریکا نیز مدعی شده است، کره شمالی اکنون قادر است موشک‌های خود را به کلاهک هسته‌ای مجهز کند. البته از توانایی کره شمالی برای دستیابی به طرح‌های پیشرفته‌تر نیز اطلاعی در دست نیست.

می‌شود. ثانیاً حساسیت گرمایی نمونه گل رس سفال نیز تعیین می‌شود و در مرحله آخر، غلظت منابع پرتوزای موجود در سفال با روش‌های حساس تعیین شده و با توجه به نیمه عمر آنها عمر سفال تعیین می‌شود. در نهایت بایستی متذکر شد، هرچند استفاده از رادیوایزوتوپهای گوناگون، تاریخ‌سنجی نمونه‌های زیست‌شناختی و زمین‌شناختی را با دقت بالا امکان‌پذیر می‌سازد؛ اما احتمالاً تاریخ‌سنجی

فصل هفتم: کاربردهای غیر صلح‌آمیز و نظامی تکنولوژی هسته‌ای / ۲۳۷

رادیوایزوتوپ‌ها در آینده به این دقت ممکن نباشد. تمام موجوداتی که بعد از ۱۹۴۰ مرده‌اند، به دلیل فعالیت‌های هسته‌ای بمب‌های اتمی، راکتورهای هسته‌ای و آزمایش‌های هسته‌ای در فضای باز دچار تغییرات هسته‌ای شده‌اند و در آینده تشخیص درصد رادیواکتیویته طبیعی در این موجودات از رادیواکتیویته حاصل از این فعالیت‌های هسته‌ای مشکل خواهد بود.

۲۳۸ / مبانی و کاربردهای فناوری هسته‌ای

سفید

منابع و مآخذ

الف. منابع فارسی

- ۱- آشنایی با فیزیک هسته‌ای، کنت کرین، ترجمه محمدابراهیم ابوکاظمی و منیژه رهبر، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۶.
- ۲- از اتم تا انرژی اتمی، محمد کاظم مرعشی، ۱۳۸۰.
- ۳- انرژی هسته‌ای؛ خدمات و نقش آن در ارتقاء صنعت کشور، بیژن افضل زاده، همایش بین المللی جایگاه چرخه سوخت هسته‌ای در توسعه فن آوری و تحقیقات، ۱۳۸۵.
- ۴- تجربیات نیروگاههای پیشرفته (جلدهای ۲۳، ۲۴ و ۲۵): تولید قدرت هسته ای، ترجمه سیمین مهدی زاده، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۹.
- ۵- تکنیک‌های هسته‌ای در علوم کشاورزی، محمدرضا اردکانی و فرامرز مجد، نشر دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.
- ۶- جنگ رادیوژی، دانشنامه رشد، <http://daneshnameh.roshd.ir/mavara/>
- ۷- سوخت هسته‌ای و استفاده از آن در راکتورهای تحت فشار، رضا خزانه و همکاران، انتشارات سازمان انرژی اتمی، ۱۳۷۶.
- ۸- فیزیک کاربردی راکتورهای هسته‌ای، احمد داورزنی، نشر جهاد دانشگاهی واحد تهران، ۱۳۸۴.
- ۹- کاربردهای صلح آمیز انرژی هسته‌ای، مهدی تولایی، انتشارات گنج عرفان، ۱۳۸۴.
- ۱۰- مبانی فیزیک پزشکی هسته‌ای، آر. چاندر، ترجمه علی بایبوردی و حسین ساعدی پور، انتشارات دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تبریز، ۱۳۸۱.
- ۱۱- مدیریت پسمان‌های رادیواکتیو و معرفی ساختارهایی برای تثبیت آن، فریبرز ریاحی، همایش بین-المللی جایگاه چرخه سوخت هسته‌ای در توسعه فن آوری و تحقیقات، ۱۳۸۵.
- ۱۲- مروری بر تکنولوژی گداخت هسته‌ای، رضا امراللهی و همکاران، سومین همایش ملی انرژی، ۱۳۸۰.
- ۱۳- منابع تولید انرژی الکتریکی در قرن بیست و یکم، دکتر سید مسعود مقدس تفرشی، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۴.
- ۱۴- منابع مواد رادیواکتیو، وب سایت پایگاه ملی داده های علوم زمین.

- ۱۵- نشت‌یابی خطوط لوله زیرزمینی انتقال مواد نفتی با استفاده از ردیاب رادیواکتیو Br-82، محمدحسن صحافی پور و همکاران، دومین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی، ۱۳۸۶.
- ۱۶- نگاهی به آمار تولید سلاح‌های هسته‌ای در کشورهای مختلف جهان همچون یک زرادخانه، جان وولف استال، ترجمه سلیمان فرهادیان، Physics world, Aug. 2005.
- ۱۷- نگاهی به روش‌های تاریخ‌سنجی با استفاده از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو، مارشال برین، ترجمه رقیه علی نژاد، www.Howstuffworks.com
- ۱۸- وضعیت تکنولوژی انرژی هسته‌ای در پایان قرن حاضر و روند تحول آن، دکتر محمد باقر غفرانی، مجله برق شریف، شماره ششم.

ب. منابع لاتین

19. "Advanced Nuclear Power Reactors", Information and Issue Briefs, World Nuclear Association, 2006.
20. Charles D. Ferguson and William C. Potter; "Lining up to enrich uranium", International Herald Tribune, Sept. 12, 2006.
21. Glasstone, Samuel and Dolan, Philip J.; "The Effects of Nuclear Weapons", third edition, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1977.
22. IAEA, "Classification of Uranium reserve/resources", IAEA-TECDOC-1035, IAEA, Vienna, Austria, 1998.
23. "Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste", International Atomic Energy Agency, 2001-06-22.
24. Jopf, James; "World Uranium Reserves", American Energy Independence, 2004.
25. Murray, Raymond; "Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems and Applications of Nuclear Processes", Butterworth-Heinemann, 2001.
26. National Research Council, "Nuclear Wastes: Technologies for Separation and Transmutation", Washington DC: National Academy Press, 1996.
27. "Nuclear Power Plants Information: Number of Reactors Operation Worldwide", International Atomic Energy Agency.
28. "Plutonium Recovery from Spent Fuel Reprocessing by Nuclear Fuel Services at West Valley, New York from 1966 to 1972". U.S. Department of Energy, February 1996.
29. "Radioactive Waste Management", Uranium & Nuclear Power Information Centre, 2002.
30. Rhodes, Richard; "Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb", New York: Simon and Schuster, 1995.
31. "The Effects of Nuclear War", Office of Technology Assessment, May 1979.
32. "The Nuclear Fuel Cycle", September 2008, <http://www.world-nuclear.org/info/inf03.html>
33. "Thorium", Information and Issue Briefs, World Nuclear Association, 2006.
34. "Waste Management in the Nuclear Fuel Cycle", Information and Issue Briefs, World Nuclear Association, 2006.
35. "World Nuclear Power Reactors 2007-08 and Uranium Requirements", World Nuclear Association, 2008-06-09.