سازمان انرژی اتمی ایران

آشنایی با انرژی هسته ای و کاربردهای آن

جلد دوم

سطح متوسطه

عنوان: آشنایی با انرژی هسته‌ای و کاربردهای آن – جلد دوم.

پدیدآورندگان: دفتر تدوین برنامه و طرح‌های راهبردی (معاونت برنامه‌ریزی هسته‌ای و نظارت راهبردی).

مشخصات ظاهری: ۸۶ص.: مصور (رنگی).

موضوع: انرژی هسته‌ای.

چاپ: سال ۱۴۰۱. حق چاپ محفوظ.

آدرس اینترنتی فایل الکترونیکی کتاب:

www.aeoi.org.ir **(بخش منابع علمی – کتاب‌ها)**

صنعت هسته‌ای برای یک کشور یک ضرورت است؛ هم برای انرژی، هم برای داروهای هسته‌ای که بسیار مهم است، هم برای تبدیل آب دریا به آب شیرین و هم برای بسیاری از نیازهای دیگر در زمینه کشـــاورزی و غیر کشاورزی. صنعت هسته‌ای در دنیا، یک صنعت پیشرفته است، یک صنعت مهم است.

سخنان مقام معظم رهبری در دیدار با مداحان اهل بیت (ع) -فروردین ۱۳۹۴

فهرست

پیشگفتار	أ
کاربردهای صلح‌آمیز انرژی هسته‌ای در پزشکی، صنعت و کشاورزی	۱
راکتورهای تحقیقاتی و شتاب‌دهنده‌ها	۳۳
فناوری لیزر و کوانتوم	۴۷
استفاده از سانتریفیوژها در حوزه سلامت و صنعت	۵۵
پسماندداری هسته‌ای	۶۰
ایمنی هسته‌ای و پرتوی و عدم اشاعه تسلیحات اتمی	۶۵
واژه‌نامه	۷۸

❖ پیشگفتار

"اوّلِ دفتر به نام ایزدِ دانا صانعِ پروردگارِ حیِّ توانا"

توسعهٔ روز افزون بهره‌برداری از مواهب فناوری صلح‌آمیز هسته‌ای به ویژه در دهه‌های اخیر و تأثیرات گسترده آن در تأمین رفاه جوامع بشری موجب آن شده است تا گسترش فعالیت‌های سازمان انرژی اتمی ایران خاصّه در سال‌های پس از پیروزی شکوهمند انقلاب اسلامی با هدف بهره‌مندی کشور از مزایای این فناوری نوین با رشدی شتابان همراه شده و تثبیت حقوق انکارناپذیرِ نسل‌های کنونی و آیندهٔ ایران اسلامی با قدرت و صلابت در دستور کار قرار گیرد. برنامه‌ریزی بلند مدت به منظور تولید برق هسته‌ای، تکمیل زنجیرهٔ تأمین سوختِ مورد نیازِ واحدهای نیروگاهی، توسعهٔ روزافزون کاربرد پرتوها در حوزهٔ بهداشت و درمان، صنعت، کشاورزی و نیز ایجاد بسترِ مناسب برای بهره‌مندی بهینه از امکانات و ظرفیت‌های موجود در حوزه علوم و فنون لیزر و کوانتوم، بخشی از چشم‌انداز ترسیم شده برای پیشبرد اهداف کلانِ صنعت هسته‌ای است.

لازم به توضیح است که مطالب مندرج در دو جلد کتابِ حاضر با هدف آشنایی کلیهٔ شهروندان عزیز ایرانی به ویژه دانش‌آموزان در سطوح پایان دورهٔ متوسطه با مبانی دانش هسته‌ای و کاربردهای متنوع آن تهیه شده است. در نگارش این اثر، این نکته مدّ نظر قرار گرفته که بخش وسیعی از افراد جامعه و کسانی که از آشنایی مختصری با علوم و فنون هسته‌ای برخوردارند، از این توانایی بهره‌مند شوند تا خود را مخاطب اصلی ما بیابند.

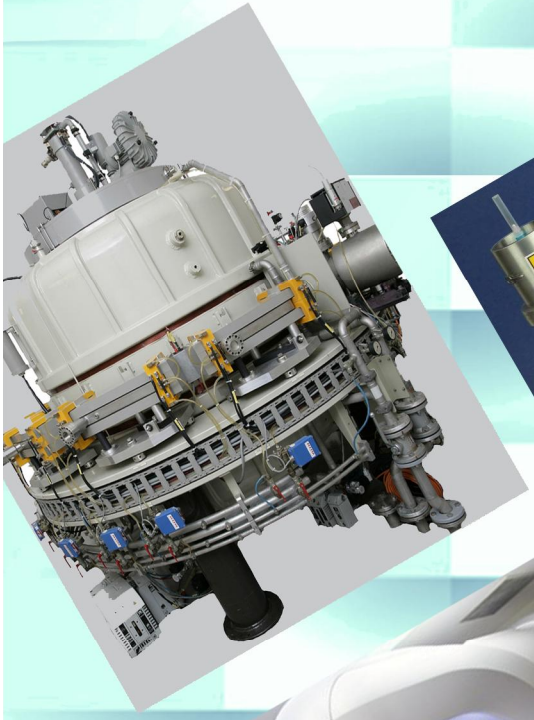
در جلد دوّم برخی از کاربردهای متنوع و متعدّد پرتوها در حوزه‌های مختلف از جمله پزشکی، صنعت، کشاورزی و مواد غذایی و همچنین در زمینهٔ محیط‌زیست تشریح شده و در ادامه به بررسی فناوری‌هایی همچون راکتورهای تحقیقاتی، شتاب‌دهنده‌ها، لیزر، کوانتوم و سانتریفیوژهای مورد استفاده در سلامت و صنعت و دستاوردهای کشور در حوزه‌های فوق پرداخته شده است. در فراز پایانی آن نیز، به‌منظور آشنایی مخاطبانِ ارجمند، با اهمیّت و حساسیّت مبحث ایمنی در صنعت هسته‌ای و پسمانداری، برخی از اقدامات انجام شده در این حوزه، معرفی شده است.

شایان ذکر است در جلد اوّل نیز، به استفاده از ظرفیتِ نیروگاه‌های هسته‌ای جهت تأمین بخشی از برق مورد نیاز جهان و معرفی نیروگاه اتمی بوشهر پرداخته شده است. افزون بر این، مراحل تولید سوخت هسته‌ای در کنار تأسیساتِ مربوط به چرخهٔ سوخت به‌طور اجمالی مورد اشاره قرار گرفته است. در ادامه به بررسی روش‌های تولید آب سنگین و سایر

ایزوتوپ‌های پایدار، آشنایی با سیستم پیشران هسته‌ای و انرژی همجوشی هسته‌ای و دستاوردهای کشور در حوزه‌های فوق پرداخته شده است.

لازم به توضیح است که تهیه‌کنندگانِ این اثر با عطف توجّه به آثاری که پیش از این در این حوزه به نگارش در آمده است، بر آن بوده‌اند تا با رویکردی متفاوت و در قالبی به‌روز و کارآمد، تصویری اجمالی و در عین حال جامع و کاربردی از مطالب و موضوعاتِ علمی ارائه نمایند. باشد تا از این رهگذر، فضای مناسبی جهت معرفی دقیق‌ترِ دستاوردها و افتخاراتِ صنعت هسته‌ای کشورمان فراهم آید. در پایان ضمن سپاس و قدردانی فراوان از ریاست محترم سازمان، معاونین و همهٔ بزرگوارانی که ما را در مسیر تهیه و انتشار این اثر یاری رساندند و به‌ویژه همکاران محترم در اداره کل دیپلماسی عمومی و اطلاع رسانی، از پیشگاه همهٔ خوانندگانِ گرانقدر استدعا داریم تا با ارائه پیشنهادات و دیدگاه‌های راهگشای خود بیش از پیش ما را در راه ارتقاء کیفیتِ ارائه مطالب یاری فرمایند.

کاربردهای صلح آمیز انرژی هسته ای
در پزشکی، صنعت و کشاورزی



❖ کاربردهای صلح‌آمیز انرژی هسته‌ای در بخش سلامت، پزشکی و بهداشت

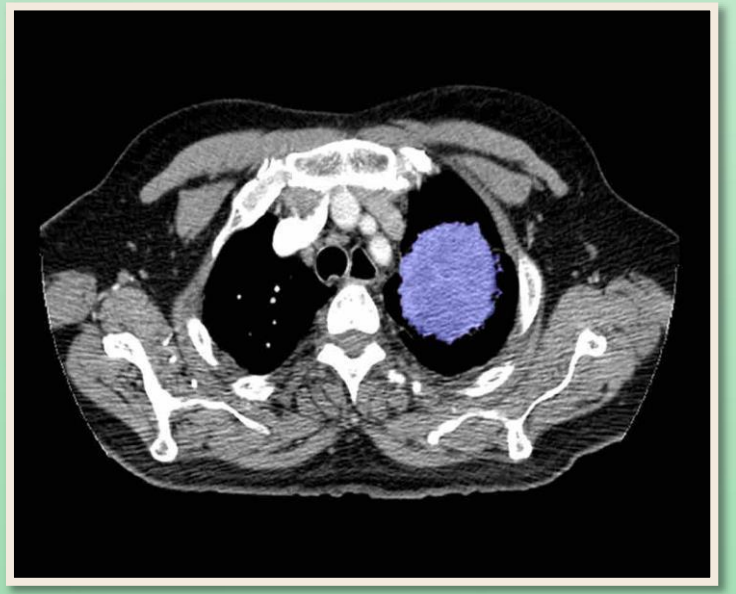
نقش فناوری هسته‌ای در پزشکی، پس از کشف پرتو ایکس توسط رونتگن در سال ۱۸۹۵ و کشف خاصیت پرتوزایی مواد توسط بکرل در سال ۱۸۹۶ آغاز شده و روزبه‌روز توسعه یافته است.

تصویربرداری از بافت و اندام‌ها، پرتودرمانی، تولید انواع رادیوداروها و استریل نمودن تجهیزات پزشکی از جمله مهم‌ترین زمینه‌های به‌کارگیری فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت است.

تصویربرداری از بیمار با به‌کارگیری فناوری هسته‌ای

• تشخیص بیماری از طریق تصویربرداری

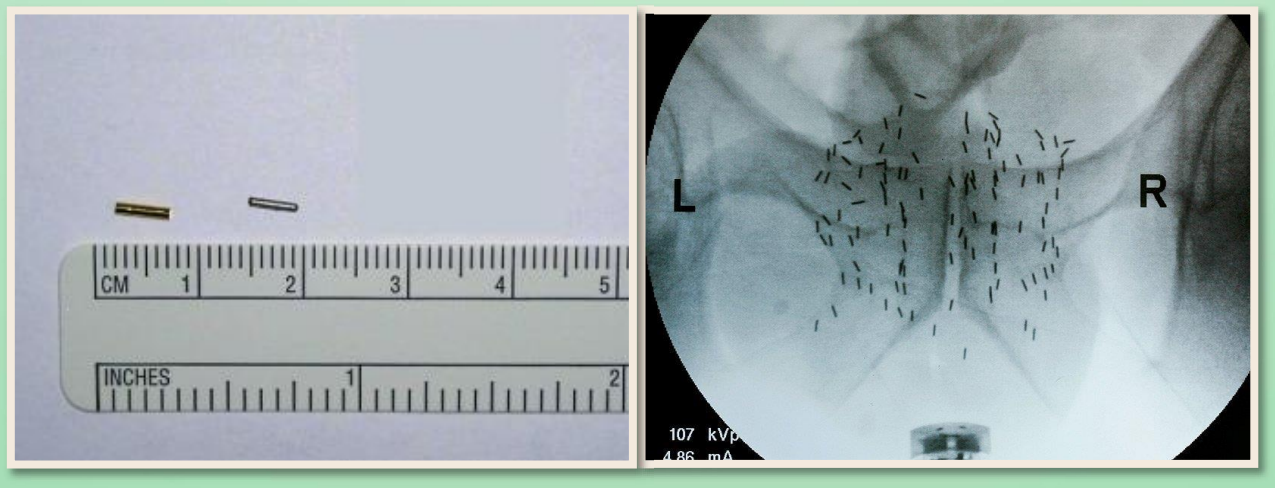
پرتوها می‌توانند از درون بدن و بافت‌های داخلی انسان عبور کنند. در نتیجه، اطلاعاتی را از درون بدن شخص بیمار به شکل تصویر در اختیار پزشک قرار می‌دهند. در نهایت، این تصاویر دریافتی برای تشخیص بیماری، انتخاب روش درمانی مناسب و بررسی موفقیت درمان مورد استفاده قرار می‌گیرند.



تصویری از ریه (سلول‌های سرطانی در ریه سمت چپ، با رنگ بنفش نشان داده شده است)

پرتودرمانی

پرتوهای یونیزان می‌توانند برای نابودی سلول‌های سرطانی یا کاهش درد مورد استفاده قرار گیرند. پرتودرمانی خارجی و پرتودرمانی داخلی دو روش اصلی در پرتودرمانی را تشکیل می‌دهند. در پرتودرمانی خارجی، از یک چشمه یا دستگاه مولد پرتوی که خارج از بدن بیمار قرار دارد، استفاده می‌شود. این نوع پرتودرمانی با فوتون (ایکس و گاما)، الکترون، پروتون، یون‌های سنگین و نوترون انجام می‌شود. در پرتودرمانی داخلی، چشمه پرتوزا به شکل میله‌های کوچکی مستقیماً در درون بافت سرطانی قرار داده می‌شود. علاوه بر این موارد، رادیوداروها نیز کاربردهای درمانی دارند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.



نمونه‌ای از چشمه‌های مورداستفاده در پرتودرمانی داخلی

• رادیوداروها

رادیوداروها، ایزوتوپ‌های پرتوزا هستند که به‌صورت خوراکی، تزریقی یا استنشاقی وارد بدن بیمار می‌شوند و جهت اهداف تشخیصی، درمانی، کاهش درد و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بالغ بر ۹۰ درصد از رادیوداروهای جهان جهت مقاصد تشخیصی بکار گرفته می‌شوند و کاربردهای درمانی آن‌ها نیز در حال توسعه است. تکنسیوم-۹۹m رایج‌ترین رادیوایزوتوپ مورد استفاده در حوزه تشخیصی است و در بیش از ۸۰ درصد از کلیه رویه‌های پزشکی هسته‌ای بکار گرفته می‌شود.

تصویری از یک رادیودارو

بیشتر رادیوداروهای به‌کاررفته در پزشکی هسته‌ای به طور مصنوعی با استفاده از سیکلوترون یا راکتور تولید می‌شوند. روش دیگر تولید هسته‌های پرتوزا با نیمه عمر کوتاه، ژنراتورها هستند که متشکل از مخلوط رادیوایزوتوپ مادر با نیمه عمر بالا و رادیوایزوتوپ دختر با نیمه عمر کوتاه است. رادیوایزوتوپ دختر از طریق فروپاشی مادر تشکیل می شود. با توجه به این که در ژنراتور، رادیوایزوتوپ‌های مادر و دختر از نظر خواص شیمیایی کاملاً متفاوت هستند، جداسازی به راحتی صورت می‌گیرد و این بزرگترین مزیت ژنراتورها است. در خصوص راکتورهای تحقیقاتی و شتاب‌دهنده‌ها در بخش‌های بعدی توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.

نمونه‌ای از یک ژنراتور تولیدکننده رادیوایزوتوپ مورداستفاده در پزشکی هسته‌ای

• استریل کردن تجهیزات پزشکی

مواد و تجهیزات یک بار مصرف پزشکی نظیر سرنگ، دستکش، سوزن، مواد بهداشتی و آرایشی و غیره را نمی‌توان با حرارت، ضدعفونی کرد. پرتودهی بهترین، بی‌خطرترین و مطمئن‌ترین روش استریل کردن محصولات پزشکی است که مزیت‌هایی از قبیل صرفه‌جویی در زمان، قابلیت پرتودهی مواد پس از بسته بندی نهایی و عدم استفاده از مواد ضد عفونی کننده شیمیایی خطرناک مانند اتیلن اکساید را دارد.

گاز استریل طبی – استریل شده با پرتو

برخی محصولات استریل شده با پرتو

❖ کاربردهای صلح‌آمیز انرژی هسته‌ای در بخش غذایی، کشاورزی و دامپروری

• افزایش زمان ماندگاری محصولات غذایی

پرتودهی می‌تواند از فساد زودهنگام مواد غذایی مانند گیاهان دارویی، ادویه‌جات، پسته، خرما و صیفی‌جات (سیب‌زمینی، پیاز و ...) جلوگیری کند و زمان ماندگاری آن‌ها را افزایش دهد. پرتودهی جایگزین خوبی برای روش‌های پاستوریزه کردن، کلرزنی و سایر روش‌های استریل کردن است و استفاده از مواد شیمیایی را به صفر می‌رساند.

توت فرنگی پرتودیده

• کنترل حشرات و آفات

برای کنترل آفات و حشرات به جای استفاده از حشره‌کش‌ها و سموم شیمیایی که مضرات خاص خود را دارند، می‌توان از روش عقیم‌سازی حشرات استفاده کرد. در این روش، حشره نر به‌صورت انبوه پرورش می‌یابد و از طریق پرتودهی، عقیم (نابارور) می‌شود. در مرحله بعد، این حشرات در کل ناحیه، آزادسازی می‌شوند که منجر به کاهش زاد و ولد و جمعیت حشرات در طول زمان می‌گردد.

تولید انبوه حشرات عقیم شده

• اصلاح ژنتیک گیاهان

پرتودهی بذر گیاهان و اصلاح ژنتیک آنها می‌تواند خصوصیات گیاهان را بهبود بخشد یا ویژگی جدیدی به آن‌ها اضافه کند. به عنوان نمونه، پرتودهی بذر برنج می‌تواند باعث افزایش مقاومت آن در برابر شوری خاک شود یا پرتودهی بذر گل‌ها می‌تواند باعث ایجاد رنگ‌های متنوعی در آن‌ها گردد.

• کاربرد در دامپروری و سلامت دام

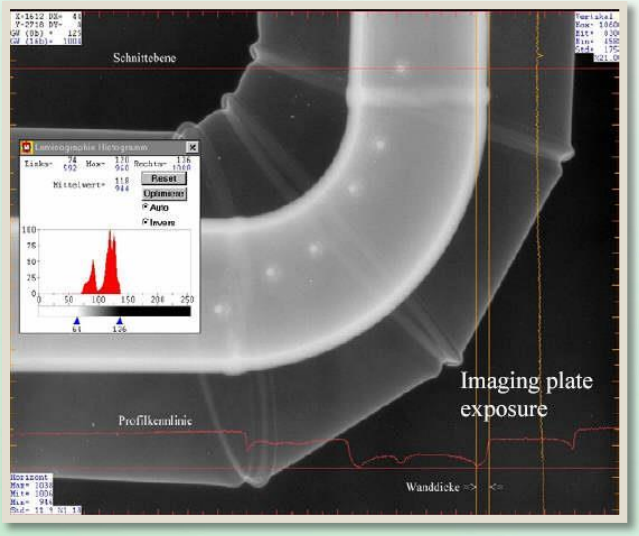
دوقلوزایی گوسفند با استفاده از فنون هسته‌ای

یکی از کاربردهای مهم پرتودهی، کاهش یا حذف آلودگی‌های موجود در محصولات دامی یا خوراک مصرفی دام، طیور و حیوانات آزمایشگاهی است. علاوه بر این، فنون هسته‌ای برای اصلاح نژاد دام و طیور مانند افزایش وزن جوجه‌های تازه از تخم درآمده یا دوقلوزایی دام‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد دیگر پرتوها در این صنعت، تولید رادیوواکسن برای پیشگیری و کنترل بیماری‌های دامی است.

❖ کاربردهای صلح‌آمیز انرژی هسته‌ای در بخش صنعت و خدمات

• تست غیر مخرب (رادیوگرافی صنعتی)

تست غیر مخرب نظیر رادیوگرافی صنعتی با استفاده از پرتو ایکس و گاما، روشی است که به کمک آن می‌توان مواد را به شیوه‌ای که به آن‌ها آسیبی وارد نشود، مورد بررسی قرار داد. این روش همانند تصویربرداری از بدن انسان است و با استفاده از آن می‌توان ضخامت یک شی، نقص‌های موجود در آن و غیره را مشاهده و بررسی کرد.



رادیوگرافی صنعتی جهت بررسی کیفیت لوله

• سیستم‌های کنترل و سنجش هسته‌ای

یکی از کاربردهای مهم پرتوها، استفاده از چشمه‌های رادیوایزوتوپی برای اندازه‌گیری ارتفاع مواد موجود در مخزن، تعیین چگالی مایع عبوری از لوله و ضخامت‌سنجی است. به عنوان مثال می‌توان ضخامت فویل‌ها، صفحات بسیار نازک، کاغذ و پلاستیک را اندازه‌گیری کرد. در سنجش با کمک رادیوایزوتوپ‌ها می‌توان به آشکارسازی دود اشاره کرد. سیستم آشکارساز دود از چشمه رادیوایزوتوپی آمرسیوم-۲۱۴ گسیلنده ذرات آلفا استفاده می‌کند. ذرات آلفای حاصل از چشمه، مولکول‌های هوا را یونیده می‌کند و در نتیجه یون‌های مثبت و منفی، جریانی را به وجود می‌آورند. وجود ذرات دود این جریان را کاهش می‌دهد و بنابراین هشداردهنده‌ای را به کار می‌اندازد که ساکنین متوجه وجود دود در محیط ساختمان می‌شوند.

تصویری از یک سنجشگر هسته‌ای

• بازرسی محموله

از چشمه‌های رادیوایزوتوپی می‌توان در کنترل کالاهای وارداتی، صادراتی و ترانزیتی استفاده کرد. در این زمینه می‌توان از پرتو ایکس حاصل از شتاب‌دهنده یا پرتو گامای حاصل از چشمه سزیم-۱۳۷ در مبادی گمرکی استفاده کرد. از این سیستم‌های کنترلی برای بررسی بار و وسایل همراه در مراکز حساس مانند فرودگاه‌ها، کنترل ورود و خروج و جلوگیری از قاچاق مواد پرتوزا نیز استفاده می‌شود.

با عبور کامیون از زیر دستگاه تصویربرداری می‌توان داخل کامیون را مشاهده کرد

• اصلاح و بهبود خواص مواد

فناوری هسته‌ای می‌تواند برای اصلاح خواص مواد یا افزودن ویژگی‌های مفید به آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. از جمله کارهای انجام شده می‌توان به بهبود خواص حرارتی و مکانیکی کابل، سیم و لوله؛ افزایش کیفیت لاستیک خودرو و تولید هیدروژل‌های پوشش‌دهنده زخم اشاره کرد. هیدروژل یا آبژل نوعی پلیمر آب‌دوست است.

چسب هیدروژل تهیه‌شده با استفاده از فنون هسته‌ای

• آنالیز مواد

از برخورد نوترون با یک ماده در راکتور تحقیقاتی، می‌توان ماده پرتوزا تولید کرد. در نهایت، با توجه به نوع و انرژی پرتو تولید شده، نوع و مقدار عنصر اصلی در نمونه اولیه قابل شناسایی خواهد بود. این روش می‌تواند برای تعیین عناصر اصلی تشکیل‌دهنده یک ماده یا بررسی ناخالصی‌های آن استفاده شود.

پژوهش در زمینه آنالیز مواد با استفاده از یک راکتور تحقیقاتی

• حفظ میراث فرهنگی

یکی از کاربردهای فناوری هسته‌ای، بررسی قدمت و تشخیص مواد تشکیل دهنده اشیای فرهنگی و شناسایی عیوب موجود در آن است. علاوه بر این، پرتوها می‌توانند برای نابودی میکروب‌ها و حشرات موجود در آن‌ها نیز مورداستفاده قرار گیرند. مزیت استفاده از پرتوها این است که برخلاف روش‌های شیمیایی، هیچ‌گونه ماده‌ای بر روی اشیاء بجا نمی‌گذارند و باعث تخریب یا آسیب به آن‌ها نمی‌شوند.

آنالیز تابلوی نقاشی با استفاده از پرتوهای ایکس

• تصفیه پسماندهای شهری، صنعتی و بیمارستانی و فرآوری گازهای خروجی از دودکش

پرتودهی فاضلاب یک کارخانه نساجی برای کاهش سطح آلودگی

تصفیه پسماندهای مایع و گازی از مواد سمی و آلوده و جداسازی آن‌ها از آب و خاک، با استفاده از پرتو امکان‌پذیر است. به عنوان مثال، لجن فاضلاب سرشار از مواد آلی و عناصر کمیاب است و لازم است قبل از استفاده به شکل کود، میکروب‌ها و باکتری‌های آن با پرتودهی از بین بروند. گازهای خروجی از دودکش‌های نیروگاه برق و صنایع دیگر نیز حاوی آلاینده‌هایی همچون دی‌اکسید سولفور، اکسید ازت و غیره هستند که با پرتودهی، این آلاینده‌ها به کودهای مفید مانند سولفات آمونیوم و نیترات آمونیوم تبدیل می‌شوند.

تشخیص بیماری

- بکارگیری ایزوتوپ‌های پرتوزا (مانند سیستم‌های تصویربرداریSPECT و PET)
- استفاده از پرتوهای ایکس در حوزه رادیولوژی (شامل ماموگرافی، سی تی اسکن، فلوروسکوپی و کاردیولوژی)

درمان بیماری

- تله‌تراپی
- براکی‌تراپی
- تزریق رادیوداروهای درمانی و کاهنده‌ی درد

مدیریت پرورش گیاهان

- بررسی کارایی کودهای شیمیایی
- تعیین زمان بهینه جهت کوددهی
- تعیین غلظت مناسب کودها و علف کش‌ها
- تعیین بازدهی خاک کشاورزی و میزان شوری و رطوبت آن

اصلاح ژنتیکی بذرهای کشاورزی

- افزایش میزان محصول
- بهبود ارزش مواد غذایی
- ایجاد مقاومت در برابر بیماری‌ها
- تغییر مدت لازم برای رسیدن محصول
- کاهش زمان پخت محصولات کشاورزی
- ایجاد مقاومت در برابر شوری آب و خشکی هوا

پرتودهی محصولات کشاورزی و مواد غذایی

- به تأخیر انداختن فساد مواد غذایی
- جلوگیری از جوانه زدن محصولات کشاورزی
- افزایش ماندگاری مواد غذایی و مدت انبارداری آن‌ها

مبارزه با آفات، حشرات و علف‌های هرز

- مبارزه با کرم میوه‌ها
- کنترل منطقه‌ای آفات از طریق عقیم سازی حشرات نر
- بررسی رفتارهای بیولوژیک بدن حشرات، تعیین مکان‌های تجمع و زمستان‌گذرانی و تخمین جمعیت حشرات در یک منطقه خاص از طریق به‌کارگیری ردیاب‌ها

پرورش دام، طیور و آبزیان

- پیشگیری، تشخیص و کنترل بیماری‌های دام و طیور
- ضدعفونی کردن استخرهای پرورش آبزیان
- کمک به تولید مثل آبزیان و پرورش آن‌ها
- اصلاح نژاد دام در جهت بازدهی بیشتر
- درمان بیماری‌های دام

سالیابی عناصر طبیعت

- سالیابی درختان و گیاهان و سایر موجودات زنده
- سالیابی آب‌های زیرزمینی
- سالیابی صخره‌ها و کوه‌ها

شناسایی و سنجش میزان آلودگی‌های محیطی

- سنجش میزان آلودگی ایجاد شده توسط فاضلاب‌های صنعتی
- سنجش میزان انواع آلاینده‌ها و گرد و غبار موجود در هوا
- سنجش میزان بخارات موجود در هوا

مدیریت خاک

- اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی شن ساحل دریاها و رودخانه‌ها
- سنجش بازدهی زمین‌های کشاورزی
- اندازه‌گیری رطوبت و شوری خاک
- بررسی فرسایش خاک

مدیریت آب

- بررسی دینامیک کانال‌ها و مخازن طبیعی و مصنوعی آب و اندازه‌گیری میزان جریان و رسوب دریاها و اقیانوس‌ها
- تعیین ارتباط بین آب‌های سطحی و سفره‌های آب زیرزمینی
- ردیابی آب‌های زیرزمینی

پالایش آلودگی‌های حاصل از واحدهای صنعتی

- حذف PAH، SO_2 و NO_x از گاز دودکش‌های صنعتی و تبدیل گوگرد و نیتروژن به کودهای شیمیایی
- پاکسازی لجن گنداب‌ها و سم‌زدایی از آب فاضلاب‌های صنعتی

کنترل فرآیندهای تولید و کیفیت محصولات

- سنجش میزان چگالی مواد
- سنجش سطح مایعات در مخازن و ستون‌های صنعتی
- اندازه‌گیری میزان رطوبت و بخارات آب موجود در مواد مختلف
- اندازه‌گیری ضخامت محصولات در صنایعی همچون کاغذ و پلاستیک

رادیوگرافی و انجام آزمایش‌های غیر مخرب

- تست جوش
- شناسایی مین‌های ضدنفر
- آنالیز سیمان پل‌ها، سدها و ...
- آنالیز و تحلیل اجسام و آثار فرهنگی، هنری و باستانی
- کنترل مبادلات کالا در گمرک‌ها از طریق نصب گیت‌های هسته‌ای
- ارزیابی و تست عملکرد قطعات مکانیکی شامل قطعات هواپیما، تجهیزات فضایی و اجزای مختلف در تأسیسات هسته‌ای

استرلیزاسیون

- خون
- مواد غذایی
- تجهیزات و لوازم پزشکی
- محصولات آرایشی بهداشتی

آنالیز یا تجزیه مواد

- آنالیز مواد صنعتی
- تعیین کیفیت فرآورده‌های نفتی
- آنالیز مواد اولیه و آلیاژها در صنایع مختلف

اکتشافات نفت و مواد معدنی

- تعیین میزان تخلخل یا چگالی
- تشخیص شکستگی‌های مخزن
- تعیین حرکت سیالات در مخازن
- لیتولوژی سنگ مخزن و ماتریکس سنگ
- تشخیص اشباع سیالات مخازن و تعیین لایه‌های دارای قابلیت تولید هیدروکربن

تولید انرژی

- ایجاد انفجارهای محدود و کنترل شده جهت اطفاء، حفر مخازن، خاک‌برداری وسیع و ....
- تولید انرژی متمرکز جهت جوشکاری، برش و لیتوگرافی
- تولید جریان برق مستقیم در باتری‌های اتمی
- تولید انرژی حرارتی

تغییر در ساختار مواد

- سخت کردن ساختار مواد و افزایش استحکام آن‌ها
- اصلاح و به هم بافتن ساختار مواد پلیمری
- آنیلینگ، لایه نشانی و کاشت یونی
- تخریب پیوندهای بین ملکولی

پژوهش‌های بنیادی علم شیمی

- بررسی ساختار اتمی مواد و تجزیه‌ی عناصر تشکیل دهنده آن‌ها
- بررسی کارکرد شیمیایی یا زیستی ملکول‌ها
- بررسی واکنش‌ها و ترکیبات شیمیایی
- پژوهش در حوزه علم نانو

پژوهش‌های بنیادی علم فیزیک

- پژوهش در حوزه فیزیک هسته‌ای
- پژوهش در حوزه ذرات بنیادی
- پژوهش در حوزه حالت جامد
- پژوهش در حوزه بیوفیزیک

پژوهش‌های حوزه زیست و بیولوژی

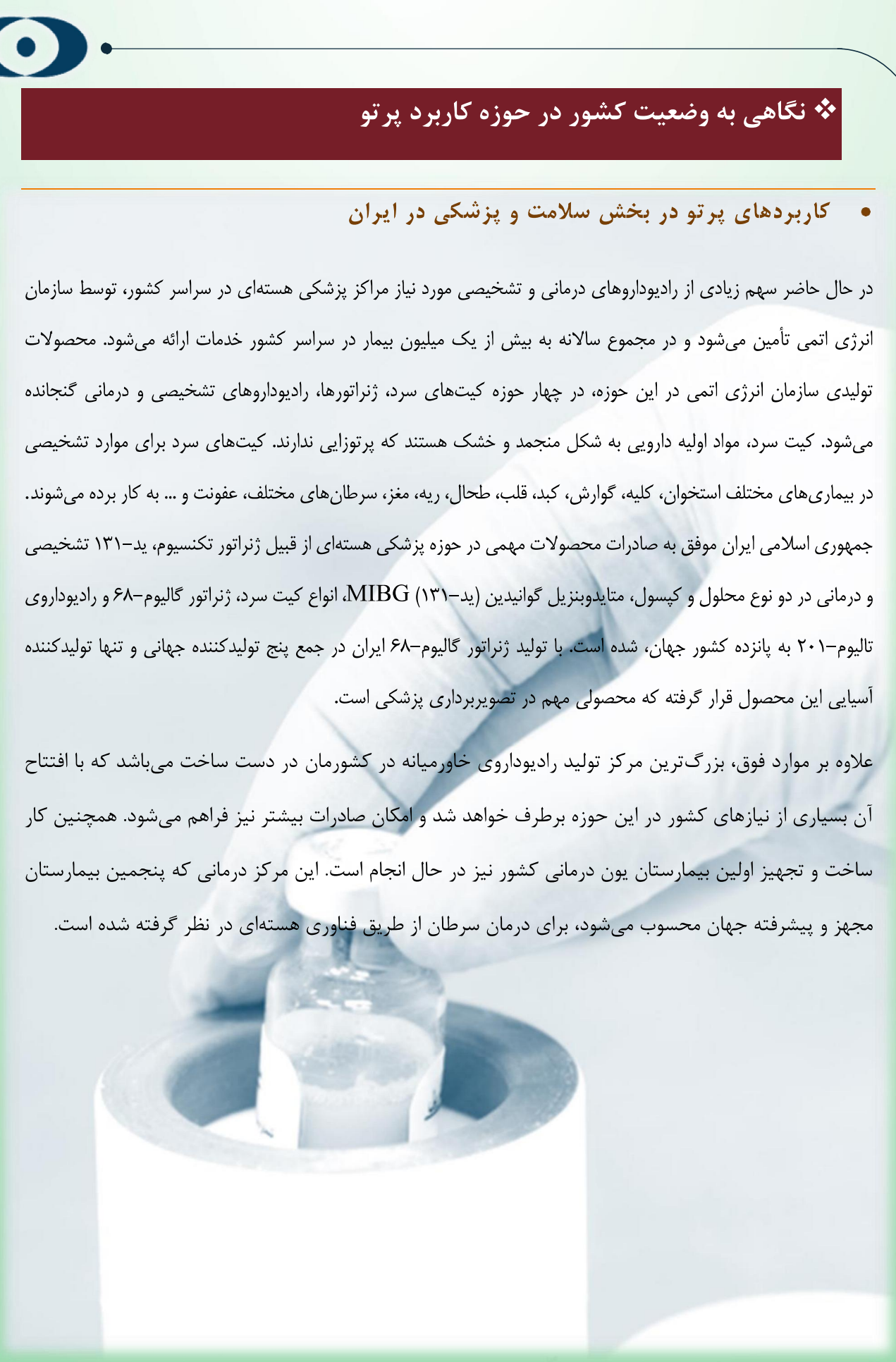
- آنالیز عناصر موجود در بافت‌های پروتئینی پیچیده و آنزیم‌های به کار رفته در تحقیقات پزشکی
- مطالعات متابولیک جهت بررسی جزئیات عملکرد ارگان‌های مختلف بدن موجودات زنده
- تست و آزمایش داروها و اطمینان از واکنش مناسب بدن به آن‌ها
- بررسی علل و درمان بیماری‌های صعب‌العلاج

❖ نگاهی به وضعیت کشور در حوزه کاربرد پرتو

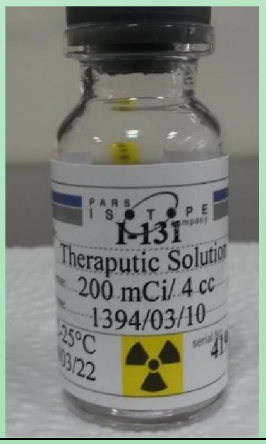
• کاربردهای پرتو در بخش سلامت و پزشکی در ایران

در حال حاضر سهم زیادی از رادیوداروهای درمانی و تشخیصی مورد نیاز مراکز پزشکی هسته‌ای در سراسر کشور، توسط سازمان انرژی اتمی تأمین می‌شود و در مجموع سالانه به بیش از یک میلیون بیمار در سراسر کشور خدمات ارائه می‌شود. محصولات تولیدی سازمان انرژی اتمی در این حوزه، در چهار حوزه کیت‌های سرد، ژنراتورها، رادیوداروهای تشخیصی و درمانی گنجانده می‌شود. کیت سرد، مواد اولیه دارویی به شکل منجمد و خشک هستند که پرتوزایی ندارند. کیت‌های سرد برای موارد تشخیصی در بیماری‌های مختلف استخوان، کلیه، گوارش، کبد، قلب، طحال، ریه، مغز، سرطان‌های مختلف، عفونت و ... به کار برده می‌شوند. جمهوری اسلامی ایران موفق به صادرات محصولات مهمی در حوزه پزشکی هسته‌ای از قبیل ژنراتور تکنسیوم، ید-۱۳۱ تشخیصی و درمانی در دو نوع محلول و کپسول، متایدوبنزیل گوانیدین (ید-۱۳۱) MIBG، انواع کیت سرد، ژنراتور گالیوم-۶۸ و رادیوداروی تالیوم-۲۰۱ به پانزده کشور جهان، شده است. با تولید ژنراتور گالیوم-۶۸ ایران در جمع پنج تولیدکننده جهانی و تنها تولیدکننده آسیایی این محصول قرار گرفته که محصولی مهم در تصویربرداری پزشکی است.

علاوه بر موارد فوق، بزرگ‌ترین مرکز تولید رادیوداروی خاورمیانه در کشورمان در دست ساخت می‌باشد که با افتتاح آن بسیاری از نیازهای کشور در این حوزه برطرف خواهد شد و امکان صادرات بیشتر نیز فراهم می‌شود. همچنین کار ساخت و تجهیز اولین بیمارستان یون درمانی کشور نیز در حال انجام است. این مرکز درمانی که پنجمین بیمارستان مجهز و پیشرفته جهان محسوب می‌شود، برای درمان سرطان از طریق فناوری هسته‌ای در نظر گرفته شده است.



تصویری از مرکز تولید رادیودارو

کپسول تشخیصی و درمانی ید-۱۳۱	بسته‌بندی رادیوداروی ^{131}I-MIBG
	
ویال محلول خوراکی ید-۱۳۱	ویال رادیوداروی درمانی ^{131}I-MIBG

تصویر برخی از رادیوداروهای تولید شده در سازمان انرژی اتمی

ساماریوم-۱۵۳ لکسیدرونام

دوتاتات لوتشیوم-۱۷۷

ید-۱۳۱ (کپسول و محلول خوراکی)

ید-۱۳۱ ^{131}I-MIBG

گالیم-۶۷ و تالیوم-۲۰۱

تصویر برخی از رادیوداروهای تولید شده در سازمان انرژی اتمی

ژنراتور استریل $^{62}Zn/^{62}Cu$	ژنراتور استریل $^{99}Mo/^{99m}Tc$
ژنراتور گازی کریپتون-۸۱	ژنراتور استریل $^{68}Ge/^{68}Ga$
ژنراتور $^{188}W/^{188}Re$	ژنراتور $^{99}Mo/^{99m}Tc$ بر پایه ژل

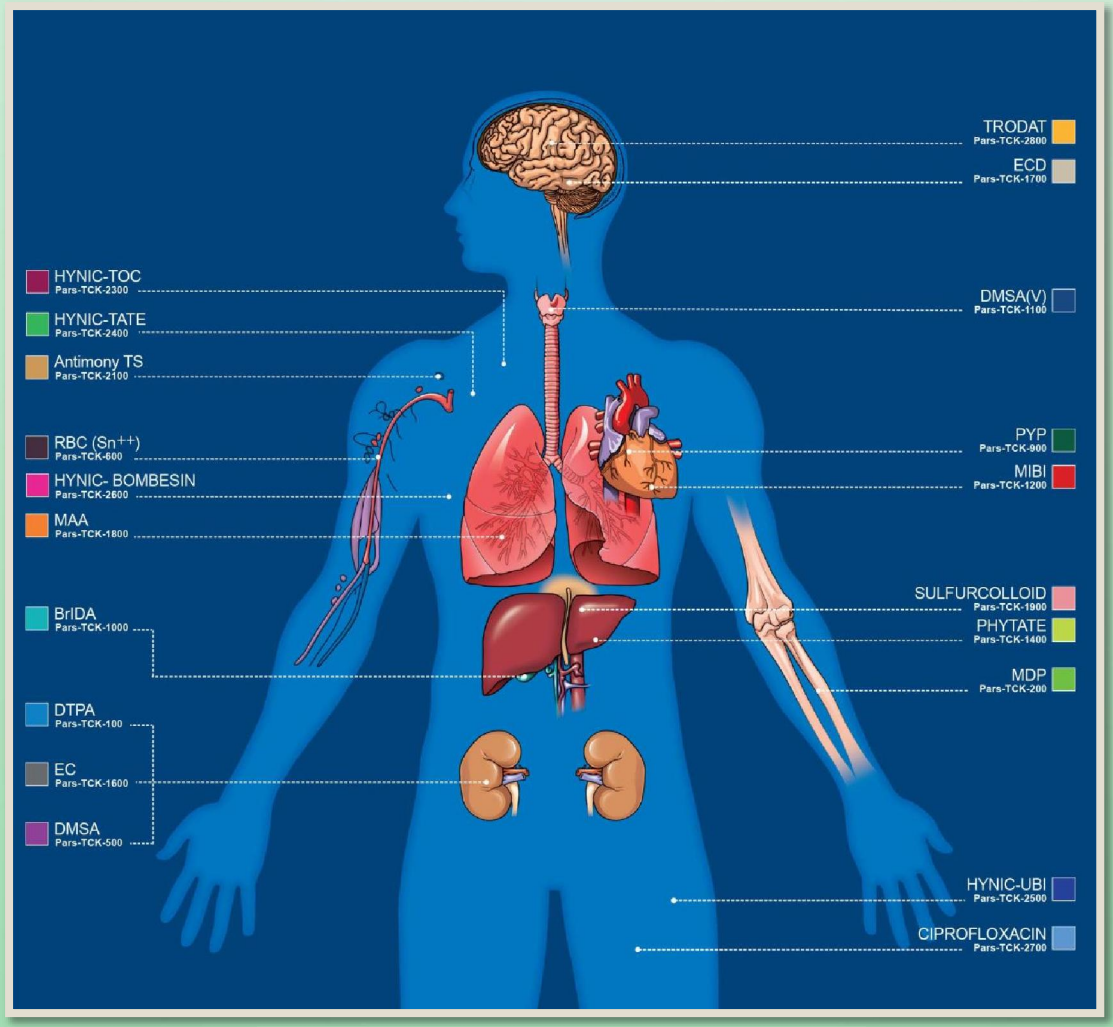
ژنراتورهای تولیدکننده رادیوایزوتوپ‌ها ساخته شده در سازمان انرژی اتمی

برخی از رادیوداروهای تولید شده توسط سازمان انرژی اتمی

ردیف	نام محصول	نوع	کاربرد
۱	کپسول ید-۱۳۱	تشخیصی و درمانی	تشخیص و درمان بیماری‌های تیروئید مثل سرطان و پرکاری تیروئید
۲	دی‌استیل بیس (متیل تیوسمی کاربازون) نشاندار شده با مس-۶۴	تشخیصی	تصویربرداری و پزشکی قلب
۳	F-18 فلوئورو دی‌اکسی گلوکز	تشخیصی	سرطان‌شناسی، عصب‌شناسی و تصویربرداری از مغز
۴	گالیم-۶۷ سیترات	تشخیصی	شناسایی عفونت، تورم و تومورهای مختلف
۵	متایدوبنزیل گوانیدین (ید-۱۳۱) MIBG	تشخیصی	تشخیص برخی تومورها
۶	کلراید تالیوم (تالیوم-۲۰۱)	تشخیصی	تصویربرداری از قلب
۷	محلول سدیم یدید (ید-۱۳۱)	درمانی	درمان تیروئید و کاربردهای تحقیقاتی
۸	متایدوبنزیل گوانیدین (ید-۱۳۱) MIBG	درمانی	درمان بیماری‌های تیروئید مثل سرطان و پرکاری تیروئید
۹	کلوئید کرومیک فسفات (فسفر-۳۲)	درمانی	کاهش التهاب مفاصل
۱۰	سدیم اورتوفسفات (فسفر-۳۲)	درمانی	تسکین درد استخوانی
۱۱	فسفات تترامتیلن دی‌آمین اتیلن لوتشیوم-۱۷۷	درمانی	تسکین درد استخوانی
۱۲	رنیوم-۱۸۶ سولفید	درمانی	کاهش التهاب مفاصل با اندازه متوسط
۱۳	رنیوم -۱۸۶ اتیدرونات	درمانی	تسکین درد استخوانی
۱۴	رنیوم -۱۸۸ اتیدرونات	درمانی	تسکین درد استخوانی
۱۵	رنیوم-۱۸۸ سولفید	درمانی	کاهش التهاب مفاصل با اندازه بزرگ
۱۶	ساماریوم-۱۵۳ لکسیدرونام	درمانی	تسکین درد استخوانی
۱۷	ایتریم-۹۰ هیدروکسی آپاتیت	درمانی	معالجه روماتیسم مفصلی، هموفیلی یا مشکلات مفصلی
۱۸	ایتریم-۹۰ سیترات	درمانی	معالجه روماتیسم مفصلی زانو، هموفیلی یا مشکلات مفصلی

انواع ژنراتورهای تولید شده توسط سازمان انرژی اتمی

ردیف	نام محصول	کاربرد
۱	ژنراتور استریل $^{99}Mo/^{99m}Tc$	تشخیص بیماری‌های مختلف
۲	ژنراتور $^{99}Mo/^{99m}Tc$ بر پایه ژل	تشخیص بیماری‌های مختلف
۳	ژنراتور استریل $^{62}Zn/^{62}Cu$	تصویربرداری
۴	ژنراتور استریل $^{68}Ge/^{68}Ga$	تصویربرداری
۵	ژنراتور گازی کریپتون-۸۱	تشخیص بیماری‌های ریه
۶	ژنراتور $^{188}W/^{188}Re$	کاربردهای تشخیصی و درمانی

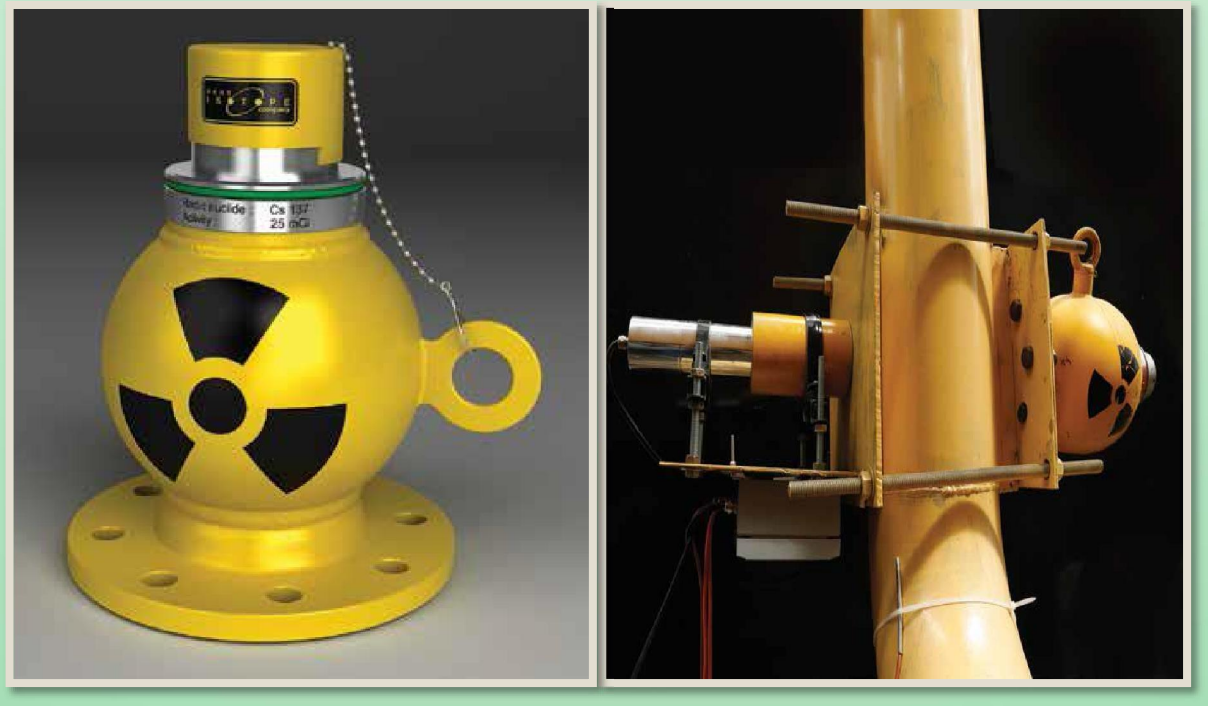


انواع کیت‌های سرد ساخت سازمان انرژی اتمی

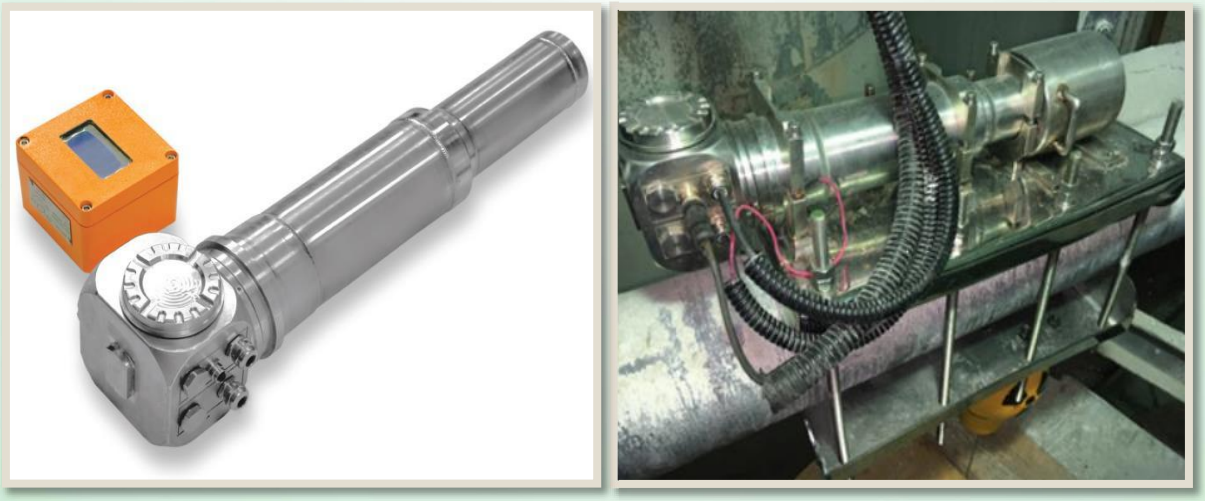
• کاربردهای پرتو در بخش صنعت و خدمات

سازمان انرژی اتمی توانسته است در زمینه تولید چشمه‌های صنعتی پرتوزای مورد نیاز کشور و همچنین ساخت دستگاه‌های اندازه‌گیری (چگالی سنج، ارتفاع‌سنج، سطح سنج و غیره) گام‌های مهمی در جهت رفع نیاز صنایع مختلف از جمله نفت، پتروشیمی، فولاد و استخراج کانی‌های معدنی بردارد. از جمله مهم‌ترین اقدامات صورت گرفته در این بخش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تولید چشمه‌های کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷ و کادمیوم-۱۰۹؛
- ساخت چشمه‌های صنعتی ایریدیوم-۱۹۲ جهت ارائه خدمات در زمینه تصویربرداری صنعتی و تست‌های غیرمخرب؛
- ساخت انواع سطح سنج هسته‌ای (سطح سنج هسته‌ای نقطه‌ای، سطح سنج هسته‌ای پیوسته، چگالی-سطح سنج هسته‌ای، سطح‌سنج هسته‌ای مواد مذاب)؛
- تولید انواع چشمه‌های کنترلی و کالیبراسیون (برای اندازه‌گیری صحت و دقت دستگاه‌های مورد استفاده)؛
- ساخت دستگاه نشت یاب صنعتی (نشت‌یابی خط لوله زیرزمینی نفت با استفاده از ردیاب رادیواکتیو برم-۸۲).

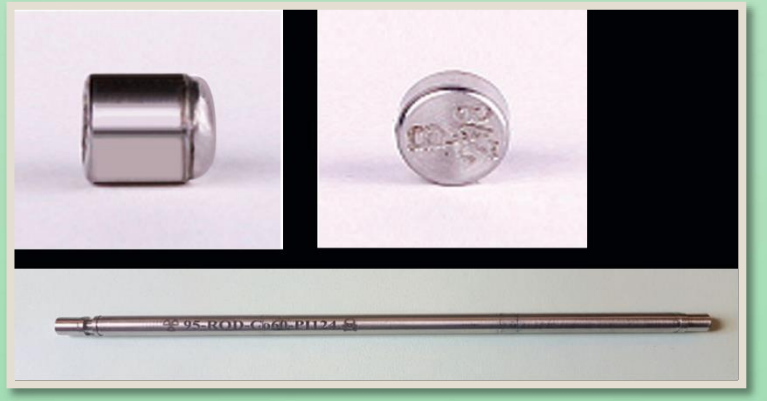


سیستم اندازه‌گیری هسته‌ای

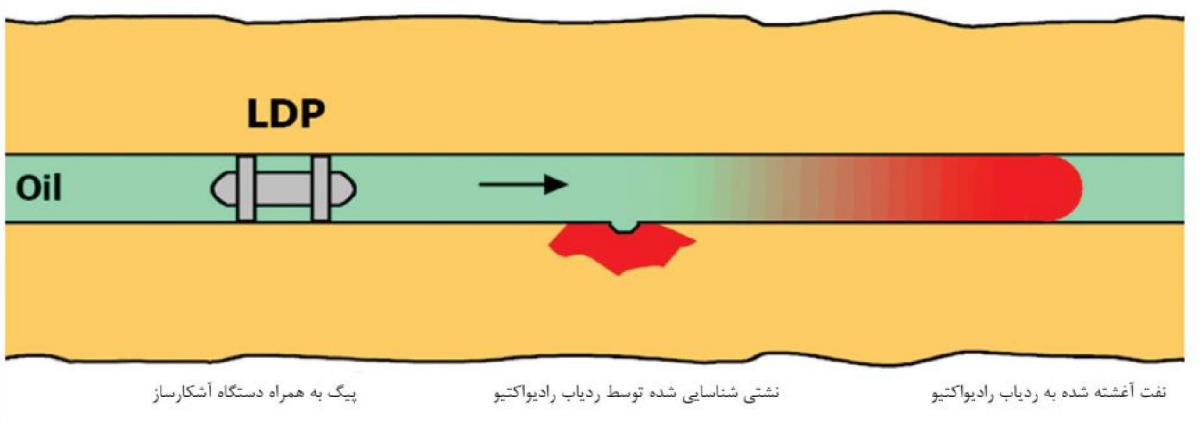


چگالی- سطح‌سنج هسته‌ای

سطح‌سنج هسته‌ای مواد مذاب



نمونه چشمه نقطه‌ای و چشمه خطی



دستگاه نشت‌یاب صنعتی

• کاربردهای پرتو در بخش کشاورزی، دامداری، محیط زیست

در این حوزه، سازمان انرژی اتمی به بهبود خصوصیات کمی و کیفی خاک، آب و تولیدات زراعی، باغی و دامی با استفاده از فناوری هسته‌ای پرداخته است. برخی از مهم‌ترین توانمندی‌ها و دستاوردهای سازمان انرژی اتمی در این بخش عبارت است از:

- اصلاح و تولید ارقام مهم گیاهان زراعی، باغی، زینتی، دارویی، مرتعی و جنگلی با استفاده از پرتو گاما با توجه به شرایط طبیعی (خشکی، شوری، آفات و سایر فعالیت‌ها) مانند گندم، برنج، پنبه، نارنگی بدون هسته، موز و گل رز؛
- کنترل آفات و حشراتی مانند پشه آنوفل، مگس مدیترانه، مگس زیتون و کرم گلوگاه انار؛
- افزایش انبارمانی و کاهش ضایعات محصولات کشاورزی مانند بادام، پسته، گردو، پیاز، خرما، انار، سیب‌زمینی، سیر و ... از طریق استفاده از پرتوهای ایکس، گاما و باریکه الکترونی؛
- تشخیص و کنترل بیماری‌های دام، طیور و آبزیان از طریق تولید انواع واکسن رادیودارویی مانند واکسن بیماری تب برفکی و لکه سفید میگو؛
- بهبود خصوصیات کمی و کیفی آبزیان از طریق تولید ماهیان تک جنسیتی با استفاده از روش پرتودهی گاما مانند تک جنسی کردن

نژاد پنبه اصلاح شده با پرتودهی

نارنگی با هسته‌های کمتر ناشی از پرتودهی بذرهای آن

ماهی قزل‌آلا با هدف افزایش تولید تخم ماهی (خاویار)؛

- اصلاح ژنتیک جانوران.

پرتودهی پسته جهت افزایش زمان ماندگاری

استفاده از پرتو گاما در ایجاد برنج اصلاح شده ژنتیکی مقاوم به بیماری

استفاده از پرتو گاما در ایجاد گندم اصلاح شده ژنتیکی مقاوم به خوابیدگی

پرتودهی سیب سبز توسط پرتوی گاما جهت افزایش زمان ماندگاری

❖ سامانه‌های پرتودهی

گسترش سامانه‌های پرتودهی با توجه به رشد جمعیت کشور و افزایش نیاز به تولیدات دامی و کشاورزی، تجهیزات پزشکی و محصولات بهداشتی یک ضرورت ملی است. از سوی دیگر با استفاده از سامانه‌های پرتودهی می‌توان به بهبود کیفیت محصولات و گسترش صادرات آن‌ها کمک نمود. هم‌اکنون ایران دارای سه سامانه پرتودهی با چشمه گاما در تهران، شهرکرد و بناب و دو سامانه پرتودهی با شتاب‌دهنده الکترونی در یزد و قزوین و یک سامانه پرتودهی قابل حمل با چشمه گاما است. علاوه بر این موارد، ساخت ۱۲ مرکز پرتودهی در کشور نیز برنامه‌ریزی شده است که طی سال‌های آینده دنبال خواهد شد.

• سامانه پرتودهی گامای تهران

مجموعه پرتودهی مستقر در تهران در سال ۱۳۶۴ احداث و راه‌اندازی گردیده و مجهز به سیستم پرتودهی با چشمه گاما است. در راستای کنترل کیفی خدمات ارائه شده، این مرکز مجهز به آزمایشگاه‌هایی برای کنترل بار میکروبی، تعیین حداکثر و حداقل دُز مناسب برای پرتودهی، تعیین مقاومت قطعات و مواد پلیمری در برابر پرتو و کنترل کیفیت پرتودهی می‌باشد.

نمایی از مرکز تابش گامای تهران

نمایی از یک مرکز پرتودهی با شتابدهنده الکترونی

• سامانه پرتودهی گامای شمال غرب کشور (شهر بناب)

اولین تأسیسات پرتودهی گاما با طراحی و ساخت کاملاً بومی، در شهر بناب استان آذربایجان شرقی در سال ۱۳۹۴ به بهره‌برداری رسیده است. چشمه بکار رفته در این سامانه، کبالت-۶۰، با ظرفیت سالانه پرتودهی ۹۰ هزار مترمکعب محصولات است. در این سامانه به دلیل استفاده از فناوری‌های جدیدتر نسبت به سامانه گامای تهران، امکان پرتودهی بالاتر و در حالت‌های مختلف و دزهای پایین‌تر نیز وجود دارد.

سامانه پرتودهی شهر بناب

• سامانه پرتودهی یزد

مرکز پرتودهی یزد در سال ۱۳۷۷ تأسیس شده و دارای یک شتاب‌دهنده حلقوی الکترون با دو خروجی ۵ و ۱۰ مگاالکترون ولت است. مرکز دارای آزمایشگاه‌های مختلف جهت کنترل کیفیت و تعیین دز مناسب پرتودهی برای مواد مختلف است. در مجموع ظرفیت پرتودهی در دو مرکز تابش گامای تهران و مرکز پرتودهی یزد حدود ۳۶ هزار مترمکعب در سال است.

نمونه محصولات پرتودهی شده

تولید چسب‌زخم شفابخش تحت عنوان هیدروژل با استفاده از فناوری هسته‌ای محصول مرکز پرتودهی یزد است. هیدروژل می‌تواند به عنوان یک پانسمان استفاده شود که حدود ۹۰ درصد آن آب است و با استفاده از آن، رطوبت و اکسیژن رسانی به زخم بهتر خواهد شد و می‌تواند ترشحات زخم را جذب کند.

هیدروژل، یکی از محصولات مرکز پرتودهی یزد برای بهبود بهتر

مرکز پرتودهی یزد

• مرکز پرتودهی شهرکرد

سامانه پرتودهی شهرکرد توسط بخش خصوصی بنا شده و بزرگ‌ترین تأسیسات پرتودهی چندمنظوره گاما در ایران است. در این سامانه از چشمه کبالت-۶۰ استفاده شده است. این مرکز برای ارائه طیف گسترده‌ای از خدمات مانند سترون‌سازی محصولات پزشکی یک‌بارمصرف و پرتودهی مواد غذایی طراحی و برنامه‌ریزی شده است. یکی از مزایای مرکز پرتودهی شهرکرد، نزدیکی به مراکز صنعتی و بهداشتی و سازندگان محصولات پزشکی استان اصفهان می‌باشد. ایجاد آزمایشگاه‌های تحقیقاتی برای دانشجویان و آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری دز، میکروب‌شناسی و پلیمر با تجهیزات پیشرفته از جمله امکانات جانبی این تأسیسات پرتودهی است.

نمای بیرونی مرکز پرتودهی شهرکرد

• سامانه پرتودهی قابل حمل گاما

دستگاه پرتودهی قابل حمل گاما برای پرتودهی محصولات کشاورزی، به طور خاص غلات و حبوبات مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. چشمه گامای استفاده شده در این دستگاه، کبالت-۶۰ است که برای پرتودهی محصولاتی همچون گندم، جهت کاهش بار میکروبی و افزایش مدت انبارداری مناسب است.

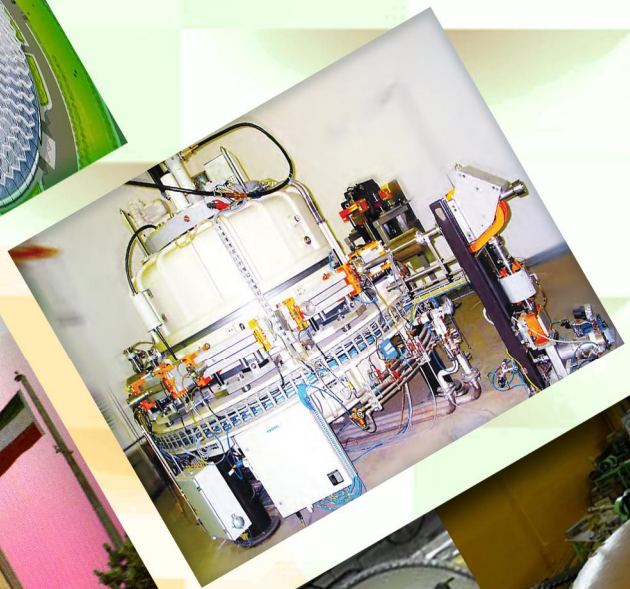
دستگاه پرتودهی قابل‌حمل گاما

• مرکز پرتو فرآیند نوین قزوین

شتاب‌دهنده از نوع الکترونی حلقوی با توان ۱۰۰ کیلووات و انرژی ۱۰ مگا الکترون‌ولت به دست متخصصان داخلی در قزوین ساخته‌شده و قادر است باریکه الکترون و پرتو ایکس را برای مصارف و کاربردهای متنوع تولید کند.

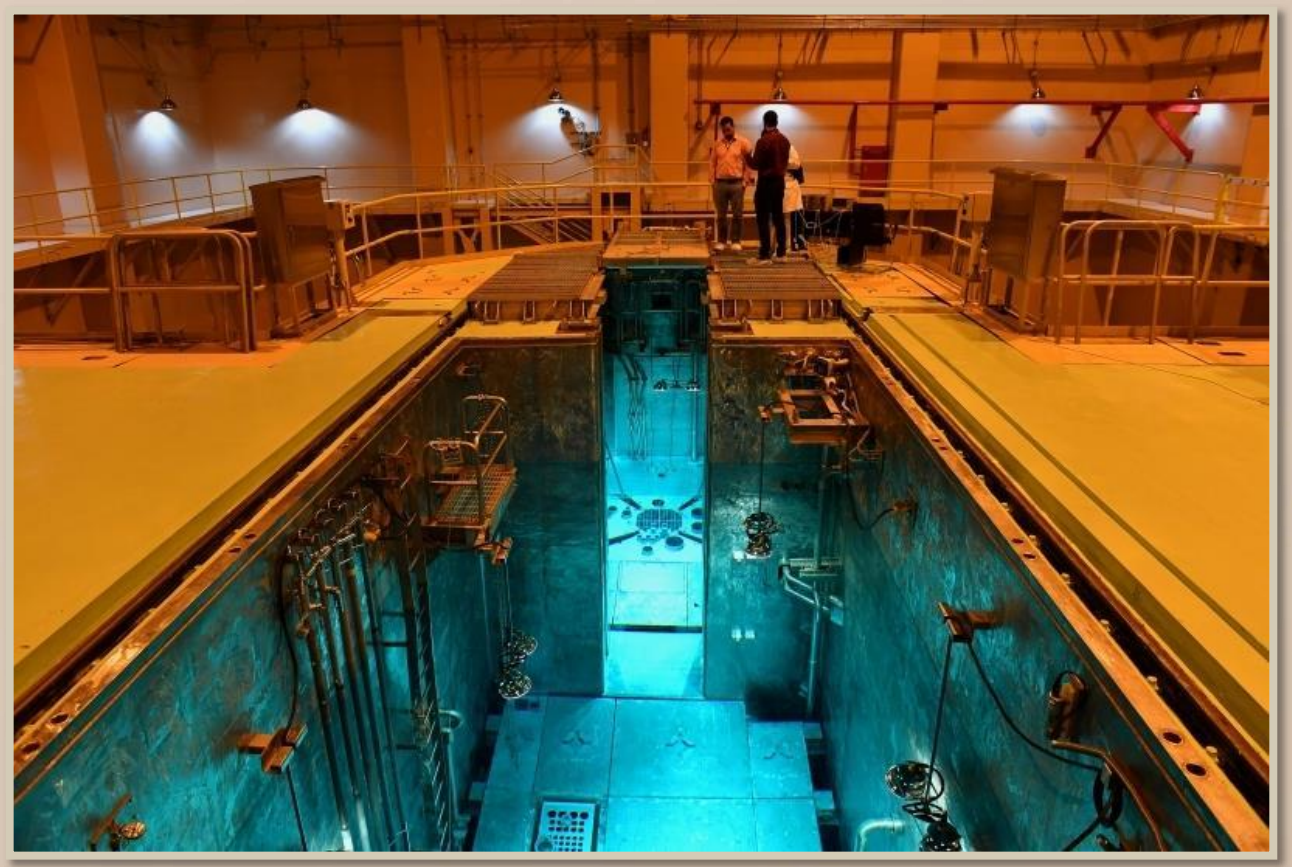
با توجه به توان بالای شتاب‌دهنده به کار رفته در این مرکز، حجم بالاتری از محصولات در مقایسه با سامانه‌های پرتودهی گامای تهران و بناب قابل پرتودهی است.

راکتورهای تحقیقاتی و شتابدهنده ها



❖ راکتورهای تحقیقاتی و کاربردهای آن

راکتورهای تحقیقاتی عمدتاً به عنوان منبع تولید نوترون و در جهت اهداف آموزشی و تحقیقاتی، تولید انواع رادیوایزوتوپ و رادیودارو، آنالیز مواد، تست سوخت هسته‌ای و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. راکتورهای تحقیقاتی، ساختار ساده‌تری نسبت به راکتورهای قدرت دارند و عموماً توان حرارتی تولیدی آن‌ها نسبت به راکتورهای قدرت بسیار کمتر است. راکتورهای تحقیقاتی میزان سوخت کمتری نیاز دارند اما میزان غنا یا درصد ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ موردنیاز آن‌ها اغلب بالا است. در راکتورهای تحقیقاتی مشابه راکتورهای قدرت، برای برداشت حرارت تولید شده در اثر شکافت هسته‌ای، به ماده خنک‌کننده نیاز است. رایج‌ترین راکتورهای تحقیقاتی در جهان، از نوع استخری هستند که سوخت آن در درون استخر آب قرار می‌گیرد.



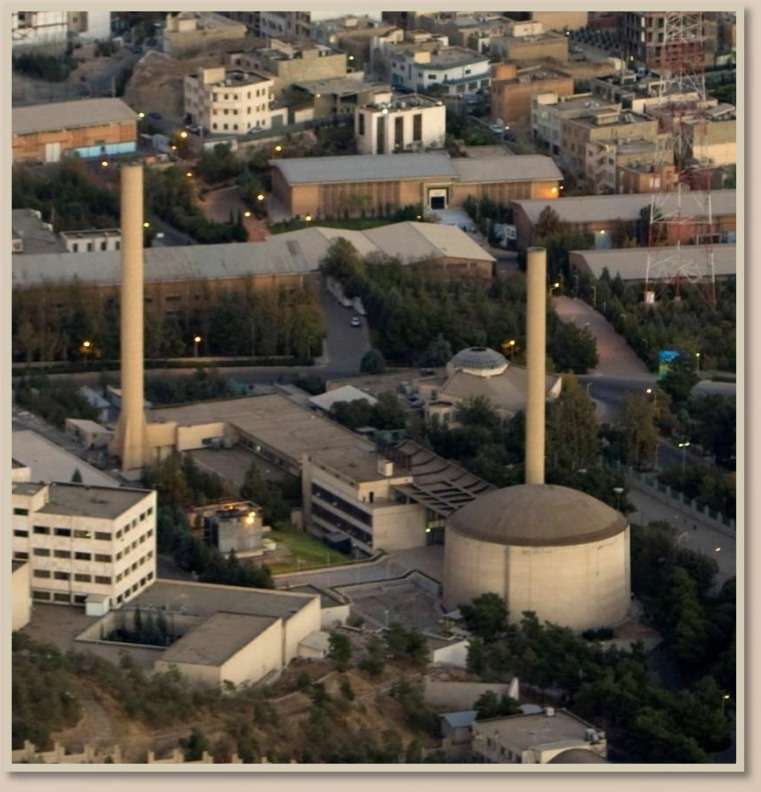
تصویر یک راکتور تحقیقاتی از نوع استخری

۲-۱ راکتورهای تحقیقاتی در ایران

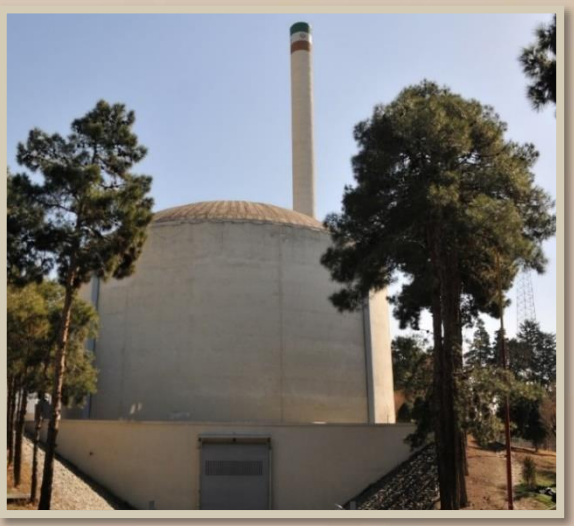
- **راکتور تحقیقاتی تهران**

فعالیت راکتور تحقیقاتی تهران از سال ۱۳۴۶ با هدف تحقیقات بنیادی، تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد نیاز، تست و آنالیز مواد، تست سوخت هسته‌ای و همچنین آموزش نیروی انسانی آغاز گردیده است. این راکتور تحقیقاتی از نوع استخری با قدرت ۵ مگاوات حرارتی، دارای خنک‌کننده آب سبک و سوخت اورانیوم با غنای ۲۰ درصد است.

در سال ۱۳۹۶، علاوه بر بازسازی این راکتور، مدار آزمایش سوخت هسته‌ای نخستین بار برای بررسی تاب‌آوری سوخت تولیدی جهت استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای، در این مجموعه ایجاد و نصب شده است.



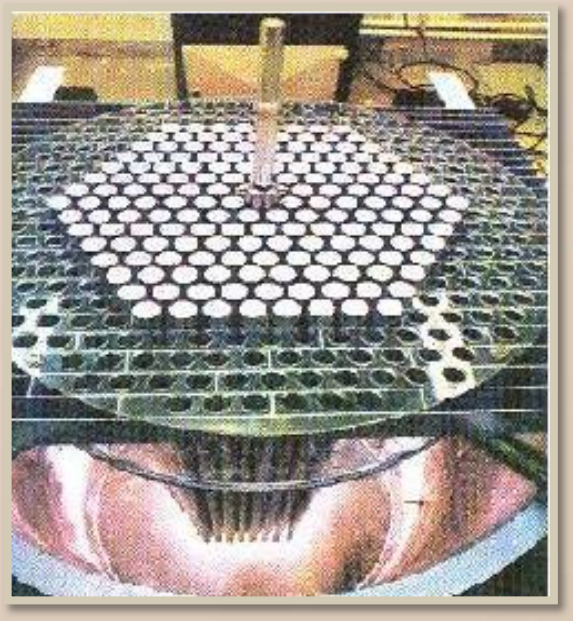
راکتور تحقیقاتی تهران



راکتور تحقیقاتی تهران

• راکتورهای تحقیقاتی در مرکز فناوری هسته‌ای اصفهان

مرکز فناوری هسته‌ای اصفهان دارای ۳ راکتور تحقیقاتی فعال با نام‌های راکتور زیر بحرانی آب سبک، راکتور آب سنگین قدرت صفر و راکتور مینیاتوری چشمه نوترونی و یک راکتور برچیده شده با نام راکتور گرافیتی زیربحرانی است. در کنار این راکتورها آزمایشگاه‌های متعدد تحقیقاتی تاسیس شده است که به همراه راکتورهای تحقیقاتی می‌توانند در اغلب پروژه‌های تحقیقاتی، علمی و کاربردی به عنوان ابزاری مناسب مورد استفاده قرار گیرند. این راکتورها جهت آموزش نیروی انسانی، تحقیق و پژوهش در مورد فیزیک راکتورهای هسته‌ای، آنالیز و تست مواد و سایر موارد تحقیقاتی کاربرد دارند.



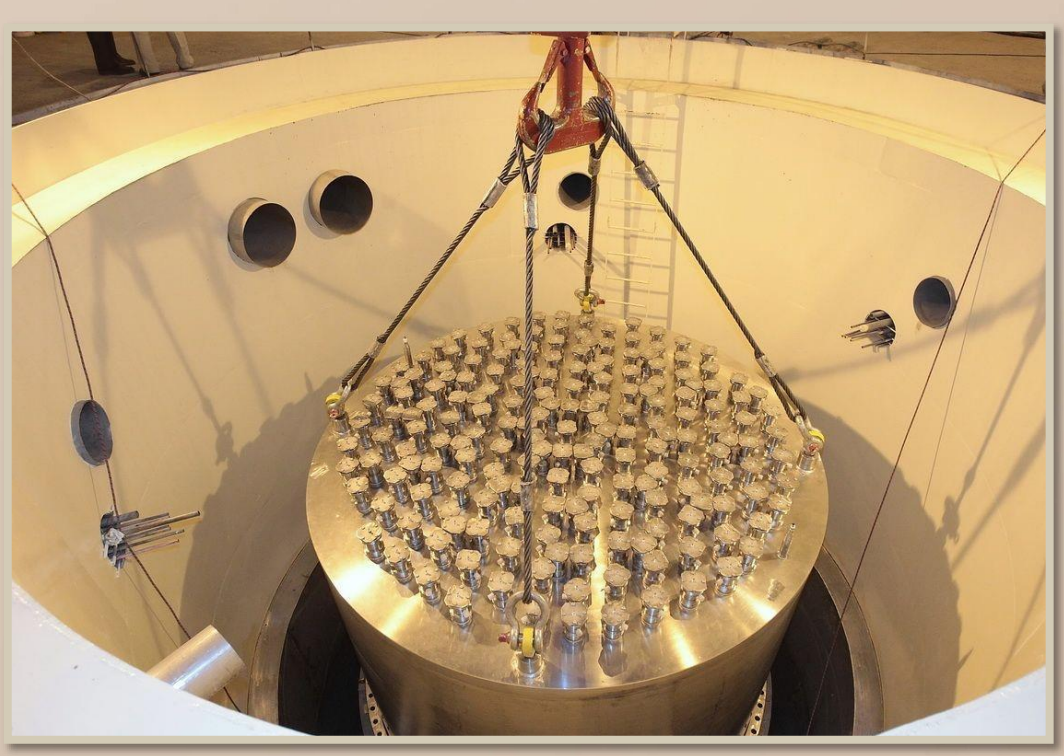
نمایی از راکتور زیر بحرانی آب سبک

نمایی از راکتور تحقیقاتی صفر قدرت

- **راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک**

نمای بیرونی راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک

راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک با قدرت ۲۰ مگاوات و با سوخت اکسید اورانیوم با غنای ۳/۶۷ درصد درحال ساخت است که در آن از آب سنگین به عنوان خنک‌کننده و کندکننده استفاده می‌شود. این راکتور جهت تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی و صنعتی، امور تحقیقاتی، تست مواد و سوخت هسته‌ای و آموزش به کار گرفته خواهد شد و جایگزین مناسبی برای راکتور تهران است. یکی از ایزوتوپ‌های وارداتی کشور کبالت-۶۰ است که در راکتور آب سنگین اراک امکان تولید این ایزوتوپ فراهم خواهد شد. فعالیت‌های مربوط به ساخت این راکتور توسط متخصصین داخلی در حال انجام است.

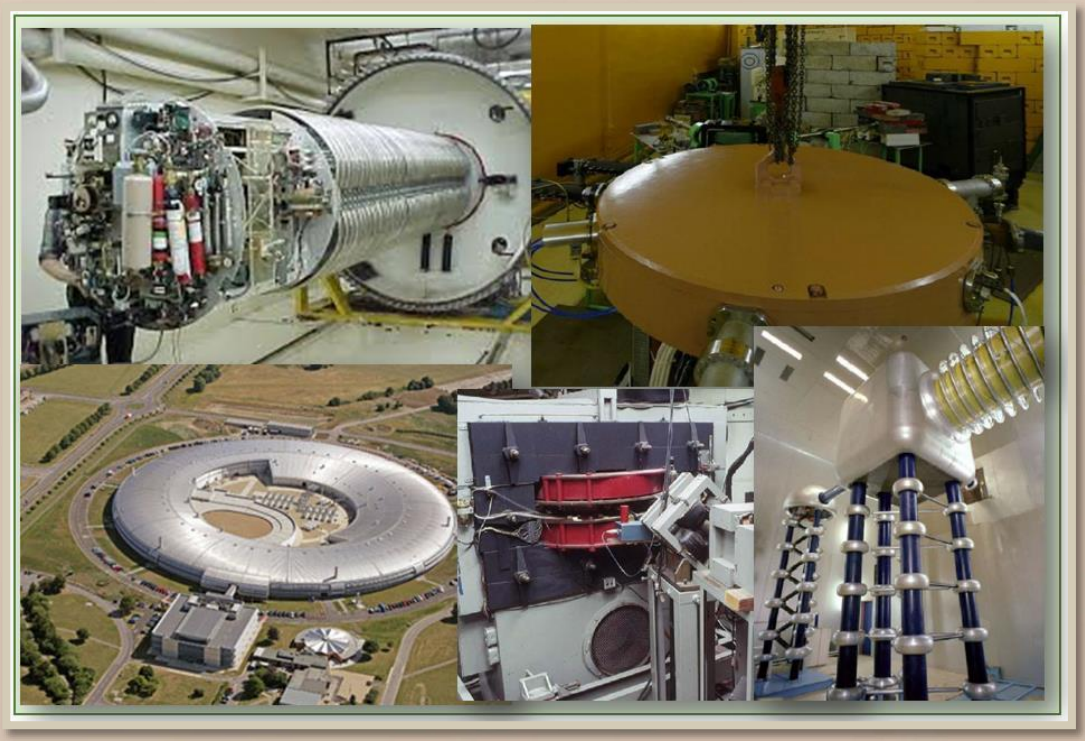


نمای داخلی راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک

❖ شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آن‌ها

شتاب‌دهنده، دستگاهی است که در آن ذرات باردار مثل الکترون، پروتون و یون‌ها به وسیله میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی تا سرعت‌های بسیار زیادی شتاب داده می‌شوند. همچنین پرتوهای ایکس نیز می‌توانند برای کاربردهای خاص توسط شتاب‌دهنده، تولید شود. در حال حاضر انواع گوناگونی از شتاب‌دهنده‌ها در ابعاد مختلف و با محدوده‌های انرژی متفاوت برای کاربردهای متنوع ساخته شده است.

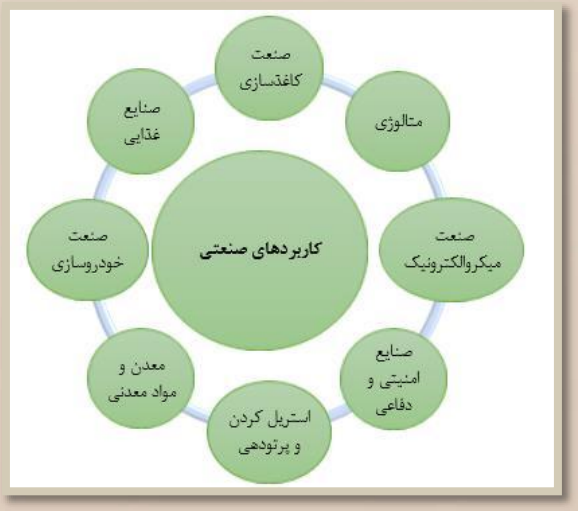
یک نوع شتاب‌دهنده برای درمان سرطان در کشور چین



برخی از انواع شتاب‌دهنده‌های مورد استفاده

۲-۲ کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها

شتاب‌دهنده‌ها در بسیاری از صنایع کاربرد دارند و کاربرد آن‌ها در حال گسترش است. شتاب‌دهنده‌ها علاوه بر صنعت در حوزه پزشکی، تحقیقات و محیط‌زیست نیز کاربردهای گسترده‌ای دارند. در این قسمت به برخی از این موارد اشاره می‌شود.



- تحقیقات فیزیک ذرات، زیست‌شناسی، پزشکی، شیمی محیط‌زیست، علم مواد، علوم زیستی و غیره؛
- استفاده از باریکه الکترون و پرتو ایکس تولیدی برای از بین بردن تومورهای سرطانی در بدن بیماران؛
- استفاده از پرتوی ایکس تولیدی برای درمان و تصویربرداری؛
- استفاده از پروتون‌های پرشتاب برای درمان تومورها؛
- تولید رادیوداروهای تشخیصی با نیمه عمر کوتاه؛
- تولید نوترون کم انرژی برای مقاصد درمانی (پروتون شتاب گرفته در شتاب‌دهنده در برخورد با ماده هدف، تولید نوترون می‌کند.)؛
- استفاده از پرتو ایکس تولیدی در تصویربرداری صنعتی و تست‌های غیر مخرب؛
- استریل یا سِتَروَن کردن مواد غذایی و لوازم پزشکی یکبار مصرف؛
- کنترل و بازرسی در مبادی گمرکی؛
- پرتودهی محصولات پلیمری و بهبود پیوندهای پلیمری در صنایع تولید سیم و کابل؛
- تصفیه گازهای آلوده، تصفیه پسماندهای شهری، صنعتی و بیمارستانی و پاک‌سازی آب‌ها و خاک‌های آلوده؛
- آنالیز مواد.

شتاب‌دهنده خطی الکترونی مورد استفاده در درمان سرطان

شتاب‌دهنده صنعتی الکترون با انرژی ۸۰۰ کیلوالکترون ولت جهت پرتودهی کابل

شتاب‌دهنده خطی الکترونی مورد استفاده در گمرک

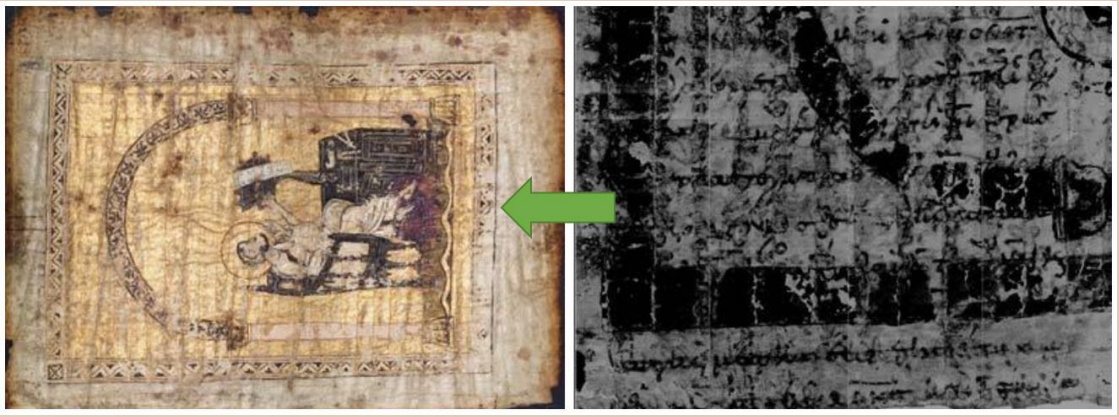
۲-۳ آشنایی با شتاب‌دهنده‌های سینکروترون و سیکلوترون

با توجه به اقدامات کشور در حوزه ساخت شتاب‌دهنده‌ها، در این بخش با دو شتاب‌دهنده زیر به‌صورت مختصر آشنا می‌شویم.

۲-۳-۱ شتاب دهنده سینکروترون

سینکروترون یک شتاب‌دهنده حلقوی نسبتاً پیچیده و بزرگ است که در آن به یک ذره باردار شتاب داده می‌شود و حرکت آن تا رسیدن به نزدیکی سرعت نور و گسیل تابش الکترومغناطیسی کنترل می‌شود. این شتاب‌دهنده با توجه به طیف وسیعی از انرژی که تولید می‌کند، جهت مقاصد تحقیقاتی در بسیاری از زمینه‌ها و برخی کاربردهای دیگر مانند ترمیم اسناد باستانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شتاب‌دهنده از نوع سینکروترون



ترمیم اسناد باستانی با استفاده از شتاب‌دهنده

۲-۳-۲ شتاب دهنده سیکلوترون

سیکلوترون‌ها معمولاً با انرژی چند مگاالکترون‌ولت تا چند گیگاالکترون‌ولت و عمدتاً جهت مقاصد پزشکی طراحی و ساخته می‌شوند. این شتاب‌دهنده برای تولید رادیوداروهای موردنیاز در فرآیند تصویربرداری هسته‌ای یا شتاب دادن پروتون جهت درمان تومورهای سرطانی بکار می‌رود.

شتاب‌دهنده از نوع سیکلوترون

۴-۲ پروژه‌های طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌ها در ایران

➢ طراحی و ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون پزشکی

نمونه‌ای از این شتاب‌دهنده توسط بخش خصوصی و نمونه دیگری در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی و با همکاری دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه شهید بهشتی و سازمان انرژی اتمی ساخته شده است. تست اولیه این شتاب‌دهنده با موفقیت انجام شده است.

➢ طرح چشمه نور ایران (شتابگر ملی ایران)

طرح چشمه نور ایران در شهر قزوین با هدف تحقیقات نانو فناوری و مطالعات بین رشته‌ای آغاز شده است. ساخت این مرکز و تجهیزات مربوطه در داخل کشور در حال انجام است. این مرکز شتاب‌دهنده‌ای از نوع سینکروترون دارد و باریکه‌ای با حداکثر انرژی ۳ گیگاالکترون‌ولت را تولید خواهد کرد و محیط سیستم اصلی شتاب‌دهنده ۵۲۸ متر خواهد بود.

طرح چشمه نور ایران

➢ طراحی و ساخت شتاب‌دهنده الکترون حلقوی ۱۰ مگاالکترون‌ولت

مرکز پرتودهی قزوین یک شتاب‌دهنده الکترون حلقوی ۱۰ مگاالکترون‌ولت دارد که کاملاً بومی‌سازی شده و توسط متخصصین داخلی، با توجه به تجربه حاصل از شتاب‌دهنده مرکز پرتودهی یزد طراحی و ساخته شده است.

شتاب‌دهنده الکترون حلقوی

➢ طراحی و ساخت شتاب‌دهنده سیکلوترون ۱۰ مگاالکترون‌ولت

طراحی و ساخت شتاب‌دهنده سیکلوترون ۱۰ مگاالکترون‌ولت برای تولید رادیوداروی فلوئور–۱۸ در حال انجام است. این رادیودارو برای تصویربرداری هسته‌ای در بیمارستان‌ها مورد نیاز است و در حال حاضر در سیکلوترون مرکز کرج سازمان انرژی اتمی تولید می‌شود.

شتاب‌دهنده سیکلوترون مرکز کرج

➢ شتاب‌دهنده واندوگراف تهران

اولین شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ایران در اوایل دهه ۱۳۵۰ در سازمان انرژی اتمی ایران نصب شد و فعالیت‌های مرتبط با فیزیک هسته‌ای تجربی و آنالیز با باریکه یونی بخش اساسی فعالیت آن است. این روش آنالیز روشی غیرمخرب، سریع (۱ تا ۱۰ دقیقه)، حساس و مقرون‌به‌صرفه است.

حداکثر انرژی این شتاب‌دهنده، ۳ مگاالکترون‌ولت است و می‌تواند یون‌های هیدروژن، دوتریوم و هلیوم را شتاب دهد.

خطوط باریکه خروجی از شتاب‌دهنده واندوگراف تهران

در این روش آنالیز با تاباندن باریکه‌ای از یون‌ها با انرژی چند مگاالکترون‌ولت به هدف، ذرات و تابش‌های خروجی از هدف اندازه‌گیری می‌شوند و به کمک آن‌ها، غلظت عناصر تشکیل‌دهنده هدف و یا نحوه توزیع این عناصر در عمق هدف یا ساختار ماده تعیین می‌شوند.

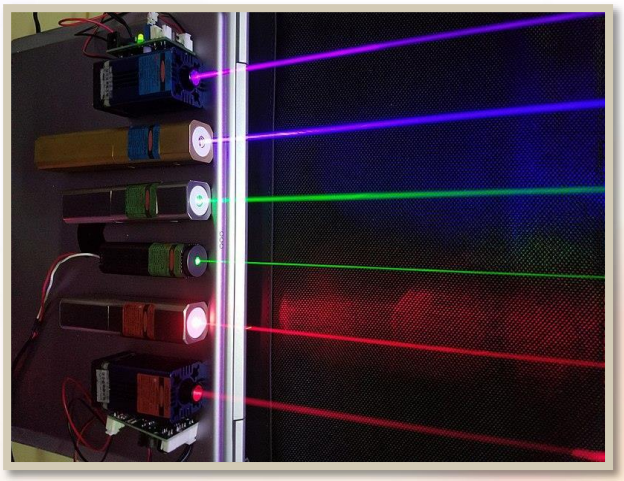
در چند سال اخیر در این آزمایشگاه، تلاش‌های فراوانی برای نمونه‌گیری بیولوژی بیماران برای تشخیص دو بیماری تالاسمی و ویلسون صورت پذیرفته است. در بیماری تالاسمی میزان آهن و در بیماری ویلسون میزان مس در کبد افزایش می‌یابد.

شتاب‌دهنده واندوگراف کاربردهای متنوعی در صنعت دارد. برای مثال، محققان می‌توانند نقشه توزیع عناصر را در نمونه‌های صنعتی ترسیم کنند. همچنین قادر به تشخیص ساختار بلوری و ناخالصی‌ها در مواد مرکب صنعتی نیز هستند که این امر می‌تواند جهت بررسی کیفیت آبکاری و لایه‌گذاری به‌کار برده شود.

فناوری لیزر و کوانتوم

❖ لیزر

امروزه لیزر کاربردهای بسیاری دارد و در چاپگرها، شبکه‌های کابل نوری، دستگاه‌های جوشکاری و برش فلزات، پژوهش‌های علمی، صنعت، سرگرمی، سلاح‌های لیزری، پزشکی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

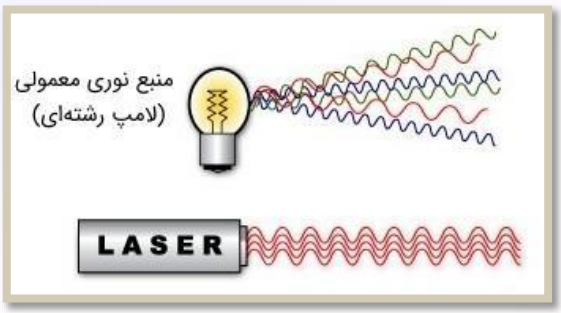


نخستین لیزر، موسوم به لیزر یاقوتی را تئودور مایمن در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. مدتی پس از آن و در همان سال، علی جوان، دانشمند ایرانی و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر گازی هلیوم-نئون شدند. تابش‌های لیزری، گرچه ممکن است برای چشم خطرناک باشند و یا باعث سوختگی پوست شوند، اما به اندازه تابش‌های هسته‌ای و پرتوزا، خطرناک نیستند.

۳-۱ لیزر چیست؟

لیزر، نور پرانرژی و تقویت شده‌ای است که در شرایط عادی در طبیعت وجود ندارد ولی با فناوری و وسایل خاصی می‌توان آن را ایجاد کرد. ماهیت لیزر و نور معمولی، یکسان است؛ هر دو، موج الکترومغناطیسی و شامل بسته‌های انرژی به اسم فوتون هستند؛ اما نورِ یک لیزر می‌تواند از نور معمولی حاصل از یک لامپ، قوی‌تر باشد. در واقع نور لیزر، با نور ضعیفی آغاز و طی چندین بار حرکت رفت و برگشتی در محیطی موسوم به کاواک، بر انرژی آن افزوده و تقویت می‌شود. احتمالاً بارها نشانگرهای لیزری را در دست گرفته‌اید. با نگاه دقیق‌تری به آن متوجه سه تفاوت اصلی لیزر با نور معمولی حاصل از یک لامپ خواهید شد:

- نور معمولی شامل همه رنگ‌ها (فرکانس‌های مرئی) است که در اصطلاح نور سفید گفته می‌شود؛ اما نور لیزر، در شرایط ایده آل می‌تواند نوری تک‌رنگ (اغلب سبز و قرمز و یا حتی بی‌رنگ) باشد.



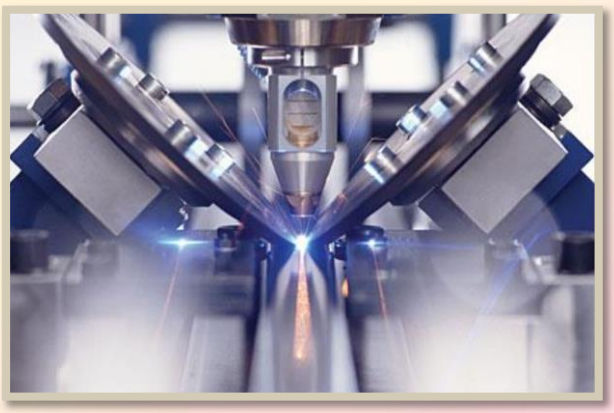
- نور لامپ در تمام جهات پخش می‌شود؛ در حالی که نور لیزر، پرتویی باریک است که به دلیل پخش‌شدگیِ خیلی کم، مسیر طولانی‌تری نسبت به نور عادی طی می‌کند.
- یک لامپ، پرتوهایی در فازهای مختلف تولید می‌کند.

در واقع فاز هر پرتو یا فوتون تابشی در هر زمان، متفاوت است و هیچ نظم خاصی در آن‌ها وجود ندارد؛ اما پرتوهای لیزر، همگی هم‌فاز هستند یعنی با هم در یک زمان به بیشترین و کمترین دامنه موج می‌رسند. پرتو لیزر را می‌توان مثل رژه منظم سربازان ارتش که همگی در یک ردیف و پشت سرهم با حرکات یکسان راه می‌روند، تشبیه کرد. در حالی که نور حاصل از یک لامپ مثل پیاده شدن مسافران قطار است که همگی به صورت غیرمنظم به سمت درب‌های خروجی هجوم می‌آورند.

۳-۲ کاربردهای لیزر

لیزر کاربردهای مختلفی دارد که می‌توان به عنوان نمونه به موارد زیر اشاره کرد:

- زیست‌شناسی و پزشکی: چاقوی لیزری، مته لیزری و غیره؛
- صنایع نظامی: ردیاب لیزری، تفنگ لیزری و غیره؛
- صنعت: حکاکی، جوشکاری لیزری، برش‌های لیزری، برش الماس، مسافت‌یاب لیزری، صنایع ساختمانی و غیره؛
- گداخت هسته‌ای؛
- ارتباطات نوری؛
- فناوری اطلاعات و ارتباطات.



۳-۳ دستاوردهای سازمان انرژی اتمی در حوزه لیزر

سازمان انرژی اتمی در زمینه توسعه فناوری‌های لیزر موفق به ساخت لیزرهای صنعتی و پزشکی شده که برخی از انواع آن‌ها در شکل زیر نشان داده شده است.

لیزر فرکشنال CO_2

لیزر دندان‌پزشکی بافت نرم

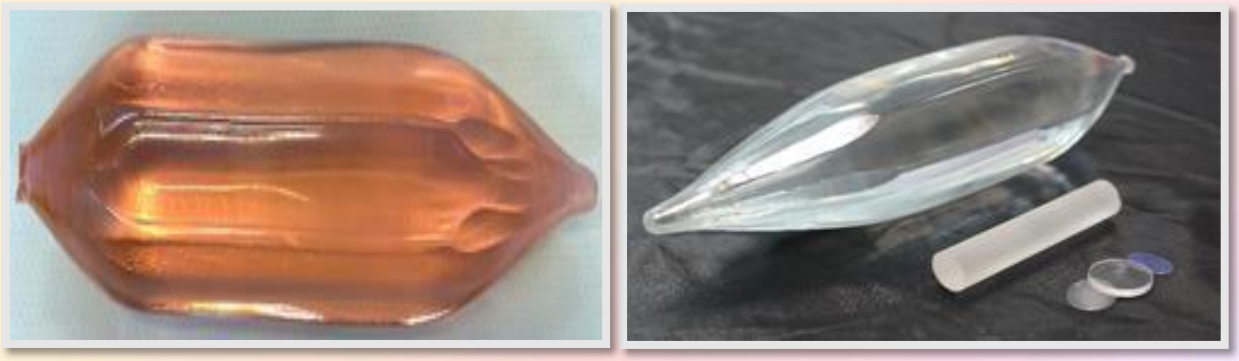
لیزر جراحی پروستات

لیزر اورولوژی هولمیوم

لیزر CO_2 زیبایی

لیزر درمانی کم‌توان

سازمان انرژی اتمی انواع بلورهای مورد استفاده در ساخت لیزرها و قطعات موردنیاز برای لایه‌نشانی لیزری را نیز تولید می‌کند. در لایه‌نشانی لیزری، یک لایه از ماده را به‌طور دقیق بر روی اجسام می‌نشانند که این عمل سبب افزایش مقاومت جسم در برابر خوردگی و زنگ‌زدگی می‌شود.



دو نوع مختلف از بلور لیزری

علاوه بر موارد فوق، سازمان انرژی اتمی قادر به ساخت انواع قطعات اپتیکی تخت، کروی و غیرکروی است. این قطعات نقش بسیار مهمی را در صنایع ساخت و تولید ابزارهایی مانند انواع دوربین، تلسکوپ‌ها و میکروسکوپ‌ها ایفا می‌کنند.

قطعات اپتیک تخت، کروی و غیرکروی

۳-۴ پیدایش فیزیک کوانتومی

فیزیک، علم مطالعه، تحلیل و بررسی طبیعت است و هدف آن درک و پیش‌بینی طبیعت در شرایط گوناگون است. تا دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، بیشتر حوزه‌های فیزیک از جمله مکانیک نیوتونی، ترمودینامیک و نظریه الکترومغناطیس که امروزه از آن‌ها با نام فیزیک کلاسیک یاد می‌شود، به‌صورت نهایی خود تدوین شده بود و به نظر می‌رسید که در بیان بسیاری از پدیده‌های فیزیکی کاملاً موفق‌اند. با این حال، در آن سال‌ها، پدیده‌هایی مشاهده و آزمایش‌هایی انجام شد که توضیح کامل و درست آن‌ها با نظریه‌های فیزیک کلاسیک ممکن نبود و سبب تغییرات بنیادی در دیدگاه فیزیک‌دانان نسبت به توضیح رفتار برخی از پدیده های فیزیکی شد. به‌طوری که در سه دهه آغازین قرن بیستم، نتایج این تلاش‌ها به نظریه‌های نسبیت و کوانتوم منجر شد که امروزه به آن فیزیک جدید می‌گویند.

در این میان، فیزیک کوانتومی به مطالعه پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک مانند اتم و ذرات سازنده آن می‌پردازد.ساختار ماده، ذره‌ای و گسسته است یعنی با تقسیم ماده در چند مرحله، به اجزای گسسته‌ای به نام مولکول یا اتم می‌رسیم. دانشمندان پس از آزمایش‌های فراوان به این نتیجه رسیده‌اند که انرژی نیز خاصیت ذره‌ای و گسسته دارد. فیزیکدانان دریافتند که نور به‌صورت بسته‌های کوچکی (کوانتوا) گسیل می‌شود. واژه کوانتوم در اصل به معنای مقدار، بسته یا دانه است و فوتون واژه‌ای است که به‌منظور توصیف بسته‌های انرژی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

منظور از فناوری‌های کوانتومی استفاده از پدیده‌های کوانتومی به‌منظور افزایش ظرفیت، سرعت، دقت و امنیت دستاوردهایی است که دستیابی به آن‌ها از طریق فیزیک کلاسیک امکان‌پذیر نیست. یکی از این پدیده‌ها در هم تنیدگی کوانتومی است. در هم تنیدگی کوانتومی به زبان ساده ارتباط دو طرفه ذرات در فاصله دور است. به بیانی دیگر، هر اتفاقی که بر روی یک ذره بیفتد، ذره دیگر در همان لحظه متوجه آن می‌شود. در فناوری کوانتومی نسل اول، از خاصیت بسته‌ای بودن انرژی و حالت‌های اتمی استفاده شد که نتیجه آن اختراع ترانزیستورها، لیزرها و رایانه‌های امروزی بوده است. در فناوری‌های کوانتومی نسل دوم از حالت‌های درهم تنیده و سایر پدیده‌های کوانتومی استفاده می‌شود.

علم جدید کوانتوم، دستاوردهای علمی فراوانی را در دنیا به همراه داشته است. برخی از کاربردهای این علم عبارت‌اند از افزایش امنیت و حفاظت اطلاعات در شبکه اینترنت، افزایش سرعت در محاسبات، کمک به اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق و غیره .

۵-۳ دستاوردهای سازمان انرژی اتمی در حوزه فناوری‌های کوانتومی

سازمان انرژی اتمی ایران، در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های کوانتومی را در دستور کار خود قرار داده است. یکی از فعالیت‌های مهم در این زمینه تأسیس آزمایشگاه ملی فناوری کوانتومی است. علاوه بر این، جمهوری اسلامی ایران جزء معدود کشورهای جهان است که توانسته در بعد آزمایشگاهی، فوتون‌های درهم‌تنیده را از هم جدا نماید. مزیت این فناوری در این است که انتقال اطلاعات احتیاج به رمزنگاری ندارد و کسی نمی‌تواند به این اطلاعات ورود کند.

رونمایی از فناوری جدید کوانتومی در کشور (جداسازی فوتون‌های در هم تنیده)

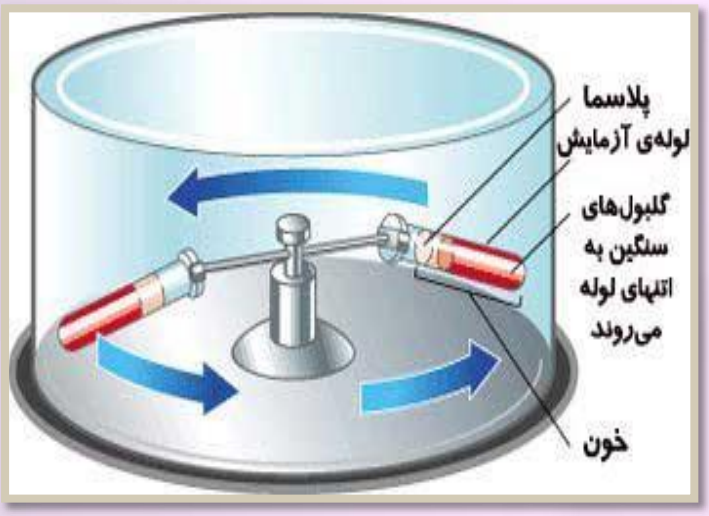
استفاده از سانتریفیوژها در حوزه سلامت و صنعت

❖ استفاده از سانتریفیوژها در حوزه سلامت و صنعت

۴-۱ تعریف سانتریفیوژ

سانتریفیوژ به هر دستگاهی گفته می‌شود که با سرعت زیادی به دور محور خود می‌چرخد و به مواد درون خود نیروی گریز از مرکز وارد می‌کند. تحت این نیرو، مواد سنگین‌تر به دلیل جرم بیشتری که دارند از مواد سبک‌تر جدا می‌شوند.

دستگاه‌های سانتریفیوژ کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف و در حوزه پزشکی دارند. زمانی که نمونه خون در دستگاه سانتریفیوژ قرار داده می‌شود، دستگاه شروع به چرخش بسیار سریع کرده و در ادامه، عناصر سازنده خون از یکدیگر جدا می‌شوند. در صنعت نفت نیز از سانتریفیوژ برای جداسازی نفت از نمونه سنگ مخزن استفاده می‌شود و در نهایت می‌توان میزان آب، نفت و گاز موجود در چاه‌های نفتی را تشخیص داد.



تصویری از سانتریفیوژ مورد استفاده جهت جداسازی سلول‌های خون

سانتریفیوژ مورد استفاده در جداسازی اجزای خون

۲-۴ دستاوردهای سازمان انرژی اتمی در ساخت سانتریفیوژهای مورد استفاده در صنایع غیرهسته‌ای

با کسب دانش طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سانتریفیوژهای مورد استفاده در صنعت غنی‌سازی توسط متخصصان داخلی، سازمان انرژی اتمی توانست تا در عرصه جدیدی از کاربردهای سانتریفیوژها در صنایع غیر هسته‌ای وارد شود و نسل اول سانتریفیوژ توبولار را برای تولید صنعتی محصولات بیوتکنولوژی شامل داروهای نوترکیب و انواع واکسن‌ها در حوزه سلامت، برای انستیتو پاستور ایران طراحی و تولید نمود.

سانتریفیوژ توبولار

در پی این موفقیت، طراحی و ساخت سانتریفیوژهای نسل دوم و سوم به نام‌های زونال و اولترا برای امور تحقیقاتی و تولید انواع واکسن‌ها انجام شده است. سرعت چرخش سانتریفیوژ اولترا بالاتر است و برای تولید واکسن‌های انسانی یا دامی، تحقیقات زیست‌فناوری و یا آزمایشگاه‌های تخصصی مناسب است.

سانتریفیوژ زونال

سانتریفیوژ اولترا

همچنین سانتریفیوژ سنگ برای انجام تحقیقات بر روی سنگ‌های مخازن نفتی کشور توسط سازمان انرژی اتمی ساخته است.

سانتریفیوژ سنگ

سانتریفیوژ دکانتر یک سانتریفیوژ پیشرفته است که استفاده فراوانی در صنعت نفت و صنایع غذایی و دارویی دارد و توسط سازمان انرژی اتمی تولید شده است. این دستگاه قادر است در مقیاس بالا، جامدات را از مایعات و یا دو فاز مایع را از یکدیگر جداسازی نماید. مهم‌ترین ویژگی این دستگاه جداسازی پیوسته و بدون وقفه آن است. مخلوط مواد به‌طور مداوم به دستگاه

وارد شده و مواد جداسازی شده از آن خارج می‌شود. با توجه به صدمات زیست‌محیطی عدم تصفیه گل حفاری، این دستگاه برای جداسازی و تصفیه گِل حفاری طراحی شده و در کنار دکل‌های نفتی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

سانتریفیوژ دکانتر

سانتریفیوژ زونال پیوسته برای وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی کشور طراحی و ساخته شد. این دستگاه جزء پیشرفته‌ترین و پیچیده‌ترین سانتریفیوژهای صنعتی و شرکت‌های تولیدکننده آن در سطح جهانی، محدود و فناوری آن انحصاری است. کاربرد این دستگاه، تولید انبوه واکسن‌های ویروسی مننژیت، هپاتیت B، هاری و آنفلوانزا و تولید داروهای خاص است.

سانتریفیوژ زونال پیوسته

مدیریت پسماندهای پرتوزا

❖ مدیریت پسماندهای پرتوزا

یکی از موارد چالش برانگیز در زمینه انرژی هسته‌ای ترس ازآلودگی محیطزیست در اثر افزایش تولید پسماندهای هسته‌ای است. شناخت درست از پسماندهای هسته‌ای و به‌کار بستن مدیریت پسماندای توانمند می‌تواند نسبت به چالش فوق‌الذکر پاسخ دهد که موجب بهره‌برداری صحیح از انرژی هسته‌ای و توسعه این تکنولوژی در جهان خواهد شد.

شناسایی، جمع‌آوری، آمایش، تثبیت و دفن پسماندهای اکتیو با رعایت تمام مقررات نظام ایمنی، سیاستی است که مدیریت پسماندای به آن می‌پردازد. پسماند پرتوزا به مواد زائد و بلااستفاده‌ای گفته می‌شود که دارای مواد پرتوزا با غلظت بیش از اندازه‌ی مشخص هستند.

پسماند پرتوزا در کلیه مراحل

چرخه سوخت هسته‌ای، بهره‌برداری از راکتورهای قدرت هسته‌ای و تحقیقاتی و در مراکز تولید و استفاده از رادیوایزوتوپ‌ها ایجاد می‌شود. هم‌چنین برخی مواد با پرتوزایی طبیعی در پوسته زمین به میزان ناچیز وجود دارند که فعالیت‌های صنعتی انسان به‌ویژه در زمینه استخراج معادن و نفت و گاز سبب می‌شود این مواد مانند عنصر رادیوم و گاز رادون از زمین به سطح آن منتقل گردند و باعث آلوده شدن مواد و تولید پسماند شوند. پسماندهای پرتوزا بر اساس میزان پرتوزایی به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- پسماندهای معاف از نظارت: پسماندهایی با سطح پرتوزایی کمتر از مقادیر مشخص شده در استانداردها.

- پسماند با سطح پرتوزایی کم و متوسط: پسماندهایی با سطح پرتوزایی بالاتر از سطح معاف و حرارت تولیدی ناشی از واپاشی کمتر از $۲\ kW/m^3$ هستند. این پسماندها بر اساس نیمه عمر رادیوایزوتوپ‌هایشان به دو دسته پسماند با نیمه عمر کوتاه (نیمه عمر کمتر از ۳۰ سال و محدوده پرتوزایی مشخص) و پسماند با نیمه عمر بالا تقسیم‌بندی می‌شوند.

- پسماندهای با سطح پرتوزایی بالا: این پسماندها رادیوایزوتوپ‌هایی با نیمه عمر بالا هستند و سطح حرارت تولیدی ناشی از واپاشی آن بالاتر از $۲kW/m^3$ می‌باشند.

پسماندهای پرتوزا به دلیل گسیل پرتوهای خطرناک، از جمله مواد سرطان‌زا به‌حساب می‌آیند؛ بنابراین باید روش‌های خاصی برای نگهداری و مدیریت آن‌ها بکار برده شود. مدیریت پسماندهای پرتوزا به کلیه عملیات اجرایی و مدیریتی شامل جابجایی، پیش‌آمایش، تثبیت، حمل و نقل، انبارداری و دفن نهایی اطلاق می‌شود. عملیات حمل و نقل، انبارداری و تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی ممکن است در هریک از مراحل فوق صورت پذیرد که جزئی از عملیات مدیریت پسماندهای پرتوزا است. آمایش یعنی استفاده از هرنوع فرآیند (فیزیکی/شیمیایی) برای تغییر مشخصات پسماند با ملاحظات ایمنی و اقتصادی. آمایش سه هدف اصلی دارد:

۱) کاهش حجم ۲) جداسازی مواد پرتوزا از پسماند ۳) تغییر ترکیب پسماند.

روش‌های متداول برای آمایش پسماندهای جامد عبارتند از: قطعه قطعه کردن، سوزاندن پسماندهای قابل احتراق، فشردن پسماندها توسط یک پرس و کاهش حجم آن‌ها. حجم پسماندهای مایع را می‌توان به روش تبخیر یا با استفاده از رزین‌های مخصوص یا رسوب‌گیری و فیلتر کاهش داد و رسوبات و یا مایع غلیظ باقی‌مانده را در مواد مناسبی مانند قیر، پلیمر، سرامیک، شیشه و سیمان

تثبیت و جامد سازی و سپس برای مدت‌زمان طولانی نگهداری نمود. در پسماندهای گازی، هسته‌های پرتوزا با روش‌هایی همچون استفاده از فیلتر، شستشو با محلول، استفاده از مواد جاذب مانند زغال فعال و ... جدا می‌شوند. گاز خروجی پس از کنترل و اطمینان از سطح پرتوزایی قابل‌قبول، در محیط تخلیه و رهاسازی می‌شود.

۱-۵ مدیریت پسماندهای پرتوزا در ایران

سازمان انرژی اتمی ایران با دارا بودن تأسیسات به‌روز در زمینه آمایش، تثبیت و انبار کردن مواد پرتوزا، مدیریت پسماندهای پرتوزا را انجام می‌دهد و شرکت پسماندازی هسته‌ای صنعت هسته‌ای ایران، متولی اجرا و پیاده‌سازی برنامه ملی مدیریت پسماند پرتوزا است. تولیدکنندگان پسماندهای پرتوزا عهده‌دار مسئولیت کلیه مراحل مدیریت ایمن پسماندهای پرتوزا از تولید تا تحویل به شرکت پسماندازی هسته‌ای جهت نگهداری بلندمدت و یا دفن هستند. در حال حاضر نیروگاه اتمی بوشهر، تأسیسات چرخه سوخت هسته‌ای و راکتور تحقیقاتی تهران به عنوان اصلی‌ترین تولیدکنندگان پسماند پرتوزا در کشور هستند و همچنین سایر تأسیسات هسته‌ای کشور شامل راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک و راکتورهای ۲ و ۳ نیروگاه اتمی بوشهر پس از راه‌اندازی، مقادیر زیادی از پسماندهای پرتوزا را تولید خواهند کرد.

بشکه‌های نگهداری پسمان‌های پرتوزا

مدیریت چشمه‌های پرتوزای مصرف شده، آمایش و تثبیت پسماندهای پرتوزا، دورریزی و دفع نهایی پسماندهای تولیدی و پایش پرتوی سایت‌های دفع پسماند از اقدامات انجام‌شده در حوزه پسماندازی هسته‌ای در کشور است.

بیشتر پسماندهای تولیدی در ایران از نوع پسماند با پرتوزایی کم و متوسط است که در نهایت بایستی دفع شوند. از این رو جهت نگهداری موقت و دفع پسماندهای پرتوزای تولیدی در کشور در لایه‌های سطحی زمین، پسماندگاهی در کویر مرکزی ایران در نزدیکی شهرستان انارک ایجاد شده است. ویژگی‌های مهم این پسماندگاه عبارت‌اند از:

- فقدان سفره‌های آب زیرزمینی تا عمق ۳۰۰ متر؛
- وجود لایه‌های ضخیمی از سنگ نفوذ ناپذیر؛
- دوری از گسل‌های اصلی و فعال زلزله؛
- اقلیم خشک و بیابانی؛
- دوری از مراکز جمعیتی، صنعتی، مناطق حفاظت شده و منابع طبیعی قابل استفاده.

مجتمع پسماندگاه انارک

ایمنی هسته ای و پرتوی
و عدم اشاعه تسلیحات اتمی

❖ ایمنی هسته‌ای

مواد پرتوزا می‌توانند آثار سوء بر سلامت انسان و محیط‌زیست مانند ایجاد بیماری‌های مختلف همچون سرطان داشته باشند. از سوی دیگر آثار نامطلوب حوادث هسته‌ای محدود به یک زمان، مکان و نسل جمعیتی خاص نیست. در صورت بروز حادثه، مواد پرتوزا در محیط منتشر خواهند شد و ممکن است از مرزهای جغرافیایی نیز عبور کنند. علاوه بر این با توجه به نیمه‌عمر طولانی این مواد، آسیب‌های بلندمدتی به همراه خواهند داشت که می‌توانند بر نسل‌های بعدی نیز اثرگذار باشند؛ بنابراین، به‌کارگیری پرتو در زندگی امروزی در کنار فواید فراوان، می‌تواند دارای آثار مخربی باشد که باید با رعایت اصول ایمنی پرتوی و هسته‌ای آن‌ها را به حداقل رساند.

به دلایل فوق، ایمنی در صنعت هسته‌ای و در کار با پرتو یک اصل بسیار مهم و ضروری بوده و همواره نوآوری‌های گوناگونی برای رشد ایمنی در این بخش در حال انجام است.

حادثه نیروگاه اتمی چرنوبیل اوکراین در سال ۱۹۸۶

۶-۱ ایمنی پرتوی

۶-۱-۱ پرتوگیری

منابع پرتوگیری انسان به دو دسته عمده منابع طبیعی و دست‌ساز بشر تقسیم می‌شوند. از زمانی که انسان پای خود را بر زمین خاکی گذاشته است، همواره پرتوگیری طبیعی، از پرتوهای کیهانی دارای ذرات پرانرژی ساطع شده از خورشید و یا دیگر ستارگان، از مواد پرتوزای موجود در پوسته زمین مانند توریم-۲۳۲، اورانیوم-۲۳۸ و اورانیوم-۲۳۵ و از رادیوایزوتوپ‌های طبیعی موجود در بدن انسان، گیاهان و سایر جانداران مانند کربن-۱۴ و پتاسیم-۴۰ داشته است. منبع دیگر، چشمه‌هایِ ساختِ دستِ انسان است که ناشی از کاربرد رادیو ایزوتوپ‌ها در پزشکی، صنعت و تحقیقات است.

نمایی از تولید پرتوهای کیهانی

منابع پرتو معمولاً به‌صورت چشمه باز (بدون پوشش) ، چشمه بسته (پوشش‌دار) و دستگاه‌های پرتوساز هستند. پرتوگیری انسان از عناصر پرتوزای موجود در محیط کار و یا محیط‌زیست به دو صورت پرتوگیری خارجی و داخلی امکان‌پذیر است. پرتوگیری خارجی ناشی از منابع پرتویی در خارج از بدن انسان است. پرتوگیری داخلی ناشی از ورود منابع پرتوی و رادیوایزوتوپ‌ها به بدن از طریق تنفس، خوردن، آشامیدن و جذب از طریق پوست یا زخم است. چنانچه ماده پرتوزا به درون بدن راه یابد، پرتوگیری داخلی آغاز و تا زمانی که ماده در بدن باشد، ادامه خواهد داشت. تنها راه توقف و یا کاهش پرتوگیری داخلی، دفع ماده پرتوزا از بدن و یا سپری شدن چند نیمه عمر (مدت زمانی که پرتوزایی به نصف مقدار اولیه می‌رسد) است. برای جلوگیری از پرتوگیری خارجی باید فاصله با منبع پرتو را افزایش و زمان در تماس بودن را کاهش داده و از حفاظ‌گذاری مناسب به دور منبع پرتویی استفاده نمود.

اثرات زیان‌بار پرتو بر انسان در دو نوع دسته‌بندی تقسیم می‌شوند. دسته اول از نظر قطعی و احتمالی بودن آثار و دسته دوم از نظر زودرس یا تأخیری بودن آثار بر انسان می‌باشد.

➢ اثرات قطعی

این اثرات معمولا وقتی بروز می کنند که پرتوگیری از یک حد آستانه بیشتر باشد. یکی از ویژگی‌های اثرات قطعی این است که قبل از آنکه یک اثر مشخص ظاهر شود، باید مقدار پرتو (دز) از یک آستانه معین تجاوز کند. هرچه مقدار پرتو بیشتر باشد، اثر قطعی آن بیشتر و نمایان‌تر است.

➢ اثرات احتمالی

اثرات احتمالی، نظیر سرطان‌های مختلف هستند که برای بروز آنها معمولاً آستانه دز وجود ندارد. این اثرات همانطور که از نامشان پیداست به‌صورت تصادفی پدیدار می‌گردند. ممکن است در فردی که در معرض مقدار کم پرتو قرار گرفته، این اثرات ظاهر شوند و مقادیر بالای پرتو در فرد دیگری، این اثرات را ایجاد ننمایند؛ البته با افزایش مقدار پرتو، احتمال بروز اثرات احتمالی نیز بیشتر می‌شود.

➢ اثرات زودرس و تاخیری پرتو بر انسان

پرتوگیری با پرتو (دز) زیاد و در مدت زمان بسیار کم که در فاصله زمانی کوتاه باعث بروز اثرات بیولوژیکی نظیر سرخی پوست می‌شود را پرتوگیری حاد و اثرات ناشی از آن را اثرات زودرس می‌گویند. پرتوگیری‌های دراز مدت با دز کم که ممکن است اثرات آن بعدها مشاهده شود را پرتوگیری مزمن و اثرات ناشی از آن را اثرات تأخیری می‌نامند.

اثرات زیان‌بخش پرتوگیری در سلامتی شخص برحسب شدت پرتوگیری شامل اثرات زودرس از قبیل بی‌اشتهایی، تهوع، استفراغ و اسهال، سردرد، تب، کاهش وزن، تاول و جوش، التهاب و سوختگی پوست، اثر بر سلول‌های خونی، اثر بر سلول‌های جنسی، آب‌مروارید و اثرات دیررس مانند اثرات ژنتیکی و سرطان می‌باشد.

۶-۱-۲ حفاظت در برابر پرتو

مطابق با اصول کلی حفاظت در برابر پرتو، فقط باید زمانی از پرتوها استفاده شود که ضروری باشد و میزان استفاده هم باید به حداقل مقدار موردنیاز، محدود شود. این مفهوم تحت نام "اصل آلارا" یا هر چه کمتر، موجه و شدنی شناخته شده است استفاده از وسایل حفاظت شخصی و جمعی مانند ماسک‌های ویژه، تهویه مناسب هوا برای جلوگیری از تجمع مواد پرتوزا در محیط، استحمام فرد و تعویض لباس کار هنگام خروج از محیط کار، استفاده از وسایل پایش و دزسنج‌ها و مواردی از این قبیل برای حفاظت پرتوی ضروری است.

آشکارسازهای پرتو از نوع گایگر مولر

پرتوهای یونیزان توسط حواس پنج‌گانه انسان قابل تشخیص نیستند؛ بنابراین، جهت شناسایی آن‌ها و کنترل پرتوگیری نیاز به تجهیزات و ابزارهای اندازه‌گیری بنام آشکارساز وجود دارد. علاوه بر این، اندازه‌گیری نرخ دز پرتوهای بتا، گاما و نوترون در ارزیابی مخاطرات محیط کار، بسیار اهمیت دارد. تجهیزاتی که بدین منظور بکار گرفته می‌شوند، دزیمتر محیطی نام دارند. هدف از اجرای پایش فردی، کنترل پرتوگیری افراد به منظور رعایت اصول حفاظت در برابر پرتو است. بدین منظور برای مشخص نمودن پرتو گیری افراد از دزیمتر فردی استفاده می شود. این دزیمترها نظیر فیلم بج، دزیمتر TLD و دزیمترهای فردی دیجیتال هستند.

دزیمتر فردی

آشکارسازهای پرتو از نوع گایگر مولر

همچنین برای سنجش مواد پرتوزایی که به شکل ناخواسته بر روی سطوح محیط کار پخش می‌شوند یا در هوا معلق هستند، از تجهیزات پایشگر آلودگی استفاده می‌شود که مجهز به سیستم مکش و نمونه‌برداری از هوا هستند. برای اطمینان از آلوده نشدن افراد شاغل یا بازدیدکنندگان از تأسیسات هسته‌ای به مواد پرتوزا از دستگاه‌های پایش تمام بدن در خروجی محل کار استفاده می‌شود.

سیستم پایش تمام بدن در خروجی تأسیسات هسته‌ای

سیستم اندازه‌گیری ذرات پرتوزا در محیط و هوا

سازمان انرژی اتمی ایران در زمینه ساخت دستگاه‌های تشخیص و پایش آلودگی هسته‌ای فردی و محیطی فعال، و موارد زیر برخی از تجهیزات ساخته‌شده در این زمینه است.

سیستم اندازه‌گیری دز فردی و محیطی ساخته شده در کشور

دستگاه کالیبراسیون سیستم اندازه‌گیری دز ساخته شده در کشور

دستگاه اندازه‌گیری دز تمام بدن ساخته شده در کشور

۶-۲ ایمنی هسته‌ای

آلودگی ناشی از تأسیسات چرخه سوخت و نیروگاه‌های هسته‌ای، تحت شرایط بهره‌برداری عادی بسیار ناچیز است اما در صورت بروز حادثه‌ای مانند ذوب شدن قلب راکتور، مواد پرتوزای قابل توجهی وارد محیط‌زیست خواهد شد؛ بنابراین، ارزیابی ایمنی هسته‌ای باید در تمامی مراحل، شامل انتخاب محل ساخت و طراحی تأسیسات، در حین ساخت و بهره‌برداری و در دو حالت عملکرد عادی و وقوع حوادث انجام شود. باید این اطمینان حاصل شود که تأسیسات هسته‌ای به گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند که کمترین احتمال بروز حادثه در آن‌ها وجود داشته باشد و در صورت بروز حادثه، مواد هسته‌ای در محیط پخش نخواهند شد.

حادثه نیروگاه اتمی فوکوشیما دایچی ژاپن در سال ۲۰۱۱

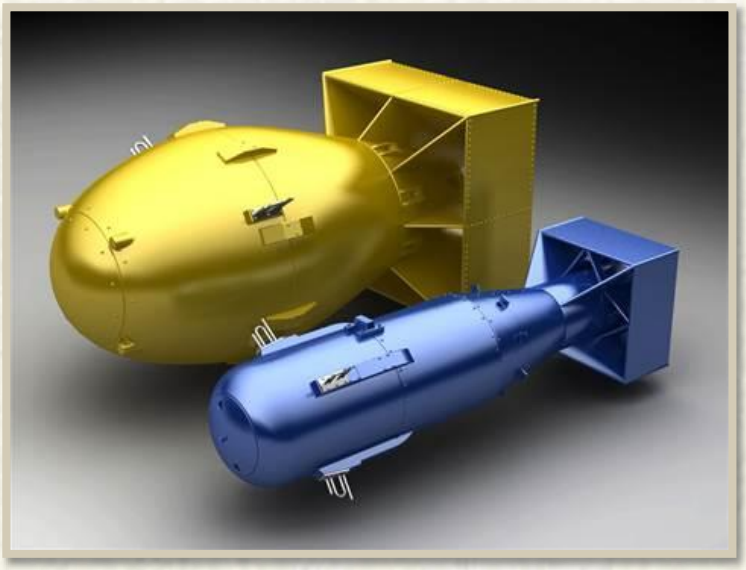
ساختار سرامیکی قرص سوخت هسته‌ای و قرارگیری آن در درون غلاف و سپس در درون محفظه تحت فشار و آن نیز در محفظه فولادی و بتنی راکتور، امکان نشر مواد پرتوزا و پاره‌های شکافت از سوخت را به حداقل می‌رساند.

مهم‌ترین حادثه قلب راکتور، از دست دادن آب خنک‌کننده در اثر شکست لوله آب خنک‌کننده و اختلال در برداشت حرارت از قلب راکتور، ذوب شدن قلب و پخش مواد پرتوزا می‌باشد. برای جلوگیری از این حادثه، پمپ‌های سیستم ایمنی وارد عمل می‌شوند و آب را به قلب راکتور تزریق می‌کنند. در یک نیروگاه هسته‌ای، سیستم‌های ایمنی برای کنترل حوادث و خاموشی راکتور به صورت چهار سیستم موازی در نظر گرفته می‌شوند تا در صورتی که هر کدام از کار افتاد، دیگری بتواند وارد عمل شده و از حادثه پیشگیری نماید.

۳-۶ عدم اشاعه تسلیحات هسته‌ای

با گسترش استفاده از انرژی هسته‌ای، اعمال نظارت‌های لازم به منظور اطمینان از بهره‌برداری صلح‌آمیز از "مواد هسته‌ای" از دغدغه‌های جامعه جهانی بوده است. مهم‌ترین نگرانی در این خصوص خطر انحراف مواد هسته‌ای موجود در کاربردهای صلح‌آمیز هسته‌ای توسط کشورها به سمت ساخت سلاح هسته‌ای است. در این راستا، پیمان منع گسترش سلاح‌های هسته‌ای در سال ۱۹۶۸ در سطح بین‌المللی منعقد شده که بسیاری از کشورها از جمله جمهوری اسلامی ایران نیز به آن پیوسته‌اند. در این راستا، آژانس بین‌المللی انرژی اتمی به نظارت مداوم بر مؤسسات هسته‌ای کشورهای عضو این پیمان می‌پردازد. علاوه بر آن، با گسترش اقدامات تروریستی در سطح جهانی، مبحث امنیت هسته‌ای اهمیت بسیاری پیدا نموده و بر این اساس انجام تدابیر خاص در مؤسسات هسته‌ای و پرتوی پیش‌بینی شده است.

بمب هسته‌ای یک سلاح کشتارجمعی است به این معنی که قدرت تخریب فوق‌العاده زیاد آن می‌تواند موجب نابودی تعداد زیادی از انسان‌ها شود. این سلاح‌ها همچنین در صورت استفاده اثرات مخرب بسیار شدیدی بر محیط‌زیست می‌گذارند که تا سال‌ها بعد باقی می‌ماند. بمب‌های هسته‌ای تاکنون دو بار در جنگ جهانی دوم توسط آمریکا علیه کشور ژاپن استفاده شده است. در سال ۱۹۴۵، از یک بمب اورانیومی جهت تخریب شهر هیروشیما استفاده شد که موجب مرگ بی‌درنگ ده‌ها هزار نفر شد. به دلیل تسلیم نشدن سریع ژاپن، بمب دوم که یک بمب پلوتونیومی بود سه روز بعد در شهر ناکازاکی انداخته شد. این بمب نیز موجب کشته شدن حدود ۴۰ هزار نفر در لحظه انفجار شد. در هر دو شهر هیروشیما و ناکازاکی، ده‌ها هزار نفر نیز بعدها به دلیل اثرات پرتوی کشته شدند.



بمب اورانیومی استفاده‌شده در شهر هیروشیما (سمت راست) و شهر ناکازاکی ژاپن (سمت چپ) در سال ۱۹۴۵

تخریب ناشی از بمب اتمی در شهر هیروشیما (یکی از معدود ساختمان‌های باقیمانده شهر)

به دلیل کشتارجمعی بودن سلاح‌های هسته‌ای، جمهوری اسلامی ایران به‌کارگیری این سلاح‌ها را یک کار غیراخلاقی و غیرشرعی می‌داند و اعلام کرده هیچ‌گاه به سمت تولید و استفاده از بمب اتمی نرفته و نخواهد رفت. رهبر معظم انقلاب اسلامی و همچنین مقامات دولتی کشور، بارها اظهار داشته‌اند که سلاح هسته‌ای هیچ جایگاهی در راهبرد دفاعی و امنیتی کشور نداشته و برنامه اتمی کشور کاملاً صلح‌آمیز است.

۴-۶ نظارت‌های قانونی مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، یک مرجع نظارتی در ایران است که وظیفه حصول اطمینان از استفاده ایمن از انرژی هسته‌ای و منابع پرتوی کشور را برعهده دارد. هدف نهایی این مرکز، حفاظت کارکنان، مردم، نسل‌های آینده و محیط‌زیست در برابر اثرات زیان‌آور پرتوها است. از جمله وظایف این مرکز، نظارت بر ایمنی تأسیسات هسته‌ای و مراکز کار با پرتو است که در جدول زیر بیان شده است.

تأسیسات هسته‌ای و مراکز کار با پرتو مشمول نظارت‌های قانونی از منظر ایمنی

عنوان	توضیحات
تاسیسات هسته‌ای شامل نیروگاه‌های هسته‌ای، راکتورهای تحقیقاتی و مجتمع‌های بحرانی، تاسیسات فرآوری و غنی‌سازی اورانیوم، تاسیسات تولید سوخت هسته‌ای و نگهداری سوخت مصرف‌شده و تاسیسات مدیریت پسماندهای پرتوزا	نیروگاه اتمی بوشهر، راکتور تحقیقاتی تهران و اراک و اصفهان، کارخانه‌های چرخه سوخت هسته‌ای (شامل معادن، کارخانه تولید کیک زرد، تأسیسات فرآوری اورانیوم، تأسیسات غنی‌سازی و کارخانه ساخت سوخت هسته‌ای)، تأسیسات پسمانداری انارک و غیره.
مراکز کار با پرتو مشمول نظارت‌های قانونی	مراکز پزشکی و درمانی و تشخیصی، صنعتی، آموزشی و تحقیقاتی، کنترل بار در فرودگاه و گمرک و غیره.

برخی دیگر از فعالیت‌های این مرکز در ادامه بیان شده است.

۱-۴-۶ سامانه هشدار آنی تشعشعات محیطی

سطح پرتوزایی در محیط باید همیشه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد زیرا این احتمال وجود دارد که مواد پرتوزا خواسته یا ناخواسته از تأسیسات هسته‌ای داخلی یا کشورهای دیگر در محیط رها شوند؛ بنابراین، سامانه‌های هشدار آنی پایش تشعشعات محیطی توسط مرکز نظام ایمنی هسته‌ای در نقاط مختلف کشور نصب شده و در حال بهره‌برداری و گسترش است.

موقعیت مکانی ایستگاه‌های هشدارآنی تشعشعات محیطی

۶-۴-۲ کنترل ورود و خروج مواد پرتوزا

کنترل ورود و خروج رادیوایزوتوپ‌ها در مبادی ورودی و خروجی کشور از نظر ایمنی و امنیت حائز اهمیت است. تولیدکنندگان فولاد و سایر فلزات و همچنین صنایع ریخته‌گری (ذوب فلزات) نیز با تهدیدات ناشی از دریافت ناخواسته چشمه‌های پرتوزا در میان قراضه‌های آهن روبرو هستند. جهت جلوگیری از ورود این چشمه‌ها یا مواد آلوده، باید سیستم‌های تشخیصی متفاوتی در مبادی گمرکی وجود داشته باشد. این سیستم‌ها دروازه‌های ایمنی نامیده می‌شوند.

۶-۴-۳ نظارت بر پرتوزایی طبیعی در برخی مناطق کشور

میزان پرتوزایی طبیعی در برخی مناطق کشور مانند رامسر به دلیل غلظت بالای گازهای رادون در اتمسفر منطقه، بالا است و به همین دلیل مرکز نظام ایمنی هسته‌ای در حال ارزیابی مستمر این مناطق است. پروژه‌های گوناگونی در این مناطق برای پایش و حفظ سلامت مردم انجام‌شده یا در حال انجام است.

۶-۴-۴ سنجش پرتوهای آلفا، بتا و گاما در محیط کشور

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای برای سنجش دقیق پرتوهای آلفا، بتا و گاما در محیط کشور، دستگاه‌های پایشی را در نقاط مختلف کشور نصب نموده است. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط این دستگاه‌ها مستقیماً به مرکز ارسال شده و در صورت وجود پرتوگیری بیش از حد طبیعی، تحت بررسی و نظارت قرار می‌گیرند.

دستگاه‌های پایش پرتوهای آلفا، بتا و گاما در محیط

واژه نامه

Accelerator	شتابدهنده
Activity	فعالیت
Alpha particle	ذره آلفا
Atomic number	عدد اتمی
Becquerel	بِکرِل
Beam	باریکه
Beta particle	ذره بِتا
Binding energy	انرژی بستگی
Boiling Water Reactor (BWR)	رآکتور آب جوشان
Brachytherapy	پرتودرمانی داخلی (براکی تراپی)
Cancer	سرطان
Cascade	آبشار
Centrifuge	سانتریفیوژ
Chain reaction	واکنش زنجیره‌ای
Clad	غلاف
Cold kit	کیت سرد
Computed tomography (CT)	برش‌نگاری رایانه‌ای (سی‌تی اسکن)
Condenser	چگالنده (خنک‌کننده)
Contamination	آلودگی
Containment	محفظه راکتور
Control rod	میله کنترل
Conversion facility	تاسیسات فرآوری
Coolant	سیال خنک‌کننده
Core	قلب راکتور
Cosmic ray	پرتو کیهانی
Criticality	بحرانیت هسته‌ای
Curie	کوری

Cyclotron	سیکلوترون
Daughter nucleus	هسته دختر
Decay	واپاشی
Decommissioning	برچینش
Detector	آشکارساز
Distillation	تقطیر
Dose	دز
Dosimetry	دزیمتری
Effective dose	دز مؤثر
Equivalent dose	دز معادل
Exploration	اکتشاف
Fuel assembly	مجتمع سوخت
Fuel cycle	چرخه سوخت
Fuel fabrication	ساخت سوخت
Fuel pellet	قرص سوخت
Fuel rod	میله سوخت
Gamma ray	پرتو گاما
Generator	ژنراتور (مولد برق)، مولد رادیودارو
Half-life	نیمه‌عمر
Heavy water	آب سنگین
Imaging	تصویربرداری
Industrial radiography	رادیوگرافی صنعتی
International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)	راکتور بین‌المللی آزمایشی گرما هسته‌ای (ایتِر)
Ionization	یونیزاسیون
Ionizing radiation	تابش یون‌ساز
Irradiation	پرتودهی
Isotope	ایزوتوپ
Laser	لیزر
Leaching	فروشویی
Linear accelerator	شتابدهنده خطی

Low enriched uranium	اورانیوم با غنای پائین
Mass number	عدد جرمی
Moderator	کندکننده
Natural radioactivity	پرتوزایی طبیعی
Neutron	نوترون
Non-destructive testing	تست غیرمخرب
Nuclear accident	حادثه هسته‌ای
Nuclear energy	انرژی هسته‌ای
Nuclear fission	شکافت هسته‌ای
Nuclear fuel	سوخت هسته‌ای
Nuclear fusion	گداخت (همجوشی) هسته‌ای
Nuclear power plant	نیروگاه هسته‌ای
Nuclear propulsion	پیشران هسته‌ای
Nuclear reaction	واکنش هسته‌ای
Nuclear reactor	رآکتور هسته‌ای
Nucleon	نوکلئون
Nucleus	هسته
Open pit mining	روش استخراج روباز
Parent nucleus	هسته مادر
Photon	فوتون
Plant mutation breeding	اصلاح ژنتیک گیاهان
Plasma	پلاسما
Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor	رآکتور آب سنگین تحت فشار
Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor (PWR)	رآکتور آب سبک تحت فشار
Proton	پروتون
Quantum	کوانتوم
Radiation	تابش
Radiation protection	حفاظت در برابر پرتو
Radioactivity	پرتوزایی

Radiography	رادیوگرافی
Radioisotope	رادیوایزوتوپ- ایزوتوپ پرتوزا
Radiopharmaceutical	رادیودارو
Radiotherapy	پرتودرمانی
Reprocessing	بازفرآوری
Research reactor	رآکتور تحقیقاتی
Safeguard	پادمان
Sensor	حسگر
Separative Work Unit (SWU)	توان جداسازی ماشین (سو)
Spent fuel	سوخت مصرف‌شده
Stable isotope	ایزوتوپ پایدار
Sterilization	استریلیزه (ضدعفونی) کردن
Synchrotron	سینکروترون
Tokamak	توکامک
Uranium enrichment	غنی‌سازی اورانیوم
Uranium extraction	استحصال اورانیوم
Uranium mining	معدنکاری اورانیوم
Waste disposal	دفع (دفن) پسمان
Waste management	پسماندداری
X ray	پرتو ایکس
Yellow cake	کیک زرد