مسلسل: ۱۸۶۷۶
دی ۱۴۰۱

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن

وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در ایران و جهان - حوزه سلامت

بسم الله الرحمن الرحیم
بنام خدای بزرگ بخشایش همیشه بخشاینده

تاریخ انتشار:
۱۴۰۱/۱۰/۲۴

شماره مسلسل: ۱۸۶۷۶
کد موضوعی: ۳۱۰

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

عنوان گزارش:

وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در ایران و جهان- حوزه سلامت

نام دفتر:
مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه انرژی)

تهیه و تدوین:
ایمان رمضانی

اظهارنظرکنندگان:
محمد بختیاری علی‌آباد، مصطفی محمدی رمضانی

ناظران علمی:
محمدحسن معادی رودسری، حبیب‌الله ظفریان ریگکی

صفحه‌آرا:
نفیسه حاجی‌صفری

ویراستار ادبی:
شیوا امین اسکندری

واژه‌های کلیدی:
۱. فناوری هسته‌ای
۲. کاربرد پرتوها
۳. بهداشت و درمان
۴. نقشه راه صنعت هسته‌ای

دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن

فهرست مطالب

۷
چکیده

۸
خلاصه مدیریتی

۹
مقدمه

۱۰
۱.ابعاد فنی بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت

۱۳
۲. وضعیت پزشکی هسته‌ای در جهان

۱۵
۳. وضعیت پزشکی هسته‌ای در ایران و چالش‌های موجود

۱۸
جمع‌بندی و پیشنهادها

۱۸
منابع و مآخذ

فهرست جداول

جدول تولیدکنندگان اصلی مولیبدن-۹۹ در جهان ۱۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۱. حوزه‌های اصلی کاربرد فناوری هسته‌ای در سلامت ۱۰
شکل ۲. مراحل تولید تکنسیوم-۹۹ ..... ۱۱
شکل ۳. نقشه توزیع دستگاه‌های اسپکت در کشورهای دنیا ۱۴
شکل ۴. نقشه توزیع دستگاه‌های پِت در کشورهای دنیا ۱۵
شکل ۵. نقشه توزیع مراکز پزشکی هسته‌ای در استان‌های کشور ۱۶
شکل ۶. نقشه توزیع دستگاه‌های پِت و سیکلوترون‌های بیمارستانی مورد نیاز در استان‌های کشور تا سال ۱۴۰۴ ..... ۱۷

وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در ایران و جهان - حوزه سلامت

چکیده

کاربردهای فناوری هسته‌ای به تولید برق محدود نمی‌شود و می‌توان از پرتوهای هسته‌ای نیز در طیف وسیعی از کاربردها، از جمله کاربردهای مرتبط با حوزه سلامت شامل تشخیص و درمان بیماری‌ها و همچنین استریل کردن تجهیزات و مواد بیمارستانی بهره برد. مهم‌ترین رادیوایزوتوپ کاربردی در این حوزه، مولیبدن-۹۹ است که غالباً از شکافت اورانیوم با غنای بالا (حدود ۹۰ درصد) تولید می‌شود. کشورهای توسعه‌یافته جهان به‌طور گسترده‌ای از کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت بهره‌برداری می‌کنند. به‌عنوان مثال در کشور آمریکا سالیانه ۲۰ میلیون عملیات پزشکی هسته‌ای انجام می‌شود. در ایران نیز با توجه به نیاز غیرقابل چشم‌پوشی جامعه به این‌گونه کاربردها، استفاده از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت مورد توجه قرار گرفته و امروزه اغلب رادیوداروهای مورد نیاز بیماران را متخصصان کشور ساخته و در مراکز متعدد پزشکی هسته‌ای به‌کار گرفته می‌شود. با این وجود، زیرساخت‌های فعلی کشور در این حوزه، پاسخگوی نیازهای رو به رشد کشور به خدمات پزشکی هسته‌ای نیست. طبق بررسی‌های انجام شده، مهم‌ترین الزامات توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت، احداث راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، تأمین سیکلوترون‌های بیمارستانی، تولید اورانیوم با غنای بالا، تأمین تجهیزات تصویربرداری هسته‌ای، تربیت نیروهای متخصص، توزیع امکانات مربوطه در کشور و رفع موانع مشارکت شرکت‌های دانش‌بنیان در این حوزه است.

خلاصه مدیریتی

علی‌رغم مناقشات سیاسی در مورد برنامه هسته‌ای ایران و ادعاهای خلاف واقع برخی دولت‌های متخاصم، بهره‌برداری از کاربردهای متنوع فناوری هسته‌ای برای رفع نیازهای کشور ضرورت دارد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری هسته‌ای، کاربردهای آن در حوزه سلامت است.

به‌طور کلی کاربردهای فناوری هسته‌ای در بخش سلامت، در سه حوزه تشخیص پزشکی، درمان بیماری‌ها (به‌ویژه سرطان) و استریل کردن تجهیزات و مواد بیمارستانی استفاده می‌شوند. مهم‌ترین زیرساخت‌های مورد نیاز جهت استفاده از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت نیز عبارتند از: راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، سیکلوترون‌های بیمارستانی، تجهیزات تصویربرداری و نیروی انسانی. شایان ذکر است که **۹۰ درصد از خدمات پزشکی هسته‌ای مربوط به استفاده از پرتوهای هسته‌ای در رویه‌های تشخیصی هستند و مهم‌ترین ماده پرتوزای مورد استفاده در رویه‌های تشخیصی پزشکی هسته‌ای، تکنسیوم-۹۹ است.**

منشأ تولید تکنسیوم-۹۹، قرارگیری اورانیوم غنی‌شده در راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی است. برای این منظور، اغلب از اورانیوم با غنای بالا (حدود ۹۰ درصد) استفاده می‌شود. اگرچه استفاده از اورانیوم با غنای پایین نیز برای تولید این ماده امکان‌پذیر است، اما باعث کاهش کیفیت مواد تولیدی، کاهش میزان تولید و افزایش هزینه تولید می‌شود. با این وجود آمریکا و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی به بهانه جلوگیری از اشاعه سلاح‌های هسته‌ای، کشورها را جهت استفاده از اورانیوم با غنای کم برای این منظور، تحت فشار قرار می‌دهند.

بسیاری از کشورهای جهان نیز به توسعه کاربردهای پزشکی هسته‌ای در حوزه سلامت توجه کرده‌اند. به‌طوری که در کشور آمریکا سالیانه ۲۰ میلیون و در اروپا ۱۰ میلیون عملیات پزشکی هسته‌ای انجام می‌شود و به طور کلی **در کشورهای توسعه‌یافته از هر پنجاه نفر یک نفر در هر سال از خدمات تشخیصی پزشکی هسته‌ای استفاده می‌کنند.** در حال حاضر ۷۸ راکتور هسته‌ای تحقیقاتی در جهان برای تولید رادیوایزوتوپ مورد استفاده قرار می‌گیرند و کشورهای هلند، بلژیک، لهستان، فرانسه، آلمان، جمهوری چک، چین، ایالات متحده آمریکا، آفریقای جنوبی، روسیه و استرالیا تولیدکنندگان اصلی مواد پرتوزای مورد استفاده در حوزه پزشکی هسته‌ای هستند.

در جمهوری اسلامی ایران نیز همگام با پیشرفت‌های صورت گرفته در بهره‌برداری صلح‌آمیز از فناوری هسته‌ای، توسعه کاربرد پرتوهای هسته‌ای در حوزه سلامت مورد توجه قرار گرفته است. ایران با داشتن ۲۰۵ مرکز پزشکی هسته‌ای، خدمات مختلف این حوزه را به بیماران ارائه می‌دهد. با این وجود، **زیرساخت‌های فعلی کشور در این زمینه، برای رفع نیاز روزافزون کشور به کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت کافی نیست.** در حال حاضر تنها یک راکتور تحقیقاتی در کشور (راکتور تهران با عمر ۵۴ سال) قابلیت تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای را دارد و از طرف دیگر، تعداد محدودی سیکلوترون نیز در شهرهای تهران، کرج و مشهد در حال تأمین بخشی از مواد پرتوزای مورد نیاز بخش پزشکی هسته‌ای کشور هستند. چهار مرکز پرتودهی هسته‌ای نیز در شهرهای تهران، بناب، شهرکرد و یزد فعال هستند. همچنین تعداد متخصصان پزشکی هسته‌ای در کشور حدود ۱۵۰ نفر است.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، مهم‌ترین الزامات کوتاه‌مدت به‌منظور توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت در راستای رفع نیازهای کشور، شامل **احداث راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، تأمین و راه‌اندازی سیکلوترون‌های بیمارستانی، تأمین حداقل ۱۳۱ دستگاه تصویربرداری اسپکت، تأمین حداقل ۲۰ دستگاه تصویربرداری پت، تجهیز ۱۵ مرکز پزشکی هسته‌ای کشور به بخش بستری پزشکی هسته‌ای، احداث حداقل ۱۲ مرکز پرتودهی، تربیت حداقل ۱۰۰ نفر متخصص پزشکی هسته‌ای و داروسازی هسته‌ای،** توزیع مناسب امکانات مربوطه در کشور، رفع موانع مشارکت شرکت‌های دانش‌بنیان در این حوزه و هماهنگی بیشتر میان سازمان انرژی اتمی و وزارت بهداشت می‌شوند. همچنین از آنجایی که استفاده از اورانیوم با غنای بالا به‌عنوان ماده هدف، نقش مهمی در کیفیت رادیوایزوتوپ‌های تولیدی دارد، **پیشنهاد می‌شود به اقتضای شرایط سیاسی موجود، تولید اورانیوم با غنای ۹۰ درصد به‌صورت آزمایشی در دستور کار قرار گیرد.**

مقدمه

فناوری هسته‌ای به‌عنوان یک فناوری راهبردی برای کشور، کاربردهای متنوعی دارد که با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، مناقشات سیاسی مربوطه مانع از برنامه‌ریزی بلندمدت برای بهره‌برداری از این فناوری و انتفاع حداکثری مردم از کاربردهای آن شده است. ازطرف‌دیگر، برخی دولت‌های متخاصم با طرح ادعاهایی در مورد برنامه هسته‌ای ایران، سعی بر ایجاد شبهه در مورد توجیه فنی و اقتصادی این برنامه دارند تا صلح‌آمیز بودن فعالیت‌های هسته‌ای کشور را زیر سؤال ببرند. ازاین‌رو معرفی کاربردهای مختلف فناوری هسته‌ای و بررسی نیازهای کشور در هریک از حوزه‌های مربوطه ضروری به‌نظر می‌رسد. از آنجایی که استفاده از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت یکی از مهم‌ترین کاربردهای این فناوری است، در گزارش حاضر، به انواع کاربردهای فناوری هسته‌ای در این حوزه و زیرساخت‌های مورد نیاز آن اشاره شده و در ادامه، وضعیت کشورهای جهان در بهره‌برداری از پزشکی هسته‌ای و همچنین وضعیت پزشکی هسته‌ای در داخل کشور و چالش‌های موجود در این زمینه بررسی شده است. در پایان پیشنهادهایی به‌منظور توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت کشور ارائه شده است.

۱. ابعاد فنی بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت

کاربردهای فناوری هسته‌ای به تولید برق محدود نمی‌شود و می‌توان از پرتوهای هسته‌ای در طیف وسیعی از کاربردها بهره برد که یکی از مهم‌ترین آنها، کاربردهای مرتبط با حوزه سلامت است. کاربردهای صلح‌آمیز فناوری هسته‌ای پس از جنگ جهانی دوم مورد توجه قرار گرفتند و تولید مواد پرتوزای قابل استفاده در پزشکی نیز اولین بار در سال ۱۹۴۶ انجام شد. در سال‌های بعد استفاده از پرتوهای هسته‌ای در بهداشت و سلامت با سرعت زیادی رشد کرد و امروزه به بخش جدایی‌ناپذیر علم پزشکی، خصوصاً در حوزه تشخیص و درمان سرطان‌ها، تبدیل شده است. به‌طوری که در کشورهای توسعه‌یافته از هر پنجاه نفر یک نفر در هر سال از خدمات تشخیصی پزشکی هسته‌ای استفاده می‌کنند و در مورد خدمات درمانی پزشکی هسته‌ای این رقم یک نفر از هر پانصد نفر در سال است.[1] در ایران نیز مطالعات پزشکی هسته‌ای از سال ۱۳۳۹ شروع شد و رشته تخصصی پزشکی هسته‌ای در ابتدای دهه ۱۳۶۰ در کشور آغاز به‌کار کرد.[2] با افزایش تعداد متخصصان پزشکی هسته‌ای در کشور و از طرف دیگر، پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه تولید رادیوداروها، امکان بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت فراهم شده است.

پرتوهای هسته‌ای معمولاً از واپاشی[3] هسته‌های پرتوزا (رادیوایزوتوپ‌ها)[4] به‌وجود می‌آیند و حامل مقادیری انرژی هستند. اگرچه برخی مواد پرتوزا در طبیعت نیز وجود دارند، اما مواد پرتوزای مورد استفاده در کاربردهای پزشکی یا صنعتی، توسط انسان و درنتیجه واکنش‌های هسته‌ای درون راکتورهای هسته‌ای یا شتاب‌دهنده‌های ذرات تولید می‌شوند. رادیوایزوتوپ‌ها به‌عنوان مهم‌ترین ادوات مورد نیاز در عرصه پزشکی هسته‌ای، با فناوری هسته‌ای تولید شده و در همه کاربردهای مرتبط با حوزه سلامت استفاده می‌شوند.

۱-۱. مروری بر کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت

به‌طور کلی می‌توان کاربردهای فناوری هسته‌ای در سلامت را به سه حوزه تشخیص، درمان و پرتودهی به تجهیزات و مواد دسته‌بندی کرد (شکل ۱).

شکل ۱. حوزه‌های اصلی کاربرد فناوری هسته‌ای در سلامت

Source: Retrieved from: World Nuclear Association, Radioisotopes in Medicine, 2022.

1. World Nuclear Association, Radioisotopes in Medicine, 2022.

۲. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، سند جامع پزشکی هسته‌ای ایران تا سال ۱۴۰۴، بهار ۱۴۰۰.

3. Decay

4. Radioisotopes

مهم‌ترین حوزه ایـــن کاربردها که ۹۰ درصد از خدمات پزشـــکی هسته‌ای را شـــامل می‌شـــوند، اســـتفاده از پرتوهای هسته‌ای در رویه‌های تشـــخیصی هســـتند.[۱] هنگامی که مواد پرتوزا در شکل رادیودارو به بدن بیمار تزریق می‌شوند، با توجه به ماهیت رادیودارو به اندام مختلف بدن وارد شـــده و بـــا تابش پرتوهای هســـته‌ای و آشکارسازی این تابش‌ها در بیرون بدن بیمار، عملکرد اندام مختلف بدن مورد بررســـی قرار می‌گیرد. رویه‌های تشـــخیصی پزشـــکی هســـته‌ای در تشـــخیص بیماری‌های قلبی، ریـــوی، مغزی، غدد، اطفال، استخوان‌ها، انواع ســـرطان و غیره کاربرد دارند. مهم‌ترین مـــاده پرتوزای مورد اســـتفاده در رویه‌های تشـــخیصی پزشـــکی هسته‌ای، تکنســـیوم-۹۹ اســـت که در ۸۰ درصد از عملیات‌های پزشکی هســـته‌ای استفاده می‌شـــود و ســـالیانه ۴۰ میلیون بیمار در جهان از این ماده اســـتفاده می‌کنند.[۲] تکنسیوم-۹۹ از واپاشی هسته مولیبدن-۹۹ به‌وجود می‌آید و به‌دلیل نیمه‌عمر کوتاه آن (۶ ساعت)، تا قبل از زمان مصرف همراه با مولیبدن-۹۹ باقی می‌ماند. مولیبدن-۹۹ به‌عنوان ماده اولیه تکنسیوم-۹۹، از شکافت اورانیوم غنی‌شده در راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی[۳] تولید می‌شود. فرایند تولید تکنسیوم-۹۹ در شکل ۲ ارائه شده است.

شکل ۲.مراحل تولید تکنسیوم-۹۹

Source :Nuclear Energy Agency) NEA ,(The Supply of Medical Radioisotopes :An Economic Study of the Molybdenum 99-Supply Chain.2010 ,

علاوه‌بر تشـــخیص، فناوری هســـته‌ای در حوزه درمان بیماری‌ها هم کاربردهـــای مؤثری دارد. عمـــده کاربرد فناوری هســـته‌ای در حوزه درمان، مربوط به مهار و درمان انوع سرطان است. برای درمان سرطان، پرتوهای هسته‌ای متصاعد از رادیودارو به بافت هدف برخورد می‌کنند و باعث از بین بردن سلول‌های سرطانی می‌شـــوند. در برخی موارد از شتاب‌دهنده‌های ذرات هم به‌عنوان منبع تولید پرتو استفاده می‌شود. مرکز ملی یون درمانی ایران نمونه‌ای از درمان ســـرطان با استفاده از شتاب‌دهی ذرات اســـت. ســـالیانه بیش از ۳۰۰۰۰ بیمار در جهان با استفاده از فناوری هســـته‌ای تحت درمان قرار می‌گیرند. موفق‌ترین درمان سرطان با استفاده از تابش‌های هسته‌ای، درمان سرطان تیروئید است که با ماده پرتوزا ید-۱۳۱ انجام می‌شود.[۴] ید-۱۳۱ در راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی تولید می‌شود و پر کاربردترین ماده پرتوزا جهت اقدام‌های درمانی پزشکی هسته‌ای در داخل کشور است.[۵]

تجهیزات و مواد مورد اســـتفاده در رویه‌های پزشکی باید تاحدامکان عاری از آلودگی‌ها و میکروب‌ها باشـــند تا از بـــروز عفونت‌های بعدی در بدن بیمار جلوگیری شـــود. به همین دلیل اســـتریل کردن مواد و تجهیزات پزشکی از اهمیت بالایی برخوردار است. ازجمله روش‌های استریل کردن این تجهیزات استفاده از گازهای سمی و بخار آب است که معایب زیادی دارند چراکه باقی ماندن گازهای سمی در تجهیزات پزشکی، آســـیب‌های جبران‌ناپذیری برای بیمار در پی خواهد داشت. همچنین استفاده از بخار آب با دمای بالا هم در بسیاری از موارد باعث ایجاد آسیب در تجهیزات و مواد می‌شـــود که باعث بالا رفتن هزینه‌ها خواهد شد. یکی از روش‌های غیرمخرب برای استریل کردن تجهیزات پزشکی اســـتفاده از پرتوهای هسته‌ای اســـت که از اثربخشی و صرفه اقتصادی مناسبی برخوردار است. در این روش با قرارگیری تجهیزات در معرض پرتوهای هسته‌ای، انرژی پرتوها باعث از بین رفتن آلودگی‌ها شـــده و تجهیزات مورد نظر درون بســـته‌بندی و با کمترین آســـیب ضدعفونی می‌شوند.

---

۱. همان.
۲. همان.
۳. راکتورهای اتمی براساس کاربرد آنها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: ۱. راکتورهای قدرت که برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند، ۲. راکتورهای تحقیقاتی که برای تولید رادیوایزوتوپ‌های هسته‌ای، آزمایش مواد، فعالیت‌های تحقیقاتی و مواردی از این دست استفاده می‌شوند.
۴. همان.
۵. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، سند جامع پزشکی هسته‌ای ایران تا سال ۱۴۰۴، بهار ۱۴۰۰.

شایان ذکر است که این سیستم‌های پرتودهی جهت افزایش طول عمر محصولات کشاورزی بدون استفاده از مواد نگهدارنده نیز قابل استفاده‌اند که کاربردهایی از این نوع، در دسته کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه کشاورزی قرار می‌گیرند و لازم است تا در گزارش جداگانه‌ای به این کاربردها پرداخته شود. پرکاربردترین هسته پرتوزا مورد استفاده برای پرتودهی، کبالت-۶۰ است که این ماده نیز در راکتورهای تحقیقاتی تولید می‌شود.[1] در برخی موارد از شتاب‌دهنده‌های ذرات هم برای پرتودهی استفاده می‌شود. یک کاربرد مهم دیگر سیستم‌های پرتودهی در پزشکی، پرتودهی به فراورده‌های خونی است که باعث افزایش کیفیت خون و قابلیت استفاده از خون برای افراد حساس می‌شود. موارد متعددی ازجمله بیماران نیازمند پیوند مغز استخوان، بیماران ایدز، بیماران نقص ایمنی و نوزادان نارس به فراورده‌های پرتودهی‌شده نیاز دارند. این کاربرد روش جایگزینی ندارد و در این بیماران تزریق خون پرتودهی نشده می‌تواند به مرگ بیمار منجر شود.[2]

۲-۱. تجهیزات و زیرساخت‌های مورد نیاز

بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای در کاربردهای مرتبط با حوزه سلامت نیازمند تجهیزات و زیرساخت‌هایی است که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی
- شتاب‌دهنده‌های ذرات
- تجهیزات تصویربرداری
- نیروی انسانی

راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، برخلاف راکتورهای هسته‌ای قدرت، برای تولید برق مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و اغلب برای اهدافی چون تولید مواد پرتوزا، آزمایش مواد، پژوهش‌های کاربردی و آموزش نیروی انسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوترون‌های تولیدی در این راکتورها در اثر برخورد با مواد هدف،[3] منجر به تولید هسته‌های پرتوزا خواهند شد. بسیاری از هسته‌های پرتوزای مورد استفاده در حوزه پزشکی، در راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی تولید می‌شوند. لذا راکتورهای تحقیقاتی نقشی کلیدی در تولید رادیوداروهای مورد استفاده در امور تشخیصی و درمانی پزشکی هسته‌ای دارند. شایان ذکر است که رادیوایزوتوپ مولیبدن-۹۹ که پرکاربردترین ماده پرتوزا در پزشکی هسته‌ای است، با قرارگیری اورانیوم غنی‌شده (به‌عنوان ماده هدف) درون راکتور تحقیقاتی تولید می‌شود. برای این منظور اغلب از اورانیوم با غنای بالا (حدود ۹۰ درصد) استفاده می‌شود. اگرچه استفاده از اورانیوم با غنای پایین نیز برای تولید این ماده امکان‌پذیر است، اما باعث کاهش کیفیت مواد تولیدی، کاهش میزان تولید و افزایش هزینه تولید می‌شود.[4]

تجهیزات دیگری که در تولید برخی رادیوداروها و پرتوهای مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای حائز اهمیت است، شتاب‌دهنده‌های ذرات (سیکلوترون) هستند. شتاب‌دهنده دستگاهی است که در آن ذرات باردار به وسیله میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی تا سرعت‌های بسیار زیادی شتاب داده می‌شوند. از برخورد این ذرات با برخی مواد و عناصر، هسته‌های پرتوزای کاربردی در حوزه پزشکی تولید می‌شوند. همچنین ممکن است از خود شتاب‌دهنده ذرات برای درمان یا تحقیقات پزشکی استفاده شود. در این صورت ذرات شتاب داده شده با شدت و انرژی مشخص به بافت سرطانی برخورد و آن را تخریب و مانع رشد و نمو آن می‌شوند. مهم‌ترین هسته پرتوزا تولیدی توسط شتاب‌دهنده که در حوزه تشخیصی پزشکی کاربرد زیادی دارد، فلوئور-۱۸ است. به‌دلیل نیمه‌عمر بسیار کوتاه این ماده (۱۱۰ دقیقه) شتاب‌دهنده‌های پزشکی باید درون مراکز درمانی مورد نظر یا در فاصله نزدیکی از آنها واقع شوند. در حوزه تشخیصی پزشکی هسته‌ای، تجهیزات تصویربرداری در خارج از بدن بیمار مستقر می‌شوند تا با ثبت پرتوهای دریافتی، امکان تحلیل عملکرد اندام مورد نظر فراهم شود. بنابراین در بهره‌برداری از کاربردهای مرتبط با حوزه سلامت فناوری هسته‌ای، تجهیزات تصویربرداری نیز نقش مهمی دارند و همه مراکز پزشکی هسته‌ای حداقل به یک دستگاه تصویربرداری هسته‌ای مجهز هستند. یکی از دستگاه‌های تصویربرداری متداولی که در مراکز پزشکی هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، دوربین‌های گاما جهت مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک‌فوتونی (اسپکت)[5] است. امروزه تجهیزات تصویربرداری پیشرفته‌تر برش‌نگاری با گسیل پوزیترون (پت)[6] نیز در پزشکی هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که تجهیزاتی دقیق‌تر، پیچیده‌تر و گران‌تر هستند.

در زمینه نیروی انسانی نیز مهم‌ترین تخصص‌های مورد نیاز در کاربرد فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت، شامل پزشکی هسته‌ای و داروسازی هسته‌ای و همچنین سایر تخصص‌های مرتبط با این حوزه، پرتو پزشکی، رادیولوژی و فیزیک پزشکی هستند.

---

1. World Nuclear Association, Radioisotopes in Medicine, 2022.
۲. مریم زادسر و همکاران، وضعیت یک ساله مصرف فراورده‌های خون اشعه دیده در اداره کل انتقال خون استان تهران، فصلنامه پژوهشی خون، ۱۳۹۲.
3. Target
4. Nuclear Energy Agency) NEA ,(The Supply of Medical Isotopes :An Economic Diagnosis and Possible Solutions,2019 .
5. Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)
6. Positron Emission Tomography (PET)

[۲. وضعیت پزشکی هسته‌ای در جهان]

پس از کشف پدیده پرتوزایی و با پیشرفت‌های علمی در زمینه تولید مواد پرتوزا، استفاده از این مواد در کاربردهای مختلف از جمله سلامت و بهداشت، مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفت. امروزه بیش از ۱۰۰۰۰ بیمارستان در سراسر دنیا خدمات پزشکی هسته‌ای ارائه می‌دهند. سالیانه در کشور آمریکا ۲۰ میلیون و در اروپا ۱۰ میلیون عملیات پزشکی هسته‌ای انجام می‌شود. به‌طور کلی در کشورهای توسعه‌یافته از هر پنجاه نفر یک نفر در هر سال از خدمات تشخیصی پزشکی هسته‌ای استفاده می‌کنند.[1]

در حال حاضر ۲۲۳ راکتور تحقیقاتی در ۵۳ کشور جهان در حال فعالیت است که از این تعداد، ۷۸ راکتور برای تولید رادیوایزوتوپ مورد استفاده قرار می‌گیرد و ۶ راکتور تحقیقاتی جدید با هدف تولید رادیوایزوتوپ نیز در حال ساخت است.[2] تولیدکنندگان اصلی مواد پرتوزای مورد استفاده در حوزه پزشکی در جهان عبارتند از کشورهای هلند، بلژیک، لهستان، فرانسه، آلمان، جمهوری چک، چین، ایالات متحده آمریکا، آفریقای جنوبی، روسیه و استرالیا. در کشور مصر هم تلاش‌هایی برای تأمین مواد پرتوزای مورد نیاز برای مصارف پزشکی داخلی انجام شده است. ازآنجایی که حدود ۸۰ درصد از رویه‌های پزشکی هسته‌ای در جهان وابسته به رادیوایزوتوپ مولیبدن-۹۹ است و سالیانه ۴۰ میلیون بیمار در جهان از این ماده استفاده می‌کنند، این ماده پرتوزا نقش مهمی در رفع نیازهای پزشکی هسته‌ای دارد. فروش سالیانه این رادیوایزوتوپ در دنیا، حدود ۵ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود. فهرست تأمین‌کنندگان اصلی مولیبدن-۹۹ در جهان، در جدول ارائه شده است. در حال حاضر عرضه مولیبدن-۹۹ پنجاه درصد بیشتر از تقاضا است. اما باید توجه داشت که به‌دلیل نیمه عمر کوتاه، امکان ذخیره‌سازی این ماده وجود ندارد و مولیبدن تولید شده باید در مدت کوتاهی به مصرف‌کننده رسانده شود. بنابراین فاصله مکانی میان محل تولید و مصرف این ماده و همچنین حمل‌ونقل سریع آن اهمیت ویژه‌ای دارد. ازطرف‌دیگر، اکثر راکتورهای تولیدکننده مولیبدن-۹۹، طول عمری بیش از پنجاه سال دارند و با از رده خارج شدن آنها، امکان کمبود این ماده در جهان محتمل است.

جدول تولیدکنندگان اصلی مولیبدن-۹۹ در جهان

کشور	نام راکتور تحقیقاتی	توان حرارتی (مگاوات)	ماده تحت تابش	ظرفیت (کوری در هفته)
بلژیک	BR-۲	۱۰۰	اورانیوم غنای بالا[3]	۶۵۰۰
هلند	HFR	۴۵	اورانیوم غنای کم[4]	۶۲۰۰
استرالیا	Opal	۲۰	اورانیوم غنای کم	۳۵۰۰
آفریقای جنوبی	Safari	۲۰	اورانیوم غنای کم	۳۰۰۰
جمهوری چک	LVR-۱۵	۱۰	اورانیوم غنای بالا	۳۰۰۰
لهستان	Maria	۳۰	اورانیوم غنای کم	۲۲۰۰
روسیه	RBT-۱۰/۲	۷	اورانیوم غنای بالا	۸۹۰
	RBT-۶	۶	اورانیوم غنای بالا	
آمریکا	MURR	۱۰	اورانیوم غنای بالا	۷۵۰
آرژانتین	RA-۳	۱۰	اورانیوم غنای کم	۴۰۰

Source: World Nuclear Association, Radioisotopes in Medicine, 2022..

1. World Nuclear Association ,Radioisotopes in Medicine,2022.
2. International Atomic Energy Agenc(IAEA),Research Reactor Database (RRDB),2022

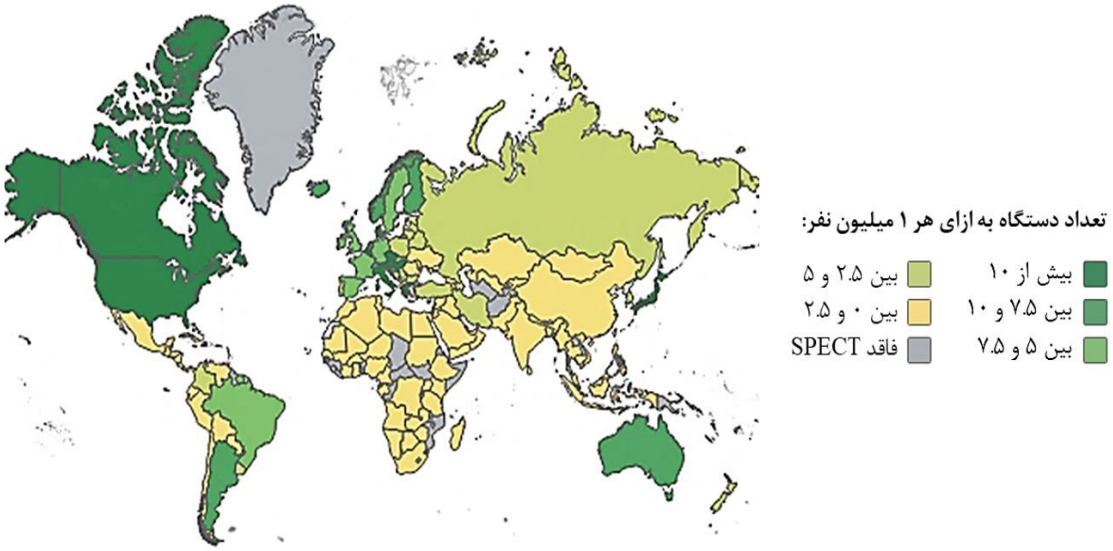
۳. منظور از اورانیوم با غنای بالا، اورانیوم با غنای بیش از ۲۰ درصد است. با این وجود در این راکتورها اغلب از اورانیوم با غنای بالای ۹۰ درصد برای تولید مولیبدن-۹۹ استفاده می‌شود.

۴. منظور از اورانیوم با غنای کم، اورانیوم با غنای کمتر از ۲۰ درصد است. با این وجود در این راکتورها اغلب از اورانیوم با غنای حدود ۲۰ درصد برای تولید مولیبدن-۹۹ استفاده می‌شود.

مسئله دیگری که درخصوص تولید مولیبدن-۹۹ در راکتورهای تحقیقاتی حائز اهمیت است، غنای اورانیوم مورد استفاده به‌عنوان هدف تحت تابش است. اگرچه استفاده از اورانیوم با غنای بالا (بیش از ۹۰ درصد غنی شده) منجر به افزایش ظرفیت تولید و کیفیت ماده پرتوزای تولیدشده می‌شود، اما آمریکا و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی به بهانه جلوگیری از اشاعه سلاح‌های هسته‌ای، کشورها را جهت استفاده از اورانیوم با غنای کم (کمتر از ۲۰ درصد) برای تولید مولیبدن-۹۹ تحت فشار قرار می‌دهند.[۱] در حوزه شتاب‌دهنده‌های ذرات (سیکلوترون‌ها) هم ۶۸۲ شتاب‌دهنده برای تولید رادیوایزوتوپ‌ها در جهان وجود دارند. رادیوایزوتوپ اصلی مورد استفاده در حوزه پزشکی که با شتاب‌دهنده‌ها تولید می‌شود، فلوئور-۱۸ است که به‌دلیل نیمه عمر بسیار کوتاه (۱۱۰ دقیقه)، باید در فاصله نزدیکی از مراکز درمان تولید شود و لذا امکان صادرات آن وجود ندارد. بزرگ‌ترین تأمین‌کنندگان سیکلوترون‌های بیمارستانی، شرکت جنرال الکتریک[۲] آمریکا، شرکت کاربرد پرتوهای یونی[۳] بلژیک و شرکت زیمنس[۴] آلمان هستند.[۵]

علاوه‌بر رادیوایزوتوپ‌ها، تجهیزات تصویربرداری پزشکی هسته‌ای هم در بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای در حوزه پزشکی نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. متداول‌ترین تجهیزات، دستگاه اسپکت است که حدود ۲۷ هزار دستگاه از آن در ۱۴۱ کشور دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرانه تعداد دستگاه اسپکت در دنیا ۳/۵ دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر و استاندارد جهانی، چهار دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر است. نقشه توزیع این دستگاه‌ها در کشورهای دنیا به‌صورت شکل ۳ است. بیشترین تعداد این دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر، در آمریکا، کانادا، ژاپن و برخی کشورهای اروپایی (بیش از ۱۰ دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر) وجود دارد.

شکل ۳. نقشه توزیع دستگاه‌های اسپکت در کشورهای دنیا



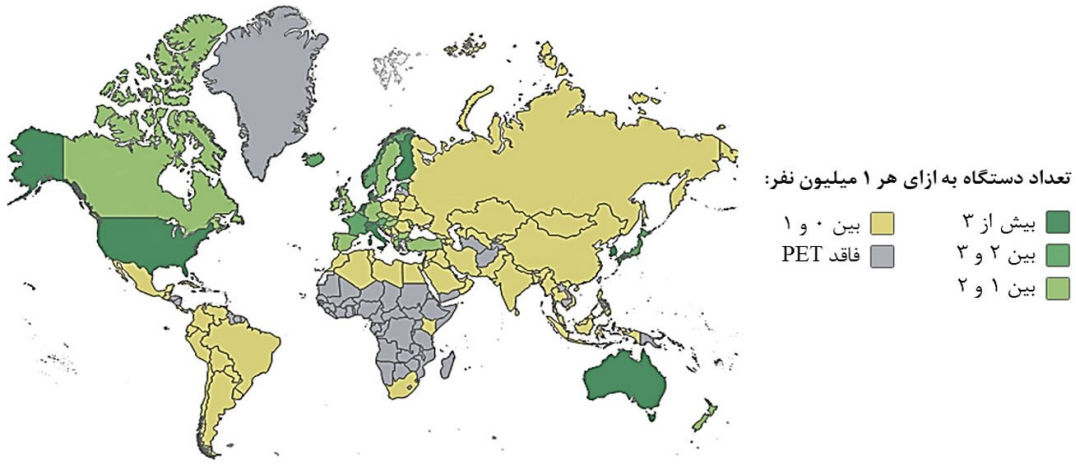
Source: International Atomic Energy Agency (IAEA), Medical Imaging and Nuclear Medicine Global Resources Database, 2022.

تجهیزات تصویربرداری دیگری که از دقت بیشتری برخوردار است، دستگاه پِت است که به‌دلیل قیمت بیشتر، تعداد آن در کشورهای جهان نسبت به دستگاه‌های اسپکت کمتر است. به‌طوری که حدود ۵ هزار دستگاه از این نوع در ۱۰۶ کشور جهان وجود دارد و سرانه تعداد دستگاه پِت در دنیا ۰/۷ دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر و استاندارد جهانی، ۰/۷ الی ۲ دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر است. نقشه توزیع این دستگاه‌ها در کشورهای دنیا در شکل ۴ ارائه شده است. بیشترین تعداد دستگاه پِت به‌ازای هر یک میلیون نفر، در آمریکا، استرالیا، کره جنوبی و برخی کشورهای اروپایی (بیش از سه دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر) وجود دارد. تولیدکنندگان اصلی تجهیزات تصویربرداری پزشکی هسته‌ای در دنیا، شرکت‌های جنرال الکتریک آمریکا، زیمنس آلمان و فیلیپس[۱] هلند هستند.

۱. این در حالی است که آمریکا تنها کشور استفاده‌کننده از سلاح‌های هسته‌ای است و همچنان به توسعه زرادخانه‌های هسته‌ای خود ادامه می‌دهد.

2. General Electric(GE)
3. Ion Beam Applications(IBA)
4. Siemens
5. International Atomic Energy Agency(IAEA),Accelerator Database,2022 .

شکل ۴.نقشه توزیع دستگاه‌های پِت در کشورهای دنیا



Source: Ibid.

[۳. وضعیت پزشکی هسته‌ای در ایران و چالش‌های موجود]

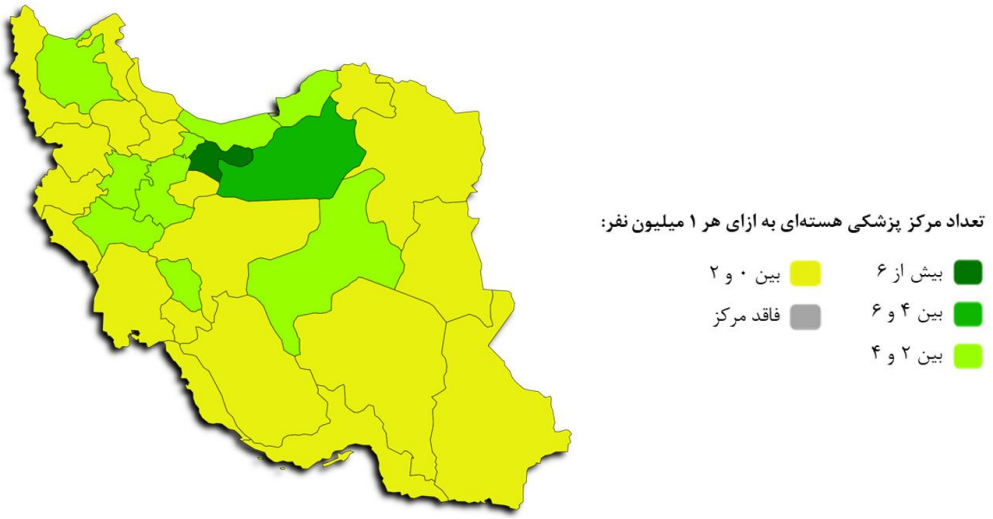
در جمهوری اسلامی ایران نیز همگام با پیشـــرفت‌های صورت گرفته در بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای، توسعه کاربرد پرتوهای هسته‌ای در حوزه سلامت مورد توجه قرار گرفته است. ایران با داشتن مراکز متعدد پزشکی هســـته‌ای، خدمات مختلف این حوزه را به بیماران ارائه می‌دهد و با وجود تحریم‌های ظالمانه موفق شده است تا رادیوداروهای مورد نیاز کشور را تولید کند. به‌طوری که سالیانه حدود یک میلیون نفر در کشور از خدمات پزشکی هسته‌ای بهره‌مند می‌شوند. با این وجود به‌دلیل افزایش روزافزون ابتلا به سرطان در کشور و زیرساخت‌های فعلی کشور، باید درخصوص توسعه و گسترش روش‌های نوین تشخیصی و درمانی پزشکی هسته‌ای اقدام‌های اساسی و بیشـــتری صورت گیرد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مهم‌ترین تجهیزات و زیرساخت‌های مورد نیاز در بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت، عبارتند از: راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، شتاب‌دهنده‌های ذرات، تجهیزات تصویربرداری و نیروی انسانی. در این بخش سعی بر این است تا با در نظر گرفتن زیرساخت‌های مربوطه، وضعیت فعلی کشور در زمینه کاربردهای فناوری هســـته‌ای در حوزه ســـلامت بررسی شده و به چالش‌های موجود اشاره شود. از چهار راکتور تحقیقاتی فعال کشور، فقط یک راکتور (راکتور تهران) قابلیت تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای را دارد و بقیه راکتورهای تحقیقاتی، اغلب جنبه آموزشی دارند. با توجه به طول عمر بالای راکتور تهران (۵۴ سال) و ظرفیت تولید آن، ساخت راکتورهای تحقیقاتی جدید به‌منظور حفظ و ارتقای ظرفیت تولید رادیوداروها در کشـــور ضروری است. شـــایان ذکر است که راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک هم قابلیت تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد نیاز در پزشکی هسته‌ای را دارد و در صورت بهره‌برداری از آن، بخشی از نیاز کشور در این زمینه برطرف خواهد شـــد. ازطرف‌دیگر، تأمین اورانیوم غنی‌شده جهت قرارگیری در راکتورهای تحقیقاتی به‌عنوان ماده هدف، برای تولید رادیوایزوتوپ مولیبدن-۹۹ ضروری است. در حال حاضر سطح غنی‌سازی اورانیوم در کشور به ۶۰ درصد محدود شده است؛ درحالی که افزایش سطح غنای اورانیوم مورد استفاده برای این منظور، به افزایش کیفیت مواد تولیدی، افزایش میزان تولید و کاهش هزینه تولید منجر خواهد شد.

بخشی از رادیوایزوتوپ‌های مورد نیاز در حوزه پزشکی هسته‌ای از طریق شـــتاب‌دهنده‌های ذرات (سیکلوترون‌ها) تولید می‌شـــود. اما با توجه به نیمه عمر کوتاه برخی رادیوایزوتوپ‌های تولیدی با این روش، حمل‌ونقل این مواد باعث هدر رفت قسمت عمده رادیودارو می‌شود و به همین دلیل ســـیکلوترون‌های تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی باید در نقاط مختلف کشور و در فاصله کمی از مراکز پزشکی هسته‌ای واقع شوند. در حال حاضر سیکلوترون‌های سازمان انرژی اتمی ایران در استان البرز توان تولید مواد پرتوزای مورد اســـتفاده در تولید رادیوداروهای مورد نیاز در همه مراکز پزشکی هسته‌ای استان تهران و البرز را دارند. تعداد محدودی سیکلوترون دیگر نیز در تهران و مشـــهد وجود دارند اما با توجه به نبود این دســـتگاه در تعداد زیادی از استان‌ها، تأمین ســـیکلوترون برای تولید رادیوداروی مورد نیاز در بخش عمده‌ای از کشـــور ضروری است. براساس سند جامع پزشکی هسته‌ای که وزارت بهداشـــت، درمان و آموزش پزشکی تدوین کرده است، تعدادی از قطب‌های سرطان کشور جهت نصب سیکلوترون داخل بیمارستانی در نظر گرفته شده‌اند که هر یک از این سیکلوترون‌ها نیاز رادیوداروی مراکز پزشکی هســـته‌ای آن قطب و قطب‌های مجاور در حداکثر مسافت حمل‌ونقل سه ساعته (هوایی یا زمینی) را تأمین خواهند کرد. براساس تقسیم‌بندی قطب‌های سرطان کشور، علاوه‌بر استان‌های تهران و البرز که رادیوداروهای آنها را سیکلوترون‌های سازمان انرژی اتمی واقع در استان البرز تأمین می‌کنند، هفت سیکلوترون دیگر باید در شهرهای اصفهان، شیراز، کرمان، تبریز، ساری، مشهد و کرمانشاه تعبیه شوند.[1]

1. Philips

در داخل کشـــور فعالیت‌هایی در زمینه تولید رادیوداروهای مورد نیاز در حال انجام است. سازمان انرژی اتمی هم‌اکنون ایزوتوپ‌های فسفر-۳۲، ایتریوم-۹۰، ید-۱۳۱، ساماریم-۱۵۳ و رنیوم-۱۸۶ را با استفاده از راکتور تحقیقاتـــی تهران و ایزوتوپ‌های فلوئـــور-۱۸، گالیوم-۶۷، ژرمانیوم-۶۸، روبیدیوم-۸۱، ایندیـــوم-۱۱۱، ید ۱۲۳ و تالیوم-۲۰۱ را با سیکلوترون‌های سازمان انرژی اتمی واقع در استان البرز به‌منظور استفاده در عملیات‌های تشـــخیصی و درمانی پزشکی هسته‌ای تولید می‌کند[۲] و برخی رادیوایزوتوپ‌های دیگر هم در مرحله تحقیق و توسعه قرار دارند. یکی از چالش‌هـــای مهم در زمینه تولیـــد رادیوداروهای مورد نیاز کشـــور، هماهنگی اندک میان سازمان انرژی اتمی به‌عنوان تولیدکننده رادیوداروها و وزارت بهداشت به‌عنوان مصرف‌کننده این رادیوداروهاســـت. این مسئله به ضعف سیاســـتگذاری مؤثر در تولید رادیوداروهای مورد نیاز مراکز درمانی کشور و همچنین طولانی شدن روند صدور مجوزها، تدوین استانداردهای مورد نیاز و کارآزمایی بالینی منجر شده است. درحال حاضر ۲۰۵ مرکز پزشکی هسته‌ای در کشور فعالیت می‌کنند که از این تعداد، ۵۲ مرکز دولتی و ۱۵۳ مرکز خصوصی هستند. توزیع مراکز پزشکی هسته‌ای در استان‌های کشور به‌ازای هر یک میلیون جمعیت در شکل ۵ ارائه شده است. تعداد تقریبی دوربین گاما از نوع اسپکت، یک دوربین به ازای هر مرکز پزشکی هسته‌ای است. بنابراین حدود ۲۰۵ دستگاه از این نوع در کشور فعال هستند و به‌طور متوسط، ۲/۴ دستگاه به‌ازای هر یک میلیون جمعیت در کشور وجود دارد. این در حالی است که استاندارد جهانی چهار دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر است و لذا تعداد دستگاه اسپکت مورد نیاز کشور، حدود ۳۳۶ دستگاه اســـت. امروزه همه مراکز استان‌ها دارای دوربین گامای فعال هستند و براساس برنامه‌ریزی وزارت بهداشت، دوربین‌های گاما جدید باید به شهرهای با جمعیت حداقل ۲۵۰ هزار نفر تخصیص یابند.

شکل ۵. نقشه توزیع مراکز پزشکی هسته‌ای در استان‌های کشور

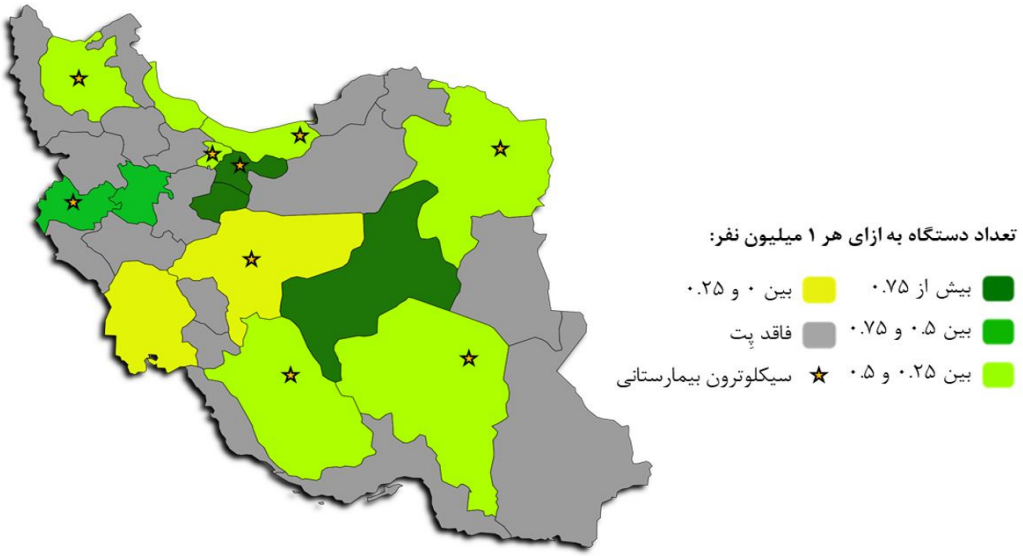


مأخذ: تلخیص نگارنده.

در زمینه تصویربرداری هسته‌ای پِت نیز با توجه به گستره جغرافیایی و جمعیتی کشورمان، هنوز توســـعه چندانی صورت نگرفته است. در سال ۱۳۹۹، تعداد هشت دستگاه پِت فعال در کشور وجود داشته است که چهار دستگاه در شهر تهران و چهار دستگاه دیگر در سایر شهرها[۱] در حال فعالیت بوده‌اند. بنابراین متوسط تعداد دستگاه فعال در کشور به‌ازای هر یک میلیون نفر جمعیت، حدود ۰/۱ دستگاه است. با در نظر گرفتن استانداردهای جهانی (۰/۷ تا ۲ دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر جمعیت) و متوسط تعداد دستگاه پِت در کشورهای آسیای غربی (۰/۲۵ دستگاه به‌ازای هر یک میلیون نفر جمعیت) و سایر عوامل مؤثر، وزارت بهداشت تعداد کل دستگاه مورد نیاز تا ســـال ۱۴۰۴ از این نوع را ۲۸ دستگاه پیش‌بینی کرده است که به استان تهران و مراکز استان‌های با جمعیت حداقل ۱/۵ میلیون نفر اختصاص خواهد یافت. طبق پیش‌بینی وزارت بهداشت و براساس نقشه کشـــوری توزیع قطب‌های سرطان،[۲] توزیع دستگاه‌های پِت مورد نیاز تا ســـال ۱۴۰۴ در کشور و همچنین سیکلوترون‌های بیمارســـتانی که رادیوداروی مرتبط با این دستگاه را تولید می‌کنند، به‌صورت شکل ۶ است.

۱. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، سند جامع پزشکی هسته‌ای ایران تا سال ۱۴۰۴، بهار ۱۴۰۰.
۲. تارنمای شرکت پارس ایزوتوپ
https//:fa.parsisotope.com/radioisotopes

شکل ۶. نقشه توزیع دستگاه‌های پِت و سیکلوترون‌های بیمارستانی مورد نیاز در استان‌های کشور تا سال ۱۴۰۴



مأخذ: همان.

اقدام‌های درمانی پزشکی هسته‌ای در کشور به دو صورت سرپایی و بستری انجام می‌شود. اقدام‌های سرپایی درمانی در پزشکی هسته‌ای صرفاً به یک اتاق با استانداردهای مورد تأیید نیاز دارد و تمام مراکز دولتی و غیردولتی به انجام این اقدام‌های درمانی قادر هستند. اما اقدام‌های درمانی نیازمند بستری، باید در بخش پزشکی هسته‌ای بیمارستان و با رعایت استانداردهای خاصی انجام شود. مراکز درمانی پزشکی هسته‌ای در کل کشور شامل ۱۱ مرکز است که چهار مرکز در تهران، دو مرکز در شیراز، دو مرکز در مشهد، یک مرکز در اصفهان، یک مرکز در بوشهر و یک مرکز در کرمان واقع شده‌اند. تعداد بسیار کم این مراکز به لیست‌های انتظار طولانی برای بیماران منجر شده است و طبق برآورد وزارت بهداشت، تا سال ۱۴۰۲ هریک از ۱۵ قطب سرطان کشور باید حداقل یک بخش بستری پزشکی هسته‌ای با حداقل چهار تخت بستری فعال داشته باشد.[۳]

مراکز پرتودهی هسته‌ای هم نقش مهمی در استریل کردن تجهیزات پزشکی ایفا می‌کنند. در حال حاضر چهار مرکز پرتودهی هسته‌ای در کشور فعال هستند که شامل سه مرکز پرتودهی گاما[۱] در شهرهای تهران، بناب و شهرکرد و یک مرکز پرتودهی الکترونی[۲] در شهر یزد می‌شوند.

علاوه‌براین، یک مرکز پرتودهی الکترونی دیگر هم در شهر قزوین در حال ساخت است.

اگرچه پرتودهی به تجهیزات پزشکی مزایای چشمگیری نسبت به سایر روش‌های جایگزین دارد، اما به‌دلیل کمبود زیرساخت‌های مورد نیاز در کشور ازجمله کمبود مراکز پرتودهی، استفاده از این روش سهم کوچکی در استریل کردن تجهیزات پزشکی کشور دارد. بهره‌برداری از مراکز پرتودهی گاما، مستلزم تأمین رادیوایزوتوپ‌های مولد پرتو، خصوصاً کبالت-۶۰ است که اغلب با راکتورهای تحقیقاتی تولید می‌شود.

به‌نظر می‌رسد در زمینه تربیت نیروی انسانی متخصص در زمینه پزشکی هسته‌ای نیز کمبودهایی در کشور وجود دارد. تعداد کل متخصصان پزشکی هسته‌ای در کشور در سال ۱۳۹۴، حدود ۱۵۰ نفر بوده است که با در نظر گرفتن استاندارد یک نفر متخصص پزشکی هسته‌ای به‌ازای هر ۳۰۰ هزار نفر جمعیت، لازم است که تا سال ۱۴۰۴ حدود ۱۰۰ نفر متخصص پزشکی هسته‌ای دیگر تربیت شوند.[۳] علاوه‌براین، تربیت نیروی انسانی متخصص داروسازی هسته‌ای نیز فقط در دو دانشگاه علوم پزشکی تهران و علوم پزشکی مازندران انجام می‌شود که با توجه به نیازهای رو به رشد کشور در زمینه تولید رادیوداروها، افزایش ظرفیت در زمینه تربیت متخصص‌های داروسازی هسته‌ای در کشور، لازم به‌نظر می‌رسد.

۱. شامل شهرهای تبریز، شیراز، کرج و مشهد.
۲. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، سند توسعه شبکه ملی مراقبت سرطان.
۳. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، سند جامع پزشکی هسته‌ای ایران تا سال ۱۴۰۴، بهار ۱۴۰۰.

جمع‌بندی و پیشنهادها

کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت یکی از مهم‌ترین کاربردهای این فناوری است که در برنامه‌ریزی بلندمدت برای پیشرفت فناوری هسته‌ای کشور باید به آن پرداخته شود. این‌گونه کاربردها در سه حوزه تشخیص پزشکی، درمان بیماری‌ها (به‌ویژه سرطان) و استریل کردن تجهیزات و مواد بیمارستانی استفاده می‌شوند. در کشورهای توسعه‌یافته از هر پنجاه نفر یک نفر در هر سال از خدمات تشخیصی پزشکی هسته‌ای استفاده می‌کنند و خدمات پزشکی هسته‌ای از بازار اقتصادی مناسبی برخوردار است. مهم‌ترین ماده پرتوزای مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای رادیوایزوتوپ مولیبدن-۹۹ است که ۸۰ درصد از عملیات‌های پزشکی هسته‌ای به آن وابسته است و سالیانه ۴۰ میلیون بیمار در جهان به نوعی از این ماده استفاده می‌کنند. امروزه اغلب تجهیزات و مواد پرتوزای مورد استفاده در حوزه پزشکی هسته‌ای در تعداد محدودی از کشورهای جهان تولید می‌شود. مهم‌ترین زیرساخت‌های مورد نیاز جهت استفاده از فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت عبارتند از: راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، سیکلوترون‌های بیمارستانی، تجهیزات تصویربرداری و نیروی انسانی.

ایران با داشتن مراکز متعدد پزشکی هسته‌ای، خدمات مختلف این حوزه را به بیماران ارائه می‌دهد و با وجود تحریم‌های بین‌المللی، سازمان انرژی اتمی برای تولید رادیوداروهای مورد نیاز کشور فعالیت‌هایی انجام می‌دهد. با این وجود با توجه به افزایش روزافزون ابتلا به سرطان در کشور و ناکافی بودن زیرساخت‌های فعلی، باید اقدام‌های بیشتری در راستای توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت صورت گیرد. در مسیر توسعه پزشکی هسته‌ای در کشور، به‌رغم پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه تولید و استفاده از رادیوداروها، در برخی موارد کمبودهای جدی وجود دارد. مهم‌ترین الزامات کوتاه‌مدت کشور در این زمینه، شامل احداث راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، تأمین و راه‌اندازی سیکلوترون‌های بیمارستانی، تأمین حداقل ۱۳۱ دستگاه تصویربرداری اسپکت، تأمین حداقل ۲۰ دستگاه تصویربرداری پِت، تجهیز ۱۵ مرکز پزشکی هسته‌ای کشور به بخش بستری پزشکی هسته‌ای، احداث حداقل ۱۲ مرکز پرتودهی و تربیت حداقل ۱۰۰ نفر متخصص پزشکی هسته‌ای و داروسازی هسته‌ای می‌شوند. همچنین از آنجایی که استفاده از اورانیوم با غنای بالا به‌عنوان ماده هدف، نقش مهمی در کیفیت رادیوایزوتوپ‌های تولیدی دارد، پیشنهاد می‌شود در راستای ماده (۱) قانون اقدام راهبردی برای لغو تحریم‌ها و صیانت از منافع ملت ایران و به اقتضای شرایط سیاسی موجود، تولید اورانیوم با غنای ۹۰ درصد به‌صورت آزمایشی در دستور کار قرار گیرد. علاوه‌براین، به‌منظور توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت و انتفاع عموم مردم از این‌گونه کاربردها، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شوند:

- توزیع امکانات، از جمله تجهیزات تصویربرداری و سیکلوترون‌های بیمارستانی، در سراسر کشور،
- حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در زمینه ساخت تجهیزات تصویربرداری پزشکی هسته‌ای و سیکلوترون‌های بیمارستانی،
- ایجاد کارگروه مشترک میان سازمان انرژی اتمی و وزارت بهداشت و سیاستگذاری مشترک در زمینه توسعه کاربرد فناوری هسته‌ای در حوزه سلامت،
- پیگیری حق مسلم ایران در استفاده از همکاری‌های بین‌المللی جهت توسعه کاربردهای صلح‌آمیز فناوری هسته‌ای.

منابع و مآخذ

۱. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، سند جامع پزشکی هسته‌ای ایران تا سال ۱۴۰۴، بهار ۱۴۰۰.
۲. تارنمای شرکت پارس ایزوتوپ (https://fa.parsisotope.com).
۳. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، سند توسعه شبکه ملی مراقبت سرطان.
4. World Nuclear Association, Radioisotopes in Medicine, 2022.
5. International Atomic Energy Agency (IAEA), Medical Imaging and Nuclear Medicine Global Resources Database, 2022.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA), Research Reactor Database (RRDB), 2022.
7. International Atomic Energy Agency (IAEA), Accelerator Database, 2022.
8. Nuclear Energy Agency (NEA), The Supply of Medical Isotopes: An Economic Diagnosis and Possible Solutions, 2019.
9. Nuclear Energy Agency (NEA), The Supply of Medical Radioisotopes: An Economic Study of the Molybdenum-99 Supply Chain, 2010.

۱. در این روش از پرتوهای تولیدی از رادیوایزوتوپ‌ها (معمولاً کبالت-۶۰) برای پرتودهی استفاده می‌شود.
۲. در این روش از الکترون‌های تولیدی از شتاب‌دهنده‌های ذرات برای پرتودهی استفاده می‌شود.
۳. **همان.**

مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاســـداران، روبروی پـــارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۵۸۵۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وب‌سایت: rc@majles.ir