

بررسی اهمیت و کاربرد شتاب‌دهنده‌ها در دنیای امروز

محمد لامعی رشتی، فرشاد قاسمی، سارا زارعی، حسین سیار، حامد آل‌ابراهیم

مهدی خسروانی، میترا انصاری، مرتضی یاحقی، امیرحسین میردامادی و شیماسادات مدنی

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

پست الکترونیکی: mlamehi@aeoi.org.ir

چکیده

این مقاله، حاصل پژوهشی گروهی است که هدف آن بررسی اهمیت و کاربرد شتاب‌دهنده‌ها در زندگی امروزی بوده است. در این مقاله علاوه بر بررسی کاربردهای گسترده شتاب‌دهنده‌ها در امور زندگی امروزی، رشد صعودی استفاده از آن‌ها در بخش‌های مختلف نیز به طور کمی گزارش شده است. ارائه آمار شتاب‌دهنده‌ها در کشورهای مختلف در کنار مقایسه وضعیت ایران در این زمینه، لزوم توجه بیشتر به این حوزه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز مواد، استرلیزاسیون صنعتی، تولید رادیوایزوتوپ، شتاب‌دهنده، هادرون‌تراپی

۱. مقدمه

پرتوهای تولید شده توسط شتاب‌دهنده‌های ذرات، امروزه به مقابله با بسیاری از چالش‌های رویاروی بشر قرن ۲۱ می‌پردازد. این چالش‌ها در حوزه‌های انرژی، محیط زیست، امنیتی و دفاعی، مراقبت‌های پزشکی، کشف پدیده‌های جدید و تحقیقات علمی می‌باشند [۱]. به همین منظور تعداد بی‌شماری از انواع مختلف شتاب‌دهنده هر روزه در بیمارستان‌ها، درمانگاه‌ها، کارخانه‌های تولیدی و صنعتی، بنادر و مراکز تحقیقاتی به کار برده می‌شوند.

۲. شتاب‌دهنده برای کاربردهای پزشکی

امروزه شتاب‌دهنده‌ها در پزشکی بسیار رایج و پرکاربرد هستند. شتاب‌دهنده‌ها در پزشکی جهت درمان و تولید رادیوایزوتوپ به کار برده می‌شوند. حدود ۳۰٪ شتاب‌دهنده‌های جهان برای پرتودرمانی و حدود ۳٪ برای پزشکی هسته‌ای اختصاص داده شده‌اند [۲]. مشخصات انواع شتاب‌دهنده‌های مورد استفاده در پزشکی و عملکرد آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است [۳]. استفاده از شتاب‌دهنده برای تولید رادیوایزوتوپ: در پزشکی، رادیوایزوتوپ‌ها جهت تشخیص و درمان مورد

جدول ۱. انواع شتاب‌دهنده‌های مورد استفاده در پزشکی [۴].

جریان متوسط	انرژی متداول (MeV)	کاربرد	شتاب دهنده
۱۰۰-۵۰۰ nA	۴-۲۵	درمان با الکترون	خطی الکترون
۲۰-۱۵۰ μA		درمان با پرتو X	
۱۰۰-۵۰۰ nA	۴-۲۰	درمان با الکترون	میکروترون-بتاترون
۲۰-۱۵۰ μA	۴-۵۰	درمان با پرتو X	
۲۵۰ mA	۲۰۰۰-۳۰۰۰	آنژیوگرافی	سینکروترون الکترون
۵۰-۱۰۰ μA	۱۰-۱۰۰ پروتون	تولید رادیودارو	
۲۰-۳۰ μA	۵۰-۷۰ پروتون یا دوترون	درمان با نوترون سریع	سیکلوترون
۲۰-۱۵۰ μA	۵۰۰-۶۰۰ پروتون	پیون‌تراپی	
۲۰-۴۰ nA	۷۰-۱۸۵ پروتون	پروتون‌تراپی	
۲۰-۴۰ nA	۷۰-۲۵۰ پروتون	پروتون‌تراپی	سینکروترون پروتون
۱۰ ^۸ تا ۱۰ ^{۱۰} ثانیه/یون‌ها	۲۲۵-۶۷۰ (MeV/amu)	درمان با یون سبک	لینک RFQ
تا ۱۵۰ μA	۲ پروتون	پروتون‌تراپی	
۳۰ μA	۶۶ پروتون	درمان با نوترون سریع	
۵۰-۱۰۰ μA	۱۰-۸۰۰ پروتون	تولید رادیودارو	پروتون
۱ mA	۸۰۰ پروتون	پیون‌تراپی	

پت و اسپکت^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً این دسته رادیوایزوتوپ‌ها توسط سیکلوترون‌های کم انرژی تولید می‌شوند. دسته دوم رادیوایزوتوپ‌ها، درمانی هستند. ابتدا رادیوایزوتوپ را نشاندار کرده سپس آن را به محل تومور هدایت می‌کنند. رادیوایزوتوپ به علت انتقال انرژی خطی^۳ بالا در محل تومور انرژی خود را به جای می‌گذارد. شکل ۱ پراکندگی سیکلوترون‌های تولید رادیوایزوتوپ پزشکی در سراسر جهان را نشان می‌دهد.

استفاده از شتاب‌دهنده برای درمان: امروزه سرطان در بسیاری از کشورها به مهم‌ترین عامل مرگ و میر تبدیل شده است. به نحوی که درصد قابل توجهی از انسان‌ها با آن درگیرند. برای مثال در امریکا دومین عامل مرگ سرطان می‌باشد. در ایران نیز سرطان سومین عامل مرگ و میر به شمار می‌رود. سالانه بیش از ۳۰۰۰ نفر از مردم ایران در اثر سرطان جان خود را از دست می‌دهند. تاکنون روش‌های گوناگونی برای درمان انواع مختلف این بیماری پیشنهاد و بکار رفته است. جراحی و پرتودرمانی مهم‌ترین این روش‌ها می‌باشند. مطالعات

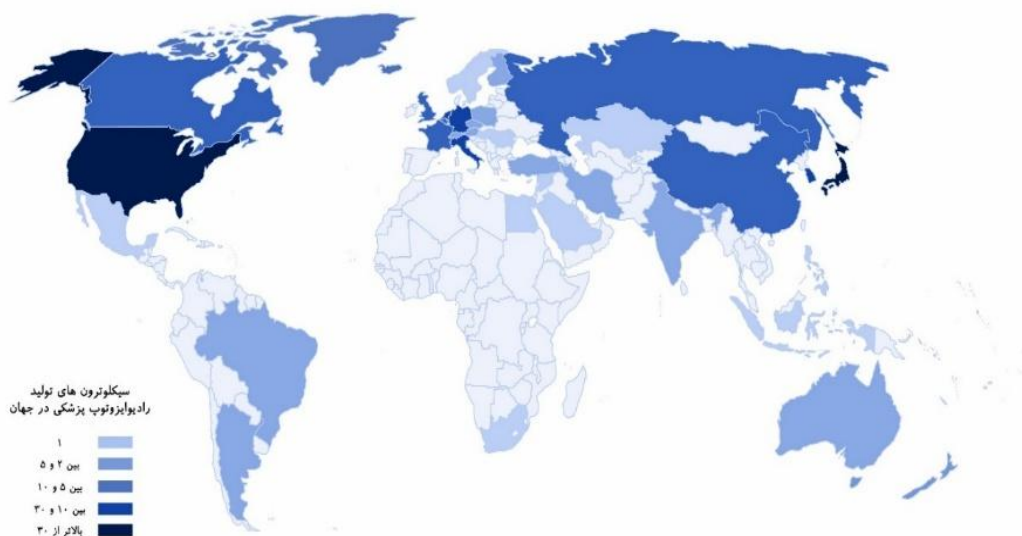
استفاده قرار می‌گیرند. در حال حاضر دو روش متداول برای تهیه رادیوایزوتوپ وجود دارد. فرآیند شکافت و در نتیجه استفاده از رآکتور یکی از روش‌های تولید رادیوایزوتوپ می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم، استفاده از رآکتور دارای معایبی از جمله تولید مقدار زیادی مواد پسماند رادیواکتیو و تولید مقدار زیادی رادیوایزوتوپ غیرمفید می‌باشد. روش دوم استفاده از شتاب‌دهنده جهت تولید رادیوایزوتوپ است. این روش نسبت به استفاده از رآکتور مزیت‌هایی دارد از جمله [۵]: دسترسی راحت‌تر به شتاب‌دهنده نسبت به رآکتور، تولید ناخالصی رادیوایزوتوپی کمتر با انتخاب انرژی تابشی مناسب، تولید رادیوایزوتوپ با فعالیت^۱ بالاتر، تولید رادیوایزوتوپ با مشخصات واپاشی مطلوب، تولید و استفاده از رادیوایزوتوپ‌های با طول عمر کوتاه با نصب شتاب‌دهنده‌ها در محلی نزدیک به محل استفاده از رادیوایزوتوپ.

کاربرد رادیوایزوتوپ‌ها در پزشکی به دو زیر مجموعه تقسیم بندی می‌شود [۵]: اولین کاربرد آن‌ها به عنوان رادیوایزوتوپ‌های تشخیصی است که حدود ۹۵٪ از رادیوایزوتوپ‌ها جهت تصویربرداری در دستگاه‌هایی همانند

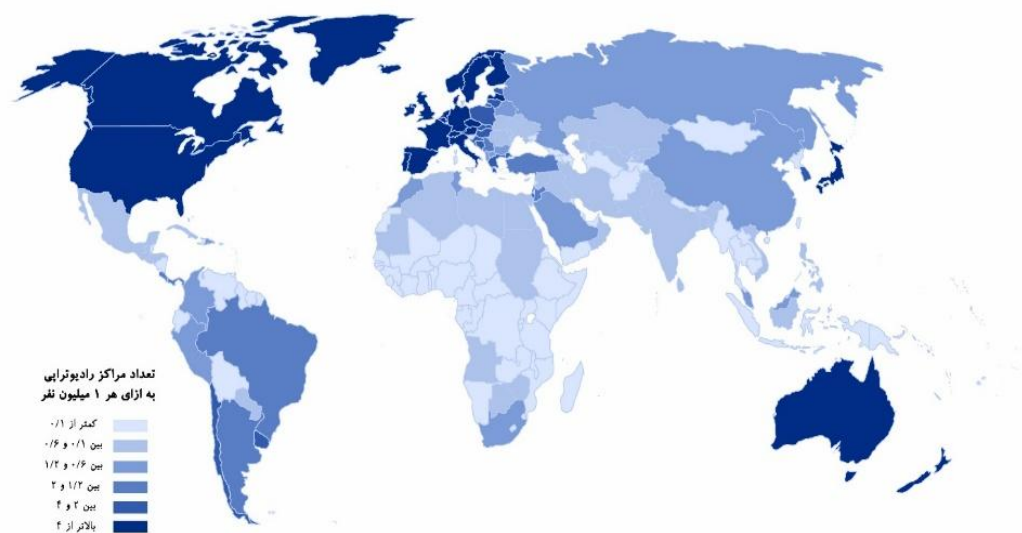
۲. PET (Positron Emission Tomography) and SPECT (Single-Photon Emission Computed Tomography)

۳. LET (Linear Energy Transfer)

۱. Radioactivity



شکل ۱. پراکندگی سیکلوترون‌های تولید رادیوایزوتوپ پزشکی.



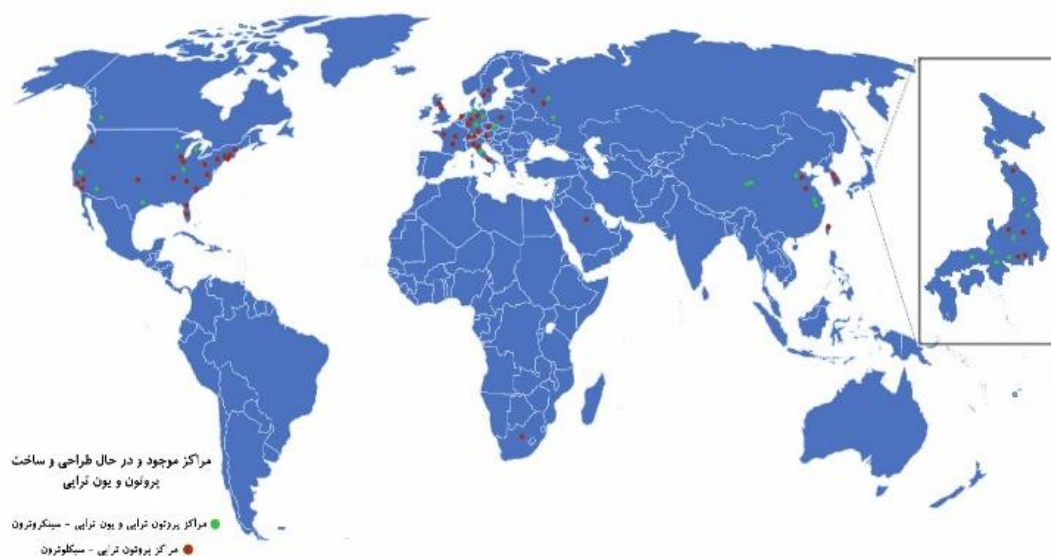
شکل ۲. دسترسی به مراکز پرتو درمانی در نقاط مختلف جهان.

استفاده از شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون با انرژی بین ۶-۱۸ مگا الکترون ولت برای پرتو درمانی بسیار رایج هستند. بر طبق مرجع [۳] به ازای هر یک میلیون نفر بیش از یک دستگاه شتاب‌دهنده خطی پزشکی باید در جهان وجود داشته باشد. در این نوع لینک‌ها، هم می‌توان مستقیماً از باریکه الکترون برای درمان استفاده کرد و هم می‌توان از فوتون ناشی از برخورد باریکه الکترون به هدف استفاده کرد. حدود یک سوم از کل شتاب‌دهنده‌های تولید شده در سراسر جهان، شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون هستند که جهت پرتو درمانی استفاده می‌شوند. در شکل ۲ میزان دسترسی به

نشان می‌دهند که انواع مختلف پرتو درمانی در بیش از ۵۰ درصد از درمان‌های موفق نقش مؤثر داشته‌اند [۶]. جهت پرتو درمانی سرطان از باریکه‌های الکترون، ایکس، پروتون، یون‌های سبک و نوترون استفاده می‌شود که در ادامه هر یک از این روش‌ها بررسی می‌شوند.

درمان با الکترون یا پرتو ایکس: امروزه استفاده از شتاب‌دهنده‌ها هم در مُد الکترون و هم در مُد ایکس جهت پرتو درمانی بسیار رایج هستند. شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، میکروترون‌ها و بتاترون‌ها دستگاه‌هایی هستند که می‌توانند باریکه‌های الکترونی در گستره ۵-۳۰ مگا الکترون ولت را تولید کنند و می‌توان از آن‌ها در این زمینه استفاده کرد [۵].

۱. LINAC: Linear Accelerator



شکل ۳. مراکز پروتون تراپی و یون تراپی در سراسر جهان.

بوده و طی تحقیقاتی که انجام شده، بین سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ بیش از ۱۰۰۰۰ بیمار در ژاپن تحت هادرون درمانی قرار گرفته‌اند که حدود ۶۰٪ از آنها توسط پروتون و حدود ۴۰٪ از آنها توسط کربن درمان شده‌اند [۸]. طبق آمار تا ژانویه سال ۲۰۱۲، ۴۱ مرکز درمان توسط هادرون در کانادا، امریکا، چین، انگلستان، فرانسه، آلمان، ایتالیا، ژاپن، کره، هلند، روسیه، آفریقای جنوبی، سوئیس و سوئد وجود دارد و بیش از ۷۵۰۰۰ بیمار درمان شده‌اند. شرکت‌های مختلفی سینکروترون و سیکلوترون برای درمان با پروتون را تولید می‌کنند [۵، ۹].

درمان با نوترون: درمان به روش بی.ان.سی.تی^۲ یک روش جدید و مدرن برای درمان تومورهای مغزی است. این روش بسیار مؤثر و امید بخش است به نوعی که اکثر کشورهای دنیا برای دستیابی به این روش در تلاش هستند. برای تولید نوترون برای این روش از راکتورهای تحقیقاتی کوچک و شتاب دهنده‌ها کمک می‌گیرند.

۳. شتاب‌دهنده برای کاربردهای صنعتی

در طول دهه‌های گذشته، صنایع برای تولید محصولات و خدمات مبتنی بر شتاب‌دهنده وارد رقابت چشمگیری شده‌اند؛ زیرا پرتودهی محصولات در منافع اقتصادی آنها تأثیر بسزایی

مراکز پرتودرمانی به ازای هر یک میلیون نفر در سراسر جهان آورده شده است [۵].

درمان با پروتون یا یون سبک: برای درمان تومورهای قرار گرفته در نقاط حساس بدن که لازم است تا بافت‌های اطراف آنها دز بسیار کمی را دریافت کنند، استفاده از روش‌های دیگر نظیر هادرون‌تراپی^۱ پیشنهاد می‌شود. هادرون‌تراپی یک کلمه جامع است که شامل تکنیک‌های مختلف برای پرتو درمانی تومورها است. در این تکنیک از پروتون، نوترون و هسته‌های سبک که هادرون نامیده می‌شوند برای کنترل موضعی هر نوع تومور استفاده می‌شود [۲]. سینکروترون‌ها و سیکلوترون‌های با انرژی متوسط برای درمان با پروتون‌ها (با انرژی ۲۵۰ مگا الکترون ولت) یا باریک‌های یون سبک (^{12}C -ions 400 MeV/u) مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. برآورد شده است که به ازای هر ۱۰ میلیون نفر حداقل یک مرکز هادرون‌تراپی باید وجود داشته باشد. امروزه مراکز MIT و دانشگاه واشنگتن بر روی این موضوع فعالیت گسترده دارند [۷]. شکل ۳ میزان دسترسی به مراکز هادرون‌درمانی در سراسر جهان (تا سال ۲۰۱۲) را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل قابل مشاهده است، ژاپن در زمینه یون درمانی بسیار فعال

۱. BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)

۲. Hadron therapy

که در معرض پرتودهی قرار می‌گیرند به صورت ذرات ریز و پودر مانند در می‌آیند و به عنوان افزودنی در گریس (روغن کاری)، روغن موتور، جوهر پرینتر، پوشش، عایق و ترموپلاستیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاهش غلظت و افزایش روان‌روی موادی مانند پلی‌پروپیلن سبب بهبود فرایندهای شکل‌گیری (قالب‌گیری) مواد خواهد شد. در خصوص سلولز نیز می‌توان گفت فیبرهای سلولز حاصل از خمیر چوب با حل شدن در دی‌سولفیدکربن، ویسکوز را پدید می‌آورد که پیکربندی اصلی پارچه ابریشم، سلفون و غیره می‌باشد. کاهش وزن مولکولی سلولز میزان تولید ویسکوز را افزایش می‌دهد که عموماً این کاهش از طریق هیدروکسید سدیم و گرما انجام می‌شود. در حالی که پرتودهی، سرعت فرایند را افزایش و افزودنی‌های شیمیایی مورد نیاز را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. کاهش هزینه تولید، افزایش خروجی محصول و همچنین کاهش آلودگی محیط‌زیست از فواید پرتودهی در این زمینه می‌باشد.

۲.۳. استریلیزاسیون مواد غذایی و افزایش مدت ماندگاری آنها

پرتودهی مواد غذایی شامل پاستوریزه کردن، کلرنی و ایمن‌سازی می‌باشد که علاوه بر سالم و بی‌خطر بودن، ارزش غذایی و کیفیت طعم مواد غذایی را از بین نمی‌برد و می‌تواند زمان مصرف مواد غذایی را افزایش دهد. جلوگیری از جوانه زنی مجدد در سیب زمینی، پیاز و سیر شود، دفع حشرات از روی حبوبات و سبزیجات، از بین بردن انگل موجود در گوشت، بالا بردن مدت ماندگاری غلات - سبزی‌ها و میوه‌ها، تاخیر در به عمل آمدن بعضی میوه‌ها، حذف باکتری‌های بیماری‌زای خطرناکی همچون ایکلی، سالمونلا و لیستریا^۳ موجود در غذاهای دریایی خام و فریز شده، گوشت قرمز و گوشت سفید، پرتودهی ادویه‌جات و محصولات غذایی خشک، استریلیزه کردن گوشت قرمز، گوشت سفید، غذاهای دریایی از جمله موارد کاربرد پرتودهی در این زمینه می‌باشد. پرتودهی مواد غذایی سبب کاهش میزان استفاده از نگهدارنده‌های مصنوعی نیز خواهد شد [۱۲، ۱۳].

داشته است. شتاب‌دهنده‌ها با تغییر مشخصات فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی مواد و تولیدات تجاری باعث می‌شود تا بهره‌وری و ارزش تولیدات بیشتر شود و یا آثار نامطلوب آن‌ها بر محیط زیست کاهش یابد. علاوه بر شتاب‌دهنده‌های باریکه الکترون از پرتو گاما و اشعه ایکس نیز جهت کاربردهای صنعتی استفاده می‌کنند [۱۰]. در ادامه برخی موارد کاربرد این نوع شتاب‌دهنده‌ها در صنایع گوناگون شرح داده می‌شود [۱].

۱.۳. تغییر در نحوه تولید مواد پلیمری

پرتودهی مواد پلیمری سبب ایجاد فرایندهایی همچون کیورینگ، پیوند عرضی، دیگریدینگ^۱ و غیره خواهد شد. از این طریق زمان انجام فرایند، هزینه‌های مرتبط با تأمین انرژی و همچنین مخاطرات زیست‌محیطی در مقایسه با فرایندهای گرمایی معادل کاهش خواهند یافت.

کیورینگ: انجام این فرایند به منظور بهبود مشخصه‌های کامپوزیت، جوهر، چسب، لایه‌نشانی، سازگارتر کردن مواد با محیط زیست و غیره انجام می‌شود. کیورینگ از طریق باریکه الکترونی، استفاده از مؤلفه‌های آلی فرار را حذف می‌کند و علاوه بر ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی کمتر و افزایش سرعت تولید محصول، مصرف توان و انرژی را در مقایسه با روش‌های گرمایی حدود ۹۰ درصد کاهش می‌دهد.

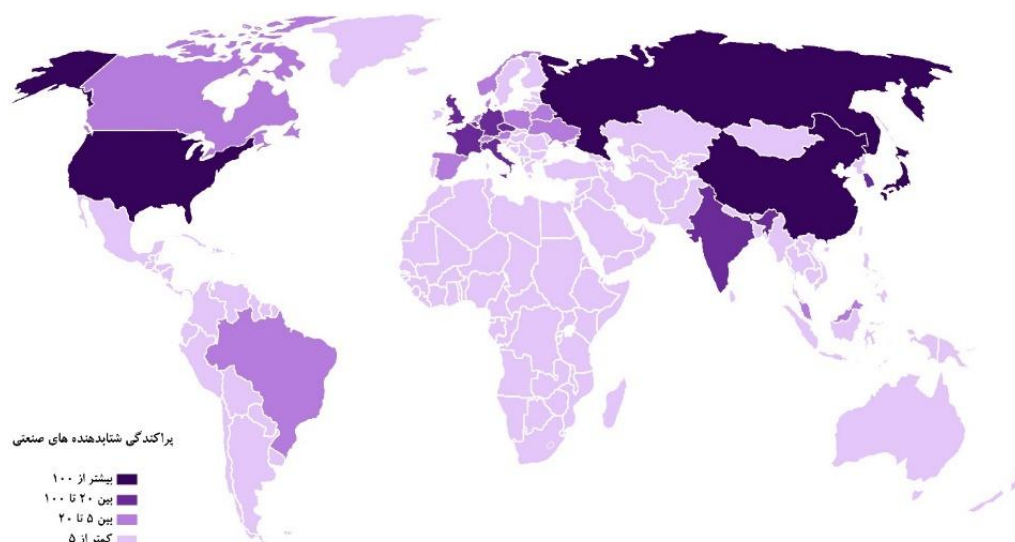
اتصال عرضی: پرتودهی موادی همچون پلی‌اتیلن، پلی‌اورتان، پلی‌وینیل کلراید^۲ و که در صنایع پلیمری به منظور تولید محصولات قابل انقباض حرارتی، لاستیک، لوله و اتصالات، هیدروژل، بهبود عایق‌بندی سیم و کابل و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند، سبب ایجاد پیوند عرضی در آن‌ها می‌شود و نهایتاً بهبود مشخصه‌های حرارتی، شیمیایی و مکانیکی را منجر خواهد شد [۱۱].

دیگریدینگ: افزایش جریان ذوب و کاهش ویسکوزیته از جمله عواملی است که با دیگریدینگ از طریق پرتودهی ایجاد می‌شود. موادی همچون پلی‌تترافلوئورواتیلن هنگامی

۱. Curing, Crosslink, Degradation

۲. Polyethylene (PE), Polyurethane (PUR), Polyvinylchloride (PVC)

۳. E.coli, Salmonella, and Listeria



شکل ۴. پراکندگی شتاب‌دهنده‌های صنعتی در سراسر جهان.

۳.۳. استریلیزاسیون محصولات و تجهیزات پزشکی

استریلیزه کردن تجهیزات پزشکی، استریل کردن مواردی همچون چاقوی کالبدشکافی، انبرک جراحی، گازهای مورد استفاده برای پاک کردن خون، لباس‌های جراحی، سرنگ‌ها، تجهیزات ویژه انتقال خون، تجهیزات ساکشن و ... را شامل می‌شود. پرتودهی باریکه الکترونی با حفظ خواص و ویژگی‌های کالای مورد پرتودهی سبب تخریب میکروارگانیزم‌های آلوده کننده می‌شود و اثرات مخرب گرمایی حاصل از پرتودهی با سامانه‌های پرتودهی گاما را که به سبب قرار گرفتن مدت زیاد محصول در معرض پرتو حاصل می‌شود، به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در زمینه استریلیزه کردن کالاهای پزشکی، عمق نفوذ بالا مستلزم استفاده از انرژی‌های بالا می‌باشد و با توجه به اینکه عموماً بسته‌بندی‌های این محصولات حجیم می‌باشد، شتاب‌دهنده‌هایی با انرژی بالا برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱].

شکل ۴ پراکندگی شتاب‌دهنده‌های صنعتی در سراسر جهان را نشان می‌دهد.

۴. شتاب‌دهنده‌ها در کنترل عوامل مضر

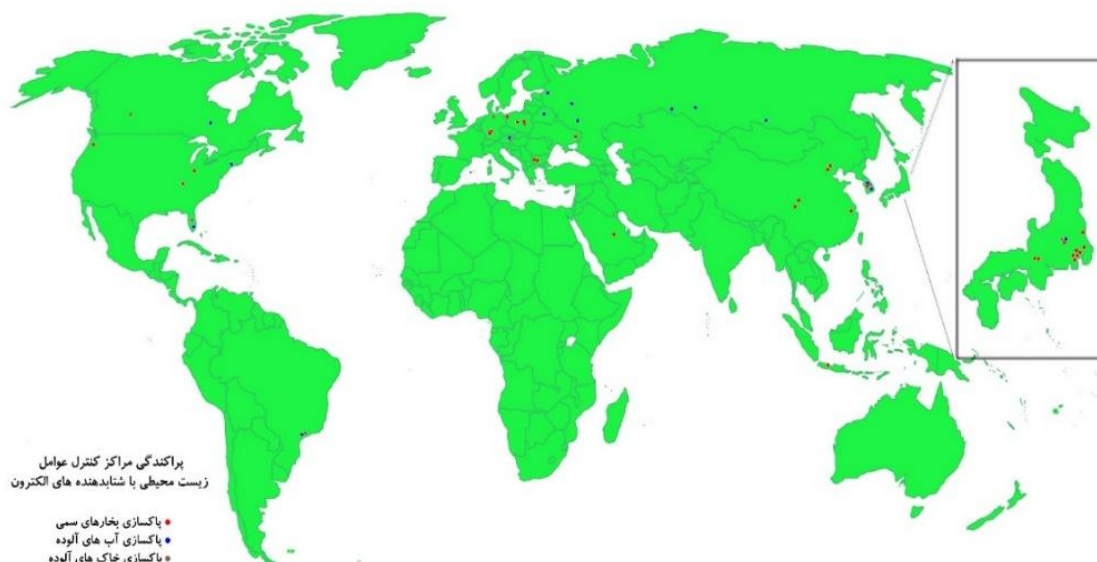
زیست‌محیطی

افزایش آسیب‌های زیست‌محیطی و تخریب منابع طبیعی در سراسر جهان یکی از مشکلات قابل توجه کنونی به شمار

می‌آید. از این‌رو، با توجه به جدی بودن وضعیت و خطرات آینده این بحران، نیاز اساسی به توسعه فناوری‌های پیشرفته برای کنترل عوامل آلاینده محیط زیست وجود دارد. استفاده از پرتو الکترون برای این منظور مقرون به صرفه و قابل اعتماد است. باریکه الکترون باعث تغییرات اساسی در خصوصیات آلاینده‌ها از قبیل انحلال‌پذیری، فراریت، واکنش‌پذیری، قابلیت جذب و غیره می‌شود [۱۴]. اخیراً، استفاده از شتاب‌دهنده‌ها برای کاربردهای زیست‌محیطی در کشورهای صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

یکی از کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها در حفظ محیط زیست، مدیریت پسماندهای هسته‌ای می‌باشد. کنترل پسماندهای هسته‌ای پرتوزا حاصل از واکنش شکافت در راکتورها یکی از چالش‌های عمده زیست‌محیطی به شمار می‌آید که می‌توان با کمک شتاب‌دهنده‌ها برای تبدیل هسته‌های پرتوزا به ایزوتوپ‌های پایدار آن را برطرف نمود. همچنین می‌توان با استفاده از راکتورهای زیر بحرانی که با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها بحرانی می‌شوند به انرژی الکتریسیته مطمئن، ارزان و بدون پسماندهای هسته‌ای پرتوزا دست یافت [۱۲].

از دیگر کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها در این حوزه تصفیه گازهای حاصل از فرآیند احتراق است. اکسید گوگرد و اکسید نیتروژن که سبب ایجاد باران اسیدی می‌شوند از گازهای حاصل از احتراق



شکل ۵. پراکندگی مراکز کنترل عوامل زیست محیطی در سراسر جهان.

در نتیجه استفاده از تجهیزات پیشرفته کنترلی برای این منظور، امری اجتناب ناپذیر است. در حال حاضر سیستم‌های بازرسی بار به سه نوع ایزوتوپ پرتوزا (رادیواکتیو)^۱، سیستم بازرسی پرتو ایکس و روش رادیوگرافی نوترونی تقسیم می‌شوند.

نوع رادیوایزوتوپی، اشیاء را با پرتوهای گامای ناشی از رادیوایزوتوپ‌هایی مانند سزیم ۱۳۷ و کبالت ۶۰ (به عنوان چشمه تابش) مورد بررسی قرار می‌دهد [۱]. مهمترین مزیت سیستم رادیوایزوتوپی هزینه پایین و قابلیت حمل ساده آن است. اما از آنجا که انرژی گامای چشمه‌ی رادیوایزوتوپی به حدود ۱ مگا الکترون ولت محدود می‌شود، علاوه بر مشکل نفوذ پذیری کم آن برای وسایل بزرگ، شامل کاستی‌های دیگری است که عبارتند از: ۱- شفافیت کم، ۲- عمر محدود چشمه تابش، ۳- گسیل پیوسته تابش و ۴- مراقبت ویژه از ایمن بودن مکان نگهداری چشمه. در نوع پرتو ایکس، اشیاء با پرتوهای ایکس ناشی از لامپ ایکس یا شتاب‌دهنده باریکه الکترون مورد بررسی قرار می‌گیرند. دستگاه پرتو ایکس، در سه نوع کاتئیری، موبایلی و پالتی در بسیاری از گمرک‌های دنیا نصب شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. رادیوگرافی پرتو ایکس به خصوص زمانی که از شتاب‌دهنده خطی استفاده می‌شود، دارای انرژی متغیر است. مزایای آن شامل پرتوهای ایکس پر انرژی و متوقف شدن پرتو ایکس با قطع منبع

می‌باشند که می‌توان با کمک شتاب‌دهنده‌ها ساختار درونی‌شان را تغییر داد و سپس توسط بخار آمونیاک آن‌ها را خنثی نمود.

تصفیه پسماندهای شهری، صنعتی و بیمارستانی و همچنین پاک‌سازی خاک‌ها و آب‌های آلوده از دیگر کاربردهای بسیار مهم شتاب‌دهنده‌ها برای حفظ محیط زیست می‌باشد. گندزدایی از پسماند شهرداری و فاضلاب شهری، پاکسازی پسماندها و فاضلاب صنعتی و بیمارستانی از مواد مسموم‌کننده و همچنین تجزیه مواد سمی از آب‌ها و خاک‌های آلوده از اهداف اصلی به کارگیری شتاب‌دهنده‌ها می‌باشد [۱۱]. شکل ۵ پراکندگی مراکز کنترل عوامل زیست محیطی به کمک شتاب‌دهنده‌ها در سراسر جهان را نشان می‌دهد.

۵. شتاب‌دهنده‌ها در امور امنیتی و دفاعی

تکنولوژی شتاب‌دهنده‌ها این توانایی را دارد که سهم قابل توجهی از نیازهای امنیت ملی و دفاعی هر کشور را برآورده کند. حوزه‌های فعالیت تکنولوژی شتاب‌دهنده در کاربردهای نظامی و امنیت ملی عبارتند از:

بازرسی محموله: با توجه به حجم روز افزون ترانزیت و ضرورت مبارزه با قاچاق کالا و تخلفات گمرکی در مبادی رسمی کشورها، روش‌های سنتی بازرسی کالا در گمرک‌ها به علت حجم فراوان کالا و تعداد محدود کارکنان جوابگو نیست.

۱. Radioactive Isotope



شکل ۶. مراکز دارای شتاب‌دهنده القایی در جهان.

در صورتی که سیستم تصویربرداری کامپتون به سیستم تصویربرداری عبوری اضافه شود می‌توان با یک سیستم مناسب، تصاویر متعددی از جهات مختلف بار به دست آورد.

عکس برداری‌های خاص: از شتاب‌دهنده‌ها می‌توان برای نظارت و شبیه‌سازی واقعی اما غیر هسته‌ای فرآیند انفجار بمب‌های هسته‌ای و عملکرد سلاح‌های هسته‌ای استفاده کرد. برای مثال در مرکز دارت^۱ واقع در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس از دو شتاب‌دهنده برای شبیه‌سازی امن، واقعی و غیر هسته‌ای عملکرد سلاح‌های هسته‌ای استفاده می‌شود [۱۲]. شتاب‌دهنده‌های لیزرپلازما و شتاب‌دهنده‌های القایی برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۶ پراکندگی این نوع شتاب‌دهنده‌ها در جهان نشان داده شده است.

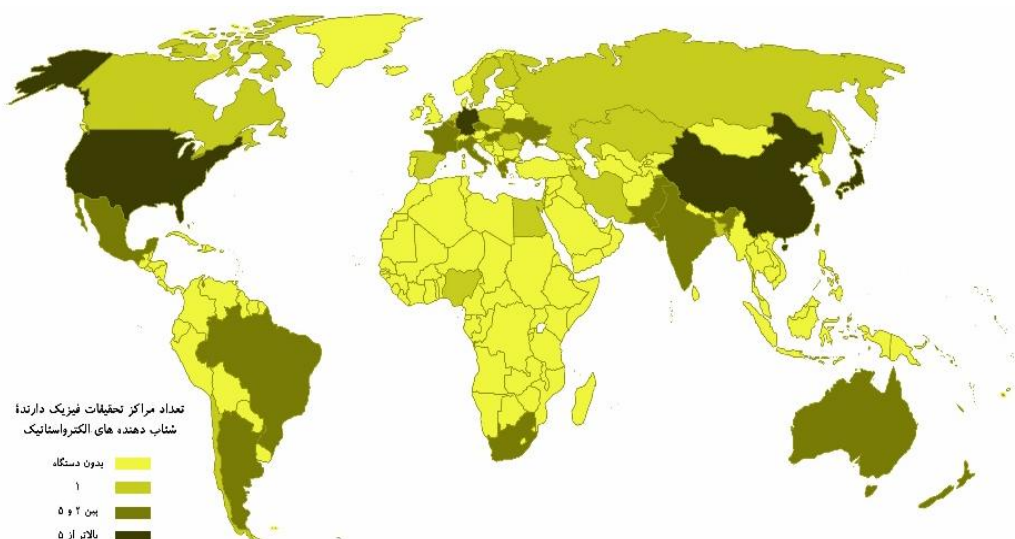
۶. کاربرد شتاب‌دهنده‌ها در تحقیقات علمی

شتاب‌دهنده‌های ذرات در مراکز تحقیقاتی جهت کشف پدیده‌های جدید و بررسی نظریه‌ها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد شتاب‌دهنده‌ها در تحقیقات علمی را به سه زیر گروه تحقیقات فیزیک، آنالیز مواد و مطالعه و بررسی آثار هنری و مصنوعات باستان‌شناسی می‌توان دسته بندی کرد. **تحقیقات فیزیک:** برای مقاصد گوناگونی از شتاب‌دهنده‌ها در

تغذیه می‌باشد. قیمت بالا و جابجایی نچندان ساده آن از معایب این نوع محسوب می‌شود. روش رادیوگرافی نوترون سریع، ابزاری مؤثر و قدرتمند برای مشاهدهٔ محمولهٔ قاچاق مانند مواد مخدر، سلاح‌های شیمیایی و مواد منفجره می‌باشد. نوترون‌ها قدرت نفوذ لازم را دارند، آن‌ها با ماده برخورد کرده و به عنوان یک سیستم مکمل برای پرتوهای گاما می‌تواند برای تعیین ترکیب عناصر استفاده شود. رادیوگرافی نوترون در مقایسه با رادیوگرافی گاما، بخصوص برای تشخیص مواد هسته‌ای قاچاق در جایی که روش‌های مرسوم مانند پرتوهای ایکس و گاما ابهام دارند و دقیق نیستند، بسیار کارآمدتر است [۱۵].

در موارد ذکر شده تصویربرداری بر پایهٔ آشکارسازی پرتوهای عبوری بوده در حالی که تصویربرداری پرتو ایکس براساس پس پراکندگی کامپتون، پایهٔ یک ابزار بازرسی منحصر بفرد را تشکیل می‌دهد [۱۶]. این ابزار قابلیت اسکن و تصویر برداری آسان و سریع از محتویات داخل خودروها را بدون نگرانی در مورد دسترسی به سمت دیگر آن فراهم می‌کند، زیرا در این مورد نیازی به قرار دادن آشکارساز در سمت دیگر شیء وجود ندارد. به عنوان مثال یک وسیله نقلیه می‌تواند به‌طور مناسب به این تکنولوژی مجهز شده و با سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت در خیابان حرکت کند تا ماشین‌های پارک شده یا کامیون‌ها را از جهت تهدیدهای امنیتی بررسی کند.

۱. Dual-Axis Radiographic Hydrodynamic Test Facility (DARHT)



شکل ۷. پراکندگی مراکز تحقیقاتی دارنده شتاب‌دهنده‌های واندوگراف و پلترون.

مواد را در اختیار ما قرار دهند. چشمه‌های حاصل از تابش سینکروترون برای بررسی ساختار مواد بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

در پزشکی نیز با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها به مطالعه و تحقیق در مورد دی.ان.ای، عملکرد پروتئین‌ها، ساختار مولکولی اچ.آی.وی، ساختار و عملکرد آنزیم‌ها در بدن و همچنین تولید داروهای جدید برای درمان بیماری‌های عمده‌ای مانند سرطان، دیابت، مالاریا و ایدز و همچنین آنتی‌بیوتیک‌های جدید می‌توان پرداخت [۱۸]. شکل ۷ پراکندگی شتاب‌دهنده‌های واندوگراف و پلترون را در سراسر جهان نشان می‌دهد.

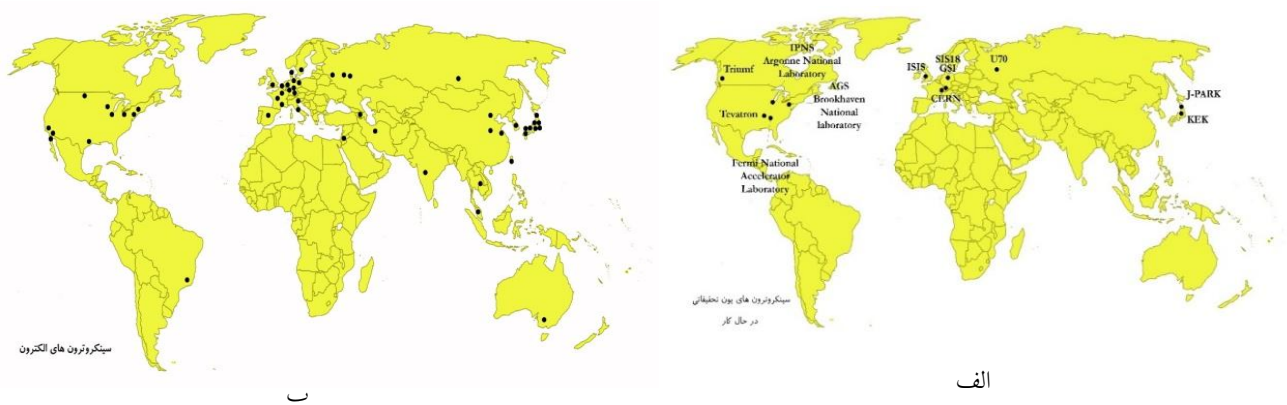
مطالعه و بررسی آثار هنری و مصنوعات باستان‌شناسی: با مطالعه و بررسی آثار هنری و باستان‌شناسی می‌توان اطلاعاتی را درباره مواد اصلی به کار برده شده در آن‌ها، فرمول‌های باستانی مورد استفاده برای تولید آثار هنری و راه‌های مفید برای نگهداری این آثار به دست آورد. برای مثال شتاب‌دهنده آگلا^۱ در پاریس تنها مرکز شتاب‌دهنده در جهان است که به مطالعه و بررسی آثار هنری و مصنوعات باستان‌شناسی در بیش از ۱۲۰۰ موزه در فرانسه اختصاص داده شده است. باریکه پروتون ۴ مگا الکترون‌ولت این شتاب‌دهنده انواع زیادی از مواد از جمله جواهرات، سرامیک، شیشه، آلیاژها، سکه‌ها،

تحقیقات فیزیک از جمله اندازه‌گیری سطح مقطع عناصر مختلف، ساختار و خواص بلوک‌های سازنده، نیروهای اندرکنش بین آن‌ها و غیره استفاده می‌کنند.

شتاب‌دهنده‌ها علاوه بر اینکه مانند تلسکوپ در علوم کیهان‌شناسی عمل می‌کنند، می‌توان از آن‌ها به عنوان میکروسکوپ‌های بسیار قوی نیز نام برد. همان‌طور که میکروسکوپ‌ها اجزای بسیار ریز را آشکار می‌کنند، شتاب‌دهنده‌ها اطلاعاتی درباره اجزایی بسیار کوچکتر از آنچه قابل مشاهده توسط میکروسکوپ‌ها است، آشکار می‌کنند. لیست شمار زیادی از ذرات بنیادی کشف شده توسط شتاب‌دهنده‌های پرنانرژی، به وضوح نشان دهنده اهمیت شتاب‌دهنده‌های پرنانرژی جهت رسیدن به درک بهتری از ساختار، خواص بلوک‌های سازنده ماده (کوآرک و لپتون) و نیروهای اندرکنش بین آن‌ها، می‌باشد [۱۲].

آنالیز مواد: شتاب‌دهنده‌ها ابزار اصلی در تحقیقات علم مواد به منظور مطالعه ساختار و خواص ماده محسوب می‌شوند. استفاده از شتاب‌دهنده یک تکنیک بسیار قوی جهت کریستالوگرافی، آشکارسازی ساختار پایه، خواص و ترکیبات مواد جامد و مولکول‌های بیوشیمیایی و همچنین بررسی آسیب‌های پرتویی در ساختار مواد می‌باشد [۱۷]. هم‌چنین منابع نور حاصل از شتاب‌دهنده‌ها می‌توانند اطلاعات و جزئیات دقیق در مورد چیدمان و رفتار اتم‌ها و الکترون‌ها در

۱. AGLAE



شکل ۸. الف) سینکروترون‌های یون تحقیقاتی و ب) سینکروترون‌های الکترون.

۷. نتیجه‌گیری

شتاب‌دهنده‌ها تقریباً در تمامی جنبه‌های زندگی روزمره بشر امروزی کاربرد دارند و روزبه‌روز استفاده از آن‌ها در جهان توسعه می‌یابد. از این رو، سرمایه‌گذاری بر روی تکنولوژی شتاب‌دهنده و ساخت آن جهت استفاده در هر یک از کاربردهای آن امری اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید.

مجسمه‌ها و همچنین نقاشی‌ها را بررسی کرده است [۱۲]. حدود ۲۰۰ شتاب‌دهنده در سراسر جهان در جهت تحقیقات علمی استفاده می‌شوند که شتاب‌دهنده‌های سینکروترون و شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک در این مراکز بسیار کاربرد دارند. شکل ۸ پراکندگی شتاب‌دهنده‌های سینکروترون در سراسر جهان را نشان می‌دهد.

مراجع

1. W Henning, and C Shank, "Accelerators for America's Future," June Sandbox Studio, Chicago, (2010).
2. U Amaldi, "Hadron Therapy in The World," University of Milano Bicocca and TERA Foundation, Italy (2008) 10.
3. X J Ma, C Lin, and W Zhen, *Biomed. Imaging Inter. J.* (2008) 6.
4. U Amaldi, "Accelerators for Medical Applications," EPAC96 (1996).
5. M Silari, "Medical Applications of Particle Accelerators," Seminar at the John Adams Institute for Accelerator Science (2011).
6. D M Parkin, F Bray, J Ferlay, and P Pisani, *CA Cancer Journal for Clinicians* (2002) 100.
7. J Huang, "Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatments," Department of Physics Faculty of Electronics & Physical Sciences University of Surrey (2009).
8. S Yamada, T Kamada, H Tsujii, "Current Status And Perspective of Charged Particle Radiotherapy in Japan," 54th IAEA General Conference, September 21-22 Vienna (2010); <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2010/cn189/cn189Presentations/Session%204/TSUJI.pdf>.
9. "Accelerators for Hadrontherapy and the Role of Industry," Particle Therapy Siemens AG Healthcare Sector, (2008); http://epaper.kek.jp/e08/talks/weim01_talk.pdf.
10. V L Auslender, A J Berejka, et al., *Industrial Radiation Processing With Electron Beams and X-rays*, IAEA 1 May (2011) Revision 6.
11. M R Cleland, "Industrial Applications of Electron Accelerators," CERN (2006) 385.
12. J Dran, "Accelerators in Art and Archaeology," EPAC (2002).
13. D Kalyani, "A Study to Evaluate the Effectiveness of Information Booklet on Knowledge Regarding Food Poisoning in School Going Children Among Primary School Teachers in Selected Government Schools At Bijapur," Rajiv Gandhi University of Health Sciences (2012).
14. S Kuk, S M Kim, Won-Gu Kang, H Bumsoo, K Nikolai Kuksanov, and K Jeong, *Journal of the Korean Physical Society*, **59**, 6 (2011) 3485.
15. U Amaldi, "The Important of Particle Accelerators," EPAC2000, Vienna, Austria (2000).
16. R W Hamm, "Accelerators and Instrumentation for Industrial Applications," 9th ICFA Seminar (2008).
17. D C Barrera, "C-band Linac for a Racetrack Microtron," Madrid University (2010).
18. R W Hamm and M E Hamm, "Introduction to the Beam Business in Industrial Accelerators and Their Applications," World Scientific (2012).