نام خانوادگی: روستایی		نام: طاهره
عنوان پایانامه: بررسی اثر تصحیح حرکت تنفسی با استفاده از یک الگوریتم اتوماتیک در کیفیت تصاویر قلب دریافت شده با توموگرافی به وسیله ی گسیل پوزیترون(Positron Emission Tomography)		
استاد راهنما: دکتر فریدون چوبدار		
درجه تحصیلی:دکتری	رشته: فیزیک	گرایش: هسته‌ای
استاد مشاور: دکتر کوروش گرجی		
درجه تحصیلی:دکتری	رشته: فیزیک پزشکی	گرایش:فیزیک پزشکی
استاد مشاور: امیر اکباتانی		
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فیزیک	گرایش: هسته‌ای
محل تحصیل: دانشگاه لرستان	دانشکده: علوم پایه	گروه آموزشی: فیزیک
کلید واژه‌ها: فارسی:توموگرافی به وسیله‌ی گسیل پوزیترون، تصویربرداری پزشکی، تصحیح حرکت تنفسی، رادیوایزوتوپ‌ها، انگلیسی: Positron Emission Tomography, radio isotope, respiratory motion correction, medical imaging,		
تاریخ فارغ التحصیلی:۱۳۸۹/۱۱/۱۱		

توموگرافی به وسیله ی گسیل پوزیترون (Positron Emission Tomography) که به اختصار PET نامیده می شود در سالهای اخیر به سرعت در حال تبدیل شدن به مهمترین ابزار تصویر برداری پزشکی هسته ای می باشد. یک روش استاندارد و غیر تهاجمی نوین برای ارزیابی عملکرد قلب، استفاده از تکنیک تصویر برداری PET است. در این روش تصویر برداری، همانند سایر روشهای تصویر برداری از قلب، اختلالات ناشی از حرکات تنفسی منجر به کاهش کیفیت تصویر می گردد. در این پژوهش، ساخت فانتوم تضعیف و اکتیویته‌ی قلب توسط NCAT، انجام شد به گونه‌ای که سیکل تنفسی در آن به ۸۰ قسمت مساوی تقسیم‌بندی و ضایعه‌ای در ناحیه‌ی apex تمام فانتوم‌های اکتیویته تعبیه، گردید. فانتوم‌های مربوط به فازهای مختلف قلبی توسط SimSET، جهت شبیه سازی تصاویر PET، مورد استفاده قرار گرفتند و سینوگرام حاصل از این شبیه سازی توسط نرم‌افزار STIR و به روش Iterative

مورد بازسازی قرار گرفت. تصاویر بازسازی شده به دو دسته‌ی مختلف تقسیم شدند، به صورتی که یک دسته از آن‌ها توسط الگوریتم اتوماتیک RMC، مورد تصحیح حرکت تنفسی قرار گرفتند و دسته‌ی دیگر بدون هیچ دستکاری تهیه شدند. تصاویر دیده شده با XMedcon، چاپ و سپس کدگذاری گردیدند و در نهایت به صورت blind، در اختیار چهار پزشک متخصص پزشکی هسته‌ای قرار داده شد. در پایان داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS، آزمون کاپا مورد ارزشیابی قرار گرفت. در شش فاکتور مورد نظر پزشکان، در بررسی کیفی تصاویر، همگی بر تاثیر مثبت تصحیح حرکت تنفسی بر تصاویر توافق نسبتاً کاملی داشتند و در بین فازهای مختلف قلبی، تاثیر این بهبود بر فاز ۹ قلبی به مراتب بیشتر بوده که نتایج بدست آمده با نتایج مقایسه‌ی کمّی، که توسط گرجی و همکاران انجام شد، همخوانی دارد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده فارسی.....یک

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پرتوهای یون‌ساز ۱

۱-۲- یون‌سازی و تحریک ۲

۱-۲-۱- یون‌سازی کلی ۳

۱-۲-۲- یون‌سازی مخصوص ۳

۱-۳- واپاشی رادیواکتیو ۳

۱-۳-۱- واپاشی آلفا (α) ۳

۱-۳-۲- برهم کنش ذرات آلفا با ماده ۵

۱-۳-۳- واپاشی بتا (β) ۵

۱-۳-۴-مشخصات ذرات بتا ۶

۱-۳-۵- برهم کنش ذرات بتا و الکترون با ماده ۶

۱-۳-۶- واپاشی پازیترون (پوزیترون) β^+ ۷

۱-۳-۷- مشخصات پوزیترون و برهم‌کنش آن با ماده ۸

۱-۳-۸- واپاشی با گیراندازی الکترون K– ۹

۱-۳-۹- پرتوهای الکترومغناطیس ۹

۱-۳-۱۰- واپاشی گاما (γ) ۱۰

۱-۳-۱۱- مشخصات پرتو گاما ۱۱

۱-۳-۱۲- برهم کنش پرتوهای ایکس و گاما با ماده ۱۲

۱-۳-۱۳- فرآیند فوتوالکتریک ۱۳

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱-۳-۱۴- فرآیند پراکندگی کامپتون ۱۳

۱-۳-۱۵- تولید جفت ۱۴

۱-۳-۱۶- گذارهای ایزومری ۱۵

۱-۴- تضعیف اشعه‌ی گاما ۱۶

فصل دوم: آشنایی با PET

۲-۱- تاریخچه‌ی پزشکی هسته‌ای ۱۹

۲-۲- PET، چیست؟ ۲۱

۲-۳- PET در آغاز ۲۲

۲-۴- توموگرافی به وسیله‌ی گسیل پوزیترون (PET) ۲۳

۲-۵- رادیونوکلئیدها ۲۵

۲-۶- چرا پوزیترون‌ها برای تصویربرداری؟ ۲۶

۲-۷- قوانین فیزیکی PET ۲۶

۲-۸- طراحی دستگاه‌های اسکن PET ۲۸

۲-۸-۱- آشکارسازهای سوسوزن جامد در PET ۳۰

۲-۸-۲- لوله‌ی فوتومولتی پلایر ۳۲

۲-۸-۳- آنالیزور ارتفاع پالس ۳۳

۲-۸-۴- چیدمان آشکارسازها ۳۳

۲-۹- دستگاه‌های اسکن PET ۳۶

۲-۱۰- نحوه‌ی گرفتن اطلاعات و تصحیح آن‌ها ۳۸

۲-۱۰-۱- گرفتن اطلاعات ۳۸

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۲-۱۱- نحوه‌ی گرفتن اطلاعات در PET دوبعدی و سه‌بعدی ۴۲

۲-۱۱-۱- فاکتورهای موثر بر اطلاعات گرفته شده..... ۴۴

۲-۱۱-۱-۱- بهنجارش ۴۴

۲-۱۱-۱-۲- تضعیف فوتون..... ۴۵

۲-۱۱-۱-۳- روش تصحیح تضعیف..... ۴۶

۲-۱۱-۱-۴- وقایع هم‌رویداد تصادفی ۴۸

۲-۱۱-۱-۵- رویدادهای پراکندگی ۴۹

۲-۱۱-۱-۶- زمان تلف شده..... ۵۰

فصل سوم: شبیه سازی و بازسازی تصاویر

۳-۱- محدودیت‌های تکنیکی اسکنرهای PET ۵۳

۳-۱-۱- حرکت قلب در طول تصویربرداری ۵۳

۳-۱-۲- حرکت قلب در طی مدت انقباض..... ۵۴

۳-۱-۳- حرکت تنفسی قلب..... ۵۵

۳-۱-۴- حرکت بیمار در طول تصویربرداری..... ۵۶

۳-۲- روش‌های شبیه‌سازی و فانتوم‌ها ۵۷

۳-۲-۱- چرا شبیه‌سازی؟ محدودیت‌ها و مزایای آن..... ۵۷

۳-۲-۲- فانتوم‌های ریاضی..... ۵۹

۳-۲-۲-۱- فانتوم‌های تحلیلی..... ۵۹

۳-۲-۲-۲- فانتوم‌های پایه‌حجمی ۵۹

۳-۳- نمونه‌هایی از برنامه‌های مونت‌کارلو برای فوتون و الکترون‌ها ۶۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۳-۳-۱- برنامه‌ی SIMIND: ۶۲

۳-۳-۲- بسته‌ی EGS4 ۶۲

۳-۳-۳- برنامه‌ی MCNP ۶۳

۳-۳-۴- برنامه‌ی PeneloPET ۶۴

۳-۳-۵- برنامه‌ی GATE ۶۴

۳-۳-۶- برنامه‌ی PET-SORTEO ۶۴

۳-۳-۷- برنامه‌ی SIMSET ۶۵

۳-۴- بازسازی تصاویر ۶۶

۳-۴-۱- الگوریتم‌های بازسازی تصویر ۶۶

۳-۴-۲- روش‌های تحلیلی ۶۶

۳-۴-۳- روش‌های تکرارکننده ۶۷

۳-۵- حرکت و تصحیح آن ۶۹

۳-۶- آنالیز داده‌ها ۷۰

۳-۶-۱- روش کاپا ۷۰

۳-۶-۲- تفسیر کاپا ۷۲

فصل چهارم: نحوه‌ی شبیه سازی

۴-۱- تهیه‌ی فانتوم ۷۴

۴-۲- شبیه‌سازی PET ۷۵

۴-۳- بازسازی تصاویر ۷۵

۴-۴- مقایسه‌ی کمّی ۷۶

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۴-۵- مقایسه‌ی کیفی ۷۷

فصل پنجم: بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- نتایج ۸۱

۵-۲- محدودیت‌های مطالعه و کارهای آینده ۸۵

مرجع‌ها ۸۷

چکیده‌ی انگلیسی ۸۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فصل اول

شکل(۱-۱): نمایش واپاشی پوزیترون ۸

شکل(۱-۲): توضیح اثر فوتوالکتریک..... ۱۳

شکل(۱-۳): فرآیند پراکندگی کامپتون..... ۱۴

شکل(۱-۴): گسیل اشعه‌ی گاما و فرآیند تبدیل داخلی..... ۱۶

شکل(۱-۵): نمایش تضعیف یک باریکه‌ی فوتون..... ۱۷

فصل دوم

شکل(۲-۱): ساختار Fluro-2-deoxy-D-glucose ۲۶

شکل(۲-۲): نتیجه‌ی واپاشی یک رادیونوکلئید ۲۷

شکل(۲-۳): طرح یک بلوک آشکارساز..... ۳۴

شکل(۲-۴): بلوک آشکارسازی که طرح اشتراک یک چهارم از لوله‌های PM را نشان می‌دهد ۳۵

شکل(۲-۵): تعریف میدان دید عرضی به وسیله‌ی زوایای مورد قبول تک‌تک آشکارسازها در یک اسکنر PET..... ۳۵

شکل(۲-۶): آرایش‌های فضایی مختلف اسکنرهای PET..... ۳۷

شکل(۲-۷): نمایش یک اسکنر PET اختصاصی و پیشرفته ۳۷

شکل(۲-۸): طرح یک بلور آشکارساز..... ۳۹

شکل(۲-۹): جمع‌آوری اطلاعات PET، به شکل سینوگرام..... ۴۱

شکل(۲-۱۰): یک نمونه سینوگرام متعارف ۴۱

شکل(۲-۱۱): گرفتن اطلاعات به صورت دوبعدی و سه‌بعدی..... ۴۳

شکل(۲-۱۲): تضعیف فوتون..... ۴۵

شکل(۲-۱۳): وقایع هم‌رویداد صحیح، تصادفی، پراکنده..... ۴۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فصل سوم

شکل(۳-۱): نمایش فانتوم بالاتنه‌ی پایه‌حجمی اصلی توسعه یافته توسط Zubal و Harrell ۶۰

شکل (۳-۲): فانتوم چهاربعدی MCAT و NCAT ۶۰

شکل(۳-۳): طرحی از یک الگوریتم بازسازی تکرار کننده‌ی کلی ۶۸

فصل چهارم

شکل(۴-۱): نمونه پرسشنامه‌ی تهیه شده ۷۷

شکل(۴a-۲): تصاویر ماهیچه‌ی قلبی قبل از تصحیح ۷۸

شکل(۴b-۲): تصاویر ماهیچه‌ی قلبی بعد از تصحیح ۷۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول(۳-۱): مثالی طرح‌بندی داده‌ها ۷۱

جدول(۳-۲): تفسیر کاپا ۷۲

جدول(۵-۱): نمایش پاسخ مشاهده‌گرها برای فاکتور زنده‌مانی عضله قلب ۸۱

جدول(۵-۲): جدول محاسبه‌ی کاپا برای فاکتور زنده‌مانی عضله قلب ۸۲

جدول(۵-۳): نمایش پاسخ مشاهده‌گرها برای فاکتور قدرت تفکیک فضایی ۸۲

جدول(۵-۴): جدول محاسبه‌ی کاپا برای فاکتور قدرت تفکیک فضایی ۸۲

جدول(۵-۵): نمایش پاسخ مشاهده‌گرها برای فاکتور شفافیت تصویر ۸۳

جدول(۵-۶): جدول محاسبه‌ی کاپا برای فاکتور شفافیت تصویر ۸۳

جدول(۵-۷): نمایش پاسخ مشاهده‌گرها برای فاکتور نسبت سیگنال به نویز ۸۳

جدول(۵-۸): جدول محاسبه‌ی کاپا برای فاکتور نسبت سیگنال به نویز ۸۳

جدول(۵-۹): نمایش پاسخ مشاهده‌گرها برای فاکتور تاثیر اکتیویته سایر بافت‌ها بر روی اکتیویته قلب . ۸۴

جدول(۵-۱۰): جدول محاسبه‌ی کاپا برای فاکتور تاثیر اکتیویته‌ی سایر بافت‌ها بر روی اکتیویته‌ی قلب ۸۴

جدول(۵-۱۱): نمایش پاسخ مشاهده‌گرها برای فاکتور بهینه‌بودن تصویر ۸۵

جدول(۵-۱۲): جدول محاسبه‌ی کاپا برای فاکتور بهینه‌بودن تصویر ۸۵

۱-۱- پرتوهای یون‌ساز

پرتوهای یون‌ساز یا ذره‌ای هستند، یا امواج الکترومغناطیسی‌اند. اگرچه از نظر فیزیکی این دو دسته پرتو کاملاً با یکدیگر متفاوتند، ولی اثرات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بر مواد بسیار به یکدیگر شبیه و اغلب یکسان میباشد، زیرا هر دو ضمن عبور از ماده قادرند الکترون‌ها را از اتم‌های تشکیل دهنده مواد جدا سازند و به همین دلیل یون‌ساز نامیده می‌شوند.

از دست دادن یک الکترون توسط اتم باعث می‌شود آن اتم فعالیت شیمیایی زیادی پیدا کند و واکنش‌های ناشی از این اتم‌های یونیزه شده است که، باعث شروع اثرات زیستی قابل ملاحظه‌ای می‌شود. از نظر فیزیکی پرتوهای الکترومغناطیس یون‌ساز یعنی پرتوهای ایکس و گاما متعلق به دسته‌ای از پرتوها هستند که پرتوهای نور مرئی، مادون قرمز و ماوراء بنفش نیز در آن دسته قرار می‌گیرند، با این تفاوت که پرتوهای ایکس و گاما دارای طول موج بسیار کوتاهتری هستند و همین امر سبب می‌شود که انرژی بیشتری داشته باشند. به هر حال تمام پرتوهای الکترومغناطیس از نظر اثراتی که بر ماده می‌گذارند با یکدیگر متفاوتند، در این گروه فقط پرتوهای پر انرژی ایکس و گاما قادر به جدا کردن الکترون از هر نوع اتم می‌باشند، در حالیکه پرتوهای الکترومغناطیس با طول موج زیاد و در نتیجه انرژی کم، نظیر پرتو ماوراء بنفش و نور مرئی فقط تحریک یا برانگیختگی در اتم ایجاد می‌کنند. وقتی از واژه گاما استفاده می‌شود که پرتو الکترومغناطیس از عناصر رادیواکتیو گسیل شده باشد، در حالیکه پرتو ایکس، پرتوی الکترومغناطیسی است که در دستگاه‌های استاندارد مولد این پرتو تحت اختلاف پتانسیل بسیار زیاد تولید می‌شود[۱]. پرتوهای یون‌ساز ذره‌ای، ذرات جزء اتم می‌باشند. از این جمله می‌توان الکترون‌های پر انرژی (e^-)، ذرات بتا (β^+)یا (β^-) آلفا (α^{++})، مزون‌ها، نوترون ($_0n^1$) و هسته‌های عناصر سنگین‌تر را که محصول

شکافت هسته‌ای می‌باشند نام برد که اغلب دارای انرژی‌های بسیار زیادی هستند، که این پرتوها را پرتوهای ذره‌ای باردار نیز می‌نامند[۱].

۱-۲- یون‌سازی و تحریک

کلیه پرتوهای یون‌ساز دو خصوصیت عمده دارند که یکی یون‌سازی و دیگری ایجاد حالت برانگیختگی در اتم‌هاست. زمانیکه اتم در حالت پایدار می‌باشد، الکترون نیز در پایین‌ترین تراز انرژی خود قرار دارد. هنگامیکه مقداری انرژی به منطقه مداری اتم برسد و جذب آن گردد، الکترون به مداری دورتر از هسته منتقل می‌شود ولی هنوز جزئی از آن اتم است. در آن حالت گفته می‌شود که اتم به حالت تحریک در آمده‌است. تحریک هر اتم چند مرحله یا تراز دارد و برای عبور از یک تراز به تراز دیگر مقداری انرژی گرفته و یا از اتم خارج می‌شود. طرح ترازهای انرژی هر اتم ثابت است. هنگامیکه انرژی جذب شده توسط اتم به قدری باشد که الکترون از مدار اتم جدا شود یون‌سازی صورت می‌گیرد. یون‌سازی و تحریک هر دو اثرات بسیار مهمی هستند زیرا روش‌های آشکارسازی بر اساس آن‌ها پایه ریزی شده است.

پرتوهای ذره‌ای باردار را پرتوهای یون‌ساز مستقیم نیز می‌نامند زیرا هنگامی که از نزدیکی اتمی عبور می‌کنند تحت تاثیر نیروی جاذبه یا دافعه‌ی بین دو بار، الکترون را از اتم جدا می‌کنند، در حالیکه پرتوهای الکترومغناطیس یون‌ساز و نوترون‌ها را پرتوهای یون‌ساز غیرمستقیم گویند زیرا انرژی آن‌ها پس از جذب در اتم باعث گسیل یک الکترون و یا یک ذره دیگر می‌شود.

معمولاً گفته می‌شود که برای انجام هر یون‌سازی در هوا ۳۴ الکترون ولت مورد نیاز است. البته اعداد دیگری مثل ۳۲/۵ الکترون ولت برای ایجاد یک جفت یون نیز در بعضی از کتاب‌ها ذکر شده‌است که به آن متوسط اتلاف به ازای هر یون‌سازی گویند. به این ترتیب یک پرتو یون‌ساز در هر بار یون‌سازی این مقدار انرژی را از دست می‌دهد تا بالاخره به حال سکون درآید. از طرف دیگر مقدار حقیقی انرژی مورد لزوم برای خارج کردن یک الکترون از مدار الکترونی اتم، یعنی پتانسیل یون‌سازی بین ۱۰ تا ۲۵ الکترون ولت بیشتر نیست. انرژی اضافی یعنی ۹ تا ۲۴ الکترون ولت معمولاً صرف تحریک اتم‌ها و یا مولکول‌های دیگر می‌شود[۱].

۱-۲-۱- یون‌سازی کلی

تعداد یون‌سازی حاصل از یک پرتو، به مقدار انرژی اولیه پرتو بستگی دارد. هر قدر این انرژی بیشتر باشد تعداد یون‌سازی یا به عبارتی یون‌سازی کلی آن پرتو بیشتر خواهد بود[۱].

۱-۲-۲- یون‌سازی مخصوص

از طرفی دیگر مسافتی که یک پرتو می‌تواند طی کند بستگی به عوامل متعددی از جمله جرم پرتو و بار پرتو نیز دارد . لذا پرتو آلفا که نسبت به پرتو بتا یا الکترون سنگین‌تر است، مسافت کمتری را با انرژی مساوی می‌تواند طی کند. لذا گفته می شود برد طی شده توسط پرتو آلفا کوتاهتر و برای پرتو بتا بلندتر است. در نتیجه تعداد جفت یون‌هایی که در واحد طول از مسیر پرتو حاصل می‌شود و یون‌سازی مخصوص می‌نامند را، وابسته به برد ذره می‌دانند. این یون‌سازی بستگی به انرژی پرتو داشته و در تمام مسیر حرکت پرتو یکسان و مشابه نیست. ضمناً یون‌سازی مخصوص در مورد هر پرتو نیز متفاوت است. به عنوان مثال ذرات آلفا با انرژی ۳ MeV می‌توانند ۴۰۰ جفت یون در یک میلی‌متر از مسیر خود ایجاد کنند در صورتیکه ذرات بتا و پرتو گاما با همین انرژی به ترتیب فقط ۵۰ جفت یون و یک جفت یون در هر میلی‌متر از مسیر تولید می‌کنند[۱].

۱-۳- واپاشی رادیواکتیو

هسته‌های رادیواکتیو (رادیونوکلئیدها)، به خاطر ترکیب نامتناسب (نسبت به هسته‌های پایدار) نوترون‌ها و پروتون‌ها و یا انرژی اضافه، ناپایدارند. به همین دلیل با گسیل تابش‌هایی مانند گاما، ذرات آلفا، ذرات بتا ، ذرات پوزیترون و یا گیراندازی الکترون واپاشیده می‌شوند[۱-۳].

۱-۳-۱- واپاشی آلفا (α)

ناپایداری هسته‌ها نسبت به گسیل پرتو آلفا بیشتر در هسته‌های سنگین که تعداد پروتون‌های آن‌ها بیش از ۸۰ و عدد جرمی آن‌ها بیش از ۲۰۰ است دیده می‌شود و می‌توان آن را برتری یافتن نیروی دافعه کولمبی بر نیروهای بستگی هسته دانست. بین هسته‌هایی که جرم متوسط دارند فقط نئودی میوم (^{144}Nd) و ساماریوم (^{147}Sm) بطور طبیعی رادیواکتیو بوده و آلفا گسیل می‌کنند. ذره‌های آلفا با انرژی‌هایی که

در هسته‌های مختلف از۱۰MeV-۴ متغیر است، منتشر می‌شوند و دارای قدرت یون‌سازی زیادی هستند. هرگاه طیف انرژی پرتو آلفا را در یک اتم رادیواکتیو بررسی کنیم خواهیم دید که این طیف ساده نیست بلکه از نظر انرژی، ذره‌های آلفا در چند گروه قرار می‌گیرند.

علت چندگانه بودن طیف این است که واپاشی آلفا همواره هسته جدید را در حالت پایدار خود ایجاد نمی‌کند بلکه بلافاصله بعد از گسیل ذره آلفا، هسته جدید ممکن است در یکی از حالات برانگیخته خود باشد. چون انرژی هر حالت برانگیخته نسبت به حالت پایه، با انرژی حالت دیگر اختلاف دارد، بر حسب اینکه هسته در کدامیک از حالات تحریک باشد انرژی ذره آلفا فرق می‌کند. ضمناً در پرش هسته جدید از حالات تحریک به حالت پایه یک پرتو گاما گسیل می‌شود که انرژی آن برابر با اختلاف انرژی این دو حالت است. کم شدن یک ذره آلفا از هسته به معنی کم شدن دو پروتون (دو بار مثبت)، و دو نوترون و یا چهار واحد جرم است. بنابراین از وزن اتمی A، چهار واحد و از عدد اتمی Z، دو واحد کاسته می‌شود. پرتو آلفا هسته هلیوم با دو نوترون و دو پروتون است[۴] که اولین مرتبه رادرفورد این موضوع را کشف کرد[۴]. علامت اختصاری آن $_2He^4$ یا $_2\alpha^4$ و یا فقط α^{++} است. جرم آن amu[1] ۴ و بار الکتریکی آن ۲+ است [۱, ۳].

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}He_{2} + Q_{\alpha} \qquad (۱-۱) $$

سرعت اولیه آلفا هنگام خروج از هسته $۱/۴ \times ۱۰^{۱۱} - ۲/۲ \times ۱۰^{۱۱}$ متر برثانیه است. برد آن در هوای صفر درجه سلسیوس و فشار یک جو، ۸/۶ – ۰/۳ سانتی‌متر است. برد آن در بافت بدن حدود چند میکرون است. بنابراین پرتو آلفا توسط طبقه شاخی پوست (ضخامت چند میکرون) جذب می‌شود. در نتیجه از نظر حفاظت، ذره آلفا به عنوان یک چشمه خارجی خطری در بر ندارد یعنی از پوست سالم نمی‌تواند به بدن نفوذ کند. یون‌سازی مخصوص پرتو آلفا در ابتدای مسیر به علت زیاد بودن سرعت ذره کم و بتدریج که سرعت ذره آلفا کم می‌شود یون‌سازی مخصوص آن افزایش می‌یابد و در آخر مسیر ذره آلفا ابتدا با گرفتن یک الکترون و سپس با گرفتن الکترون دیگر به هسته هلیوم تبدیل شده و متوقف می‌گردد. در

1Atomic Mass Unit

آخر مسیر یون‌سازی مخصوص ذرات آلفا به صفر تنزل پیدا می‌کنند. با توجه به گفته‌های بالا یک ورقه کاغذ هم می‌تواند تمام پرتوهای آلفای حاصل از یک منبع را جذب کند[۱, ۳].

۱-۳-۲- برهم کنش ذرات آلفا با ماده

ذرات آلفا انرژی خود را از طریق تحریک و یون‌سازی اتم‌های ماده‌ای که از درون آن عبور می‌کنند از دست می‌دهند. بین یک ذره آلفا با دو بار مثبت و الکترون مداری در اتم‌های ماده با بار منفی یک نیروی جاذبه قوی کولمبی وجود دارد. امکان دارد که این نیروی جاذبه باعث پرش الکترون به مداری با انرژی بالاتر شود (تحریک)، و یا الکترون کاملاً از اتم خارج شود (یون‌سازی). به علت سنگینی ذره آلفا در عمل انتقال انرژی، در مسیر ذره آلفا هیچ گونه انحرافی به وجود نمی‌آید و مسیر ذره در تمام طول، مستقیم خواهد بود. به الکترون‌هایی که در این واکنش از اتم‌ها جدا می‌شوند الکترون‌های ثانویه اطلاق می‌شود. این الکترون‌ها خود مسیری مطابق ذرات بتا (مسیر زیگزاگ) دارند و در این مسیر به یون‌سازی ادامه می‌دهند. هنگامی که اکثر انرژی ذره در اثر یون‌سازی و تحریک مصرف گردید ذره آلفا دو الکترون را در مدار خالی خود جایگزین ساخته و تبدیل به اتم هلیوم می‌شود[۱, ۳].

۱-۳-۳- واپاشی بتا (β)

چنانچه هسته در حالت تحریک انرژی کافی برای گسیل ذره آلفا با انرژی MeV ۱۰-۴ را نداشته باشد از طریق واپاشی بتا مثبت ، بتا منفی ویا تسخیر الکترون به پایداری می‌رسد[۴] و نتیجه آن تبدیل یکی از پروتون‌ها به نوترون و یا یکی از نوترون‌ها به پروتون است. بنابراین ناپایداری هسته‌هایی که (β^-) نگاترون گسیل می‌کنند را در اثر زیادی نوترون‌ها می‌دانند، در حالیکه گسیل پوزیترون (β^+) را به کمبود نوترون‌ها یا زیادی پروتون‌ها نسبت می‌دهند که معمولاً تعداد هسته‌های گروه اول به مراتب بیشتر است[۳].

واپاشی بتا دارای مشخصاتی است که آن را از واپاشی آلفا متمایز می‌کند.

۱-ذرات بتا دارای طیف انرژی پیوسته‌ای هستند که از صفر تا ماکزیمم تغییر می‌کند.

۲-حدود انرژی‌هایی که در ذره بتا دیده می‌شود از MeV ۳-۰/۰۲ متغیر است بنابراین پرانرژی‌ترین ذره‌های بتا انرژی بسیار کمتری از کم‌انرژی‌ترین ذره آلفا دارند.

۳-ذره‌های بتا (β^+, β^-) از اجزاء سازنده هسته اتم نمی‌باشند. بنابراین گسیل آن‌هاخود نتیجه یک تغییر و تحول نوکلئونی است که در داخل هسته انجام می‌گیرد[۳].

۱-۳-٤-مشخصات ذرات بتا

ذره بتای منفی (نگاترون) باری منفی و جرمی بسیار کم در حدود amu ۰/۰۰۰۵۵ یا $۹/۱\times۱۰^{-۲۸}$ گرم دارد. جنس پرتوی بتای منفی الکترون است. جرم آن در مقیاس هسته‌ای صفر و علامت اختصاری آن e^- یا β^-، است. سرعت این ذرات بین صفر تا سرعت سیر نور متغیر است. برد پرتو بتا در هوا در حدود چندین سانتی‌متر تا حدود متر می‌باشد ولی در آب یا بافت حدود چند میلی‌متر است. از نظر حفاظت، پرتو بتا یک خطر خارجی محسوب می‌شود زیرا در برخورد با ماده می‌تواند اشعه ایکس به وجود آورد که این پرتو به راحتی از طبقات خارجی پوست می‌گذرد و اندام‌های حساس به پرتو را تحت تابش قرار می‌دهد[۱, ۳].

خاصیت یون‌سازی اشعه بتا به مراتب کمتر از اشعه آلفا است، یعنی بطور متوسط در حدود ۱۰۰ مرتبه کمتر از پرتو آلفا می‌باشد. بالعکس برد یا قدرت نفوذ آن بطور متوسط ۱۰۰ برابر بیشتر از پرتو آلفا است. آلومینیوم حفاظ خوبی برای پرتو بتا می‌باشد. یک ورقه آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر به خوبی می‌تواند پرتو بتا را متوقف سازد. ذرات بتا نیز مانند ذرات آلفا می‌توانند در اتم برانگیختگی ایجاد کنند ولی این خاصیت نیز در پرتو بتا کمتر از پرتو آلفا می‌باشد[۱].

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + \beta^- + \bar{\nu} \quad + Q_{\beta^-} \qquad (۲-۱)\ [4] $$

۱-۳-۵- برهم کنش ذرات بتا و الکترون با ماده

انرژی لازم برای یون‌سازی بر حسب نوع مولکول متغیر است. برای مولکول آب بطور متوسط ۱۶eV انرژی در نظر گرفته می‌شود. انواع تحریک‌ها، انرژی‌های کمتری در حدود eV لازم دارند و بطور

متوسط تعداد تحریک‌ها سه برابر تعداد یون‌سازی‌ها است. انتقال انرژی حرارتی از هر دو مورد قبل، انرژی کمتری نیاز دارد و لذا تعداد انتقال‌های انرژی حرارتی بیشتر است. بطور متوسط وقتی الکترون پر انرژی ویا ذرات بتا به مولکول‌های آب برخورد می‌کند یک یون‌سازی و در نتیجه ۱۶ الکترون ولت انرژی و تعداد سه تحریک و تحریک‌های حرارتی متعددی را که جمعاً این‌ها هم ۱۶ الکترون ولت انرژی لازم دارند انجام می‌دهد. بنابراین عمل یون‌سازی بطور متوسط ۳۲ الکترون ولت در آب تلف می‌کند. این عدد را متوسط اتلاف انرژی به ازای هر یون‌سازی می‌نامند که در آب ۳۲/۵ و در هوا ۳۴ الکترون ولت است[۱, ۳].

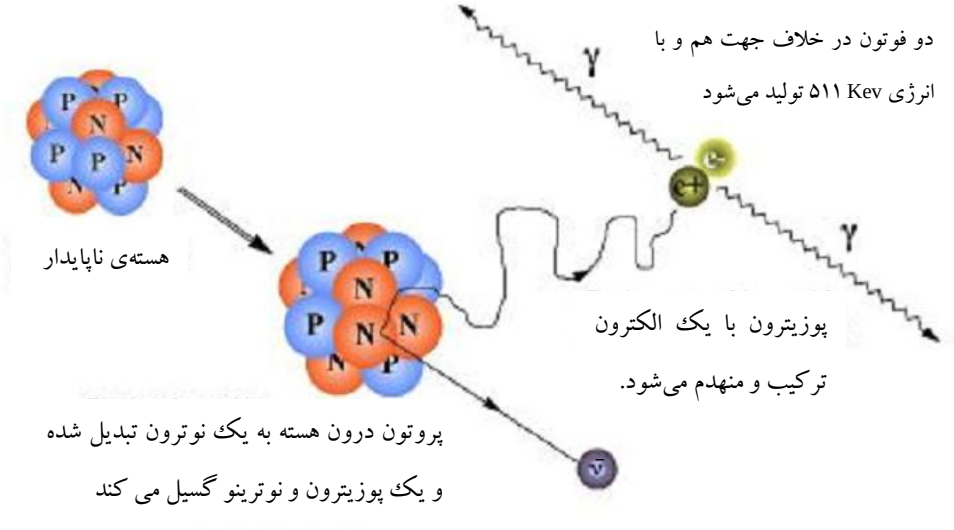
۱-۳-٦- واپاشی پازیترون (پوزیترون) β^+

در مواردی که نسبت نوترون به پروتون خیلی کم است و گسیل آلفا از نظر انرژی غیر ممکن است، هسته تحت شرایطی می‌تواند از طریق گسیل پوزیترون به پایداری برسد. هسته‌های ناپایدار که نوترون کم دارند، به دو صورت ممکن است به پایداری برسند. یکی اینکه پروتونی در داخل هسته الکترونی را از منطقه مداری بگیرد و به نوترون تبدیل شود و در این حالت فقط پرتو ایکس از هسته خارج می‌شود که این حالت را گیراندازی الکترون[1] می‌نامند. در حالت دیگر یک پروتون در داخل هسته تبدیل به یک پوزیترون و یک نوترون و یک نوترینو می شود (شکل ۱-۱)[۱, ۳].

$$ {}_{Z}X_{N}^{A} \rightarrow {}_{Z-1}Y_{N+1}^{A} + \beta^{+} + \nu + Q_{\beta^{+}} \qquad (۳-۱) $$

زیرا بر اساس اصل بقای جرم و انرژی، طبق واکنش اخیر جرم سمت راست واکنش بیشتر از جرم سمت چپ است. لذا بایستی مقداری انرژی توسط پروتون وارد هسته شده باشد که آن انرژی به جرم تبدیل شود تا ذرات سمت راست حاصل شوند[۴].

1Electron Capture



شکل(۱-۱): نمایش واپاشی پوزیترون[۵].

۱-۳-۷- مشخصات پوزیترون و برهم‌کنش آن با ماده

پوزیترون ضد ذره الکترون است. عمر آن کوتاه و در حدود $۱۰^{-۷}$ ثانیه می‌باشد. جرم پوزیترون برابر با جرم الکترون و بار الکتریکی آن برابر با بار الکتریکی الکترون و با علامت مثبت است. به علت کوتاهی عمر و اینکه در برخورد با یک الکترون منهدم می‌شود، سایر مشخصات آن تعیین نشده و حدس زده می‌شود که مانند الکترون باشد[۱, ۳]. اخیراً عناصر رادیواکتیوی که پوزیترون دهنده می‌باشند از نظر پزشکی اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. پوزیترون قسمتی از رگبارهای ثانویه پرتوهای کیهانی را تشکیل می‌دهد یعنی مزون‌های سبک یا میومزون‌ها بسته به بارشان به پوزیترون یا الکترون تبدیل می‌شوند طبق یک قاعده عمومی در فیزیک بهداشت، هر جا که پوزیترون موجود باشد پرتوهای گاما نیز وجود دارند چون همانطور که در فوق اشاره شد حالت منحصر به فرد عبور پوزیترون‌ها از یک ماده جاذب، این است که یک پوزیترون، انرژی خود را به دلیل بر هم کنش با اتم‌های ماده جاذب، از دست می‌دهد و تقریباً به حالت سکون می‌رسد و با یک الکترون از اتم ماده‌ی جاذب ترکیب می‌شود. در این لحظه هر دو ذره ($\bar{e}$ و β^{+}) برای تولید دو فوتون با انرژی ۵۱۱ Kev که در دو جهت مخالف ($\sim ۱۸۰^{\circ}$) گسیل می‌شوند، از بین می‌روند (شکل۱-۱). این فرآیند، فرآیند فنا نامیده می‌شود. آشکارسازی هم‌زمان دوفوتون مقابل هم، با انرژی ۵۱۱ Kev به وسیله‌ی دو آشکارساز، اساس کارتوموگرافی به وسیله‌ی گسیل پوزیترون (PET)

می‌باشد[۱, ۲, ۵]. انرژی هر یک از این پرتوهای گامای انهدامی[1] معادل انرژی حاصل از تبدیل جرم الکترون می‌باشد (۰/۵۱۱ Mev) [۱, ۳]. در تمام مسائل مربوط به محاسبه حفاظ، دزیمتری و ارزیابی خطرات پرتوها، می‌باید این پرتوهای انهدامی در نظر گرفته شوند.

۱-۳-۸- واپاشی با گیراندازی الکترون K–

راه دیگر برای کم شدن تعداد پروتون موجود در هسته، فرآیند گیراندازی الکترون می‌باشد. نتیجه‌ی نهایی این فرآیند دقیقاً مشابه کاهش با گسیل β^+ است. در این واپاشی یکی از الکترون‌های مدار داخلی (معمولاً از لایه K و به ندرت از مدار L) جذب هسته شده و با پیوستن به یک پروتون، نوترونی به وجود می‌آید. بنابراین نتیجه‌ی نهایی همانا کاهش یک پروتون و افزایش یک نوترون است. در این فرآیند هیچگونه پرتو بارداری گسیل نمی‌شود ولی به علت تغییر آرایش الکترونی، اشعه ایکس حاصل می‌شود. این فرآیند را تسخیر–K نیز می‌نامند زیرا معمولاً الکترون مدار K جذب هسته می‌شود[۴]. مسئله با تولید یک فوتون ایکس خاتمه نمی‌یابد بلکه جای خالی الکترون از لایه بالاتر پر می‌شود و لذا چندین فوتون فلورسانس تولید می‌شود[۱, ۳].

$$ {}^{1}_{1}P_0 \; + {}^{0}_{-1}e_0 \; (k) \rightarrow {}^{1}_{0}n_1 \; + {}^{0}_{0}X \quad + {}^{0}_{0}\nu \qquad\qquad (۴-۱) $$

۱-۳-۹- پرتوهای الکترومغناطیس

طیف امواج الکترومغناطیس وسیع است. از طول موج‌های خیلی بزرگ در حد کیلومتر و متر تا حدود انگستروم و کمتر از آن را در بر می‌گیرد. طیف کامل پرتوهای الکترومغناطیس در محیط به صورت امواج رادیویی، فروسرخ، مرئی، فرابنفش، پرتوایکس، پرتو گاما و فوتون‌های کیهانی وجود دارد. اثر امواج الکترومغناطیس بر روی سیستم بستگی به خود امواج و ساختمان موجود زنده دارد. یک موج، یک بسته انرژی است و اثر آن وقتی ظاهر می‌شود که این انرژی در سیستم جذب شود. در امواج الکترومغناطیس بخصوص امواج یونیزه‌کننده، مهم این است که چقدر انرژی جذب می‌شود ولی اینکه موج چه انرژی دارد مهم نیست. در فرکانس‌های زیاد این پرتوها هیچ شباهتی به امواج ندارند و مانند ذره

1Annihilation radiation

عمل می‌کنند. نظریه منقطع بودن امواج الکترومغناطیس ابتدا به وسیله پلانک بیان شد. او هریک از این دسته‌های انرژی را کوانتوم نامید. این فرضیه بعداً توسط انیشتین به اثبات رسید و بجای کوانتوم کلمه فوتون بکار گرفته شد. بنابراین در مورد پرتوهای الکترومغناطیس بایستی آن‌ها را بصورت موج با طول موج و فرکانس مشخص در نظر گرفت ولی هنگامی که انرژی مطرح می‌شود آن‌ها را باید ذرات کوچک حاوی انرژی دانست که با سرعت نور حرکت می‌کنند[۱, ۳].

جذب فوتون‌ها به ساختمان شیمیایی و مولکولی محیطی بستگی دارد که فتون از آن عبور می‌کند. قوانینی که بر پیوندهای شیمیایی مولکول‌ها و رزونانس و غیره حاکم است همان قوانین شیمیایی است. مسئله این است، که فراوانی مولکول‌ها با محیط غیر زنده تفاوت دارد و نوع ساختمان قسمت‌های مختلف موجود زنده نیز با هم فرق دارد. تفاوت در ساختمان شیمیایی تعیین کننده نوع عکس العمل مولکول، بخصوص در مقابل پرتو خاصی است. پرتوها با طول موج زیاد در موجود جذب نمی‌شود چون هیچ مکانیزمی وجود ندارد که بتواند با انرژی کم و طول موج زیاد تبادل انجام دهد[۱, ۳].

۱-۳-۱۰- واپاشی گاما (γ)

اگر در هسته‌ای نسبت نوترون به پروتون یا پروتون به نوترون مطابق با ترکیب نوکلئونی هسته پایدار باشد ولی انرژی داخل هسته‌ای بیشتر باشد[۴]، هسته‌ها با از دست دادن فوتون به تراز پایه برمی‌گردند. اگر خروج از حالت تحریک بیش از میلی‌ثانیه بطول انجامد ایزوتوپ یا عنصر را شبه پایدار[۱] و نحوه تبدیل هسته‌ای را تغییر ایزومری[۲] می‌نامند. در صورتیکه زمان خروج از حالت تحریک $۱۰^{-۱۰}$ ثانیه باشد نحوه تبدیل هسته‌ای را تبدیل داخلی[۳] گویند. در این موارد پرتو گامای حاصل از هسته، الکترون‌های مداری را تغییر مکان می‌دهد. علاوه بر گسیل الکترون از اتم، پرتو ایکس نیز از اتم خارج می‌شود. اگر پرتو ایکس حاصله از مدار K یا L، الکترونی از مدارهای خارجی به بیرون پرتاب کند این الکترون را

1metastable
2Isomeric Transition
3Internal Conversion