





دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم و فناوری‌های نوین

گروه مهندسی هسته‌ای

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی هسته‌ای

گرایش رآکتور

ارزیابی میزان دز دریافتی کارکنان در شتابدهنده سیکلوترون با روش مونت کارلو

و مقایسه آن با نتایج تجربی

استادان راهنما:

دکتر علیرضا کریمیان

دکتر محمد میرزایی

پژوهشگر:

سید مجتبی سادات اشکور

بهمن ماه ۱۳۸۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق
موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه
اصفهان است.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم و فناوری های نوین

گروه مهندسی هسته ای

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی هسته ای گرایش رآکتور

آقای سید مجتبی سادات اشکور

تحت عنوان

ارزیابی میزان دز دریافتی کارکنان در شتابدهنده سیکلوترون با روش مونت کارلو

و مقایسه آن با نتایج تجربی

در تاریخ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر علیرضا کریمیان با مرتبه ی علمی استادیار امضا

۲- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمد میرزایی با مرتبه ی علمی استادیار امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر محمدرضا عبدی با مرتبه ی علمی استادیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر بهزاد تیموری با مرتبه ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

دکتر محمدرضا عبدی

سپاسگزاری

سپاس پروردگار مهربانم را که در هر نفس فرصتی گران‌بها به من عطا نمود

و در هر فرصتی، نعمتی ارزنده،

هرگامی را قوتی و هر مسیری را همتی.

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

پژوهش حاضر، تلاش اساتید فرزانه‌ای است که در طول دوران تحصیل، افتخار تعلیم در محضر آنان را یافته و در پرتو دانش بیکرانشان بهره فراوان برده‌ام.

از استاد عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر علیرضا کریمیان که با راهنمایی‌ها، همکاری‌ها، همراهی‌ها و هم‌فکری‌های خود، در تکوین دیدگاه من در این دوره نقش بسزایی داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. با کلمات نمی‌توان از ایشان سپاسگزاری نمود و ارزش‌های وجودی ایشان را بیان نمود. شاگردی این استاد گرانقدر برای اینجانب افتخار بزرگی بود. از خداوند منان خواهان آنم که در تمام مراحل زندگی با صحت و سلامتی کامل به زندگی‌شان ادامه دهند و همیشه در سایه لطف پروردگار از گزند مصائب و مشکلات زندگی به دور مانند. از دیگر استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد میرزایی که در طول انجام این تحقیق همواره از راهنمایی‌ها و مشاوره‌های ایشان بهره‌مند شده‌ام تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم. باشد که همیشه در سایه لطف پروردگار مراحل زندگی خود را در کمال صحت و سلامت و شادمانی ادامه دهند.

خدا را بر نعمت شاگردی چنین اساتید دانشمندی شاکرم.

از آقایان مهندس مهدی کمالی، دکتر محمدرضا عبدی، دکتر مجتبی مستجاب‌الدعواتی و دیگر اعضای هیات علمی و کارمندان دانشکده علوم و فناوری‌های نوین نیز کمال تشکر را دارم که شرایط لازم برای انجام پژوهش فوق را فراهم نمودند.

سپاس ویژه خود را از آقایان مهندسان شاهرور و اصلانی ابراز می‌نمایم که صادقانه در انجام این تحقیق همکاری نمودند. سلامتی و پیروزی روزافزون این دو عزیز را از خداوند منان خواستارم. همچنین از مهندسان انصاف، شادان‌پور، کیومرثی، پیروزفر و دیگر کارشناسان پژوهشکده تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج که کمال همکاری را در انجام این پروژه نمودند، سپاسگزارم.

تقدیم

با یک دنیا محبت،

تقدیم به یگانه‌های روزگار، پدر و مادر عزیزم که وجودشان مصداق صداقت، عشق، عطف و تبلور گذشت و فداکاری است.

تقدیم به خانواده‌ی عزیزم نیما، حسین، محبوبه و حسن که همیشه در قلبم جای دارند.

چکیده

پرتوداروهای تالیوم- ۲۰۱، سیستم ژنراتور روبیدیوم- ۸۱ / کریپتون- ۸۱ و FDG به ترتیب از طریق واکنش‌های $^{18}\text{O} (n, p) ^{18}\text{F}$ و $^{nat}\text{Kr} (p, 2n) ^{81}\text{Rb}$ یا $^{nat}\text{Kr} (p, n) ^{81}\text{Rb}$ ، $^{203}\text{Tl} (p, 3n) ^{201}\text{Pb}$ در پژوهش‌های تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج تولید می‌شوند. در اثر بمباران پروتونی هدف در تولید هر کدام از پرتوداروها، جمعیت نوترونی بسیار زیادی تولید شده که باعث فعال شدن هسته‌های مواد موجود در اتاق‌های هدف می‌شود. ایجاد نقص فنی در هدف یا دیگر مواد موجود در اتاق هدف یکی از مهمترین مشکلات در ضمن بمباران پروتونی است که برای انجام تعمیرات لازم باید بمباران قطع شده و اپراتور تعمیرات مورد نظر را انجام دهد. در انجام تعمیرات میزان دز موجود در اتاق هدف ملاک اصلی برای وارد شدن به اتاق است.

در این تحقیق شار متوسط پروتون و نوترون بر اثر بمباران پروتونی در فرآیند تولید پرتوداروی مشخص، درون حجم دیوارها و خطوط جریان و تمامی موادی که در اتاق‌های هدف وجود دارند، با استفاده از روش مونت کارلو محاسبه می‌شوند سپس با توجه به زمان بمباران پروتونی، نیمه‌عمر عناصر و سطح مقطع متناسب با شار نوترونی و پروتونی، عناصر پرتوزای تولیدی شناسایی می‌شوند. با توجه به عناصر پرتوزای تولیدی دز معادل فردی تجمعی در موقعیت‌های خاصی از اتاق هدف محاسبه می‌شود. همچنین دز تجمعی فردی با استفاده از قرص‌های ترمولومینسانس GR-200A نیز اندازه‌گیری شده است که با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌شود.

برای تولید پرتوداروهای تالیوم- ۲۰۱، سیستم ژنراتور روبیدیوم- ۸۱ / کریپتون- ۸۱ و FDG با استفاده از روش مونت کارلو شدت نوترون تولیدی و پرتوزایی پرتوداروی تولیدشده مورد نظر به ترتیب مقادیر $(n/s) \times 10^{13} \times 1/93$ و $(Ci) 11/13$ ، $(n/s) \times 10^{11} \times 6/33$ و $(mCi) 39/04$ ، $(n/s) \times 10^{11} \times 5/6$ و $(mCi) 740$ محاسبه می‌شوند. در شرایط مشابه مقدار پرتوزایی محصولات مورد نظر به ترتیب $(Ci) 9/75$ ، $(mCi) 35/6$ و $(mCi) 600$ اندازه‌گیری می‌شوند. خطای نسبی بین نتایج بدست آمده از قرص‌های TLD و شبیه‌سازی مونت کارلو کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: دزیمتری، سیکلوترون، اتاق هدف، پرتودارو، تالیوم- ۲۰۱، روبیدیوم- ۸۱ / کریپتون- ۸۱

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آن‌ها
۱-۱-۱	مقدمه
۲-۱	شتاب‌دهنده های الکتروستاتیکی
۳-۱	شتاب‌دهنده های دوره‌ای
۱-۳-۱	شتاب‌دهنده خطی
۲-۳-۱	شتاب‌دهنده دوار
۴-۱	کاربرد شتاب‌دهنده‌ها
۱-۴-۱	کاربردهای پزشکی
۲-۴-۱	کاربردهای کشاورزی
۳-۴-۱	کاربردهای صنعتی
۵-۱	آشنایی با سیکلوترون پژوهشکده تحقیقات پزشکی هسته‌ای کرج
۱-۵-۱	شناسایی کلی سیستم شتاب‌دهنده کرج
۲-۵-۱	چشمه یونی و سیستم استخراج یون‌ها
۳-۵-۱	میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی
۴-۵-۱	سیستم شتاب‌دهی با فرکانس بالا
۵-۵-۱	میدان مغناطیسی سیکلوترون
۶-۵-۱	سیستم استخراجی پرتوها و هدایت آن به خطوط انتقال
۷-۵-۱	خطوط انتقال پرتو
۸-۵-۱	سیستم‌های تامین خلاء، خنک‌کننده، تامین فشار هوا
۹-۵-۱	سیستم کنترل و فرمان‌دهی
۶-۱	تولید ذرات ثانویه و اهمیت دزیمتری در تولید یک پرتودارو

فصل دوم: آشنایی با روش مونت کارلو

۱۹-۲-۱- روش مونت کارلو.....	۱۹
۱-۱-۲- مقدمه.....	۱۹
۲-۱-۲- مبانی روش مونت کارلو.....	۲۰
۳-۱-۲- ترابرد ذرات توسط روش مونت کارلو.....	۲۲
۴-۱-۲- آمار محاسبات مونت کارلو.....	۲۶
۵-۱-۲- دقت و درستی محاسبات مونت کارلو.....	۲۷
۶-۱-۲- روش‌های کاهش خطا.....	۲۸
۲-۲- آشنایی با کد MCNPX.....	۲۹
۱-۲-۲- مقدمه.....	۲۹
۲-۲-۲- تفاوت کد MCNPX با کد MCNP4c.....	۲۹
۳-۲-۲- زبان برنامه و کامپیوتر.....	۳۰
۵-۲-۲- سطح مقطع.....	۳۰
۶-۲-۲- واحدها در MCNPX.....	۳۱
۷-۲-۲- پرونده ورودی.....	۳۱
۸-۲-۲- کارت عنوان مسئله.....	۳۲
۹-۲-۲- هندسه کد.....	۳۳
۱۰-۲-۲- کارت معرفی سلول.....	۳۳
۱۱-۲-۲- کارت سطح.....	۳۴
۱۲-۲-۲- کارت‌های مربوط به هندسه‌های تکراری.....	۳۶
۱۳-۲-۲- کارت اطلاعات.....	۳۷
۱۴-۲-۲- کارت معرفی نوع مسئله.....	۳۷

عنوان	صفحه
کارت کاهش واریانس	۱۵-۲-۲-۳۸
کارت اهمیت سلول	۱۶-۲-۲-۳۸
کارت معرفی مواد	۱۷-۲-۲-۳۹
کارت معرفی چشمه	۱۸-۲-۲-۴۰
دستور SDEF	۱۹-۲-۲-۴۰
کارت Sln	۲۰-۲-۲-۴۱
کارت SPn	۲۱-۲-۲-۴۲
کارت درخواست	۲۲-۲-۲-۴۲
کارت درخواست Fna	۲۳-۲-۲-۴۳
کارت های درخواست نوع (۱ ، ۲ ، ۴ ، ۶ ، ۷)	۲۴-۲-۲-۴۴
کارت En	۲۵-۲-۲-۴۵
کارت های محاسبه دز	۲۶-۲-۲-۴۵
کارت های خاتمه دهنده (Cut off)	۲۷-۲-۲-۴۶
خاتمه دهنده تاریخچه یا NPS	۲۸-۲-۲-۴۶
خاتمه ترابرد با توجه به زمان سپری شده از کامپیوتر یا CTME	۲۹-۲-۲-۴۶
پیغام های خطا	۳۰-۲-۲-۴۶
تخمین خطا در محاسبات	۳۱-۲-۲-۴۷

فصل سوم: شبیه سازی اتاق های هدف، محاسبه و اندازه گیری دز فردی

اتاق هدف جامد	۱-۳-۴۹
مقدمه	۱-۱-۳-۴۹
محاسبه پرتو زایی سرب- ۲۰۱ تولیدی	۲-۱-۳-۵۰
طیف نوترون تولیدی حاصل از بمباران پروتونی هدف تالیومی	۳-۱-۳-۵۱

عنوان	صفحه
۳-۱-۴- محاسبه دز فردی پس از قطع بمباران پروتونی	۵۵
۳-۲- اتاق هدف گازی	۶۷
۳-۲-۱- مقدمه	۶۷
۳-۲-۲- محاسبه پرتوزایی ژنراتور Rb-81/Kr81-m در پایان بمباران	۶۷
۳-۲-۳- طیف نوترون و پروتون ساطع شده از مجموعه هدف بر اثر بمباران پروتونی	۷۰
۳-۲-۴- محاسبه دز فردی پس از قطع بمباران پروتونی	۷۱
۳-۳- اتاق هدف مایع	۷۶
۳-۳-۱- مقدمه	۷۶
۳-۳-۲- محاسبه پرتوزایی فلوتور-۱۸	۷۷
۳-۳-۳- طیف نوترون و پروتون ساطع شده از مجموعه هدف بر اثر بمباران پروتونی	۸۰
۳-۳-۴- محاسبه دز فردی پس از قطع بمباران پروتونی	۸۱
۳-۴- جمع‌آوری داده‌های تجربی و نتایج آنها	۸۵
۳-۴-۱- مقدمه	۸۵
۳-۴-۲- آنیل کردن قرص‌های ترمولومینسانس	۸۶
۳-۴-۳- تنظیم کردن قرص‌های ترمولومینسانس	۸۶
۳-۴-۴- اندازه‌گیری دز در اتاق هدف تالیوم	۸۷
۳-۴-۵- اندازه‌گیری دز در اتاق هدف کریپتون	۸۸

فصل چهارم: بحث، نتیجه‌گیری و افق‌های پیشرفت

۴-۱- مقدمه	۹۰
۴-۲- اتاق هدف تالیوم	۹۱
۴-۳- اتاق هدف کریپتون	۹۳
۴-۴- اتاق هدف FDG	۹۷

صفحه	عنوان
۱۰۲	۴-۵- افق‌های پیشرفت
۱۰۲	۴-۵-۱- ایمنی پرتوکاران
۱۰۲	۴-۵-۲- آماده‌کردن هدف
۱۰۲	۴-۵-۳- کد شبیه‌سازی
۱۰۳	۴-۵-۴- ارتقاء نتایج اندازه‌گیری شده
۱۰۳	پیوست
۱۱۲	منابع و موآخذ

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: شمایی از ساختار اصلی یک شتاب‌دهنده خطی [۴].....	۳
شکل ۲-۱: شمای کلی از شتاب‌گرفتن ذره‌ی باردار در یک شتاب‌دهنده دوار [۵].....	۴
شکل ۳-۱: دستگاه شتاب‌دهنده ذرات (سیکلوترون) موجود در پژوهشکده تحقیقات پزشکی هسته‌ای کرج [۱۵].....	۱۰
شکل ۴-۱: شمای کلی از اجزاء تشکیل‌دهنده شتاب‌دهنده سیکلوترون [۵].....	۱۲
شکل ۱-۳-۱: ابعاد هدف تالیوم (میلی‌متر).....	۵۰
شکل ۲-۳: ابعاد اتاق هدف تالیوم، موقعیت هدف و موقعیت قرار گرفتن فانتوم‌های معادل بدن که با شماره های ۴۲ تا ۵۴ نشان داده شده‌است (ابعاد بر حسب متر).....	۵۶
شکل ۳-۳: طیف شار میانگین نوترون درون حجم معادل قاب‌های اطراف هدف که معادل یک پوسته کروی به شعاع ۸ سانتی‌متر و ضخامت پوسته ۲/۵ سانتی‌متر است.....	۵۷
شکل ۴-۳: طیف شار میانگین نوترون درون لوله‌ی آلومینیومی مسیر حرکت پروتون (خط جریان) بر اثر بمباران پروتونی تالیوم-۲۰۳.....	۵۸
شکل ۵-۳: شار میانگین کلی نوترون درون حجم دیوارهای اتاق هدف تالیوم بر اثر بمباران پروتونی تالیوم-۲۰۳.....	۵۹
شکل ۶-۳: طیف شار میانگین نوترون درون حجم دیوارهای اتاق هدف تالیوم (شماره‌های روی نمودار، شماره دیوارهای اتاق هدف تالیوم می‌باشد که به طور کامل در بالا معرفی شده‌است).....	۶۰
شکل ۷-۳: ابعاد هدف گازی کریپتون (میلی‌متر).....	۶۷
شکل ۸-۳: طیف شار متوسط پروتون درون حجم هدف گازی کریپتون.....	۶۹
شکل ۹-۳: ابعاد اتاق هدف کریپتون، موقعیت هدف و موقعیت قرار گرفتن فانتوم‌های معادل بدن که با شماره‌های ۳۳ تا ۴۲ مشخص شده‌است (ابعاد بر حسب متر).....	۷۲
شکل ۱۰-۳: شار متوسط کلی نوترون درون حجم دیوارها بر اثر بمباران پروتونی هدف گازی کریپتون.....	۷۴
شکل ۱۱-۳: ابعاد هدف مایع برای بمباران آب خالص شده با اکسیژن-۱۸ (بر حسب میلی‌متر).....	۷۶
شکل ۱۲-۳: ابعاد اتاق هدف برای تولید FDG، موقعیت هدف و موقعیت قرار گرفتن فانتوم‌های معادل بدن که با شماره‌های ۳۶ تا ۴۲ مشخص شده‌است (ابعاد بر حسب متر).....	۸۲

- شکل ۳-۱۳: شار متوسط کلی نوترون درون حجم دیوارها بر اثر بمباران پروتونی آب برای تولید FDG..... ۸۳
- شکل ۳-۱۴: منحنی کالیبراسیون برای قرص‌های ترمولومینسانس. معادله خط و ضریب همبستگی آن (R^2) در نمودار آمده‌است..... ۸۷
- شکل ۳-۱۵: مقایسه اندازه‌گیری تجربی دز معادل فردی با مقادیر شبیه‌سازی در اتاق هدف تالیوم که با محدوده خطای نسبی ۵٪ مشخص شده‌است..... ۸۸
- شکل ۳-۱۶: مقایسه اندازه‌گیری تجربی دز معادل فردی با مقادیر شبیه‌سازی در اتاق هدف کریپتون که با محدوده خطای نسبی ۵٪ مشخص شده‌است..... ۸۹
- شکل ۴-۱: نتایج دزیمتری در حضور هدف تالیوم در اتاق هدف و در شرایطی که ۵۰ ساعت از قطع بمباران سپری شده‌باشد و در این حالت زمان بمباران پروتونی ۵ دقیقه باشد. موقعیت شماره‌های دزیمتر در شکل (۲-۳) نشان داده شده‌است..... ۹۱
- شکل ۴-۲: نتایج دزیمتری برای زمان‌های مختلف بمباران تالیوم پس از خارج کردن هدف از اتاق (موقعیت شماره‌های دزیمتر در شکل (۲-۳) نشان داده شده‌است و گروه‌های زمانی به صورت "زمان بمباران / زمان سپری شده پس از قطع بمباران" در شکل نشان داده شده‌است)..... ۹۲
- شکل ۴-۳: محاسبه زمان سپری شده لازم پس از قطع بمباران پروتونی به‌منظور دستیابی به نرخ دز کمتر از $25 \mu\text{Sv/h}$ بر حسب زمان بمباران پروتونی در حالتی که هدف تالیوم از اتاق خارج شده‌باشد (معادله خط و ضریب همبستگی آن (R^2) بر روی نمودار نشان داده شده‌است)..... ۹۳
- شکل ۴-۴: نتایج دزیمتری برای زمان‌های مختلف بمباران کریپتون و با حضور هدف در اتاق (موقعیت شماره‌های دزیمتر در شکل (۳-۹) نشان داده شده‌است و گروه‌های زمانی به صورت "زمان بمباران / زمان سپری شده پس از قطع بمباران" در شکل نشان داده شده‌است)..... ۹۴
- شکل ۴-۵: محاسبه زمان سپری شده لازم پس از قطع بمباران پروتونی به‌منظور دستیابی به نرخ دز کمتر از $25 \mu\text{Sv/h}$ بر حسب زمان بمباران پروتونی در حالت حضور هدف کریپتون در اتاق (معادله خط و ضریب همبستگی آن (R^2) بر روی نمودار نشان داده شده‌است)..... ۹۵
- شکل ۴-۶: نتایج دزیمتری برای زمان‌های مختلف بمباران کریپتون در حالتی که هدف گازی از اتاق خارج شده‌است (موقعیت شماره‌های دزیمتر در شکل (۳-۹) نشان داده شده‌است و گروه‌های زمانی به صورت "زمان بمباران / زمان سپری شده پس از قطع بمباران" در شکل نشان داده شده‌است)..... ۹۶

شکل ۴-۷: محاسبه زمان سپری شده لازم پس از قطع بمباران پروتونی به منظور دستیابی به نرخ دز کمتر از $25 \mu\text{Sv/h}$ بر حسب زمان بمباران پروتونی در حالتی که هدف کریبتون از اتاق خارج شده باشد (معادله خط و ضریب همبستگی آن (R^2) بر روی نمودار نشان داده شده است). ۹۷

شکل ۴-۸: نتایج دزیمتری برای زمان‌های مختلف بمباران هدف آب غنی شده در حالت حضور هدف مایع در اتاق (موقعیت شماره‌های دزیمتر در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است و گروه‌های زمانی به صورت "زمان بمباران / زمان سپری شده پس از قطع بمباران" در شکل نشان داده شده است). ۹۸

شکل ۴-۹: محاسبه زمان سپری شده لازم پس از قطع بمباران پروتونی به منظور دستیابی به نرخ دز کمتر از $25 \mu\text{Sv/h}$ بر حسب زمان بمباران پروتونی در حالت حضور هدف آب غنی شده در اتاق (معادله خط و ضریب همبستگی آن (R^2) بر روی نمودار نشان داده شده است). ۹۹

شکل ۴-۱۰: نتایج دزیمتری برای زمان‌های مختلف بمباران هدف آب غنی شده در حالتی که هدف مایع از اتاق خارج شده باشد (موقعیت شماره‌های دزیمتر در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است و گروه‌های زمانی به صورت "زمان بمباران / زمان سپری شده پس از قطع بمباران" در شکل نشان داده شده است). ۱۰۰

شکل ۴-۱۱: محاسبه زمان سپری شده لازم پس از قطع بمباران پروتونی به منظور دستیابی به نرخ دز کمتر از $25 \mu\text{Sv/h}$ بر حسب زمان بمباران پروتونی در حالتی که هدف مایع از اتاق خارج شده باشد (معادله خط و ضریب همبستگی آن (R^2) بر روی نمودار نشان داده شده است). ۱۰۱

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: پارامترهای لازم برای معرفی سطوح در MCNPX [۲۵].	۳۵
جدول ۲-۲: فهرستی از کارت‌های درخواست [۲۵].	۴۳
جدول ۳-۲: توصیف کارت‌های درخواست Fna [۲۵].	۴۴
جدول ۱-۳: محاسبه پرتوزایی سرب-۲۰۱ حاصل از بمباران پروتونی تالیوم-۲۰۳.	۵۲
جدول ۲-۳: طیف نوترون تولیدی حاصل از بمباران پروتونی هدف تالیوم.	۵۴
جدول ۳-۳: عناصر تشکیل‌دهنده دیوار معمولی با چگالی 2.35 gr/cm^3 [۲۸ و ۲۷].	۵۵
جدول ۴-۳: عناصر پرتوزا تولیدی در معادل قاب‌های اطراف هدف و خطوط جریان.	۶۴
جدول ۵-۳: عناصر پرتوزا تولیدی در دیوار شماره ۸.	۶۵
جدول ۶-۳: اجزاء تشکیل‌دهنده کره ICRU با چگالی 1 gr/cm^3 [۳۰ و ۲۹].	۶۶
جدول ۷-۳: نتایج دزیمتری برای حالت ۱ ساعت تعمیر در اتاق هدف تالیوم در شرایطی که از قطع بمباران ۴ روز گذشته باشد و طول کل زمان بمباران پروتونی نیز ۹/۶۳ ساعت باشد.	۶۶
جدول ۸-۳: فراوانی کریپتون طبیعی [۳۰].	۶۸
جدول ۹-۳: طیف شار نوترون و پروتون ساطع شده از مجموعه هدف گازی کریپتون بر اثر بمباران پروتونی ۷۰	۷۰
جدول ۱۰-۳: عناصر تشکیل‌دهنده استیل-۳۱۶ با چگالی 8 gr/cm^3 [۳۱].	۷۱
جدول ۱۱-۳: مقدار شار متوسط کلی نوترون و پروتون بر اثر بمباران پروتونی هدف گازی کریپتون، در حجم‌هایی که پروتون و نوترون وجود دارد.	۷۳
جدول ۱۲-۳: نتایج دزیمتری برای حالت ۱ ساعت تعمیر در اتاق هدف گازی کریپتون در شرایطی که از قطع بمباران ۳ روز گذشته باشد و طول کل زمان بمباران پروتونی نیز ۱ ساعت باشد.	۷۵
جدول ۱۳-۳: محاسبه پرتوزایی اولیه فلئور-۱۸ بر اثر بمباران پروتونی آب غنی‌شده.	۷۸
جدول ۱۴-۳: طیف شار نوترون و پروتون ساطع شده از مجموعه هدف آب غنی‌شده بر اثر بمباران پروتونی. ۸۱	۸۱
جدول ۱۵-۳: مقدار شار متوسط کلی نوترون و پروتون بر اثر بمباران پروتونی آب برای تولید FDG، در حجم‌هایی که پروتون و نوترون وجود دارد.	۸۳
جدول ۱۶-۳: نتایج دزیمتری برای حالت ۱ ساعت تعمیر در اتاق هدف FDG در شرایطی که از قطع بمباران ۱ روز گذشته باشد و طول کل زمان بمباران پروتونی نیز ۱/۵ ساعت باشد.	۸۴

فصل اول

شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آنها

۱-۱- مقدمه

آنچه ما از خواص ذرات زیرهسته‌ای و خود هسته می‌دانیم، از مطالعه واپاشی ذرات و هسته‌های ناپایدار و واکنش بین آنها به دست آمده است. این مطالعات اولین بار روی هسته‌های پرتوزا، با شناسایی ماهیت ذراتی که گسیل می‌کنند، و نیز اندازه‌گیری طیف انرژی آنها، صورت گرفت. ذرات آلفای گسیل شده از هسته‌های پرتوزا، توسط راترفورد و همکارانش، در بمباران پولک‌ها (هدف‌های نازک) از عناصر مختلف مورد استفاده قرار گرفت و معلوم شد این ذرات می‌توانند از موادی با ضخامت چندین هزار برابر قطر اتم عبور کنند. انحراف گاه به گاه این ذرات در زوایای بزرگ، مشاهده‌ای بود که منجر به کشف هسته اتم گردید. تحقیقات بیشتر، تجربه اولین واکنش هسته‌ای و کشف نوترون را به دنبال داشت. از اوایل سال‌های ۱۹۳۰ این حقیقت آشکار شد که، اگر بتوان چشمه‌ای که قادر باشد باریکه موازی و هم‌خط شده‌ای از ذرات، با شدتی به مراتب بیش از چشمه‌های پرتوزای طبیعی و یا تابش‌های کیهانی، و با ویژگی‌های مورد نظر آزمایش‌کنندگان (بار - جرم - انرژی - قطبش) فراهم نمود، می‌توان اطلاعات بسیار زیادتری به دست آورد. این موضوع منجر به توسعه شتاب‌دهنده‌های ذرات گردید. قبل از پرداختن به بررسی انواع شتاب‌دهنده‌ها، ملاحظاتی از مبانی فیزیکی شتاب‌دهنده‌ها را طرح می‌کنیم.

ذراتی که قرار است شتاب بگیرند باید باردار باشند و شتاب خود را در میدان الکتریکی به دست آورند. بسیاری از ذرات به منظور تولید باریکه پیوسته و یا بسته‌های ذرات با هم شتاب می‌گیرند و برحسب نیاز لازم است منحرف، کانونی و یا واکانونی شوند که در این مورد از میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. ذرات توسط چشمه‌ای تولید می‌شوند و به صورت موازی شده به ناحیه‌ای که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تاثیر گذارند تزریق می‌شوند و تا کسب انرژی مورد نیاز در آن ناحیه باقی می‌مانند. ما نمی‌خواهیم مادامی که ذرات در حال شتاب گرفتن هستند با ذرات دیگری برخورد کنند، به همین دلیل آنها در خلاء حرکت می‌کنند. همین که انرژی نهایی فراهم شد، ذرات برای برخورد به هدف ثابت مورد نظر، یا برخورد به باریکه دیگری از ذرات که از جهت مقابل شتاب گرفته‌اند، وارد عمل می‌شوند. در مورد اول ذرات غالباً از شتاب‌دهنده خارج شده، آن‌گاه در میدان مغناطیسی منحرف می‌شوند، که این خود امکان اندازه‌گیری دقیق انرژی آنها را هم فراهم می‌سازد. این ذرات سپس در کانال‌های مختلف، جایی که قرار است با هدف برخورد کنند، هدایت می‌شوند. این هدف به وسیله آشکارسازهایی احاطه شده است که فرآورده‌های برهم‌کنش به آنها برخورد کرده و طی فرآیند دیگری با تولید سیگنال الکتریکی اطلاعات مورد نیاز را فراهم می‌کند [۱، ۲].

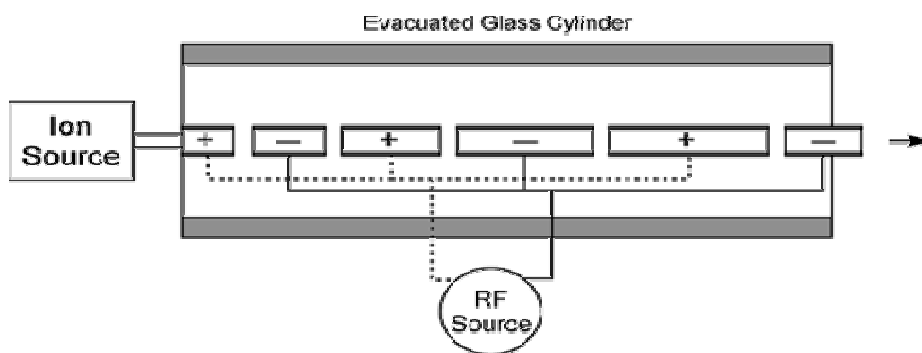
۱-۲- شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیکی

در این ماشین‌ها، ذرات به وسیله اختلاف پتانسیل ثابتی شتاب می‌گیرند. این شتاب‌دهنده‌ها در آزمایش‌های انرژی پایین به طور مؤثری کاربرد داشته و هنوز هم دارند. ذرات شتاب‌گرفتنی در یک لوله تخلیه که چند متری طول دارد حرکت می‌کنند. این ذرات از چشمه‌ای که در یکی از دو انتهای لوله قرار دارد تولید می‌شوند. چشمه می‌تواند در پتانسیل شتاب‌دهنده و یا پتانسیل زمین قرار گیرد. در انتهای دیگر لوله الکترودی نصب است که، بر حسب پتانسیل چشمه، در پتانسیل زمین یا پتانسیل شتاب‌دهنده می‌باشد. پتانسیل شتاب‌دهنده معمولاً به یکی از دو راه تامین می‌شود: مولد کوکرافت-والتون و مولد واندوگراف. شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیکی، توانایی تولید باریکه‌های با شدت خیلی زیاد که در بسیاری از کاربردها مفیدند را دارا می‌باشند. آنها گاهی به عنوان تزریق کننده در شتاب‌دهنده‌های پرتوان به کار می‌روند [۱، ۲، ۳].

۳-۱- شتاب‌دهنده های دوره‌ای^۱

۱-۳-۱- شتاب‌دهنده خطی^۲

در یک شتاب‌دهنده دوره‌ای، ذرات به دفعات زیاد روانه میدان الکتریکی شتاب‌دهنده می‌شوند و هر بار انرژی آن مقدار کمی افزایش می‌یابد. یک شتاب‌دهنده خطی، آن طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، از مجموعه‌ای لوله (الکترودها) متصل به یک نوسان ساز با بسامد بالا ساخته شده است. الکترودهای متوالی دارای قطبیت مخالف‌اند. وقتی یک ذره از درون یک لوله عبور می‌کند در معرض میدان الکتریکی قرار نمی‌گیرد، اما در فضای بین دو لوله تحت تاثیر میدان الکتریکی واقع می‌شود. و چنانچه قطبش این میدان به سمت راست باشد، ذره شتاب می‌گیرد. از آن جا که سرعت v ذره در خلال پیمودن شتاب‌دهنده افزایش می‌یابد، طول لوله‌ها باید تا زمانی که ذرات شتاب‌گیرنده فرانسیتی شوند، به طور پیوسته افزایش یابد. در وضعیت فرانسیتی $C \approx v$ شده و طول مورد نیاز لوله به مقدار ثابتی می‌رسد. در مورد الکترون‌ها این حالت بعد از پیمودن چند متر طول شتاب‌دهنده روی می‌دهد. در این مورد باید یا لوله‌های بسیار بلند و یا بسامدهای فوق العاده زیاد مورد استفاده قرار گیرد [۱، ۲، ۳].



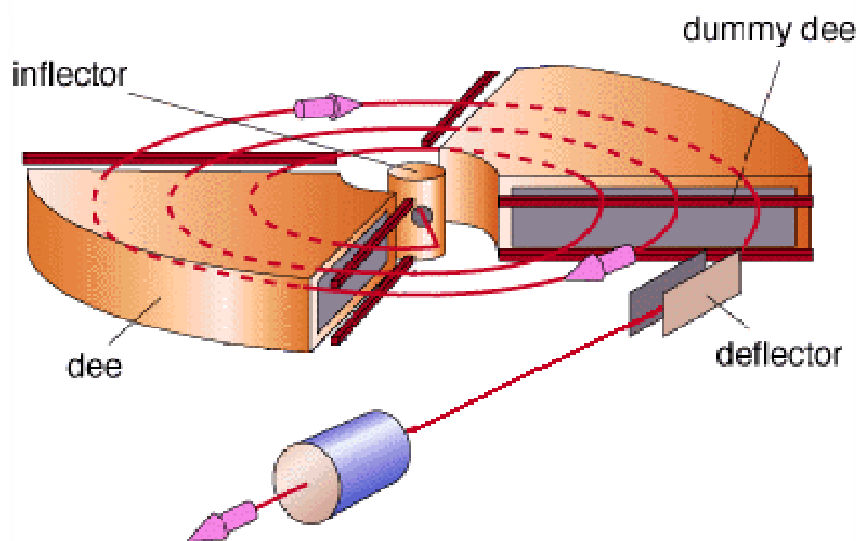
شکل ۱-۱: شمایی از ساختار اصلی یک شتاب‌دهنده خطی [۴].

^۱ - Periodic

^۲ - Linear Accelerator (LINAC) or Wideroe

۱-۳-۲- شتاب‌دهنده دوار^۱

در یک سیکلوترون ذراتی که باید شتاب بگیرند درون اتاقک خلائی مرکب از دو دی^۲ که بین دو قطب یک آهن‌ربا قرار دارند حرکت می‌کنند. آهن‌ربا میدان مغناطیسی یکنواخت را روی دی‌ها اعمال می‌کند. دی‌ها به یک مولد فرکانس رادیویی^۳ با بسامدی متصل شده‌اند. ذرات، از چشمه‌ای که در مرکز دی‌ها قرار دارد، با سرعت کمی، به درون شتاب‌دهنده تزریق می‌شوند. این ذرات با اختلاف پتانسیل فرکانس رادیویی در لحظاتی که از فضای بین دی‌ها می‌گذرند، شتاب می‌گیرند، سپس درون دی‌ها در مسیری دایره‌ای، که توسط میدان مغناطیسی فراهم می‌شود، با سرعتی ثابت حرکت می‌کنند. برای شتاب‌گیری پی‌در پی، لازم است یک ذره مدت زمانی برابر نصف پریود فرکانس رادیویی را درون هر دی سپری کند. موقعی که شعاع ذره به شعاع دی رسید، از شتاب‌دهنده خارج می‌شود. انواع دیگری از شتاب‌دهنده‌ها مانند بتاترون و سنکروسیکلوترون و سنکروترون و شتاب‌دهنده‌های برخوردی وجود دارند که توصیف آنها خارج از موضوع این رساله می‌باشد [۱, ۲, ۳].



شکل ۱-۲: شمای کلی از شتاب‌گرفتن ذره‌ی باردار در یک شتاب‌دهنده دوار [۵].

^۱ - Cyclotron

^۲ - Dee

^۳ - Radio Frequency Generator (RF generator)