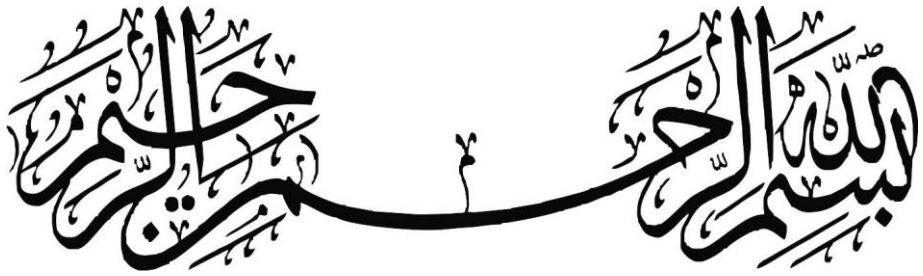

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

طراحی و شبیه‌سازی سیکلوترون‌های با انرژی زیر ۱۰MeV با استفاده از نرم افزار CST

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک، گرایش هسته‌ای

رشید امانی بابادی

استاد راهنما

دکتر سید ظفرالله کلانتری

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده‌ی فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک هسته‌ای آقای رشید امانی بابادی

تحت عنوان

طراحی و شبیه‌سازی سیکلوترون‌های با انرژی زیر ۱۰MeV
با استفاده از نرم افزار CST

در تاریخ ۹۲/۱۱/۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر سید ظفرالله کلانتری
۲- استاد مشاور پایان نامه	آقای سجاد محمودپور قمصر
۳- استاد داور	دکتر اکبر پروازیان
٤- استاد داور	دکتر مریم حسنوند
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مجتبی اعلایی

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

شکر و سپاس خداوند بلند مرتبه و مهربان را که در لحظه لحظه ی زندگی ام مرا به خود وانگذاشت که اگر چنین بود توان برداشتن قدمی را نداشتم و تلاش را در سخت ترین لحظات زندگی از من دریغ نداشت، براستی که تنها اوست دهنده ی بی منت.

در اینجا وظیفه ی خودم می دانم از استاد گرامی و بزرگوارم جناب آقای دکتر سید ظفرالله کلانتری تشکر و قدردانی بنمایم. بی شک راهنمایی های ایشان در مواجه با پیچیدگی ها و دلگرمی های ایشان در لحظه های دشوار باعث به ثمر نشستن این پروژه گردیده است.

همچنین لازم می دانم از آقای مهندس سجاد محمودپور قمصر که در لحظه لحظه ی مراحل پایان نامه پشتیبان و همراهم بودند تشکر و قدردانی نمایم.

از اساتید داور جناب آقای دکتر پروازیان و سرکار خانم دکتر حسنوند که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشته اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از خانواده ی مهربان و عزیزم، به ویژه از پدر و مادر گرامی ام برای پشتگرمی ها و دعای خیرشان که در ناامیدی ها تنها پناهگاهم بودند بسیار سپاسگزارم.

از همه ی دوستانم بزرگوارم، به ویژه از برادر عزیزم جناب آقای محمد نامی نظری که در تمام مدتی که با هم بودیم به من لطف داشتند و مرا در تمام امور یاری کردند، صمیمانه تشکر می کنم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

به پاس الطاف بیکرانش

تقدیم به

پیشگاه مقدس حضرت ولی عصر(عج)

و تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ تاریخچه ۲

۱-۲ اهداف اساسی ساخت شتاب‌دهنده‌ها ۵

۱-۲-۱ دادن انرژی بیشتر به ذرات باردار ۵

۱-۲-۲ تولید باریکه ذرات با شدت بیشتر ٦

۱-۳ مبانی فیزیک شتاب‌دهنده ٦

۱-٤ ویژگی‌های یک شتاب‌دهنده ۷

۱-٥ اجزای مشترک شتاب‌دهنده‌ها ..... .

۱-٦ موارد استفاده از شتاب‌دهنده‌ها ۷

۱-۷ جدول زمانی پیدایش و توسعه‌ی شتاب‌دهنده‌ها ۸

۱-۸ موضوع پایان‌نامه‌ی حاضر ۱۰

فصل دوم: معرفی انواع شتاب‌دهنده

۲-۱ شتاب‌دهنده‌ها ۱۱

۲-۲ شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی ۱۲

۲-۲-۱ تیوپ‌های اشعهX ۱۲

۲-۲-۲ شتاب‌دهنده الکترواستاتیک کوک کرافت-والتون ۱۳

۲-۲-۳ شتاب‌دهنده با مولد واندوگراف ۱٤

۲-۲-٤ شتاب‌دهنده خطی القایی ۱٦

۲-۲-٥ بتاترون ۱۹

۲-۳ شتاب‌دهنده‌های فرکانس رادیویی ۲۱

۲-۳-۱ شتاب‌دهنده‌های خطی ۲۲

۲-۳-۲ شتاب‌دهنده چهارقطبی رادیو فرکانسی (RFQ) ۲٥

۲-۳-۳ سیکلوترون ۲٦

۲-۳-٤ سینکروسیکلوترون ۲۷

۲-۳-٥ سیکلوترون ایزوکرونوس(متقارن) ۲۸

۲-۳-٦ میکروترون ۲۸

۲-۳-۷ رودوترون ۳۰

۲-۳-۸ سینکروترون ۳۱

فصل سوم: سیکلوترون

۳-۱ طرز کار سیکلوترون ۳۷
۳-۲ دینامیک عرضی ذرات ۳۹
۳-۳ اجزای سیکلوترون ۴۱
۳-۳-۱ سیستم الکترومگنت ۴۱
۳-۳-۲ چشمه‌ی یونی ۴۲
۳-۳-۳ محفظه‌ی خلاء ۴۲
۳-۳-۴ فرکانس رادیویی سیکلوترون ۴۳
۳-۳-۵ انحناء دهنده (دیفلکتور) ۴۵
۳-۳-۶ دی‌ها ۴۵
۳-۴ اثرات نسبیتی ۴۷
۳-۵ سختی باریکه‌ی یونی ۴۷

فصل چهارم: شبیه‌سازی میدان مغناطیسی سیکلوترون با استفاده از کد CST

۴-۱ اهمیت میدان مغناطیسی سیکلوترون ۴۹
۴-۲ محاسبه‌ی تحلیلی میدان مغناطیسی سیکلوترون ۵۰
۴-۳ آشنایی با نرم افزارCST و روش شبیه‌سازی در آن ۵۹
۴-۳-۱ برنامه CST EM STUDIO ۶۰
۴-۴ مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی(با نرم افزارCST) با نتایج تجربی ۶۲
۴-۵ بهینه‌سازی میدان مغناطیسی سیکلوترون در گاف ۶۳
۴-۵-۱ قاب ۶۳
۴-۵-۲ هسته ۶۸
۴-۵-۳ پیچه ۷۳
۴-۶ شبیه‌سازی میدان مغناطیسی در گاف ۷۷
۴-۷ محاسبه‌ی میدان مغناطیسی سیکلوترون در گاف به روش مدار مغناطیسی ۷۸
۴-۸ شبیه‌سازی حرکت ذرات ۸۲
۴-۹ ولتاژ دی‌ها، طول مسیر حرکت ذرات و برآورد فشار خلاء ۸۴
۴-۱۰ سیکلوترون‌هایی با انرژی بالاتر ۸۶
۴-۱۱ نتیجه‌گیری ۸۹
۴-۱۲ پیشنهادات ۹۰
مراجع ۹۱

چکیده

سیکلوترون یکی از انواع شتاب‌دهنده‌های رادیو فرکانسی به‌شمار می‌آید که در آن از میدان الکتریکی جهت شتاب دادن، و از میدان مغناطیسی جهت هدایت ذرات در مسیر دایره‌ای استفاده می‌شود. سیکلوترون معمولاً برای شتاب دادن به یون‌های با بار مثبت مورد استفاده قرار می‌گیرد. اجزای اصلی این شتاب‌دهنده‌ها شامل الکترومگنت، چشمه‌ی یونی، سیستم خلأ و سیستم فرکانس رادیویی هستند. هم اکنون در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان و با همکاری دانشکده‌ی فیزیک طرح ساخت یک سیکلوترون در حال انجام است. موضوع این پایان نامه به‌دست آوردن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای موثر در میدان مغناطیسی در راستای طراحی الکترومگنت این سیکلوترون با استفاده از نرم افزار CST و برآورد طول مسیر ذره و مقایسه‌ی آن با مسافت آزاد میانگین برای محاسبه‌ی فشار خلاء مورد نیاز در محفظه‌ی خلاء می‌باشد. با حل معادلات حرکت ذره، مسیر ذرات در صفحه X-Y رسم شد و مکانی که بیشترین تمرکز باریکه را داریم به‌دست آمد. سپس با استفاده از آن بهترین محل برای قرارگیری منحرف‌کننده باریکه مشخص شد. در ادامه شبیه‌سازی مگنت‌هایی برای سیکلوترون‌هایی با انرژی ۱MeV، ۲MeV، ۱۰MeV که در عمل کاربردهای مختلفی از جمله پزشکی و تولید رادیوایزوتوپ دارد، در دستور کار قرار گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای استخراج پارامترهای بهینه ارائه شد.

کلمات کلیدی:

۱- شتابگرها ۲- سیکلوترون ۳- الکترومگنت ٤- نرم افزار شبیه‌سازی CST

فصل اول
مقدمه

۱-۱ تاریخچه

در فیزیک این پرسش مطرح بوده که ساختار نهایی ماده چگونه است؟ یکی از راه‌های پاسخ دادن به این سوال این است که ذرات پر انرژی را به ماده‌ی مورد نظر بزنیم و یا به‌طور رو در رو با هم برخورد دهیم، تحلیل نتایج چنین برخوردهایی بهترین روش برای مطالعه‌ی ماهیت ذرات زیراتمی ماده است. رادرفورد[۱] در سال ۱۹۱۹ نشان داد که هسته نیتروژن را می‌توان توسط ذرات آلفای پر انرژی که به‌طور طبیعی از رادیوم و توریم رادیواکتیو گسیل می‌شدند بمباران کرده و تجزیه و تحلیل نمود. این ذرات آلفا که در بمباران هسته‌ها مورد استفاده قرارگرفت دارای انرژی بین۵ تا ۸ میلیون الکترون ولت بودند. رادرفورد اظهار امیدواری کرد به‌توان شتاب‌دهنده‌هایی ساخت که ذرات پرانرژی‌تری از ذرات آلفا تولید کرد. ۱۱ سال بعد همکار وی پروفسور چادویک به کشف نوترون نایل آمد. در سال ۱۹۳۲ ژولیو کوری[۲] با بهره‌گیری از نوترون‌های چادویک[۳] پرده از راز راز ساخت مصنوعی عنصر رادیواکتیو بردارد، و در سال ۱۹۳۳ نیز کشف پوزیترون توسط کارل اندرسون[۴] صورت گرفت که اکتشاف ذرات بنیادی دیگری را به‌دنبال داشت، این رخدادهای ارزنده دلیلی شد تا فیزیکدانان برای

---

[۱] Rutherford

[۲] Joliot Curie

[۳] Chadwick

[۴] Carl Anderson

تحقیق در قلمرو ذرات بنیادی نیازمند داشتن ذرات پر انرژی باشند که باعث اشتیاق آنها به ساخت و طراحی شتاب دهنده‌ها گردید[۱].

ساده‌ترین راه برای دست‌یابی به چنین ذرات پر انرژی این است که بگذاریم ذره تحت اختلاف پتانسیل V قرار گیرد تا انرژی جنبشی‌اش به اندازه‌ی qV، افزایش پیدا کند، یا به عبارت دیگر باید طول موج ذرات را کاهش دهیم. طیف وسیعی از فوتون‌ها می‌توانند ما را در مطالعه‌ی دنیای ملکول‌ها و اتم‌ها یاری دهند، زیرا در این محدوده به انرژی‌های چند الکترون ولت تا چند کیلو الکترون ولت نیاز داریم، ولی در دنیای هسته‌ها که به انرژی چند مگا الکترون ولت نیاز است باید از شتاب‌دهنده‌ها استفاده شود. به سادگی دیده می‌شود که هرچه بعدی که مورد کاوش است کوچکتر باشد، انرژی ذره‌ی کاوشگر باید بیشتر باشد.

طول موج دوبروی[۱] برای یک ذره با تکانه‌ی p عبارت است:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (۱-۱)$$

که در آن h ثابت پلانک[۲] است. در اکثر عبارات، طول موج کاهش یافته دوبروی را به کار خواهیم برد:

$$\lambda\!\!\!^{-} = \frac{\hbar}{p} \qquad (۲-۱)$$

همان‌طور که در اپتیک معلوم شده است، برای دیدن جزئیات ساختاری ابعاد d، طول موجی در حدود d یا کوچکتر از آن باید به کار بریم:

$$\lambda\!\!\!^{-} \le d \qquad (۳-۱)$$

بنابراین تکانه‌ی لازم، عبارت است از:

$$p \ge \frac{\hbar}{d} \qquad (٤-۱)$$

برای بررسی ابعاد کوچک، به تکانه‌های زیاد و در نتیجه به انرژی‌های زیاد احتیاج داریم. به عنوان مثال، فرض می کنیم d=۱fm و پروتون ذره‌ی جستجوگر مورد نظر باشد. خواهیم دید که در این حالت یک تقریب غیر نسبیتی مجاز است؛ بنابراین انرژی جنبشی پروتون‌ها برابر خواهد شد با:

$$E_k = \frac{P^2}{2m_p} = \frac{\hbar^2}{2m_p d^2} \qquad (۵-۱)$$

---

[۱] De Broglie's Wavelength

[۲] Plank constant

E_k و همچنین $m_p c^2$ = ۹۳۸ MeV دارای بعد انرژی‌اند. در نتیجه، انرژی جنبشی را در شکل جدید آن به صورت یک نسبت می‌نویسیم:

$$\frac{E_k}{m_p c^2} = \frac{1}{2d^2}\left(\frac{\hbar}{m_p c}\right)^2 \qquad (۶-۱)$$

کمیت داخل پرانتز، طول موج کامپتون برای پروتون است:

$$\lambda\!\!\!^{-}_p = \frac{\hbar}{m_p c} = 0.21 fm \qquad (۷-۱)$$

به‌طوری که انرژی جنبشی به صورت زیر داده می‌شود:

$$\frac{E_k}{m_p c^2} = \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda\!\!\!^{-}_p}{d}\right)^2 \qquad (۸-۱)$$

پس با توجه به رابطه‌ی بالا انرژی لازم برای بررسی ابعادی از مرتبه‌ی ۱fm، تقریبا برابر ۲۰MeV است. از آنجا که این انرژی جنبشی خیلی کمتر از انرژی سکون نوکلئون است، تقریب غیر نسبیتی موجه است. طبیعت، باریکه‌ی پروتون با چنین شدتی را به ما نمی‌دهد، بنابراین ناچاریم آنها را به‌طور مصنوعی تولید کنیم. (پرتوهای کیهانی حاوی ذراتی با انرژی خیلی بالاتر هستند، اما شدت آن‌ها آنقدر کم است که به ندرت می‌توان از آن‌ها به صورتی سازمان یافته استفاده کرد).

راه معمولی برای تولید یک باریکه از ذرات با انرژی زیاد آن است که ذرات باردار را در یک میدان الکتریکی شتاب دهیم. نیروی وارد بر ذره‌ای با بارالکتریکی q توسط یک میدان الکتریکی E برابراست با:

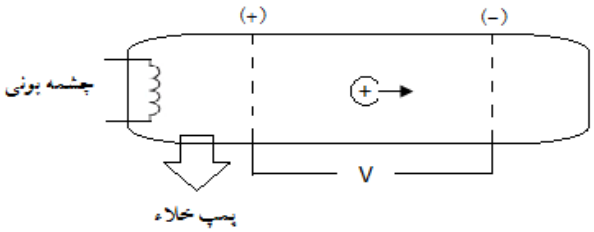
$$F = qE \qquad (۹-۱)$$

در ساده‌ترین شتاب‌دهنده(شکل ۱-۱) که شامل دو شبکه به فاصله ی d و به اختلاف پتانسیل V از یکدیگر است. شدت میدان متوسط عبارت است از:

$$E = \frac{V}{d} \qquad (۱۰-۱)$$

و انرژی کسب شده توسط ذره برابر است با:

$$W = Fd = qV \qquad (۱۱-۱)$$



شکل ۱-۱- شکل اولیه‌ی ساده‌ترین شتاب‌دهنده‌ی[۲].

واحد اندازه‌گیری انرژی در دنیای شتاب‌دهنده‌ها الکترون ولت است. یک الکترون ولت مقدار انرژیی است که اگر یک الکترون در اختلاف پتانسیل یک ولت قرار گیرد به آن میزان انرژی به‌دست می‌آورد. البته دستگاه باید در خلاء قرار بگیرد، در غیر این صورت ذرات شتاب‌دار با ملکول‌های هوا برخورد کرده و به تدریج مقدار زیادی از انرژی خود را از دست خواهند داد. همچنین یک چشمه‌ی یونی[۱] نیز برای تولید ذرات باردار مورد نیاز است.
حال سوالی که مطرح می‌شود این است که آیا می‌توان به کمک ماشین‌های ساده نظیر آنچه ترسیم شده است، به باریکه‌هایی از ذرات با انرژی‌هایی از مرتبه‌ی ۲۰MeV دست یافت؟ هرکس که با ولتاژهای زیاد کار کرده باشد می‌داند که انجام چنین کاری آسان نیست. در چند keV، این امکان وجود دارد که ولتاژ به‌طور ناگهانی سقوط کند و برای فرا رفتن از حتی ۱۰۰keV، تجربه‌ی کافی لازم است. در حقیقت، نبوغ و تلاش قابل ملاحظه‌ای به کار گرفته شده است تا مولدهای الکترواستاتیکی به جایی برسند که بتوانند ذراتی با انرژی حدود ۱۰MeV تولید کنند. با این همه، هرچقدرهم که مولد الکترواستاتیکی پیشرفته باشد، دستیابی به انرژی‌هایی که چند مرتبه‌ی بزرگی بالاتر باشند، غیر ممکن است. برای رسیدن به این هدف ایده‌ی جدیدی لازم بود، و آن ایده این بود: اعمال پی در پی یک ولتاژ معین بر یک ذره. در واقع، در راه رسیدن به شتاب‌دهنده‌های بزرگ امروزی، چندین بار تصور می‌شد که به حداکثر انرژی شتاب‌دهنده‌ها دست یافته‌اند. با وجود این، هر نوع مشکلی که به ظاهر لاینحل به نظر می رسید، به کمک یک روش جدید و مبتکرانه برطرف می‌شد[۱].

۱-۲ اهداف اساسی ساخت شتاب‌دهنده‌ها

۱-۲-۱ دادن انرژی بیشتر به ذرات باردار

باتوجه به اینکه ذرات ساطع شده از عناصر رادیواکتیو[۲] از انرژی‌هایی از مرتبه‌ی چند MeV تجاوز نمی‌کرد، و دانشمندان به دنبال تحقیق در قلمرو فیزیک هسته‌ای و فیزیک انرژی بالا به‌ویژه برای تولید جفت ذره و

[۱] Ion source

[۲] Radioactive elements

پاد ذره بودند، سبب شد تا تلاش‌هایی در زمینه‌ی ساخت و طراحی شتاب‌دهنده‌ها انجام دهند، که تلاش‌ها در این زمینه با ساخت مولدهای الکتروستاتیک چند میلیون ولتی در سال ۱۹۳۱ آغاز شد و به اختراع سینکروترون پروتون[۱] با انرژی ۲۵۰ میلیون ولت در سال ۱۹۶۰ انجامید[۱].

۱-۲-۲ تولید باریکه ذرات با شدت بیشتر

دستیابی به ذرات با شدت زیاد در اغلب واکنش‌های هسته‌ای مورد نیاز است. این در حالی است که یک گرم رادیوم تعداد 3.7×10^{10} ذره‌ی آلفا در واحد زاویه‌ی فضایی می‌دهد که استفاده از آن‌ها در راستای معین ناگزیر تعداد آن‌ها را به 10^{8} ذره در سانتی‌متر مربع از هدف کاهش می‌دهد. در صورتی که یک وان‌دوگراف[۲] معمولی به آسانی می‌تواند دسته ذرات کانونی شده از پروتون‌ها را با شدت 10^{12} ذره در سانتی‌متر مربع هدف فراهم کند[۱].

۱-۳ مبانی فیزیک شتاب‌دهنده

ذراتی که قرار است شتاب بگیرند باید باردار باشند و شتاب خود را در میدان الکتریکی به‌دست آورند بسیاری از ذرات به‌منظور تولید باریکه پیوسته و یا به صورت بسته‌های ذرات با هم شتاب می‌گیرند و بر حسب 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 که فشار آن در بعضی از شتاب‌دهنده‌ها به حدود $10^{-6}mmHg$ می‌رسد، حتی در بسیاری از شتاب‌دهنده‌های پیشرفته میزان این خلاء ممکن است تا میلیون‌ها مرتبه بیشتر هم باشد. 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 اندازه‌گیری دقیق انرژی آنها را فراهم می‌سازد. این ذرات سپس در کانال‌های مختلف جایی که قرار است به هدف برخورد کنند، هدایت می‌شوند. این هدف به‌وسیله آشکارسازهایی[۳] احاطه شده است، که فرآورده‌های برهم کنش به آنها برخورد کرده و طی فرآیند دیگری با تولید سیگنال الکتریکی اطلاعات مورد نیاز

---

[۱] Synchrotron

[۲] Van De Graff

[۳] Detector

را فراهم می‌کند. در مورد دوم می‌توان از شتاب‌دهنده‌ی LHC[1] نام برد، که با استفاده از ذرات تولید شده در آن به بررسی ساختار نهایی ذرات می‌پردازند.

۱-٤ ویژگی‌های یک شتاب‌دهنده

ذرات شتاب گرفته در یک شتاب‌دهنده دارای ویژگی‌هایی هستندکه این ویژگی‌ها را می‌توان به‌عنوان ویژگی‌های آن شتاب‌دهنده برشمرد. از جمله‌ی این ویژگی‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پیوسته یا پالسی بودن باریکه ذرات تولید شده
- نوع ذرات شتاب گیرنده
- بیشینه انرژی ذرات
- شدت باریکه ذرات

۱-۵ اجزای مشترک شتاب‌دهنده‌ها

شتاب‌دهنده‌ها از اجزای مختلفی ساخته شده‌اند. بعضی از این اجزا در همه‌ی شتاب‌دهنده‌ها مشترک است که عبارتند از:

- چشمه یون
- اپتیک باریکه
- خلاء

۱-٦ موارد استفاده از شتاب‌دهنده‌ها

با پیشرفت شتاب‌دهنده‌ها، امروزه شاهد آن هستیم که ذرات باردار در این ماشین‌ها در ترکیبی از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تا نزدیکی‌های سرعت نور شتاب می‌گیرند و به همین دلیل کاربردهای آنها

[1] Large Hadron Collider

طیف بسیار گسترده‌ای را شامل می‌شود. حجم و ابعاد شتاب‌دهنده‌ها از حدود چند سانتی‌متر تا انـدازه‌هـایی حـدود چندین کیلومتر می‌رسد، با کاربردهایی همچون[۲]:

- درک ساختار ذراتی که طبیعت را به‌وجود آورده‌اند.
- شناخت قوانین حاکم بر آنها (حوزه فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی).
- شناخت ساختار مواد و خصوصیات آنها (حوزه فیزیک حالت جامد و متالوژی).
- درمان‌های پزشکی بخصوص تومورهای سرطانی.
- تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی.
- استریلیزه کردن مواد مختلف.
- کاشت یونی جهت بهبود خواص سطحی مواد.
- تبدیل پسماندهای هسته‌ای.
- تولید انرژی، با روش‌های ایمن‌تر در رآکتورهای زیر بحرانی.
- استفاده از پرتو ایکس حاصل از سیکلوترون[۱] در اپتیک.

۱-۷ جدول زمانی پیدایش و توسعه‌ی شتاب‌دهنده‌ها

مهمترین پیشرفت‌ها و رخدادهای علمی مربوط به شتاب‌دهنده‌ها در ذیل آورده شده است[۲]:

۱۸۹۵: کشف اشعه ایکس توسط رونتگن[۲].

۱۸۹۷: کشف الکترون توسط تامسون[۳].

۱۹۰۵: نظریه نسبیت انیشتین[٤].

۱۹۰۷: توسعه‌ی نظریه‌ی تابش سنکروترونی توسط اسکات[٥].

---

[۱] Cyclotron

[۲] Roentgen

[۳] Thomson

[٤] Enstein

[٥] Schott

۱۹۱۱: کشف هسته‌ی اتم توسط رادرفورد با استفاده از ذرات آلفا.

۱۹۲۰: ساخت اولین مبدل آبشاری ۱۰۰ کیلو ولتی توسط گریناخر[۱].

۱۹۲٤: مفاهیم اولیه‌ی شتاب دادن توسط قرار گرفتن ذره در اختلاف پتانسیل‌های متعدد بری اولین بار توسط آیزینگ[۲] پیشنهاد شد.

۱۹۲۷: رولف ویدرو[۳] اولین شتاب‌دهنده‌ی خطی را ساخت، یون‌های سدیم و پتاسیم شتاب داده شدند.

۱۹۲۸: دیراک[٤] پیش‌بینی کرد که پادماده نیز وجود دارد (پوزیترون).

۱۹۳۱: واندوگراف اولین مولد ولتاژ بالا را ساخت.

۱۹۳۲: کاکروفت و والتون[٥] اولین شتاب‌دهنده‌ی انرژی بالا را ساختند که به‌وسیله ی آن اولین واکنش هسته‌ای غیر طبیعی $P + Li \rightarrow 2He$ انجام شد.

۱۹۳۲: لورنس و لیوینگستون[٦] اولین شتاب‌دهنده‌ی سیکلوترونی که قادر بود پروتون‌ها را تا انرژی۱/۲ مگا الکترون ولت شتاب دهد، ساختند.

۱۹۳۲: کشف پوزیترون و نوترون.

۱۹٤۱: کرست و سربر[۷] اولین بتاترون را ساختند.

۱۹٤۱: توسکچ[۸] و ویدرو مفهوم حلقه انبارش را برای اولین بار مطرح کردند.

۱۹٤۳: اولیفنت[۹] مفهوم سینکروترون را مطرح کرد.

۱۹٤۷: مشاهده اولین تابش سینکروترونی در شرکت جنرال الکتریک[۱۰] .

۱۹٤۷: آلوارز اولین شتاب‌دهنده خطی پروتونی را ساخت.

۱۹٤۷: ادوارد گینزتن[۱۱] موفق به ساخت اولین شتاب‌دهنده خطی الکترونی شد.

---

[۱] Greinacher

[۲] Ising

[۳] Wideroe

[٤] Dirac

[٥] Cockcroft & Walton

[٦] Lawrence & Livingston

[۷] Kerst & Serber

[۸] Touschek

[۹] Oliphant

[۱۰] General Electric

[۱۱] Ginzton

۱۹۵۰-۱۹۵۲: مفهوم اثر کانونی قوی ابداع شد.

۱۹۵٤: ویلسون[۱] و دیگران اولین سینکروترون اثر کانونی قوی را در کرنل[۲] ساختند.

۱۹۵٦: هارتمن[۳] از تابش سینکروترونی برای آزمایش‌های اسپکتروسکوپی استفاده کرد.

۱۹٦۰ : ساخت اولین شتاب‌دهنده‌ی برخوردی الکترون - پوزیترون، ADA ، در فراسکاتی .

۱۹۷۲: ساخت اولین شتاب‌دهنده‌ی برخوردی پروتون -پروتون، ISR، در مرکز تحقیقات سرن.

۱۹۸۱: ساخت اولین برخورد دهنده‌ی پروتون - پادپروتون، SPS ، در مرکز تحقیقات سرن.

۱-۸ موضوع پایان نامه‌ی حاضر

در حال حاضر تنها سیکلوترون موجود در کشور، سیکلوترون وارداتی ساخت کشور بلژیک است که در مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج قرار دارد و می‌تواند پروتون‌ها را تا MeV ۳۰ شتاب دهد. بومی سازی ساخت این شتاب‌دهنده علاوه بر به دست آوردن فناوری ساخت آن می‌تواند زمینه‌ای برای استفاده ازکاربردهای ارزشمند این ماشین باشد . با توجه به جنبه‌های کاربردی این نوع شتاب‌دهنده، از سال۱۳۸۷ طرح ساخت شتاب‌دهنده سیکلوترونی در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان با همکاری دانشکده فیزیک در حال انجام است.

موضوع این پایان‌نامه در راستای شبیه‌سازی مگنت سیکلوترون۷ اینچی موجود و طراحی و شبیه‌سازی سیکلوترون‌هایی با انرژی۱MeV،۲MeV،۱۰MeV، می‌باشد ، همچنین شبیه‌سازی حرکت ذره در سیکلوترون و برآورد اندازه‌ی فشار محفظه‌ی خلا و محل قرارگیری منحرف کننده، در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه‌ی این پایان‌نامه و در فصل دوم به معرفی انواع مختلف شتاب‌دهنده‌ها، و در فصل سوم به بررسی کلی سیکلوترون پرداخته‌ایم. در فصل چهارم نتایج طراحی‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده را آورده‌ایم و در انتها مروری بر نتایج داشتیم و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی این پروژه معرفی کرده‌ایم.

---

[۱] Wilson

[۲] Cornell

[۳] Hartman

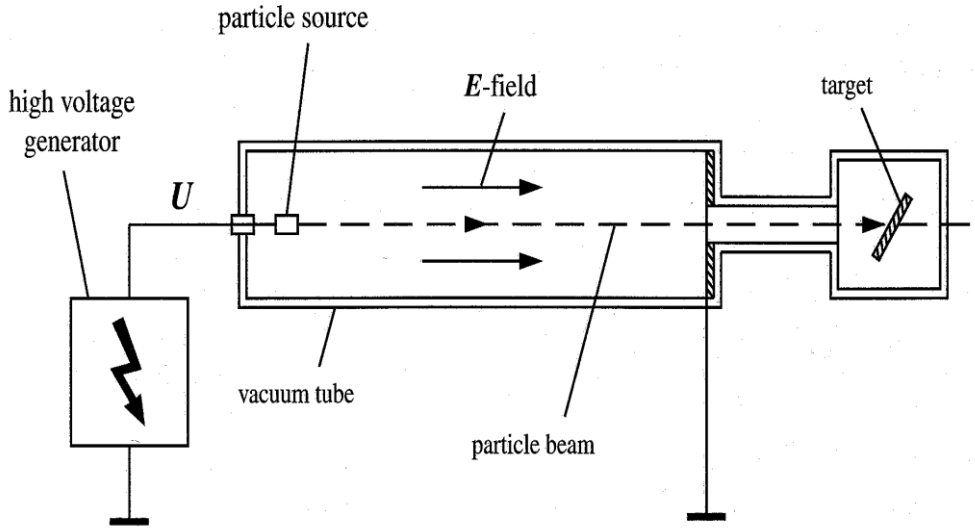
فصل دوم
انواع شتاب‌دهنده

۲-۱ شتاب‌دهنده‌ها

شتاب‌دهنده‌های ذرات دارای انواع مختلفی هستند که از چند منظر مختلف می‌توان آنها را تقسیم‌بندی نمود. نگاه اول نسبت به انواع مختلف شتاب‌دهنده‌های ذرات می‌تواند بر اساس تقسیم‌بندی نوعی آنها باشد، به عنوان مثال ما می‌توانیم شتاب‌دهنده‌های ذرات را به دو دسته اصلی شتاب‌دهنده‌های طبیعی(عناصر رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی) و شتاب‌دهنده‌های ساخته دست بشر تقسیم‌بندی کنیم. که شتاب‌دهنده‌های ساخته دست بشر نیز خود دارای انواع مختلفی می‌باشند. این شتاب‌دهنده‌ها را می‌توان از منظر انرژی باریکه‌ی خروجی از آنها به شتاب‌دهنده‌های انرژی پایین، انرژی متوسط یا انرژی بالا و یا از منظر تکنولوژی‌های به‌کار رفته در آنها تقسیم‌بندی نمود. اولین شتاب‌دهنده‌های ذرات بر اساس اصول الکتروستاتیکی کار می‌کردند. با ورود میدان مغناطیسی به عرصه شتاب‌دهنده‌های ذرات، این سیستم‌ها وارد حوزه تازه‌ای شدند و شتاب‌دهنده‌های دایره‌ای در عرصه تکنولوژی ظهور یافتند. اعمال قوانین جدید فیزیک از قبیل قوانین نسبیت و غیره موجب تحولات شگرفی در شتاب‌دهنده‌های ذرات شد. منظر دیگر برای تقسیم‌بندی شتاب‌دهنده‌های ذرات تحول تاریخی آنها و چگونگی ورود تکنولوژی‌های مختلف به حوزه شتاب‌دهنده می‌باشد. ما در اینجا شتاب‌دهنده‌ها را از منظر تکنولوژی به‌کار رفته در آنها تقسیم و بررسی کرده‌ایم[۱].

۲-۲ شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی

ساده‌ترین راه شتاب دادن به ذره باردار، قرار دادن آن در یک اختلاف پتانسیل ثابت است. هرگاه ذره باردار با بار q درپتانسیل V قرار گیرد انرژی جنبشی qV را به‌دست می‌آورد(شکل ۲-۱). بزرگ‌ترین اختلاف پتانسیلی را که می‌توان در شرایط شتاب‌دهنده ایجاد کرد در حدود $10^7 V$ است، و لذا یون‌ها انرژی‌ای در حدود ۱۰MeV ، به ازای واحد بار کسب می‌کنند. این درست انرژی ایست که برای بسیاری از مطالعات ساختار هسته‌ای مورد نیاز است و بنابراین، این نوع شتاب‌دهنده در آزمایشگاه‌های فیزیک هسته‌ای سراسر جهان، کاربرد وسیعی دارد. تکنولوژی شتاب‌دهنده الکتروستاتیکی شامل برقراری و نگهداری یک پایانه ولتاژ بالا به‌منظور شتاب‌دادن به ذرات باردار حاصل از چشمه یون است.



شکل ۲-۱- شکل اولیه‌ی شتاب‌دهنده‌ی الکتروستایکی[۵].

۲-۲-۱ تیوپ‌های اشعه x

تیوپ اشعه x، تیوپ خلائی است که، اشعه x تولید می‌کند. تیوپ اشعه x دارای یک گسیلنده از قبیل یک فیلمان یا کاتد که الکترون‌ها را به درون خلاء گسیل می‌دهد و یک آند که الکترون‌ها را جمع آوری می‌کند، می باشد. منبع توان ولتاژ بالا، برای مثال ۳۰ تا ۵۰ کیلو ولت، به دو سر کاتد و آند متصل می‌شود. الکترون‌های کنده شده ازکاتد با آند برخورد می‌کنند. تیوپ‌های اشعه x اولین شتاب‌دهنده‌های ساخته شده دست بشر می‌باشند. به‌طور تاریخی اولین تیوپ اشعه x به‌وسیله ویلیام دیوید کالیدج[۱] در سال ۱۹۱۳ ساخته شد. این تیوپ برای ایجاد فلورسانس مرئی برای تاباندن به کانی مورد استفاده قرار می‌گرفت. شکل ۲-۲- تیوپ اشعه‌ی را نشان می‌دهد، که در آن W_{in} W_{out} به ترتیب ورودی و خروجی خنک کننده‌ی آند هستند. ویلیام دیوید کالیدج در سال ۱۹۲۶ با

[۱] David Coolidge