

ارزیابی عملکرد اولین سیکلوترون بیمارستانی نصب شده در بیمارستان دکتر مسیح دانشوری جهت تولید رادیوایزوتوپ‌های پوزیترون زا

پردیس غفاریان^۱، سیده معصومه خامسی^۲ و محمدرسا گلرخ نودهی^۱

۱. مرکز تحقیقات بیماری‌های مزمن تنفسی، پژوهشکده سل و بیماری‌های ریوی، مرکز آموزشی، پژوهشی و درمانی سل و بیماری‌های ریوی بیمارستان دکتر مسیح دانشوری، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی - درمانی شهید بهشتی
۲. بخش پت سی تی و سیکلوترون بیمارستان دکتر مسیح دانشوری، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی - درمانی شهید بهشتی

پست الکترونیکی: pardis.ghafarian@sbmu.ac.ir

چکیده

اولین سیکلوترون بیمارستانی حفاظدار با مدل GE PET Trace ۷۰۰ در بیمارستان دکتر مسیح دانشوری در سال ۱۳۹۱ نصب گردید. از آنجائی که انجام آزمون‌های پذیرش پس از نصب دستگاه به منظور مقایسه کارایی سیستم با ادعاهای شرکت سازنده لازم الاجرا می‌باشد آزمون‌های فوق‌الذکر انجام شد و آهنگ تولید گاما و نوترون در حین بمباران به منظور تولید فلورین ۱۸ و نیتروژن ۱۳ در بونکر سیکلوترون به عنوان تابعی از فاصله و در جریان‌های هدف کاربردی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق مشاهده شد که مقدار فعالیت رادیوکتیو تولیدی بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد شرکت سازنده ۲۸۵۸/۳۲، ۱۳۸/۱۵ و ۱۰۴۷/۵ میلی کوری به ترتیب برای فلورین ۱۸، نیتروژن ۱۳ و کربن ۱۱ می‌باشد که بالاتر از گزارش‌های ارائه شده توسط کارخانه سازنده می‌باشد و مشخص گردید که در فاصله یک متری از کابینت پشتیبان هدف در جریان ۳۵ میکروآمپر روی هدف فلورین ۱۸، آهنگ تولید نوترون ۱۳/۸ میکروسیورت بر ساعت می‌باشد و با افزایش فاصله از ۰/۵ به ۲/۵ متر در مجاورت اتصال دو درب سیکلوترون در جریان هدف ۳۵ میکروآمپر به منظور تولید نیتروژن ۱۳ آهنگ تولید گاما از ۸/۶ به ۲ میکروسیورت بر ساعت کاهش می‌یابد. این مطالعه نشان داد که آهنگ تولید دوز در این نوع سیکلوترون به علت حفاظ دار بودن در طی بمباران بالا نیست.

واژه‌های کلیدی: آزمون پذیرش، سیکلوترون، آهنگ تولید دوز نوترون، آهنگ تولید دوز گاما، فلورین ۱۸، نیتروژن ۱۳

۱. مقدمه

پزشکی به دهه ۱۹۵۰ با کشف تالیم ۲۰۱ رونق گرفت [۱]. در نیمه دهه ۱۹۷۰ با معرفی سیستم پت، تولید رادیوایزوتوپ فلورین ۱۸ که مبنای تولید رادیوداروی ^{۱۸}F-FDG می‌باشد به منظور مطالعه متابولیسم گلوکز مورد بررسی قرار گرفت [۱].

با ساخت سیکلوترون در دهه ۱۹۳۰، تولید رادیوایزوتوپ‌ها در پزشکی، صنعت، کشاورزی و تحقیقات آغاز گردید [۱]. اما تولید رادیوایزوتوپ‌ها در سیکلوترون به منظور استفاده

با رونق گرفتن تصویربرداری ملکولی با استفاده از دوربین پت از سال ۱۹۹۳، تولید رادیوایزوتوپ‌های ایجاد شده در سیکلوترون وسعت یافت [۲] و به تبع آن پیشرفت در تکنیک‌های طراحی هدف در سیکلوترون‌ها در جهت تولید بیشتر و تولید رادیوایزوتوپ‌های متنوع صورت گرفت [۳]. در سیکلوترون‌های بیمارستانی معمولاً تولید رادیوایزوتوپ‌های متداول در تصویربرداری پت سی تی مانند فلورین-۱۸، نیتروژن-۱۳، اکسیژن-۱۵ و کربن-۱۱ مورد توجه قرار دارد که از شتاب دادن پروتون در محدوده انرژی ۱۹-۱۰ MeV حاصل می‌شود [۱]. بیمارستان دکتر مسیح دانشوری در تابستان ۱۳۹۱ به عنوان اولین مرکز سیکلوترون بیمارستانی به تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد نیاز در تصویربرداری پت سی تی (فلورین-۱۸، نیتروژن-۱۳، اکسیژن-۱۵ و کربن-۱۱) اقدام نمود. از مزایای این سیکلوترون، حفاظ دار^۱ بودن آن و تولید درون هدفی $^{13}\text{N-NH}_3$ می‌باشد. پس از نصب مکانیکی دستگاه سیکلوترون، تنظیمات الکترونیکی مربوطه به منظور رسیدن به شرایط کاری مناسب توسط مهندسان انجام گرفت، اما در این مرحله عملکرد سیکلوترون از لحاظ صحت و دقت در کارکرد آن به منظور تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد نظر باید مورد بررسی قرار گیرد. برای رسیدن به قطعیت مورد نظر آزمون‌های پذیرش دستگاه سیکلوترون در مورد عملکرد سیستم توسط متخصص فیزیک بخش سیکلوترون بیمارستان دکتر مسیح دانشوری انجام گرفت. حفاظ دار بودن سیکلوترون باعث کاهش سطح کل پرتوها در اتاق سیکلوترون می‌گردد. در عین حال این حفاظ می‌تواند مانند لانه‌ای برای واپاشی گازهای رادیواکتیو تولید شده در هنگام بمباران باشد. توجه به این نکته حائز اهمیت می‌باشد که با وجود اینکه در حین بمباران ورود افراد به بونکر^۲ ضروری به نظر نمی‌رسد اما در بعضی از مواقع به علت رخداد بعضی از اتفاقات در حین بمباران که به کاهش تولید و یا قطع آن می‌انجامد با توجه به رعایت اصل ALARA^۳ لزوم وارد شدن افراد در بونکر

۱. Self Shield

۲. Bunker

۳. As Low As Reasonably Achievable

سیکلوترون حتمی می‌باشد. لذا هدف از این تحقیق انجام آزمون‌های پذیرش دستگاه سیکلوترون می‌باشد که در نهایت نتایج مشاهده شده در این آزمون با نتایج به دست آمده از کارخانه سازنده مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا عملکرد سیکلوترون از لحاظ صحت در کارکرد مورد ارزیابی قرار گیرد. در عین حال بررسی مقدار آهنگ دوز نوترون و گامای موجود در بونکر سیکلوترون در فواصل مختلف از دستگاه سیکلوترون و در جریان‌های متداول کاربردی به منظور تولید فلورین ۱۸ و $^{13}\text{N-NH}_3$ در حین بمباران اندازه‌گیری می‌شود.

۲. تجهیزات

۲.۱. سیکلوترون (PET Trace ۷۰۰) MINITrace

سیکلوترون (PET Trace ۷۰۰) از نوع سیکلوترون‌های ایزوکرونوس با انرژی ثابت است که می‌تواند یون‌های هیدروژن باردار منفی (H^-) را تا انرژی ۹٫۶ MeV در میان صفحات دی شکل که به صورت عمودی قرار گرفته‌اند، شتاب دهد و بیشینه جریان پرتو اصابت شده به هدف را به $50 \mu\text{A}$ برساند. مزیت تکنولوژی یون منفی، افزایش بازده استخراج با کمیته تولید رادیواکتیویته داخلی در سیکلوترون می‌باشد. سیکلوترون بیمارستان مسیح دانشوری به وسیله یک سامانه فرمان که تحت سیستم عامل لینوکس کار می‌کند هدایت می‌شود و مجهز به ظرفیت بالا به منظور ثبت تمامی وقایع با ذکر تمامی جزئیات می‌باشد که می‌تواند تمامی اصول GMP^۴ را رعایت نماید [۴]. در ادامه مشخصات قسمت‌های مختلف سیکلوترون ارائه می‌شود.

۲.۲. سامانه مغناطیسی و سامانه رادیوفرکانسی

سامانه مغناطیسی سیکلوترون بیمارستان دکتر مسیح دانشوری شامل مگنت با سیم پیچ و یک منبع تغذیه برای آن می‌باشد که باعث تولید میدان مغناطیسی پایدار در یک زمان کوتاه می‌شود. میدان مغناطیسی در سیکلوترون باعث حرکت ذرات باردار شتاب‌دار در مسیر دایره‌ای و شکل دهی پلاسما در چشمه

۴. Good Manufacturing Practice

جدول ۱. مشخصات و نحوه تولید رادیوایزوتوپ‌ها در سیکلوترون PET Trace ۷۰۰.

| ماده هدف | واکنش هسته‌ای | نیمه عمر | رادیوایزوتوپ |
|---|---------------------------|----------|--------------|
| (دیونیزه‌غنی شده ۹۸%-۹۵%) $H_7^{18}O$ | $^{18}O(p, n)^{18}F$ | ۱۱۰ min | فلورین-۱۸ |
| (گاز متان با فشار بالا) $H_7^{16}O$ دیونیزه | $^{16}O(p, \alpha)^{13}N$ | ۱۰ min | نیتروژن-۱۳ |
| $^{14}N_7 + 1\% \ ^{16}O_7$ | $^{14}N(p, \alpha)^{11}C$ | ۲۰ min | کربن-۱۱ |
| $^{15}N_7 + 1\% \ ^{16}O_7$ غنی شده | $^{15}N(p, n)^{15}O$ | ۲ min | اکسیژن-۱۵ |

می‌گردد که به واسطهٔ رصد همزمان جریان‌های چشمهٔ یونی و هدف و خصوصیات سامانهٔ رادیوفرکانسی انتخاب شده است.

۴.۲. سامانهٔ استخراج پرتو

در سامانهٔ استخراج پرتو یون‌های منفی به وسیله یک نوع ورقهٔ^۲ کربنی نازک که در مسیر شعاعی یون‌های شتاب‌دار قرار گرفته‌اند مورد اصابت قرار گرفته و در نهایت الکترون‌ها جذب ورقه می‌گردند و در این زمان به علت تغییر بار صورت گرفته جهت حرکت یون‌ها عوض می‌شود. از بررسی جریان الکترون‌ها در ورقه تنظیم بودن سامانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پرتو پس از عبور از ورقهٔ کربنی از میان موازی‌سازهای بالا و پایین عبور کرده و پس از عبور از ورقه‌های هدف، وارد محفظهٔ هدف می‌شود.

۵.۲. سامانهٔ هدف

سیکلوترون PET Trace ۷۰۰ به منظور تولید رادیوایزوتوپ‌هایی مانند فلورین ۱۸، نیتروژن ۱۳، اکسیژن ۱۵ و کربن ۱۱ کاربرد دارد. واکنش‌های هسته‌ای به منظور تولید رادیوایزوتوپ‌های مربوطه در جدول ۱ ارائه شده است [۵] از آنجایی که در حال حاضر هدف اکسیژن ۱۵ به علت نبود مواد اولیه مورد بهره برداری قرار نگرفته است لذا در جدول ۲ مشخصات سه نوع هدف به منظور تولید فلورین ۱۸، نیتروژن ۱۳ و کربن ۱۱ قابل مشاهده است.

۶.۲. سامانهٔ تشخیصی

به منظور کنترل جریان پرتو از چشمهٔ یونی به هدف، سامانهٔ تشخیصی جریان پرتو شامل پروب داخلی است که در فاصلهٔ

یونی می‌گردد. این میدان از نوع استاتیک است و به وسیله الکترومگنت تولید می‌شود. در این نوع سیکلوترون طراحی قطب‌ها به منظور ایجاد شتاب دادن به شکل ایزوکرونوس طراحی شده است که باعث تولید میدان مغناطیسی با شدت میانگین ۱/۶۶ تسلا می‌شود. تمرکز پرتو به وسیله چهار سکتور در روی قطب‌ها به دست می‌آید. جنس قطب‌ها از استیلی است که درصد کمی کربن دارد. سیم پیچ‌ها از لوله‌های مسی توخالی تشکیل شده‌اند و به وسیله فایبرگلاس ایزوله شده‌اند [۴]. برای محافظت کویل‌ها در دماهای زیاد، این قطعات به ترموسویچ مجهز شده‌اند. سامانهٔ رادیوفرکانسی به منظور بیرون کشیدن یون‌های تولید شده در چشمهٔ یونی و همچنین شتاب دادن یون‌ها در چهار مرحله در هر دوران در محفظهٔ خلاء کاربرد دارد که شامل مولد تولید فرکانس رادیویی و دو عدد الکتروود (دی) می‌باشد. ذرات به وسیله امواج رادیوفرکانسی که از طریق کابل هم محور وارد محفظه خلاء می‌شوند شتاب می‌گیرند. اختلاف ولتاژ ایجاد شده بین دو صفحهٔ دی، ۳۵ کیلو ولت و فرکانس رزنانس ۱۰۱ مگا هرتز می‌باشد.

۳.۲. چشمهٔ یونی

نوع چشمهٔ یونی سیکلوترون^۱ PIG کاتد سرد می‌باشد که در مرکز سیکلوترون در مکانی ثابت نصب شده است. در واقع پلاسما در میان دو کاتد تولید می‌گردند [۴]. این سیکلوترون به سیستم تنظیم هوشمند مجهز است. در این سیستم خروجی چشمهٔ یونی در طی عملکرد سیکلوترون در خارج از محفظهٔ خلاء کنترل می‌شود که باعث ایجاد شرایط بهینه در حین بمباران

جدول ۲. مشخصات هدف فلورین ۱۸، نیتروژن ۱۳ و کربن ۱۱.

| | اطلاعات هدف | | |
|-------------------|--|--|---|
| | فلورین-۱۸ (Generation II target) | آمونیم- نیتروژن-۱۳ | کربن-۱۱ |
| ماده محفظه هدف | نقره | نقره | آلومینیوم |
| خنک‌کنندگی محفظه | آب دیونیزه | آب دیونیزه | آب دیونیزه |
| فشار پرکننده | هلیوم (۲۵ بار) | متان (۴ بار) | $^{14}\text{N}_2 + 1\% \text{ }^{16}\text{O}_2$ (۹ بار) |
| فشار انتقال دهنده | هلیوم (۴ بار) | متان (۴ بار) | N_2 (۳ بار) |
| ماده فویل | Ti-Al-V (۱۲,۵ μm خلا) Havar (۲۵ μm هدف) | Ti-Al-V (۱۲,۵ μm خلا) Havar (۱۲,۵ μm هدف) | Ti-Al-V (۲۵ μm خلا) Havar (۲۵ μm هدف) |
| خنک‌کنندگی فویل | گاز هلیوم با سرعت زیاد | گاز هلیوم با سرعت زیاد | گاز هلیوم با سرعت زیاد |
| عمق/طول هدف | ۱۲ میلی‌متر | ۱۲ میلی‌متر | ۱۰۰ میلی‌متر |
| حجم هدف | ۱/۷ میلی‌متر | ۰/۸ میلی‌متر | ۲۳ میلی‌متر |

۹.۲. دوز کالیبراتور

کالیبراتور دوز ۵۰۰ ATOMLAB شامل یک قسمت نمایشگر و یک آشکارساز اتاقک یونش پر شده با گاز آرگون با ۰,۶۳۵ سانتی‌متر سرب حفاظ شده می‌باشد که برای اندازه‌گیری دقیق فعالیت رادیواکتیو^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد. صفحه نمایشگر آن لمسی و بزرگ بوده که در آن امکان صفر کردن تابش زمینه وجود دارد.

۱۰.۲. منبع کالیبراتور دوز

دوزیمتر نوترون با مدل LB ۶۴۱۱ از شمارنده تناسبی با گاز ^3He که به وسیله یک تعدیل‌کننده کروی از جنس پلی اتیلن با قطر ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. پاسخ دوزیمتر به نوترون‌ها به علت شکل کروی دوزیمتر همسانگرد می‌باشد. محدوده آهنگ دوز از ۱۰۰ نانو سیورت بر ساعت تا ۱۰۰ میلی سیورت بر ساعت است و حساسیت آن به گاما کمتر از ۳۰ شمارش در ثانیه در ۱۰ میلی سیورت بر ساعت می‌باشد. از آنجائی که دوزیمتر به نوترون‌های گرمایی حساسیت زیادی دارد، نوترون‌های سریع به وسیله تعدیل‌کننده به نوترون‌های گرمایی تبدیل می‌شوند اما محدوده انرژی مورد استفاده از نوترون‌های گرمایی تا انرژی ۲۰ MeV می‌باشد.

شعاعی کوچکی در ۵۵ میلی‌متری از مرکز سامانه قرار گرفته است و از طریق انتقال گرمایی به وسیله تابش خنک می‌شود و شامل موازی سازه‌های بالا و پایین هستند که به منظور مستقر نمودن پرتو استفاده می‌شوند و از طریق انتقال گرمایی به وسیله تابش و هدایت خنک می‌شوند [۴]. جنس موازی سازه‌ها و پروب از تانتالیوم با نقطه ذوب ۲۹۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

۷.۲. سامانه خلاء

تولید خلاء همواره به وسیله دو نوع پمپ دیفیوژن و مکانیکی انجام می‌شود. سرعت پمپ دیفیوژن ۱۷۵۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد و این در حالی است که ظرفیت پمپ مکانیکی ۱۶ مترمکعب بر ساعت و حجم تانک آن ۱۰۰ لیتر می‌باشد. از آنجائی که مقدار خلاء یکی از عوامل مهم در تولید رادیواکتیو توپ می‌باشد، اندازه‌گیری مقدار خلا همواره به وسیله ریزپردازنده‌های کنترلی در سامانه سیکلوترون اندازه‌گیری می‌شود.

۸.۲. سامانه خنک‌کننده

سامانه خنک‌کننده در سیکلوترون شامل دو مدار اولیه و ثانویه می‌باشد. مدار ثانویه به طور غیر مستقیم از طریق تبادل گرمایی با مدار اولیه انتقال حرارتی ایجاد می‌نماید. مدار ثانویه یک مسیر بسته از آب دیونیزه است که با جریان ۵۵ لیتر بر دقیقه باعث خنک شدن تمامی قسمت‌های سیکلوترون می‌گردد. دمای آب در گردش داخل سیکلوترون 2 ± 2 درجه سانتی‌گراد و هدایت آب کمتر از ۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد [۵].

۱. Radioactive Activity

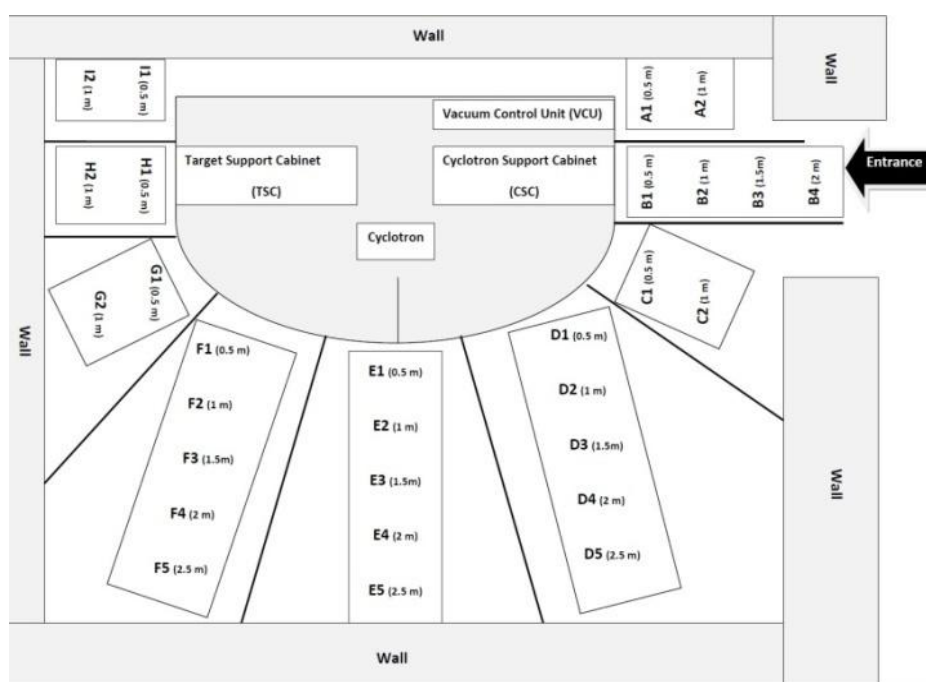
۱۱.۲. دوزیمتر گاما

دوزیمتر گاما با مدل BNS-۹۲ از نوع آشکارسازهای گایگر مولر می‌باشد که قابلیت اندازه‌گیری دوز رسیده توسط تابش گاما را به صورت دوز تجمعی و هم به صورت آهنگ دوز دارا است. لازم به ذکر است که محدوده حساسیت این دوزیمتر از ۵۰ KeV تا ۱٫۵ MeV می‌باشد و محدوده آهنگ دوز در این سیستم از ۵۰ نانو سیورت بر ساعت تا ۵۰۰ میلی سیورت بر ساعت تعریف شده است.

۳. روش انجام کار

در شروع فرایند تمامی سامانه‌های دوزیمتری از لحاظ صحت کارکرد و کالیبره بودن مورد ارزیابی قرار گرفت و تمامی پرسنل به دوزیمتر قرائت مستقیم و غیر مستقیم مجهز گردیدند. در گام بعدی فشارهای گاز هیدروژن چشمه یونی (۵ بار)، هلیوم عملکردی (۲۵ بار)، هلیوم انتقالی (۵ بار)، هلیوم خنک کننده (۱٫۶ بار) گاز متان (۴ بار)، ترکیب گازی نیتروژن ۱۴ و یک درصد اکسیژن ۱۶ (۹ بار) و گاز نیتروژن انتقالی (۳ بار) با خلوص متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. سامانه خلاء به همراه سامانه خنک کننده اولیه و ثانویه ارزیابی گردید. مقدار آب داخل سیکلوترون به همراه فشار آب‌های ورودی و خروجی از تمامی قسمت‌های سیکلوترون بررسی شد. صحت سامانه الکترونیکی به همراه عملکرد سامانه رادیوفرکانسی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی‌های انجام شده از طریق سامانه فرمان، سیکلوترون روشن شد. بعد از برقراری میدان مغناطیسی و اطمینان از تنظیم بودن دستگاه، شرایط اولیه به منظور برقراری جریان چشمه یونی و سامانه رادیوفرکانسی بررسی شد. در این مرحله به وسیله آب طبیعی با مشخصات اهمی ۱۸ مگا اهم و دیونیزه و با هدایت کمتر از ۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، بررسی خطوط انتقال از محفظه مخصوص نگهداری آب به محیط هدف و از هدف به هات لب مورد بررسی قرار گرفت و زمان‌های انتقال ثبت شد. سپس آماده سازی سامانه هدف به مدت ۱۰ دقیقه و با جریان ۲۰ میکروآمپر جهت گرم نمودن تدریجی هدف انجام شد. پس از انتقال فعالیت و اندازه‌گیری آن توسط دوز کالیبراتور و همچنین توسط دستگاه

سیکلوترون و اطمینان از صحت فعالیت انتقالی، تولید اصلی با پر شدن هدف مخصوص فلورین ۱۸ انجام شد و بمباران هدف به مدت ۲ ساعت با جریان ۵۰ میکروآمپر آغاز گردید. پس از انجام بمباران و عبور فلورین ۱۸ از فیلتر به منظور جذب ناخالصی، فلورین ۱۸ به هات لب منتقل گردید و فعالیت تولیدی توسط دوز کالیبراتور و همچنین توسط دستگاه سیکلوترون ثبت گردید. در نهایت سامانه هدف به منظور شستن هدف و خطوط انتقال از آب معمولی پر شده و به هات لب منتقل شد. این مرحله دو بار انجام شد و در نهایت خطوط به مدت ۱۵ دقیقه با گاز هلیوم با خلوص مورد نظر خشک شدند. لازم به ذکر است که در تولید ^{13}N -ammonia و $^{11}\text{CO}_2$ روند آماده سازی هدف‌ها مشابه هدف فلورین ۱۸ می‌باشد با این تفاوت که از مواد اولیه متفاوت و از شرایط ذکر شده در جداول ۱ و ۲ و ۳ به منظور تولید رادیویوتوپ و رادیوداروی مورد نظر استفاده گردید. به منظور اندازه‌گیری آهنگ دوز در یونکر سیکلوترون، بمباران هدف ^{13}N - NH_3 به مدت ۲۵ دقیقه در جریان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ میکروآمپر با فشار گاز متان (۴ بار) بر روی هدف و بمباران هدف فلورین ۱۸ به مدت ۲ ساعت با جریان‌های ۲۰، ۳۰ و ۳۵ میکروآمپر با فشار گاز هلیوم ۲۵ بار به طور مجزا انجام گرفت. لازم به ذکر است استفاده از جریان‌های فوق‌الذکر در سال گذشته در فرایند تولید استفاده شده است و کاربردی می‌باشد. پس از پایدار شدن دستگاه تمامی اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های مشخص و در نقاط اندازه‌گیری که با توجه به محدودیت‌های محیطی اتاق سیکلوترون به صورت شکل ۱، طراحی و انتخاب گردید، انجام پذیرفت. توجه به این نکته اهمیت دارد که نقاط اندازه‌گیری به نه قسمت اصلی از A تا I تقسیم بندی شده است که هر قسمت اصلی با توجه به ابعاد اتاق سیکلوترون در فواصل ۰٫۵ تا ۲٫۵ متری با گام ۰٫۵ متری مشخص گردیده است. ردیف A در مقابل قسمت کنترل خلاء دستگاه و ردیف B در مقابل کابینت پشتیبان سیکلوترون می‌باشد. قسمت C در گوشه حفاظ سمت چپ سیکلوترون، قسمت D در وضعیت مرکزی حفاظ سمت چپ سیکلوترون، قسمت E در قسمت اتصال دو درب راست و چپ سیکلوترون و قسمت F در مقابل قسمتی از درب حفاظ



شکل ۱. نمایی از مکان نقاط اندازه‌گیری شده در این تحقیق.

استفاده قرار می‌گیرد. این هدف از نوع هدف مایع می‌باشد. در کنار هدف منبع آب پرکننده هدف و یک دستگاه اتوماتیک پمپ سرنگ به منظور پر کردن هدف وجود دارد. فشار بالای متان در جهت تولید مستقیم $N-NH_3$ در درون هدف و همچنین به منظور جلوگیری از شکل‌گیری فضاهای خالی در مساحت هدف در حین بمباران به هدف اعمال می‌گردد و کاربرد دیگر گاز هلیوم در جهت خالی کردن و انتقال $N-NH_3$ تولیدی هدف به سیستم تقسیم‌کننده دوز می‌باشد.

۳.۴. سامانه هدف کربن ۱۱

هدف کربن ۱۱ از نوع هدف گازی می‌باشد و به منظور تولید کربن ۱۱ به فرم شیمیایی $^{11}CO_2$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیکلوترون $^{11}CO_2$ تولید شده در هدف به منظور تولید متیل آیوداید در هات لب مورد توجه قرار می‌گیرد. بازده تولید رادیویازوتوپ ^{18}F که مبنای تولید رادیوداروی ^{18}F -FDG می‌باشد و رادیوداروی ^{13}N -ammonia که به صورت درون‌هدفی تولید می‌شود و همچنین تولید کربن ۱۱ به فرم $^{11}CO_2$ تولید شده در هدف که به منظور تولید متیل آیوداید در هات لب مورد استفاده قرار می‌گیرد در جدول ۳ ارائه شده است.

سمت راست سیکلوترون می‌باشد که مقابل هدف سیکلوترون قرار دارد. ردیف اندازه‌گیری G در گوشه حفاظ سمت راست سیکلوترون بعد از هدف قرار دارد. حال آنکه ردیف H در مقابل کابینت پشتیبان هدف در نظر گرفته شده است. در نهایت قسمت I در کنار سامانه پرکننده هدف قرار دارد.

۴. نتایج

۱.۴. سامانه هدف فلورین ۱۸

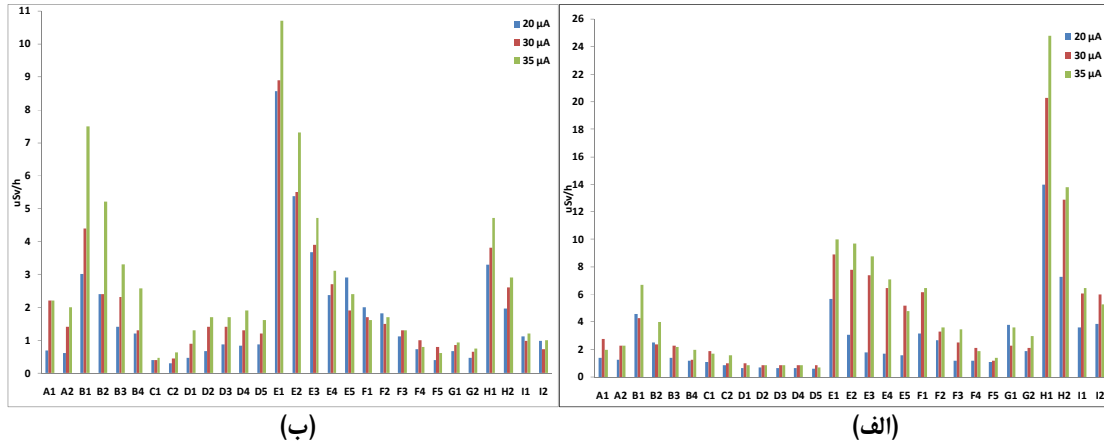
سیستم هدف فلورین ۱۸ از نوع هدف مایع می‌باشد که فلورین ۱۸ را در شکل شیمیایی فلوراید قابل نشاندار شدن، $^{18}F^-$ ، تولید می‌کند. لازم به ذکر است که در کنار هدف فلورین ۱۸ منبع آب پرکننده هدف و یک سیستم اتوماتیک پمپ سرنگ به منظور پر کردن هدف وجود دارد. فشار بالای هلیوم در حین بمباران به هدف اعمال می‌گردد تا از شکل‌گیری فضاهای خالی در مساحت هدف در حین بمباران جلوگیری شود و استفاده از فشار پایین‌تر هلیوم به منظور خالی کردن و انتقال هدف به هات لب انجام می‌گردد.

۲.۴. سامانه هدف نیتروژن ۱۳

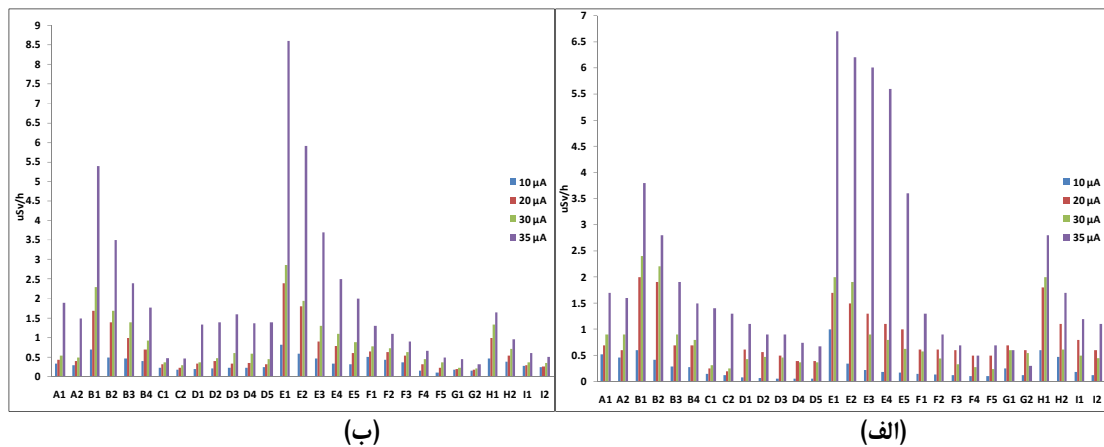
هدف نیتروژن ۱۳ به منظور تولید درون هدف $N-NH_3$ مورد

جدول ۳. بازده انواع هدف به منظور تولید رادیوایزوتوپ‌ها در سیکلوترون PET Trace ۷۰۰.

| رادیوایزوتوپ | محصول | ارزیابی بازده | | | نوع آزمون |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| | | mCi @ EOB | GBq @ EOB | زمان بمباران (دقیقه) | |
| ¹⁸ F | فلورین-۱۸ | ۲۵۰۰ | ۹۳ | ۱۲۰ | اندازه‌گیری شده در کارخانه |
| | | ۲۸۵۸/۳۲ | ۱۰۵/۷۵ | ۱۲۰ | تست پذیرش |
| ¹³ N | آمونیم-نیتروژن-۱۳ | ۷۵ | ۲/۸ | ۲۵ | اندازه‌گیری شده در کارخانه |
| | | ۱۳۸/۱۵ | ۵/۱۱ | ۲۵ | تست پذیرش |
| ¹¹ C | دی اکسید کربن-کربن-۱۱ | ۹۰۰ | ۳۳/۳ | ۳۰ | اندازه‌گیری شده در کارخانه |
| | | ۱۰۴۷/۵ | ۳۸/۷۶ | ۳۰ | تست پذیرش |



شکل ۲. آهنگ دوز نوترون (الف) و آهنگ دوز گاما (ب)، بر حسب میکروسیورت بر ساعت در ارتفاع یک متری در فاصله شعاعی ۰٫۵ تا ۲٫۵ متری با گام ۰٫۵ متری از سیکلوترون حاصل از هدف فلورین ۱۸.



شکل ۳. آهنگ دوز نوترون (الف) آهنگ دوز گاما (ب)، بر حسب میکروسیورت بر ساعت در ارتفاع یک متری در فاصله شعاعی ۰٫۵ تا ۲٫۵ متری با گام ۰٫۵ متری از سیکلوترون حاصل از هدف نیتروژن ۱۳.

۴.۴. اندازه‌گیری آهنگ دوز نوترون و گاما در بونکر با استفاده از هدف فلورین ۱۸ و نیتروژن ۱۳ در شکل ۲ آهنگ دوز نوترون و آهنگ دوز گاما بر حسب میکروسیورت بر ساعت در ارتفاع یک متری از سطح زمین با در نظر گرفتن جریان‌های مختلف اعمالی در هدف فلورین ۱۸ که در فاصله شعاعی ۰٫۵ تا ۲٫۵ متری با گام ۰٫۵ متری از

میکروسیورت بر ساعت در ارتفاع یک متری از سطح زمین با در نظر گرفتن جریان‌های مختلف اعمالی در هدف فلورین ۱۸ که در فاصله شعاعی ۰٫۵ تا ۲٫۵ متری با گام ۰٫۵ متری از

شد که در ارتفاع یک متری، آهنگ تولید نوترون بیشتر به قسمت راست سیکلوترون که نزدیک به محل هدف می‌باشد محدود می‌گردد به ویژه اینکه در فاصله ۰/۵ متری از قسمت کابینت پشتیبان هدف آهنگ تولید نوترون ۲۴/۸ میکروسیورت بر ساعت است که بالاترین نرخ تولید نوترون را دارا می‌باشد که در حین اعمال جریان ۳۵ میکروآمپر روی هدف تولید گردیده است. لازم به ذکر است که با افزایش فاصله به یک متر، آهنگ تولید نوترون به عدد ۱۳/۸ میکروسیورت بر ساعت در فاصله کاهش می‌یابد. این در حالی است که نرخ تولید نوترون در وضعیت اتصال دو درب سیکلوترون در فاصله ۰/۵ متری ۱۰ میکروسیورت بر ساعت می‌باشد که به عدد ۵/۲ میکروسیورت بر ساعت در فاصله ۲/۵ متری می‌انجامد.

۳.۵. اندازه‌گیری آهنگ دوز نوترون و آهنگ دوز گاما در

بونکر سیکلوترون با استفاده از هدف نیتروژن ۱۳

با بررسی آهنگ دوز نوترون در ارتفاع یک متری مشاهده می‌گردد که در مکان اتصال دو درب راست و چپ سیکلوترون با افزایش جریان هدف آهنگ تولید نوترون نیز افزایش می‌یابد و این اثر به ویژه در افزایش جریان از ۳۰ به ۳۵ میکروآمپر و در وضعیت ۰/۵ متری از سیکلوترون که باعث افزایش نرخ تولید نوترون از ۲ به ۶/۷ میکروسیورت بر ساعت می‌باشد قابل مشاهده است. نرخ تولید نوترون تقریباً در جریان‌های ۲۰ و ۳۰ میکروآمپر نزدیک به یکدیگر می‌باشند ولی با افزایش جریان به ۳۵ میکروآمپر آهنگ تولید نوترون افزایش می‌یابد. نرخ تولید نوترون در مکان اتصال دو درب راست و چپ سیکلوترون و در مقابل کابینت پشتیبان سیکلوترون و در مقابل کابینت پشتیبان هدف بالا می‌باشد. در ارزیابی انجام شده در آهنگ تولید گاما مشاهده می‌شود که با افزایش جریان از ۳۰ به ۳۵ میکروآمپر در وضعیت ۰/۵ متری از سیکلوترون در مکان اتصال دو درب راست و چپ آهنگ دوز گاما از ۲/۸۶ به ۸/۶ میکروسیورت در ساعت افزایش پیدا کرد و با افزایش فاصله به ۲/۵ متری سیکلوترون در جریان ۳۵ میکروآمپر آهنگ دوز گاما به ۲ میکروسیورت بر ساعت تنزل پیدا می‌کند. آهنگ دوز

سیکلوترون اندازه‌گیری شده است، ارائه گردیده است. آهنگ دوز نوترون و آهنگ دوز گاما بر حسب میکروسیورت بر ساعت در ارتفاع یک متری از سطح زمین با در نظر گرفتن جریان‌های مختلف اعمالی در هدف نیتروژن ۱۳ که در فاصله شعاعی ۰/۵ متری از سیکلوترون اندازه‌گیری شده است، در شکل ۳ قابل مشاهده است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

۱.۵. ارزیابی عملکرد سیکلوترون

آزمون‌های پذیرش دستگاه باید بلافاصله پس از نصب مکانیکی و تنظیمات الکترونیکی دستگاه توسط متخصص فیزیک بخش انجام گیرد. انجام این آزمون‌ها در بخش سیکلوترون بیمارستان دکتر مسیح دانشوری انجام شد و نتایج به دست آمده بیشتر از ادعای کارخانه سازنده بود که نشان دهنده دقت در نصب مکانیکی دستگاه و تنظیم دقیق تمامی پارامترهای تعیین کننده در تولید رادیوایزوتوپ می‌باشد.

۲.۵. اندازه‌گیری آهنگ دوز نوترون و دوز گاما در بونکر

سیکلوترون با استفاده از هدف فلورین ۱۸

در این تحقیق مشاهده گردید که با افزایش یافتن جریان در هدف فلورین ۱۸ آهنگ تولید پرتوهای گاما افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش جریان از ۳۰ تا ۳۵ میکروآمپر در فاصله ۰/۵ متری در قسمت کابینت پشتیبان سیکلوترون از مقدار ۴/۴ به مقدار ۷/۵ و در موقعیت اتصال دو درب سیکلوترون از ۸/۹ به ۱۰/۷ میکروسیورت بر ساعت افزایش نشان می‌دهد. لازم به ذکر است پرتوهای گاما در موقعیت کابینت پشتیبان سیکلوترون بالاتر از کابینت پشتیبان هدف می‌باشد که به علت افزایش فضاهاى خالی بیشتر در کابینت پشتیبان سیکلوترون می‌باشد که در جهت هدایت تمامی دستگاه‌های خنک کننده در آن مکان به داخل سیکلوترون می‌باشد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که با افزایش فاصله از سیکلوترون آهنگ تولید پرتوهای گاما در تمامی موقعیت‌ها به شدت کاهش می‌یابد. با بررسی‌های انجام شده در مکان‌های مختلف در اطراف سیکلوترون مشاهده

ایجاد می‌شود، بنابراین پلی اتیلن احاطه کننده این هدف‌ها به عنوان کند کننده نوترون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و کند کردن بیشتر به وسیله بورون موجود در حفاظ سیکلوترون انجام می‌شود. در عین حال پرتوهای گامای تولیدی توسط بتون موجود در حفاظ تضعیف می‌گردند. لازم به ذکر است که جذب پرتوهای گامای تولیدی در حین بمباران در هدف و پس از بمباران به وسیله ۱۰ سانتی‌متر سرب احاطه کننده هدف‌ها تضعیف می‌گردند [۶]. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص گردید که سیکلوترون حفاظ دار ۷۰۰ PET Trace از لحاظ اصول ایمنی پرتوها در حین بمباران در وضعیت مطلوب می‌باشد.

گاما در جریان‌های ۲۰ و ۳۰ میکروآمپر نزدیک یکدیگر می‌باشد ولی با افزایش جریان به ۳۵ میکروآمپر آهنگ تولید افزایش می‌یابد و در کل آهنگ افزایش تولید گاما در مکان اتصال دو درب راست و چپ سیکلوترون بالاتر از مقابل کابینت پشتیبان سیکلوترون می‌باشد.

توجه به این نکته اهمیت دارد که مقدار آهنگ دوز به نوع رادیوایزوتوپ تولیدی، زمان بمباران و مقدار جریان هدف بستگی دارد. از آنجائی که در فرآیند تولید فلورین ۱۸ به طور مستقیم نوترون و در فرآیند تولید نیتروژن ۱۳ به طور مستقیم پرتوهای آلفا تولید می‌شود و نوترون در حین واکنش‌های ثانویه انجام شده و در قسمت‌های دیگر سیکلوترون در حین تولید

مراجع

1. International Atomic Energy Agency, "Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice", Technical Reports Series No. 465, IAEA (2008).
2. International Atomic Energy Agency, "Cyclotron Produced Radionuclides: Guidance on Facility Design and Production of [18F] Fluorodeoxyglucose (FDG)", IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 3, IAEA (2012).
3. International Atomic Energy Agency, "Cyclotron Produced Radionuclides: Operation and Maintenance of Gas and Liquid Targets", IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 4, IAEA (2012).
4. GE Healthcare, "MINItrace (PET Tracer Production System) Technical Specification", Technical Publications, General Electric Company (2009).
5. GE Healthcare, "MINItrace (PET Tracer Production System) Operator Guide", General Electric Company (2010).
6. GE Healthcare, "MINItrace (PET Tracer Production System) Service Manual-Health and Safety", Technical Publications, General Electric Company (2005).