

ساخت اتاقک یونش چاهک دار مرتبط با هوای آزاد و ارزیابی محاسباتی و اندازه گیری پارامترهای عملکردی آن

کوروش اربابی^{۱*}، غلامرضا رئیس علی^۲، معصومه دهقانی مقدم^۳، مصطفی غفوری^۴، ارژنگ شاهر^۵، سعید حمیدی^۶

- ۱- دانشجوی دکتری فیزیک پزشکی، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران
- ۲- دانشیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران
- ۳- کارشناس ارشد فیزیک هسته‌ای، معاونت تحقیقات و فناوری هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران
- ۴- مربی، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران
- ۵- کارشناس فیزیک هسته‌ای، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران
- ۶- استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک

تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۷/۲/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۷/۴/۱۹

چکیده

مقدمه: اتاقک یونش چاهک دار مرتبط با هوای آزاد یکی از سیستم‌های اندازه‌گیری برای تعیین قدرت چشمه‌های براکی تراپی است. این اتاقک از محفظه‌ای استوانه‌ای ساخته می‌شود که در وسط و در امتداد محور آن حفره‌ای استوانه‌ای برای قرار دادن چشمه‌های مورد اندازه‌گیری تعبیه شده است.

مواد و روش‌ها: با بررسی عملکرد اتاقک‌های یونش چاهک دار مرتبط با هوای آزاد و با استفاده از کد MCNP-4C به عنوان ابزار محاسباتی، اتاقک مورد طراحی شبیه‌سازی شد و پس از ارزیابی پاسخ محاسباتی و بدست آوردن نتیجه مطلوب اتاقک یونش چاهک دار ساخته شد. پارامترهای عملکردی این اتاقک شامل ولتاژ کاری، میزان جریان نشتی، تکرارپذیری پاسخ، مکان مرجع، ضریب بازترکیب، ضریب قطبش و پایداری پاسخ برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: مقدار جریان نشتی اتاقک در ولتاژ کاری آن در مقایسه با پاسخ اتاقک برای چشمه‌های مذکور قابل صرفنظر بود. پاسخ اتاقک ساخته شده برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am تکرار پذیر است و مکان مرجع اتاقک ساخته شده برای هر یک از چشمه‌های مذکور در ۶ سانتیمتری کف اتاقک بدست آمد. ضریب بازترکیب در اتاقک یونش مورد نظر بسیار کم است و مقدار ضریب قطبش نزدیک به ۱ است و از اینرو از تأثیر این دو ضریب در اندازه‌گیری‌ها صرفنظر شد. نزدیک بودن مقادیر اندازه‌گیری در فاصله‌های مختلف زمانی نشان دهنده پایداری پاسخ اتاقک برای هر یک از چشمه‌های مورد آزمایش بود. همچنین نتایج حاصل از جریان اندازه‌گیری شده اتاقک ساخته شده به ازای واحد قدرت چشمه با نتایج متناظر پاسخ اتاقک شبیه‌سازی، برای مکان‌های مختلف چشمه در اتاقک در محدوده انرژی چشمه‌های مورد آزمایش مقایسه شد.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که مکان مرجع اندازه‌گیری برای هر یک از چشمه‌های مذکور در هر دو اتاقک (ساخته شده و شبیه‌سازی شده) یکی است و بیانگر رفتار مشابهی هستند. با توجه به خصوصیات عملکردی خوب اندازه‌گیری شده برای اتاقک یونش ساخته شده، می‌توان از آن برای اندازه‌گیری قدرت چشمه‌های براکی تراپی با انرژی بیشتر از ۵۰ کیلو الکترون ولت استفاده کرد. (مجله فیزیک پزشکی ایران، دوره ۴، شماره ۱۶ و ۱۷، پاییز و زمستان ۸۶: ۱-۱۰)

واژگان کلیدی: اتاقک یونش چاهک دار، چشمه‌های گامای براکی تراپی، قدرت گرمای هوا، شبیه سازی مونت کارلو

* نویسنده مسؤول: کوروش اربابی

آدرس: کرج، انتهای رجائی شهر، بلوار مودن، بلوار مرکز تحقیقات

هسته ای، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی

karbabi@nrcam.org

صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸

تلفن: ۴۴۲۴۰۷۳ (۲۶۱) ۹۸+

۱- مقدمه

با توجه به گسترش روز افزون کاربرد منابع پرتوزا در درمان بیماری‌ها و به خصوص چشمه‌های براکی تراپی در درمان تومورهای کوچک و لزوم اعمال دقت در کاربرد این چشمه‌ها و نهایتاً پرتودهی دقیق موضع مشخص شده در بدن بیمار، بکاربردن سیستم‌های اندازه‌گیری که با دقت بالایی بتوانند شدت چشمه‌های مورد استفاده را اندازه‌گیری کنند، اجتناب ناپذیر است [۱]. اتاقک‌های یونش چاهک‌دار مرتبط با هوای آزاد یکی از سیستم‌های اندازه‌گیری برای تعیین قدرت چشمه‌های براکی تراپی است [۲-۶]. با توجه به خصوصیات مناسب این نوع اتاقک‌ها و فقدان مسئله نشت گاز از حجم حساس به دلیل ارتباط آن با هوای آزاد [۷]، در این تحقیق ساخت این نوع اتاقک مورد توجه قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

اتاقک یونش چاهک‌دار مرتبط با هوای آزاد برای کالیبراسیون چشمه‌های براکی تراپی استفاده می‌شود. این اتاقک‌ها دارای هندسه استوانه‌ای هستند که در وسط و در امتداد محور آن چاهکی استوانه‌ای به منظور قرار دادن چشمه‌های مورد اندازه‌گیری وجود دارد و حجم حساس این اتاقک‌ها (فضای بین الکترودها) با هوای بیرون در تماس است، از اینرو باید ضریب تصحیح مربوط به چگالی هوا (فشار و دما) در اندازه‌گیری‌ها اعمال شود [۸، ۹]. ناحیه مناسب اندازه‌گیری در

این نوع اتاقک (نقطه مرجع) مکانی است که اگر مرکز چشمه در آنجا قرار بگیرد، پاسخ اتاقک بیشینه و تغییرات آن کمینه باشد که در این صورت، عدم قطعیت در تعیین نرخ کرمای هوای مرجع^۱ کمینه خواهد بود [۹، ۷].

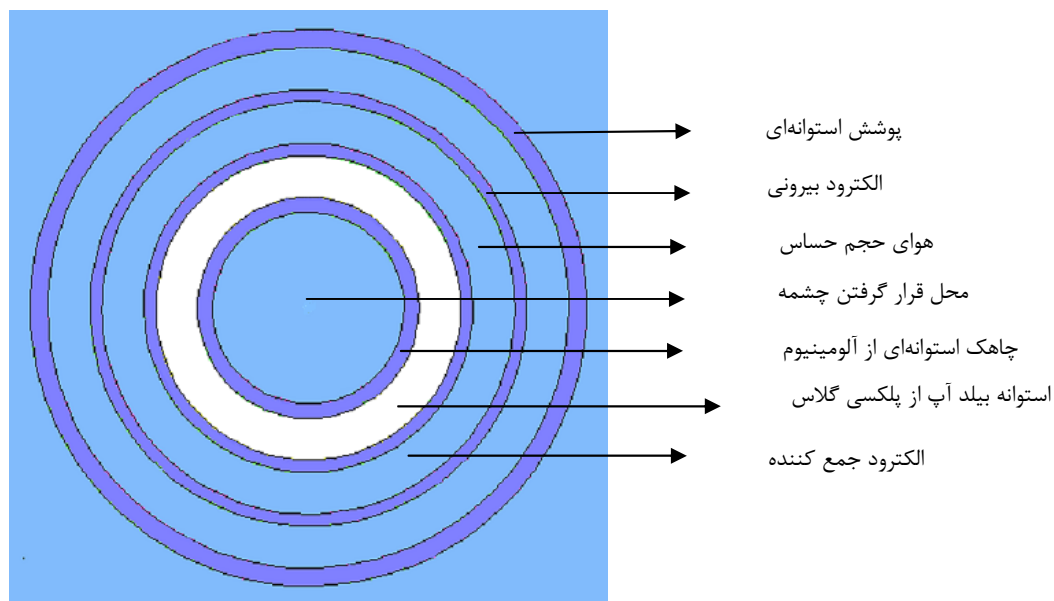
۲-۱- محاسبات

با توجه به اینکه در محدوده ولتاژ کاری اتاقک‌های یونش، آهنگ باز ترکیب یون‌های تولید شده در حجم حساس اتاقک ناچیز است، تعداد یون‌های تولید شده در اتاقک و در نتیجه جریان تولید شده در مدار متصل به الکترومتر را می‌توان با فرض اینکه کل انرژی جذب شده در حجم حساس موجب یونش اتم‌های هوا می‌شود، با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی کرد. در این تحقیق اتاقک مورد طراحی با استفاده از کد مونت کارلوی MCNP-4C [۱۰] شبیه‌سازی شد. برش عرضی از هندسه شبیه‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است. چگالی هوای حجم حساس اتاقک، با توجه به میزان دما و فشار آزمایشگاه در زمان اندازه‌گیری هر چشمه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است [۱۱].

$$\rho(g/cm^3) = 0.001293 \times \frac{29315P}{1013.25 (273.15 + T)}$$

که در آن P و T به ترتیب فشار (بر حسب میلی‌بار) و دمای محیط (بر حسب درجه سلسیوس) در زمان اندازه‌گیری است.

1 - Reference air KERMA rate



شکل ۱- برش عرضی از اتاقک چاهکدار شبیه‌سازی شده با کد MCNP

استفاده شد و مقدار جریان به ازای واحد قدرت گرمای هوای چشمه از رابطه (۲) محاسبه شد [۱۳].

$$I \left(\frac{A}{\mu\text{Gym}^2\text{h}^{-1}} \right) = 8.17 \times 10^{-15} \frac{*F8}{F6} \quad (2)$$

در رابطه (۲) تالی *F8 انرژی جذب شده بر حسب مگاالکترون ولت در حجم حساس اتاقک چاهکدار شبیه‌سازی شده است و تالی F6 گرمای فوتون‌ها بر حسب مگا الکترون ولت بر گرم در حجم حساس اتاقک یونش کروی LS01 در فاصله مرجع یک متری، می‌باشد.

۲-۲- ساخت اتاقک یونش چاهکدار

با استفاده از طرح به دست آمده از شبیه‌سازی و الگو گرفتن از چند اتاقک یونش موجود (نظیر اتاقک یونش PTW HDR TW 33004 و SNC 1008)، نقشه کلیه قطعات اتاقک یونش چاهک دار که شامل ۴۷ قطعه بود ترسیم و قطعات بر اساس آن‌ها ساخته شدند.

در اتاقک یونش چاهکدار ساخته شده، الکتروود داخلی به صورت یک پوسته استوانه‌ای با شعاع خارجی ۲/۵۵ سانتی متر و ضخامت

جدول ۱- نیمه عمر و طیف انرژی فوتون‌های گسیلی چشمه‌های مورد استفاده در سه گستره انرژی مختلف [۱۲]

چشمه	نیمه عمر	E_i (MeV)	Y_i (%)
^{137}Cs	سال ۳۰٫۰۴	۰٫۶۶۱۷	۸۵٫۱۰
		۰٫۱۲۲۱	۸۵٫۶
		۰٫۱۳۶۵	۱۰٫۷
^{57}Co	روز ۲۷۱٫۷۹	۰٫۱۴۴	۹٫۱۶
		۰٫۰۵۹۵	۳۵٫۹
		۰٫۰۲۶۴	۲٫۴۰
^{241}Am	سال ۴۳۲٫۲	۰٫۰۳۳۲	۰٫۱۲۶
		۰٫۰۴۳۴	۰٫۰۷۴

بیناب انرژی و نیمه‌عمر چشمه‌های به کار رفته در این تحقیق شامل ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am است که در سه گستره انرژی مختلف قرار می‌گیرند (جدول ۱). با توجه به اینکه شدت چشمه‌های مذکور توسط اتاقک کروی LS01 تعیین شده است، برای محاسبه قدرت گرمای هوای چشمه‌ها، از نتایج محاسبه اتاقک کروی LS01 شبیه‌سازی شده با کد MCNP که توسط رئیس‌علی و همکارانش انجام شده بود،

۲-۳- بررسی عملکرد اتاقک یونش ساخته شده

برای اندازه‌گیری پاسخ اتاقک یونش چاهک‌دار ساخته شده از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{59}Co و ^{241}Am استفاده شد. چشمه ^{137}Cs از نوع لوله‌ای بوده و اکتیویته آن در زمان اندازه‌گیری 0.26 میلی کوری 53 بود. چشمه ^{59}Co با اکتیویته 5.09mCi در فاز آبی به صورت محلول در 7 میلی لیتر آب در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج تولید گردید و چشمه ^{241}Am از نوع کپسولی مدل X 101 RCC ساخت شرکت Nycomed Amersham انگلستان با اکتیویته 14mCi است [۱۴]. قدرت چشمه‌های مذکور که توسط رئیس‌علی همکارانش اندازه‌گیری شده در جدول ۲ آمده است [۱۳].



شکل ۲- قطعات ساخته شده اتاقک چاهک‌دار مرتبط با هوای آزاد

0.2 سانتی مترو الکتروود خارجی به صورت پوسته استوانه‌ای هم‌مرکز با الکتروود داخلی با شعاع خارجی 3.65 سانتی مترو ضخامت 0.2 سانتی متر هستند (شکل ۲). جنس هر دو الکتروود از آلایژ آلومینیوم (آلیاژ 1075 ، طبق محاسبات انجام شده توسط رئیس‌علی و همکاران) [۱۳] بوده و طول هرکدام 12 سانتی متر می‌باشد. در فضای بین دو الکتروود که حجم حساس اتاقک را تشکیل می‌دهد، هوا وجود دارد و این حجم حدود 200 سانتی متر مکعب می‌باشد. در قسمت دیواره داخلی الکتروود جمع‌کننده، پوسته‌ای استوانه‌ای به ضخامت 0.7 سانتی متر و ارتفاع 11.3 سانتی متر از جنس پرسپکس (PMMA) برای ایجاد شرایط تعادل الکترونی در انرژی‌های بالا در نظر گرفته شده است. در بالا و پایین الکتروودها، حلقه‌های حفاظتی^۱ (شکل ۲) و عایق‌هایی برای جلوگیری از نشت الکتریکی در داخل اتاقک یونش قرار داده شده است. جنس این حلقه‌ها از آلومینیوم و عایق‌هایی که در بالا و پایین الکتروود جمع‌کننده قرار می‌گیرند از جنس تفلون و عایق‌هایی که در بالا و پایین الکتروود بیرونی و در بالا و پایین حلقه‌های حفاظتی قرار می‌گیرد از جنس پرسپکس در نظر گرفته شده‌اند. روی اتاقک پوششی استوانه‌ای از آلومینیوم و در قسمت بالایی آن چاهکی به منظور قرار دادن چشمه در اتاقک تعبیه شده است که به صورت پوسته‌ای استوانه‌ای با شعاع خارجی 1.85 سانتی متر و ضخامت 0.25 سانتی متر با ارتفاع داخلی 14 سانتی متر از جنس آلومینیوم است. پین‌هایی که به منظور اتصالات الکتریکی در اتاقک استفاده می‌شود از جنس برنج ساخته شدند. تصاویری از اجزای اتاقک ساخته شده در شکل ۲ و تصویر اتاقک پس از ساخت در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از ساخت اتاقک و تعیین ولتاژ کاری آن، تکرارپذیری، تعیین مکان مرجع، اثر بازترکیب، اثر قطبش و پایداری مورد بررسی قرار گرفت.

1- Guard Rings

ساخت اتاقک یونش چاهک دار

با استفاده از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am پارامترهای ولتاژ کاری، جریان ناشی، تکرارپذیری، تعیین مکان مرجع، اثر بازترکیبی، اثر قطبش و پایداری اتاقک اندازه‌گیری شدند که در زیر شرح داده شده‌اند.



شکل ۳- اتاقک یونش چاهک‌دار ساخته شده

جدول ۲- قدرت کرمای هوا مربوط به چشمه‌های ^{241}Am و ^{57}Co و ^{137}Cs [۱۳]

چشمه	^{137}Cs	^{57}Co	^{241}Am
$S_K(\mu\text{Gym}^2\text{h}^{-1})$	164 ± 2	276 ± 3	0.545 ± 0.3

مدار خارجی نشان دهنده نرخ تشکیل تمام بارها حین یونیزاسیون درون حجم فعال اتاقک است [۱۵].

به منظور تعیین ولتاژ کاری اتاقک یونش ساخته شده پاسخ آن با استفاده از الکترومتر نوع PTW UNIDOS 10002 در ولتاژهای مختلف (۵۰ تا ۴۰۰ ولت) اندازه‌گیری شد. با توجه به انرژی نسبتاً بالای چشمه ^{137}Cs و بالا بودن پاسخ اتاقک برای این چشمه نسبت به دو چشمه ^{241}Am و ^{57}Co در نتیجه پایین بودن خطای اندازه‌گیری و هم چنین بالا بودن نیمه عمر آن نسبت به این دو چشمه، ولتاژ کاری اتاقک و پایداری اتاقک برای چشمه ^{137}Cs مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به اندازه‌گیری‌ها مشخص شد که این محدوده منطقه اشباع یونی است و برای اطمینان بیشتر از حذف اثر بازترکیب، ولتاژ کاری ۳۰۰ ولت در نظر گرفته شد.

۲-۳-۱- تعیین ولتاژ کاری اتاقک یونش ساخته شده

تحت شرایطی که بازترکیبی ناچیز است و تمام بارها جمع‌آوری می‌شوند جریان حالت پایه با اندازه‌گیری دقیق نرخ جفت یون‌های تولید شده درون حجم بدست می‌آید. در ولتاژی که با اندازه کافی بالا باشد، میدان الکتریکی به اندازه کافی بزرگ هست که به طور مؤثر بازترکیبی را به مقادیر ناچیز کاهش دهد، و تمام بارهای اولیه به وجود آمده در فرآیند یونیزاسیون در جریان یونی شرکت کنند، ولی افزایش بیشتر ولتاژ نمی‌تواند جریان را افزایش دهد، زیرا تمام بارها جمع‌آوری می‌شوند و نرخ ایجاد بارها نیز ثابت است. از این رو این ناحیه، ناحیه اشباع یون است که به طور معمول اتاقک یونش در آن ناحیه کار می‌کند. تحت این شرایط جریان اندازه‌گیری شده در

جدول ۳- تعیین ولتاژ کاری اتاقک با استفاده از چشمه ^{137}Cs

ولتاژ (V)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰
جریان اتاقک به ازای واحد زمان (نانو آمپر)	0.127 ± 0.1	0.128 ± 0.2	0.128 ± 0.2	0.128 ± 0.2	0.128 ± 0.4	0.128 ± 0.6	0.128 ± 0.5	0.128 ± 0.4

چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{59}Co و ^{241}Am اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه (۳) ضریب تصحیح بازترکیب ($k_{recombin}$) تعیین شد. در این رابطه M_1 و M_2 به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده در دو ولتاژ V_1 و V_2 است [۱۶].

$$k_{recombin} = \frac{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - \frac{M_1}{M_2}} \quad (۳)$$

۶-۳-۲- بررسی اثر قطبش

مثبت یا منفی بودن ولتاژ الکتروود داخلی، بیانگر مثبت یا منفی بودن قطبش اتاقک است که در عمل پاسخ اتاقک کمی اختلاف بین این دو حالت نشان می‌دهد. به این منظور بررسی اثر قطبش پاسخ اتاقک در مکان مرجع در دو ولتاژ $+300\text{V}$ و -300V اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه (۴) ضریب قطبش ($k_{Polarity}$) برای هر کدام از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{59}Co و ^{241}Am تعیین شد. در رابطه (۴) M_+ و M_- مقادیر اندازه‌گیری شده در دو ولتاژ مثبت و منفی اعمال شده به الکتروود جمع‌کننده (داخلی) است و $M_{\pm}$ مقدار اندازه‌گیری شده در قطبش به کار رفته در اندازه‌گیری‌های اصلی است [۷] و در بررسی اثر قطبش در اتاقک M_- در مخرج رابطه (۴) در نظر گرفته شد.

$$k_{Polarity} = \frac{M_+ + M_-}{2M_{\pm}} \quad (۴)$$

۷-۳-۲- بررسی پایداری پاسخ اتاقک

برای بررسی پایداری پاسخ اتاقک، در فاصله‌های زمانی یک ماهه (برای مدت ۳ ماه)، پاسخ اتاقک برای هر سه چشمه در مکان مرجع اندازه‌گیری شد که مقدار میانگین خطای آن $\pm 0.3\%$ بود. نزدیک بودن این مقادیر نشان‌دهنده پایداری پاسخ اتاقک در طول زمان است که نتایج پس از تصحیح اثر واپاشی چشمه و تصحیح فشار و دما در جدول ۴ آورده شده‌اند.

۲-۳-۲- تعیین جریان نشتی اتاقک

برای بررسی جریان نشتی اتاقک، پاسخ اتاقک بدون حضور چشمه اندازه‌گیری شد و مقدار جریان‌نشتی در حدود 10^{-14} آمپر اندازه‌گیری گردید. بنابراین با توجه به کم بودن جریان نشتی در برابر جریان حاصل از اندازه‌گیری چشمه‌ها که در حد پیکوآمپر می‌باشند، می‌توان از آن در اندازه‌گیری‌ها صرف نظر کرد.

۳-۳-۲- بررسی تکرارپذیری پاسخ اتاقک

به منظور بررسی تکرارپذیری پاسخ اتاقک، حداقل ۵ بار اندازه‌گیری در هر مکان چشمه در اتاقک انجام شد. مقدار خطای موجود در اندازه‌گیری نشان دهنده میزان تکرارپذیری پاسخ اتاقک است.

۴-۳-۲- اندازه‌گیری جریان به منظور تعیین مکان مرجع

اتاقک برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{59}Co و ^{241}Am پاسخ اتاقک یونش چاهک‌دار ساخته شده برای مکان‌های مختلف چشمه در اتاقک برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{59}Co و ^{241}Am با استفاده از الکترومتر نوع UNIDOS PTW 10002 اندازه‌گیری شد و نقطه مرجع اتاقک برای هر کدام از این چشمه‌ها تعیین شد. در این حالت چشمه ابتدا در کف اتاقک قرار داده شد سپس در گام‌های یک سانتیمتری، چشمه به سمت بالا حرکت داده شد و جریان اتاقک اندازه‌گیری گردید.

۵-۳-۲- بررسی اثر باز ترکیب

در عمل، بار جمع‌آوری شده توسط الکترودهای اتاقک یونش کمتر از بار تولید شده توسط پرتو یونساز است که علت آن، تلفات ناشی از بازترکیب و نفوذ بعضی یون‌های مثبت و منفی به فضای بین دو الکتروود است.

به منظور بررسی اثر بازترکیب در اتاقک یونش چاهک‌دار، پاسخ اتاقک در دو ولتاژ -300 و -150 ولت برای هر یک از

جدول ۴- بررسی پایداری اتاقک یونش چاهکدار برای مدت ۶ ماه

چشمه	ماه اول	ماه دوم	ماه سوم
^{137}Cs	$0.155 \text{ (nA)} \pm 0.04\%$	$0.156 \text{ (nA)} \pm 0.02\%$	$0.155 \text{ (nA)} \pm 0.03\%$
^{57}Co	$6.160 \text{ (pA)} \pm 0.06\%$	$6.191 \text{ (pA)} \pm 0.01\%$	$6.427 \text{ (pA)} \pm 0.01\%$
^{241}Am	$1.783 \text{ (pA)} \pm 0.01\%$	$1.825 \text{ (pA)} \pm 0.02\%$	$2.089 \text{ (pA)} \pm 0.01\%$

۴- نتایج

نتایج حاصل از مقدار جریان اندازه‌گیری شده به ازای واحد قدرت چشمه در حجم حساس اتاقک چاهکدار ساخته شده و جریان محاسبه شده اتاقک یونش چاهکدار شبیه‌سازی شده برای مکان‌های مختلف چشمه در اتاقک برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am همراه با مقادیر خطا (با ضریب پوششی $k=2$) در شکل ۴ آمده است. مکان مرجع اتاقک ساخته شده برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am در ۶ سانتیمتری کف اتاقک بدست آمد.

نتایج اندازه‌گیری پاسخ اتاقک در مکان مرجع اتاقک در دو ولتاژ 150V و 300V به منظور بررسی اثر بازترکیب اتاقک یونش چاهکدار برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am در جدول ۵ آمده است و در آن، مقدار $k_{recombin}$ برای هر یک از چشمه‌ها تعیین شده است. هم‌چنین نتایج اندازه‌گیری پاسخ اتاقک در مکان مرجع اتاقک در دو ولتاژ 300V و 300V برای چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am به منظور بررسی اثر قطبش در جدول ۶ آمده است و در آن مقدار $k_{polarity}$ برای هر یک از چشمه‌ها تعیین شده است.

جدول ۵- تعیین $k_{recombin}$ در اندازه‌گیری‌های پاسخ اتاقک یونش چاهکدار ساخته شده

چشمه	150V	300V	$k_{recombin}$
^{137}Cs	$0.127 \text{ (nA)} \pm 0.01\%$	$0.128 \text{ (nA)} \pm 0.02\%$	$1.003 \pm 0.02\%$
^{57}Co	$4.218 \text{ (pA)} \pm 0.02\%$	$4.216 \text{ (pA)} \pm 0.02\%$	$0.999 \pm 0.03\%$
^{241}Am	$1.456 \text{ (pA)} \pm 0.01\%$	$1.471 \text{ (pA)} \pm 0.03\%$	$1.007 \pm 0.02\%$

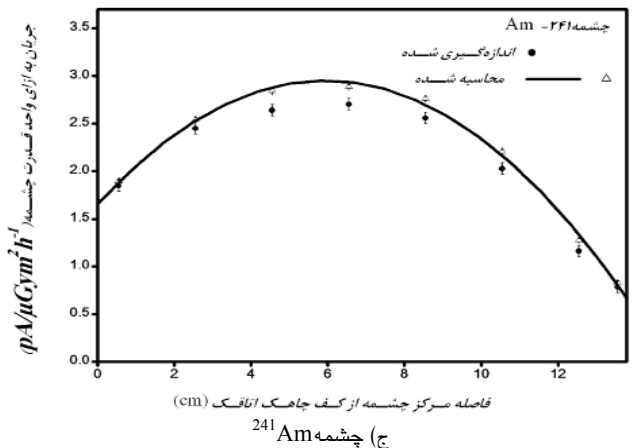
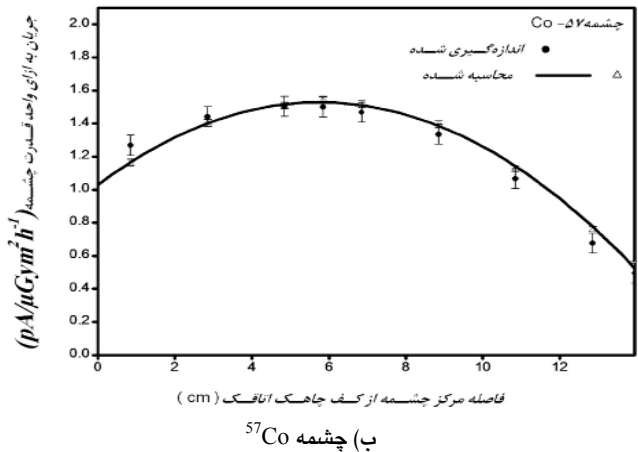
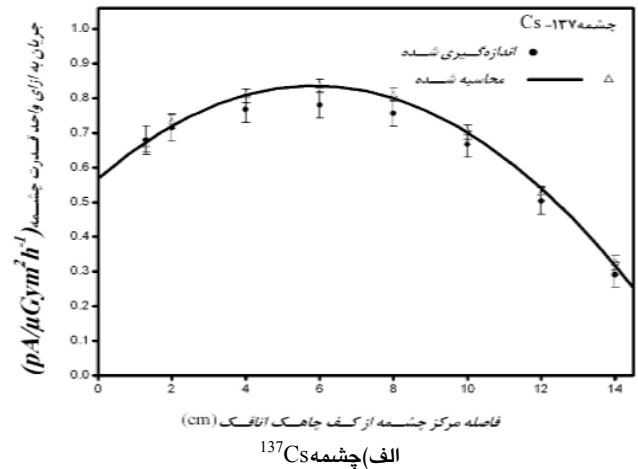
جدول ۶- تعیین $k_{polarity}$ در اندازه‌گیری‌های پاسخ اتاقک یونش چاهکدار ساخته شده

چشمه	300V	300V	$k_{polarity}$
^{137}Cs	$0.128 \text{ (nA)} \pm 0.01\%$	$0.128 \text{ (nA)} \pm 0.02\%$	$1.000 \pm 0.03\%$
^{57}Co	$4.222 \text{ (pA)} \pm 0.02\%$	$4.216 \text{ (pA)} \pm 0.02\%$	$1.000 \pm 0.04\%$
^{241}Am	$1.455 \text{ (pA)} \pm 0.06\%$	$1.471 \text{ (pA)} \pm 0.03\%$	$0.995 \pm 0.07\%$

۴- بحث و نتیجه گیری

طبق نتایج بدست آمده، جریان نشتی اتاقک ساخته شده با توجه به مقدار پاسخ اتاقک برای چشمه‌های مورد اندازه‌گیری قابل صرف نظر کردن است. بررسی مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am و پایین بودن مقدار خطا در اندازه‌گیری پاسخ اتاقک ساخته شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که پاسخ اتاقک ساخته شده برای هر یک از چشمه‌های مذکور تکرار پذیر است و مکان مرجع اتاقک ساخته شده برای هر یک از چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am در ۶ سانتیمتری کف اتاقک بدست آمد. با توجه به مقادیر $k_{Recombin}$ که در جدول ۳ آمده است اثر بازترکیب در اتاقک یونش مورد نظر بسیار کم است. هم چنین با بررسی مقادیر $k_{Polarity}$ در جدول ۴ دیده می‌شود که برای چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am مقدار $k_{Polarity}$ نزدیک به ۱ است و از اینرو می‌توان از تأثیر این ضریب در اندازه‌گیری‌ها صرف نظر کرد. و نزدیک بودن مقادیر اندازه‌گیری در فاصله‌های مختلف زمانی نشان دهنده پایداری پاسخ اتاقک است.

در شکل ۴ بررسی مقادیر جریان اندازه‌گیری شده به ازای واحد قدرت چشمه در مکان‌های مختلف چشمه در اتاقک ساخته شده برای چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am و مقایسه آن با مقادیر متناظر محاسبه شده اتاقک یونش چاهک‌دار شبیه‌سازی شده برای هر یک از چشمه‌های مذکور نشان می‌دهد که پاسخ اندازه‌گیری شده اتاقک یونش چاهک‌دار ساخته شده رفتار مشابهی با نتایج حاصل از پاسخ محاسبه شده اتاقک یونش چاهک‌دار شبیه‌سازی شده برای چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{57}Co و ^{241}Am دارد و مکان مرجع اندازه‌گیری برای هر یک از چشمه‌های مذکور در هر دو اتاقک یکی است که این توافق چند جانبه می‌تواند تأیید محکمی بر درستی اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده باشد و بنابراین از کد MCNP-4C می‌توان برای بررسی پارامترهای موثر در پاسخ اتاقک و بهینه‌کردن پاسخ آن در طراحی و ساخت



شکل ۴- مقایسه مقدار جریان اندازه‌گیری شده در اتاقک یونش چاهک‌دار ساخته شده و پاسخ محاسبه شده با شبیه‌سازی آن برحسب مکان‌های مختلف چشمه در طول محور اتاقک برای الف) چشمه ^{137}Cs ، ب) چشمه ^{57}Co و ج) چشمه ^{241}Am

۵- تشکر و قدردانی

از کارکنان کارگاه تراشکاری پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران به ویژه آقای ابراهیم عینعلی به خاطر همکاری‌های صمیمانه در انجام این تحقیق سپاسگزاریم و یاد و خاطره شادروان فرهاد صفری که در این تحقیق متحمل زحمات زیادی شدند را نیز گرامی می‌داریم.

اتاقک‌های یونش چاهک‌دار مرتبط با هوای آزاد برای چشمه‌های با انرژی مختلف استفاده کرد. همچنین تجربه به دست آمده در ساخت موفقیت‌آمیز این نوع اتاقک یونش راهگشای توسعه ساخت این نوع آشکارسازها و همچنین انواع دیگر آشکارسازها در کشور می‌باشد.

منابع

1. Solimanian A, Aalipour A, Ghafoori M, Standard Calibration of ^{137}Cs Brachytherapy Sources, Journal of Nuclear Science & Technology, 2005;56:34-53.
2. Ahmad N, Mirza NM, Mirza SM, Rashid T, Tufail M, Khan LA, Design and Study of Characteristics of a Three Electrode Experimental, Nuc Inst Meth Phy Res 1992; A321403-409
3. Pai S, Reinstein LE, Evaluation of a New Sealed Reentrant Well Chamber for HDR and LDR Brachytherapy Calibration, Med Phys 1998; 25(5):719-721.
4. Ho AK, Sibata CH, Desouza CN, Castighone R, Shin KH, Evaluation of a Well-type Ionization Chamber for Calibration of HDR and LDR Brachytherapy Sources, Med Dosi 1995; 20(1):31-34.
5. Meiler IRJ, Sibata CH, Ho AK, Souza CD, Shin KH, A Well-type Ionization Chamber Geometric Correction Factor, Phys Med Biol 1996; 41,1141-1148.
6. Buerman L, Kramer HM, Schrader H, Selbach HJ, Activity Determination of ^{192}Ir Solid Sources by Ionization Chamber Measurement Using Calculated Corrections for Self-absorption, Nuc Inst Meth Phy Res A1994; 339:369-376.
7. International Atomic Energy Agency, Calibration of Photon and Beta Source Used in Brachytherapy, IAEA-TECDOC- 1274, March 2002.
8. PTW-Freiburg Instruction Manual for HDR Chamber Type 33004, D432. 131. 0/1.
9. Michael G, Mitch MG, Zimmerman BE, Lamperti PJ, Seltzer SM, Cursey BM, Well-ionization Chamber Response Relative to NIST Air Kerma Strength Standards for Prostate Brachytherapy Seeds, Med Phys 2000;27(10):2293-2296.
10. Briesmeister JF, MCNP-4C, A General Monte Carlo N Particle Transport Code System Version 4C, Los Alamos National Laboratory LA-13709-M (2000)
11. Chilton AB, Shultis JK, Faw RE, Principles of Radiation Shielding, Prentice- Hall, INC, Englewood Cliffs, 1984; NJ 07632
12. Martin JE, Physics for Radiation Protection, New York, John Wiley & Sons Inc, 2000

13. Raisali Gh, Hamidi S, Dehghanimoghadam M, Ghafoori M, Solimanian A, Investigation on the Effect of Chamber Wall Aluminum Alloy on the Response of Free-Air Well-Type chamber for ^{137}Cs , ^{57}Co , and ^{241}Am Gamma Rays, Journal of Nuclear Science & Technology 2007; 41(4):36-43.
14. Austrian Research Center Seibersdorf, Secondary Standard Ionization Chamber Type LS-01, Nov. 1984.
15. Knoll GF, Radiation Detection and Measurement, 3rd ed, John Wiley & Sons Inc, New York 1999.
16. Park SH, Kim HS, Kim YK, Kang SM, Kim JC, Kim JK, Saturation Characteristics of the Ionization Chamber at a Low Dose Rate, Radiation Physics and Chemistry 2005; 73:248-253.