

## شبیه‌سازی آشکار ساز اتاقک یونش برای دوزسنجی سیستم‌هایی با آهنگ دوز پایین

امین گراوند<sup>۱</sup>، محمد افشار<sup>۲</sup>، حمید شغائی دوک<sup>۳</sup>، سید محمد هاشمی نژاد<sup>۴</sup>، حسین جعفری<sup>۵</sup>

۱. کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲. کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۳. کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴. کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۵. دانشجوی دکتری مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

### چکیده:

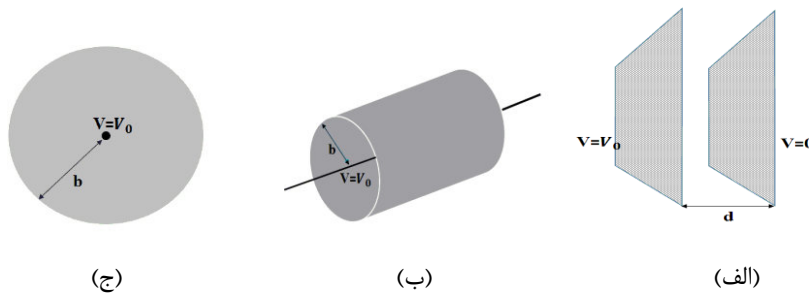
بیشتر دستگاههای تصویر برداری پزشکی نیازمند یک دزیومتر با دقت بالا جهت اندازه گیری میزان دُز جذب شده باریکه تابش ایکس، حین عبور از بافت بدن می باشند. آشکارسازهای اتاقک یونش به دلیل سادگی، پاسخ سریع و قابلیت اطمینان بالا، یکی از مناسب ترین ابزار های دزیومتری برای تابش ایکس در محدوده ی تشخیصی پرتوها می باشند. اتاقک یونش شبیه‌سازی شده دارای هندسه استوانه‌ای با حجم ۳۰ سانتی‌متر مکعب می‌باشد. جنس آند اتاقک یونش، تنگستن با روکش طلا و جنس دیواره اتاقک، پلگسی گلاس و گاز استفاده شده در حجم حساس، نیتروژن می‌باشد. ولتاژ اعمالی جهت کار در ناحیه اشباع ۲۵۰ ولت و چشمه استفاده شده در این شبیه‌سازی  $Am-241$  می‌باشد. نرم افزار استفاده شده جهت شبیه‌سازی اتاقک یونش از نرم افزار  $Garfield^{++}$  استفاده شده است. این نرم افزار از ترکیب چند برنامه برای محاسبه‌ی میدان الکتریکی، مشخصات انتقال الکترون و تعیین مسیر یونش در آشکارساز، تشکیل شده‌است. اتاقک یونش شبیه‌سازی شده دارای ساختاری ساده و بسیار مناسب جهت استفاده در مراکزی که در آن آهنگ دوز بسیار پایین است، می‌باشد.

کلمات کلیدی: *Ion Chamber-Garfield-Dosimeter-Simulation-X-Ray Imaging*

### مقدمه :

استفاده از آشکارسازهای اتاقک یونش در چند سال اخیر به طور قابل توجهی در زمینه پزشکی از جمله محاسبه دُز دریافتی ناشی از پرتوهای یونساز و رادیو داروها در رادیولوژی تشخیصی، فلوروسکوپی و همچنین ماموگرافی رایج شده است. اتاقک های یونش یکی از کاربردی ترین نوع آشکارسازهای پرتو های

یونساز محسوب می شوند [۱]. ساختمان این نوع از آشکارسازها، ساده و آسان تهیه می شوند و نیز سریع پاسخ می دهند که بسته به مواد به کار رفته در تهیه آنها، ساختار یا حجمشان برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند [۲]. آشکارساز های اتاقک یونش از لحاظ شکل هندسی به سه دسته کلی صفحه موازی، استوانه ای و کره ای تقسیم می شوند (شکل ۱).



شکل ۱. اشکال هندسی آشکارساز های گازی. الف: صفحه موازی، ب: استوانه ای، ج: کره [۳]

در یک آشکارساز گازی با آرایش صفحات موازی میدان الکتریکی (صرفنظر از آثار لبه) یکنواخت بوده و اندازه آن از رابطه (۱) محاسبه می شود (شکل ۱ الف):

$$E = \frac{V_0}{d} \quad (1)$$

در اتاقک های با آرایش استوانه ای، ولتاژ  $V_0$  به سیم مرکزی اعمال شده و بدنه استوانه به پتانسیل زمین متصل است (شکل ۱ ب). اندازه میدان الکتریکی در فاصله  $r$  از مرکز اتاقک از رابطه (۲) محاسبه می شود:

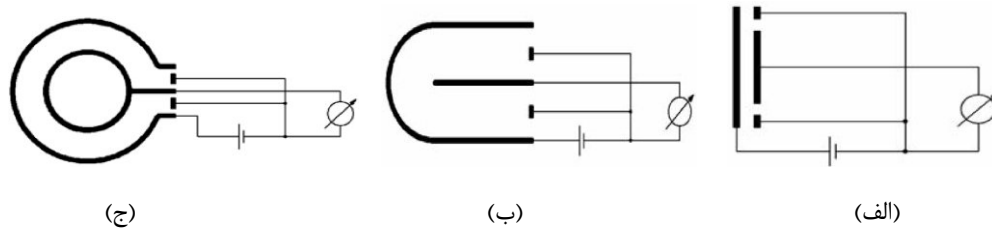
$$E = \frac{V_0}{r} \times \frac{1}{\ln \frac{b}{a}} \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $a$  شعاع سیم مرکزی،  $b$  شعاع اتاقک و  $r$  فاصله از مرکز اتاقک می باشد. با توجه به رابطه (۲) می توان متوجه شد که اندازه میدان در اطراف سیم مرکزی بسیار بزرگ است. لازم بذکر است که تکثیر زوج یون ها در یک آشکارساز گازی با آرایش استوانه ای نسبت به آرایش صفحه موازی بسیار آسان تر صورت می گیرد. به همین دلیل شمارنده های تناسبی و گایگر را با آرایش استوانه ای می سازند. در یک آشکارساز با آرایش کره ای، ولتاژ  $V_0$  به یک کره کوچک واقع در مرکز آشکارساز اعمال شده و پتانسیل پوسته بیرونی کره صفر می باشد (شکل ۱ ج). اندازه میدان الکتریکی در فاصله  $r$  از مرکز این نوع از آشکارساز ها از رابطه (۳) قابل محاسبه می باشد [۴]:

$$E = \frac{V_0}{r^2} \times \frac{a \cdot b}{b - a} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $a$  و  $b$  به ترتیب شعاع کره مرکزی و پوسته خروجی و  $r$  فاصله از مرکز می باشد. در چنین آرایشی نیز می توان میدان های قوی را تولید نمود اما چنین آرایش کره ای محدودیت و

مشکل طراحی، طرفدار چندانی ندارند [۲]. نحوه اعمال پتانسیل و همچنین جمع آوری بار در انواع مختلف نامبرده در شکل (۲) مشخص شده است [۵].



شکل ۲. نحوه اعمال پتانسیل به الکترودها و شمارش بار. الف: صفحه موازی، ب: استوانه‌ای، ج: کروی [۶]

## روش کار :

استفاده از برنامه‌های شبیه‌سازی، قبل از ساخت، به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه انجام می‌شود. در این مقاله، شبیه‌سازی آشکارساز اتاقک یونش، با استفاده از شبیه‌سازی آشکارسازهای گازی،  $Garfield^{++}$ ، که توانایی پیش‌بینی سیگنال‌های به دست آمده از آشکارساز را دارد، انجام شده است. نرم‌افزار  $Garfield^{++}$ ، نرم‌افزاری است برای شبیه‌سازی دقیق آشکارسازهایی که در آن‌ها از گازها و یا مواد نیمه رسانا به عنوان ماده‌ی حساس آشکارساز استفاده می‌شود. این نرم‌افزار از ترکیب چند برنامه برای محاسبه‌ی میدان الکتریکی، مشخصات انتقال الکترون و تعیین مسیر یونش در آشکارساز، تشکیل شده است [۷].

به همین دلیل امکان توسعه‌ی این برنامه‌ها برای کاربردهای خاص، نسبت به حالتی که یک برنامه به صورت یک‌جا توسط یک نفر نوشته شود بسیار بیشتر می‌باشد. نرم‌افزار گارفیلد از کلاس‌های متعددی برای تعریف چشمه، هندسه، فشار، دما، میزان و نوع گاز حجم حساس آشکاز تشکیل شده است [۸].

نوع گاز درون اتاقک در شبیه‌سازی از دو وجه اصلی بر پاسخ اتاقک یونش اثر می‌گذارد. وجه اول مربوط به بازترکیب یونی در گازهاست و وجه دوم نوع گاز، ضریب  $W$  است که برابر با مقدار انرژی میانگین لازم برای تولید یک جفت الکترون-یون در هر گاز است. از نتیجه دو وجه ذکر شده می‌توان این استنباط را کرد که نیتروژن با ضریب بازترکیب پایین و خاصیت الکترون‌گاتیو پایین گاز مناسبی برای حجم حساس آشکارساز می‌باشد. برای تعیین هندسه‌ی مناسب اتاقک یونش، سادگی و سرعت رسیدن به جریان اشباع بسیار مهم است. استفاده و ساخت هندسه‌ی کروی بسیار مشکل است و در عمل عموماً از دو هندسه استوانه‌ای و صفحه موازی استفاده می‌شود [۹].

در صورتی که میدان الکتریکی در اتاقک صفحه موازی با فاصله‌ی بین الکترودهای  $d$  و اتاقک استوانه‌ای با  $d = b - a$  یکسان باشد (در این صورت ولتاژ اعمالی به اتاقک استوانه‌ای بیشتر از اتاقک صفحه موازی است)، در شرایطی که بازده جمع‌آوری بار در هر دو اتاقک برابر باشد جریان اندازه‌گیری شده در اتاقک صفحه موازی، برابر با  $\frac{1}{4} \left(1 + \frac{a}{b}\right)^2$  برابر جریان در اتاقک استوانه‌ای است [۵]. به عبارتی در ناحیه‌ی اشباع، اتاقک

استوانه‌ای، سریع‌تر و در جریان پایین‌تری به اشباع می‌رسد و بازده جمع‌آوری بار واحد را تولید می‌کند. بنابراین استفاده از هندسه‌ی استوانه‌ای در مقایسه با اتاقک صفحه موازی، موجب کاهش جریان اشباع می‌شود و مناسب‌تر می‌باشد. برای بررسی ابعاد اتاقک یونش مورد نظر باید به چند نکته توجه کرد. اول اینکه طبق رابطه‌ی (۴) افزایش حجم اتاقک، جریان اشباع را زیاد می‌کند و از طرف دیگر هرچه حجم اتاقک کمتر شود، دقت فضایی اندازه‌گیری اتاقک بیشتر می‌شود. به ویژه در مواقعی که هدف از استفاده از اتاقک یونش، تعیین توزیع دز در سیستم‌های پرتودهی باشد، حجم کوچکتر اتاقک، توزیع دقیق‌تری را به همراه دارد [۱۰].

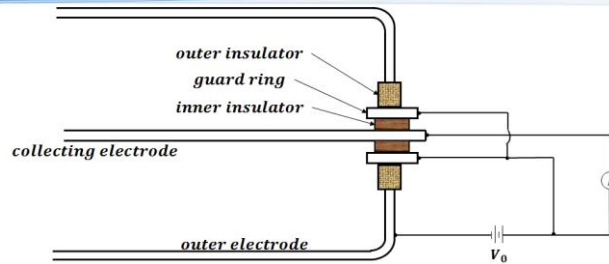
$$D = \frac{I_s}{M} \times \frac{W}{e} = \frac{I_s}{\rho V} \times \frac{W}{e} \quad (4)$$

انتخاب ماده‌ای مناسب برای الکترودهای اتاقک، نقشی اساسی بر روند کار اتاقک دارد. انتخاب جنس ماده دیواره، بستگی به کمیت مورد اندازه‌گیری دارد. اگر اتاقک یونش برای اندازه‌گیری پرتوگیری بر حسب رونتگن به کار رود، جنس دیواره باید معادل هوا باشد، یعنی عدد اتمی موثر آن مطابق با هوا باشد. اگر اتاقک یونش برای اندازه‌گیری دز جذبی در یک محیط خاص استفاده شود، هم دیواره اتاقک و هم گاز درون آن باید با این محیط مطابقت داشته باشند. برای برقراری اختلاف پتانسیل بین الکترودهای مرکزی و دیواره‌ی اتاقک لازم است آنها با یکدیگر هیچ‌گونه اتصال الکتریکی نداشته باشند. لذا مابین آنها با یک عایق پوشانده می‌شود که این دو را از نظر الکتریکی جدا از هم نگه دارد [۱۱]. سه نوع زیر لایه‌ی طبیعی مناسب به عنوان عایق در اتاقک‌های یونش، امبر<sup>۱</sup>، کوارتز<sup>۲</sup> و موم سرزین<sup>۳</sup> هستند. جریان یونش در اتاقک‌های یونش معمولاً مقادیر کمی از مرتبه‌ی پیکوآمپر تا میکروآمپر هستند و نشی در قسمت‌های مختلف اتاقک و سیستم اندازه‌گیری آن، خطای زیادی در پاسخ اتاقک ایجاد می‌کند. به همین دلیل باید تا حد امکان منابع نشی را شناسایی و برطرف کرد. یکی از اصلی‌ترین مراکز جریان نشی، ساقه‌ی اتاقک (مجموعه‌ی انتهای اتاقک استوانه‌ای که به منبع ولتاژ و الکترومتر متصل می‌شود) و منبع آن عایق میان الکترودهای مرکزی و دیواره است. در واقع با هر طراحی، مقداری عایق باید بین الکترودها قرار گیرد و هر نشی از عایق‌ها به جریان یونش اندازه‌گیری شده اضافه می‌شود و موجب بخش ناخواسته‌ای در سیگنال خروجی می‌گردد. برای اینکه این بخش، کمتر از ۱٪ از جریان یونش  $10^{-12}$  A در ولتاژ اعمالی ۱۰۰ V باقی بماند، مقاومت عایق باید بیشتر از  $10^{18}$  Ohm باشد. شکل (۳) طرحی از یک حلقه محافظ در هندسه استوانه‌ای برای کاهش جریان نشی را نشان می‌دهد [۱۲].

<sup>1</sup> Amber

<sup>2</sup> Quartz

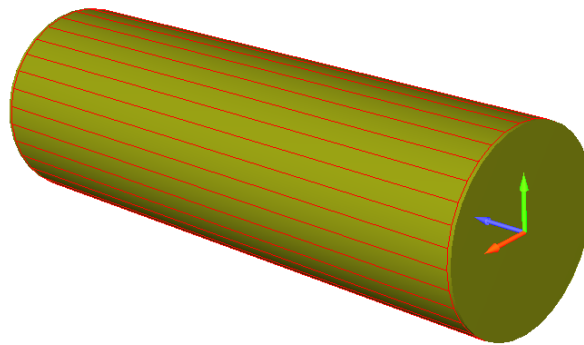
<sup>3</sup> Ceresin Wax



شکل ۳. طرحی از یک حلقه‌ی محافظ در هندسه‌ی استوانه‌ای

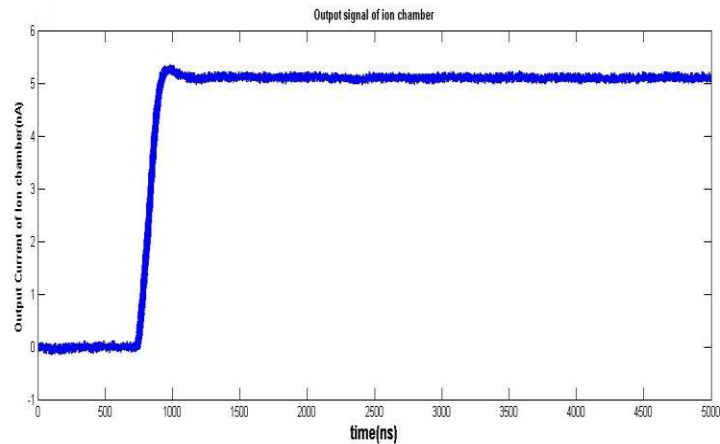
## نتایج :

هندسه‌ی شکل (۴) توسط کلاس Geometry Simple تحت دستور View Geometry در نرم افزار گارفیلد رسم شده است. رسم هندسه‌ی تعریف شده در Garfield<sup>++</sup> توسط برنامه‌ی ROOT انجام می‌شود. اتاقک یونش مورد نظر با هندسه‌ی استوانه‌ای به صورت بسته حاوی گاز نیتروژن در فشار یک اتمسفر و حجم حدود  $30 \text{ cm}^3$  طراحی شده است. در هندسه تعریف شده شعاع استوانه ۳ سانتی‌متر و طول آن ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد.



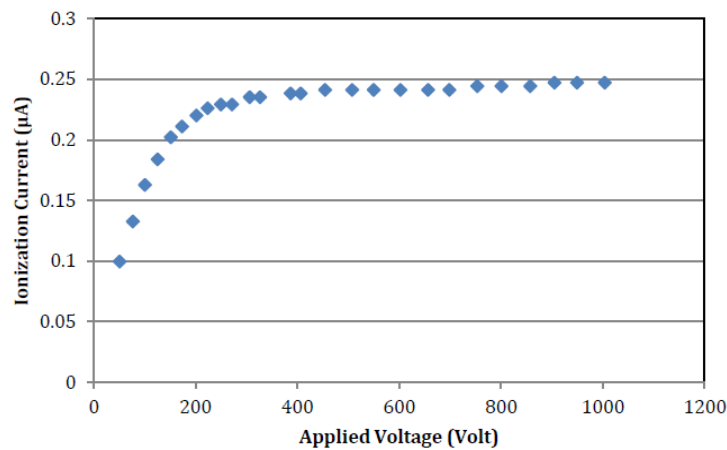
شکل ۴. هندسه‌ی تعریف شده در برنامه‌ی Garfield<sup>++</sup>.

شکل (۵) سیگنال خروجی از آشکارساز اتاقک یونش شبیه‌سازی شده با زمان رشد ۵۰۰ نانوثانیه و دامنه ۲۰۰ نانو آمپر را نشان می‌دهد.



شکل ۵. سیگنال خروجی آشکارساز اتاقک یونش

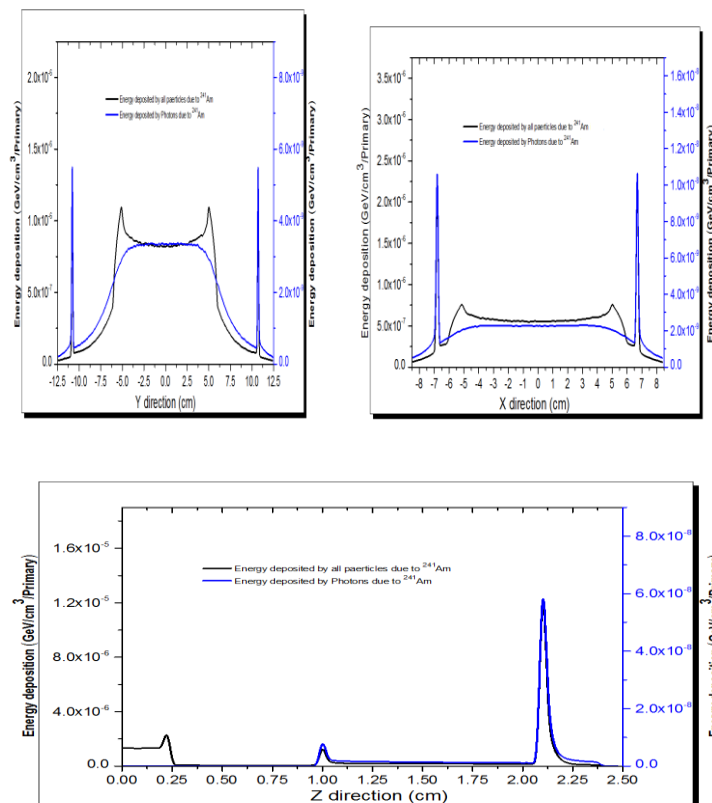
مطابق شکل (۶) اتاقک در تمامی ولتاژهای اعمالی پاسخ تقریباً یکسانی دارد. بهترین ولتاژ انتخاب شده برای انجام آزمایش ها ۲۵۰ ولت می باشد. ولتاژ ۲۵۰ ولت، ولتاژی است که آشکارساز اتاقک یونش در ناحیه اشباع و همان ناحیه‌ای است که بهترین حالت کار اتاقک یونش است.



شکل ۶. منحنی تغییر جریان یونش نسبت به ولتاژ اعمالی در آشکارساز اتاقک یونش

بررسی انرژی بر جای گذاشته در حجم حساس آشکارساز و همچنین تاثیر پنجره های ورودی و خروجی و به ویژه الکتروود مرکزی بر روی مسیر باریکه تابش ی X تابیده شده به آن، یکی از مهم ترین پارامترهایی است که در روند شبیه‌سازی و عملکرد این آشکارساز، مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از انرژی به جا گذاشته، میزان انرژی است که در حجم حساس آشکارساز رها شده است. انرژی به جا گذاشته شده عامل

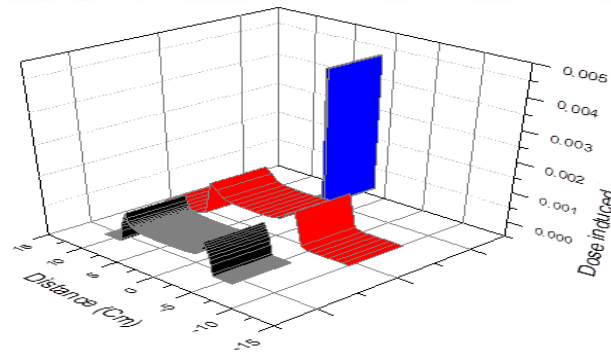
اصلی ایجاد سیگنال و در نهایت اندازه‌گیری مقدار دوز می‌باشد. شکل (۸) منحنی دو بعدی انرژی به جا گذاشته شده در آشکارساز اتاقک یونش ناشی از چشمه  $Am^{241}$  را نمایش می‌دهد. پیک‌های ایجاد شده ناشی از اثرات براگ-پیک ذرات باردار است. ذرات باردار به نسبت سنگینی ذره، این قابلیت دارند که قسمت عمده انرژی خود را در انتهای مسیر رها کنند که به این قابلیت اثر براگ-پیک گویند که در سیستم درمانی به روش ذرات سنگین از این قابلیت به وفور استفاده می‌کنند.



شکل ۸. منحنی انرژی به جا گذاشته شده در آشکارساز اتاقک یونش ناشی از همه ذرات و فوتون چشمه  $Am^{241}$

در سه راستای X-Y-Z

شکل (۹) مقدار دوز حاصل از چشمه  $Am^{241}$  اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز اتاقک یونش را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. قله‌های ایجاد شده در نمودار به خاطر اثرات براگ-پیک که در ذرات باردار وجود دارد می‌باشد. نمودار سیاه رنگ، مربوط به ذرات بتا و نمودار قرمز مربوط به پرتو گامای و نمودار آبی مربوط به پرتوهای پراکنده محیطی ناشی از چشمه  $Am-241$  می‌باشد. دامنه پرتو بتا نسبت به فوتون به خاطر سنگین بوده آن بیشتر و برد آن کمتر است.



شکل ۹. مقدار دوز اندازه‌گیری شده‌ی ناشی از چشمه AM-241

## بحث و نتیجه گیری :

بدون شک اتاقک های یونش با هندسه استوانه‌ای، یکی از مناسب ترین ابزار ها جهت آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای یونساز می باشند. ضریب اطمینان بالا، پاسخ سریع و به ویژه هزینه ی ساخت نسبتاً پایین این گونه از آشکارساز ها از ویژگی بارز آشکارساز با هندسه استوانه‌ای می باشد. اتاقک یونش شبیه‌سازی شده با هندسه‌ی استوانه‌ای با محتوای حجم حساس گاز نیتروژن به حجم حدود  $30 \text{ cm}^3$  می باشد. اگر نیاز به دزیمتری با دقت فضایی بالا باشد، حجم اتاقک بر حسب میزان دقت مورد نظر کاهش یابد. اختلاف شعاع داخلی دیواره و شعاع الکتروود مرکزی کم و نسبت آن دو به یک نزدیک می باشد. الکتروود مرکزی از جنس تنگستن با روکش طلا و دیواره از جنس پلگسی گلاس می باشد. برای افزایش جمع‌آوری بار و کاهش بازترکیب، شعاع الکتروود مرکزی  $100$  میکرومتر انتخاب شده است. جهت کاهش جریان نشتی از حلقه‌ی محافظ به زمین وصل شده در میان عایق استفاده شد. جنس این حلقه نیز تا حد امکان سبک و نزدیک به هوا، مثل آلومینیوم انتخاب شد. برای کاهش نشتی و نویز در پاسخ اتاقک هم از کابل‌های با کیفیت بالا از نوع کوکسیال و اتصالات مناسب استفاده شود.

## مراجع :

۱. Knoll, G.F., Radiation Detection and Measurement, University of Michigan, United States of America, 1999.
۲. Tsoulfanidis, N., Landsberger, S., Measurement and detection of radiation. CRC press, 2010.
۳. Khan, F.M., Physics of Radiation Therapy, University of Minnesota Medical school, Minnesota, 2003.



۴. Attix, F.H., Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, WILEY VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2004.
۵. International Atomic Energy Agency, The use of plane-parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams: an international code of practice for dosimetry, Technical reports series no. 381, Vienna, 1997.
۶. International Atomic Energy Agency, Dosimetry in diagnostic radiology: an international code of practice, Technical reports series no. 457, Vienna, 2007.
۷. PTW Radiation Medicine Quality Assurance (QA) Catalog, Radiation medicine products from PTW-radiation therapy, Freiburg, Germany, 2008/2009.
۸. Krane, K.S., Introductory Nuclear Physics, Wiley, New York, 1988.
۹. Bushberg, J. T.; Boone, J. M., The essential physics of medical imaging, Lippincott Williams & Wilkins, 2011.
۱۰. Yoshizumi, M., Caldas, L., A new ring-shaped graphite monitor ionization chamber, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol 619, No. 1, pp. 207-210, 2010.
۱۱. Cember, H., Introduction to health physics, McGraw-Hill, 1983.
۱۲. Perini, A.P., Neves, L.P., Caldas, L.V.E., Investigation of the applicability of a special parallel-plate ionization chamber for x-ray beam dosimetry, Radiation Physics and Chemistry, Vol 95, pp. 94-97, 2014.