

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

رشته فیزیک گرایش هسته‌ای

رساله دکتری

طراحی و ساخت اتاقک یونش هوای آزاد جهت دزیمتری در سطح استاندارد

نگارنده: سید مصطفی محمدی سیدکلانی

استاد راهنما

دکتر حسین توکلی عنبران

بهمن ۱۳۹۶



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای سید مصطفی محمدی سیدکلانی دانشجوی دکتری رشته فیزیک هسته‌ای به شماره دانشجویی ۹۳۱۵۸۹۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۹ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: طراحی و ساخت اتاقک یونش هوای آزاد جهت دزیتمتری در سطح استاندارد دفاع و با اخذ نمره ۱۹/۱۸۴ به درجه: عالی نائل گردید.

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

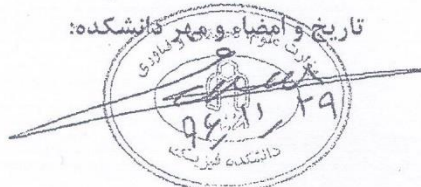
ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر حسین توکلی عنبران	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر مسلم سوهانی	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۳	دکتر محمدرضا شجاعی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۵	دکتر نیما قلعه	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۶	دکتر احسان ابراهیمی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای سید مصطفی محمدی سیدکلانی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیر و سپاس

سپاس ایزد منان که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم رسیده و از هیچ محبتی دریغ نکرد و در تمام مراحل زندگیم مرا قوت قلب بود. اینک که توفیق جمع‌آوری و تهیه این مجموعه را یافته‌ام بر خود واجب می‌دانم از تمامی عزیزان و کسانی که در طی انجام این پژوهش به بنده لطف داشته‌اند تشکر و قدردانی نمایم.

بر خود لازم می‌دانم که:

از جناب آقای دکتر حسین توکلی که درس‌های زیادی به بنده آموخت و اکنون نیز خود را حاضر در کلاس ایشان می‌بینم؛

از جناب آقای دکتر حسین زمانی به خاطر راهنمایی‌ها و کمک در راستای پیشرفت پروژه؛

از جناب آقای دکتر اربابی و آقای رحمانی بخاطر کمک در راستای ساخت دستگاه؛

صمیمانه تقدیر و تشکر به عمل آورم و اجر معنوی را از خداوند متعال برای این عزیزان خواستارم.

تقدیم به:

پدر عزیزم

که کوهی استوار و حامی من در تمام طول زندگیم بود؛
او که قلبش ایمان را، نگاهش صلابت را و اندرزهایش تلاش و استقامت را در مدرسه حیات به من
آموخت.

مادرم عزیزم

فرشته مهربانی که لحظه لحظه زندگیم آکنده از مهر و محبت‌های بی دریغ و الطاف خالصانه او بوده و
هست.

و تقدیم به همسر مهربانم

که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم می‌باشد و با عشق و صبر خود تحمل مشکلات مسیر را برایم
تسهیل نمود.

تعهد نامه

این جانب سید مصطفی محمدی سیدکلانی دانشجوی دوره دکتری رشته فیزیک-هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و ساخت اتاقک یونش جهت دزیمتری در سطح استاندارد تحت راهنمایی آقای دکتر حسین توکلی عنبران متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست

چکیده

مقدار انرژی متوسط به جا گذاشته شده در یک ماده بر واحد جرم، دز جذبی نامیده می شود. تعیین دز جذبی بصورت نظری و یا بصورت عملی، دزیمتری تابش نام دارد. هر آشکار سازی که بتواند کمیتی مربوط به دز انباشته شده در حجم حساس خود را اندازه گیری کند دزیمتر نام دارد. اندازه گیری دز جذبی طبق پروتکل های تعریف شده توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی^۱ (IAEA) صورت می گیرد. استانداردهای تعریف شده توسط IAEA در دو سطح استاندارد اولیه و استاندارد ثانویه طبقه بندی می شوند.

استاندارد اولیه شامل ابزاری یا روشی است که بالاترین دقت ممکن از یک کمیت معین بر اساس تعریف آن کمیت را بدست می دهد. روش های مختلفی در مبحث دزیمتری تابش وجود دارد، سه روش اصلی در سطح استاندارد اولیه عبارتند از [۱]: اتاقک یونش هوای آزاد، کالریمتری و دزیمتری فریک. تمرکز اصلی این پروژه بر روی اتاقک یونش هوای آزاد استوار است. استاندارد ثانویه بر اساس استاندارد اولیه تعریف می شود، اما از نظر دقت در سطح پایین تری قرار دارند. از طرف دیگر استفاده از آنها راحت تر بوده و هزینه ساخت و نگهداری کمتری نیز دارند.

آزمایشگاه دزیمتری استاندارد اولیه^۲ (PSDL) وظیفه تهیه استانداردهای اولیه در زمینه دزیمتری تابش و روش های کاری مبتنی بر آن را بر عهده دارد. علاوه بر این آزمایشگاه های PSDL در زمینه بهبود استانداردهای اولیه و تهیه داده های مورد نیاز جهت دزیمتری نیز فعال می باشند. از طرف دیگر آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه^۳ (SSDL) مطابق استانداردها و روش کار تعریف شده توسط PSDL با استفاده از تجهیزات مناسب به کالیبراسیون و ارائه خدمات به کاربران پرتو می پردازد. هر

^۱ IAEA: International Atomic Energy Agency

^۲ PSDL: Primery Standard Dosimetry Labrator

^۳ SSDL: Secondary Standard Dosimetry Laboratory

مرکز SSDL باید با یک مرکز PSDL در ارتباط باشد. در ایران آزمایشگاه SSDL بر اساس استانداردهای تعریف شده توسط IAEA [۱] به ارائه خدمات به کاربران پرتو می‌پردازد. آزمایشگاه SSDL به‌منظور کالیبره کردن تجهیزات خود، آنها را در بازه‌های زمانی سه ساله به آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ارسال می‌کند. ارسال تجهیزات به آژانس نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی می‌باشد. همچنین امکان ارسال در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر وجود ندارد. مطابق این موارد، طرح کلان توسعه و تجهیز آزمایشگاه دزیمتری استاندارد اولیه در سازمان انرژی اتمی تصویب و به مرحله اجرا گذاشته شد. این پروژه به عنوان بخشی از این طرح به مطالعه و ساخت اتاقک یونش هوای آزاد می‌پردازد.

در این رساله، ابتدا مطالعه جامعی بر روی اتاقک‌های یونش هوای آزاد انجام گرفت. در ادامه با استفاده از کدهای شبیه‌سازی کامپیوتری پارامترهای مختلف اتاقک یونش بررسی و طرح نهایی اتاقک یونش ارائه شد. در انتها بر مبنای نتایج شبیه‌سازی‌ها به ساخت نمونه اولیه اتاقک یونش هوای آزاد اقدام شد.

کلمات کلیدی:

اتاقک یونش هوای آزاد، کالریمتری، استاندارد اولیه، استاندارد ثانویه، پرتوهای X مرجع، ضرایب تصحیح، شبیه‌سازی مونت کارلو، کد MCNP، شبیه‌سازی المان محدود، ضریب تصحیح رطوبت.

فهرست مقالات استخراج شده از رساله به شرح زیر می باشد:

مقاله ۱

عنوان مقاله:

The investigation of electric field uniformity for design a new free-air ion chamber

نویسندگان:

1- Seyed Mostafa Mohammadi 2- Hossein Tavakoli Anbaran 3- Hossein Zamani Zeinali

نام ژورنال / آدرس مقاله:

Journal of Instrumentation / doi:10.1088/1748-0221/11/07/P07017

تاریخ پذیرش / چاپ مقاله:

پذیرش: شمسی: ۱۳۹۵/۳/۲۴ میلادی: 2016-6-13

چاپ: شمسی: ۱۳۹۵/۴/۳۰ میلادی: 2016-7-20

مقاله ۲

عنوان مقاله:

Free-air ionization chamber, FAC-IR-300, designed for medium energy X-ray dosimetry

نویسندگان:

1- Seyed Mostafa Mohammadi 2- Hossein Tavakoli Anbaran 3- Hossein Zamani Zeinali

نام ژورنال / آدرس مقاله:

Journal of Instrumentation / doi:10.1088/1748-0221/12/01/T01008

تاریخ پذیرش / چاپ مقاله:

پذیرش: شمسی: ۱۳۹۵/۱۰/۱۳ میلادی: 2017-1-2

چاپ: شمسی: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲ میلادی: 2017-1-31

مقاله ۳

عنوان مقاله:

Investigation of electron-loss and photon scattering correction factors for FAC-IR-300 ionization chamber

نویسندگان:

1- Seyed Mostafa Mohammadi 2- Hossein Tavakoli Anbaran 3- Hossein Zamani Zeinali

نام ژورنال / آدرس مقاله:

Journal of Instrumentation / doi:10.1088/1748-0221/12/02/P02002

تاریخ پذیرش / چاپ مقاله:

پذیرش: شمسی: ۱۳۹۵/۱۱/۳ میلادی: 2017-1-22

چاپ: شمسی: ۱۳۹۵/۱۱/۱۴ میلادی: 2017-2-2

مقاله ۴

عنوان مقاله:

Diaphragm correction factors for the FAC-IR-300 free-air ionization chamber

نویسندگان:

1- Seyed Mostafa Mohammadi 2- Hossein Tavakoli Anbaran

نام ژورنال / آدرس مقاله:

Applied Radiation and Isotopes / doi: 10.1016/j.apradiso.2017.11.030

تاریخ پذیرش / چاپ مقاله:

پذیرش: شمسی: ۱۳۹۶/۹/۶ میلادی: 2017-11-27

چاپ: شمسی: ۱۳۹۶/۹/۷ میلادی: 2017-11-28

مقاله ۵

عنوان مقاله:

Investigation of the humidity effect on the FAC-IR-300 ionization chamber response

نویسندگان:

1- Seyed Mostafa Mohammadi 2- Hossein Tavakoli Anbaran

نام ژورنال / آدرس مقاله:

Radiation Protection Dosimetry / doi:10.1093/rpd/ncx109

تاریخ پذیرش / چاپ مقاله:

میلادی: 2017-7-29

پذیرش: شمسی: ۱۳۹۶/۵/۷

مقاله ۶

عنوان مقاله:

Design of the free-air ionization chamber, FAC-IR-150, for X-ray dosimetry

نویسندگان:

1- Seyed Mostafa Mohammadi 2- Hossein Tavakoli Anbaran

نام ژورنال / آدرس مقاله:

Radiation Physics and Chemistry / doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.09.019

تاریخ پذیرش / چاپ مقاله:

میلادی: 2017-9-14

پذیرش: شمسی: ۱۳۹۶/۶/۲۳

میلادی: 2017-9-18

چاپ: شمسی: ۱۳۹۶/۶/۲۷

۱ فصل اول	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ برهمکنش فوتون با ماده	۳
۱-۲-۱ اثر فوتوالکتریک	۴
۱-۲-۲ پراکندگی کامپتون	۵
۱-۲-۳ پراکندگی راییلی	۶
۱-۲-۴ تولید زوج دوگانه و سه گانه	۶
۱-۲-۵ ضریب تضعیف کلی	۸
۱-۳ مروری بر مولد پرتو X	۹
۲ فصل دوم	۱۲
۲-۱ مقدمه	۱۳
۲-۲ استاندارد اولیه در دزیمتری تابش	۱۴
۲-۲-۱ کالریمتری	۱۴
۲-۲-۲ دزیمتری شیمیایی	۱۵
۲-۲-۳ اتاقک یونش هوای آزاد	۱۶
۲-۳ پرتوگیری و کرمای هوا	۱۷
۲-۴ آزمایشگاه استاندارد	۱۸
۲-۵ کیفیت پرتو X	۱۹
۲-۵-۱ پرتوهای مرجع	۲۰
۲-۵-۲ ویژگی سری های پرتو X	۲۰
۳ فصل سوم	۲۳
۳-۱ مقدمه	۲۴
۳-۲ اندازه گیری کرمای هوا	۲۴
۳-۲-۱ ضریب تضعیف پرتو	۲۶
۳-۲-۲ ضریب تصحیح دما و فشار	۲۶
۳-۲-۳ ضریب تصحیح رطوبت	۲۷
۳-۲-۴ باز ترکیب یون و ضریب تصحیح اشباع	۳۰
۳-۲-۵ ضریب تصحیح پلاریته	۳۳
۳-۲-۶ ضریب تصحیح توزیع میدان الکتریکی	۳۴
۳-۲-۷ ضریب تصحیح فرار الکترون	۳۵
۳-۲-۸ ضریب تصحیح پراکندگی فوتون	۳۶
۳-۲-۹ ضریب تصحیح پراکندگی دیافراگم	۳۶
۳-۲-۱۰ ضریب تصحیح عبور	۳۷

۳۹	فصل چهارم
۴۰	۴-۱ مقدمه
۴۱	۴-۲ معرفی کد MCNP
۴۲	۴-۳ معرفی نرم افزار COMSOL
۴۴	فصل پنجم
۴۵	۵-۱ مقدمه
۴۶	۵-۲ طراحی اتاقک یونش
۴۶	۵-۲-۱ طول جدایی الکترونها
۴۸	۵-۲-۲ طول تضعیف
۴۹	۵-۲-۳ طول الکترون جمع کننده
۴۹	۵-۲-۴ سیستم دیافراگم
۵۱	۵-۲-۵ پوشش محافظ
۵۳	۵-۳ ضرایب تصحیح
۵۳	۵-۳-۱ ضریب تصحیح رطوبت
۵۷	۵-۳-۲ میدان الکتریکی
۵۸	۵-۳-۲-۱ خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم پتانسیل در غیاب الکترون گارد صفحه ای
۵۹	۵-۳-۲-۲ خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم پتانسیل در حضور الکترون گارد صفحه ای
۶۳	۵-۳-۲-۳ گاردهای نواری
۶۷	۵-۳-۲-۴ پوشش محافظ
۷۱	۵-۳-۳ ضریب تصحیح فرار الکترون
۷۲	۵-۳-۴ ضریب تصحیح پراکندگی فوتون
۷۳	۵-۳-۵ ضریب تصحیح پراکندگی از دیافراگم
۷۴	۵-۳-۶ ضریب تصحیح عبور
۷۶	فصل ششم
۷۷	۶-۱ مقدمه
۷۷	۶-۲ ابعاد فیزیکی اتاقک یونش
۷۸	۶-۳ ساخت اتاقک یونش FAC-IR-150
۸۱	۶-۴ مقایسه ابعاد اتاقک یونش
۸۲	۶-۵ نتایج تست اولیه اتاقک یونش FAC-IR-150
۸۷	۶-۶ نتیجه گیری
۸۸	پیوست-۱ تعیین ضخامت نیم لایه (HVL)
۸۸	الف-۱ مقدمه
۸۸	الف-۲ تعاریف کلی
۸۹	الف-۳ شرایط و روش اندازه گیری
۹۲	پیوست-۲ کیفیت های پرتو X مرجع

- شکل (۱-۱) نمونه‌ای از اتاقک یونش ساخته شده توسط پیر کوری، ۱۸۹۵-۱۹۰۰ [۳] ۳
- شکل (۲-۱) طرح کلی از اثر فوتوالکتریک ۵
- شکل (۳-۱) نمای کلی از پراکندگی کامپتون [۴] ۶
- شکل (۴-۱) نمای کلی از اندرکنش تولید زوج دوگانه ۷
- شکل (۵-۱) نمای کلی از اندرکنش تولید زوج سه گانه ۸
- شکل (۶-۱) نمودار ضرایب تضعیف برای هوای خشک [۵] ۸
- شکل (۷-۱) نمای کلی از یک لامپ اشعه X ۹
- شکل (۸-۱) نمای کلی از فرآیند تابش ترمزی ۱۰
- شکل (۹-۱) طیف الکترون‌های ثانویه حاصل از فوتون انرژی 1.5 keV [۶] ۱۱
- شکل (۱۰-۱) نمای کلی از نقطه کانونی در لامپ اشعه X ۱۱
- شکل (۱-۲) نمای کلی از یک کالریمتر آبی [۸] ۱۵
- شکل (۲-۲) نمای کلی از یک اتاقک یونش هوای آزاد [۹] ۱۷
- شکل (۱-۳) نمای کلی از یک اتاقک یونش هوای آزاد ۲۵
- شکل (۲-۳) بازترکیب یون مطابق روش Boutillon [۱۵] برای پتانسیل 1000V و $n=2.5$ [۲۴] ۳۲
- شکل (۳-۳) منحنی اشباع برای یک اتاقک یونش نوعی [۲۵] ۳۳
- شکل (۴-۳) نمودار طرح‌وار تعیین Δx ، I_c و I_g مورد نیاز در رابطه (۳-۲۶) ۳۴
- شکل (۵-۳) نمودار طرح‌وار ناحیه A و ناحیه B جهت محاسبه ضریب k_{es} ۳۵
- شکل (۶-۳) طرح کلی از پراکندگی فوتون‌ها از سطح دیافراگم ۳۷
- شکل (۷-۳) طرح کلی از عبور پرتوها از بدنه دیافراگم و صفحه جلویی ۳۸
- شکل (۱-۴) نمای کلی از محیط کاربری برنامه COMSOL Multiphysics ۴۳
- شکل (۱-۵) شار انرژی الکترون‌های ثانویه ناشی از فوتون‌هایی با انرژی 150 keV ۴۷
- شکل (۲-۵) نمودار تغییر دز بر حسب فاصله از صفحه مرجع برای فوتون‌های 150 keV ۴۸
- شکل (۳-۵) نمایی از دیافراگم اتاقک یونش FAC-IR-150 ۵۱
- شکل (۴-۵) تغییرات شار فوتون عبوری از صفحه تنگستن بر حسب ضخامت برای فوتون‌های 150 keV ۵۱
- شکل (۵-۵) نمای کلی از پوشش محافظ اتاقک یونش FAC-IR-150 ۵۲
- شکل (۶-۵) تضعیف شار فوتون عبوری از صفحه محافظ جلویی برای فوتون‌های 150 keV ۵۲

- شکل (۷-۵) تغییرات نسبت ρ_h / ρ_d بر حسب میزان رطوبت نسبی و دمای هوا ۵۵
- شکل (۸-۵) تغییرات ضریب تصحیح رطوبت بر حسب تغییر درصد رطوبت نسبی در دمای 20°C ۵۶
- شکل (۹-۵) تغییرات ضریب تصحیح رطوبت بر حسب تغییر درصد رطوبت نسبی در دمای 22°C ۵۶
- شکل (۱۰-۵) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در غیاب الکتروود گارد صفحه‌ای ۵۸
- شکل (۱۱-۵) خطوط میدان الکتریکی در غیاب الکتروود گارد صفحه‌ای ۵۹
- شکل (۱۲-۵) نمایی از الکتروود گارد صفحه‌ای ۶۰
- شکل (۱۳-۵) هم‌صفحه نبودن الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده ۶۱
- شکل (۱۴-۵) هم‌پتانسیل نبودن الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده ۶۱
- شکل (۱۵-۵) هم‌صفحه و هم‌پتانسیل بودن الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده ۶۱
- شکل (۱۶-۵) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در حضور الکتروود گارد صفحه‌ای ۶۲
- شکل (۱۷-۵) خطوط میدان الکتریکی در حضور الکتروود گارد صفحه‌ای ۶۳
- شکل (۱۸-۵) نمایی از یک گارد نواری ۶۴
- شکل (۱۹-۵) نمایی از قرار گرفتن گاردهای نواری بین دو الکتروود بالا و پایین ۶۴
- شکل (۲۰-۵) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در حضور گاردهای نواری ۶۵
- شکل (۲۱-۵) خطوط میدان الکتریکی در حضور گاردهای نواری ۶۶
- شکل (۲۲-۵) سطوح هم‌پتانسیل در حضور (شکل راست) و در غیاب (شکل چپ) گاردهای نواری ۶۶
- شکل (۲۳-۵) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در حضور پوشش محافظ ۶۷
- شکل (۲۴-۵) خطوط میدان الکتریکی در حضور پوشش محافظ ۶۸
- شکل (۲۵-۵) خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی برای پتانسیل جعبه $+1000\text{V}$ ۶۸
- شکل (۲۶-۵) خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی برای پتانسیل جعبه $+1500\text{V}$ ۶۹
- شکل (۲۷-۵) خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی برای پتانسیل جعبه $+2000\text{V}$ ۶۹
- شکل (۲۸-۵) خطوط میدان الکتریکی برای اختلاف پتانسیل 1000 V بین دو صفحه و پتانسیل پوشش محافظ $+250\text{ V}$ (شکل چپ)، $+500\text{ V}$ (شکل وسط) و پتانسیل $+750\text{ V}$ (شکل راست) ۷۰
- شکل (۲۹-۵) خطوط میدان الکتریکی برای اختلاف پتانسیل 2000 V بین دو صفحه و پتانسیل پوشش محافظ $+500\text{ V}$ (شکل چپ)، $+1000\text{ V}$ (شکل وسط) و پتانسیل $+1500\text{ V}$ (شکل راست) ۷۰
- شکل (۳۰-۵) خطوط میدان الکتریکی برای اختلاف پتانسیل 4000 V بین دو صفحه و پتانسیل پوشش محافظ $+1000\text{ V}$ (شکل چپ)، $+2000\text{ V}$ (شکل وسط) و پتانسیل $+3000\text{ V}$ (شکل راست) ۷۱
- شکل (۳۱-۵) منحنی تغییرات ضریب فرار الکترون بر حسب انرژی فوتون ورودی ۷۲

- شکل (۵-۳۲) منحنی تغییر ضریب پراکندگی فوتون بر حسب انرژی فوتون ورودی ۷۳
- شکل (۵-۳۳) منحنی تغییر ضریب پراکندگی دیافراگم بر حسب انرژی فوتون ورودی ۷۴
- شکل (۵-۳۴) منحنی تغییر ضریب عبور از بدنه دیافراگم و پوشش محافظ جلویی بر حسب انرژی فوتون ورودی ۷۵
- شکل (۶-۱) نمای کلی از اتاقک یونش FAC-IR-150 ۷۷
- شکل (۶-۲) نمای جلویی اتاقک یونش FAC-IR-150 ۷۹
- شکل (۶-۳) نمای پشت اتاقک یونش FAC-IR-150 ۷۹
- شکل (۶-۴) نمایی از یک گارد نواری ۸۰
- شکل (۶-۵) نمایی از عایق استفاده شده بین گاردهای نواری ۸۰
- شکل (۶-۶) نمایی از میله‌های فولادی نگه دارنده ۸۱
- شکل (۶-۷) نمایی از قرارگیری اتاقک یونش در مقابل چشمه Co^{60} از نمای جانبی ۸۳
- شکل (۶-۸) نحوه قرار گرفتن اتاقک یونش و چشمه Co^{60} از نمای طولی ۸۳
- شکل (۶-۹) نمایی از صفحه کنترل چشمه Co^{60} و الکترومتر ۸۴
- شکل (۶-۱۰) اتاقک یونش استاندارد PTW 23361 ۸۶
- شکل (أ-۱) نمایی از هندسه اندازه‌گیری HVL. در این شکل F_0 نقطه کانونی؛ S پنجره لامپ X؛ F فیلتر اضافی؛ A_1 ، A_2 و A_3 دریچه‌های عبور پرتو؛ M اتاقک شاهد؛ F_{HVL} ماده جاذب جهت اندازه‌گیری HVL؛ D آشکارساز و P نقطه اندازه‌گیری است [۱۴] ۸۹
- شکل (أ-۲) تعیین HVL_1 و HVL_2 با استفاده از منحنی کرمای هوا [۱۴] ۹۱

جدول (۱-۲) مشخصات گرمایی آب و گرافیت: ρ چگالی، k رسانایی گرمایی، α ضریب پخش گرمایی [۹]	۱۵
جدول (۲-۲) مشخصات کیفیت‌های مرجع پرتو X در ناحیه تشخیصی [۱۴]	۲۰
جدول (۳-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQR [۱۴]	۲۱
جدول (۴-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQA [۱۴]	۲۱
جدول (۵-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQT [۱۴]	۲۱
جدول (۶-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQR-M [۱۴]	۲۲
جدول (۷-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQA-M [۱۴]	۲۲
جدول (۱-۳) مقادیر ثابت ρ_{air} و W_{air}/e در رابطه (۱-۳) [۱۸]	۲۶
جدول (۲-۳) مقادیر ضریب R و جرم مولی گاز برای هوای خشک و بخار آب	۲۷
جدول (۱-۵) داده‌های مربوط به توان توقف الکترون و برد الکترون در هوای خشک [۵]	۴۷
جدول (۲-۵) مقادیر m_w بر حسب گرم در طوبت نسبی مختلف	۵۴
جدول (۳-۵) مقادیر ضریب X و چگالی هوای مرطوب در رطوبت‌های نسبی مختلف	۵۴
جدول (۴-۵) نسبت W_h / W_d در رطوبت‌های نسبی مختلف [۳۰]	۵۵
جدول (۱-۶) پارامترهای هندسی اتاقک یونش FAC-IR-150	۷۸
جدول (۲-۶) مقایسه ابعاد نهایی این کار با ابعاد اتاقک یونش NIST و BIPM	۸۱
جدول (۳-۶) ضرایب تصحیح اتاقک یونش FAC-IR-150 برای انرژی گامای ^{60}Co	۸۲
جدول (۴-۶) داده‌های اندازه‌گیری شده اتاقک یونش FAC-IR-150	۸۵
جدول (۵-۶) داده‌های اندازه‌گیری شده توسط اتاقک یونش استاندارد	۸۵
جدول (۶-۶) گرمای هوا برای اتاقک یونش استاندارد	۸۶
جدول (۱-أ) مشخصات پیشنهادی اتاقک‌های کلاس مرجع همراه با کاربردهای آنها [۱۴]	۹۰
جدول (۱-ب) کیفیت پرتو X مرجع تهیه شده توسط NIST [۱۵]	۹۲
جدول (۲-ب) کیفیت‌های مرجع پرتوهای X تهیه شده توسط ISO [۱۵]	۹۳

فصل اوّل

مقدمه

۱-۱ مقدمه

پرتو X در سال ۱۸۹۵ توسط ویلیام رونتگن^۴ فیزیکدان آلمانی کشف شد و بخاطر همین کشف برنده نخستین جایزه نوبل سال ۱۹۰۱ گردید [۲]. در مدت زمان کوتاهی کشف شد که می‌توان از پرتو پرتو X در درمان طیف گسترده‌ای از بیماری‌های خوش خیم و یا خطرناک استفاده کرد. امروزه پرتو X کاربردهای وسیعی در زمینه‌های پزشکی (تشخیصی و یا درمانی)، صنعت (تصویربرداری صنعتی) و تحقیقات پیدا نموده است، بطوری‌که فعالیت در این زمینه‌ها بدون بکارگیری پرتو X ناممکن یا سخت است. گستره ولتاژ کاری دستگاه‌های مولد اشعه X مورد استفاده در کاربردهای درمانی بین 10 kV تا 400 kV می‌باشد. از نظر تاریخی پرتوهای X مورد استفاده در بخش درمان به چهار دسته تقسیم می‌شوند [۲]:

۱- پرتوهای گرنز^۵، ولتاژ کاری لامپ اشعه X در گستره 10 kV تا 20 kV؛

۲- درمان تماسی، ولتاژ کاری لامپ اشعه X در گستره تا 50 kV؛

۳- درمان سطحی، ولتاژ کاری لامپ اشعه X در گستره 50 kV تا 150 kV؛

۴- درمان عمقی، ولتاژ کاری لامپ اشعه X در گستره 150 kV تا 400 kV.

در کاربردهای صنعتی، روش آزمایش پراش اشعه ایکس یکی از مهم‌ترین روش‌های غیر مخرب به‌منظور بدست آوردن اطلاعات در مورد ساختار و ترکیب یک ماده خاص و یا تهیه تصویر در سطح مولکولی می‌باشد.

⁴ Wilhelm Roentgen

⁵ Grenz rays

مهم‌ترین وسیله جهت اندازه‌گیری پرتو X اتاقک یونش می‌باشد. اتاقک یونش نخستین بار توسط ماری و پیر کوری در تحقیقات اولیه روی جداسازی مواد رادیواکتیو مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۱-۱) نمونه‌ای از اتاقک یونش ساخته شده توسط پیر کوری را نشان می‌دهد [۳].

ساختار کلی اتاقک‌های یونش از دو الکترود استوانه‌های هم مرکز و یا دو صفحه تخت موازی تشکیل شده است. معمولاً بین این دو الکترود از هوا پر شده است. از آن زمان به بعد اتاقک یونش کاربرد وسیعی در آزمایشگاه‌های استاندارد جهت کاربردهای تحقیقاتی و کالیبراسیون پیدا کرده است.



شکل (۱-۱) نمونه‌ای از اتاقک یونش ساخته شده توسط پیر کوری، ۱۸۹۵-۱۹۰۰ [۳]

۱-۲ برهمکنش فوتون با ماده

برهمکنش فوتون با ماده از طریق فرآیندهای مختلفی صورت می‌گیرد. احتمال رویداد هر برهمکنش به انرژی فوتون ورودی ($h\nu$) و عدد اتمی ماده (Z) وابسته است. مهم‌ترین اندرکنش‌هایی که در حوزه رادیوتراپی (محدوده انرژی کمتر از 20 MeV) مورد توجه می‌باشند عبارتند از: اثر فوتو

الکتریک، پراکندگی کامپتون (پراکندگی ناهمدوس)، پراکندگی رایلی (پراکندگی همدوس) و تولید زوج (دوگانه و یا سه گانه).

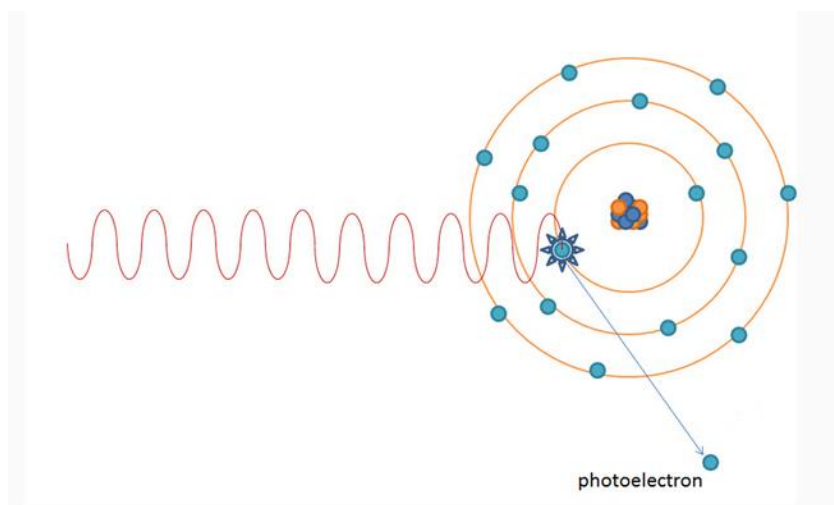
فوتون‌ها می‌توانند با الکترون‌های مداری اتم (پراکندگی کامپتون و تولید زوج سه گانه)، کل اتم (اثر فوتوالکتریک و پراکندگی رایلی) و یا با هسته اتم (تولید زوج دوگانه) اندرکنش کنند. نتیجه برهمکنش می‌تواند منجر به انتقال انرژی فوتون به یک الکترون مداری اتم (اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج سه گانه)، پراکندگی فوتون (اثر کامپتون و پراکندگی رایلی) و یا جذب فوتون (اثر فوتوالکتریک، تولید زوج دوگانه و سه گانه) شود. در ادامه هر کدام از چهار برهمکنش اصلی اشاره شده در بالا بطور مختصر توضیح داده می‌شود.

۱-۲-۱ اثر فوتوالکتریک

در پدیده فوتوالکتریک، فوتون با یک الکترون مقید برهمکنش می‌کند. در طول این فرآیند، فوتون کاملاً جذب شده و الکترون با انرژی جنبشی E_e آزاد می‌شود. شکل (۱-۲) نمودار طرح‌وار اثر فوتوالکتریک را نشان می‌دهد. انرژی جنبشی الکترون از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_e = h\nu - E_B \quad (1-1)$$

در رابطه (۱-۱)، E_B انرژی بستگی الکترون مقید می‌باشد. همانطور که در شکل (۱-۶) مشاهده می‌شود، جذب فوتوالکتریک در هوا برای پرتوهای فوتون با انرژی کم برهمکنش غالب است. ضریب تضعیف اثر فوتوالکتریک در سطح میکروسکوپی (τ) با توان سوم عدد اتمی متناسب (Z^3) و با توان سوم انرژی رابطه معکوس ($(h\nu)^{-3}$) دارد. در انرژی‌های پایین اثر فوتوالکتریک پدیده غالب بوده و با افزایش انرژی احتمال رویداد آن به سرعت کاهش پیدا می‌کند [۴].



شکل (۲-۱) طرح کلی از اثر فوتوالکتریک

۱-۲-۲ پراکندگی کامپتون

پراکندگی کامپتون برهمکنش بین فوتون و یک الکترون با وابستگی خیلی کم می‌باشد. در طی این فرآیند جهت و انرژی فوتون اولیه تغییر کرده و یک الکترون تحت زاویه معین ϕ پراکنده می‌شود. شکل (۳-۱) نمودار طرح‌وار از پراکندگی کامپتون را نشان می‌دهد. پراکندگی کامپتون در هوا در گستره انرژی میانی روی می‌دهد (شکل (۶-۱)). اگر مطابق شکل (۳-۱) فوتون تحت زاویه θ نسبت به جهت ورود پراکنده شود، انرژی فوتون پراکنده شده ($h\nu'$)، انرژی الکترون پراکنده شده (T_e) و زاویه پراکندگی فوتون (ϕ) از رابطه زیر بدست می‌آیند:

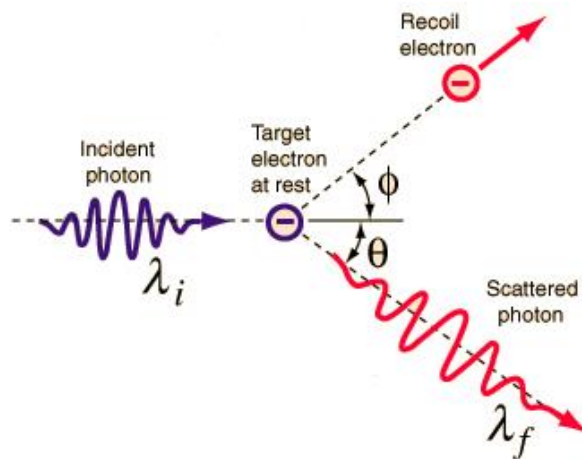
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (1 - \cos\theta)\alpha}, \quad \alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2} \quad (۲-۱)$$

$$T_e = h\nu - h\nu' \quad (۳-۱)$$

$$\cot\phi = (1 + \alpha) \tan \frac{\theta}{2} \quad (۴-۱)$$

در رابطه (۲-۱)، m_e جرم سکون الکترون می‌باشد. ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون (δ_c) مستقل

از عدد اتمی ماده بوده و با افزایش انرژی فوتون ورودی کاهش پیدا می‌کند [۴].



شکل (۳-۱) نمای کلی از پراکندگی کامپتون [۴]

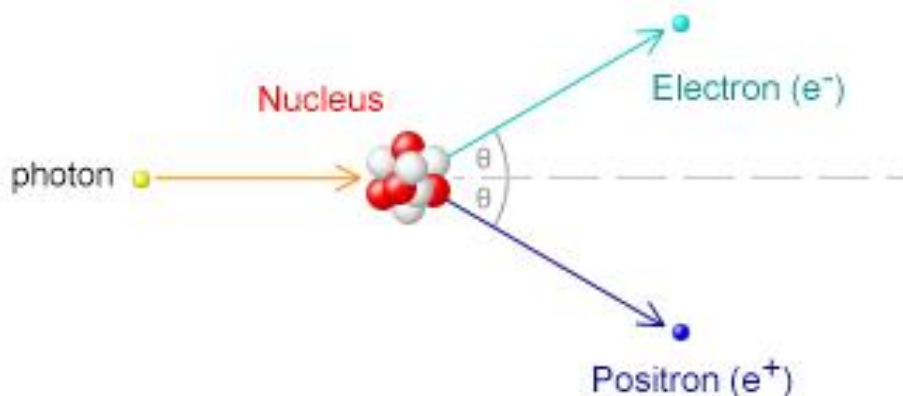
۱-۲-۳ پراکندگی رایلی

پراکندگی رایلی، گاهی پراکندگی همدوس هم نامیده می‌شود. این پراکندگی کاملاً کشسان بوده و هیچ انرژی به محیط منتقل نمی‌کند. در طی این فرآیند فوتون ورودی با کل اتم برهمکنش کرده و با زاویه کوچک θ نسبت به راستای فوتون ورودی پراکنده می‌شود. ضریب تضعیف پراکندگی رایلی (δ_R) با عدد اتمی ماده هدف متناسب (Z) و با توان دوم انرژی فوتون ورودی $(h\nu)^2$ رابطه عکس دارد.

۱-۲-۴ تولید زوج دوگانه و سه گانه

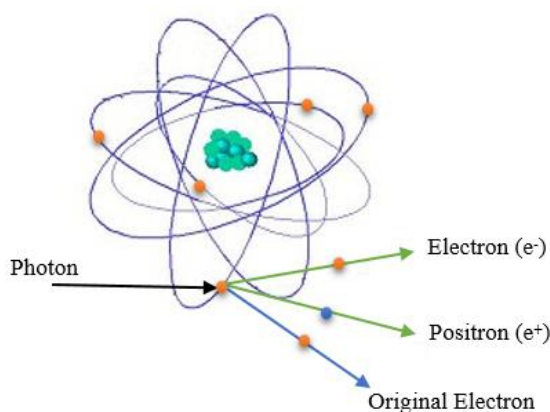
اندرکنش تولید زوج بین فوتون ورودی و یک میدان کولونی روی می‌دهد. این پدیده به دو صورت ظاهر می‌شود: تولید زوج دوگانه و تولید زوج سه گانه. تولید زوج دوگانه برهمکنش بین فوتون و میدان کولونی هسته می‌باشد در حالی که تولید زوج سه گانه برهمکنش بین فوتون و میدان کولونی الکترون مداری اتم است. در فرآیند تولید زوج دوگانه، فوتون کاملاً نابود شده و انرژی معادل $2m_e c^2$ صرف تولید زوج الکترون-پوزیترون می‌شود. شکل (۴-۱) نمودار طرح‌وار از اندرکنش تولید زوج دوگانه را

نشان می‌دهد. در تولید زوج دوگانه باقی مانده انرژی معادل $h\nu - 2m_e c^2$ بین زوج تولیدی تقسیم شده و بصورت انرژی جنبشی زوج‌ها نمایان می‌شود.



شکل (۴-۱) نمای کلی از اندرکنش تولید زوج دوگانه

در تولید زوج سه‌گانه انرژی باقی مانده فوتون بین الکترون مداری آزاد شده و جفت تولیدی تقسیم می‌شود. شکل (۵-۱) نمودار طرح‌وار از تولید زوج سه‌گانه را نشان می‌دهد. بر خلاف سه‌اندرکنش قبلی اندرکنش‌های تولید زوج دارای انرژی آستانه می‌باشند، این انرژی آستانه در واکنش تولید زوج دوگانه برابر با $2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$ و در واکنش تولید زوج سه‌گانه برابر با $4m_e c^2 = 2.044 \text{ MeV}$ است. ضریب تضعیف تولید سه‌گانه معمولاً کوچکتر از ضریب تضعیف تولید دوگانه است و با افزایش انرژی نسبت تولید سه‌گانه به دوگانه افزایش پیدا می‌کند. در کاربردهای دزیمتری معمولاً ضرایب تضعیف دوگانه و سه‌گانه را بصورت ضریب تضعیف تولید زوج (K) نشان می‌دهند. ضریب تضعیف تولید زوج (K) با عدد اتمی ماده (Z) و انرژی فوتون ورودی ($h\nu$) رابطه مستقیم دارد [۴].



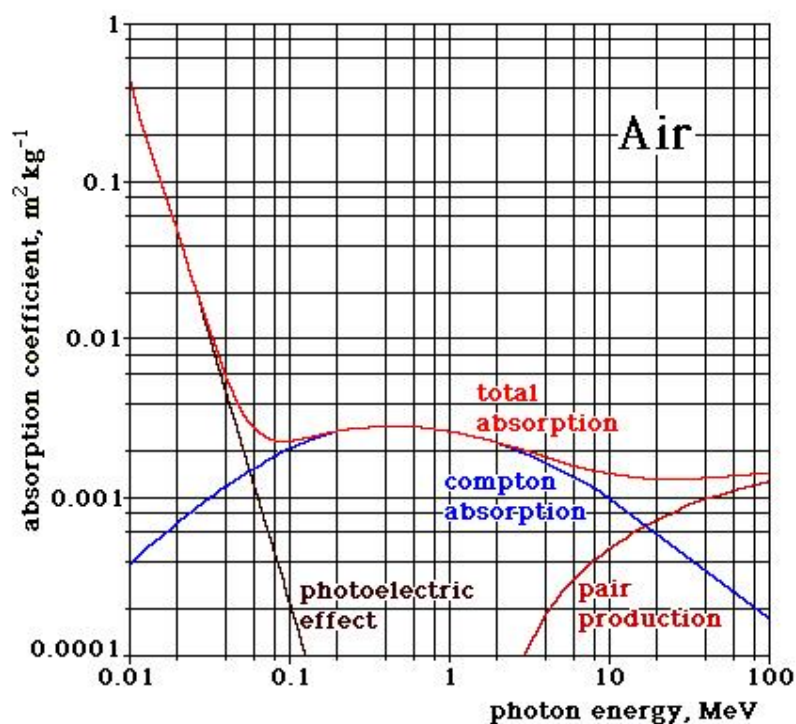
شکل (۵-۱) نمای کلی از اندرکنش تولید زوج سه گانه

۵-۲-۱ ضریب تضعیف کلی

ضریب تضعیف کلی (μ) از حاصل جمع ضرایب تضعیف چهارگانه که در بالا به آنها اشاره شد بدست می آید:

$$\mu = \tau + \delta_c + \delta_R + \kappa \quad (۵-۱)$$

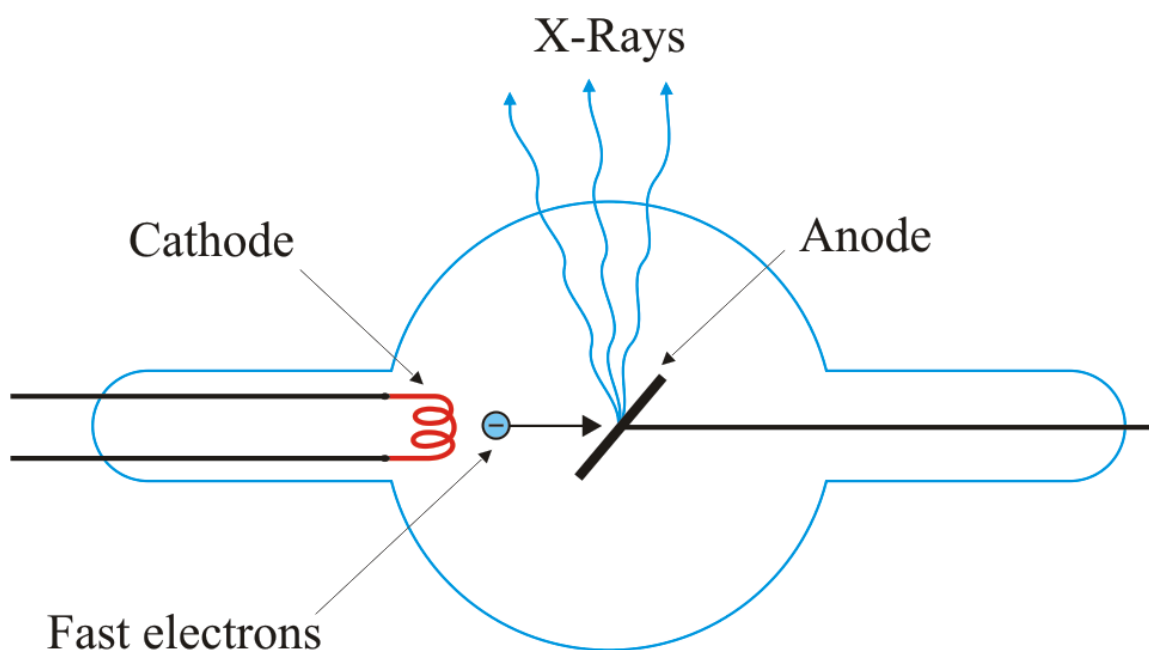
معمولاً در جدول های استاندارد، ضریب تضعیف کلی (μ) را بصورت ضریب تضعیف جرمی (μ/ρ) نشان می دهند که ρ چگالی ماده می باشد. علت بیان ضریب تضعیف به صورت ضریب تضعیف جرمی، مستقل از حالت ماده بودن ضریب تضعیف جرمی است. شکل (۶-۱) نمونه ای از این داده ها را برای هوا نشان می دهد [۵].



شکل (۶-۱) نمودار ضرایب تضعیف برای هوای خشک [۵]

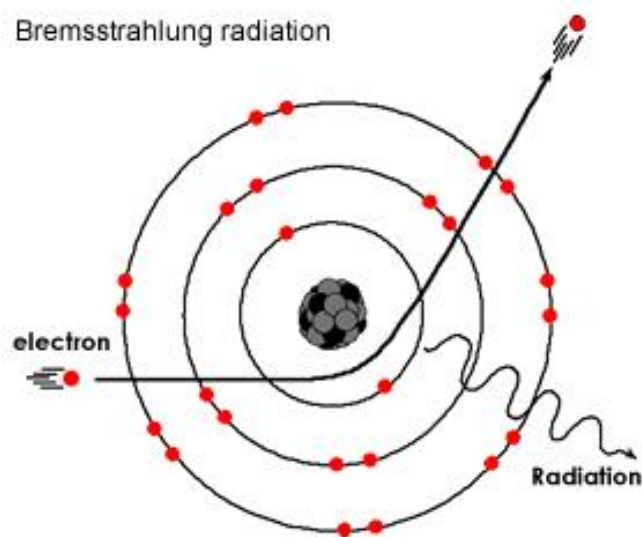
۱-۳ مروری بر مولد پرتو X

در حالت کلی، پرتو X از طریق تبدیل بخشی از انرژی جنبشی الکترون‌های پر انرژی به فوتون طی فرآیند تابش ترمزی^۶ تولید می‌شود. مطابق شکل (۷-۱)، یک مولد نوعی پرتو X از یک محفظه شیشه‌ای با خلاء بالا تشکیل شده است و دو الکتروند آند و کاتد در آن قرار دارد. به منظور شتاب دادن الکترون‌های تولید شده در کاتد، یک اختلاف پتانسیل بالا بین دو الکتروند برقرار است. الکترون‌های تولید شده در کاتد تحت تأثیر این میدان الکتریکی شتاب گرفته و در اثر برخورد با آند طی فرآیند تابش ترمزی که در شکل (۸-۱) نشان داده شده است، بخشی از انرژی جنبشی خود را بصورت تابش گسیل می‌کنند.



شکل (۷-۱) نمای کلی از یک لامپ اشعه X

^۶ Bremsstrahlung



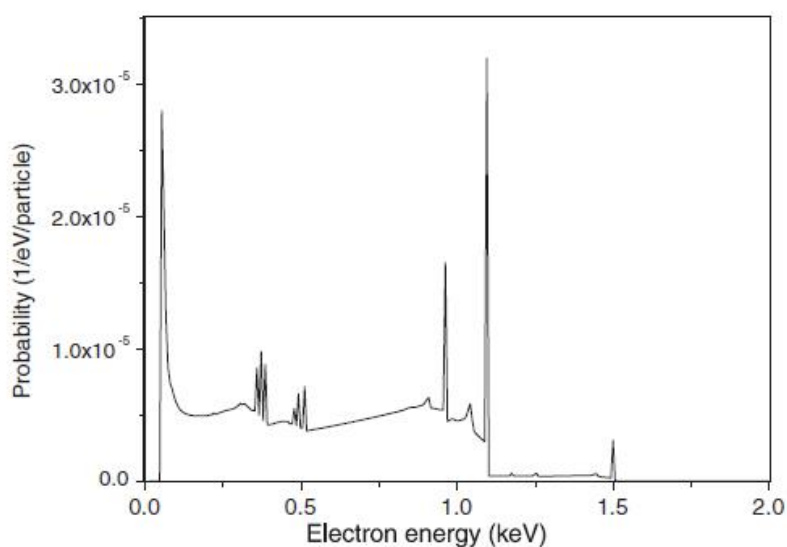
شکل (۸-۱) نمای کلی از فرآیند تابش ترمزی

جنس آند بسته به نوع کاربرد لامپ پرتو X می‌تواند از جنس تنگستن، مولیبدن و یا مس باشد. راندمان تولید پرتو X معمولاً پایین (در حدود ۰.۱٪) بوده و باقی مانده انرژی جنبشی الکترون‌ها بصورت گرما ظاهر می‌شود. مطابق شکل (۹-۱)، طیف پرتو X خروجی یک طیف پیوسته است و بوسیله سه پارامتر کنترل می‌شود: اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد (kV)، جریان تیوپ (mA) و زمان (S). لامپ پرتو X بسته به کاربرد مد نظر دارای طراحی‌های مختلفی است.

سه پارامتر اصلی یک مولد اشعه X عبارتند از: بیشینه پرتو X خروجی، نقطه کانونی^۷ و گرمای تولید شده. نقطه کانونی مطابق شکل (۱۰-۱) مساحتی از هدف است که توسط الکترون بمباران می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد چون بخش زیادی از انرژی الکترون‌ها در آند به صورت گرما آزاد می‌شود در نتیجه به‌منظور جلوگیری از صدمه دیدن هدف نقطه کانونی باید بزرگ باشد. به‌منظور

⁷ Focal Spot

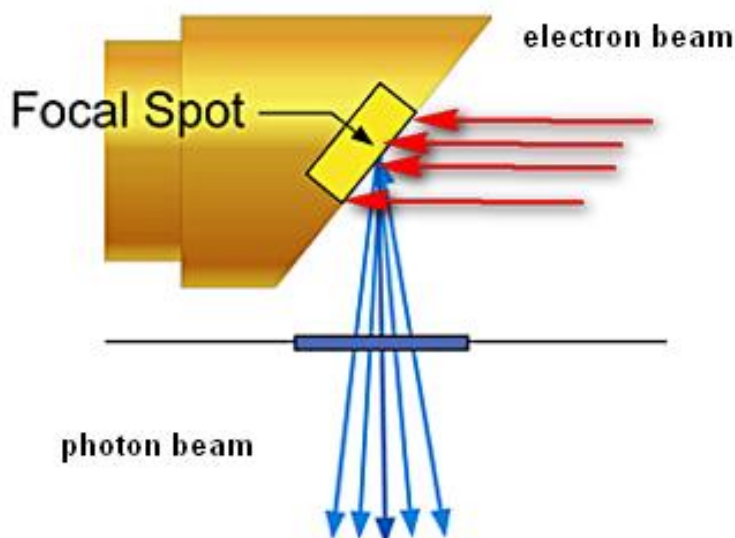
پخش گرمای تولید شده در کاتد بر روی سطح بزرگتر، هدف بصورت دوار طراحی می‌شود. از طرف دیگر برای یک رادیوگرافی خوب کوچک بودن نقطه کانونی الزامی است. برای رعایت هر دو الزام بالا (بزرگ بودن سطح مقطع برخورد به هدف به منظور پخش گرما و کوچک بودن نقطه کانونی) همان‌طور که در شکل (۷-۱) نشان داده شده است در طراحی لامپ اشعه X هدف معمولاً نسبت به



صفحه الکترون‌های ورودی دارای زاویه است. علت این مسئله در این است که ضمن کوچک ماندن نقطه کانونی، الکترون‌ها با سطح بزرگتری از هدف برخورد داشته باشند.

شکل (۹-۱) طیف الکترون‌های ثانویه حاصل از فوتون انرژی 1.5 keV [۶]

شکل (۱۰-۱) نمای کلی از نقطه کانونی در لامپ اشعه X



فصل دوم

استاندارد اولیه و دزیمتری

۲-۱ مقدمه

دز جذبی برابر است با انرژی جذب شده بر واحد جرم ماده [۷]. هر ابزاری که بتواند معیاری از انرژی انباشته شده در حجم حساس خود را در خروجی به‌ما بدهد دزیمتر نامیده می‌شود. در کاربردهای مختلف پرتو نیازمند استفاده از دزیمترهای دقیق هستیم که بر مبنای استانداردهای تعریف توسط مراجع مربوطه کار می‌کنند. تعیین دز تابش با استفاده از دزیمتر استاندارد، دزیمتری نام دارد. دزیمتری به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: دزیمتری مطلق و دزیمتری نسبی. دزیمتری مطلق^۸، دز جذبی تابش در یک ماده معین را بطور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند. دزیمتری مطلق گاهی کالیبراسیون نیز نامیده می‌شود. دزیمتری مطلق باید تحت شرایط مرجع انجام گیرد، به‌همین دلیل معمولاً نیاز به ضرایب تصحیح جهت اصلاح هرگونه انحراف از شرایط مرجع است. اما در دزیمتری نسبی^۹ تنها دز جذبی بدست آمده توسط ۲ دزیمتر باهم مقایسه می‌شود و نیاز به اعمال ضریب تصحیح نیست. در دزیمتری نسبی یکی از دزیمترها باید در شرایط مرجع قرار داشته باشد.

دزیمتری مطلق در دو سطح استاندارد اولیه و استاندارد ثانویه انجام می‌گیرد. استاندارد اولیه بالاترین دقت ممکن از یک کمیت خاص را بر اساس تعریف آن به ما می‌دهد. استاندارد اولیه نباید زیر مجموعه یک استاندارد دیگر باشد و یا نسبت به آن کالیبره شود. استاندارد ثانویه یا استاندارد کاری در برابر استاندارد اولیه کالیبره می‌شود.

^۸ Absolute dosimetry

^۹ Relative dosimetry

۲-۲ استاندارد اولیه در دزیمتری تابش

روش‌های دزیمتری مطلق در سطح استاندارد اولیه عبارتند از: کالریمتری، دزیمتری شیمیایی و اتاقک یونش هوای آزاد [۱]. در ادامه به توضیح مختصری در ارتباط با این روش‌ها می‌پردازیم.

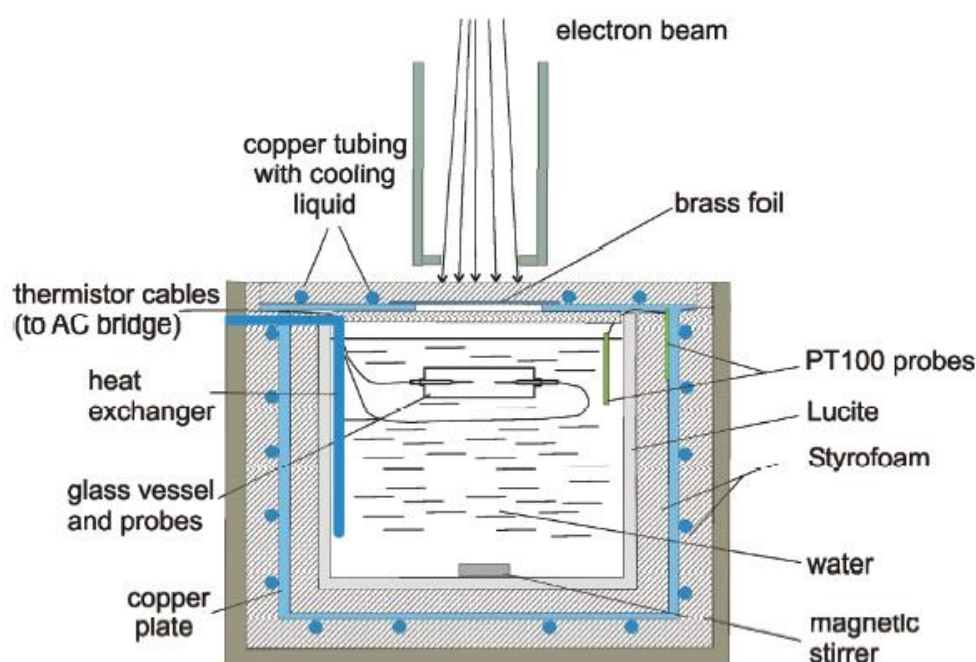
۲-۲-۱ کالریمتری

روش کالریمتری به عنوان استاندارد اولیه اندازه‌گیری دز جذبی پرتوهای X مگاولتاژ (پرتوهایی با پتانسیل تولید 1 MV و بالاتر)، تابش گامای ^{60}Co و پرتوهای پروتون بکار می‌رود. کالریمتری یعنی اندازه‌گیری مستقیم افزایش دما ناشی از انباشت انرژی پرتو (فوتون یا ذرات باردار) در یک محیط جاذب (معمولاً آب یا گرافیت). همانطور که جدول (۱-۲) نشان می‌دهد افزایش دمای ایجاد شده ناشی از انباشت تابش در ماده جاذب اندک است. افزایش دما توسط یک (یا دو) دماسنج حساس اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (۱-۲) به دز جذبی محیط ربط داده می‌شود [۸]:

$$\bar{D} = \frac{C \Delta T}{1 - \delta} \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲)، C گرمای ویژه محیط جاذب، ΔT تغییرات دمایی ناشی از تابش پرتو و δ ضریب شکست گرمایی محیط (کسری از انرژی تابش تابیده شده که صرف واکنش‌های شیمیایی در محیط جاذب می‌شود) می‌باشد. شکل (۱-۲) نمای کلی از یک کالریمتر آبی را نشان می‌دهد [۸].

جدول (۱-۲) اطلاعات کلی در ارتباط با دو ماده اصلی بکار گرفته شده در کالریمتر یعنی آب و گرافیت را نشان می‌دهد. افزایش دما در جدول (۱-۲)، به ازای هر 1 Gy تابش ورودی به ماده جاذب می‌باشد [۹].



شکل (۱-۲) نمای کلی از یک کالریمتر آبی [۸]

جدول (۱-۲) مشخصات گرمایی آب و گرافیت: ρ چگالی، k رسانایی گرمایی، α ضریب پخش گرمایی [۹]

Material	ρ (kg m ⁻³)	C (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	k (J s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	α (m ² s ⁻¹)	$\Delta T/D$ (mK Gy ⁻¹)
Water	998	4180	0.602	1.44×10^{-7}	0.24
Graphite	1770	725	135	1.05×10^{-4}	1.4

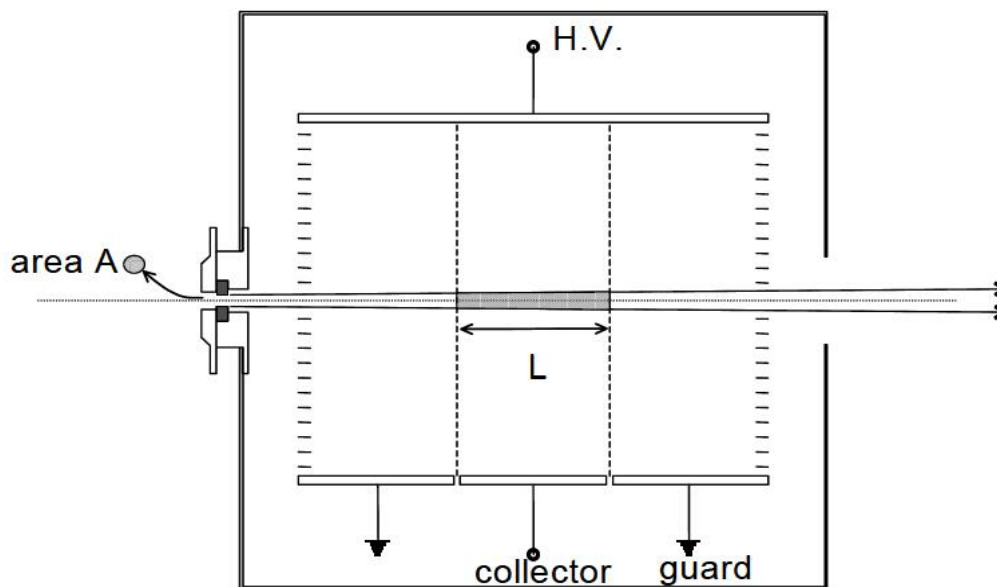
۲-۲-۲ دزیمتری شیمیایی

دزیمتری شیمیایی بر این اصل استوار است که دز انباشته شده در یک ماده سبب ایجاد تغییرات شیمیایی در آن می‌شود. هدف اصلی در این روش، اندازه‌گیری میزان تغییرات شیمیایی ایجاد شده و ارتباط دادن آن به دز جذبی می‌باشد. ماده‌ای که بیشتر در این نوع از دزیمترها مورد استفاده قرار می‌گیرد Ferrous sulphate نام دارد. به همین دلیل این نوع از دزیمترها به نام دزیمتر فریک شناخته می‌شوند. واکنش اصلی در دزیمتر فریک، اکسیداسیون یون Ferrous (Fe^{+2}) و تبدیل شدن آن به یون Ferric (Fe^{+3}) تحت تأثیر تابش ورودی است. یون‌های Fe^{+3} جذب بالایی در طول موج 304 nm از

خود نشان می‌دهند. میزان یونهای Fe^{+3} قبل و بعد از پرتودهی با اندازه‌گیری چگالی اپتیکی محلول تعیین می‌شود. از مزایای دزیمترهای فریک معادل آب بودن آن است.

۲-۲-۳ اتاقک یونش هوای آزاد

اندازه‌گیری مستقیم انرژی آزاد شده توسط تابش ورودی در هوا ممکن نیست، در عوض انرژی آزاد شده در هوا از طریق اندازه‌گیری یونیزاسیون ایجاد شده بدست می‌آید. ابزار استاندارد جهت دزیمتری مرجع برای پرتوهای X کیلو وولتاژ، اتاقک یونش هوای آزاد می‌باشد. یک اتاقک یونش هوای آزاد صفحه موازی، شامل دو الکتروود اصلی موازی می‌باشد که با اعمال پتانسیل الکتریکی به آنها، کار جمع‌آوری بار انجام می‌شود. شکل (۲-۲) طرح کلی از یک اتاقک یونش هوای آزاد را نشان می‌دهد. فوتون‌های تولید شده توسط لامپ اشعه X از طریق روزنه دیافراگم وارد اتاقک یونش می‌شوند، به این فوتون‌ها که هنوز اندرکنشی انجام نداده‌اند، فوتون‌های اولیه گفته می‌شود. برهمکنش فوتون‌های اولیه با ملکول‌های هوا سبب ایجاد الکترون‌های ثانویه می‌شود. در گستره کاری اتاقک‌های یونش هوای آزاد، بر همکنش غالب اندرکنش‌های فوتوالکتریک و کامپتون هستند و احتمال رویداد تولید زوج وجود ندارد. به منظور جمع‌آوری الکترون‌های تولید شده در داخل حجم حساس اتاقک، یک میدان الکتریکی در فضای بین الکتروودها ایجاد می‌شود. طراحی و ساخت اتاقک یونش هوای آزاد هدف اصلی این پروژه بوده و در فصل‌های بعد بیشتر در مورد آن بحث می‌کنیم.



شکل (۲-۲) نمای کلی از یک اتاقک یونش هوای آزاد [۹]

۲-۳ پرتوگیری و کرمای هوا

مهم‌ترین کمیت در دزیمتری، پرتوگیری X ،^{۱۰} است. این کمیت تنها برای فوتون‌ها تعریف می‌شود.

پرتوگیری بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (۲-۲)$$

در رابطه (۲-۲)، dQ بار آزاد شده و dm جرم ماده جاذب است. بار حاصل از فوتون‌های ثانویه مانند

فوتون‌های ناشی از تابش ترمزی در این تعریف قرار نمی‌گیرند. واحد قدیمی پرتوگیری که در سال

۱۹۲۸ تعیین شد، رونتگن^{۱۱} (R) می‌باشد. طبق تعریف هر رونتگن برابر است با مقدار تابشی که در هر

1 cm^3 از هوا در شرایط دما و فشار استاندارد، برابر 1 esu بار تولید کند ($1 \text{ esu} = 3.335 \times 10^{-10} \text{ C}$).

¹⁰ Exposure

¹¹ Roentgen

واحد جدید پرتوگیری در سیستم بین‌المللی واحدها^{۱۲} (SI) کولن بر کیلوگرم (C/kg) است. رابطه این دو واحد بصورت زیر بیان می‌شود:

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} \frac{C}{kg} \quad (3-2)$$

کمیت دیگری که در دزیمتری تابش اهمیت دارد کرما^{۱۳} می‌باشد. کرما تنها برای تابش‌های غیر باردار (فوتون و یا نوترون) تعریف می‌شود [۱۰]. کرما برابر است با مجموع انرژی جنبشی اولیه آزاد شده توسط ذرات باردار که بوسیله اندرکنش پرتو با ماده تولید شده‌اند [۱۱]. کرما رابطه نزدیکی با پرتوگیری دارد و در عمل کرما را از طریق اندازه‌گیری پرتوگیری و ضرب کردن متوسط انرژی مورد نیاز جهت تولید هر جفت یون بدست می‌آید [۱۱]:

$$K_{air} = \frac{(W_{air/e})}{(1-g)} X \quad (4-2)$$

در رابطه (۴-۲) W_{air} متوسط انرژی مورد نیاز برای تولید هر جفت یون در هوا، e بار الکترون و g کسری از انرژی جنبشی ذره باردار که به صورت تابش ترمزی هدر می‌رود. واحد کرما در SI مطابق دستورالعمل سال ۲۰۰۶ گری^{۱۴} (Gy) است. طبق تعریف هر گری مقدار پرتویی است که در هر کیلوگرم از ماده جاذب انرژی معادل ۱ ژول آزاد کند [۱۲].

۴-۲ آزمایشگاه استاندارد

به‌منظور کالیبراسیون دزیمترها جهت کنترل خروجی دستگاههای مولد اشعه، مراکزی بنام آزمایشگاه‌های دزیمتری استاندارد تأسیس شده‌اند. این آزمایشگاه‌ها در دو سطح آزمایشگاه دزیمتری استاندارد اولیه (PSDL) و آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه (SSDL) فعالیت می‌کنند. در سلسله

¹² International System of Units

¹³ KERMA: Kinetic Energy Released per Mass

¹⁴ Gray

مراتب استاندارد، استاندارد اولیه در قله قرار داشته و دقت تمام نتایج به دقت آن وابسته است. اگرچه ممکن است مراکز استاندارد اولیه از روش‌های مختلفی برای بدست آوردن کمیت مورد نظر استفاده کنند، اما تطابق نتایج آنها باید بسار خوب (در حد ۱٪) باشد [۹]. تمامی مراکز SSDL باید با یک مرکز PSDL بصورت مستقیم یا غیر مستقیم در ارتباط باشند. روش کار به این صورت است که بعد از معرفی یک استاندارد در PSDL و تعیین یک روش و ابزار جهت تعیین آن کمیت، مراکز SSDL مطابق با آن به ارائه خدمات کالیبراسیون به کاربران پرتو می‌پردازد. آزمایشگاه SSDL باید تجهیزات اندازه‌گیری خود را در بازه‌های زمانی معین به مراکز PSDL فرستاده تا صحت خوانش آنها تأیید شود. در ایران آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه در مجتمع پژوهشی البرز واقع در کرج قرار دارد. این آزمایشگاه بر اساس استانداردهای تعریف شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [۱] به کاربران پرتو خدمات ارائه می‌کند.

۵-۲ کیفیت پرتو X

تعیین مشخصات کامل پرتو X نیازمند بررسی توزیع طیفی پرتو است. اما این توزیع طیفی به تجربه کاری بالا و صرف زمان زیاد نیازمند است. امروزه کیفیت پرتو X مطابق با استانداردهای IAEA، با استفاده از پارامترهای زیر بیان می‌شود:

- ۱- پتانسیل کاری لامپ اشعه X که بر حسب kV تعریف می‌شود؛
- ۲- ضخامت نیم لایه^{۱۵} (HVL) که معمولاً بر حسب میلیمتر آلومینیوم برای پرتو X کم انرژی و یا میلیمتر مس برای پرتو X انرژی متوسط بیان می‌شود [۱۳]؛
- ۳- ضریب همگنی (h) که بصورت حاصل تقسیم HVL_1 به HVL_2 تعریف می‌شود.

¹⁵ HVL: Half Value Layer

HVL_1 و HVL_2 بترتیب به صورت مقدار ضخامتی از ماده که شدت پرتوهای اولیه را به نصف و یک چهارم مقدار اولیه کاهش می دهند تعریف می شوند. جهت تعیین HVL باید از پرتو باریک استفاده شود (در پیوست الف روش اندازه گیری HVL آمده است).

۲-۵-۱ پرتوهای مرجع

جدول (۲-۲) مطابق استاندارد TRS 457، کیفیت های مرجع پرتو X مورد نیاز جهت کالیبراسیون در سطح رادیولوژی تشخیصی را نشان می دهد [۱۴].

جدول (۲-۲) مشخصات کیفیت های مرجع پرتو X در ناحیه تشخیصی [۱۴]

کاربرد	فیلتر اضافی	نوع تابش	کیفیت تابش
رادیوگرافی عمومی، فلوروسکوپی و رادیوگرافی دندان	-	تابش خارج شده از مولد پرتو X	RQR
شبیه سازی پرتو عبوری از بدن بیمار	آلومینیوم	تابش با فیلتر اضافه	RQA
شبیه سازی تضعیف پرتو در کاربردهای CT	مس	تابش با فیلتر اضافه	RQT
کاربردهای ماموگرافی	-	تابش خارج شده از مولد پرتو X	RQR-M
مطالعات ماموگرافی	آلومینیوم	تابش با فیلتر اضافه	RQA-M

۲-۵-۲ ویژگی سری های پرتو X

در کاربردهای عملی هر کدام از پنج کیفیت اصلی اشاره شده در جدول (۲-۲) خود به زیر قسمت های مختلفی تقسیم می شوند. در جدول (۳-۲) زیر قسمت های سری RQR، برای گستره رادیوگرافی عمومی، فلوروسکوپی و رادیوگرافی دندان آمده است. این دسته از پرتوها توسط لامپ X با آند تنگستن تولید می شوند. در جدول (۴-۲) زیر قسمت های سری RQA آمده است. سری RQA به منظور شبیه سازی پرتو عبوری در پشت بیمار مورد استفاده قرار می گیرد. جدول (۵-۲) زیر قسمت های سری RQT که در شبیه سازی های مربوط به تضعیف پرتو در CT بکار می رود را نشان می دهد. کیفیت های مرجع RQR-M و RQA-M که در ماموگرافی بکار می روند در جدول (۶-۲) و

جدول (۷-۲) آمده‌اند. جهت کاربردهای ماموگرافی از لامپ X با آند مولیبدن استفاده می‌شود. همانطور که در این جداول نشان داده شده است در هر سری یک کیفیت پرتو به عنوان کیفیت پرتو مرجع تعیین شده است [۱۴].

جدول (۳-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQR [۱۴]

کیفیت تابش	ولتاژ لامپ اشعه X (kV)	HVL ₁ (mm Al)	ضریب همگنی (h)
RQR 2	40	1.42	0.81
RQR 3	50	1.78	0.76
RQR 4	60	2.19	0.74
RQR 5 *	70	2.58	0.71
RQR 6	80	3.01	0.69
RQR 7	90	3.48	0.68
RQR 8	100	3.97	0.68
RQR 9	120	5.00	0.68
RQR 10	150	6.57	0.72
* کیفیت تابش مرجع در کاربردهای رادیوگرافی عمومی			

جدول (۴-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQA [۱۴]

کیفیت تابش	ولتاژ لامپ اشعه X (kV)	فیلتر اضافی (mm Al)	HVL ₁ (mm Al)
RQA 2	40	4	2.2
RQA 3	50	10	3.8
RQA 4	60	16	5.4
RQA 5 *	70	21	6.8
RQA 6	80	26	8.2
RQA 7	90	30	9.2
RQA 8	100	34	10.1
RQA 9	120	40	11.6
RQA 10	150	45	13.3
* کیفیت تابش مرجع در کاربردهای رادیوگرافی عمومی			

جدول (۵-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQT [۱۴]

کیفیت تابش	ولتاژ لامپ اشعه X (kV)	فیلتر اضافی (mm Cu)	HVL ₁ (mm Al)
RQT 8	100	0.2	6.9
RQT 9 *	120	0.25	8.4
RQT 10	150	0.3	10.1
* کیفیت تابش مرجع در کاربردهای عمومی CT			

جدول (۶-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQR-M [۱۴]

کیفیت تابش	ولتاژ لامپ اشعه X (kV)	HVL ₁ (mm Al)
RQR-M 1	25	0.28
RQR-M 2 *	28	0.31
RQR-M 3	30	0.33
RQR-M 4	35	0.36
* کیفیت تابش مرجع در کاربردهای عمومی ماموگرافی		

جدول (۷-۲) مشخصات کیفیت‌های تابش پرتو X سری RQA-M [۱۴]

کیفیت تابش	ولتاژ لامپ اشعه X (kV)	فیلتر اضافی (mm Al)	HVL ₁ (mm Al)
RQA-M 1	25	2	0.56
RQA-M 2 *	28	2	0.60
RQA-M 3	30	2	0.62
RQA-M 4	35	2	0.68
* کیفیت تابش مرجع در کاربردهای عمومی ماموگرافی			

استاندارد TRS-457 در محدوده درمانی و تشخیصی (گستره انرژی تا 150 kV) قرار دارد. مرجعی که گستره انرژی تا 300 kV را پوشش می‌دهد NIST^{۱۶} است. جدول (ب-۱) پیوست ب، کیفیت‌های استاندارد پرتوهای X را مطابق اصلاحات اعمال شده در سال ۲۰۰۳ برای آند تنگستنی نشان می‌دهد [۱۵]. سازمان جهانی استاندارد^{۱۷} (ISO) نیز جدولی در ارتباط با کیفیت‌های استاندارد پرتوهای X ارائه داده است که در جدول (ب-۲) پیوست ب، آمده است [۱۵].

¹⁶ NIST: National Institute of Standard and Technology

¹⁷ ISO: International Standard Organization

فصل سوم

اتاقک یونش هوای آزاد

۳-۱ مقدمه

امروزه اتاقک‌های یونش هوای آزاد صفحه‌موازی، بطور گسترده به‌منظور اندازه‌گیری کرمای هوا برای پرتوهای X با انرژی کمتر از 400 keV مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۱-۳) نمای کلی از یک اتاقک یونش صفحه‌موازی را نشان می‌دهد. پرتوهای X از میان روزنه اتاقک عبور کرده و در برخورد با مولکول‌های هوا تولید یون می‌کنند. این یون‌های بوسیله میدان الکتریکی تولید شده توسط دو الکتروود فلزی که به اختلاف پتانسیل معینی متصل هستند جمع‌آوری و توسط یک الکترومتر مناسب خوانده می‌شود.

۳-۲ اندازه‌گیری کرمای هوا

برای اتاقک یونش هوای آزاد کرمای هوا با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۶]:

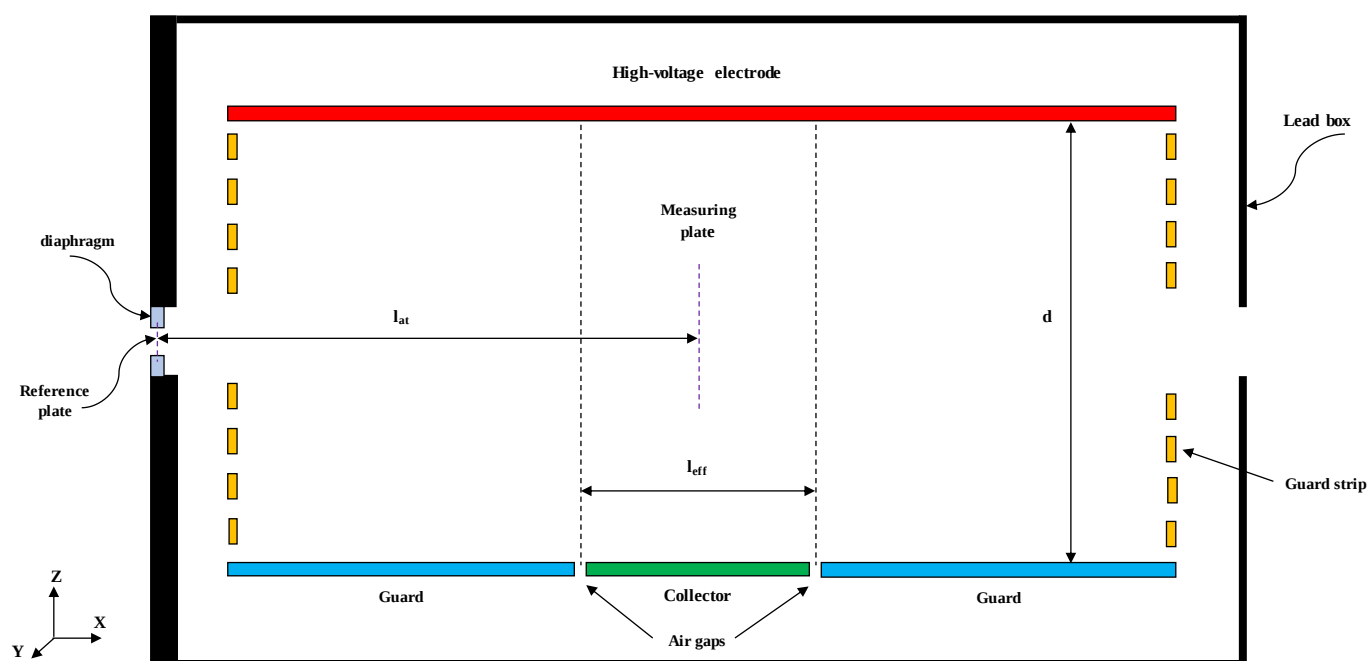
$$K = \frac{Q}{m} \times \frac{W_{\text{air}}}{e} \times \frac{1}{1-g} \prod_i k_i \quad (۱-۳)$$

در رابطه (۱-۳)، m جرم هوای حجم اندازه‌گیری^{۱۸}، Q بار خوانده شده توسط الکترومتر بعد از اعمال تصحیح مربوط به خوانش زمینه، W_{air}/e انرژی متوسط مورد نیاز جهت تولید هر جفت یون درهوا، g کسری از انرژی جنبشی الکترون‌ها که بصورت تابش ترمزی هدر می‌رود (برای پرتوهای X با انرژی با انرژی تولید کمتر از 300 keV ضریب g قابل صرف‌نظر است [۱۷]) و $\prod_i k_i$ حاصلضرب ضرایب تصحیح پاسخ اتاقک یونش می‌باشد که در رابطه (۲-۳) نشان داده شده است:

$$\prod k_i = k_{\text{at}} \times k_{\text{TP}} \times k_{\text{h}} \times k_{\text{s}} \times k_{\text{p}} \times k_{\text{field}} \times k_{\text{e}} \times k_{\text{sc}} \times k_{\text{dia}} \times k_{\text{tr}} \quad (۲-۳)$$

¹⁸ Measuring volume

در رابطه (۲-۳)، ضرایب k_{tr} ، k_{dia} ، k_{sc} ، k_e ، k_{field} ، k_p ، k_s ، k_h ، k_{TP} ، k_{at} به ترتیب ضریب تصحیح تضعیف پرتو، ضریب تصحیح دما و فشار، ضریب تصحیح رطوبت، ضریب تصحیح بازترکیب یون و اثر اشباع، ضریب تصحیح پلاریته، ضریب تصحیح توزیع میدان الکتریکی، ضریب تصحیح فرار الکترون، ضریب تصحیح پراکندگی فوتون، ضریب تصحیح پراکندگی دیافراگم و ضریب تصحیح عبور می‌باشد. حجم اندازه‌گیری در رابطه (۱-۳) برابر است با: $V_m = A \times l_{eff}$ ، که A مساحت دیافراگم و l_{eff} طول مؤثر جمع‌آوری می‌باشد.



شکل (۱-۳) نمای کلی از یک اتاقک یونش هوای آزاد

برخی از ضرایب تصحیح در رابطه (۲-۳) مستقیماً با اندازه‌گیری تعیین می‌شوند و برخی دیگر با استفاده از شبیه‌سازی بدست می‌آیند. در بخش‌های ۱-۲-۳ تا ۱۰-۲-۳ توضیحات کاملی در ارتباط با نحوه اندازه‌گیری و محاسبه این ضرایب آمده است. مقادیر ثابت ρ_{air} و $W_{air/e}$ در جدول (۱-۳) آمده است.

جدول (۱-۳) مقادیر ثابت ρ_{air} و W_{air}/e در رابطه (۱-۳) [۱۸].

Constant	Value	u_i^a
ρ_{air}^b	1.2930 kg m^{-3}	0.0001
W_{air} / e	33.97 J C^{-1}	0.0015
^a u_i is the relative standard uncertainty		
^b Density of dry air at $T_0 = 273.15 \text{ K}$ and $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$		

۳-۲-۱ ضریب تضعیف پرتو

این ضریب، تضعیف پرتو در امتداد طول تضعیف، l_{at} بین صفحه مرجع و صفحه اندازه‌گیری که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است را بدست می‌دهد. ضریب l_{at} بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_{\text{at}} = e^{\mu l_{\text{at}}} \quad (۳-۳)$$

در رابطه (۳-۳)، μ ضریب تضعیف کل هوا می‌باشد.

۳-۲-۲ ضریب تصحیح دما و فشار

ضریب تصحیح دما و فشار، k_{TP} ، جهت اصلاح تغییرات دما و فشار بر چگالی هوای داخل حجم جمع‌آوری بکار می‌رود. ضریب k_{TP} با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_{\text{TP}} = \frac{(273.15+T)}{(273.15+T_0)} \times \frac{P_0}{P} \quad (۴-۳)$$

دما و فشار مرجع به ترتیب 20°C و 1013.25 mbar می‌باشند [۱]. در نتیجه رابطه (۴-۳) بصورت زیر در می‌آید:

$$k_{\text{TP}} = \frac{(273.15+T)}{293.15} \times \frac{1013.25}{P} \quad (۵-۳)$$

دمای مرجع در آمریکار شمالی 22°C است [۱۳]. به‌منظور کمینه کردن تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری دما بر عدم قطعیت کل، استفاده از یک دماسنج استاندارد کالیبره شده با دقت mK لازم است.

محل قرارگیری سنسور دماسنج در داخل اتاقک یونش می‌باشد. در انتخاب محل قرارگیری دماسنج باید دقت شود که دماسنج نه با فوتون‌های اولیه تداخل داشته باشد و نه توزیع میدان الکتریکی را بهم بزند.

۳-۲-۳ ضریب تصحیح رطوبت

تغییرات میزان رطوبت هوا، مانند تغییرات دما و فشار بر روی چگالی هوا تأثیر می‌گذارد. در بخش قبل با معرفی ضریب k_{TP} تأثیر پارامترهای دما و فشار را بررسی کردیم. در این بخش ضریب تصحیح رطوبت، k_H ، را به منظور بررسی تأثیر رطوبت معرفی می‌کنیم.

همانطور که می‌دانید، قانون گاز کامل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$PV = mRT \quad (۶-۳)$$

در رابطه (۶-۳)، V حجم گاز (m^3)، m جرم گاز (kg)، R ثابت گاز ($J/kg^\circ K$) و T دمای مطلق گاز ($^\circ K$) می‌باشد. با جایگذاری چگالی در معادله (۶-۳) داریم:

$$P = \rho RT \quad (۷-۳)$$

ضریب R با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R = \frac{R_u}{M_{gas}} \quad (۸-۳)$$

در رابطه (۸-۳)، R_u ثابت جهانی گاز می‌باشد که مقدار آن $8.31447 J/mole^\circ K$ است و M_{gas} جرم مولکولی گاز است. در جدول (۲-۳) مقادیر جرم مولکولی گاز و ضریب R برای هوای خشک و بخار آب آمده است.

جدول (۲-۳) مقادیر ضریب R و جرم مولی گاز برای هوای خشک و بخار آب

گاز	M_{gas} (kg/mole $^{\circ}\text{K}$)	R (J/kg $^{\circ}\text{K}$)
هوای خشک	0.02897	287.003
بخار آب	0.01802	461.402

با استفاده از اطلاعات جدول (۲-۳) داریم:

$$P_d = \rho_d (287.003)T \quad (۹-۳)$$

$$P_w = \rho_w (461.402)T$$

در رابطه (۹-۳)، P_d و P_w به ترتیب فشار هوای خشک و فشار بخار آب می‌باشند. مطابق قانون

گیبس-دالتون^{۱۹}، فشار یک گاز مرکب برابر است با مجموع فشار جزئی هر یک از اجزای تشکیل

دهنده آن [۱۹]:

$$P = \sum_i P_i \quad (۱۰-۳)$$

در رابطه (۱۰-۳)، P فشار کل گاز و P_i فشار جزئی گاز i ام است. در نتیجه داریم:

$$P = P_d + P_w \quad (۱۱-۳)$$

از ترکیب روابط (۶-۳) و (۱۱-۳) داریم:

$$P_d V = m_d R_d T \quad \& \quad P_d = P - P_w \quad (۱۲-۳)$$

$$\frac{V}{m_d} = \frac{R_d T}{P - P_w} \Rightarrow v_d = \frac{R_d T}{P - P_w}$$

در رابطه (۱۲-۳)، v_d حجم ویژه هوای خشک می‌باشد (m^3/kg). در این مرحله رطوبت ویژه^{۲۰}، x ، را

معرفی می‌کنیم:

$$x = \frac{m_w}{m_d} \quad (۱۳-۳)$$

¹⁹ Gibbs-Dalton

²⁰ Specific Humidity

در رابطه (۱۳-۳)، m_d و m_w بترتیب جرم بخار آب و جرم هوای خشک می‌باشند. برای بدست آوردن m_w از تعریف درصد رطوبت نسبی، φ ، استفاده می‌شود:

$$\varphi = \frac{p_w}{p_{ws}} \times 100 \quad (۱۴-۳)$$

در رابطه (۱۴-۳)، p_w و p_{ws} بترتیب فشار بخار و فشار بخار اشباع می‌باشد. مقدار p_{ws} با استفاده از معادله بوک^{۲۱} بدست می‌آید [۲۰]:

$$p_{ws} = 0.6112 \exp \left(\left(18.678 - \frac{T}{234.5} \right) \left(\frac{T}{257.14 + T} \right) \right), \quad T > 0^\circ\text{C} \quad (۱۵-۳)$$

مقادیر p_{ws} در دماهای 20°C و 22°C بترتیب 2338.34 pa و 2644.20 pa می‌باشند. با قرار دادن این مقادیر در معادله (۱۴-۳) و استفاده از قانون گاز کامل جهت تعیین p_w ، مقدار m_w بر حسب گرم بدست می‌آید. اگر رابطه (۶-۳) را برای هوای مرطوب باز نویسی کنیم و مقدار m_w را از رابطه (۱۳-۳) در آن قرار دهیم داریم:

$$P_w V = m_w R_w T \Rightarrow P_w V = x m_d P_w T \quad (۱۶-۳)$$

$$\frac{V}{m_d} = \frac{x R_w T}{P_w} \Rightarrow P_w = \frac{x R_w T}{v_d}$$

با قرار دادن P_w از رابطه (۱۶-۳) در رابطه (۱۲-۳) داریم:

$$v_d = \frac{R_d T}{P - \frac{x R_w T}{v_d}} \Rightarrow v_d = \left(1 + x \frac{R_w}{R_d} \right) R_d \frac{T}{P} \quad (۱۷-۳)$$

اگر رابطه حجم ویژه را بر حسب ضریب رطوبت نسبی دوباره نویسی کنیم داریم:

$$v = \frac{V}{M} = \frac{V}{m_d + m_w} = \frac{V}{m_d(1+x)} \Rightarrow v = v_d \frac{1}{1+x} \quad (۱۸-۳)$$

²¹ Buck equation

با جایگذاری v_d از رابطه (۱۷-۳) در معادله (۱۸-۳) داریم:

$$v = \frac{R_d T}{P} \left(\frac{1+x \frac{R_w}{R_d}}{1+x} \right) \Rightarrow v = v_d \left(\frac{1+x \frac{R_w}{R_d}}{1+x} \right) \quad (۱۹-۳)$$

همانطور که از رابطه حجم ویژه مشخص است، حجم ویژه عکس چگالی می‌باشد:

$$\rho = \rho_d \left(\frac{1+x}{1+x \frac{R_w}{R_d}} \right) \quad (۲۰-۳)$$

با قرار دادن مقادیر R_d و R_w از جدول (۲-۳) در رابطه (۲۰-۳) داریم:

$$\rho = \rho_d \frac{1+x}{1+1.6075x} \quad (۲۱-۳)$$

مطابق رابطه (۲۱-۳) در یک دمای معین، چگالی هوای مرطوب از چگالی هوای خشک کمتر است. علت این مسئله این است که هوای خشک عمدتاً از مولکول‌های دو اتمی O_2 و N_2 تشکیل شده است. وزن این مولکول‌ها به ترتیب ۳۲ و ۲۸ واحد جرم اتمی^{۲۲} (amu) می‌باشد. از طرف دیگر یک مولکول آب H_2O دارای وزنی معادل ۱۸ amu است. بنابراین در یک دمای معین جایگزینی هر مولکول آب با مولکول‌های دو اتمی اکسیژن و یا نیتروژن، جرم کل و در نتیجه چگالی کل کاهش پیدا می‌کند.

۳-۲-۴ باز ترکیب یون و ضریب تصحیح اشباع

با افزایش پتانسیل اتاقک یونش جریان خوانده شده افزایش پیدا می‌کند تا این‌که به یک مقدار ثابتی برسد، به این مقدار ثابت جریان اشباع گفته می‌شود. در این هنگام بین تولید و باز ترکیب یون‌ها تعادل برقرار می‌شود. افزایش پتانسیل سبب کاهش باز ترکیب یون‌ها می‌شود، با این حال بیشینه پتانسیل قابل اعمال به علت جلوگیری از تکثیر شدن یون‌ها محدود می‌باشد. باز ترکیب یون‌ها به دو

²² Atomic mass unit

دسته تقسیم می‌شود: بازترکیب اولیه^{۲۳} و بازترکیب کلی (حجمی)^{۲۴}. بازترکیب اولیه تنها بین یون‌های مثبت و منفی در یک مسیر یونیزاسیون رخ می‌دهد، برای پرتوهای X با انرژی کم و متوسط قابل چشم پوشی بوده و مستقل از نرخ دز تابش ورودی است [۲۱]. در حالی که بازترکیب کلی بین یون‌های مثبت و منفی واقع در کل حجم یونیزاسیون رخ می‌دهد و به نرخ دز جذبی، ابعاد اتاقک یونش و پتانسیل جمع‌آوری بار وابسته است [۲۲].

در این کار ضریب تصحیح اشباع، k_s ، بر اساس دستورالعمل پیشنهادی BIPM^{۲۵} در ارتباط با ضریب تصحیح اشباع که توسط Boutillon تدوین شد بدست می‌آید [۲۳]. اساس کار به این صورت است که جریان یونش در دو پتانسیل V و V/n اندازه‌گیری می‌شود، V پتانسیل کاری اتاقک یونش و n عددی بین ۲ تا ۴ می‌باشد. سپس نسبت $R = \frac{I_V}{I_{V/n}}$ را بدست می‌آوریم، I_V و $I_{V/n}$ بترتیب جریان یونش در پتانسیل‌های V و V/n بعد از اعمال تصحیح فشار و دما می‌باشند. این فرآیند را برای چند نرخ کرمای مختلف تکرار می‌کنیم. بهتر است این کار را با تغییر جریان آند انجام دهیم ولی می‌توان با تغییر فیلترهای مختلف نیز این کار را انجام داد.

نتیجه کار مجموعه‌ای از داده‌های R بر حسب $I_{V,uncorr}$ است، $I_{V,uncorr}$ خوانش اولیه جریان یونش در ولتاژ V بدون اعمال هرگونه ضریب تصحیح می‌باشد. بهتر است اندازه‌گیری‌ها حداقل در چهار تا پنج نرخ کرما بین کمینه و بیشینه نرخ کرمای قابل دسترسی انجام گیرد. منحنی R بر حسب $I_{V,uncorr}$ همانطور که در شکل (۲-۳) مشاهده می‌شود باید خطی باشد. بعد از منطبق کردن یک خط بر این داده‌ها، ضرایب a_0 و a_1 که بترتیب برابر با عرض از مبدا و شیب این خط هستند بدست می‌آیند. ضرایب بازترکیب اولیه، k_{init} ، و باز ترکیب حجمی، k_{vol} ، با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند [۲۴]:

²³ Initial recombination

²⁴ General (volume) recombination

²⁵ BIPM: Bureau International des Poids et Mesures

$$k_{init} = \frac{a_0 - 1}{n - 1} \quad (22-3)$$

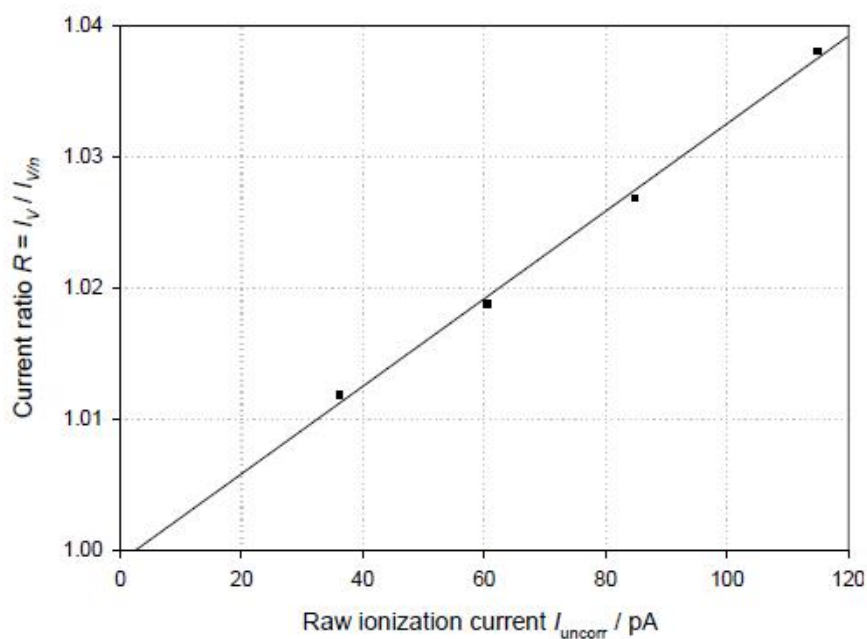
$$k_{vol} = \frac{a_1}{n^2 - 1} \quad (23-3)$$

با داشتن ضرایب k_{init} و k_{vol} برای بدست آوردن ضریب k_s کافی است که جریان I_V اندازه گیری شده در ولتاژ کاری V را در رابطه (۲۴-۳) قرار دهیم:

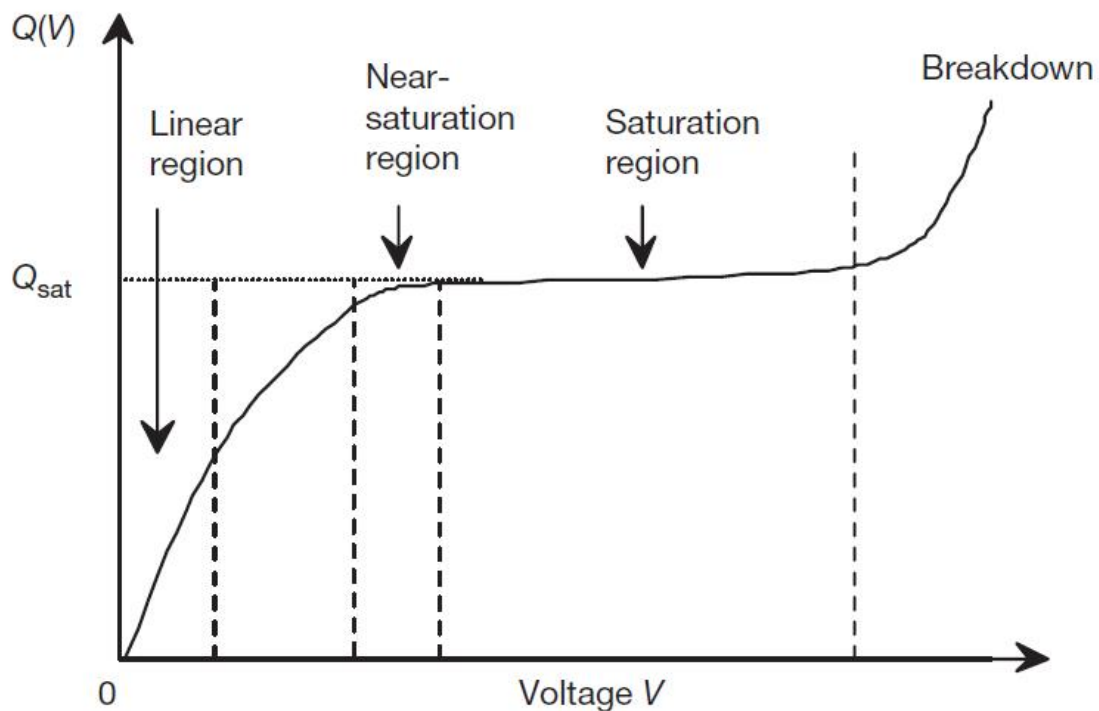
$$k_s = 1 + k_{init} + k_{vol} I_V \quad (24-3)$$

همانطور که مشاهده می شود باز ترکیب یون تنها به جریان یونیزاسیون وابسته است، و نه به کیفیت پرتو، و در نتیجه برای یک اتاقک خاص مقدار ثابتی می باشد [۲۴].

منحنی پاسخ اتاقک یونش بر حسب ولتاژ در یک دز معین منحنی اشباع نام دارد. شکل (۳-۳) نمونه ای از این دست منحنی ها را نشان می دهد [۲۵]. نسبت $\frac{Q(V)}{Q_{sat}}$ و یا $\frac{I(V)}{I_{sat}}$ که I_{sat} و Q_{sat} بترتیب بار و جریان اشباع هستند، بازده جمع آوری، f ، اتاقک یونش در ولتاژ V نامیده می شود. در دزیمتری تابش، اتاقک یونش باید در ناحیه اشباع ($f \approx 1$) و یا ناحیه نزدیک اشباع ($f > 0.98$) کار کند [۲۵].



شکل (۲-۳) باز ترکیب یون مطابق روش Boutillon [۱۵] برای پتانسیل 1000V و $n=2.5$ [۲۴]



شکل (۳-۳) منحنی اشباع برای یک اتاقک یونش نوعی [۲۵]

۳-۲-۵ ضریب تصحیح پلاریته

تغییر پلاریته ولتاژ اعمال شده به اتاقک یونش بخصوص هنگام تابش پرتو الکترونی (مثلاً چشمه بتا ^{90}Sr که به عنوان چک سورس مورد استفاده قرار می گیرد) بر پاسخ آن تأثیر می گذارد. ضریب تصحیح پلاریته، k_p ، تغییرات پلاریته ولتاژ اعمال شده به الکتروود جمع کننده بر روی پاسخ اتاقک یونش را در نظر می گیرد. اگر M^+ بار خوانده شده در پلاریته $+V$ و M^- بار خوانده شده در پلاریته $-V$ باشد ضریب تصحیح پلاریته به صورت زیر تعریف می شود:

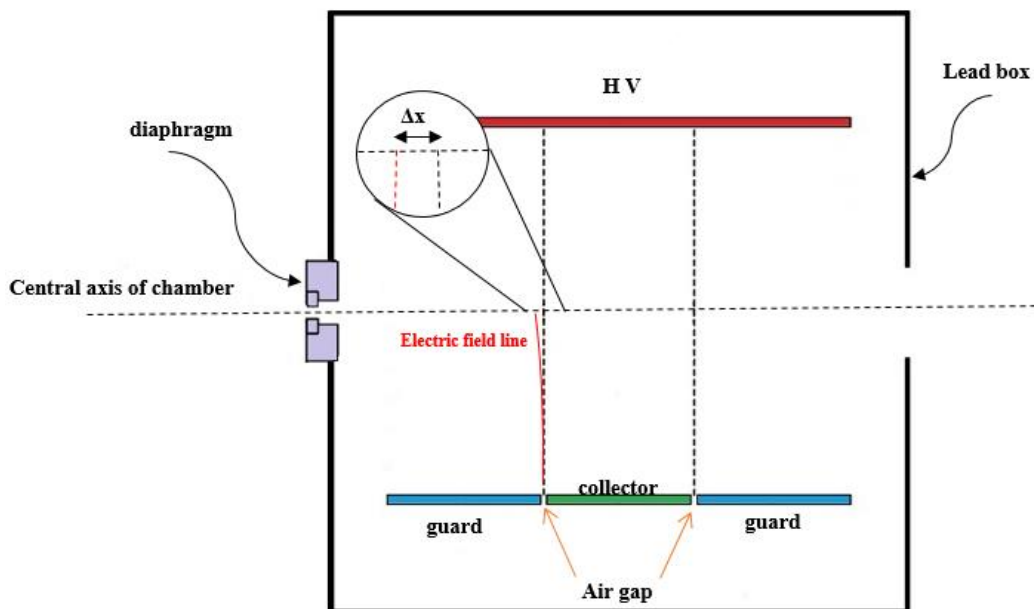
$$k_p = \frac{|M^+| + |M^-|}{2|M^+|} \quad (۲۵-۳)$$

۳-۲-۶ ضریب تصحیح توزیع میدان الکتریکی

ضریب تصحیح توزیع میدان الکتریکی، k_{field} ، موازی بودن خطوط میدان الکتریکی در حجم جمع‌آوری را در نظر می‌گیرد. این ضریب برخلاف ضرایب قبلی، با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری تعیین می‌شود. در این کار جهت بدست آوردن ضریب k_{field} از دستورالعمل CIPM^{۲۶} استفاده شده است. ضریب k_{field} به صورت زیر بدست می‌آید [۲۶]:

$$k_{\text{field}} = 1 + \frac{2\Delta x}{l_c + l_g} \quad (۲۶-۳)$$

در رابطه (۲۶-۳) l_c و l_g به ترتیب طول الکتروود جمع‌کننده و طول شکاف بین الکتروود جمع‌کننده و الکتروود گارد می‌باشند. مقدار Δx مطابق شکل (۴-۳) بدست می‌آید. در این کار جهت بدست آوردن ضریب k_{field} از نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است. در فصل چهار توضیحات کاملی در ارتباط با نرم افزار COMSOL Multiphysics آمده است.



شکل (۴-۳) نمودار طرح‌وار تعیین Δx ، l_c و l_g مورد نیاز در رابطه (۲۶-۳)

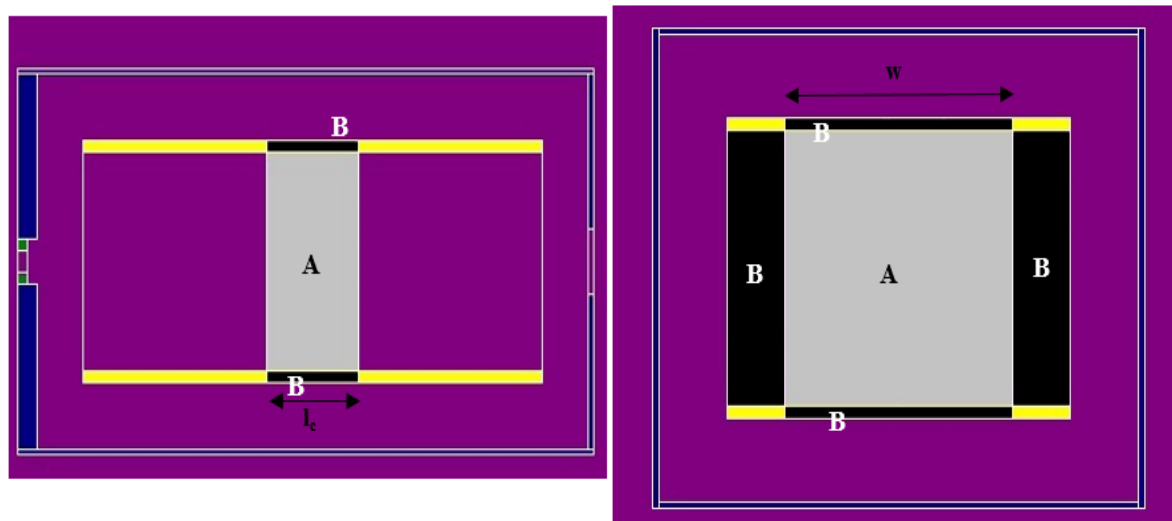
²⁶ International Committee for weights and measures

۳-۲-۷ ضریب تصحیح فرار الکترون

در محاسبات مربوط به ابعاد اتاقک یونش، انرژی متوسط الکترون‌های ثانویه، E_{mean} ، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که طیف الکترون‌های ثانویه یک طیف پیوسته است، همواره بخشی از الکترون‌ها انرژی بیشتری از E_{mean} دارند. این دسته از الکترون‌ها از حجم جمع‌آوری فرار کرده و سهمی در بار کل خوانده شده ندارند. برای در نظر گرفتن سهم الکترون‌های فراری، ضریب تصحیح فرار الکترون، k_e ، را معرفی می‌کنیم. این ضریب با استفاده از کد MCNP4C محاسبه می‌شود. ضریب فرار الکترون با استفاده از رابطه (۳-۲۷) بدست می‌آید [۲۷]:

$$k_e = \frac{E_A + E_B}{E_A} \quad (۳-۲۷)$$

در رابطه (۳-۲۷)، E_A انرژی به‌جا گذاشته شده توسط الکترون‌های تولید شده از فوتون‌های اولیه در ناحیه A (حجم جمع‌آوری)، E_B انرژی به‌جا گذاشته شده ناشی از الکترون‌های تولید شده در حجم A رسیده به ناحیه B می‌باشد. نواحی A و B در شکل (۳-۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۳-۵) نمودار طرح‌وار ناحیه A و ناحیه B جهت محاسبه ضریب k_{es}

۳-۲-۸ ضریب تصحیح پراکندگی فوتون

همانطور که می‌دانیم، تعریف کرما شامل سهم فوتون‌های پراکنده شده نمی‌شود [۲۸]. در حالی که در عمل بار تولید شده در حجم جمع‌آوری ناشی از فوتون‌های پراکنده شده و غیر پراکنده شده می‌باشد. پس باید سهم فوتون‌های پراکنده شده را حذف کنیم. برای این کار ضریب تصحیح پراکندگی فوتون، k_{sc} ، را معرفی می‌کنیم. ضریب k_{sc} نیز با استفاده از کد MCNP4C محاسبه می‌شود. ضریب k_{sc} با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۹]:

$$k_{sc} = \frac{E_p}{E_p + E_{sc}} \quad (۲۸-۳)$$

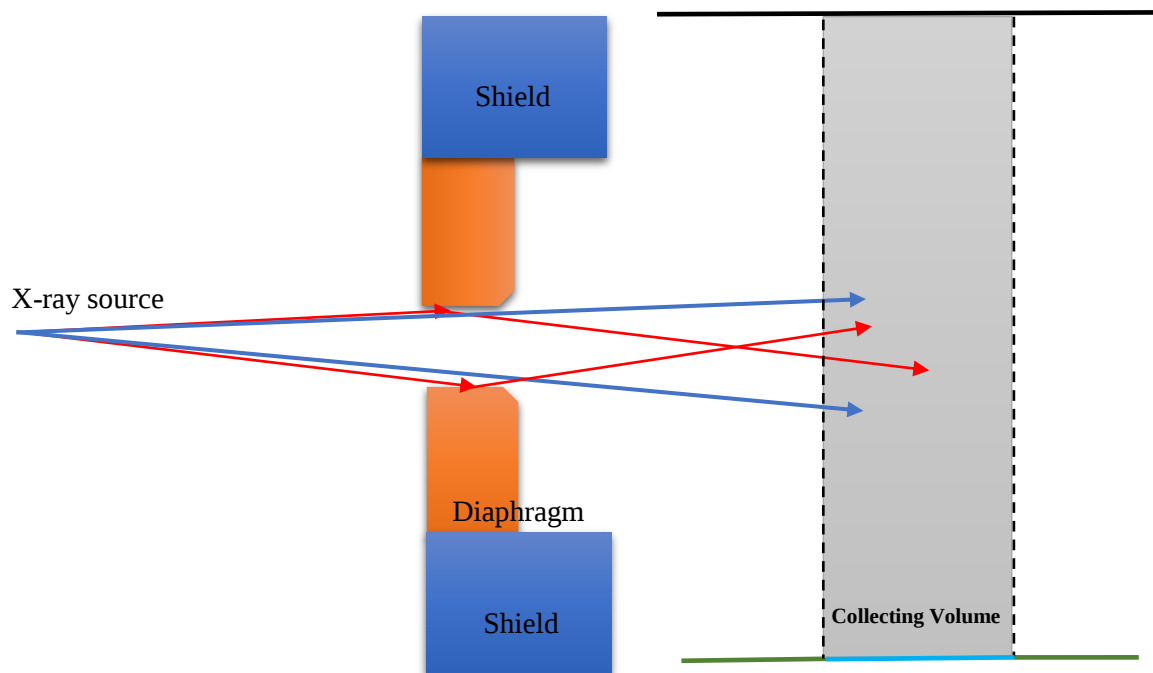
در رابطه (۲۸-۳)، E_p انرژی به‌جا گذاشته شده توسط فوتون‌های اولیه در حجم جمع‌آوری و E_{sc} انرژی به‌جا مانده از فوتون‌های پراکنده شده که به حجم جمع‌آوری رسیده‌اند می‌باشد.

۳-۲-۹ ضریب تصحیح پراکندگی دیافراگم

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، در تعریف کرما سهم پرتوهای پراکنده شده وجود ندارد. یکی از منابع پراکندگی فوتون از سطح دیافراگم می‌باشد. حضور دیافراگم به‌منظور تولید باریکه‌ای موازی از پرتوها ضروری است، اما مطابق شکل (۳-۶) وجود دیافراگم موجب پراکندگی پرتو از سطح آن می‌شود. در هنگام عبور پرتوها از دیافراگم، برخی از پرتوها مستقیماً از دهنه دیافراگم عبور می‌کنند (پرتوهای آبی) اما برخی دیگر در اثر برخورد با بدنه دیافراگم پراکنده می‌شوند (پرتوهای قرمز). در این بخش سهم پرتوهای پراکنده شده از سطح دیافراگم در دز انباشته شده در حجم جمع‌آوری را با معرفی ضریب پراکندگی دیافراگم، k_{dia} ، در نظر می‌گیریم. برای تعیین ضریب k_{dia} از شبیه‌سازی MCNP4C استفاده می‌کنیم. ضریب k_{dia} با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_{dia} = \frac{E_p}{E_p + E_{dia}} \quad (۲۹-۳)$$

در رابطه (۳-۲۹)، E_p انرژی به جا گذاشته شده توسط فوتون‌های اولیه در حجم جمع‌آوری و E_{dia} انرژی به جا مانده در حجم جمع‌آوری ناشی از فوتون‌های پراکنده شده از سطح دیافراگم می‌باشند. همانطور که انتظار داریم ضریب k_{dia} کوچکتر از یک می‌باشد.



شکل (۳-۶) طرح کلی از پراکندگی فوتون‌ها از سطح دیافراگم

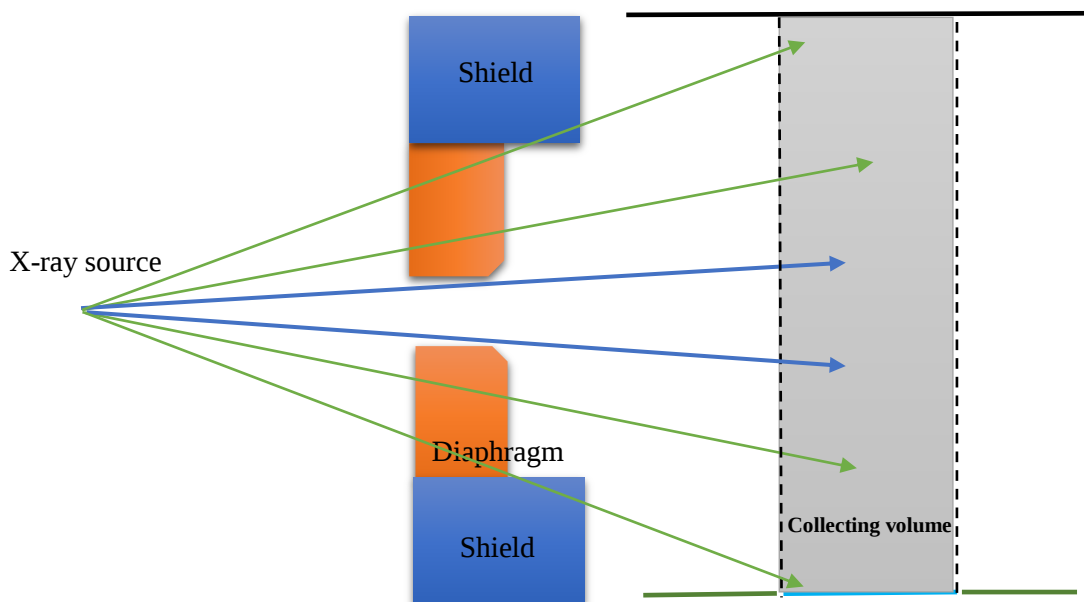
۳-۲-۱۰ ضریب تصحیح عبور

ضخامت دیافراگم و صفحه جلویی باید به اندازه‌ای باشد که عبور پرتوها از بدنه دیافراگم و پوشش جلویی اتاقک یونش به کمترین مقدار برسد. اما همانطور که در شکل (۳-۷) مشاهده می‌کنید، به‌علت اندازه محدود دیافراگم و صفحه جلویی همواره برخی از فوتون‌ها از بدنه دیافراگم و پوشش جلویی عبور کرده (پرتوهای سبز) و به حجم جمع‌آوری می‌رسند. با افزایش انرژی فوتون‌های ورودی، احتمال عبور آنها بیشتر هم می‌شود. از آنجایی که این پرتوهای پراکنده شده در تعریف کرما سهمی ندارند، باید سهم آنها را محاسبه و تصحیح لازم روی نتایج اعمال شود. برای در نظر گرفتن سهم پرتوهای

عبوری از بدنه دیافراگم و صفحه جلویی ضریب عبور، k_{tr} ، را معرفی می‌کنیم. ضریب k_{tr} با استفاده شبیه‌سازی MCNP4C بدست می‌آید. ضریب k_{tr} به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$k_{tr} = \frac{E_p}{E_p + E_{tr}} \quad (3-30)$$

در رابطه (3-30)، E_p انرژی به‌جا گذاشته شده توسط فوتون‌های اولیه در حجم جمع‌آوری و E_{tr} انرژی به‌جا مانده در حجم جمع‌آوری ناشی از فوتون‌های عبوری از بدنه دیافراگم و صفحه جلویی می‌باشند.



شکل (3-7) طرح کلی از عبور پرتوها از بدنه دیافراگم و صفحه جلویی

فصل چهارم

معرفی نرم افزارهای شبیه سازی

۱-۴ مقدمه

امروزه شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نقشی اساسی در توسعه علوم و مهندسی بازی می‌کنند. این شبیه‌سازی‌ها ممکن است به‌منظور طراحی یک محصول جدید و یا بهینه کردن یک طراحی انجام شوند. در حال حاضر طیف گسترده‌ای از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در دسترس قرار دارند. یک نرم‌افزار مناسب باید به‌خوبی شرایط دنیای فیزیک واقعی را در محیط مجازی خود شبیه‌سازی کند. در این رساله با توجه به فیزیک مسئله از نرم‌افزارهای MCNP مبتنی بر روش مونت کارلو و COMSOL مبتنی بر روش المان محدود استفاده شد.

با توجه به ماهیت تصادفی برهمکنش‌های هسته‌ای، شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبات نوترون، فوتون و ذرات باردار بسیار به واقعیت نزدیک است. در این روش تمامی اندرکنش‌های پرتو با ماده مطابق با فیزیک واقعی مسئله دنبال شده و احتمال هر رویداد با توجه به داده‌های تجربی، در قالب سطح مقطع، تعیین می‌شود. کد MCNP یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی در زمینه فیزیک هسته‌ای می‌باشد که بر اساس روش مونت کارلو بنا شده است. در بخش ۲-۴ به معرفی این کد می‌پردازیم.

نرم‌افزار دیگری که در این کار از آن استفاده شده، COMSOL Multiphysics نام دارد. این نرم‌افزار از روش المان محدود^{۲۷} به منظور شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی استفاده می‌کند. این نرم‌افزار دارای کتابخانه داخلی قدرتمند بوده که مشخصات فیزیکی طیف گسترده‌ای از مواد و ترکیبات آن‌ها را در خود جای داده است. در بخش ۳-۴ به معرفی این کد می‌پردازیم.

²⁷ Finite Element

۴-۲ معرفی کد MCNP

$^{28}\text{MCNP}$ یک کد چند منظوره مستقل از زمان است که ترابرد نوترون، فوتون، الکترون و یا ترکیبی از آنها را در هندسه سه بعدی با استفاده از روش مونت کارلو انجام می‌دهد. این کد در زمینه‌های حفاظت در برابر اشعه، دزیمتری تابش، رادیوگرافی، فیزیک پزشکی، اکتشاف نفت و طراحی رآکتورهای شکاف و همجوشی کاربرد دارد. کد MCNP دارای قابلیت‌های زیادی در توصیف هندسه مسئله و هندسه چشمه می‌باشد. اطلاعات کتابخانه‌ای کاملی در ارتباط با سطح مقطع اندرکنش‌های مختلف در این کد قرار دارد. برای استفاده از این کد، اطلاعات چشمه و محیط اندرکنش توسط یک فایل ورودی به برنامه داده می‌شود. اطلاعات ورودی مسئله شامل خصوصیات هندسی، توصیف مواد، انتخاب سطح مقطع‌ها، نوع و هندسه چشمه، نوع جواب خواسته شده یا tally و روش اجرای برنامه در یک فایل متنی text قرار داده می‌شود.

در استفاده از کد MCNP جهت بدست آوردن نتیجه درست و نزدیک به واقعیت باید نکات زیر را در نظر داشت:

- ۱- **هندسه مسئله:** باید هندسه مسئله مطابق با شرایط واقعی در نظر گرفته شود و تمامی سطح‌ها و حجم‌ها به‌درستی تعریف شود؛
- ۲- **عناصر و مواد مسئله:** نوع عناصر، ترکیب شیمیایی آنها و ویژگی‌های فیزیکی تمامی قسمت‌های مسئله باید براساس دستورالعمل کار با نرم افزار برای کد تعریف شود؛
- ۳- **هندسه چشمه:** موقعیت مکانی چشمه (مختصات هندسی) و مشخصات هندسی چشمه (نقطه‌ای، سطحی و یا حجمی) و نوع چشمه (تک انرژی و یا دارای طیف انرژی) باید برای کد معین شود؛

²⁸ MCNP: Monte Carlo N-Particle

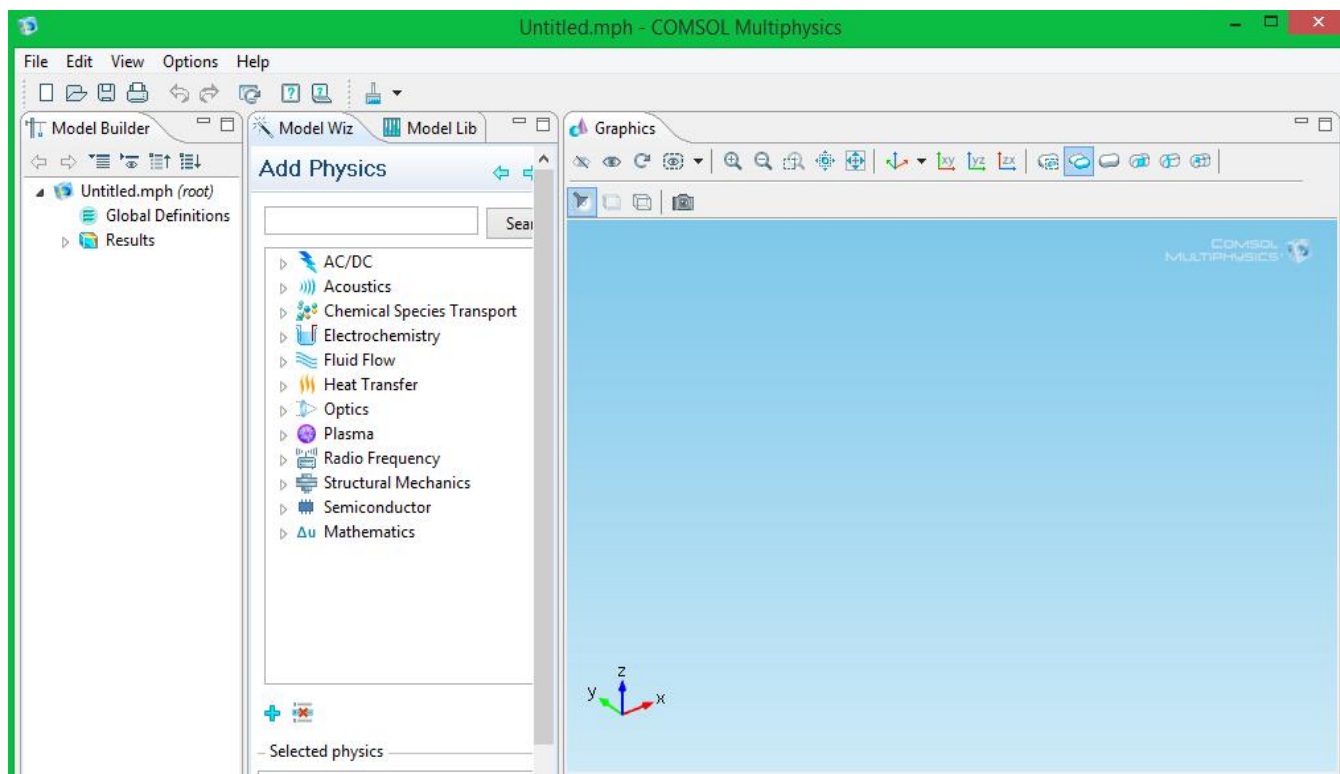
- ۴- نتایج: نوع خروجی و نتیجه مورد انتظار از برنامه باید برای کد تعریف شوند؛
- ۵- زمان محاسبه: مدت زمانی که باید برنامه اجرا شود باید برای برنامه تعریف شود؛
- ۶- تعداد ذره: کد MCNP علاوه بر مدت زمان اجرای برنامه، از طریق معین کردن تعداد ذرات ترابرد شده اجرای برنامه را متوقف می‌کند.

۳-۴ معرفی نرم‌افزار COMSOL

نرم‌افزار COMSOL Multiphysics به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی به‌کار می‌رود. در شکل (۴-۱) نمایی کلی از محیط کاری این نرم‌افزار نشان داده شده است. این نرم‌افزار توانایی حل طیف وسیعی از مسائل فیزیکی در زمینه‌های الکتریسیته، مغناطیس، میدان‌های الکترومغناطیس، اپتیک، پلاسما، ابزارهای RF و میکروموج، نیمه رساناها، ساختارهای مکانیکی و دینامیکی، اکوستیک، شارش سیالات، انتقال حرارت، الکتروشیمی و مهندسی شیمی را دارا می‌باشد. علاوه بر این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی رد ذرات در یک سیال و یا یک میدان الکترومغناطیس را دارا می‌باشد. کتابخانه این نرم‌افزار حاوی اطلاعات ۲۵۰۰ ماده شامل عناصر، مواد معدنی، آلیاژهای فلزی، عایق‌های حرارتی، نیمه رساناها و مواد پیزوالکتریک می‌باشد.

روش کار به این صورت است که ابتدا هندسه مسئله (یک بعدی، دو بعدی و یا سه بعدی)، مدل عملکردی (مطابق مدهایی که در بالا به آنها اشاره شد) و واحدهای اندازه‌گیری (واحد طول و واحد زاویه) را برای برنامه تعریف می‌کنیم. در ادامه با استفاده از ابزارهای طراحی موجود در برنامه، هندسه مسئله را رسم می‌کنیم. امکان وارد کردن هندسه طراحی شده توسط سایر نرم‌افزارهای طراحی صنعتی مانند: Auto CAD، Creo parametric، Solid Edge، Solid Work، Pro/ENGINEER و Space Claim در این برنامه وجود دارد. به هر قسمت از هندسه مسئله باید یک ماده نسبت دهیم. این کار با استفاده از کتابخانه مواد نرم‌افزار انجام می‌شود. علاوه بر این امکان تعریف یک ماده جدید با

خواص معین در برنامه وجود دارد. مرحله نهایی، حل مسئله توسط نرم افزار می باشد. می توان با استفاده از دستورات مشخص خروجی مورد نظر خود را مشاهده کنیم.



شکل (۴-۱) نمای کلی از محیط کاربری برنامه COMSOL Multiphysics

فصل پنجم

تعیین پارامترهای اتاقک یونش هوای آزاد
FAC-IR-150 با استفاده از شبیه‌سازی

۱-۵ مقدمه

اتاقک یونش هوای آزاد ابزاری برای اندازه‌گیری خروجی چشمه‌های اشعه بر حسب کمیت کرمای هوا، از طریق برهمکنش فوتون‌ها با ملکول‌های هوا و اندازه‌گیری الکترون‌های تولید شده می‌باشد. در شکل (۱-۳) طرح کلی از یک اتاقک یونش هوای آزاد نشان داده شد. اتاقک یونش هوای آزاد توسط یک پوشش محافظ به‌منظور جلوگیری از ورود تابش‌های مزاحم به داخل آن احاطه شده است. ورود تابش به‌داخل اتاقک یونش از طریق یک روزنه در سطح جلویی پوشش محافظ انجام می‌گیرد. همچنین روزنه ورودی صفحه مرجع را تعریف می‌کند. در داخل جعبه یک جفت الکتروود صفحه‌ای موازی قرار دارد که با اتصال آنها به یک منبع پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی بین این صفحات برقرار می‌شود. در قسمت پایین دو الکتروود قرار دارد: الکتروود جمع‌کننده و الکتروود گارد صفحه‌ای. الکتروود جمع‌کننده با طول l_c کار جمع‌آوری بارهای تولید شده را بعهده دارد. الکتروود دیگر، الکتروود گارد صفحه‌ای می‌باشد که به‌منظور یکنواختی کردن میدان الکتریکی داخل حجم اتاقک یونش، در اطراف الکتروود جمع‌کننده قرار می‌گیرد. الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده توسط شکاف کوچکی از هوا بطول l_g از هم جدا شده‌اند. فاصله بین صفحه مرجع و صفحه اندازه‌گیری در شکل (۱-۳) طول تضعیف، l_{at} نام دارد. در طراحی اتاقک یونش هوای آزاد طول l_{at} باید به اندازه‌ای باشد که تعادل بار-ذره^{۲۹} (CPE) در حجم جمع‌آوری برقرار باشد.

²⁹ CPE: Charge Particle Equilibrium

۵-۲ طراحی اتاقک یونش

مهم‌ترین پارامترهای هندسی در طراحی بهینه اتاقک یونش هوای آزاد عبارتند از: فاصله جدایی الکترودها (d)، فاصله دیافراگم از صفحه اندازه‌گیری (l_{at})، طول مؤثر جمع‌کننده (l_{eff})، سیستم دیافراگم و پوشش محافظ. در ادامه این موارد را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۵-۲-۱ طول جدایی الکترودها

بر اساس الزامات CPE، فاصله بین الکترودها باید بزرگ‌تر از برد پرنرژی‌ترین الکترون‌ها باشد. برای یک لامپ اشعه X با ولتاژ کاری 150 kV، بیشینه انرژی الکترون‌های ثانویه برابر 150 keV می‌باشد. برد این الکترون‌ها در هوای خشک مطابق جدول (۵-۱) با چگالی هوای 0.001205 g/cm^3 (در دمای 20°C و فشار 1013.25 mbar) برابر با 26.50 cm است. اما تنها کسر کوچکی از الکترون‌ها دارای این انرژی هستند، در نتیجه به‌منظور طراحی بهینه اتاقک یونش از انرژی متوسط و برد متوسط استفاده می‌شود. برای تعیین انرژی متوسط، E_{mean} ، ابتدا شار الکترون‌های ثانویه را با استفاده از شبیه‌سازی MCNP بدست می‌آوریم. شکل (۵-۱) شار الکترونهای ثانویه تولید شده توسط فوتون‌های 150 keV را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۵-۱) مشاهده می‌شود طیف الکترون‌های ثانویه تولید شده پیوسته است. E_{mean} با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

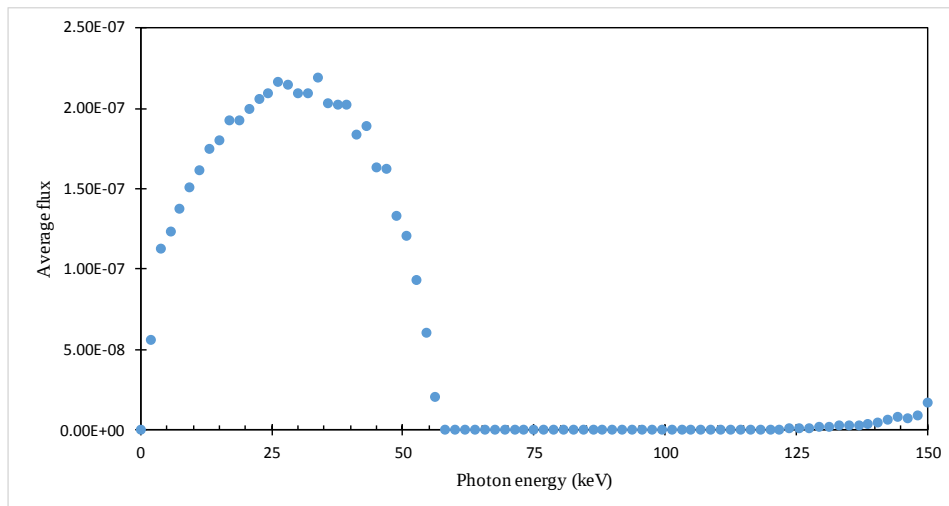
$$E_{mean} = \frac{\sum (\text{انرژی}) \times (\text{فراوانی هر انرژی})}{(\text{فراوانی کل})} \quad (۵-۱)$$

با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و با استفاده از رابطه (۵-۱)، E_{mean} برابر با 29.97 keV بدست می‌آید.

برد متوسط، R_{mean} ، متناظر با این انرژی مطابق جدول (۵-۱) برابر است با:

$$R_{mean}(\text{cm}) = \frac{2.002 \times 10^{-3}}{0.001205} = 1.66 \text{ cm} \quad (۵-۲)$$

حداقل فاصله جدایی الکترودها، d، باید دو برابر R_{mean} باشد.



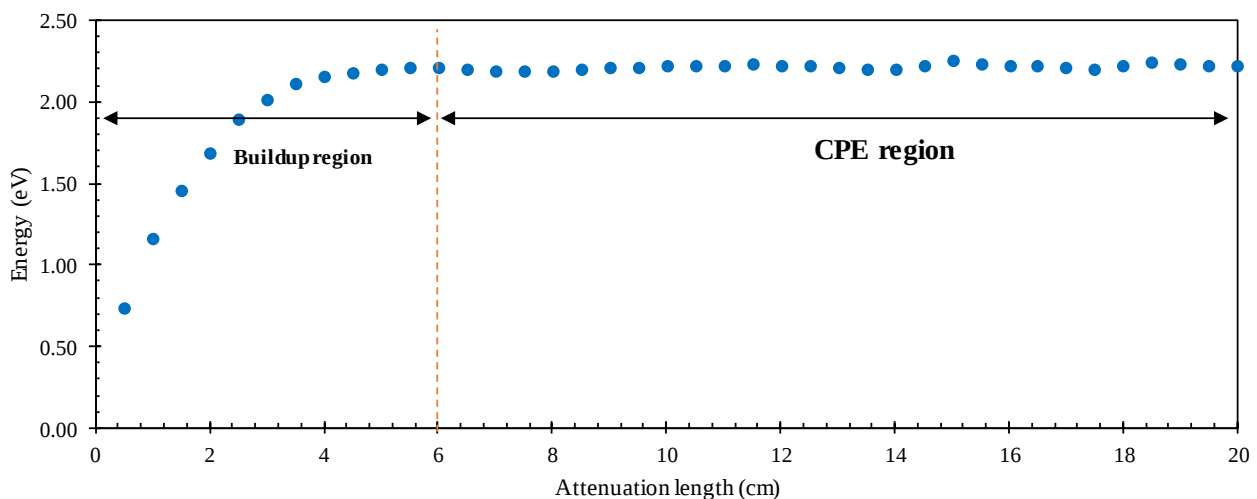
شکل (۱-۵) شار انرژی الکترون‌های ثانویه ناشی از فوتون‌هایی با انرژی 150 keV

جدول (۱-۵) داده‌های مربوط به توان توقف الکترون و برد الکترون در هوای خشک [۵]

Kinetic Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm ² /g)			CSDA Range (g/cm ²)
	Collision	Radiative	Total	
0.00E+00	1.98E+01	3.90E-03	1.98E+01	2.88E-04
1.25E-02	1.66E+01	3.92E-03	1.66E+01	4.27E-04
1.50E-02	1.44E+01	3.94E-03	1.45E+01	5.89E-04
1.75E-02	1.28E+01	3.95E-03	1.28E+01	7.73E-04
2.00E-02	1.16E+01	3.95E-03	1.16E+01	9.78E-04
2.50E-02	9.75E+00	3.97E-03	9.76E+00	1.45E-03
3.00E-02	8.49E+00	3.98E-03	8.50E+00	2.00E-03
3.50E-02	7.56E+00	3.99E-03	7.57E+00	2.63E-03
4.00E-02	6.85E+00	4.00E-03	6.85E+00	3.32E-03
4.50E-02	6.28E+00	4.01E-03	6.28E+00	4.09E-03
5.00E-02	5.82E+00	4.03E-03	5.82E+00	4.91E-03
5.50E-02	5.43E+00	4.04E-03	5.44E+00	5.80E-03
6.00E-02	5.11E+00	4.06E-03	5.11E+00	6.75E-03
7.00E-02	4.59E+00	4.09E-03	4.60E+00	8.82E-03
8.00E-02	4.20E+00	4.13E-03	4.20E+00	1.11E-02
9.00E-02	3.89E+00	4.18E-03	3.89E+00	1.36E-02
1.00E-01	3.63E+00	4.22E-03	3.64E+00	1.62E-02
1.25E-01	3.17E+00	4.35E-03	3.18E+00	2.36E-02
1.50E-01	2.86E+00	4.49E-03	2.87E+00	3.19E-02
1.75E-01	2.64E+00	4.63E-03	2.64E+00	4.10E-02
2.00E-01	2.47E+00	4.79E-03	2.47E+00	5.08E-02
2.50E-01	2.24E+00	5.13E-03	2.24E+00	7.21E-02
3.00E-01	2.08E+00	5.50E-03	2.09E+00	9.53E-02
3.50E-01	1.98E+00	5.89E-03	1.98E+00	1.20E-01
4.00E-01	1.90E+00	6.31E-03	1.91E+00	1.46E-01

۵-۲-۲ طول تضعیف

در اتاقک‌های یونش هوای آزاد، ایجاد شرایط CPE جهت اندازه‌گیری کرمای هوا الزامی است. بنابراین حجم جمع‌آوری باید در فاصله‌ای از روزنه ورودی قرار گیرد که در آن منحنی تغییرات دز بر حسب فاصله تقریباً هموار شود. فاصله بین صفحه مرجع تعریف شده توسط روزنه ورودی و صفحه اندازه‌گیری که در مرکز حجم جمع‌آوری، طول تضعیف، l_{at} نام دارد. برای بدست آوردن منحنی تغییرات دز انباشتی بر حسب فاصله از صفحه مرجع از کد MCNP استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲-۵) مشاهده می‌گردد، منحنی تغییرات به دو قسمت تقسیم می‌شود: ناحیه انباشت^{۳۰} و ناحیه CPE. ناحیه انباشت، ناحیه سمت چپ خط نارنجی (خط چین)، به‌علت تغییر دز بر حسب فاصله جهت استفاده در اتاقک یونش هوای آزاد مناسب نیست. در طراحی اتاقک یونش هوای آزاد باید طول l_{at} به اندازه‌ای باشد که حجم جمع‌آوری در ناحیه CPE قرار بگیرد.



شکل (۲-۵) نمودار تغییر دز بر حسب فاصله از صفحه مرجع برای فوتون‌های 150 keV

³⁰ Build up region

۵-۲-۳ طول الکتروود جمع کننده

الکتروود جمع کننده کار جمع کردن بار را انجام می دهد. در مورد اتاقک های یونش هوای آزاد زیاد بودن این طول به کاهش عدم قطعیت اندازه گیری مکانیکی و جمع آوری بهتر بارها منجر می شود. از طرف دیگر کوچکتر بودن این طول به کمینه کردن اثر عدم یکنواختی در توزیع میدان الکتریکی کمک می کند.

حداقل مقدار طول الکتروود جمع کننده، l_c ، باید بزرگتر از برد متوسط الکترون های ثانویه باشد. در رابطه (۱-۳) جرم m با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$m = \rho_{air} \times V_m \quad (۳-۵)$$

در رابطه بالا ρ_{air} چگالی هوای خشک در شرایط دما و فشار استاندارد است. حجم V_m با استفاده از طول مؤثر جمع کننده، l_{eff} ، به همراه مساحت دیافراگم، A ، تعریف می شود. l_{eff} برابر است با:

$$l_{eff} = l_c + \frac{l_g}{2} + \frac{l_g}{2} \quad \Rightarrow \quad l_{eff} = l_c + l_g \quad (۴-۵)$$

دلیل این کار این است که بارهای تولید شده در محل شکاف سهم مساوی در الکتروود جمع کننده و الکتروود گارد صفحه ای دارند. به منظور کمینه کردن عدم قطعیت l_{eff} ، یک اندازه گیری مکانیکی از مرتبه میکرومتر جهت تعیین l_c و l_g لازم است.

۵-۲-۴ سیستم دیافراگم

دیافراگم معمولاً بشکل استوانه و از یک فلز چگال (طلا، سرب و یا تنگستن) و یا آلارژی از آن ساخته می شود. ضخامت دیافراگم باید به اندازه ای باشد که نشی پرتو از بدنه آن ناچیز باشد. معمولاً به منظور راحتی ساخت و اندازه گیری مساحت، روزنه دیافراگم بشکل استوانه ساخته می شود. در طراحی ابعاد روزنه دیافراگم باید موارد زیر را در نظر داشت:

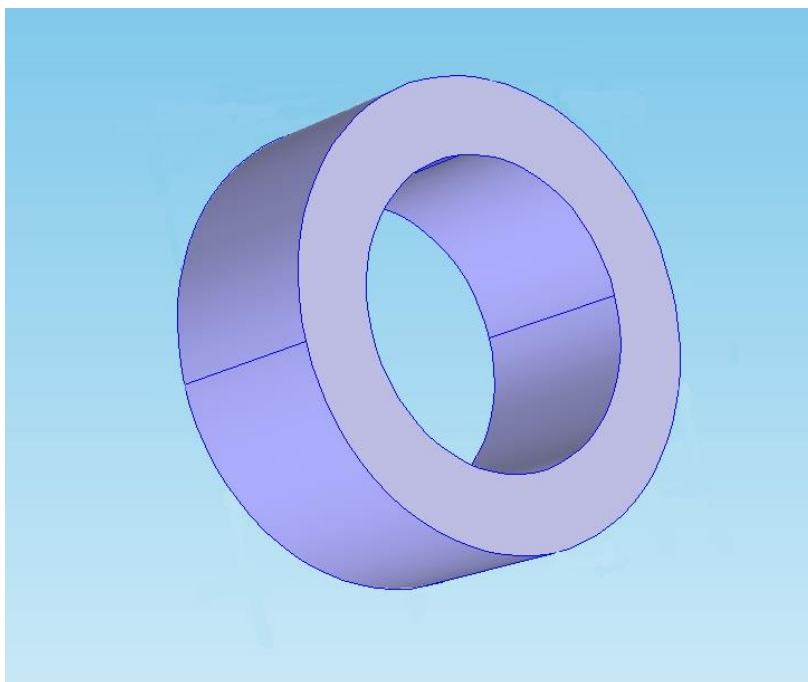
➤ اگر روزنه خیلی کوچک باشد:

- ۱- ماشین کاری دشوار است؛
- ۲- اندازه‌گیری دقیق سخت است؛
- ۳- هم‌راستا شدن آن با پرتو ورودی مشکل است؛
- ۴- پراکندگی فوتون‌های ورودی از سطح آن افزایش می‌یابد.

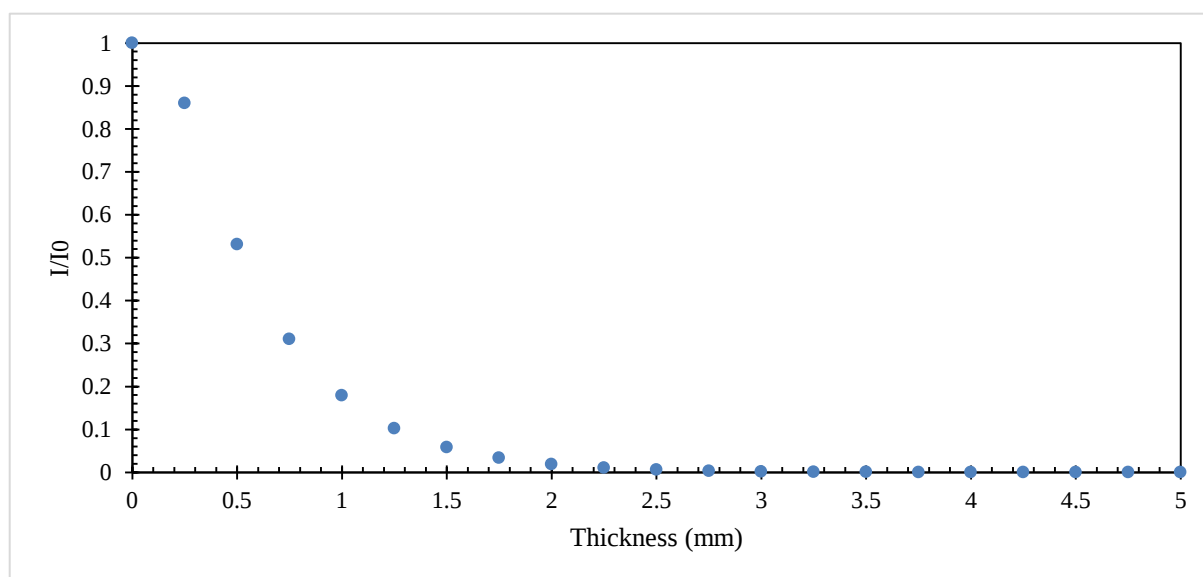
➤ اگر روزنه خیلی بزرگ باشد:

- ۱- بازترکیب یون در یک پتانسیل معین افزایش می‌یابد؛
- ۲- پرتوها در اثر برخورد با گاردهای نوای پراکنده می‌شوند؛
- ۳- فرار یون افزایش پیدا می‌کند؛
- ۴- سبب غیر یکنواخت شدن پرتو عبوری از دیافراگم می‌شود.

به‌منظور جلوگیری از پراکندگی فوتون‌های واقع در کانون اشعه X از لبه‌های دیافراگم، قطر دهانه دیافراگم باید بزرگتر از قطر کانون لامپ اشعه X باشد [۲۸]. قطر کانون لامپ اشعه X معمولاً کوچکتر از 4 mm است، در نتیجه قطر روزنه دیافراگم باید بزرگتر از 4 mm باشد. در ساخت اتاقک یونش FAC-IR-150 از آلیارژ تنگستن-مس با چگالی 16.5 g/cm^3 برای ساخت دیافراگم استفاده شده است. همچنین قطر دهانه دیافراگم 8 mm در نظر گرفته شد. شکل (۳-۵) نمایی از دیافراگم اتاقک یونش FAC-IR-150 را نشان می‌دهد. ضخامت بهینه دیافراگم با استفاده از شبیه‌سازی MCNP بدست می‌آید. شکل (۴-۵) نتایج شبیه‌سازی برای فوتون‌های انرژی 150 keV را نشان می‌دهد. به‌منظور کمینه کردن سهم عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری مساحت دیافراگم در عدم قطعیت تعیین جرم هوا، باید اندازه‌گیری مکانیکی دقیق از مرتبه میکرومتر انجام شود.



شکل (۳-۵) نمایی از دیافراگم اتاقک یونش FAC-IR-150

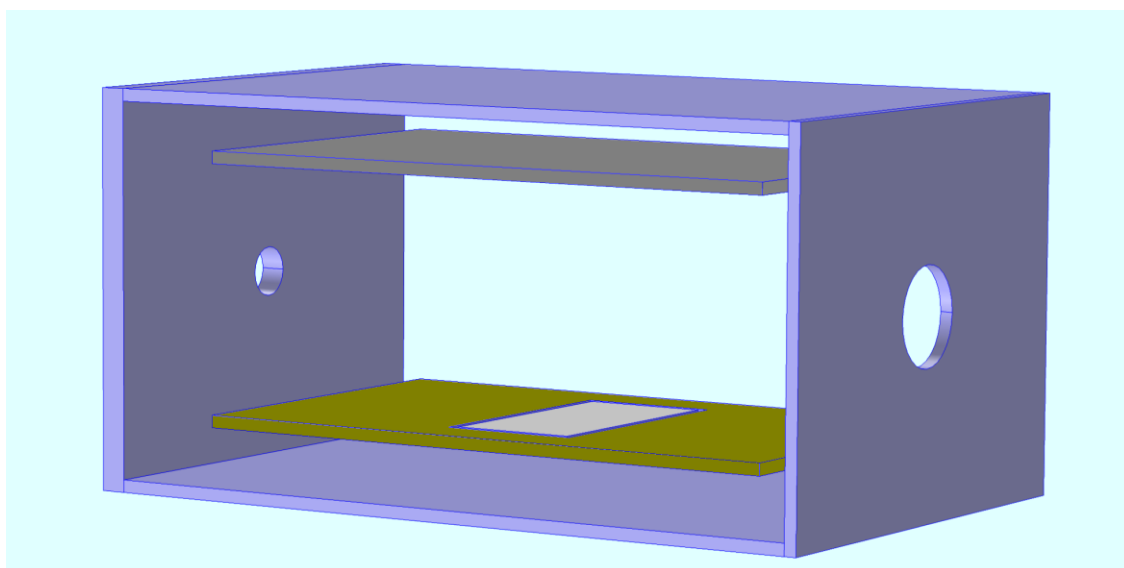


شکل (۴-۵) تغییرات شار فوتون عبوری از صفحه تنگستن بر حسب ضخامت برای فوتون‌های 150 keV

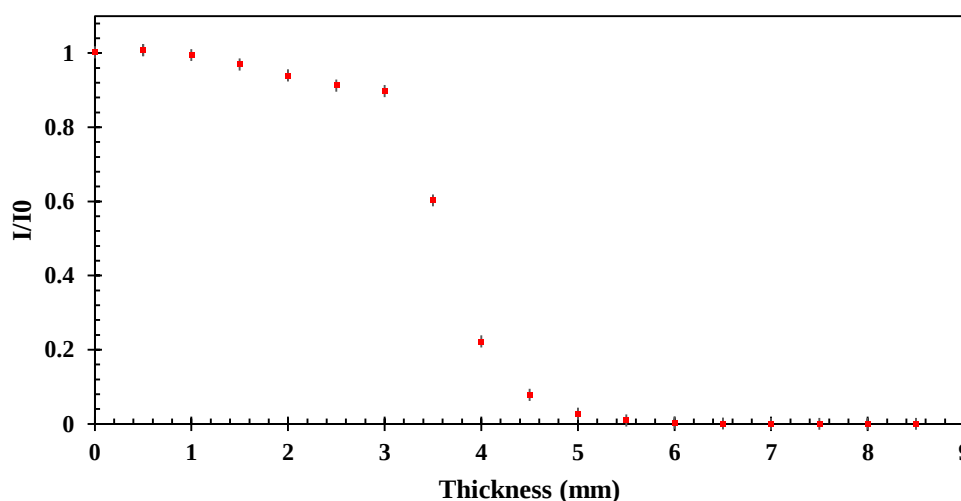
۵-۲-۵ پوشش محافظ

به منظور کمینه کردن تأثیر تابش‌های مزاحم بر عملکرد اتاقک یونش هوای آزاد، از پوشش محافظ مطابق شکل (۵-۵) در اطراف اتاقک یونش استفاده می‌شود. در این کار از صفحات استیل با ضخامت

3 mm جهت ساخت پوشش محافظ استفاده شده است. به‌علاوه این که صفحه جلویی در مقابل پرتو قرار دارد به منظور افزایش تضعیف پرتو، از یک صفحه سربی به ضخامت 4 mm بین دو صفحه استیل استفاده شده است. جهت بررسی تضعیف پرتو در عبور از صفحه جلویی از کد MCNP استفاده شده است. شکل (۵-۶) نتایج شبیه‌سازی را برای فوتون‌های 150 keV نشان می‌دهد.



شکل (۵-۵) نمای کلی از پوشش محافظ اتاقک یونش FAC-IR-150



شکل (۵-۶) تضعیف شار فوتون عبوری از صفحه محافظ جلویی برای فوتون‌های 150 keV

۵-۳ ضرایب تصحیح

برخی از ضرایب تصحیح که در رابطه (۲-۳) نشان داده شده است با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم بدست می‌آیند و برخی دیگر با استفاده از شبیه‌سازی تعیین می‌شوند. در فصل سوم توضیحات کاملی در مورد نحوه محاسبه ضرایب تصحیح ارائه شده است. در این بخش مقادیر محاسبه شده این ضرایب آمده است.

۵-۳-۱ ضریب تصحیح رطوبت

همانطور که در بخش (۳-۲-۳) بحث شد، تغییرات رطوبت باعث تغییر در پاسخ اتاقک یونش می‌شود. به منظور اصلاح این اثر ضریب k_h را معرفی کردیم. در این بخش مقدار این ضریب را در رطوبت‌های نسبی مختلف بدست می‌آوریم. با استفاده از رابطه (۱-۳) و با فرض ثابت ماندن دما و فشار، گرمای هوای مرطوب را می‌توان بر حسب گرمای هوای خشک بدست آورد. ضریب تصحیح رطوبت را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$k_h = \frac{Q_d}{Q_h} \quad (۵-۵)$$

در رابطه (۵-۵)، Q_d و Q_h به ترتیب بار تولید شده در حجم حساس برای هوای خشک و هوای مرطوب می‌باشند. با قرار دادن Q از رابطه (۱-۳) در رابطه (۵-۵) داریم:

$$k_h = \frac{\frac{K_d m_d}{(\frac{W}{e})_d}}{\frac{K_h m_h}{(\frac{W}{e})_h}} \Rightarrow \frac{K_d W_h m_d}{K_h W_d m_h} \quad (۶-۵)$$

جدول (۲-۵) مقادیر m_w بر حسب گرم آب موجود در هر کیلوگرم از هوای خشک در رطوبت‌های نسبی مختلف را نشان می‌دهد. در رابطه (۶-۵)، مقادیر $\frac{W_h}{W_d}$ با استفاده از گزارش ICRU 31 [۳۰] که در جدول (۴-۵) آمده و نسبت $\frac{K_d}{K_h}$ با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو بدست می‌آیند. همچنین

نسبت $\frac{m_d}{m_h}$ مطابق داده‌های جدول (۲-۵) تعیین می‌شود. در جدول (۳-۵) مقادیر ضریب x و چگالی

هوا در رطوبت‌های نسبی مختلف آمده است. در شکل (۷-۵) تغییرات نسبت چگالی هوای مرطوب به

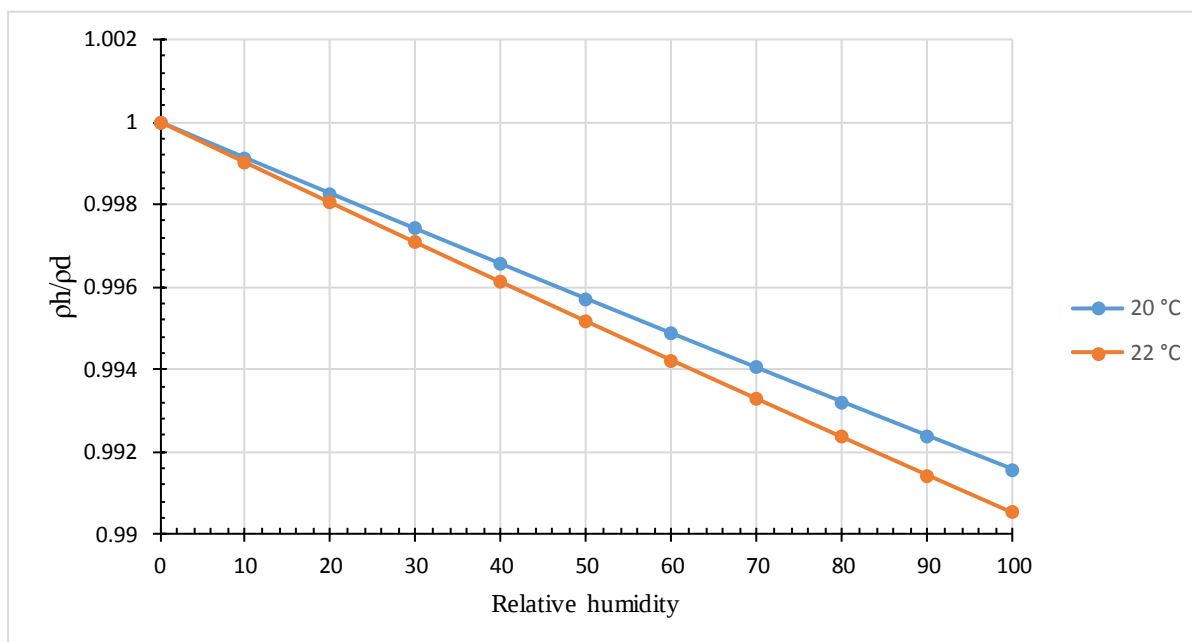
چگالی هوای خشک در دماهای 20°C و 22°C نشان داده شده است.

جدول (۲-۵) مقادیر m_w بر حسب گرم در طوبت نسبی مختلف

Relative Humidity %	m_w	
	20°C	22°C
10	1.435	1.623
20	2.871	3.246
30	4.306	4.869
40	5.741	6.492
50	7.176	8.114
60	8.612	9.737
70	10.047	11.360
80	11.482	12.983
90	12.917	14.606
100	14.353	16.229

جدول (۳-۵) مقادیر ضریب x و چگالی هوای مرطوب در رطوبت‌های نسبی مختلف

Humidity %	20°C		22°C	
	x	ρ_{air}	x	ρ_{air}
0	0	0.0012041	0	0.0011959
10	0.001433	0.0012031	0.001620	0.0011947
20	0.002862	0.0012020	0.003235	0.0011936
30	0.004287	0.0012010	0.004845	0.0011924
40	0.005708	0.0012000	0.006450	0.0011913
50	0.007125	0.0011989	0.008049	0.0011901
60	0.008538	0.0011979	0.009643	0.0011890
70	0.009947	0.0011969	0.011233	0.0011879
80	0.011352	0.0011959	0.012817	0.0011868
90	0.012753	0.0011949	0.014396	0.0011857
100	0.014149	0.0011940	0.015970	0.0011846



شکل (۷-۵) تغییرات نسبت ρ_h / ρ_d بر حسب میزان رطوبت نسبی و دمای هوا

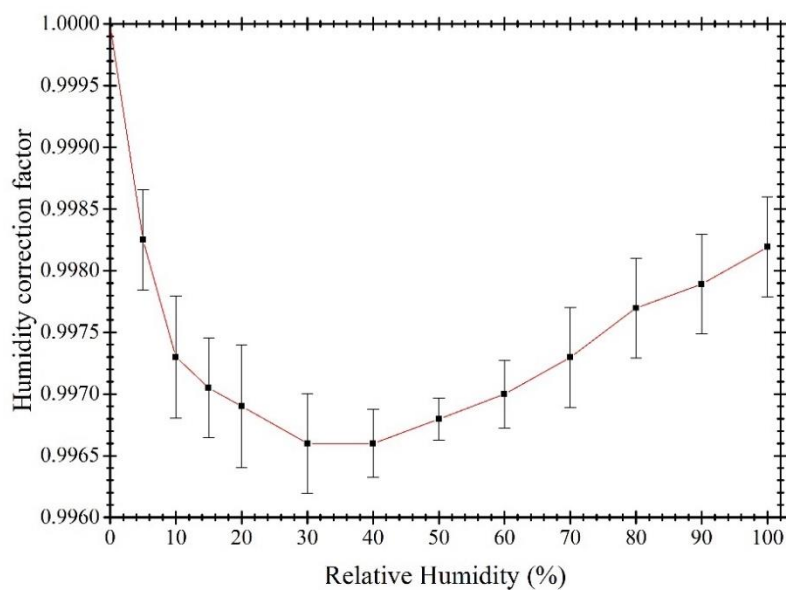
جدول (۴-۵) نسبت W_h / W_d در رطوبت‌های نسبی مختلف [۳۰]

Relative Humidity %	W_h / W_d
0	1.0000
10	0.9966
20	0.9954
30	0.9948
40	0.9942
50	0.9934
60	0.9930
70	0.9924
80	0.9922
90	0.9918
100	0.9912

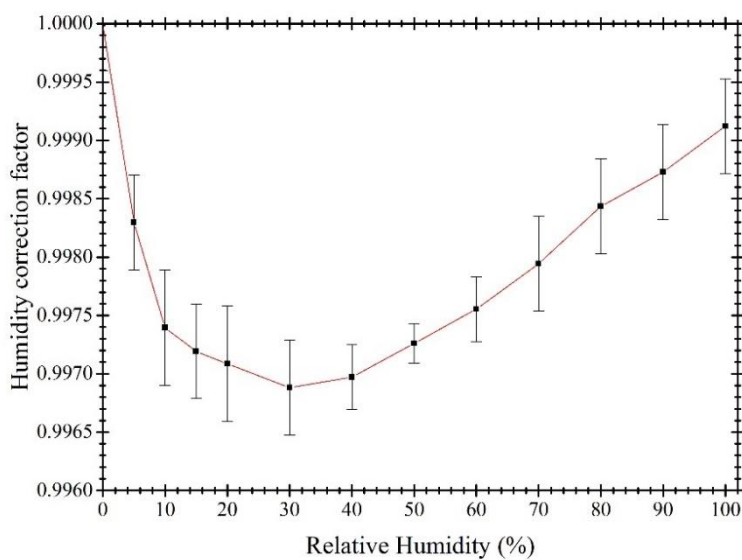
شکل (۸-۵) تغییرات ضریب k_h را در دمای 20 °C و شکل (۹-۵) تغییرات ضریب k_h را در دمای

22 °C بر حسب تغییر درصد رطوبت نسبی نشان می‌دهد. مقادیر ضریب k_h در هر دو شکل در فشار

ثابت 101.325 kPa بدست آمده‌اند. خطاهای نشان داده شده در این دو شکل، معادل 1 σ می‌باشد.



شکل (۵-۸) تغییرات ضریب تصحیح رطوبت بر حسب تغییر درصد رطوبت نسبی در دمای 20 °C



شکل (۵-۹) تغییرات ضریب تصحیح رطوبت بر حسب تغییر درصد رطوبت نسبی در دمای 22 °C

نتایج بدست آمده در این بخش در مقاله موجود در مرجع [۳۱] آمده است.

۵-۳-۲ میدان الکتریکی

قدرت میدان الکتریکی در حجم جمع‌آوری (شکل (۳-۱)) باید به اندازه‌ای باشد که کسر بالایی از بارهای تولیدی را جمع کند، از طرفی آنقدر زیاد نباشد که سبب آغاز فرآیند تکثیر یون‌ها در این ناحیه شود. طول موثر، l_{eff} ، بوسیله خطوط نیرو که از مرکز شکاف هوای بین الکتروود جمع‌کننده و الکتروود گارد صفحه‌ای می‌گذرد تعریف می‌شود، با این فرض که خطوط میدان الکتریکی بر هر دو الکتروود عمود باشد. به‌منظور رسیدن به این هدف باید نکات زیر را در طراحی اتافک در نظر داشت:

- ۱- درجه بالایی از موازی بودن بین الکتروودها؛
- ۲- هم‌صفحه بودن الکتروود جمع‌کننده با الکتروود گارد صفحه‌ای؛
- ۳- هم‌پتانسیل بودن الکتروود جمع‌کننده و الکتروود گارد صفحه‌ای.

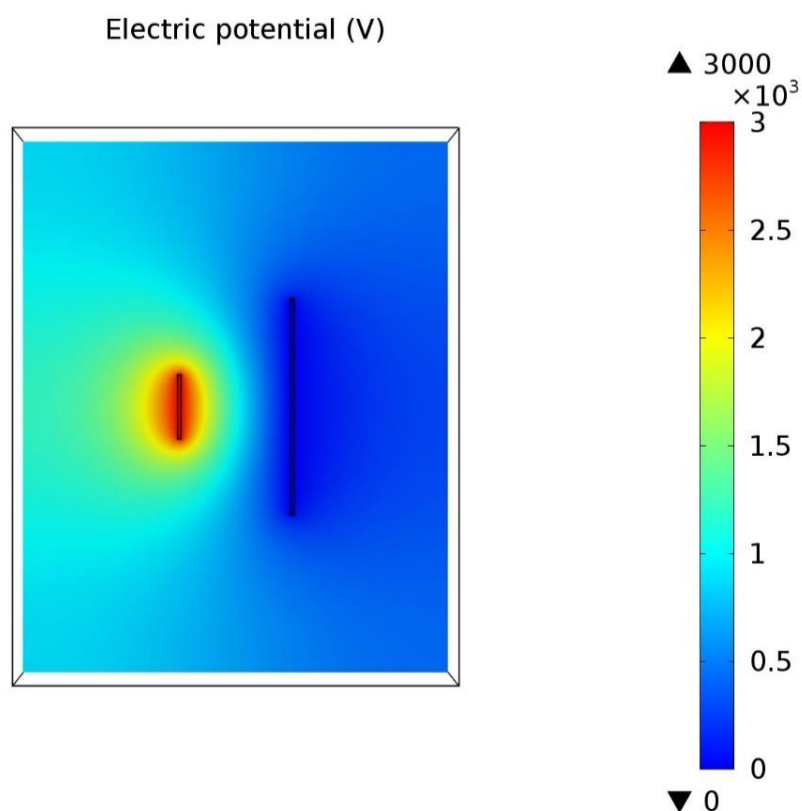
با استفاده از یک سیستم ماشین کاری خوب (در زمان ساخت دستگاه) می‌توان دو شرط اول را تا حد زیادی برآورده کرد. پوشش محافظ اتافک می‌تواند روی توزیع میدان الکتریکی در حجم جمع‌آوری اختلال ایجاد کند. این مشکل تا حد زیادی با اضافه کردن گاردهای نواری^{۳۱} در فضای بین الکتروودهای بالایی و پایینی برطرف می‌شود. گاردهای نواری از نظر الکتریکی از هم جدا بوده و در فواصل مساوی از هم قرار دارند. یک اختلاف پتانسیل الکتریکی خطی تولید شده توسط یک سیستم الکترونیکی تقسیم‌کننده ولتاژ به گاردهای نواری اعمال می‌شود. این مدار به‌منظور جلوگیری از هرگونه اختلال در عملکرد اتافک یونش در بیرون از آن قرار می‌گیرد. در ادامه این بخش به بررسی نقش الکتروود گارد صفحه‌ای، گاردهای نواری و پوشش محافظ در توزیع میدان الکتریکی در داخل حجم اتافک یونش می‌پردازیم. نتایج این بررسی‌ها در مقاله‌ای که در مرجع [۳۲] آمده نشان داده شده شده است.

³¹ Guard strip

۵-۳-۲-۱ خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل در غیاب الکتروود گارد

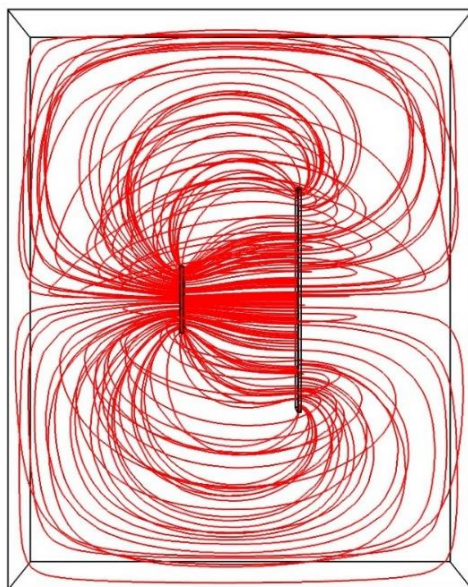
صفحه‌ای

در گام اول سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی را در غیاب الکتروود گارد صفحه‌ای بررسی می‌کنیم. در این بخش از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics جهت شبیه‌سازی سطوح هم‌پتانسیل و خطوط میدان الکتریکی استفاده شده است. شکل (۵-۱۰) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی و شکل (۵-۱۱) خطوط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در غیاب الکتروود گارد صفحه‌ای سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی به شدت منحنی است.



شکل (۵-۱۰) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در غیاب الکتروود گارد صفحه‌ای

Electric field

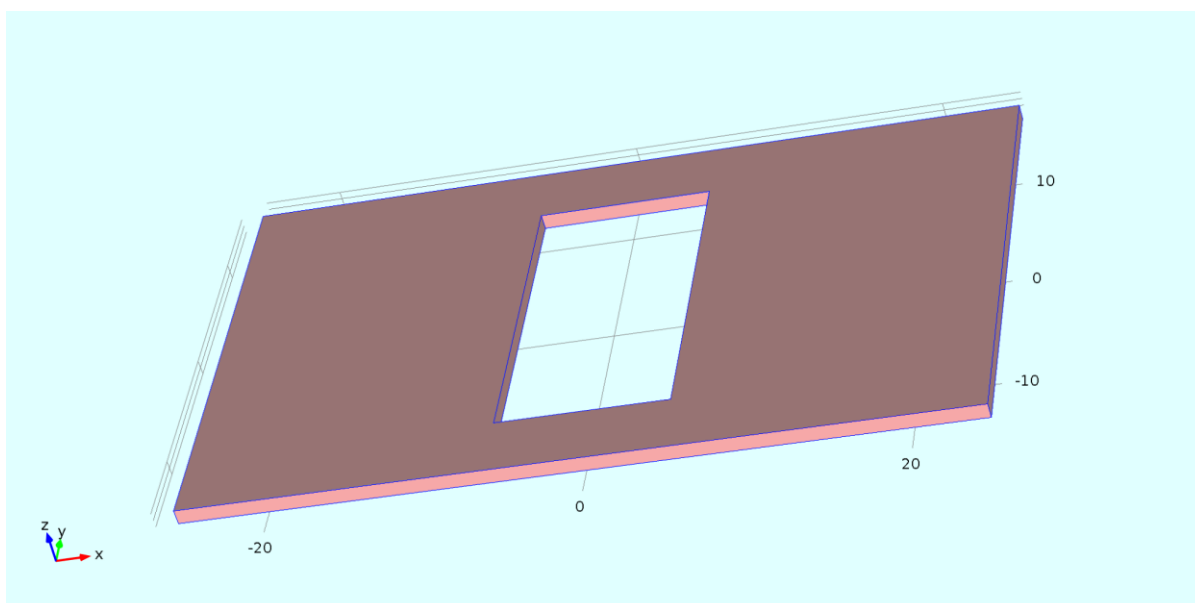


شکل (۵-۱۱) خطوط میدان الکتریکی در غیاب الکترود گارد صفحه‌ای

۵-۳-۲-۲ خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل در حضور الکترود گارد صفحه‌ای

همانطور که در شکل (۵-۱۱) مشاهده شد، خطوط میدان الکتریکی بشدت منحنی بوده و برای استفاده در اتاقک یونش هوای آزاد مناسب نیست. در نتیجه جهت موازی کردن خطوط میدان الکتریکی از الکترود گارد صفحه‌ای مطابق شکل (۵-۱۲) در اطراف الکترود جمع‌کننده استفاده می‌کنیم. یک شکاف کوچک هوا به طول l_g این دو را از هم جدا نگه می‌دارد.

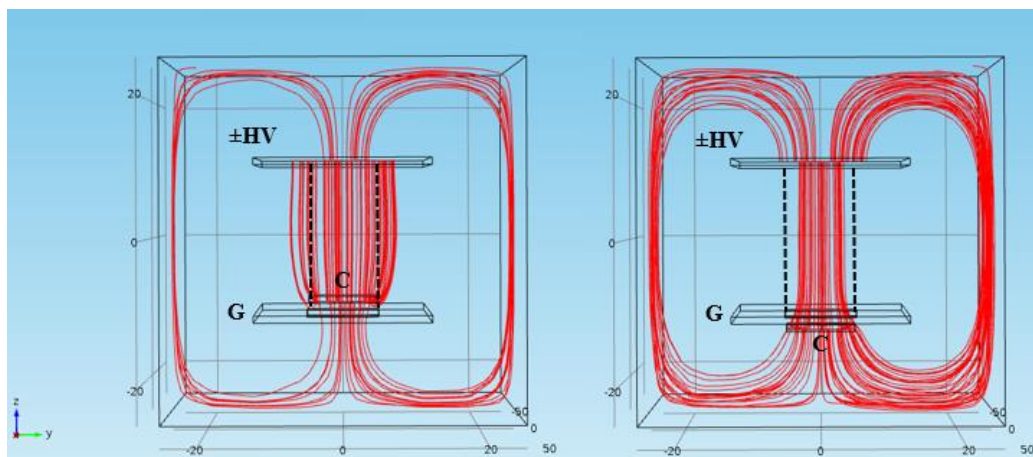
الکترود گارد صفحه‌ای باید دقیقاً در صفحه الکترود جمع‌کننده قرار داشته و از نظر الکتریکی با آن هم‌پتانسیل باشد. هم‌صفحه نبودن الکترود گارد صفحه‌ای و الکترود جمع‌کننده، موازی بودن خطوط میدان الکتریکی در حجم جمع‌آوری را از بین می‌برد.



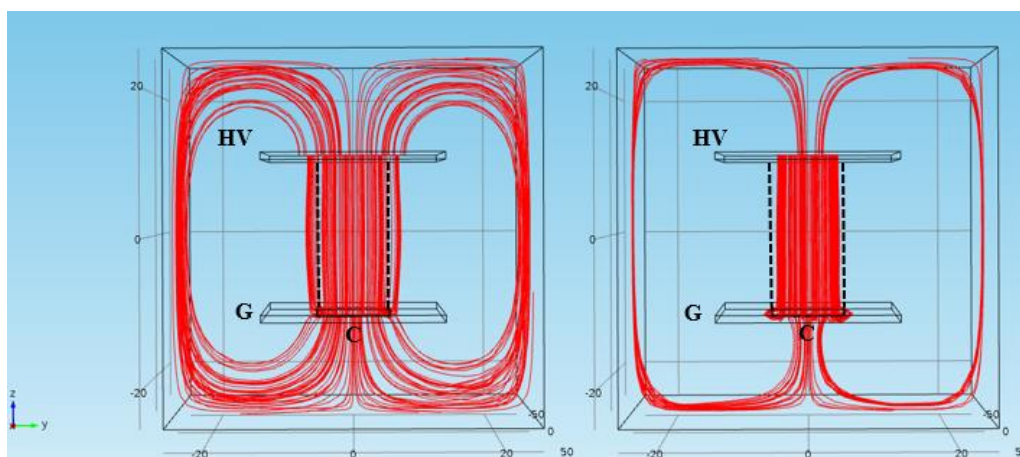
شکل (۵-۱۲) نمایی از الکتروود گارد صفحه‌ای

شکل (۵-۱۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را برای حالتی که الکتروود جمع‌کننده بالاتر از الکتروود گارد صفحه‌ای است (شکل سمت چپ) و حالتی که الکتروود جمع‌کننده پایین‌تر از الکتروود گارد صفحه‌ای است (شکل سمت راست) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود موازی بودن خطوط میدان نسبت به حالتی که دو الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده دقیقاً هم‌صفحه هستند (شکل (۵-۱۵)) از بین رفته است.

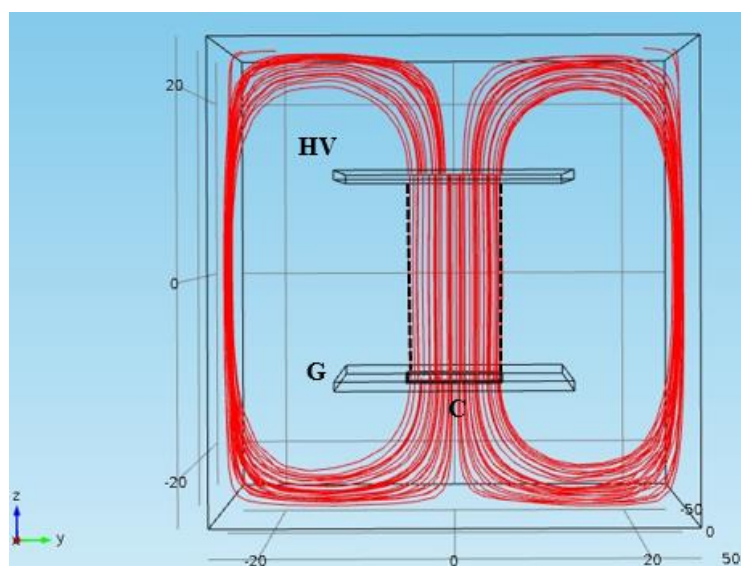
نکته مهم دیگری که باید در طراحی الکتروود گارد صفحه‌ای به آن توجه شود هم‌پتانسیل بودن آن با الکتروود جمع‌کننده است. شکل (۵-۱۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای حالت‌هایی که الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده هم‌پتانسیل نیستند را نشان می‌دهد. در شکل سمت چپ الکتروود گارد صفحه‌ای در پتانسیل پایین‌تری نسبت به الکتروود جمع‌کننده بوده در حالی که در شکل سمت راست گارد صفحه‌ای در پتانسیل بالاتری نسبت به الکتروود جمع‌کننده قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هم‌پتانسیل نبودن الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده، موازی بودن خطوط میدان الکتریکی در حجم جمع‌آوری را از بین می‌برد.



شکل (۵-۱۳) هم صفحه نبودن الکترون گارد صفحه‌ای و الکترون جمع کننده



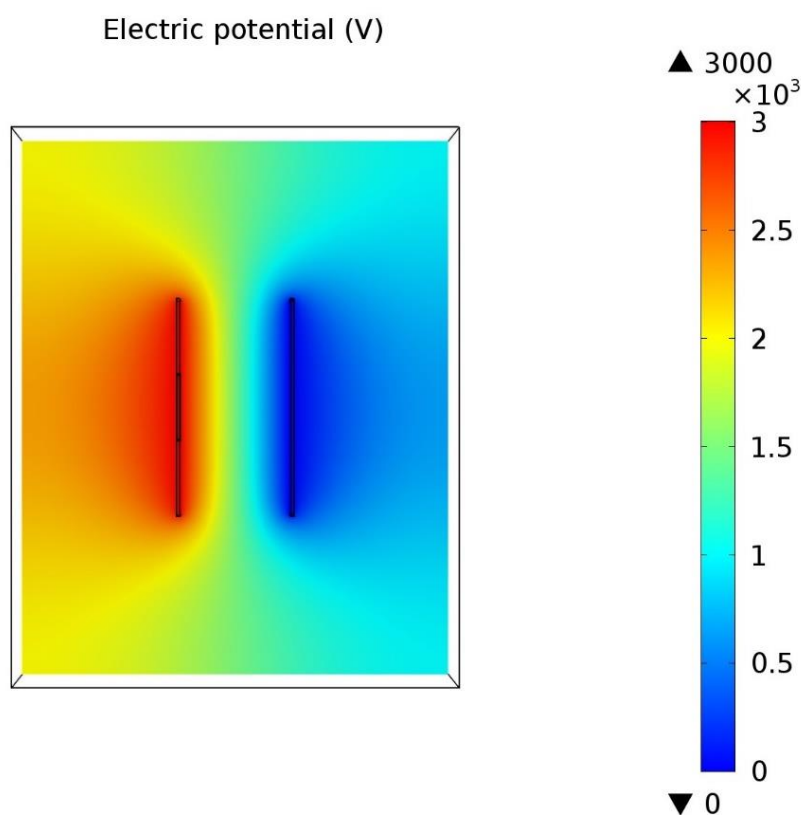
شکل (۵-۱۴) هم پتانسیل نبودن الکترون گارد صفحه‌ای و الکترون جمع کننده



شکل (۵-۱۵) هم صفحه و هم پتانسیل بودن الکترون گارد صفحه‌ای و الکترون جمع کننده

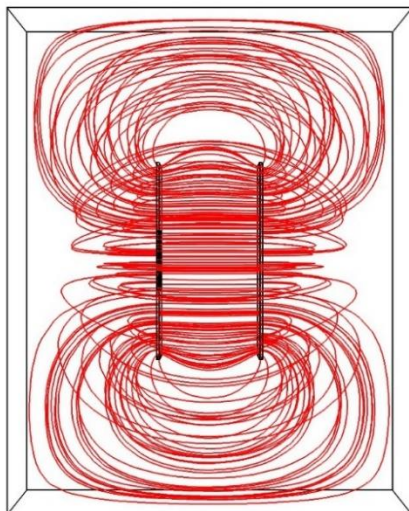
بعد از بررسی دو عامل هم‌صفحه بودن و هم‌پتانسیل بودن الکتروود گارد صفحه‌ای و الکتروود جمع‌کننده، در مرحله بعد تأثیر حضور الکتروود گارد صفحه‌ای روی توزیع میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه بالایی و پایینی را بررسی می‌کنیم. نتایج حاصل از اضافه شدن الکتروود گارد صفحه‌ای بر روی سطوح هم‌پتانسیل و خطوط میدان الکتریکی بترتیب در شکل (۵-۱۶) و شکل (۵-۱۷) آمده است.

همانطور که در شکل (۵-۱۷) مشاهده می‌شود مطابق انتظار ما خطوط میدان الکتریکی کاملاً موازی و عمود بر الکتروود بالایی شده‌اند. با این حال هنوز در لبه‌های به‌علت اثرات لبه، شاهد انحنای خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل هستیم. در بخش بعدی با اضافه کردن گاردهای نواری تا حد زیادی اثر لبه را اصلاح می‌کنیم.



شکل (۵-۱۶) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در حضور الکتروود گارد صفحه‌ای

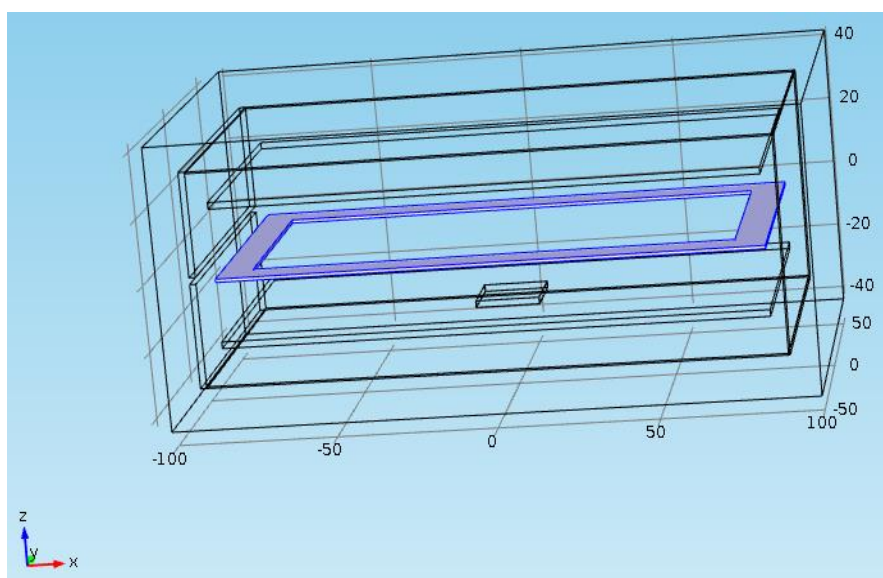
Electric field



شکل (۱۷-۵) خطوط میدان الکتریکی در حضور الکتروود گارد صفحه‌ای

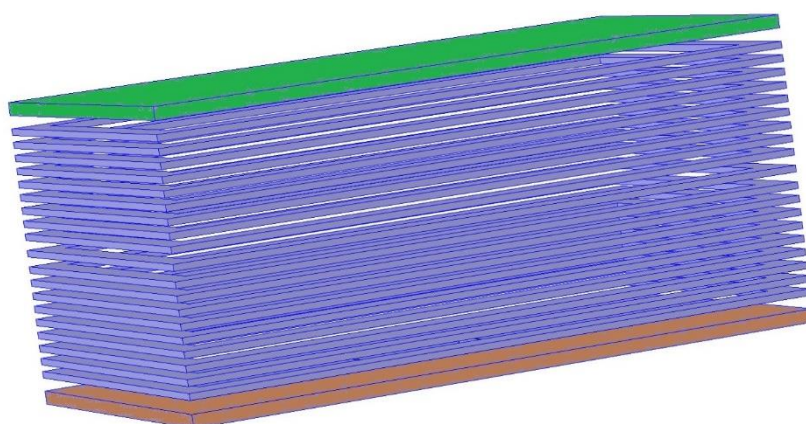
۵-۳-۲-۳ گاردهای نواری

همانطور که در شکل (۱۶-۵) و شکل (۱۷-۵) مشاهده شد، با قرار دادن الکتروود گارد صفحه‌ای خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل در فضای بین الکتروودها تا حد زیادی موازی شد. با این حال، هنوز در لبه‌ها ما شاهد انحنا در خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل هستیم. برای اصلاح این اثر از گارد نواری که در شکل (۱۸-۵) نشان داده شده بین دو الکتروود بالایی و پایینی استفاده می‌کنیم. در این طراحی ما از یک سیستم گارد نواری مطابق شکل (۱۹-۵) استفاده کردیم. نتایج نشان داده شده در مراجع [۳۳] و [۳۴] نشان می‌دهد که فاصله جدایی بین گاردهای نواری نباید بیشتر از یک دهم طول تضعیف (l_{at}) باشد. همچنین نتایج بررسی‌ها در مرجع [۳۵] نشان می‌دهد که افزایش ضخامت نوارها و کاهش عایق بین آنها می‌تواند میزان یکنواختی میدان الکتریکی را بهبود بخشد.



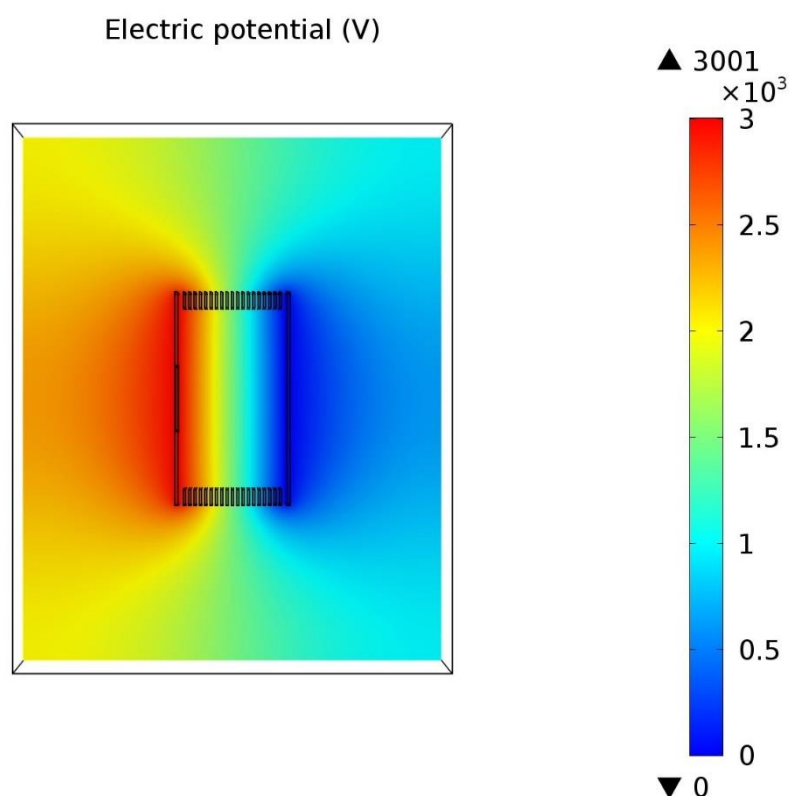
شکل (۵-۱۸) نمایی از یک گارد نواری

در طراحی اتاقک یونش FAC-IR-150 از آلومینیوم در ساخت گاردهای نواری استفاده شده است. تعداد کل گاردها همان‌طور که در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است برابر با ۱۹ عدد می‌باشد. در طراحی گاردهای نواری باید دقت شود که این گاردها کاملاً با الکترودهای بالایی و پایینی موازی بوده و فواصل بین آنها کاملاً یکسان باشد تا میدان یکنواختی ایجاد شود. برای اعمال پتانسیل الکتریکی به گاردهای نواری از یک سیستم تقسیم ولتاژ استفاده می‌شود.



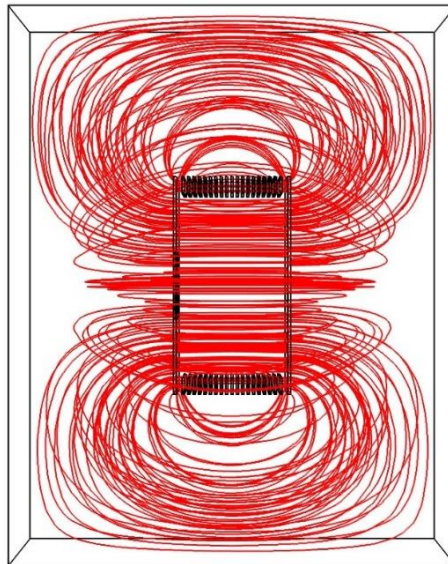
شکل (۵-۱۹) نمایی از قرار گرفتن گاردهای نواری بین دو الکتروده بالا و پایین

نحوه اعمال پتانسیل به این صورت است که یک اختلاف پتانسیل خطی به هر گارد اعمال می‌شود. همچنین برای جلوگیری از تأثیر گرمای تولید شده توسط مدار تقسیم کننده ولتاژ روی توزیع دمای هوای داخل اتاقک یونش، تقسیم کننده ولتاژ باید در خارج از اتاقک یونش قرار داشته باشد. نتایج حاصل از اضافه کردن گاردهای نواری در شکل (۲۰-۵) و شکل (۲۱-۵) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با اعمال گاردهای نواری میزان انحنای موجود در لبه‌ها بشدت کاهش پیدا می‌کند.



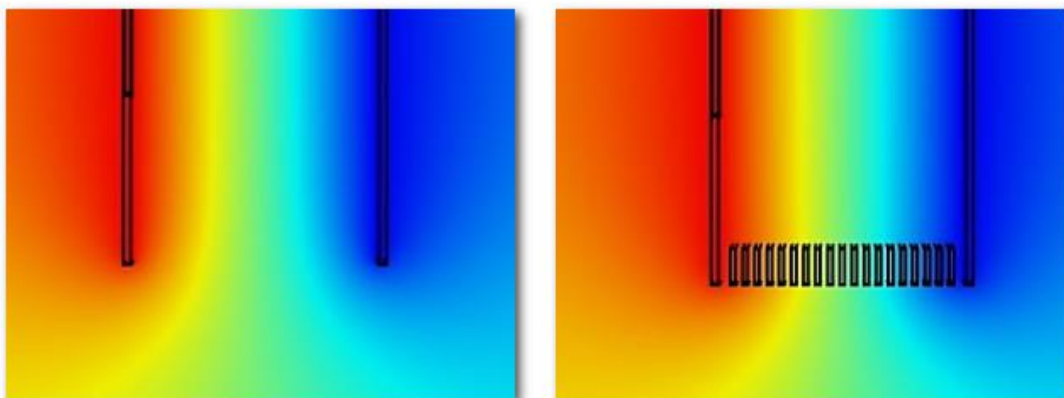
شکل (۲۰-۵) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در حضور گاردهای نواری

Electric field



شکل (۲۱-۵) خطوط میدان الکتریکی در حضور گاردهای نواری

شکل (۲۲-۵) مقایسه بین حالت وجود گاردهای نواری (شکل سمت راست) و عدم وجود گارد نواری (شکل سمت چپ) را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود با قرار دادن گاردهای نواری و اعمال پتانسیل خطی به آنها انحنای موجود در لبه الکترودها تا حد زیادی از بین رفته است.

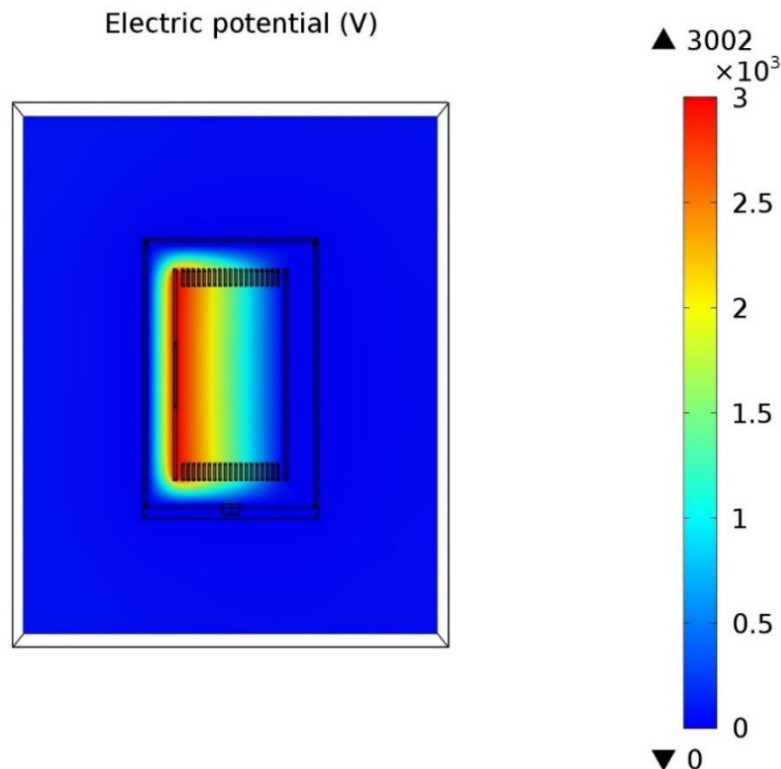


شکل (۲۲-۵) سطوح هم‌پتانسیل در حضور (شکل راست) و در غیاب (شکل چپ) گاردهای نواری

۵-۳-۲-۴ پوشش محافظ

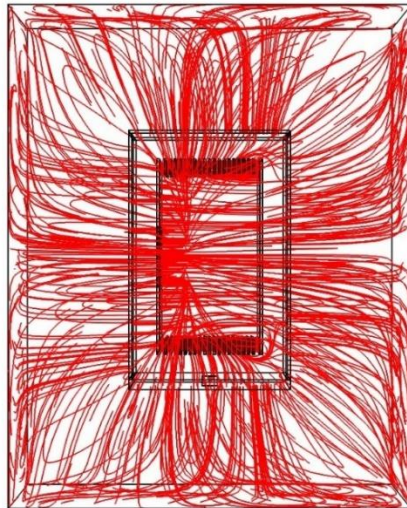
همانطور که در بخش ۳-۲-۴ اشاره شد، استفاده از پوشش محافظ به منظور جلوگیری از تأثیر تابش‌های مزاحم بر عملکرد اتاقک یونش الزامی است. از طرفی به علت رسانا بودن، پوشش محافظ بر توزیع میدان الکتریکی در اطراف و داخل اتاقک یونش تأثیر می‌گذارد. در این بخش، با استفاده از شبیه‌سازی COMSOL تأثیر پوشش محافظ را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

شکل (۲۳-۵) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در حضور پوشش محافظ را نشان می‌دهد. بر خلاف شکل (۲۰-۵) حضور پوشش محافظ، یکنواختی سطوح هم‌پتانسیل را از بین می‌برد. شکل (۲۴-۵) خطوط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود حضور پوشش محافظ به شدت خطوط میدان الکتریکی در داخل اتاقک یونش را غیر موازی می‌کند. نتایج نشان داده شده در شکل (۲۳-۵) و شکل (۲۴-۵) برای یک پوشش محافظ با پتانسیل صفر می‌باشد.



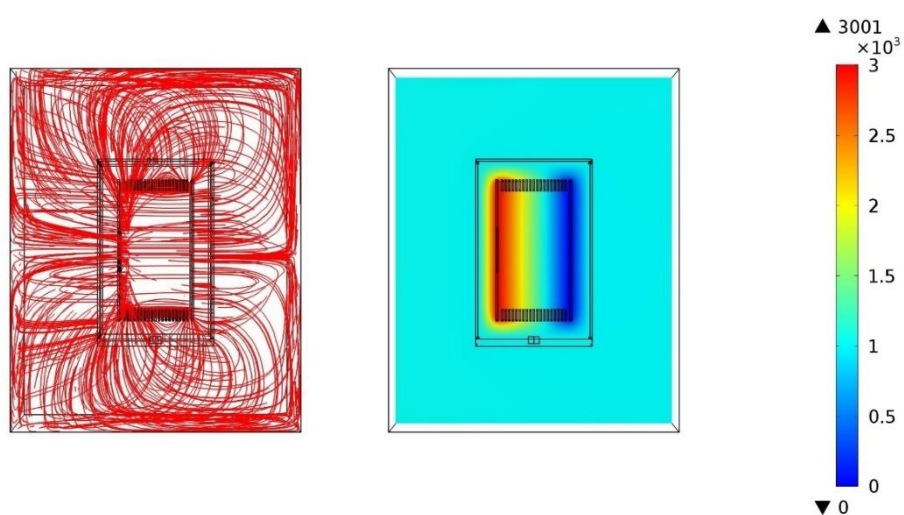
شکل (۲۳-۵) سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی در حضور پوشش محافظ

Electric field

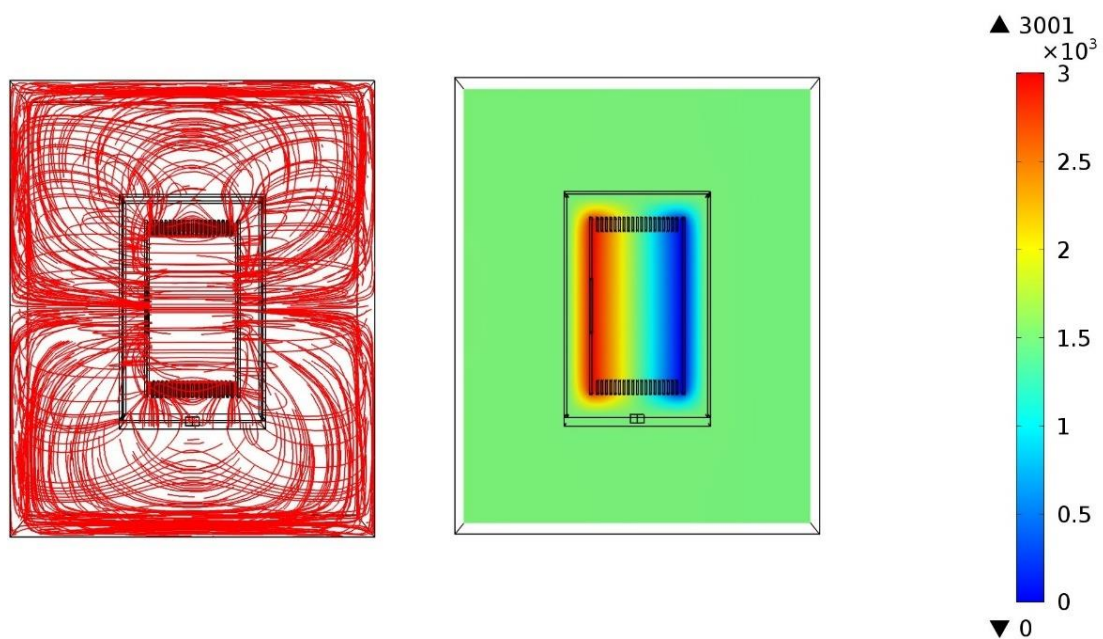


شکل (۲۴-۵) خطوط میدان الکتریکی در حضور پوشش محافظ

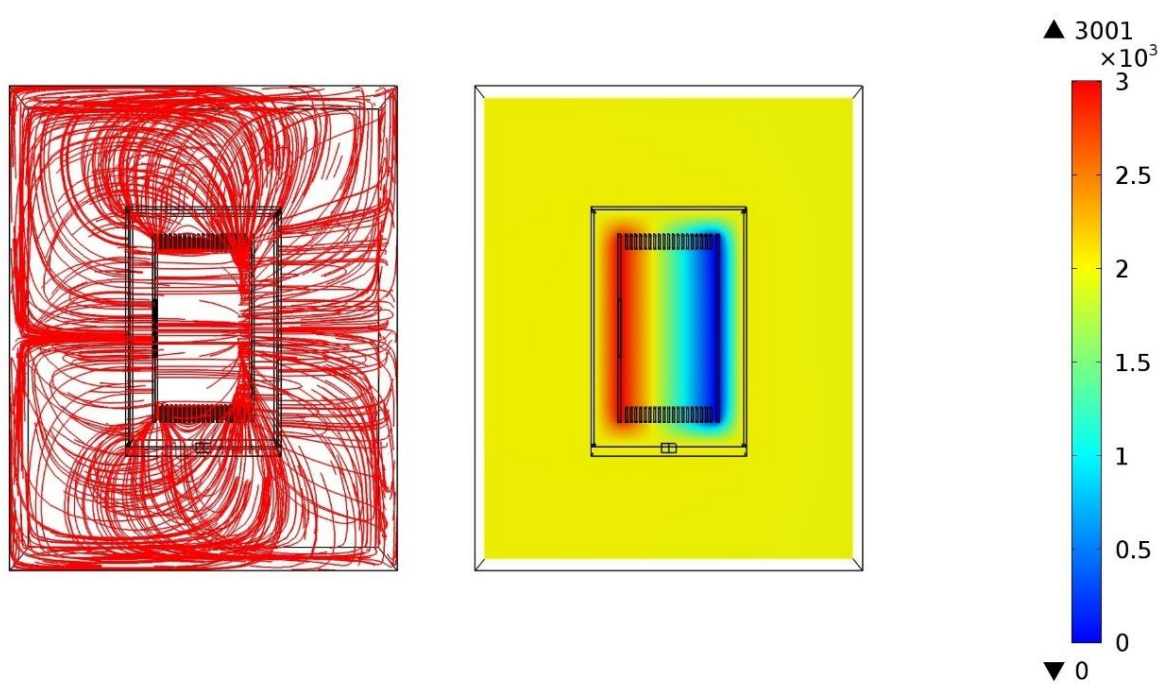
به منظور اصلاح تأثیر پوشش محافظ بر توزیع میدان الکتریکی داخل اتاقک، به پوشش محافظ پتانسیل الکتریکی اعمال می‌کنیم. در شکل (۲۵-۵) تا شکل (۲۷-۵) بترتیب پتانسیل‌های $+1000\text{ V}$ ، $+1500\text{ V}$ و $+2000\text{ V}$ به پوشش محافظ اعمال شده است.



شکل (۲۵-۵) خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی برای پتانسیل جعبه $+1000\text{ V}$

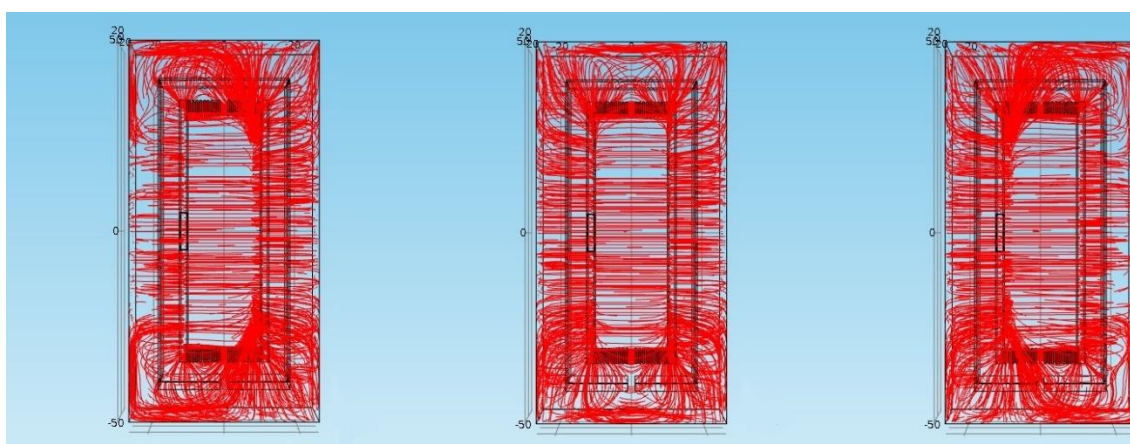


شکل (۵-۲۶) خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی برای پتانسیل جعبه +1500V

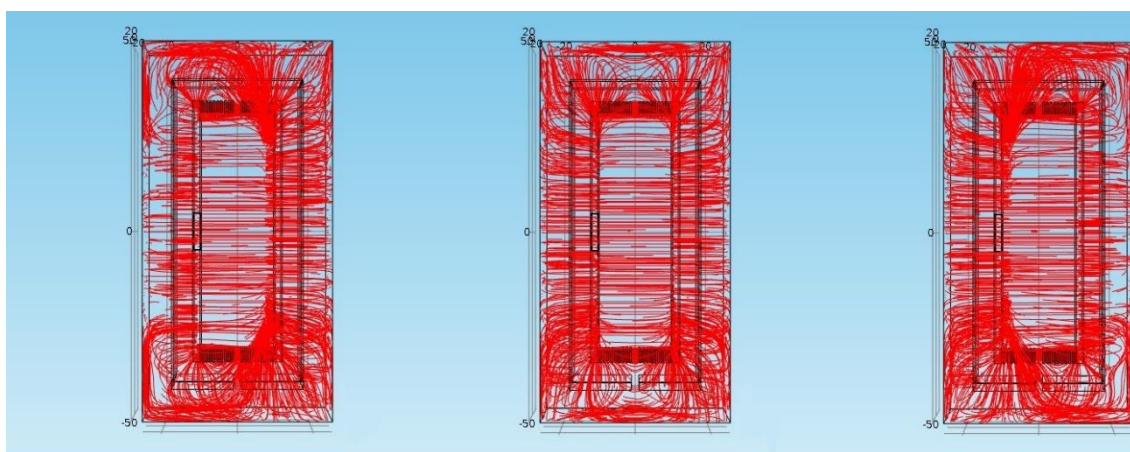


شکل (۵-۲۷) خطوط میدان الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی برای پتانسیل جعبه +2000V

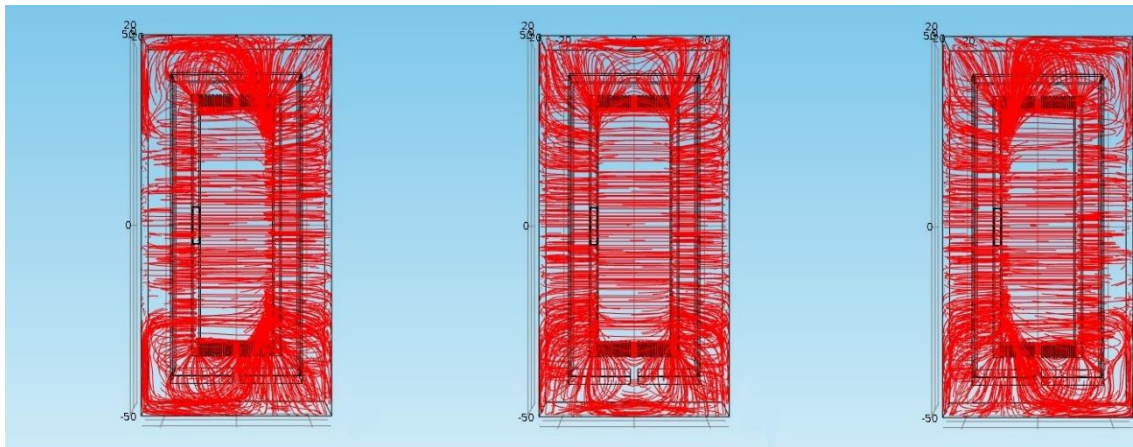
همانطور که در شکل (۲۵-۵) تا شکل (۲۷-۵) مشاهده می‌شود، پتانسیل بهینه پوشش محافظ برابر با 1500 V است. یعنی در پتانسیلی معادل نصف پتانسیل اعمال شده به اتاقک یونش. برای اطمینان از اینکه آیا همواره پتانسیل بهینه پوشش محافظ معادل نصف پتانسیل اعمال شده به اتاقک یونش است، شبیه‌سازی‌های بالا را برای پتانسیل اتاقک یونش معادل 1000 V ، 2000 V و 4000 V تکرار کردیم. همانطور که در شکل (۲۸-۵) تا شکل (۳۰-۵) مشاهده می‌شود، در تمام این موارد بهینه پتانسیل پوشش محافظ برابر $V/2$ است.



شکل (۲۸-۵) خطوط میدان الکتریکی برای اختلاف پتانسیل 1000 V بین دوصفحه و پتانسیل پوشش محافظ 250 V (شکل چپ)، 500 V (شکل وسط) و پتانسیل 750 V (شکل راست)



شکل (۲۹-۵) خطوط میدان الکتریکی برای اختلاف پتانسیل 2000 V بین دوصفحه و پتانسیل پوشش محافظ 500 V (شکل چپ)، 1000 V (شکل وسط) و پتانسیل 1500 V (شکل راست)

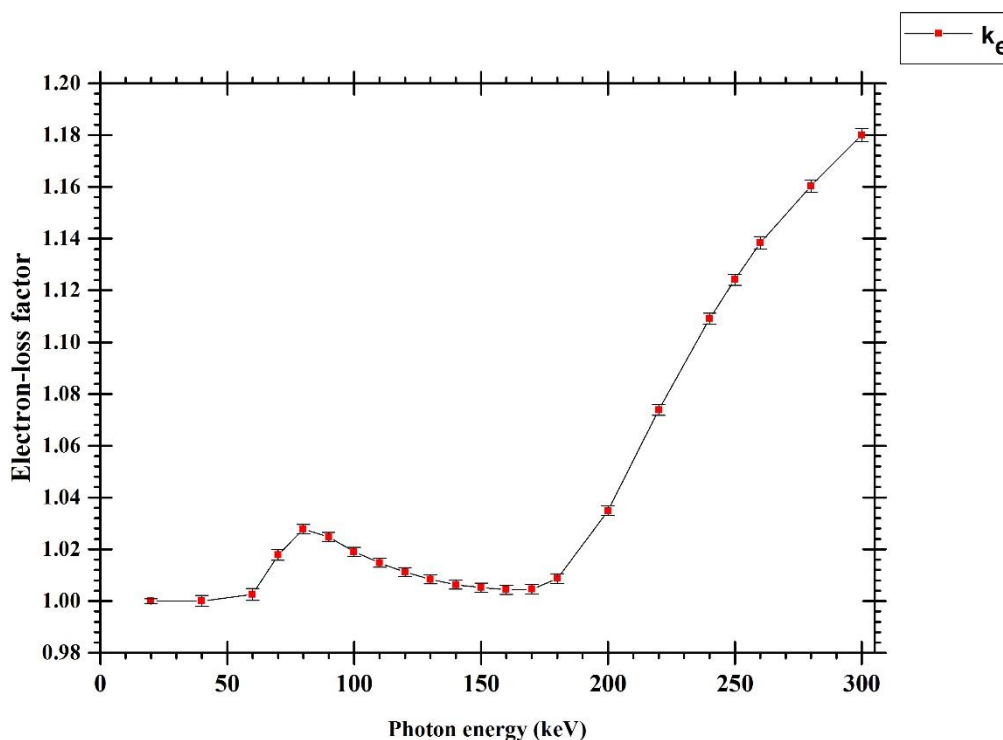


شکل (۵-۳) خطوط میدان الکتریکی برای اختلاف پتانسیل +4000 V بین دو صفحه و پتانسیل پوشش محافظ +1000 V (شکل چپ)، +2000 V (شکل وسط) و پتانسیل +3000 V (شکل راست)

۵-۳-۳ ضریب تصحیح فرار الکترون

برای شبیه‌سازی ضریب فرار الکترون، k_e از کد شبیه‌سازی MCNP4C استفاده می‌شود. هندسه مورد استفاده در شبیه‌سازی در شکل (۵-۳) نشان داده شد. تعداد تاریخچه مورد استفاده 10^8 می‌باشد. شکل (۵-۳۱) تغییرات ضریب k_e بر حسب انرژی را نشان می‌دهد.

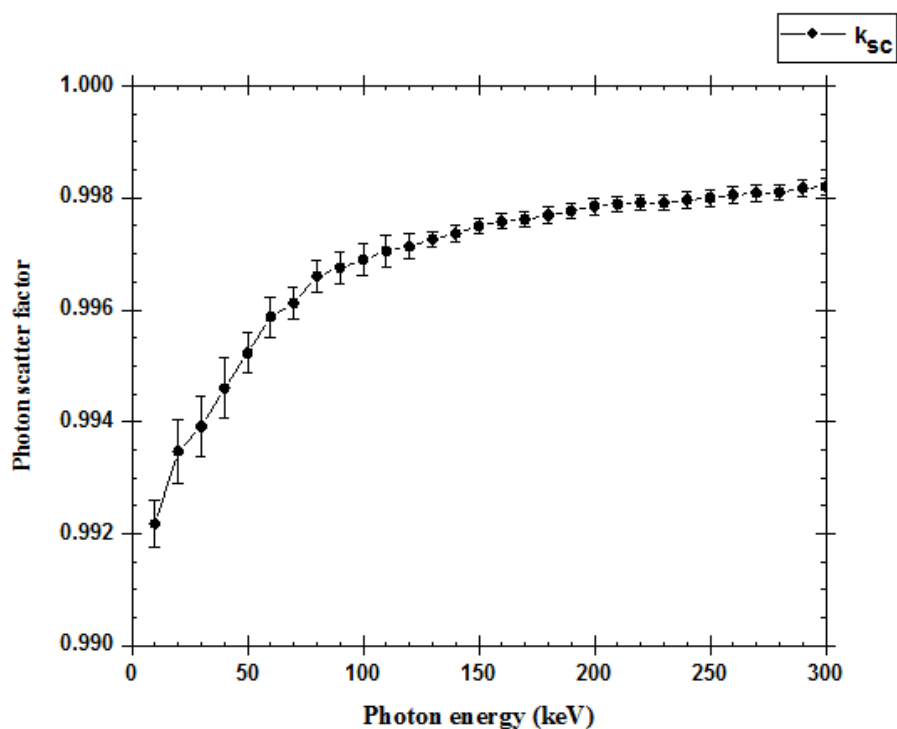
علت به‌وجود آمدن قله در شکل (۵-۳۱) به برهمکنش فوتون-الکترون بر می‌گردد. همانطور که می‌دانیم در انرژی‌های پایین برهمکنش فوتوالکتریک غالب است. با افزایش انرژی فوتون‌های ورودی انرژی فوتو-الکترون‌ها بیشتر شده و این الکترون‌های پر انرژی بر راحتی از حجم جمع‌آوری فرار می‌کنند. با این وجود، افزایش انرژی فوتون‌های ورودی سطح مقطع واکنش فوتو الکتریک را کاهش می‌دهد. در ادامه با افزایش بیشتر انرژی فوتون‌های ورودی سطح مقطع پراکندگی کامپتون افزایش پیدا می‌کند. با افزایش انرژی فوتون‌های ورودی، الکترون‌های کامپتون انرژی بیشتری بدست آورده و شانس فرار آن‌ها بیشتر می‌شود. در نتیجه منحنی تغییرات ضریب k_e نسبت به انرژی روند صعودی به خود می‌گیرد. نتایج این بررسی در مرجع [۳۶] آمده است.



شکل (۳۱-۵) منحنی تغییرات ضریب فرار الکترون بر حسب انرژی فوتون ورودی

۵-۳-۴ ضریب تصحیح پراکندگی فوتون

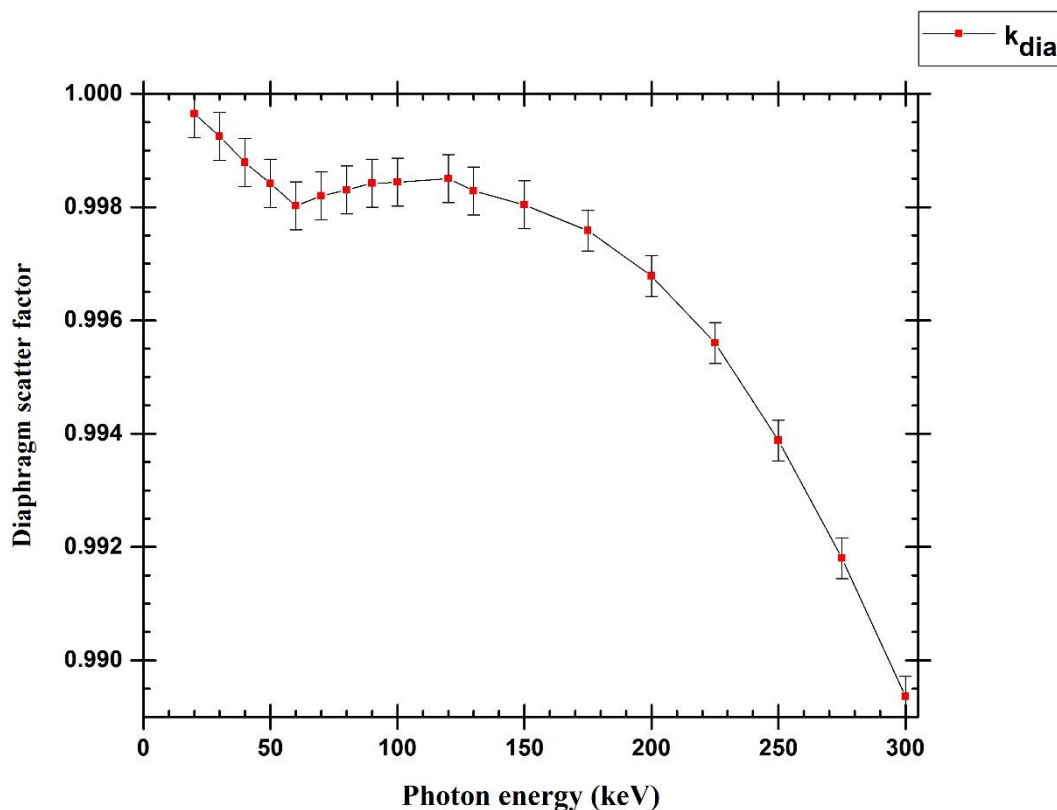
در این بخش به منظور تعیین ضریب پراکندگی فوتون، k_{sc} ، از کد شبیه‌سازی MCNP4C استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۳۲-۵) نشان داده شده است. تعداد تاریخچه مورد استفاده 10^7 می‌باشد. همانطور که در شکل (۳۲-۵) مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی فوتون ورودی پراکندگی فوتون‌ها کمتر شده و ضریب k_{sc} به یک میل می‌کند. نتایج این بررسی در مرجع [۳۶] آمده است.



شکل (۳۲-۵) منحنی تغییر ضریب پراکندگی فوتون بر حسب انرژی فوتون ورودی

۵-۳-۵ ضریب تصحیح پراکندگی از دیافراگم

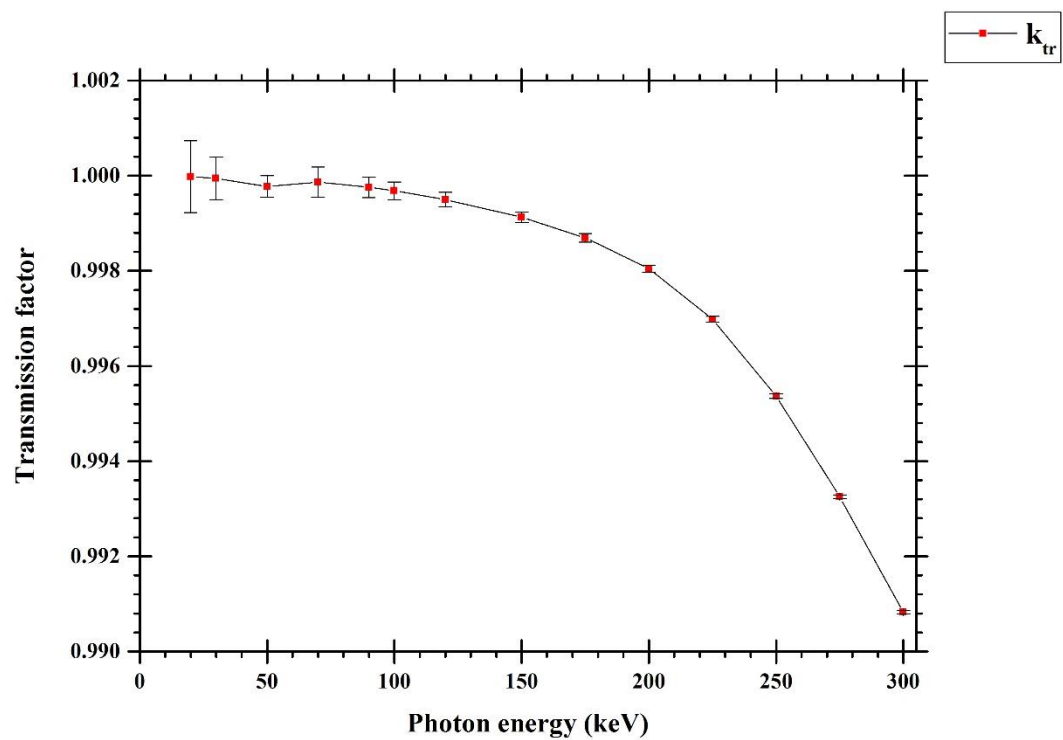
برای تعیین ضریب پراکندگی دیافراگم، k_{dia} ، از کد شبیه‌سازی MCNP4C استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۳۳-۵) نشان داده شده است. تعداد تاریخچه مورد استفاده در این شبیه‌سازی 10^7 می‌باشد. همانطور که از شکل (۳۳-۵) مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی فوتون ورودی پراکندگی از دهانه دیافراگم بیشتر شده و ضریب k_{dia} از ۱ فاصله می‌گیرد. مطابق شکل (۳۳-۵) یک دره جذب در انرژی حدود 70 keV مشاهده می‌شود. این انرژی با لبه جذب K تنگستن مطابق است. انرژی لبه K برای تنگستن برابر 69.518 keV می‌باشد. نتایج این بررسی در مرجع [۳۷] آمده است.



شکل (۵-۳۳) منحنی تغییر ضریب پراکندگی دیافراگم بر حسب انرژی فوتون ورودی

۵-۳-۶ ضریب تصحیح عبور

در این بخش برای شبیه‌سازی ضریب عبور از بدنه دیافراگم و پوشش محافظ جلویی، k_{tr} ، از کد شبیه‌سازی MCNP4C استفاده شده است. شکل (۵-۳۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. تعداد تاریخچه مورد استفاده 10^8 می‌باشد. همانطور که از شکل (۵-۳۴) مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی فوتون‌های ورودی، احتمال عبور فوتون‌ها از بدنه دیافراگم و پوشش محافظ جلویی بیشتر شده و ضریب k_{tr} از ۱ فاصله می‌گیرد. نتایج این بررسی در مرجع [۳۷] آمده است.



شکل (۳۴-۵) منحنی تغییر ضریب عبور از بدنه دیافراگم و پوشش محافظ جلویی بر حسب انرژی فوتون ورودی

فصل ششم

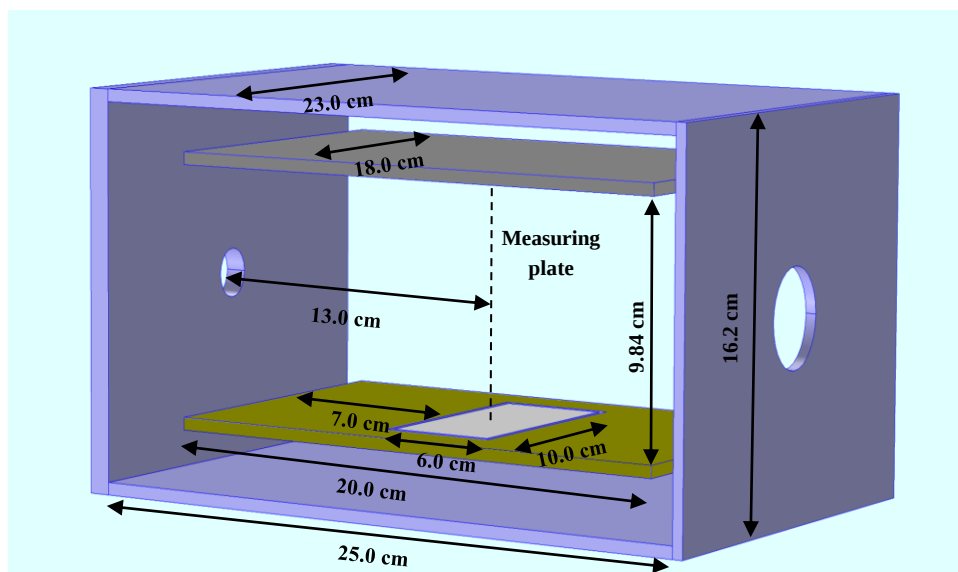
ساخت اتاقک یونش هوای آزاد

۶-۱ مقدمه

در فصل‌های سوّم و پنجم با استفاده از شبیه‌سازی‌های MCNP و COMSOL مطالعه کاملی روی اتاقک یونش هوای آزاد انجام شد و پارامترهای هندسی و ضرایب تصحیح آن بدست آمد. در این فصل با استفاده از نتایج بدست آمده در فصل‌های قبل طراحی نهایی اتاقک یونش FAC-IR-150 ارائه شده است. همچنین در ادامه این فصل مراحل ساخت اتاقک یونش FAC-IR-150 شرح داده می‌شود.

۶-۲ ابعاد فیزیکی اتاقک یونش

در این بخش بر اساس نتایجی که در فصل‌های سوّم و پنجم بدست آمد طرح نهایی اتاقک یونش ارائه شده است. در شکل (۶-۱) نمایی کلی از اتاقک یونش FAC-IR-150 همراه با اندازه دقیق هر یک از اجزای آن نشان داده شده است. سایر پارامترهای اتاقک یونش در جدول (۶-۱) آمده است. در مرجع [۳۸] نتایج طراحی اتاقک یونش FAC-IR-150 آمده است.



شکل (۶-۱) نمایی کلی از اتاقک یونش FAC-IR-150

جدول (۱-۶) پارامترهای هندسی اتاقک یونش FAC-IR-150

Chamber parameters	Dimension
Aperture diameter (mm)	8.0
Air path length (l_{at}) (cm)	13.0
Collecting length (l_c) (mm)	58.0
Air gap length (l_g) (mm)	2.0
Electrode separation (d) (cm)	9.84
Collector width (cm)	10.0
Guard width (cm)	18.0
Polarizing voltage (V)	3000
Measuring volume (cm^3)	3.016

۳-۶ ساخت اتاقک یونش FAC-IR-150

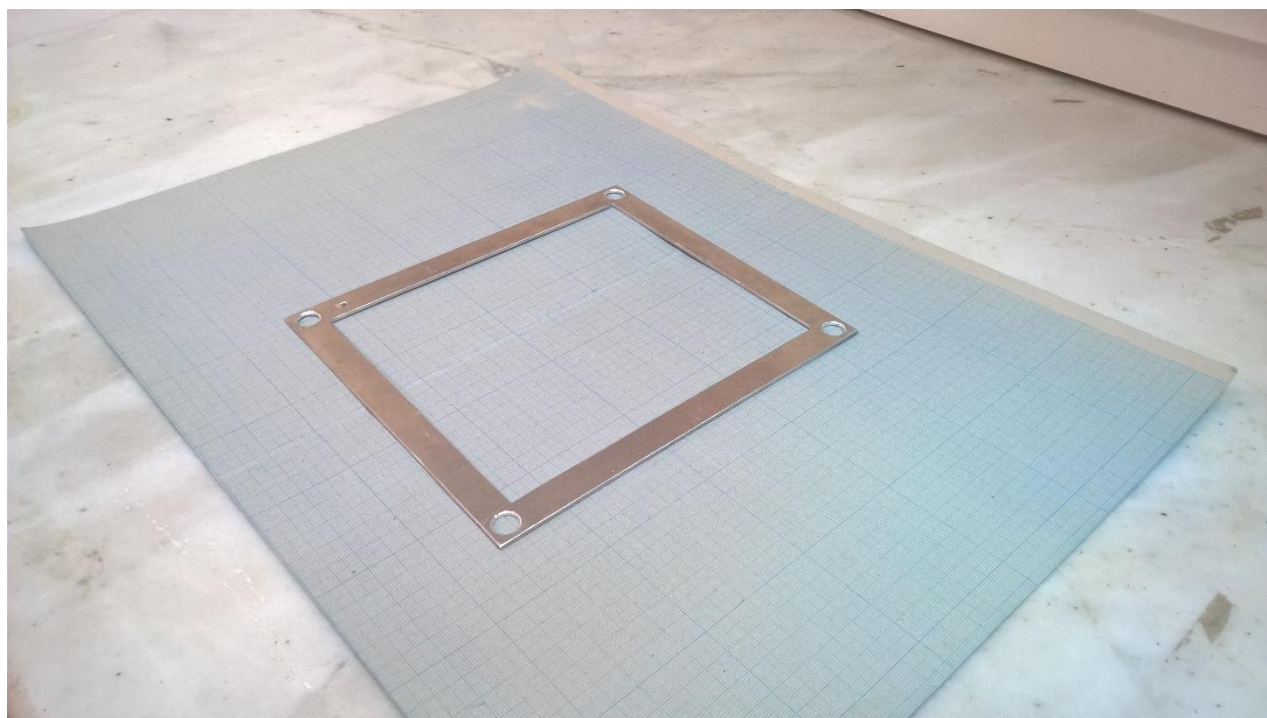
مرحله نهایی این کار، ساخت اتاقک یونش FAC-IR-150 با استفاده از نتایج بدست آمده در بخش قبل می‌باشد. در شکل (۲-۶) نمای جلویی از اتاقک یونش FAC-IR-150 نشان داده شده است. نمای پشتی از اتاقک یونش FAC-IR-150 در شکل (۳-۶) آمده است. نمایی از گارد نواری آلومینیومی در شکل (۴-۶) آمده است. همچنین عایق پلاستیکی بین گاردهای نواری در شکل (۵-۶) نشان داده شده است. به‌منظور ساخت اتاقک از یک میله‌های فولادی جهت نگه داشتن الکترودها، گاردها و عایق‌های بین آنها مطابق شکل (۶-۶) استفاده شده است.



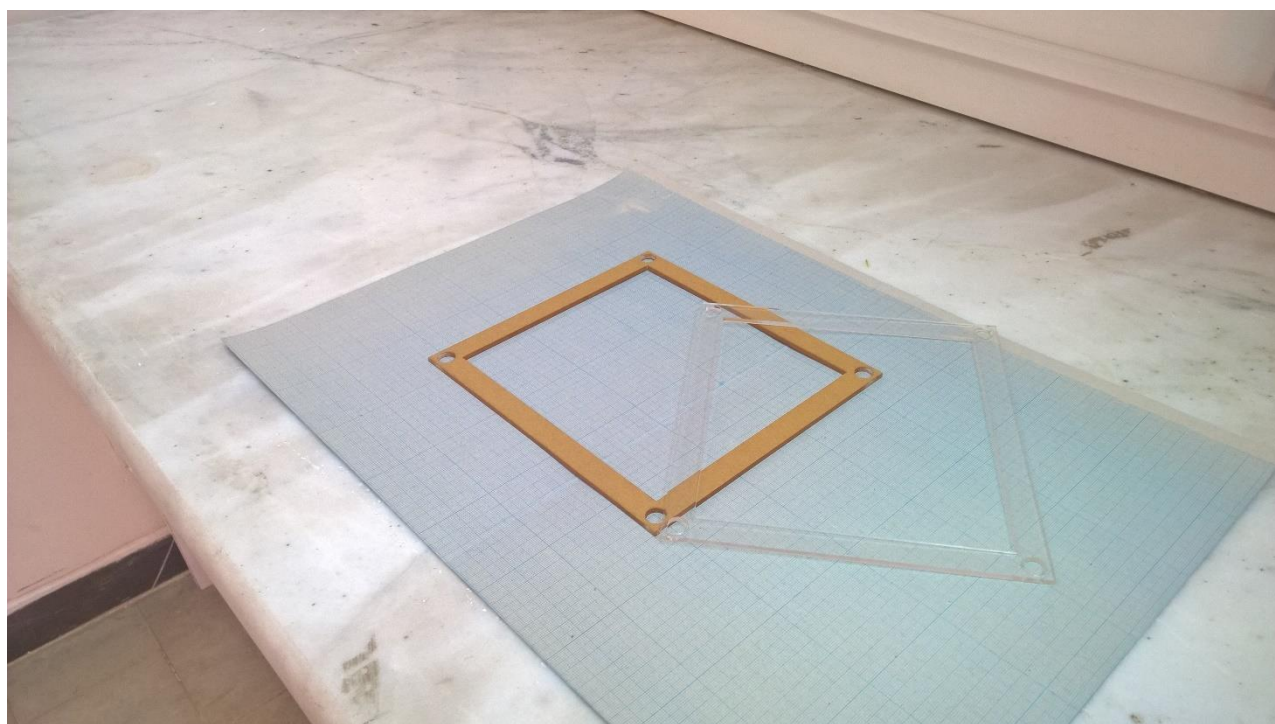
شکل (۲-۶) نمای جلویی اتاقک یونش FAC-IR-150



شکل (۳-۶) نمای پشت اتاقک یونش FAC-IR-150



شکل (۴-۶) نمایی از یک گارد نواری



شکل (۵-۶) نمایی از عایق استفاده شده بین گاردهای نواری



شکل (۶-۶) نمایی از میله‌های فولادی نگه دارنده

۶-۴ مقایسه ابعاد اتاقک یونش

در این بخش ابعاد نهایی اتاقک یونش FAC-IR-150 با نمونه اتاقک یونش هوا آزاد Ritz در NIST [۳۹] و اتاقک یونش BIPM [۴۰] مقایسه شده است. نتایج در جدول (۲-۶) نشان داده شده است.

جدول (۲-۶) مقایسه ابعاد نهایی این کار با ابعاد اتاقک یونش NIST و BIPM

Chamber parameters	FAC-IR-150	NIST	BIPM
Collector length	60.0 mm	70.0 mm	15.46 mm
Electrodes separation	98.4 mm	90.0 mm	70.0 mm
Air attenuation length	130.0 mm	127 mm	100.0 mm
Diaphragm diameter	8.0 mm	10.0 mm	9.94 mm
Collector width	10.0 cm	9.0 cm	7.1 cm
HV potential	3000 V	5000 V	1500 V

۵-۶ نتایج تست اولیه اتاقک یونش FAC-IR-150

در این بخش نتایج تست اولیه اتاقک یونش FAC-IR-150 آمده است. به‌علاوه در دسترس نبودن دستگاه مولد اشعه X، تست با استفاده از چشمه گامای Co^{60} انجام شد. مطابق نکاتی که در فصل ۵ در مورد ضرایب تصحیح بیان شد، ضرایب تصحیح برای اتاقک یونش محاسبه و همراه با مقادیر عدم قطعیت هر کدام در جدول (۳-۶) نشان داده شد.

نحوه آرایش چشمه و اتاقک یونش در شکل (۷-۶) نشان داده شده است. با استفاده از لیزرهای جانبی و طولی اتاقک یونش را طوری قرار می‌دهیم که کاملاً با خروجی چشمه پرتو هم راستا باشد. پایه‌ای که در زیر اتاقک یونش قرار دارد به‌منظور تغییر ارتفاع اتاقک یونش جهت هم راستا شدن با پرتو لیزر طولی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شکل (۸-۶) را ببینید. صفحه کنترل چشمه Co^{60} و الکترومتر همان‌طور که شکل (۹-۶) نشان داده شده است، در خارج از اتاق اشعه قرار دارند. اتاقک یونش با استفاده از یک کابل رابط به الکترومتر متصل است.

قبل از شروع پرتودهی، دما و فشار توسط دماسنج و فشارسنج استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. رطوبت هم با استفاده از رطوبت‌سنج تعیین می‌کنیم.

جدول (۳-۶) ضرایب تصحیح اتاقک یونش FAC-IR-150 برای انرژی گامای Co^{60}

Correction factors	Value	Uncertainty
k_{tr}	0.9576	0.0005
k_e	1.7220	0.0076
k_{TP}	1.1883	0.0032
k_{field}	1.0555	0.0013
k_s	1.0000	0.0001
k_{dia}	0.9581	0.0003
k_{pol}	0.9914	0.0022
k_h	0.9970	0.0003



شکل (۶-۷) نمایی از قرارگیری اتاقک یونش در مقابل چشمه Co^{60} از نمای جانبی



شکل (۶-۸) نحوه قرار گرفتن اتاقک یونش و چشمه Co^{60} از نمای طولی



شکل (۹-۶) نمایی از صفحه کنترل چشمه Co^{60} و الکترومتر

بعد از قرارگیری اتاقک یونش در موقعیت مناسب در مقابل چشمه و اتصال الکترومتر به آن، جریان نشتی اتاقک یونش را اندازه‌گیری می‌کنیم. اندازه‌گیری جریان نشتی باید بعد از انجام پرتودهی هم دوباره تکرار شود. بعد از پایداری خوانش الکترومتر، مقدار بار خوانده شده را ثبت می‌کنیم. نتایج جریان نشتی قبل تابش، جریان نشتی بعد از تابش و مقدار بار هنگام پرتودهی در جدول (۴-۶) آمده است. در جدول (۴-۶)، M_0 جریان نشتی قبل از تابش و M_1 جریان نشتی بعد از تابش می‌باشد.

هدف نهایی در این قسمت تعیین کرمای هوای چشمه Co^{60} با استفاده از رابطه (۱-۳) می‌باشد. تمامی داده‌های جدول (۴-۶) در بازه زمانی 60 s اندازه‌گیری شده‌اند. به‌منظور اطمینان از صحت مقدار کرمای محاسبه شده، نتیجه را با مقدار بدست آمده توسط اتاقک یونش PTW 23361، شکل (۱۰-۶) را ببینید، که توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی کالیبره شده است مقایسه می‌کنیم. در جدول (۵-۶) نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده توسط اتاقک یونش استاندارد آمده است.

جدول (۴-۶) داده‌های اندازه‌گیری شده اتاقک یونش FAC-IR-150

	M_0	M	M_1
خوانش اولیه (nC)	2.447	763.50	0.438
	1.169	762.10	1.219
	1.138	762.40	0.415
	1.350	761.60	1.692
	1.249	764.40	0.599
	1.521		0.546
			0.861
خوانش متوسط	1.479	762.80	0.824
خطای آماری	0.202	0.51	0.180
تفکیک الکترومتر	0.001	0.01	0.001
خطای خوانش	0.202	0.51	0.180
خوانش کل		761.32	

جدول (۵-۶) داده‌های اندازه‌گیری شده توسط اتاقک یونش استاندارد

	M
خوانش اولیه (nC)	0.2230
	0.2210
	0.2220
	0.2220
خوانش متوسط	0.2220
خطای آماری	0.0004
تفکیک الکترومتر	0.0010
خطای خوانش	0.0011

در این اندازه‌گیری‌ها مقدار متوسط دما برابر 22.0°C و فشار برابر 855.5 mbar می‌باشد. همچنین درصد رطوبت نسبی برابر با 60 % است. در جدول (۶-۶) مقدار گرمای محاسبه شده برای اتاقک یونش استاندارد آمده است.

جدول (۶-۶) کرمای هوا برای اتاقک یونش استاندارد

		error
M	0.2220	0.0011
N_k	47.89	0.60
k_{TP}	1.1883	0.0032
k_h	0.9970	0.0003
kerma	12.5957	0.1727

مقدار کرمای هوا برای اتاقک یونش FAC-IR-150 با استفاده از رابطه (۱-۳) و استفاده از داده‌های موجود در جدول (۴-۶) و جدول (۱-۳) برابر است با: 14.1847 ± 0.3643 . مقایسه داده بدست آمده توسط اتاقک یونش FAC-IR-150 با اتاقک یونش استاندارد اختلافی در حدود 12.62 % را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰-۶) اتاقک یونش استاندارد PTW 23361

۶-۶ نتیجه‌گیری

هدف نهایی در این رساله مطالعه کلی اتاقک یونش هوای آزاد و ساخت یک اتاقک یونش هوای آزاد جهت دزیمتری پرتوهای X در سطح استاندارد می‌باشد. در این کار مطالعه کاملی بر روی اتاقک یونش هوای آزاد انجام گرفت و اجزای مختلف آن بررسی شد. بر مبنای این مطالعات و انجام شبیه‌سازی‌های لازم، طرح نهایی اتاقک یونش FAC-IR-150 ارائه شد. در ادامه با توجه به امکانات موجود، اتاقک یونش FAC-IR-150 ساخته شد. انجام تست‌های کامل نیازمند داشتن دستگاه مولد پرتو X استاندارد و بهینه سازی ساختار اتاقک یونش می‌باشد. به‌منظور دستیابی به هدف نهایی از ساخت این اتاقک یونش که همان دزیمتری در سطح استاندارد اولیه است و کمینه کردن عدم قطعیت نتیجه حاصل، پیشنهادات زیر باید رعایت شوند:

- ۱- استفاده از مواد با کیفیت و خلوص بالا جهت ساخت الکترودها و عایق‌ها؛
- ۲- استفاده از ابزارهای برش لیزری دقیق با دقتی از مرتبه میکرومتر؛
- ۳- استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری دقیق با دقتی از مرتبه میکرومتر؛
- ۴- استفاده از تراز لیزری با دقتی از مرتبه میلیمتر؛
- ۵- استفاده از لیزرهای دقیق جهت همراستایی اتاقک یونش با چشمه پرتو؛
- ۶- استفاده از یک سیستم تعلیق اتاقک یونش با قابلیت جابه‌جایی در سه جهت طولی، عرضی و ارتفاع با دقت میلیمتر؛
- ۷- استفاده از دماسنج دیجیتال با دقت mK؛
- ۸- استفاده از مولد ولتاژ با پایداری خروجی بهتر از 0.1 %؛
- ۹- استفاده از الکترومتر مناسب با دقت و پایداری خوانش بالا؛

در نهایت اندازه‌گیری‌ها باید در یک اتاق مناسب صورت گیرد که دما، فشار و رطوبت آن کنترل شده بوده و اثر تابش‌های پراکنده حداقل باشد.

پیوست-أ تعیین ضخامت نیم لایه (HVL)

الف-۱ مقدمه

HVL یک کمیت به صورت مقدار ضخامتی از ماده جاذب که سبب تضعیف یک کمیت به نصف مقدار اولیه همان کمیت، تعریف می شود. مطابق این تعریف HVL وابسته به کمیت مورد اندازه گیری می باشد. در این پیوست به منظور تعیین HVL، از دستورالعملی که در استاندارد TRS457 آمده استفاده شده است [۱۴].

الف-۲ تعاریف کلی

اولین HVL (HVL_1) مقدار ضخامتی از ماده جاذب است که مقدار یک کمیت را به نصف مقدار اندازه گیری شده همان کمیت در غیاب ماده جاذب کاهش دهد. اضافه کردن لایه های بیشتر سبب کاهش بیشتر کمیت مورد اندازه گیری می شود. به مقدار ضخامتی که مقدار کمیت را به یک چهارم مقدار اولیه آن برساند $d_{1/4}$ گفته می شود. دومین HVL (HVL_2) با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$HVL_2 = d_{1/4} - HVL_1 \quad (\text{الف-۱})$$

نسبت HVL_1 به HVL_2 ضریب همگنی، h ، نامیده می شود:

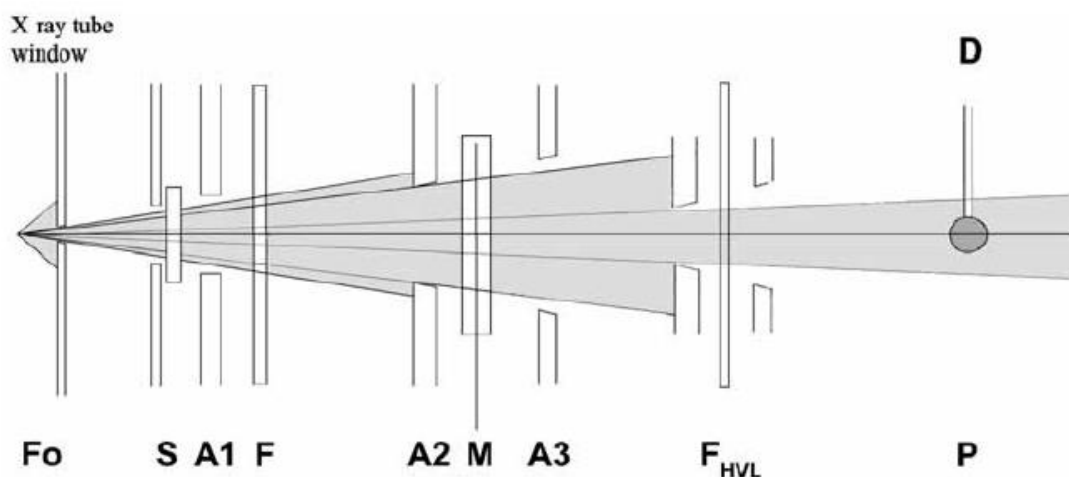
$$h = \frac{HVL_1}{HVL_2} \quad (\text{الف-۲})$$

ضریب h در حقیقت پهنای طیف پرتو X را نشان می دهد و مقداری بین ۰ تا ۱ دارد. هرچه ضریب h بزرگتر باشد نشان دهنده باریکی بیشتر پرتو بکار رفته می باشد. برای رادیولوژی تشخیصی این ضریب مقداری بین ۰/۷ تا ۰/۹ دارد.

الف-۳ شرایط و روش اندازه‌گیری

شرایط کلی اندازه‌گیری کرما جهت تعیین HVL در آزمایشگاه SSDL و بیمارستان با هم فرقی ندارند. روش اشاره شده در این کتاب جهت تعیین HVL مطابق دستورالعمل ICRU^{۳۲} [۴۱] و IAEA [۴۲] می‌باشد.

هندس‌ه اندازه‌گیری باید شرایط هندسه باریک را ایجاد کند. همچنین قطر پرتو باید به اندازه‌ای باشد که آشکارساز بصورت کامل و یکنواخت پرتو ببینید. شرایط کلی جهت اندازه‌گیری در آزمایشگاه SSDL در شکل (أ-۱) نشان داده شده است. ممکن است ایجاد چنین آرایشی در بیمارستان مشکل باشد ولی مسئول پرتوکار باید تا حد ممکن چنین آرایشی را ایجاد کند.



شکل (أ-۱) نمایی از هندسه اندازه‌گیری HVL. در این شکل Fo نقطه کانونی؛ S پنجره لامپ X؛ F فیلتر اضافی؛ A₁، A₂ و A₃ دریچه‌های عبور پرتو؛ M اتاقک شاهد؛ F_{HVL} ماده جاذب جهت اندازه‌گیری HVL؛ D آشکارساز و P نقطه اندازه‌گیری است [۱۴].

در حالت کلی باید پاسخ هر اتاقک را توسط تصحیح مربوط به وابستگی پاسخ آن به انرژی اصلاح کرد، در نتیجه می‌توان از هر نوع اتاقک جهت اندازه‌گیری HVL استفاده کرد. با این‌همه، استفاده از

³² ICRU: International Commission on Radiation Units and measurements

اتاقک‌های یونش کلاس مرجع که در جدول (أ-۱) به مشخصات کلی آنها اشاره شده است جهت اندازه‌گیری HVL توصیه می‌شوند.

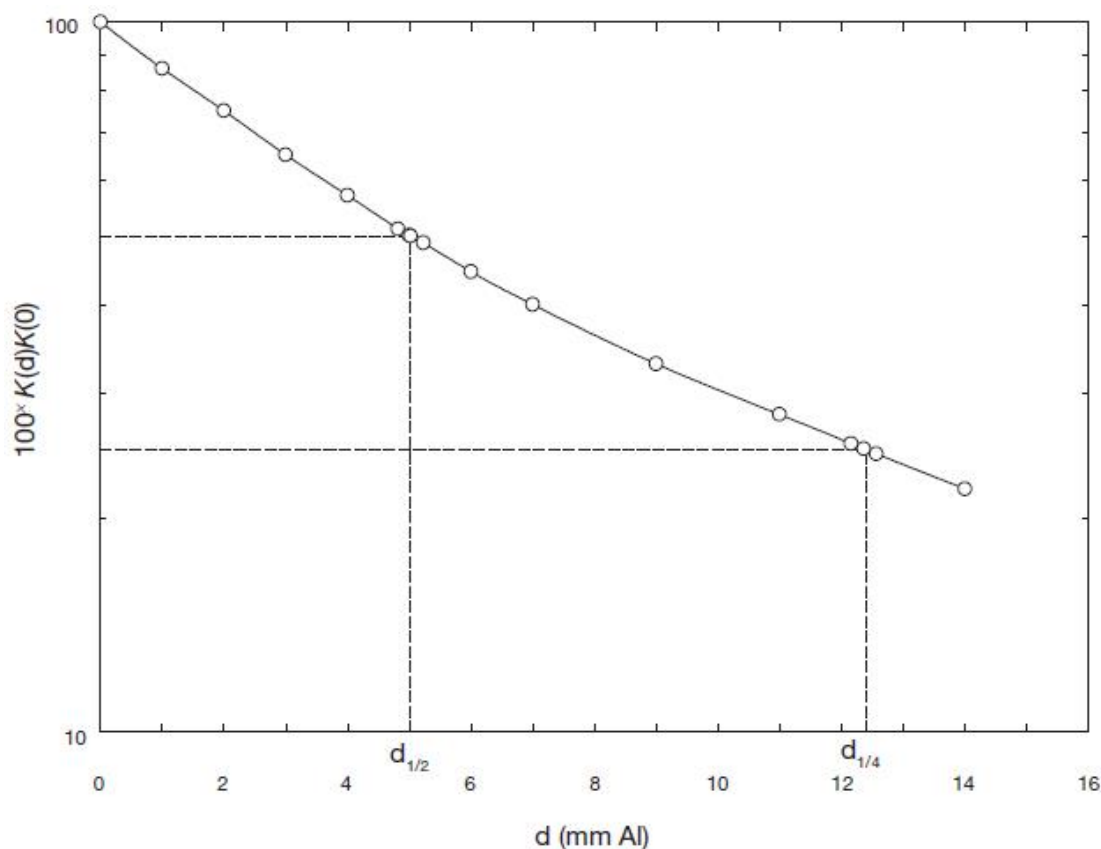
آشکارساز باید در نقطه اندازه‌گیری HVL قرار گیرد. به‌منظور جلوگیری از اثر اختلاف خروجی لامپ‌های اشعه X بر روی HVL بدست آمده، توصیه می‌شود که از یک اتاقک شاهد^{۳۳} مطابق شکل (أ-۱) استفاده شود و کلیه خوانش‌ها نسبت به خوانش اتاقک شاهد نرمالیزه شوند. اتاقک شاهد باید در نقطه‌ای قرار گیرد که حضور و یا ضخامت ماده جاذب روی خوانش آن اثر نگذارد. بهتر است که ماده جاذب در فاصله یکسانی از آشکارساز و اتاقک شاهد قرار گیرد. فاصله جاذب آلومینیومی از آشکارساز باید حداقل ۵ برابر قطر پرتو در محل آشکارساز باشد. علت وجود این فاصله از بین بردن اثر تابش‌های پراکنده از ماده جاذب روی خوانش آشکارساز و اتاقک شاهد می‌باشد. دما اتاق نیز باید در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری و اثر تغییرات دمایی را بر نتایج بدست آمده اعمال کنیم.

جدول (أ-۱) مشخصات پیشنهادی اتاقک‌های کلاس مرجع همراه با کاربردهای آنها [۱۴]

کاربرد	نوع آشکارساز	گستره ولتاژ لامپ اشعه X (kV)	خطای ذاتی (%)	گستره نرخ کرمای هوا	
				پرتو اصلی	پرتو تضعیف شده
رادبولوژی عمومی	استوانه‌ای یا صفحه‌موازی	60-150	3.2	1mGy/s- 500mGy/s	10μGy/s- 5mGy/s
فلوروسکپی	استوانه‌ای یا صفحه‌موازی	50-100	3.2	10μGy/s- 10mGy/s	0.1μGy/s- 100μGy/s
ماموگرافی	صفحه‌موازی	22-40	3.2	10μGy/s- 10mGy/s	
CT*	استوانه‌ای	100-150	3.2	0.1mGy/s- 50mGy/s	
رادیوگرافی دندان	استوانه‌ای یا صفحه‌موازی	50-90	3.2	1μGy/s- 10mGy/s	
* تغییرات حساسیت در امتداد طول فعال دزیتر نباید بیشتر از 3.0% باشد.					

³³ Monitor chamber

در رادیولوژی تشخیصی از جاذب آلومینیوم برای تعیین HVL استفاده می‌شود. خلوص این جاذب‌های آلومینیومی باید بهتر از 99.9% باشد و ضخامت آنها با دقت بهتر از 0.05 mm اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری اولیه کرمای هوا باید در غیاب ماده جاذب انجام گیرد. به منظور تعیین HVL_1 اندازه‌گیری کرمای هوا در ضخامت‌های مختلف ماده جاذب انجام می‌گیرد تا به نزدیکی 50% مقدار اولیه کرمای هوا برسیم. اگر بخواهیم HVL_2 را بدست بیاوریم باید اضافه کردن ضخامت ماده جاذب را تا رسیدن به 25% کرمای هوای اولیه ادامه دهیم. در انتها کرمای هوا را بر حسب ضخامت ماده جاذب در مقیاس نیمه لگاریتمی رسم می‌کنیم. نتیجه یک منحنی مانند شکل (أ-۲) است که می‌توان مقادیر HVL_1 و HVL_2 را از روی آن تعیین کرد.



شکل (أ-۲) تعیین HVL_1 و HVL_2 با استفاده از منحنی کرمای هوا [۱۴]

پیوست-ب کیفیت‌های پرتو X مرجع

جدول (ب-۱) کیفیت پرتو X مرجع تهیه شده توسط NIST [۱۵]

Beam code ^a	Additional filtration ^b				Half-value layer (HVL)		Homogeneity coefficient (%)	
	Al (mm)	Cu (mm)	Sn (mm)	Pb (mm)	Al (mm)	Cu (mm)	Al	Cu
L10					0.037		86	
L15					0.059		70	
L20					0.070		72	
L30	0.30				0.23		60	
L40	0.53				0.52		61	
L50	0.71				0.79		63	
L80	1.45				1.81		56	
L100	1.98				2.80		58	
M20	0.27				0.15		72	
M30	0.5				0.36		65	
M40	0.89				0.74		67	
M50	1.07				1.04		68	
M60	1.81				1.64	0.052	63	60
M80	2.86				2.98	0.10	68	61
M100	5.25				5.00	0.20	74	55
M150	5.25	0.25			10.1	0.66	88	63
M200	4.35	1.12			14.7	1.64	94	68
M250	4.25	3.2			18.3	3.2	98	85
M300	4.25		6.5		21.7	5.3	100	97
H10	0.105				0.051		77	
H15	0.5				0.16		87	
H20	1.01				0.36		89	
H30	4.50				1.20		86	
H40	4.53	0.26			2.93		94	

H50	4.0			0.1	4.2	0.14	93	93
H60	4.0	0.61			6.0	0.25	94	94
H100	4.0	5.2			13.4	1.15	97	92
H150	4.0	4.0	1.51		16.9	2.43	100	96
H200	4.0	0.6	4.16	0.77	19.7	4.10	99	99
H250	4.0	0.6	1.04	2.72	22	5.19	99	98
H300	4.1		3.0	5.0	23	6.19	99	98
S60	4.35				2.79	0.09	76	66
S75	1.50				1.81		58	

^a برای کدهای این جدول حرف L نشان‌دهنده فیلتر سبک (Light)، حرف M نشان‌دهنده فیلتر متوسط (Moderate)، حرف H نشان‌دهنده فیلتر سنگین (Heavy)، حرف S نشان‌دهنده فیلتر خاص (Special) و عدد همراه با این حروف نشان‌دهنده ولتاژ کاری لامپ X بر حسب (kV) است.

^b فیلترهای اضافی شامل فیلترهای ذاتی نمی‌شود. برای پرتوهای کد L10 تا L100 و پرتوهای کد M20 تا M50 و پرتوهای کد H10 تا H40 و پرتو کد S75 مقدار فیلتر ذاتی برابر 1.0mm Be است. همچنین برای پرتوهای کد M60 تا M300 و H50 تا H300 و پرتو کد S60 مقدار فیلتر ذاتی برابر با 3.0mm Be است.

جدول (ب-۲) کیفیت‌های مرجع پرتوهای X تهیه شده توسط ISO [۱۵]

Beam code ^a	Additional filtration ^b				First HVL		Second HVL	
	Al (mm)	Cu (mm)	Sn (mm)	Pb (mm)	Al (mm)	Cu (mm)	Al (mm)	Cu (mm)
HK10					0.042		0.045	
HK20	0.15				0.128		0.170	
HK30	0.52				0.408		0.596	
HK60	3.19					0.079		0.113
HK100	3.90	0.15				0.289		0.463
HK200		1.15				1.669		2.447
HK250		1.60				2.463		3.37
HK280		3.06				3.493		4.089
HK300		2.51				3.474		4.205
WS60		0.3				0.179		0.206
WS80		0.529				0.337		0.44
WS150			1.03			1.88		2.13
WS200			2.01			3.09		3.35

WS250			4.01			4.30		4.50
WS300			6.54			5.23		5.38
NS15	0.49				0.153		0.167	
NS20	0.90				0.324		0.351	
NS25	2.04				0.691		0.762	
NS30	4.02				1.154		1.374	
NS40		0.21				0.82		0.094
NS60		0.6				0.241		0.271
NS80		2.0				0.59		0.62
NS100		5.0				1.14		1.19
NS120		4.99	1.04			1.76		1.84
NS150			2.50			2.41		2.57
NS200		2.04	2.98			4.09		4.20
NS250			2.01	2.97		5.34		5.40
NS300			2.99	4.99		6.17		6.30
LK10	0.30				0.061			
LK20	2.04				0.441			
LK30	3.98	0.18			1.492			
LK35		0.25			2.21			
LK55		1.19				0.260		
LK70		2.64				0.509		
LK100		0.52	2.0			1.27		
LK125		1.0	4.0			2.107		2.094
LK170		1.0	3.0	1.5		3.565		3.592
LK110		0.5	2.0	3.5		4.726		4.733
LK240		0.5	2.0	5.5		5.515		5.542

^a برای کد پرتوهای X این جدول حرف LK نشان‌دهنده نرخ کرمای پایین (Low Kerma) ، حرف HK نشان‌دهنده نرخ کرمای بالا (High Kerma) ، حرف NS نشان‌دهنده پرتو باریک (Narrow Spectrum) ، حرف WS نشان‌دهنده پرتو پهن (Wide Spectrum) و عدد همراه با این حروف نشان‌دهنده ولتاژ کاری لامپ X بر حسب (kV) است.

^b فیلترهای اضافی شامل فیلترهای ذاتی نمی‌شود. برای پرتوهای کد LK10 تا LK30 و پرتوهای کد NS10 تا NS30 و پرتوهای کد HK10 تا HK30 مقدار فیلتر ذاتی برابر 1.0mm Be است. همچنین برای سایر کیفیت‌های پرتو مقدار فیلتر ذاتی برابر با 4.0mm Be است.

- [1] International Atomic Energy Agency, "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water," Technical reports series no. 398, Vienna2006.
- [2] H. Robin, H. Brendan, H. Lois, K. Zdenka, T. David, and B. Clive, "Advances in kilovoltage x-ray beam dosimetry," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 59, p. R183, 2014.
- [3] (2015). *Ionization chamber*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionization_chamber
- [4] R. D. Evans *The Atomic Nucleus*: McGraw-Hill, Inc., 1955.
- [5] Available: <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>
- [6] J. E. Groetz, N. Ounoughi, C. Mavon, A. Belafrites, and M. Fromm, "Conception and realization of a parallel-plate free-air ionization chamber for the absolute dosimetry of an ultrasoft X-ray beam," *Rev Sci Instrum*, vol. 85, pp. 1-9, Aug 2014.
- [7] International Commission on Radiological Protection, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," 2007.
- [8] K. J. Stewart, "The development of new devices for accurate radiation dose measurement," Doctor of Philosophy in Physics, Department of Physics, McGill University, 2007.
- [9] National Physical Laboratory, "Quantities, Units, and Ionising Radiation Fundamentals," 2007.
- [10] National Physical Laboratory, "Practical Course in Reference Dosimetry for kV X-ray Dosimetry," 2010.
- [11] International Commission on Radiation Units and measurements, "Fundamental quantities and units for ionizing radiation," Report 85, Washington, DC,2011.
- [12] Bureau International des Poids et Mesures, *The International System of Units (SI)*: 8th edition, 2006.
- [13] The American Association of Physicists in Medicine (AAPM), "AAPM protocol for 40–300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology," 2011.
- [14] International Atomic Energy Agency, "Dosimetry in diagnostic radiology: An international code of practice," Technical reports series no. 457, Vienna,2007.
- [15] M. O'Brien and S. M. Seltzer, "Update on NIST X-Ray Air-Kerma Standards and Calibrations," National Institute of Standards and Technology, USA,2005.
- [16] C. Kessler, P. Roger, and D. T. Burns, "Establishment of reference radiation qualities for mammography," Bureau International des Poids et Mesures, France2010.

- [17] W. Ksouri, M. Denozière, J. Gouriou, and J.-M. Bordy, "Dosimetric standard for continuous X-rays radiation fields of low and medium-energies," *Laboratoire National Henri Becquerel*, 2005.
- [18] M. O'Brien, T. Williams, T. Sander, and P. Lamperti, "Comparison of the NIST and NPL Air Kerma Standards Used for X-Ray Measurements Between 10 kV and 80 kV," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 105, pp. 701-705, 2000.
- [19] L. s. j. Gillespie, "The GibbsDalton law of partial pressures," *Physical review*, vol. 36, 1930.
- [20] A. Buck, "New equations for computing vapor pressure and enhancement factor," *American Meteorological Society*, vol. 20, pp. 1527–1532, 1982.
- [21] J. W. Boag, "Ionization chambers in Radiation Dosimetry," *Academic Press*, vol. 2, pp. 169-243, 1987.
- [22] T. W. M. Grimbergen, A. H. L. Aalbers, and B. J. Mijnheer, *dosimetry of low and medium energy x-rays*: Netherlands Commission on Radiation Dosimetry, 1997.
- [23] M. Boutillon, "Volume recombination parameter in ionization chambers," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 43, pp. 2061-2072, 1998.
- [24] D. T. Burns, C. Kessler, P. Roger, and A. R. EL.Sersy, "Preliminary Characterization of the NIS free air chamber standard at the BIPM," BIPM2009.
- [25] P. ANDREO "Calibration of photon and electron beams," Department of Medical Radiation Physics, Stockholm, Sweden. 2000.
- [26] D. Rogers, I. Kawrakow, N. Klassen, and J. McCaffrey, "NRC Activities and Publications 1999–2001 Report to CCRI(I) Meeting," BIPM2001.
- [27] T. Kurosawa and N. Takata, "Estimation of Electron-loss and Photon-scattering Corrections for Parallel-plate Free-air Chambers," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 42, pp. 1077–1080, 2005.
- [28] D. T. Burns and L. Büermann, "Free-air ionization chambers," *Metrologia*, vol. 46, pp. S9-S23, 2009.
- [29] T. Kurosawa and N. Takata, "Correction factors for free–air ionization chambers for X–rays transmitted through a diaphragm edge and scattered from the surface of the diaphragm aperture," Ionizing Radiation Section, NMIJ/AIST, Japan, 2005.
- [30] ICRU, "Average Energy Required to Produce an Ion Pair," *International Commission on Radiation Units and measurements*, vol. Report 31, 1979.
- [31] S. M. Mohammadi and H. Tavakoli-Anbaran, "Investigation of the humidity effect on the FAC-IR-300 ionization chamber response," *Radiation Protection Dosimetry*, doi:10.1093/rpd/ncx109, 2017.
- [32] S. M. Mohammadi, H. Tavakoli-Anbaran, and H. Z. Zeinali, "Investigation of electric field distribution on FAC-IR-300 ionization chamber," *Journal of Instrumentation*, vol. 11, p. P07017, 2016.

- [33] V. H. Ritz, "Design of free-air chambers for the soft x-ray region (20-100 kV)," *Radiology*, vol. 73, pp. 11-22, 1959.
- [34] A. Allisy and A. M. Roux, "Contribution à la mesure des rayons roentgen dans le domaine de 5 à 50 kV," *Acta Radiol*, vol. 55, pp. 57-74, 1961.
- [35] I. K. Uotila, "Field distortion in guarded-wall free-air ionization chambers," *Metrologia*, vol. 16, pp. 15-9, 1980.
- [36] S. M. Mohammadi, H. Tavakoli-Anbaran, and H. Z. Zeinali, "Investigation of electron-loss and photon scattering correction factors for FAC-IR-300 ionization chamber," *Journal of Instrumentation*, vol. 12, p. P02002, 2017.
- [37] S. M. Mohammadi and H. T. Anbaran, "Diaphragm correction factors for the FAC-IR-300 free-air ionization chamber," *Applied Radiation and Isotopes*, doi: 10.1016/j.apradiso.2017.11.030, 2017.
- [38] S. M. Mohammadi and H. Tavakoli-Anbaran, "Design of the free-air ionization chamber, FAC-IR-150, for X-ray dosimetry," *Radiation Physics and Chemistry*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.09.019>, vol. 144, pp. 344-350, 2017.
- [39] S. M. Seltzer, "Correction Factors for the NIST Free-Air Ionization Chambers Used to Realize Air Kerma from W-Anode X-Ray Beams," *National Institute of Standards and Technology*, vol. NISTIR 7887, pp. 1-41, 2012.
- [40] J. Šolc and V. Sochor, "Characterization of the new free-air primary standard for low-energy X-rays at CMI," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 104, pp. 328-331, 2014.
- [41] International Commission on Radiation Units and measurements, "Physical Aspects of Irradiation, National Bureau of Standards Handbook 85," Rep. 10b, Washington, DC, 1964.
- [42] International Atomic Energy Agency, "Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy," Technical Reports Series No. 374, Vienna, 1995.

Abstract

The amount of energy left in a matter is called absorbent dose. The determination of absorbed dose is called radiation dosimeter. The absorption dose is measured according to the protocols defined by the International Atomic Energy Agency (IAEA). The standards defined by the IAEA are classified into two levels of primary and secondary standards. The primary standard includes tools that give the highest possible accuracy of a given quantity based on its definition. The three main methods at the primary standard level are [1]: Free-air ionization chamber, calorimetry, and ferric dosimeter. The main focus of this project is on the free air ionization chamber. The secondary standard is defined according to the primary standard but is at a lower level in terms of accuracy. On the other hand, they are easier to use and cost less construction and maintenance. The Primary Standard Dosimetry Laboratory (PSDL) is responsible for providing primarily standards for radiation dosimetry and its working methods. In addition, the PSDL labs are also active in improving the basic standards and providing the required dosimetry data. On the other hand, the secondary standard dosimetry laboratory (SSDL), according to the standards and methodology defined by the PSDL, uses appropriate equipment to calibrate and provide services to other users of the beam. As stated above, secondary standards are calibrated based on comparison with the primarily standards, so each SSDL center must be linked to a PSDL. In Iran, the standard laboratory of standard dosimetry is located in Karaj and it provides services to users according to the standards defined by the IAEA [1]. In order to periodically calibrate its equipment, the SSDL laboratory sends them to the International Atomic Energy Agency (IAEA) for a period of three years. Sending equipment to the IAEA requires a lot of time and money. There is also no possibility to send in shorter time periods. Accordingly, the design and development of a standard dosimetric laboratory were approved and implemented by the Atomic Energy Organization.

Key words:

Free-air ionization chamber, Calorimetry, Primary standard, Secondary standard, reference X ray beam, correction factors, Monte Carlo simulation, MCNP code, Finite element method, Humidity correction factor.



Shahrood University of Technology

Faculty of Physics and Nuclear Engineering

PhD Dissertation in Nuclear Physics

**Design and Construction of the free-air ionization
chamber for dosimetry in standard level**

By: Seyed Mostafa Mohammadi Seyedkolaei

Supervisor:

Dr Hossein Tavakoli Anbaran

January 2018