

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده‌ی فیزیک

گروه هسته‌ای

## عنوان پایان نامه

بررسی اثر و شکل موازی‌ساز بر روی توان تفکیک دوربین گاما به روش  
مونت کارلو

سوده مددی

استاد راهنما:

دکتر حسین توکلی عنبران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۳

ب

تقدیم به پدر و مادرم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپری برای مشکلات و ناملایمات کردند

تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

تقدیم به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و به کام و مشوق من بوده است.

خدایا تورا سپاس، تورا سپاس به خاطر تمام سختی‌هایی که عاجزان از تو کمک خواسته‌ام و تو گریانه، عطا کرده‌ای. تمام سختی‌هایی که فراموش کرده‌ام حال آنکه تو مرا فراموش نکرده‌ای.

خدایا تورا سپاس به خاطر تمام نعمت‌هایی که عطای کنی و من نمی‌بینم یا می‌بینم و نمی‌فهمم یا می‌فهمم و از یاد می‌برم.

خدایا تورا سپاس آنگونه‌ای که تو شایسته‌ای نه آنگونه که این زبان می‌گوید.

خدایا سپاس بزرگی‌ات، کرم‌ت، مهربانی‌ات، صبر‌ت

خدایا تورا سپاس به خاطر خودت

الحمد لله كما هو اعلم

از استاد گرامی و ارجمند جناب آقای دکتر حسین توکلی صبران که در این رساله راهنمای من بودند کمال تشکر و قدردانی را دارم باشد که این

خردترین، نخبی از زحمات ایشان را سپاس گوید.

و همچنین از کلیه کسانی که در انجام این رساله مشوق و پشتیبان من بودند کمال تشکر را دارم.

## چکیده

در پزشکی هسته‌ای تشخیصی، عوامل متعددی بر روی کیفیت تصویر بدست آمده اثرگذار است. به عنوان نمونه، حضور موازی‌ساز پرتو، نفوذ پرتو از دیواره موازی‌ساز، ساختار آشکارساز سوسوزن، محدودیت‌های الکترونیکی و غیره عواملی هستند که بر روی کیفیت تصویر مؤثرند. یکی از روش‌های ارزیابی این عوامل استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو است. در همین راستا در این پایان نامه با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNP-4C نقش موازی‌ساز (ابعاد و شکل آن) در کیفیت تصویر (توان تفکیک مکانی) بدست آمده از دوربین گاما بررسی شده است.

روش کار به این صورت است که موازی‌سازهای تک‌حفره استوانه‌ای، تک‌حفره مکعبی، تک‌حفره واگرا، تک‌حفره همگرا، تک‌حفره شش‌ضلعی، حفره موازی استوانه‌ای و حفره موازی مکعبی شبیه‌سازی شده و با تغییر قطر حفره موازی‌ساز اثر آن بر توان تفکیک مکانی به منظور بررسی اثر هندسه موازی‌ساز بر کیفیت تصاویر بدست آمده است.

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که موازی‌سازهایی مانند تک‌حفره شش‌ضلعی، تک‌حفره استوانه‌ای و تک‌حفره مکعبی که از لحاظ هندسی تقریباً یکسانند، روند تغییرات توان تفکیک مکانی نیز در آن‌ها یکسان است. در مورد موازی‌سازهای تک‌حفره واگرا و همگرا، موازی‌ساز همگرا از توان تفکیک بالاتری به نسبت واگرا برخوردار است. در موازی‌سازهای حفره موازی، به جز در قطر ۱ میلی‌متر که موازی‌ساز استوانه‌ای از توان تفکیک بالاتری برخوردار است، در بقیه قطرها روند تغییرات توان تفکیک مکانی تقریباً یکسان است.

پس نتیجه می‌گیریم که در اشکال هندسی که به طور تقریبی به هم نزدیکند، توان تفکیک تغییر چندانی ندارد و فقط قطر موازی‌ساز باعث تغییر توان تفکیک مکانی می‌شود. همچنین موازی‌سازهای حفره موازی در قطر یک میلی‌متر به نسبت موازی‌سازهای تک‌حفره از توان تفکیک بالاتری برخوردارند.

کلید واژه: موازی‌ساز، توان تفکیک مکانی، دوربین گاما

فهرست مطالب ..... صفحه

فصل اول: مقدمه ..... ۱

۱-۱ پزشکی هسته‌ای ..... ۲

۲-۱ تاریخچه‌ی دوربین گاما ..... ۳

۳-۱ پیشرفت‌های متاخر ..... ۴

۴-۱ دوربین گاما ..... ۵

فصل دوم: مفاهیم پایه ..... ۷

۱-۲ مقدمه ..... ۸

۲-۲ سازوکار برهم‌کنش پرتوی گاما با ماده ..... ۸

۱-۲-۲ پراکندگی کامپتون ..... ۹

۲-۲-۲ اثر فوتوالکتریک ..... ۱۰

۳-۲-۲ تولید زوج ..... ۱۰

۳-۲ رویدادهایی که در دوربین گاما اتفاق می‌افتد ..... ۱۴

۴-۲ اجزای دوربین گاما ..... ۱۵

۱-۴-۲ چشمه ..... ۱۵

۲-۴-۲ آشکارساز ..... ۱۷

۳-۴-۲ موازی‌ساز ..... ۱۸

۱-۳-۴-۲ تقسیم‌بندی موازی‌ساز بر حسب انرژی ..... ۲۰

۲-۳-۴-۲ موازی‌ساز همگرا ..... ۲۱

۳-۳-۴-۲ موازی‌ساز واگرا ..... ۲۳

۲۴.....	۴-۳-۴-۲ موازی ساز تک حفره (واگرا)
۲۶.....	۵-۳-۴-۲ موازی ساز حفره موازی
۲۷.....	۴-۴-۲ تکثیر کننده ی فوتون
۲۸.....	۵-۲ پارامترهای پردازش تصویر
۲۸.....	۱-۵-۲ توان تفکیک مکانی
۲۹.....	۲-۵-۲ توان تفکیک طیفی
۳۰.....	۵-۲ ۳ بازده
۳۱.....	<b>فصل سوم: MCNP-4C</b>
۳۲.....	۱-۳ مقدمه
۳۳.....	۲-۳ ساختار کلی فایل ورودی
۳۴.....	۳-۳ کارت سطوح
۳۴.....	۱-۳-۳ کارت تعریف صفحه
۳۵.....	۲-۳-۳ کارت تعریف کره
۳۶.....	۳-۳-۳ کارت تعریف استوانه
۳۹.....	۴-۳-۳ کارت تعریف مخروط
۴۰.....	۵-۳-۳ چشمه و معیارهای آن
۴۱.....	۵-۳ کارت Fn
۴۲.....	۶-۳ کارت ماده و معیارهای آن

فصل چهارم: شبیه‌سازی موازی سازها.....	۴۳
۱-۴ مقدمه.....	۴۴
۲-۴ شبیه‌سازی موازی ساز تک حفره استوانه‌ای.....	۴۵
۳-۴ شبیه‌سازی موازی ساز تک حفره مکعبی.....	۴۷
۴-۴ شبیه‌سازی موازی ساز تک حفره همگرا.....	۵۰
۵-۴ شبیه‌سازی موازی ساز تک حفره واگرا.....	۵۳
۶-۴ شبیه‌سازی موازی ساز تک حفره شش ضلعی.....	۵۶
۷-۴ شبیه‌سازی موازی ساز حفره موازی استوانه‌ای.....	۵۹
۸-۴ شبیه‌سازی موازی ساز حفره موازی مکعبی.....	۶۲
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۶۵
پیوست الف.....	۷۰
منابع و مآخذ.....	۷۱



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. پراکندگی کامپتون..... ۹
- شکل ۲-۲. تولید زوج..... ۱۱
- شکل ۳-۲. نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در سرب بر حسب انرژی..... ۱۱
- شکل ۴-۲. نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در تنگستن بر حسب انرژی..... ۱۲
- شکل ۵-۲. نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در پلاتینیوم بر حسب انرژی..... ۱۲
- شکل ۶-۲. نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در بافت نرم بر حسب انرژی..... ۱۱
- شکل ۷-۲. رویدادهایی که در دوربین گاما به وقوع می‌پیوندد [۱]..... ۱۵
- شکل ۸-۲. آشکارساز سوسوزن و تکثیرکننده فوتون [۱]..... ۱۸
- شکل ۹-۲. نفوذ جداری موازی‌ساز حفره‌موازی [۹]..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲. موازی‌ساز همگرا حفره‌موازی [۱]..... ۲۱
- شکل ۱۱-۲. موازی‌ساز واگرا حفره‌موازی [۱]..... ۲۲
- شکل ۱۲-۲. موازی‌ساز حفره‌موازی [۱]..... ۲۳
- شکل ۱۳-۲. موازی‌ساز تک‌حفره واگرا [۱]..... ۲۴
- شکل ۱۴-۲. تصویر بدست آمده از موازی‌ساز تک‌حفره واگرا [۱]..... ۲۵
- شکل ۱۵-۲. توان تفکیک فضایی [۱۴]..... ۲۷
- شکل ۱-۴. هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره با سطح مقطع دایروی در سیستم دوربین گاما..... ۴۲
- شکل ۲-۴. پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز تک‌حفره استوانه‌ای..... ۴۳
- شکل ۳-۴. نمودار قطر موازی‌ساز تک‌حفره استوانه‌ای بر حسب FWHM..... ۴۴
- شکل ۴-۴. هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره مکعبی در سیستم دوربین گاما..... ۴۵
- شکل ۵-۴. پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز تک‌حفره مکعبی..... ۴۶
- شکل ۶-۴. نمودار قطر موازی‌ساز تک‌حفره مکعبی بر حسب FWHM..... ۴۷
- شکل ۷-۴. هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره همگرا در سیستم دوربین گاما..... ۴۸
- شکل ۸-۴. هندسه‌ی رسم شده توسط کد MCNP-4C برای موازی‌ساز تک‌حفره همگرا..... ۴۸
- شکل ۹-۴. پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز تک‌حفره همگرا..... ۴۹
- شکل ۱۰-۴. نمودار قطر موازی‌ساز تک‌حفره همگرا بر حسب FWHM..... ۵۰
- شکل ۱۱-۴. هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره واگرا در سیستم دوربین گاما..... ۵۱
- شکل ۱۲-۴. هندسه‌ی رسم شده توسط کد MCNP-4C برای موازی‌ساز تک‌حفره واگرا..... ۵۱
- شکل ۱۳-۴. پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز تک‌حفره واگرا..... ۵۲
- شکل ۱۴-۴. نمودار قطر موازی‌ساز تک‌حفره واگرا بر حسب FWHM..... ۵۳
- شکل ۱۵-۴. هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره شش‌ضلعی در سیستم دوربین گاما..... ۵۴
- شکل ۱۶-۴. پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز تک‌حفره شش‌ضلعی..... ۵۵

- شکل ۴-۱۷. نمودار قطر موازی‌ساز تک‌حفره شش‌ضلعی بر حسب FWHM..... ۵۶
- شکل ۴-۱۸. هندسه‌ی رسم شده توسط کد MCNP-4C. برای موازی‌ساز حفره‌موازی..... ۵۷
- شکل ۴-۱۹. پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز حفره‌موازی استوانه‌ای..... ۵۸
- شکل ۴-۲۰. فیت گوسی پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز حفره‌موازی استوانه‌ای..... ۵۹
- شکل ۴-۲۱. هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز حفره‌موازی مکعبی در سیستم گاما..... ۶۰
- شکل ۴-۲۲. پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز حفره‌موازی مکعبی..... ۶۱
- شکل ۴-۲۳. فیت گوسی پروفایل‌های بدست آمده از موازی‌ساز حفره‌موازی مکعبی..... ۶۲
- شکل ۵-۱. مقایسه سه موازی‌ساز تک‌حفره استوانه‌ای، مکعبی و شش‌ضلعی..... ۶۵
- شکل ۵-۲. مقایسه سه موازی‌ساز تک‌حفره همگرا و واگرا..... ۶۶
- شکل ۵-۳. مقایسه سه موازی‌ساز حفره‌موازی مکعبی و استوانه‌ای..... ۶۶
- شکل ۵-۴. مقایسه‌ی توان تفکیک دو موازی‌ساز حفره‌موازی که فاصله‌ی آنها تا چشمه متغیر است. [۱۷]..... ۶۷
- شکل ۵-۵. اثبات رابطه‌ی ۱۳..... ۶۸

## فهرست جدوال

جدول ۱-۲. رادیوداروها و کاربردهای آنها [۷و۸].....	۱۶
جدول ۲-۲. پارامتر $k$ مربوط به هندسه‌ی موازی‌ساز [۱].....	۲۰
جدول ۱-۳. کارت تعریف صفحات [۱۲و۱۳].....	۳۲
جدول ۲-۳. کارت تعریف کره [۱۲و۱۳].....	۳۳
جدول ۳-۳. کارت تعریف سطوح استوانه‌ای [۱۲و۱۳].....	۳۴
جدول ۴-۳. کارت تعریف مخروط [۱۲و۱۳].....	۳۷
جدول ۵-۳. کارت‌های ثبت $F_n$ . [۱۲و۱۳].....	۳۹
جدول ۱-۴. FWHM بدست آمده مربوط به شکل ۲-۴.....	۴۴
جدول ۲-۴. FWHM بدست آمده مربوط به شکل ۵-۴.....	۴۷
جدول ۳-۴. FWHM بدست آمده مربوط به شکل ۶-۴.....	۵۰
جدول ۴-۴. FWHM مربوط به شکل ۸-۴.....	۵۲
جدول ۵-۴. FWHM مربوط به شکل ۱۴-۴.....	۵۶
جدول ۶-۴. ضخامت جداری بدست آمده برای موازی‌سازهای حفره‌موازی از قطر ۱ تا ۴ میلی‌متر.....	۵۷
جدول ۷-۴. FWHM بدست آمده مربوط به شکل ۱۲-۴.....	۵۹
جدول ۸-۴. FWHM بدست آمده مربوط به شکل ۱۴-۴.....	۶۲
جدول ۱-۵. مقایسه‌ی FWHM بدست آمده در هر قطر برای سه موازی‌ساز تک‌حفره استوانه‌ای، مکعبی و شش- ضلعی.....	۶۴
جدول ۲-۵. مقایسه‌ی FWHM بدست آمده برای دو موازی‌ساز تک‌حفره همگرا و واگرا.....	۶۴
جدول ۳-۵. مقایسه‌ی FWHM بدست آمده در هر قطر برای دو موازی‌ساز حفره‌موازی استوانه‌ای، مکعبی.....	۶۵



# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ پزشکی هسته‌ای

منشأ پزشکی هسته‌ای به اواخر قرن هجدهم برمی‌گردد. کشف پرتوزایی توسط هانری بکرل<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۶ و رادیم توسط ماری کوری<sup>۲</sup> در سال ۱۸۹۸، پس از کشف پرتوهای ایکس توسط ویلیام رونتگن<sup>۳</sup> در سال ۱۸۹۵ انجام شد و پس از آن پرتوهای ایکس و چشمه‌های رادیوم برای تصویربرداری به سرعت مورد استفاده قرار گرفتند. دوربین انگر<sup>۴</sup> یا دوربین گاما اولین بار در سال ۱۹۵۸ توسط هال انگر<sup>۵</sup> در دانشگاه برکلی ابداع شد. آخرین پیشرفت‌ها توسعه‌ی پت<sup>۶</sup> توسط فیلیپس<sup>۷</sup> و اسپکت<sup>۸</sup> توسط کوهل<sup>۹</sup> و دیگران در طول دهه‌ی ۱۹۷۰ بود که در واقع عصر جدیدی برای پزشکی هسته‌ای محسوب می‌شد.

پزشکی هسته‌ای تشخیصی، شاخه‌ای از تصویربرداری پزشکی و فیزیک پزشکی است که در آن از مواد رادیواکتیو جهت تشخیص بیماری‌ها استفاده می‌شود. روش‌های تشخیصی در مورد اعضای مختلف بدن مانند استخوان‌ها، مغز، کلیه، ریه، قلب، دستگاه گوارش و دستگاه ادراری کاربرد دارد. روش کار به این صورت است که ابتدا رادیوداروی مخصوص هر عضو با ماده رادیواکتیو نشاندار می‌شود و به بیمار منتقل می‌شود (تزریق، خوراکی یا استنشاقی) و در عضو بدن تجمع می‌یابد، سپس با دوربین گاما تصویربرداری از عضو مورد نظر صورت می‌گیرد. به طور مثال از رادیوداروهای استنشاقی برای اسکن

- 
1. Henri Becquerel
  2. Marie Curie
  3. William Roentgen
  4. Anger Camera
  5. Hall Anger
  6. PET ( Positron Emission Tomography)
  7. Phillips
  8. SPECT ( Single Photon Emission Tomography)
  9. Kohel

شش‌ها استفاده می‌شود. پرتوهای گامای گسیل شده با کمترین انرژی می‌توانند بدون پراکندگی و جذب از بدن خارج شوند.

در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای دو حیطةی وسیع وجود دارد:

۱- تصویربرداری تک‌فوتون (اسپکت)

۲- تصویربرداری پوزیترون (پت)

در تصویربرداری تک‌فوتون از رادیونوکلئیدهایی استفاده می‌شود که واپاشی آن‌ها با گسیل پرتوی گاما همراه است و دو نوع دارد. در نوع اول تصویر بدست آمده تحت یک زاویه‌ی خاص از بیمار بدست می‌آید (تصویر تخت یا دوبعدی). در نوع دوم دوربین گاما متحرک است و تصویربرداری از زوایای زیادی حول بیمار صورت می‌گیرد (تصویر سه بعدی). در تصویربرداری پوزیترون از رادیونوکلئیدهایی استفاده می‌شود که از طریق گسیل پوزیترون واپاشیده می‌شوند. با نابودی پوزیترون (نابودی زوج) همزمان دو پرتوی گاما ساطع می‌شود که این پرتوها نیز با دوربین گاما آشکارسازی می‌شوند. در این نوع تصویربرداری هم قابلیت بدست آوردن تصاویر دو بعدی و سه بعدی وجود دارد [۱].

## ۱-۲ تاریخچه‌ی دوربین گاما

اولین آثار رادیواکتیویته در سال ۱۸۶۷ توسط سنت ویکتور<sup>۱</sup> بر روی امولسیون فیلم مشاهده گردید. پس از او در سال ۱۸۹۶ هانری بکرل در جریان بررسی خاصیت لومینانس املاح اورانیوم، پی به وجود اشعه‌ای نظیر اشعه ایکس برد. بکرل املاح اورانیوم را در صفحات فوتوگرافی قرار داد و دور از نور در جایی نگه‌داشت و پس از ظاهر کردن آن‌ها به وجود اشعه‌ای ناشناخته پی‌برد. این کشف بکرل بعدها

---

1. Saint Victor

در ۲۶ دسامبر ۱۸۹۸ منجر به اعلام کشف رادیوم توسط پیر و ماری کوری<sup>۱</sup> گردید. در ۱۸۹۹ رادرفورد نشان داد که دو نوع تابش از املاح اورانیوم ساطع می‌شود و این ذرات را آلفا و بتا نامید. در سال ۱۹۰۰ کوری و ویلارد<sup>۲</sup> نوع سومی از این تابش‌ها را کشف و آن را گاما نامیدند. در ۱۹۰۸ معلوم شد، که آلفا و بتا تحت تاثیر میدان مغناطیسی منحرف می‌شوند، ولی گاما چنین انحرافی از خود نشان نمی‌دهد. واژه رادیواتم و تعریف آن نخستین بار توسط کوهمن<sup>۳</sup> در سال ۱۹۴۷ برای نامیدن اتم‌هایی که دارای نیمه عمر زوال رادیواکتیو قابل اندازه‌گیری هستند، وضع شد. تصویرگری به کمک رادیواتم‌ها در سال ۱۹۴۹ بعد از آن که اسکنر خط مستقیم<sup>۴</sup> تولید شد، آغاز شد. معرفی دوربین جرقه-ای<sup>۵</sup> (دوربین انگر یا دوربین گاما) و امکان اخذ سریع تصاویر رادیواتمی، بدون احتیاج به حرکت جارویی (آشکارسازی ساکن)، مهم‌ترین پیشرفت در ابزارهای تصویرگر هسته‌ای بود [۱].

### ۳-۱ پیشرفت‌های متأخر

نخستین آزمایش استفاده از تزریق رادیوایزوتوپ در تصویربرداری از یک انسان، توسط هرمان آل-بلومگارت<sup>۶</sup> و وایس<sup>۷</sup> از دانشگاه هاروارد انجام گرفت. این آزمایش در سال ۱۹۲۷ و به کمک یک اتافک ابری و رادون انجام گرفت. با وجود تلاش‌های فراوان، این آزمایش‌ها موفقیت آمیز نبودند، و این محققین آزمایشگاه ملی لارنس برکلی بودند که برای نخستین بار توانستند با موفقیت از یک رادیوایزوتوپ در محیطی بالینی بهره ببرند. آن‌ها به کمک سیکلوترون ایزوتوپ ید-۱۳۱ را تولید کردند که برای پروژه‌های تیروئیدی بکار رفت. از همین ایزوتوپ مدت کوتاهی بعد برای سرطان

---

2. Pierr and Marie Curie

1. Vilar

2. Kohman

3. Direct Line Scanner

4. Scintillation Cammera (Anger or Gamma Camera)

5. Herrmann L. Blumgart

6. Soma Weiss



تیروئید و پرکاری تیروئید استفاده گردید. حال انگر در سال ۱۹۵۸ دوربین انگر را در دانشگاه برکلی ابداع کرد. همچنین استفاده از رادیوایزوتوپ  $^{99m}Tc$  در ۱۹۶۴ توسط تیم متشکل از پل‌هارپر<sup>۱</sup> و نیز رابرت بک<sup>۲</sup> از دانشگاه شیکاگو باعث ایجاد نقطه عطفی در تاریخ فیزیک پزشکی و پزشکی هسته‌ای گردید [۱].

## ۱-۴ دوربین گاما

دوربین گاما یک ابزار مهم در پزشکی هسته‌ای و رادیوگرافی دیجیتال است که برای به تصویر کشیدن پرتوهای گامای ساطع شده از عضو به کار می‌رود.

تمام اجزای دوربین گاما به نوبه‌ی خود در تهیه‌ی تصاویری با کیفیت مؤثرند. آشکارسازهایی که به طور متداول از آن‌ها در دوربین گاما استفاده می‌شود سوسوزن‌ها هستند که نوع سوسوزن (آلی، غیر آلی، گازی)، اندازه‌ی کریستال‌ها و فاصله‌ی آشکارساز از موازی‌ساز، پارامترهایی مهم در داشتن تصویری با کیفیت هستند.

یکی از اجزای مهم دوربین گاما موازی‌ساز است که نقش مهمی در عبور پرتوهای موازی و جذب پرتوهای غیر موازی ایفا می‌کند. پرتوهای غیر موازی اگر به آشکارساز برسند باعث مات شدن تصویر می‌شوند به همین خاطر باید موازی‌ساز را از جنس فلزی با جذب بالا ساخت که پرتوهای غیرموازی از آن عبور نکنند. سرب، تنگستن و پلاتینیوم از متداول‌ترین فلزاتی هستند که در ساخت موازی‌ساز به کار می‌روند [۸ و ۶ و ۱]. فوتون‌ها پس از عبور از موازی‌ساز وارد کریستال‌ها شده و ایجاد فلش‌های نوری می‌کنند.

- 
1. Paul Harper
  2. Robert Beck
  3. PMT ( Photo Multiplier )

فلش‌های نوری از طریق نوربرها به تکثیرکننده‌های فوتون<sup>۳</sup> رسیده، تقویت و ثبت می‌گردد. موازی‌ساز انواع و کاربردهای مختلفی دارد به طور مثال موازی‌ساز تک‌حفره واگرا برای تصویربرداری از ارگان‌های کوچک به کار می‌رود و تصویری بزرگتر ارائه می‌دهد. عواملی مانند شکل هندسی موازی‌ساز، فاصله‌ی موازی‌ساز از آشکارساز و چشمه، بر کیفیت تصویر مؤثرند. بدست آوردن تصاویری با کیفیت و توان تفکیک مکانی بالا هدف متخصصان پزشکی هسته‌ای در طراحی دوربین‌های گاما است.

در فصل دوم به بیان مفاهیم فیزیکی پایه‌ای پرداخته شده که کاربردی اساسی در تصویربرداری به کمک دوربین گاما دارند.

فصل سوم به طور مختصر شامل دستوراتی است که از آن‌ها در نوشتن کدهای شبیه‌سازی استفاده شده است.

فصل چهارم در برگیرنده‌ی هندسه‌های شبیه‌سازی شده، نتایج و نمودارهای مربوط به آن‌هاست.

فصل پنجم شامل نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادها و پیوست‌های مورد نیاز است.

# فصل دوم

## مفاهیم پایه

## ۲-۱ مقدمه

اندرکنش پرتوهای گاما با ماده در هر انرژی فرایندهایی متفاوت و مستقل است. برای بررسی سازوکار کلی دوربین گاما نیازمندیم تا فرایندها و پدیده‌های دخیل در این سیستم را به خوبی شناخته و مفاهیمی را که در بدست آوردن تصاویری با کیفیت سهیم هستند، بشناسیم.

## ۲-۲ سازوکار برهم‌کنش پرتوی گاما با ماده

بنابر محدوده‌ی انرژی پرتوی گاما، احتمال دارد که اندرکنش‌های فوتوالکتریک، کامپتون و یا تولید زوج با ماده صورت گیرد.

در اثر عبور پرتوی گاما از یک جاذب، هر پرتوی گاما یا برهم‌کنشی با ماده جاذب ندارد و از آن بدون اندرکنش عبور می‌کند و یا توسط جاذب یا پراکندگی از باریکه جدا می‌شود. اگر تعداد پرتوی اولیه که در واحد زمان به طور عمود بر یک جاذب می‌تابد  $I_0$  و شدت باریکه‌ی دست نخورده  $I$  باشد، کسری از پرتوی گاما که از باریکه جدا شده متناسب با ضخامت  $dx$  خواهد بود.

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx \quad (1-2)$$

ضریب تناسب  $\mu$  را ضریب تضعیف خطی می‌گویند معمولاً  $\mu$  را ضریب جذب خطی کل هم می‌نامند، هرچند که پراکندگی و جذب هر دو در تضعیف باریکه‌ی پرتو گاما شرکت دارند. انتگرال معادله‌ی (۱-۲) برای جاذبی به ضخامت  $t$  به صورت زیر است.

$$I_t = I_0 e^{-\mu t} \quad (2-2)$$

باید توجه کرد که  $I_t$ ، شدت باریکه‌ای است که بدون اندرکنش از ضخامت  $t$  عبور کرده است. از آنجایی که تضعیف توسط سه فرایند مستقل کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج صورت می‌گیرد می‌توان نوشت:

$$\mu = \mu_c + \mu_{ph} + \mu_{pa} \quad (3-2)$$

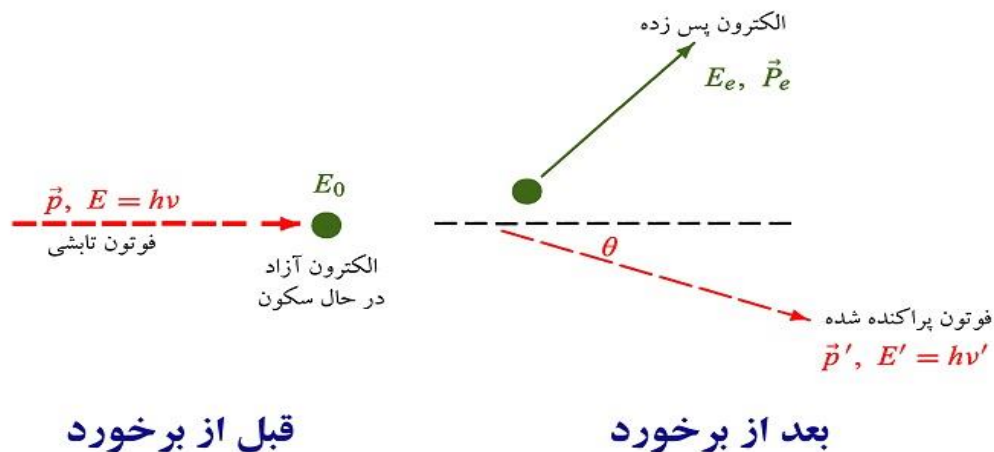
در این رابطه هر ضریب تضعیف جزئی، متناسب با احتمال وقوع آن فرایند خاص است. چون هر ضریب متناسب با تعداد اتمها در واحد حجم جاذب است، ضریب تضعیف جرمی  $\mu/\rho$  را تعریف و از آن استفاده می‌کنیم. در این سه اندرکنش احتمال وقوع به انرژی فوتون ورودی بستگی دارد. تمام این اندرکنشها منجر به انتقال کامل یا قسمتی از انرژی فوتون (پرتوی گاما)، به انرژی الکترون می‌شود [۳].

برای محاسبه  $\mu$  و رسم نمودارهای شکل ۲-۵، ۲-۶، ۲-۷ و ۲-۸ از برنامه XCOM\* استفاده شده است [۵].

## ۲-۲-۱ پراکندگی کامپتون

در پراکندگی کامپتون، فوتونی با انرژی  $E = h\nu$  به الکترون آزاد برخورد می‌کند و پراکنده می‌شود.

فوتون پراکنده شده با انرژی  $E' = h\nu'$  و با زاویه  $\theta$  و الکترون تحت زاویه  $\phi$  پراکنده می‌گردد.



شکل ۲-۱: پراکندگی کامپتون

$$E_{\gamma} = E_{\gamma'} + T_e \quad (۴-۲)$$

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (1 - \cos \theta) \left( \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} \right)} \quad (۵-۲)$$

$$\sigma \left( \frac{1}{m} \right) = aNZf(E_{\gamma}) \quad (۶-۲)$$

در این رابطه  $a$  ثابت است،  $N$  تعداد اتم‌ها در واحد حجم ماده،  $Z$  عدد اتمی ماده در تمام انرژی‌ها و تمام عناصر و  $\sigma$  احتمال اندرکنش کامپتون در واحد طول ماده است [۶].

### ۲-۲-۲ اثر فتوالکتریک

در این پدیده در اثر تابش پرتو به اتم (الکترون مقید اتمی)، الکترون‌های اتمی آزاد می‌شوند.

$$T_e = E_{\gamma} - E_{Be} \quad (۷-۲)$$

بر طبق این رابطه، انرژی جنبشی الکترون برابر است با: تفاضل انرژی پرتوی گامای تابیده شده با انرژی بستگی الکترون.

$$\tau \left( \frac{1}{m} \right) = aN \frac{Z^R}{E_{\gamma}^n} \quad (۸-۲)$$

$\tau$  احتمال اندرکنش پدیده‌ی فتوالکتریک در واحد طول ماده است و  $R \leq 5$  و  $n \leq 3$  [۶ و ۳].

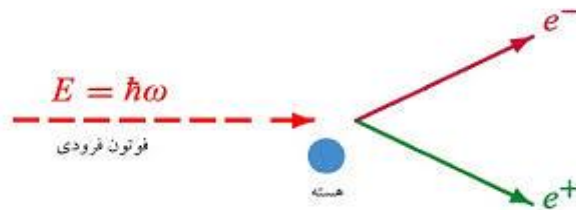
### ۳-۲-۲ تولید زوج

یکی دیگر از برهم‌کنش‌های فوتون با ماده تولید زوج است که در طی آن فوتون ورودی نابود شده و الکترون و پوزیترون تولید می‌شوند. برای انجام این فرایند به خاطر برقراری قوانین پایستگی خطی، انرژی فوتون ورودی باید به این صورت باشد [۶ و ۳].

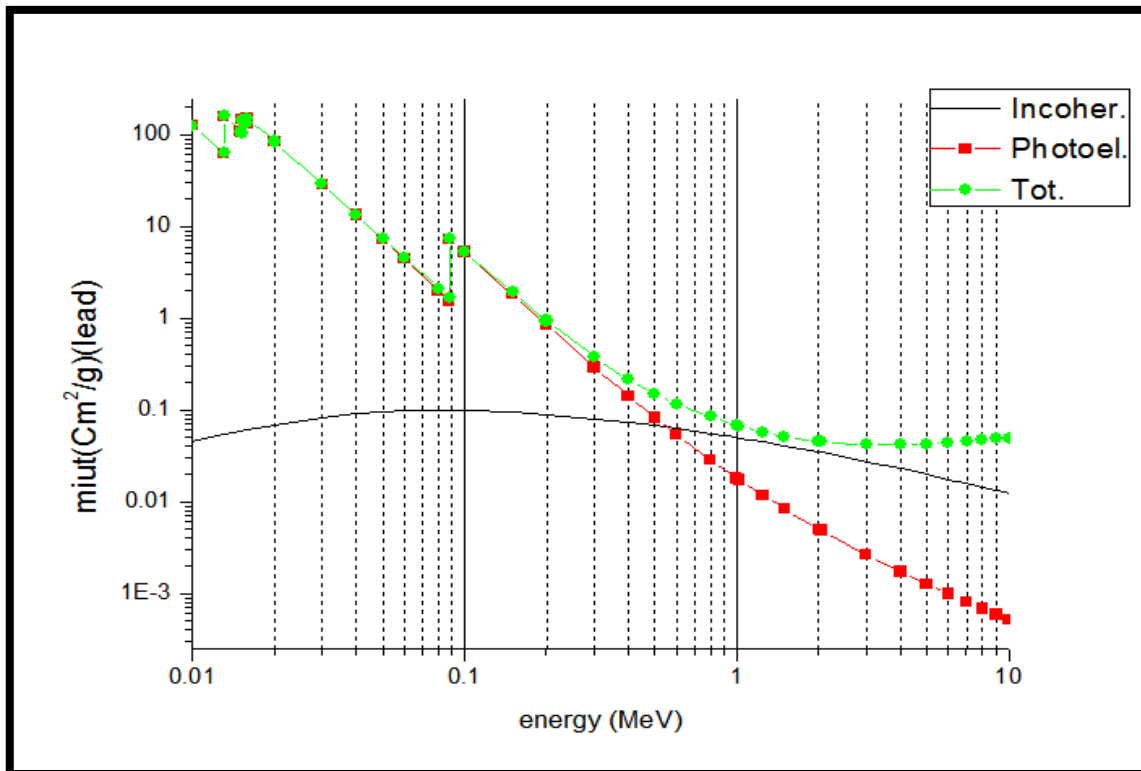
$$E_{\gamma} \leq 2M_e c^2 \quad \text{در مجاورت هسته} \quad (۹-۲)$$

$$E_\gamma \leq 4M_e c^2 \quad \text{در مجاورت الکترون} \quad (10-2)$$

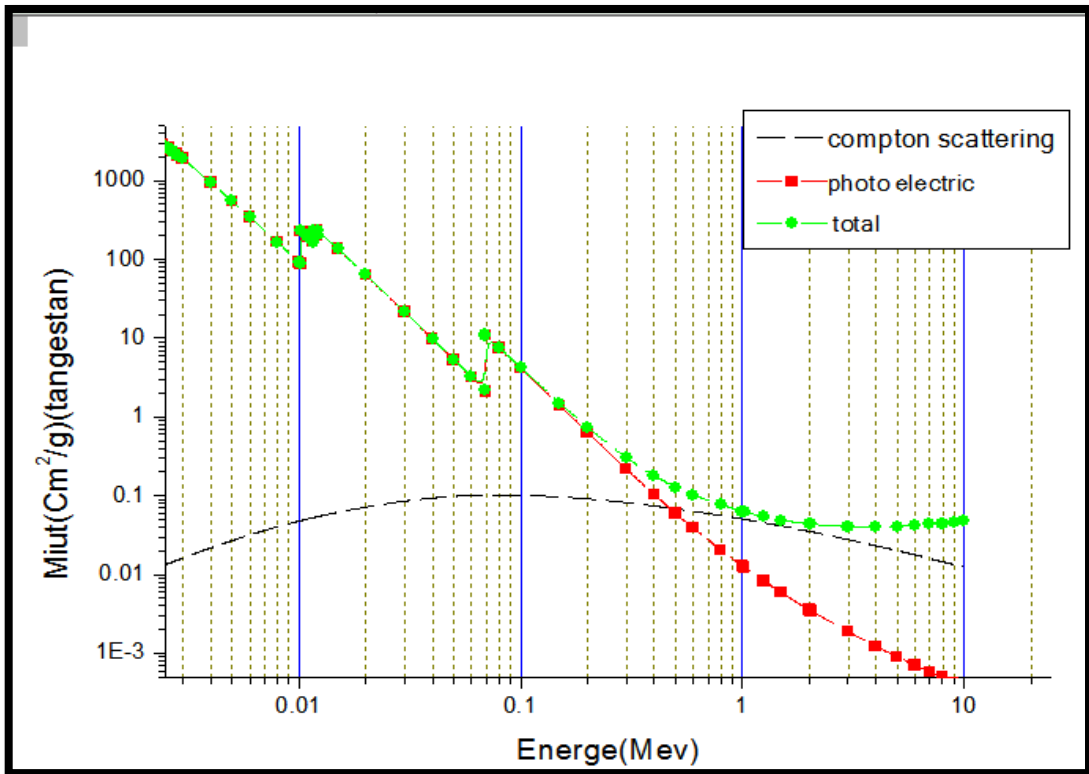
$$\kappa\left(\frac{1}{m}\right) = aNZ^2 f(E_{\gamma,Z}) \quad \text{احتمال رخداد تولید زوج} \quad (11-2)$$



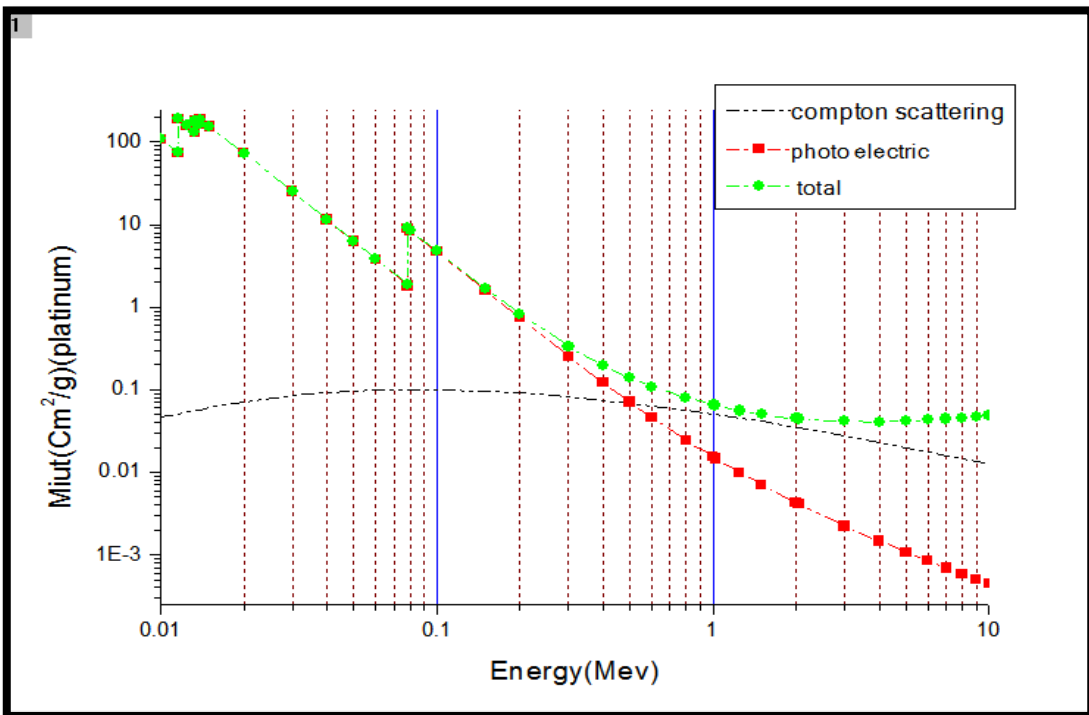
شکل ۲-۲: تولید زوج



شکل ۲-۳: نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در سرب بر حسب انرژی

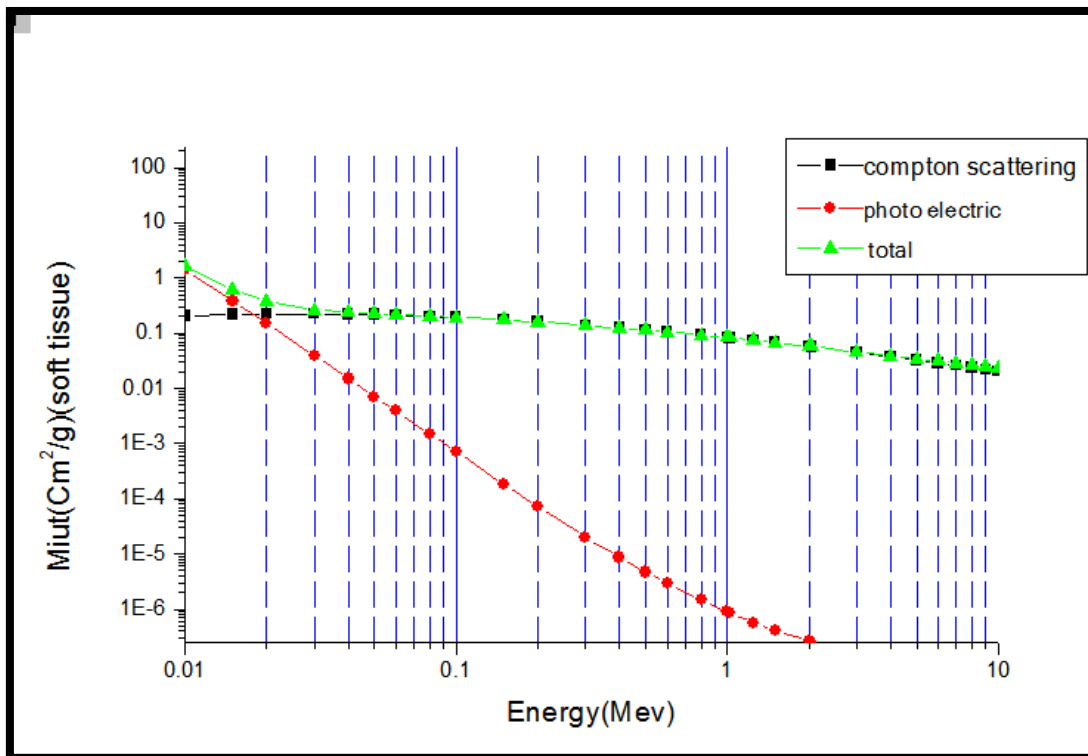


شکل ۲-۴: نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در تنگستن بر حسب انرژی



شکل ۲-۵: نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در پلاتینیوم بر حسب انرژی





شکل ۲-۶: نمودار ضریب تضعیف جرمی پرتوی گاما در بافت نرم بر حسب انرژی

همان طور در نمودارهای ۲-۴، ۲-۵، ۲-۶ و ۲-۷ مشخص است در انرژی‌های پایین (۰،۱۴ مگاالکترون-ولت) در بافت نرم اندرکنش غالب پراکندگی کامپتون و در سرب، تنگستن و پلاتینیوم اندرکنش غالب فتوالکتریک است.

با توجه به انرژی پرتوی گاما محدوده‌ی زیر برای اندرکنش‌های غالب تعریف می‌شود:

$$E_{\gamma} \leq 0.05 \text{ Mev} \quad \text{اندرکنش غالب فتوالکتریک} \quad (۲-۱۲)$$

$$0.05 \leq E_{\gamma} \leq 5 \text{ Mev} \quad \text{اندرکنش غالب پراکندگی کامپتون} \quad (۲-۱۳)$$

$$E_{\gamma} \geq 5 \text{ Mev} \quad \text{اندرکنش غالب تولید زوج} \quad (۲-۱۴)$$

طبق این روابط تولید زوج در محدوده‌ی انرژی در نظر گرفته شده در این تحقیق اندرکنشی غالب نیست و اتفاق نمی‌افتد [۶].

## ۳-۲ رویدادهایی که در دوربین گاما اتفاق می‌افتند:

همان‌طور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است، ۴ نوع رویداد ممکن است در دوربین گاما به وقوع بپیوندد و فقط یکی از آن‌ها به درستی اطلاعات را انتقال می‌دهد:

۱- رویدادهای معتبر: پرتوی گاما موازی با موازی‌ساز گسیل شده، از حفره‌ی آن عبور کرده، به آشکارساز می‌رسد و انرژی‌اش را در آشکارساز در اثر به‌جا می‌گذارد.

۲- پراکندگی توسط آشکارساز: پرتوی گاما پس از گذشتن از موازی‌ساز به آشکارساز رسیده و با آن اندرکنش (کامپتون) انجام می‌دهد، پرتو پراکنده و وارد کریستال بعدی (اندرکنش ثانویه) شده و ثبت می‌گردد. ثبت این پرتو باعث ایجاد نویز در تصویر می‌شود چراکه پرتو قسمتی از انرژی خود را در یک کریستال و قسمتی دیگر را در کریستالی دیگر به‌جا گذاشته است.

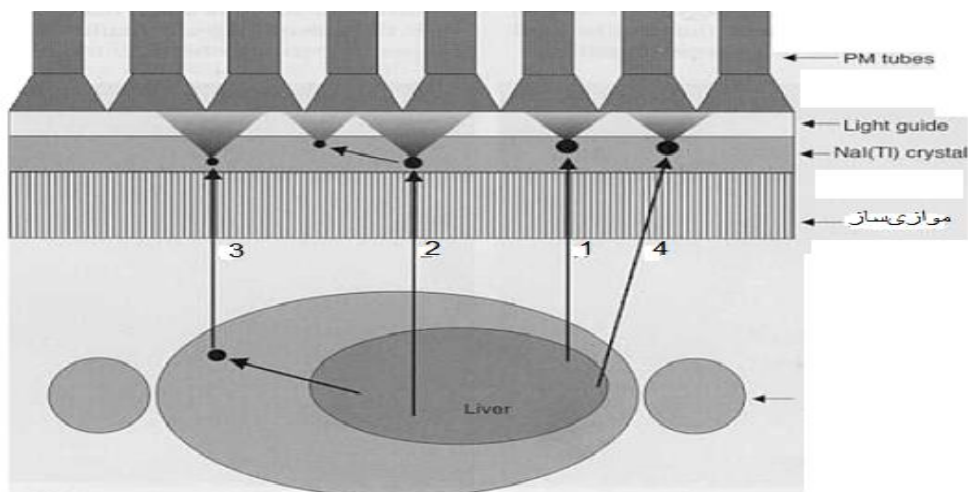
۳- پرتوی گاما به سمت موازی‌ساز گسیل نمی‌شود بلکه در بدن توسط عضو مورد نظر پراکنده می‌شود ولی به طور صحیح به موازی‌ساز می‌رسد. تمام این پرتوها قابل قبول نیستند مگر اینکه زاویه پراکندگی کمتر از ۴۵ درجه باشد.

این پدیده باعث کاهش کنتراست می‌شود (Low Spatial Frequency).

۴- پرتوی گاما به سوی موازی‌ساز گسیل می‌شود، اما نه موازی با موازی‌ساز و از جداری به جدار دیگر نفوذ می‌کند. این پدیده باعث مات و تیره شدن تصویر می‌شود [۱].

❖ رویداد دیگری هم که ممکن است رخ دهد، پراکندگی در موازی‌ساز است.

به طوری که پرتوی گسیل شده توسط دیواره‌ی داخلی موازی‌ساز پراکنده می‌شود و به آشکارساز می‌رسد (البته احتمال رخداد این حالت بسیار کم است زیرا سطح مقطع جذب فوتون در سرب و در انرژی ۱۴۰ کیلو الکترون‌ولت بسیار بالاست به همین خاطر در شکل لحاظ نشده است).



شکل ۲-۷: رویدادهایی که در دوربین گاما به وقوع می‌پیوندد [۱]

## ۲-۴ اجزای سیستم دوربین گاما

۱. چشمه<sup>۱</sup>
۲. آشکارساز<sup>۲</sup>
۳. موازی‌ساز<sup>۳</sup>
۴. تکثیرکننده‌ی فوتون<sup>۴</sup>
۵. سیستم کامپیوتری ثبت داده و تشکیل تصویر

### ۲-۴-۱ چشمه

از نقطه نظر شیمیایی، هر عضو بدن عملکردی متفاوت با بقیه دارند. پزشکان و شیمیدان‌ها، مقداری از مواد شیمیایی را که توسط اعضای بدن جذب می‌شوند را مشخص کرده‌اند. به طور مثال تیروئید، ید را و مغز برخی قندها را جذب می‌کند. با این دانش پرتوپزشکان مواد رادیوایزوتوپ را با مواد بیولوژیکی مختلف ترکیب می‌کنند.

- 
1. Source
  2. Detector
  3. Collimator
  4. Photo multiplier

مقدار ماده رادیواکتیو رسیده به بدن برای تشخیص ناچیز است. مریض در قبل و بعد از آزمایش چیز ناخوشایندی احساس نمی کند و اثرات باقیمانده از ماده در مدت کوتاهی از بین می رود. رادیوایزوتوپی که برای تشخیص و آزمایش به کار می رود باید نیمه عمر کوتاهی داشته باشد تا زیاد در بدن باقی نماند.

رادیوایزوتوپی که به کرات در تشخیص استفاده می شود  $^{99m}Tc$  می باشد که در ۸۰٪ پرتوپزشکی ها مورد استفاده قرار می گیرد. تکنسیوم به دلایل زیر برای مصرف پرتوپزشکی رادیونوکلئید خوبی است:

- نیمه عمر فیزیکی آن حدود ۶ ساعت است و در عین حال که زمانی طولانی برای بررسی فرایندهای متابولیکی است، زمان کوتاهی برای به حداقل رساندن تابش به بدن است (در پرتو درمانی).

- تکنسیوم  $^{99m}$  در هنگام واپاشی گاماها کم انرژی و الکترون منتشر می کند [۷و۳]  
تعدادی از رادیو داروهای تشخیصی که به طور مصنوعی تولید می شوند و کاربردهای رایج آن ها در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۱-۲) رادیوداروها و کاربردهای آن ها [۷و۸]

نیمه عمر فیزیکی	کاربرد آن	رادیودارو
۶ ساعت	اسکن قلب، کبد، کلیه، شش، استخوان، کبد و غیره	تکنسیوم $^{99m}$
۸ روز	اسکن تیروئید	ید $^{131}$
۵،۲۴ روز	اسکن شش، مطالعات جریان خون	زنون $^{133}$
۱۳ ثانیه	اسکن ریه	کریپتون $^{81}$
۳،۲۶۱۲ روز	اسکن تومور	گالیوم $^{67}$
۱۱۰ دقیقه	اسکن استخوان	فلوئور $^{18}$
۷۲،۹ ساعت	اسکن قلب	تالیوم $^{201}$

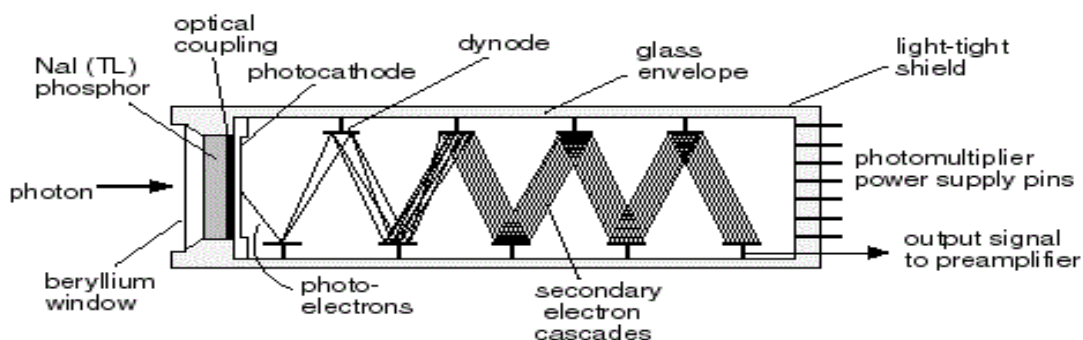
## ۲-۴-۲ آشکارساز

از جمله موادی که در آشکارسازی پرتوهای ایکس و گاما از آن‌ها استفاده می‌شود، سوسوزن‌ها می‌باشند. نخستین جامدی که به عنوان یک آشکارساز ذره به کار رفت، سوسوزنی بود که رادرفورد در آزمایش‌های خود در زمینه‌ی پراکندگی ذرات آلفا مورد استفاده قرار داد. سوسوزن‌ها موادی هستند، که وقتی تابشی یونساز از آن‌ها می‌گذرد تولید جرقه یا نور می‌کنند. برخورد نور با فوتوکاتد، لامپ تکثیرکننده فوتونی منجر به کنده شدن الکترون از آن می‌شود، الکترون‌های تولید شده در فاصله بین داینودهای متعدد، تکثیر شده و در نهایت تپ الکتریکی قابل اندازه‌گیری تولید می‌شود.

معمولاً ذراتی که وارد آشکارساز می‌شوند، به طور کامل شمرده نمی‌شوند و در مواردی بسته به نوع و انرژی ذره و نوع و اندازه آشکارساز، ممکن است بدون هیچ برهم‌کنشی از آشکارساز بگذرند و یا علامتی که تولید می‌کنند، آنقدر کوچک باشد که نتوان با دستگاه‌های الکترونیکی قابل دسترس آن‌ها را ثبت کرد. از اینرو بازده ذاتی آشکارسازها عملاً کمتر از ۱ می‌باشد. بازده آشکارساز به چگالی و اندازه‌ی ماده‌ی آشکارساز، نوع و انرژی تابش و سیستم الکترونیک متصل به آشکارساز، وابسته است. با افزایش احتمال برهم‌کنش بین تابش فرودی و ماده‌ی آشکارساز، بازده افزایش می‌یابد که این احتمال متناسب با سطح مقطع اندرکنش‌ها با آشکارساز، چگالی ماده و ابعاد آشکارساز است.

اگر باریکه‌ای موازی از فوتون‌ها با انرژی  $E$  که طول  $l$  را در آشکارساز می‌پیمایند، در نظر گرفته شود، احتمال اینکه یک فوتون حداقل یک برهم‌کنش در آشکارساز داشته باشد برابر  $1 - e^{-\mu(E)l}$  است که در آن  $\mu(E)$  ضریب تضعیف خطی فوتون‌هایی با انرژی  $E$  در ماده آشکارساز است. اگر برای تولید یک تپ قابل آشکار یک برهم‌کنش کافی باشد، بازده ذاتی آشکارساز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۱۵ و ۷].

$$\varepsilon_i(E) = 1 - e^{-\mu(E)l} \quad (۱۵-۲)$$



شکل ۲-۸: آشکارساز سوسوزن و تکثیرکننده فوتون [۱]

## ۲-۴-۳ موازی‌ساز

موازی‌ساز، وسیله‌ای است که به موازی‌سازی پرتوها و حذف پرتوهای ناشی پراکندگی کامپتون می‌پردازد. تیغه‌های موازی‌ساز تعیین کننده‌ی میدان دید سیستم<sup>۱</sup> هستند. تیغه‌ها به پرتوهای اجازه عبور می‌دهند که به موازات آن‌ها باشند.

به طور کلی موازی‌ساز به چهار نوع اصلی تقسیم بندی می‌شود:

۱. موازی‌ساز تک‌حفره<sup>۲</sup>

۲. موازی‌ساز حفره‌موازی<sup>۳</sup>

۳. موازی‌ساز همگرا<sup>۴</sup>

۴. موازی‌ساز واگرا<sup>۵</sup>

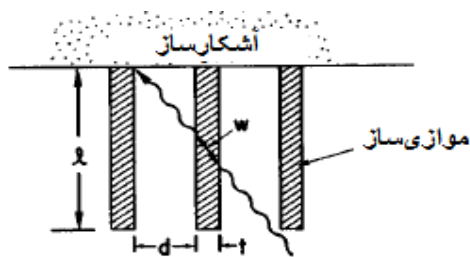
موازی‌ساز انواع دیگری هم دارد که می‌توان از ترکیب این چهار نوع و تغییر هندسه، موازی‌سازی جدید طراحی کرد.

- 
1. Fov (field of view)
  2. Pinhole collimator
  3. Parallel collimator
  4. Converging collimator
  5. Diverging collimator
  6. Septal Thickness

یکی از عواملی که در طراحی موازی‌ساز اهمیت دارد این است که نفوذ پرتوهای گاما از یک حفره به حفره دیگر، در موازی‌سازهای حفره موازی از طریق جداره کم باشد.

$$t = \frac{2dw}{(l-w)} \quad (16-2)$$

$t$  ضخامت جداری<sup>۱</sup>،  $d$  قطر حفره‌ها،  $l$  طول موازی‌ساز و  $w$  کوتاهترین مسیری است که پرتوی گاما در جداره، از یک حفره به حفره دیگر طی می‌کند.



شکل ۹-۲: نفوذ جداری موازی‌ساز حفره موازی [۹]

$$e^{-\mu w} \leq 0.05 \quad (17-2)$$

$$\mu w \geq 3$$

$$w \geq \frac{3}{\mu}$$

$$t \geq \frac{2d \times \frac{3}{\mu}}{l - \frac{3}{\mu}} \geq \frac{6d/\mu}{l - 3/\mu} \quad (18-2)$$

اثبات رابطه‌ی ۱۶-۲ در پیوست الف آورده شده است.

اگر  $t$  کوچکترین حد ممکن را داشته باشد، بازده موازی‌ساز افزایش (توان تفکیک مکانی کاهش) می‌یابد. در ساخت موازی‌ساز از موادی با ضریب تضعیف خطی بزرگ استفاده می‌شود (موادی با عدد

1. Septal Thickness

اتمی و چگالی بالا). نکته اینجاست که ضریب تضعیف خطی عناصر سنگین به انرژی پرتوی گاما وابسته است پس ضخامت جداری فاکتوری وابسته به انرژی می شود [۱].

## ۲-۴-۳-۱ تقسیم بندی موازی ساز بر حسب انرژی

- ۱- موازی ساز در محدوده‌ی انرژی‌های بالا<sup>۱</sup> (در حدود ۱ MeV)
- ۲- موازی ساز در محدوده‌ی انرژی‌های پایین<sup>۲</sup> (در حدود ۱۴۰ keV)
- ۳- موازی ساز در محدوده‌ی انرژی‌های متوسط<sup>۳</sup> (در حدود ۴۰۰ keV)

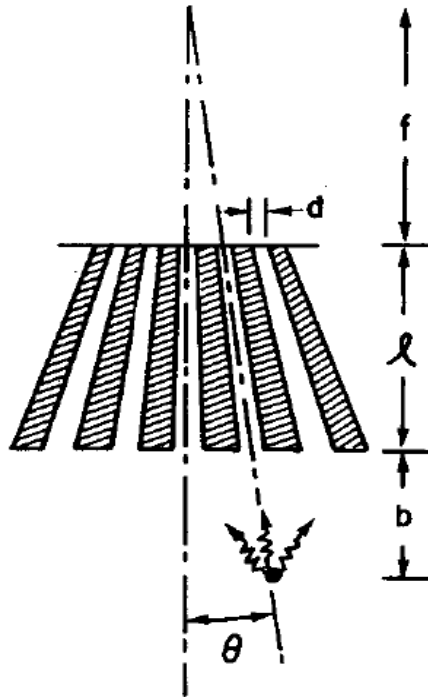
ضخامت جداری برای هر یک از این سه ناحیه قابل محاسبه است. موازی‌سازهای مربوط به محدوده انرژی‌های پایین شکننده‌اند و به راحتی خراب می‌شوند. این عدد برای محدوده سوم در حدود چند میلی‌متر است [۱].

---

1. High Energy Collimator  
2. Low Energy Collimator  
3. Medium Energy Collimator



۲-۳-۴-۲ موازی ساز همگرا



شکل ۲-۱۰: موازی ساز همگرا حفره موازی [۱]

$$R_{colli} \approx \left[ \frac{d(l_{eff} + b)}{l_{eff}} \right] \left[ \frac{1}{\cos \theta} \right] \left[ 1 - \frac{l_{eff}}{2(f + l_{eff})} \right] \quad (19-2)$$

$$g \approx k^2 \left( \frac{d}{l_{eff}} \right)^2 \left[ \frac{d}{(d+t)} \right]^2 \left[ \frac{f^2}{(f-b)^2} \right] \quad (20-2)$$

$$l_{eff} \approx \left[ 1 - \frac{2}{\mu \cos \theta} \right] \quad (21-2)$$

$b$  فاصله‌ی چشمه تا موازی ساز،  $l$  طول موازی ساز،  $d$  قطر آن،  $f$  فاصله‌ی کانونی و  $\mu$  ضریب

تضعیف جرمی است.

$k$  ثابتی است که به شکل موازی ساز وابسته است.

جدول (۲-۲): پارامتر  $k$  مربوط به هندسه‌ی موازی‌ساز [۱]

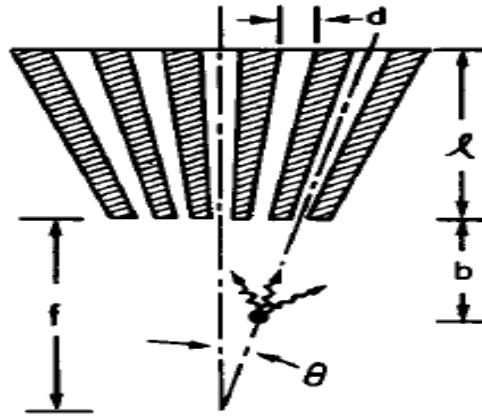
شکل هندسی	ثابت $k$
حفره دایره‌ای در آرایش شش‌گوشه	۰/۲۴
حفره شش‌گوشه در آرایش شش‌گوشه	۰/۲۶
حفره مربعی در آرایش مربعی	۰/۲۸

$R$  توان تفکیک مکانی موازی‌ساز،  $g$  بازده<sup>۱</sup> و  $l_{eff}$  طول مؤثر است.

در این نوع (همگرا) میدان دید از قطر بیشتری برخوردار است ولی تصویر بدست آمده کوچکتر است.

در واقع از منطقه‌ی وسیع‌تری تصویربرداری می‌شود [۱۷ و ۱].

## ۲-۴-۳-۳ موازی ساز واگرا



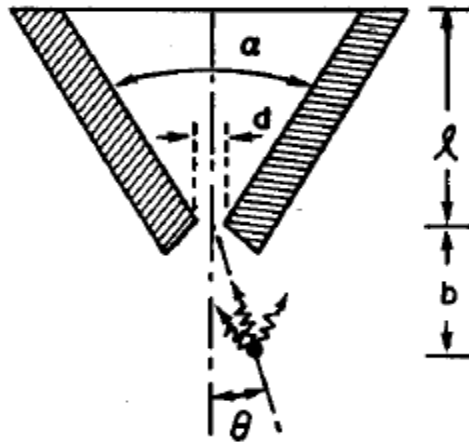
شکل ۲-۱۱ : موازی ساز واگرا حفره موازی [۱]

$$R_{colli} \approx \left[ \frac{d(l_{eff} + b)}{l_{eff}} \right] \left[ \frac{1}{\cos \theta} \right] \left[ 1 + \frac{l_{eff}}{2f} \right] \quad (22-2)$$

$$g \approx k^2 \left( \frac{d}{l_{eff}} \right)^2 \left[ \frac{d}{(d+t)} \right]^2 \left[ \frac{f+l}{f+l+b} \right] \quad (23-2)$$

در این نوع (واگرا) تصویر بدست آمده بزرگتر از جسم است و بافت را با دقت بیشتری می توان بررسی کرد [۱۷].

۴-۳-۴-۲ موازی‌ساز تک‌حفره (واگرا)



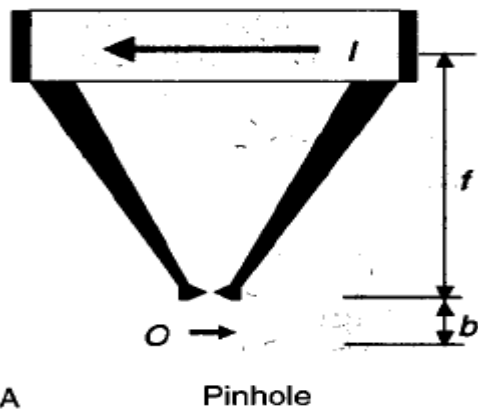
شکل ۲-۱۳: موازی‌ساز تک‌حفره واگرا [۱]

$$R_{\text{colli}} \approx \frac{d_e(1+b)}{l} \quad (24-2)$$

$$g \approx d_e \frac{\cos^3 \theta}{16b^2} \quad (25-2)$$

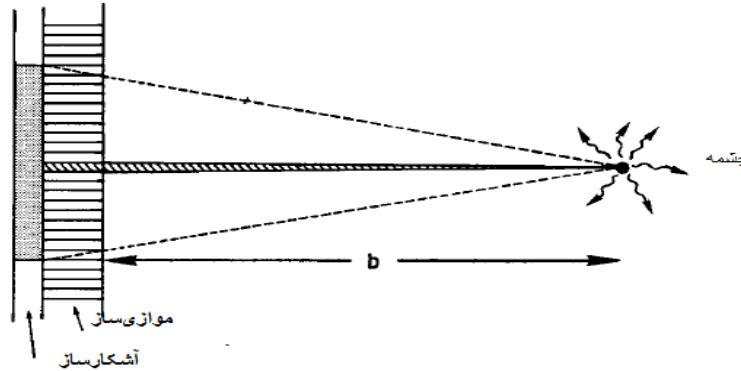
$$d_e = \sqrt{d[d + 2\mu^{-1} \tan(\frac{\alpha}{2})]} \quad (26-2)$$

در این نوع موازی‌ساز تصویر بدست آمده بزرگتر از شیء است [۱۷و].



شکل ۱۴-۲ تصویر بدست آمده از موازی ساز تک حفره واگرا [ ۱ ]

## ۵-۳-۴-۲ موازی‌ساز حفره‌موازی



شکل ۲-۱۲: موازی‌ساز حفره‌موازی [۱]

$$R_{colli} \approx \frac{d(l_e + b)}{l_e} \quad (27-2)$$

$$g \approx k^2 \left(\frac{d}{l_e}\right)^2 \left[\frac{d}{(d+t)}\right]^2 \quad (28-2)$$

موازی‌سازهایی با توان تفکیک مکانی بالا، بازدهی پایین و با توان تفکیک مکانی پایین بازدهی بالا<sup>۲</sup> دارند.

بازده موازی‌ساز به فاصله‌ی چشمه از موازی‌ساز وابسته نیست. چون وقتی چشمه از موازی‌ساز دور می‌شود بازده برای پرتوهای عبوری از هر تک حفره با نسبت  $\frac{1}{b^2}$  کاهش می‌یابد (طبق فرمول ۲-۲۵). از طرفی تعداد حفره‌هایی که پرتوها می‌توانند از آن‌ها عبور کنند با نسبت  $b^2$  افزایش می‌یابد. در نتیجه این دو اثر همدیگر را خنثی کرده و تعداد شمارش‌ها و بازده به  $b$  وابسته نیست. در این نوع موازی‌ساز اندازه‌ی تصویر بدست آمده با خود شیء یکسان است [۱۷].

---

1.High Resolution  
2.High sensitivity

## ۲-۴-۴ تکثیرکننده‌ی فوتون

کریستال‌های آشکارساز، اشعه‌ی گاما را به فوتون‌های نوری و تکثیرکننده‌های فوتون، نور را به پیام‌های الکترونیکی تبدیل می‌کنند. محل تکثیرکننده‌های فوتون در واقع پشت کریستال آشکارساز است و هرچه تعداد آن‌ها بیشتر باشد توان تفکیک مکانی تصویر بدست آمده بهتر است و هرچه تعداد آن‌ها بیشتر باشد می‌توان ضخامت کریستال را کاهش داد.

در تکثیرکننده‌های نور، فوتون‌ها در ورودی، بر اساس اثر فوتوالکتریک، الکترون آزاد می‌نمایند. الکترون‌های آزاد شده در یک میدان الکتریکی شتاب گرفته و انرژی آن‌ها افزایش می‌یابد. الکترون‌ها در اثر برخورد با فوتوکاتد که به کمک آن‌ها میدان الکتریکی ایجاد گشته است، تعداد بیشتری الکترون آزاد می‌نمایند و این روند چندین بار تکرار می‌گردد تا سطح انرژی الکترون‌ها به حد مطلوبی برسد. در نهایت پتانسیل‌های اندازه‌گیری‌شده، توسط تقویت‌کننده‌ها، تقویت شده و ثبت می‌گردد [۱۰ و ۷].

## ۲-۵ پارامترهای پردازش تصویر

تصویر بدست آمده از دوربین گاما تحت تاثیر عوامل مختلفی می تواند کیفیت مورد نظر را نداشته باشد با استفاده از این پارامترها می توان کیفیت تصویر و کارایی دوربین گاما را سنجید.

۱- توان تفکیک مکانی<sup>۱</sup>

۲- توان تفکیک طیفی (پاسخ فرکانس یا کنتراست)<sup>۲</sup>

۳- بازده<sup>۳</sup>

## ۲-۵-۱ توان تفکیک مکانی

توان تفکیک مکانی در واقع توانایی سیستم، در تشخیص لبه ها است.

در این پارامتر دو فاکتور موازی ساز و ساختار آشکارساز (به طور مثال ضخامت کریستال) نقش عمده دارند. توان تفکیک مکانی یک سیستم از این رابطه بدست می آید:

$$R_{sys} = \sqrt{R_{int}^2 + R_{colli}^2} \quad (2-29)$$

$R_{int}$  یا توان تفکیک مکانی ذاتی مربوط به ساختار آشکارساز است. مقدار توان تفکیک مکانی ذاتی اغلب سیستم های تجاری در حدود  $3 \pm 0.4$  میلی متر می باشد در نتیجه می توان این پارامتر را ۴ در نظر گرفت و از آنجایی که این پارامتر در تمام شبیه سازی ها یکسان است پس پارامتری که توان تفکیک مکانی کل سیستم را تغییر می دهد توان تفکیک مکانی موازی ساز است [۱۱]. هرچه ضخامت کریستال بیشتر باشد پرتوی بیشتری جذب آشکارساز شده و در نتیجه توان تفکیک مکانی ذاتی کاهش و بازده افزایش می یابد و برعکس.

$R_{colli}$  پارامتر مربوط به موازی ساز است که به طول، قطر حفره و جنس موازی ساز وابسته است.

---

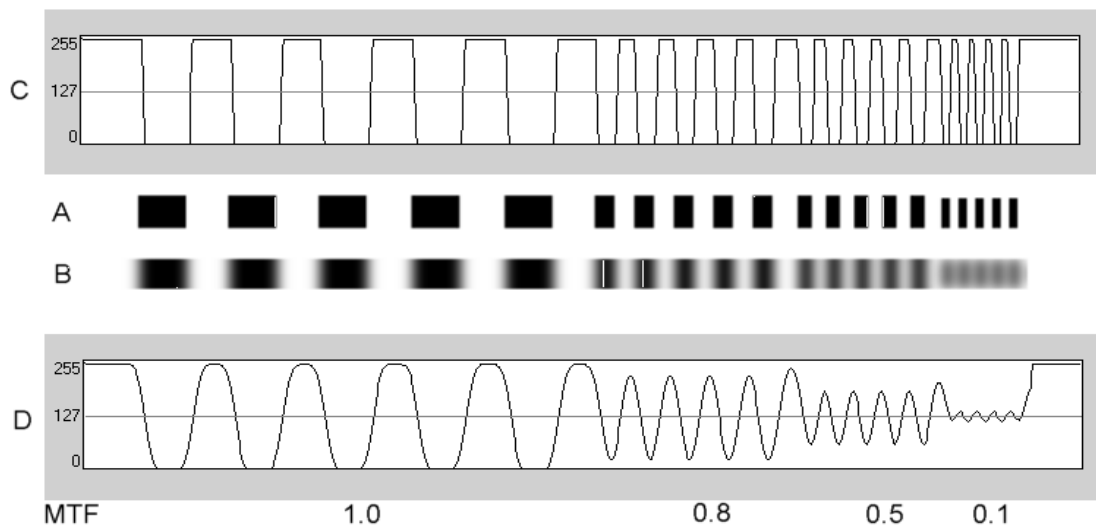
1. Resolution  
2. Modulate Transfer Function (MTF)  
3. Efficiency



در شبیه‌سازی، پهنای پیک تابع نقطه گستر (PSF)<sup>۱</sup> و یا (LSF)<sup>۲</sup> در نصف مقدار بیشینه (FWHM) پس از برازش گوسی پروفایل تصویر بدست آمده، نمایانگر توان تفکیک مکانی موازی‌ساز است. هرچه FWHM<sup>۳</sup> بیشتر باشد تصویر از توان تفکیک مکانی کمتری برخوردار است و برعکس [۹].

## ۲-۵-۲ توان تفکیک طیفی (پاسخ فرکانس)

توانایی یک سیستم برای تصویربرداری از یک شیء بدون محوشدگی است که بر حسب فرکانس فضایی طبقه‌بندی می‌شود. در تصویر برداری از چشمه‌های نقطه‌ای و یا خطی استفاده می‌شود که این اثر این دو نوع چشمه در واقع مانند عملگری است که به سیستم اعمال شده و خروجی تحت تاثیر این عملگرها قرار گرفته و ممکن است محوشدگی<sup>۴</sup> اتفاق بیافتد. برای درک بهتر توان تفکیک فضایی از شکل ۲-۱۵ استفاده می‌کنیم.



شکل ۲-۱۵: توان تفکیک فضایی [۱۴]

1. Point Spread Function
2. Line Spread Function
3. Full Width at Half- Maximum
4. Blurring

در این شکل A یک الگوی اصلی برای تست است که از آن تصویربرداری شده است و نتیجه‌ی آن B است. C پروفایل بدست آمده از A و D پروفایل بدست آمده از B است. همان‌طور که در شکل مشخص است تصویر بدست آمده از الگوی اصلی محوشدگی دارد یا به اصطلاح مات است. اگر به نقاط سفید عدد ۲۵۵ و به نقاط سیاه عدد صفر را نسبت دهیم پروفایل های D و C بدست می‌آیند که در واقع نمایانگر توان تفکیک فضایی هستند.

از رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی MTF استفاده می‌شود [۱۴].

$$MTF = \frac{\text{maximum intensity} - \text{minimum intensity}}{\text{maximum intensity} + \text{minimum intensity}}$$

maximum intensity = حداکثر شدت

minimum intensity = حداقل شدت

## ۲-۵-۳ بازده

بازده نسبت پرتوی گامای عبوری از موازی‌ساز (پرتوهایی که به آشکارساز می‌رسد)، به کل پرتوی گامای خروجی از چشمه است. این پارامتر به نوع موازی‌ساز، طیف انرژی و مشخصات آشکارساز (ضخامت کریستال، ابعاد و فوتومولتی پلایرها) وابسته است. یک موازی‌ساز با بازده بالا<sup>۱</sup> به طور آشکارا شمارش بیشتری نسبت به یک موازی‌ساز با توان تفکیک بالا<sup>۲</sup> خواهد داشت. به طور صریح‌تر طبق رابطه‌ی زیر اگر حساسیت یک سیستم بالا باشد توان تفکیک مکانی آن پایین است [۱].

در یک ضخامت مشخص طبق رابطه‌های ۲-۲۴ و ۲-۲۵

$$g \propto (R_{Coll}^2) \quad (۲-۳۰)$$

- 
1. High sensitivity
  2. High Resolution

فصل سوم

**MCNP**

MCNP کد مونت کارلویی N ذره‌ای است که برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ در آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس نوشته و توسعه یافته است. از این کد برای محاسبه‌ی ترابرد و آنالیز نوترون، فوتون، الکترون و حالت‌های جفت شده‌ی آنها مانند نوترون\_فوتون و غیره و همچنین محاسبه‌ی ترابرد الکترون‌های اولیه و ثانویه در اندرکنش پرتوی گاما با ماده می‌توان استفاده کرد.

MCNP کدی است که در فیزیک پزشکی، پزشکی هسته‌ای، رادیوگرافی، دزیمتری، طراحی و تحلیل آشکارسازها، طراحی راکتورهای شکافت و غیره کاربرد فراوانی دارد.

توانایی این کد در تولید چشمه‌های عمومی، سطحی، حجمی، رسم هندسه‌ی ورودی و یک مجموعه وسیع از داده‌های سطح مقطع ویژگی ارزشمندی که استفاده از این کد را آسان و فراگیر کرده است.

برنامه ورودی توسط کاربر نوشته می‌شود. فایل ورودی شامل اطلاعاتی درباره‌ی خصوصیات هندسه، توصیف مواد، انتخاب سطح مقطع‌ها، مکان و مشخصات چشمه و غیره است.

در استفاده از کد MCNP-4C برای ذرات مختلف محدودیت انرژی نیز وجود دارد، به طوری که تنها قادر به انجام محاسبات مربوط به فوتون‌ها و الکترون‌هایی در بازه‌ی انرژی  $1000\text{MeV} - 1\text{Kev}$  است. در این فصل مرور دستورهایی که در نوشتن کد شبیه‌سازی به کار رفته‌اند پرداخته شده است [۱۲ و ۱۳].

### ۳-۲ ساختار کلی کد فایل ورودی

کد MCNP-4C از سه قسمت اصلی Cell card، Surface card و Data card تشکیل شده است. قسمت اول به معرفی سلول‌ها می‌پردازد (از چه صفحه‌هایی تشکیل شده و با چه موادی پر شده است). قسمت دوم شامل اطلاعاتی در مورد هندسه‌ی سیستم (صفحه، استوانه، کره و ....) است. قسمت سوم خود از چند بخش تشکیل شده است. بخش اول SDEF Card است که در آن موقعیت چشمه، انرژی و توزیع زاویه‌ای آن تعریف می‌شود. Mod card و Tally card هم بخش‌های دیگری از Data card هستند. در Mod card نوع ذره‌ای که باید مورد ترابرد قرار بگیرد مشخص می‌شود. این ذره می‌تواند فوتون، الکترون، نوترون و حالت‌های جفت شده‌ی آن‌ها باشد. در Tally card نوع خروجی برنامه مشخص می‌شود. این خروجی می‌تواند جریان سطحی، شار حجمی، پالس و دیگر پارامترهای مورد نیاز برنامه باشد.

واحدهای مورد استفاده در کد MCNP به صورت زیر است:

۱. طول بر حسب cm
۲. انرژی بر حسب MeV
۳. زمان بر حسب ثانیه
۴. چگالی جرمی بر حسب  $g/cm^3$

### ۳-۳ کارت سطوح

#### ۱-۳-۳ کارت تعریف صفحه

انواع کارت صفحه قابل تعریف در MCNP4C، در جدول زیر فهرست شده است.

جدول (۱-۳) کارت صفحات

نام گذاری	نوع سطح	معادله	پارامترهای مشخصه
P PX PY PZ	صفحه	$Ax + By + Cz - D = 0$ $X-D=0$ $Y-D=0$ $Z-D=0$	ABCD D D D

#### • کارت P

این کارت، کارت تعریف صفحه است. با توجه به معادلات ریاضی صفحه، برای تعریف صفحه با استفاده از این کارت، چهار پارامتر مورد نیاز است.

**J P A B C D**

#### • کارت PX

برای تعریف صفحات عمود بر محور X، از این کارت استفاده می‌شود. با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است که نشان‌دهنده‌ی محل تلاقی صفحه با محور X است.

**J PX D**

#### • کارت PY

برای تعریف صفحات عمود بر محور Y، از این کارت استفاده می‌شود. با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است که نشان‌دهنده‌ی محل تلاقی صفحه با محور Y است.

**J PY D**

• کارت PZ

برای تعریف صفحات عمود بر محور Z از این کارت، استفاده می‌شود. با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است که نشان‌دهنده‌ی محل تلاقی صفحه با محور Z است.

**J PZ D**

۳-۳-۲ کارت تعریف کره

جدول (۳-۳) کارت تعریف کره

نام گذاری	نوع سطح	معادله	پارامترهای مشخصه
S SO SX SY SZ	کره	$(X-\bar{X})^2 + (Y-\bar{Y})^2 + (Z-\bar{Z})^2 - R^2 = 0$ $X^2 + Y^2 + Z^2 - R^2 = 0$ $(X-\bar{X})^2 + Y^2 + Z^2 - R^2 = 0$ $X^2 + (Y-\bar{Y})^2 + Z^2 - R^2 = 0$ $X^2 + Y^2 + (Z-\bar{Z})^2 - R^2 = 0$	XYZR R XR YR ZR

• کارت S

برای تعریف کره، با توجه به معادلات ریاضی آن، چهار پارامتر مورد نیاز است.

**J S X Y Z R**

سه عدد اول مختصات مرکز کره را مشخص می‌کنند و عدد چهارم شعاع کره است.

• کارت SO

برای تعریف کره‌ای که محور آن در مرکز مختصات قرار دارد، از این کارت استفاده می‌شود. با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است و آن شعاع کره است.

**J SO R**

• کارت SX

برای تعریف کره‌ای عمود بر محور X، از این کارت استفاده می‌شود و دو پارامتر مورد نیاز است:

$$J \quad SX \quad X \quad R$$

عدد اول مرکز کره بر روی محور X، و عدد دوم شعاع کره است.

• کارت SY

برای تعریف کره‌ای عمود بر محور Y، از این کارت استفاده می‌شود و دو پارامتر مورد نیاز است:

$$J \quad SY \quad Y \quad R$$

عدد اول مرکز کره بر روی محور Y، و عدد دوم شعاع کره است.

• کارت SZ

برای تعریف کره‌ای عمود بر محور Z، از این کارت استفاده می‌شود و دو پارامتر مورد نیاز است:

$$J \quad SZ \quad Z \quad R$$

عدد اول مرکز کره بر روی محور Z، و عدد دوم شعاع کره است.

۳-۳-۳ کارت تعریف استوانه

جدول (۳-۳) کارت تعریف سطوح استوانه‌ای

نام‌گذاری	نوع سطح	معادله	پارامترهای مشخصه
C/X	استوانه	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	Y Z R
C/Y		$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	X Z R
C/Z		$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2 = 0$	X Y R
CX		$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CY		$x^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CZ		$x^2 + y^2 - R^2 = 0$	R



### • کارت C/X

برای تعریف استوانه‌ای بی‌نهایت و موازی با محور X، از این کارت استفاده می‌شود. و سه پارامتر مورد نیاز است.

**J C/X Y Z R**

دو عدد اول، مختصات محور استوانه در صفحه y z و عدد سوم شعاع استوانه است. با استفاده از این تعریف، استوانه‌ای ساخته می‌شود که به موازات محور X تا بی‌نهایت امتداد دارد و برای محدود کردن آن باید از صفحات PX استفاده شود.

### • کارت CX

برای تعریف استوانه‌ای بی‌نهایت بر روی محور X، از این کارت استفاده می‌شود. پارامتر مورد نیاز در این تعریف، فقط شعاع استوانه است.

**J CX R**

### • کارت C/Y

برای تعریف استوانه‌ای بی‌نهایت و موازی با محور Y، از این کارت استفاده می‌شود و سه پارامتر مورد نیاز است.

**J C/Y X Z R**

دو عدد اول، مختصات محور استوانه در صفحه X Z و عدد سوم شعاع استوانه است. با استفاده از این تعریف، استوانه‌ای ساخته می‌شود که به موازات محور Y تا بی‌نهایت امتداد دارد و برای محدود کردن آن باید از صفحات PY استفاده شود.

### • کارت CY

برای تعریف استوانه‌ای بی‌نهایت بر روی محور  $Y$ ، از این کارت استفاده می‌شود. پارامتر مورد نیاز در این تعریف، فقط شعاع استوانه است.

**J    C Y    R**

### • کارت C/Z

برای تعریف استوانه‌ای بی‌نهایت و موازی با محور  $Z$ ، از این کارت استفاده می‌شود و سه پارامتر مورد نیاز است.

**J    C/Z    X Y R**

دو عدد اول، مختصات محور استوانه در صفحه  $xy$  و عدد سوم شعاع استوانه است. با استفاده از این تعریف، استوانه‌ای ساخته می‌شود که به موازات محور  $Z$  تا بی‌نهایت امتداد دارد و برای محدود کردن آن باید از صفحات  $PZ$  استفاده شود.

### • کارت CZ

برای تعریف استوانه‌ای بی‌نهایت بر روی محور  $Z$ ، از این کارت استفاده می‌شود. پارامتر مورد نیاز در این تعریف، فقط شعاع استوانه است.

**J    C Z    R**

### ۳-۳-۴ کارت مخروط

جدول (۳-۴) کارت تعریف مخروط

نام گذاری	نوع سطح	معادله	پارامترهای مشخصه
K / X	مخروط	$\sqrt{(y-\bar{y})^2 + (z-\bar{z})^2} - t(x-\bar{x}) = 0$	$x \quad y \quad z \quad t^2 \pm 1$
K / Y		$\sqrt{(x-\bar{x})^2 + (z-\bar{z})^2} - t(y-\bar{y}) = 0$	$x \quad y \quad z \quad t^2 \pm 1$
K / Z		$\sqrt{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2} - t(z-\bar{z}) = 0$	$x \quad y \quad z \quad t^2 \pm 1$
K X		$\sqrt{(y-\bar{y})^2} - t(x-\bar{x}) = 0$	$x \quad t^2 \pm 1$
K Y		$\sqrt{(z-\bar{z})^2} - t(y-\bar{y}) = 0$	$y \quad t^2 \pm 1$
K Z		$\sqrt{(x-\bar{x})^2} - t(z-\bar{z}) = 0$	$z \quad t^2 \pm 1$
			$\sqrt{(x-\bar{x})^2} - t(z-\bar{z}) = 0$

#### • کارت KX

برای تعریف مخروطی بی‌نهایت بر روی محور X، از این کارت استفاده می‌شود و دو پارامتر مورد نیاز است.

$$J \quad KX \quad X \quad t^2 \pm 1$$

عدد اول، مختصات نوک مخروط بر روی محور X و t معادل با  $\tan \theta$  است. برای انتخاب هر یک از جهات مثبت یا منفی باید از  $\pm 1$  استفاده کرد.

#### • کارت KY

برای تعریف مخروطی بی‌نهایت بر روی محور Y، از این کارت استفاده می‌شود و دو پارامتر مورد نیاز است.

$$J \quad KY \quad Y \quad t^2 \pm 1$$

عدد اول، مختصات نوک مخروط بر روی محور  $Y$  و  $t$  معادل با  $\tan \theta$  است. برای انتخاب هر یک از جهات مثبت یا منفی باید از  $\pm 1$  استفاده کرد.

### • کارت KZ

برای تعریف مخروطی بی‌نهایت بر روی محور  $Z$ ، از این کارت استفاده می‌شود و دو پارامتر مورد نیاز است.

$$J \quad KZ \quad Z \quad t^2 \pm 1$$

عدد اول، مختصات نوک مخروط بر روی محور  $Z$  و  $t$  معادل با  $\tan \theta$  است. برای انتخاب هر یک از جهات مثبت یا منفی باید از  $\pm 1$  استفاده کرد.

### ۳-۴ چشمه و معیارهای آن

#### • چشمه عمومی SDEF

چشمه عمومی توسط کارت SDEF تعریف می‌شوند و ساختار آن به این صورت است:

$$SDEF \quad POS= X Y Z \quad erg \quad \& \quad \dots\dots\dots$$

POS مختصه‌ی مرکز چشمه و erg انرژی آن را مشخص می‌کند.

چشمه‌های حجمی در مختصات استوانه‌ای به وسیله‌ی متغیرهای  $POS, RAD, AXS$  و  $EXT$  تعریف می‌شوند. محور استوانه در امتداد  $AXS$  بوده و از نقطه  $POS$  می‌گذرد. شعاع استوانه به وسیله‌ی  $RAD$  و فاصله‌ی دو قاعده استوانه از نقطه  $POS$  توسط  $EXT$  مشخص می‌گردد.

### ۳-۵ کارت Fn

از کارت‌های ثبت (Tally) برای تعیین نوع اطلاعات خواسته شده توسط کاربر استفاده می‌شود که می‌تواند جریان ذرات گذرنده از یک سطح، شار در یک نقطه، گرمای یک ناحیه و ... باشد. فرم کلی آن به صورت زیر است:

$$\mathbf{Fn: a \quad S_1, \dots, S_i}$$

$n$  شماره‌ی خروجی است که بین اعداد ۱ تا ۹۹۹ متغیر می‌باشد و رقم آخر بیانگر نوع

خروجی است.  $a$ ، نوع ذره است و نوترون، پروتون یا الکترون را مشخص می‌کند.

$S_i$  ها شماره‌ی سطوح یا سلول‌هایی هستند که خروجی در سطح آن‌ها یا در حجم آن‌ها

تعریف می‌شود.

جدول (۳-۵) کارت‌های ثبت Fn [ ۱۲ و ۱۳ ]

Tally	Fn Units	*Fn Multiplier	*Fn Units
F1	Particles	E	Mev
F2 F4 F5	Particles/cm <sup>2</sup>	E	Mev/cm <sup>2</sup> Mev/cm <sup>2</sup> Mev/cm <sup>2</sup>
F6	Mev/g	1.60219E-22	jerks/g
F7	Mev/g	1.60219E-22	jerks/g
F8	pulses	E	Mev
+F8	pulses	E	Mev

F1، جریان روی سطح را محاسبه می‌کند و واحد آن "تعداد ذرات" است.

F1:N یا F1:P یا F1:E

F2، متوسط شار روی سطح را محاسبه می‌کند و واحد آن " /cm<sup>2</sup> ذره" است.

F2:N یا F2:P یا F2:E

F4، متوسط شار درون سلول را محاسبه می کند و واحد آن " $cm^2$  / ذره" است.

F5، شار در یک آشکارساز حلقه‌ای یا نقطه‌ای را محاسبه می کند و واحد آن " $cm^2$  / ذره" است.

F6، متوسط انرژی آزاد شده در یک سلول را محاسبه می کند و واحد آن " $Mev/g$ " است.

F7، انرژی آزاد شده در اثر شکافت به ازای واحد جرم را محاسبه و واحد آن " $Mev/g$ " است.

F8، توزیع انرژی که باعث ایجاد پالس در آشکارساز می گردد را محاسبه می کند و واحد آن پالس است.

### ۳-۶ کارت ماده و معیارهای آن

برای تعریف کردن ماده از کارت Mm استفاده می شود. m شماره ماده است.

اگر از عدد اتمی استفاده شود به این صورت است:

**m2 82000 1**

**m3 11000 0.5 53000 0.5**

تعریف اول برای سرب نوشته شده که عدد اتمی آن ۸۲ است و نسبت آن ۱ است.

تعریف دوم برای سدیم یدید (NaI) نوشته شده، ۱۱ عدد اتمی سدیم و ۵۳ عدد اتمی ید است. ۰,۵

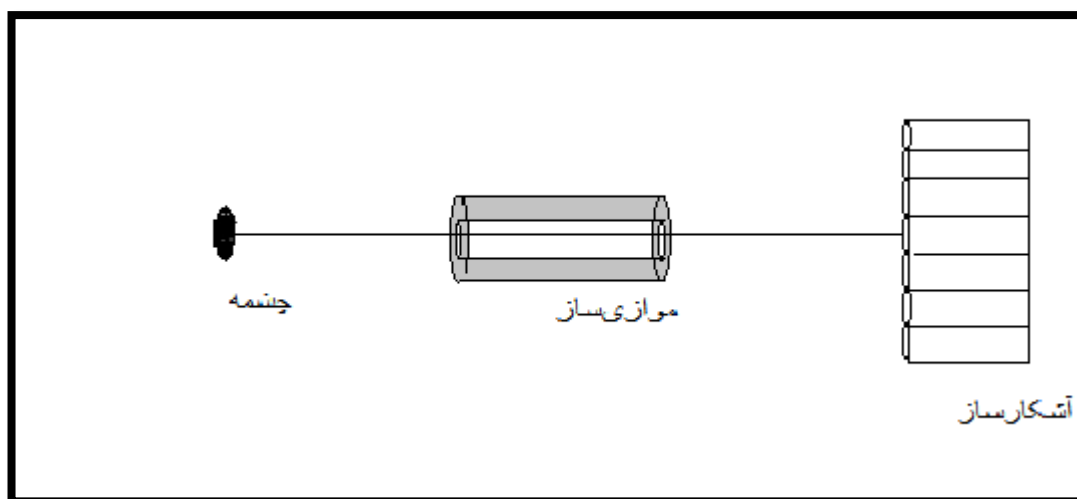
نسبت اتمی هریک از آنها است [۱۲ و ۱۳].

## فصل چهارم

### شبیه‌سازی موازی سازها

#### ۴-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی اثر موازی‌ساز با هندسه‌های مختلف بر روی سیستم زیر که شامل چشمه، موازی‌ساز و آشکارساز است، می‌پردازیم. روش کار به این صورت است که موازی‌سازهای تک‌حفره استوانه‌ای، تک‌حفره مکعبی، تک‌حفره واگرا، تک‌حفره همگرا، تک‌حفره شش‌ضلعی، حفره موازی استوانه‌ای، حفره موازی مکعبی شبیه‌سازی و داده‌های ثبت شده توسط هر یک از ۱۹ آشکارساز رسم و پس از اعمال برازش گوسی، FWHM آن‌ها برای بررسی توان تفکیک مکانی بدست آمده است.



شکل ۴-۱: هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز تک حفره با سطح مقطع دایروی در سیستم دوربین گاما

در این هندسه فاصله‌ی چشمه تا آشکارساز ۱۵۰ میلی‌متر، فاصله‌ی مرکز موازی‌ساز تا آشکارساز ۵۰ میلی‌متر، فاصله‌ی مرکز موازی‌ساز تا چشمه ۱۰۰ میلی‌متر، قطر خارجی موازی‌ساز ۴۰ میلی‌متر، ارتفاع موازی‌ساز ۳ میلی‌متر و جنس آن از سرب است.

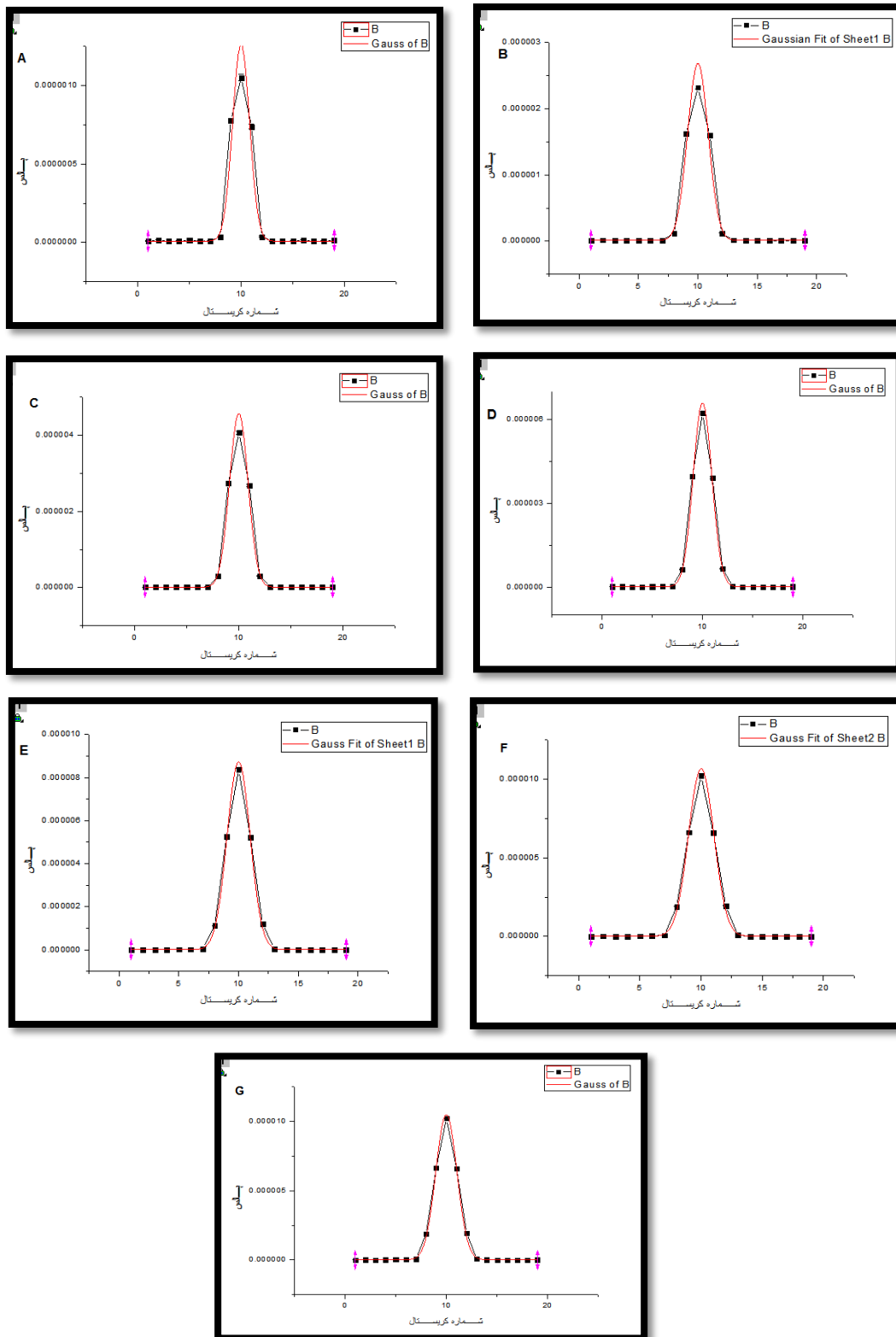
**مشخصات چشمه:** چشمه دیسکی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۱ میلی‌متر

**مشخصات آشکارساز:** از ۱۹ آشکارساز استوانه‌ای NaCl با قطر ۲ و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است [۱۶].

برای مقایسه نتایج و بررسی اثر تغییر قطر حفره موازی‌ساز، تمام پارامترها در تمام شبیه‌سازی‌ها ثابت و فقط قطر داخلی (حفره) موازی‌ساز پارامتر متغیر است. در نمودارها قطر موازی‌سازها و فاصله‌ی کریستال‌ها از کریستال مرکزی بر حسب میلی‌متر است.



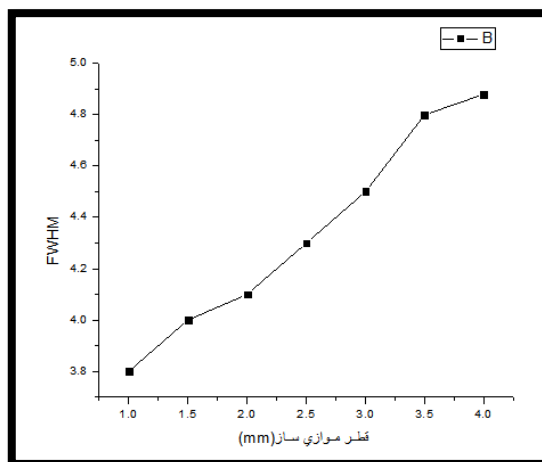
## ۲-۴ شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره استوانه‌ای



شکل ۲-۴: نمودارهای A, B, C, D, E, F, G به ترتیب مربوط به پروفایل موازی‌ساز تک‌حفره استوانه‌ای است که قطر حفره داخلی به این شکل تغییر یافته (۱،۵،۲،۵،۳،۵،۴). قطر خارجی ثابت و ۴۰ mm است.

جدول (۴-۱): FWHM مربوط به شکل ۴-۲

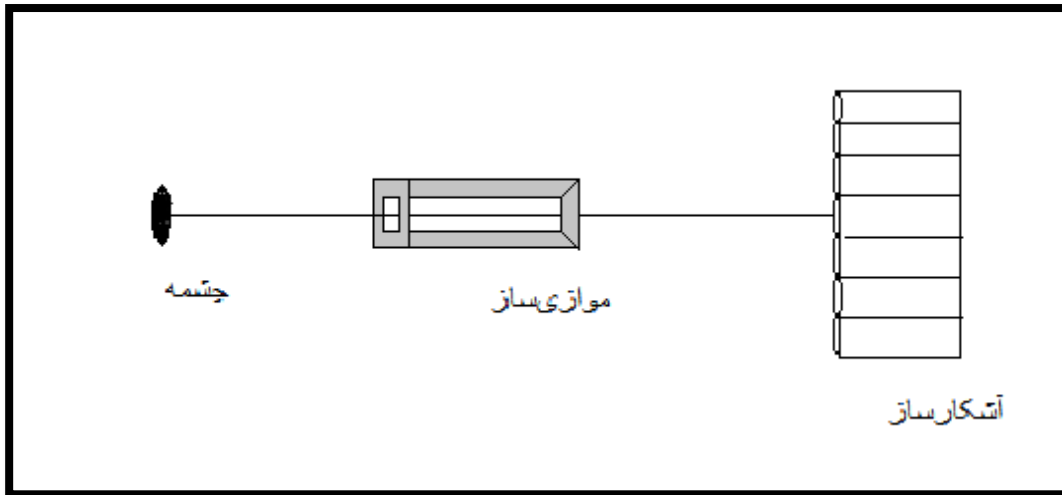
FWHM (mm)	قطر حفره (mm)
۳,۸	۱
۴	۱,۵
۴,۱	۲
۴,۳	۲,۵
۴,۵	۳
۴,۸	۳,۵
۴,۸۸	۴



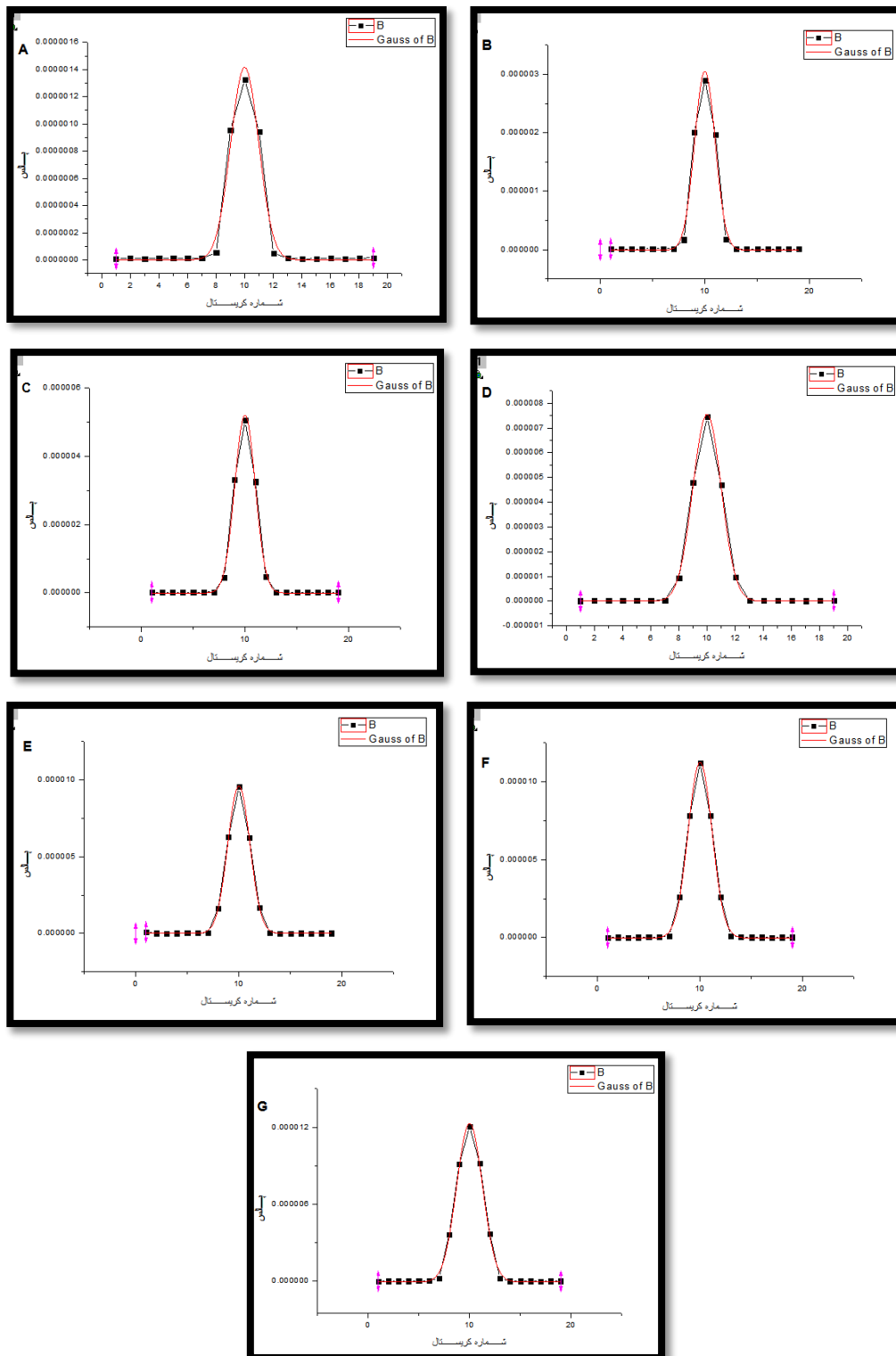
شکل ۴-۳: نمودار FWHM بر حسب قطر موازی سازه تک حفره استوانه‌ای

با توجه به شکل ۴-۲ و ۴-۳ جدول (۴-۱) مشخص است که با افزایش قطر حفره موازی سازه، FWHM هم افزایش یافته و این نمایانگر این است که توان تفکیک مکانی رو به کاهش است و موازی سازه با قطر ۱ میلی‌متر از توان تفکیک مکانی بهتری نسبت به بقیه‌ی قطرهای برخوردار است.

### ۳-۴ شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره مکعبی



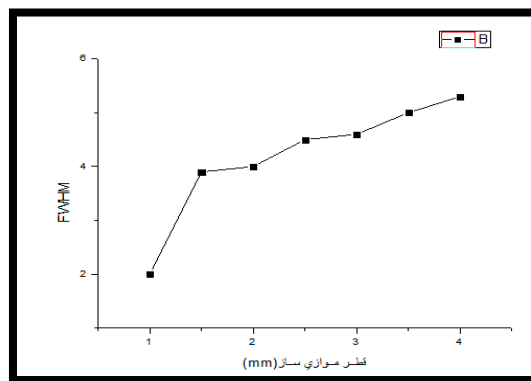
شکل ۴-۴: هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره مکعبی در سیستم دوربین گاما



شکل ۴-۵: نمودارهای A,B,C,D,E,F,G به ترتیب مربوط به پروفایل موازی‌ساز تک‌حفره مکعبی است که طول ضلع داخلی موازی‌ساز به این شکل تغییر یافته (۱،۰،۱،۵،۲،۰،۵،۳،۰،۳،۵،۴). طول ضلع خارجی در حدود ۴۰ میلی‌متر است.

جدول (۲-۴): FWHM مربوط به شکل ۵-۴

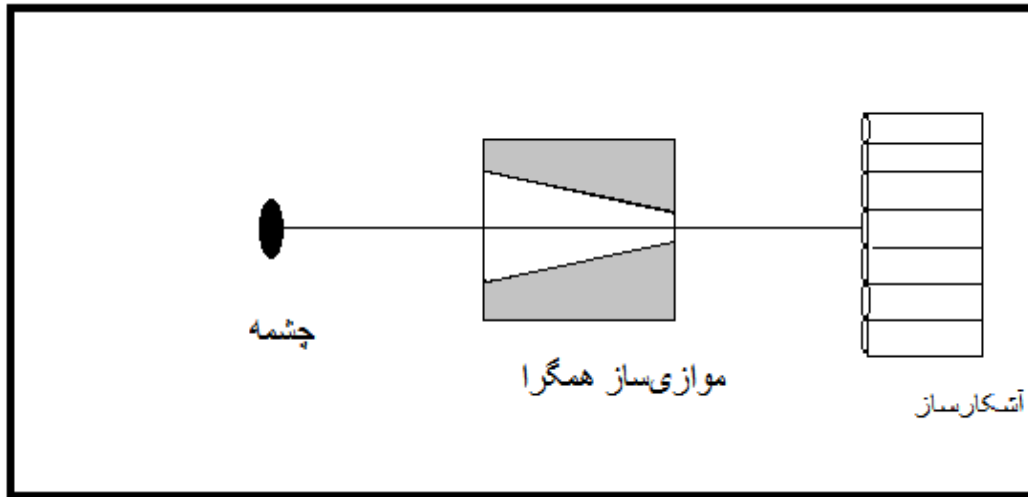
FWHM (mm)	ضلع موازی‌ساز (mm)
۲	۱
۳,۹	۱,۵
۴	۲
۴,۵	۲,۵
۴,۶	۳
۵	۳,۵
۵,۳	۴



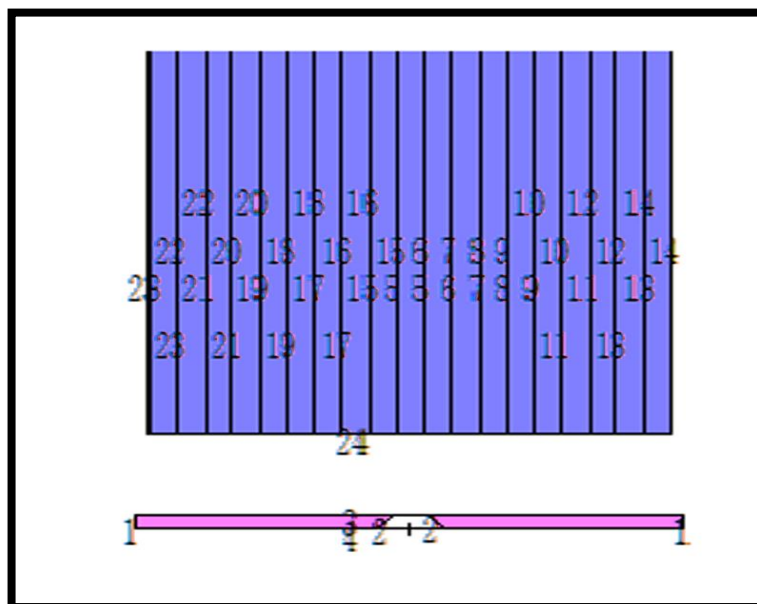
شکل ۴-۶: نمودار FWHM بر حسب قطر موازی‌ساز تک‌حفره مکعبی

باتوجه به جدول ۲-۴ و شکل ۵-۴ و ۴-۶ مشخص است که در این نوع موازی‌ساز هم با بزرگ شدن حفره موازی‌ساز FWHM به ترتیب افزایش و توان تفکیک مکانی کاهش یافته است. موازی‌سازی مکعبی با اضلاع ۱، ۳ و بالاترین توان تفکیک مکانی و موازی‌ساز مکعبی با اضلاع ۴، ۳ و پایین‌ترین توان تفکیک مکانی را داراست. در این نوع هم قطر ۱,۵ برای داشتن تصویری با کیفیت مناسب‌تر است (به دلیل این‌که سرعت تشکیل تصویر در این قطر بیشتر است).

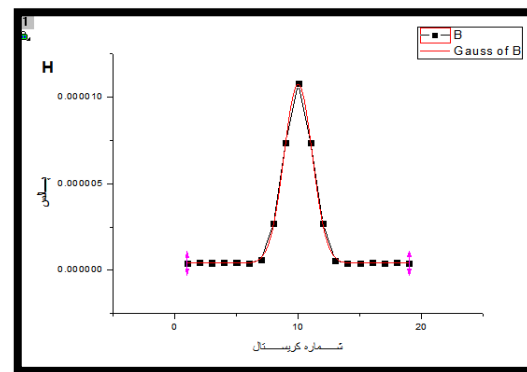
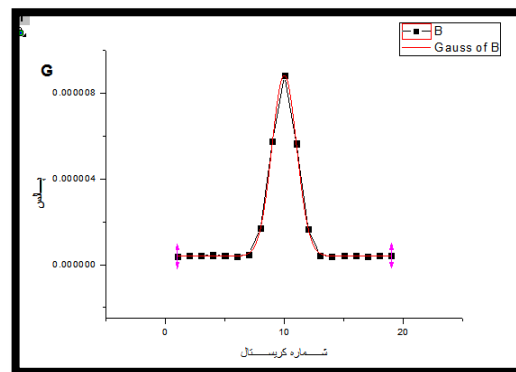
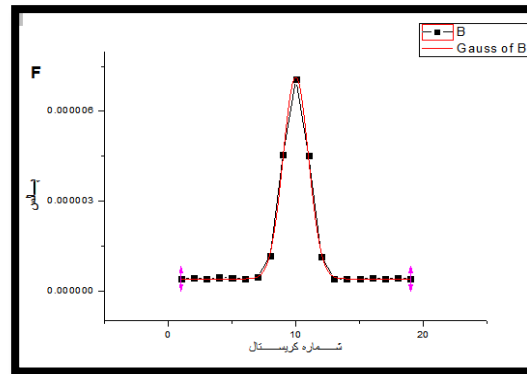
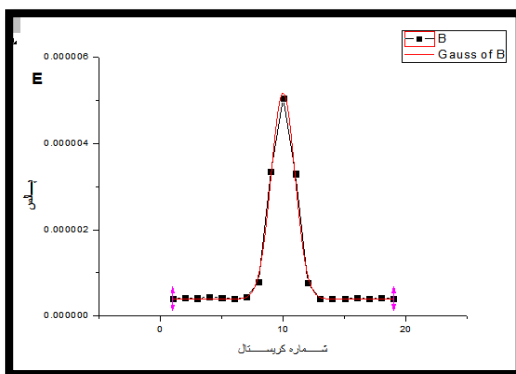
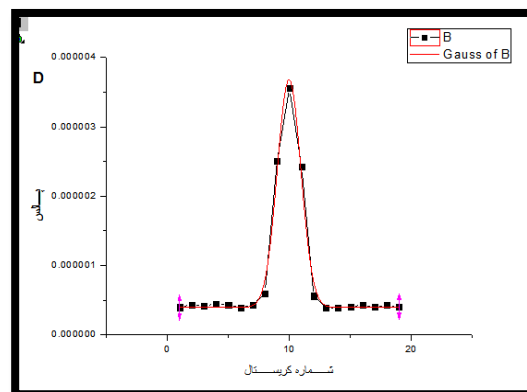
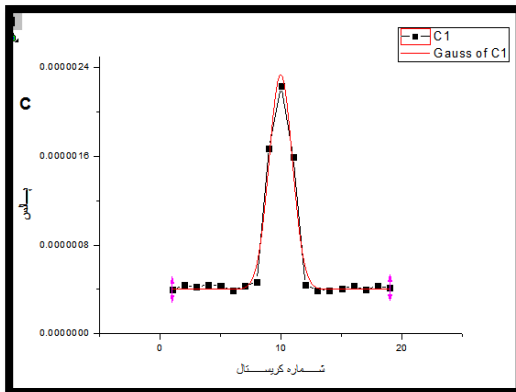
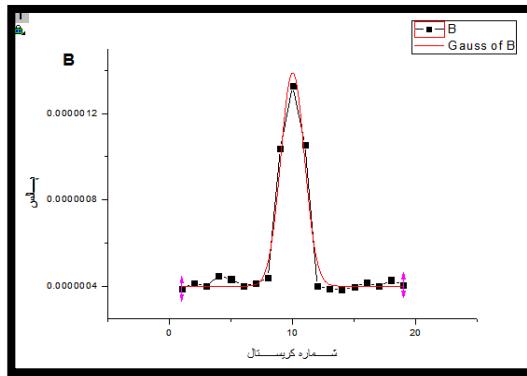
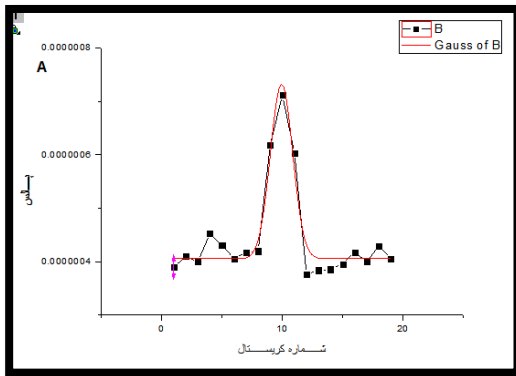
۴-۴ شبیه‌سازی موازی‌سازی تک‌حفره همگرا



شکل ۴-۷: هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌سازی تک‌حفره همگرا در سیستم دوربین گاما



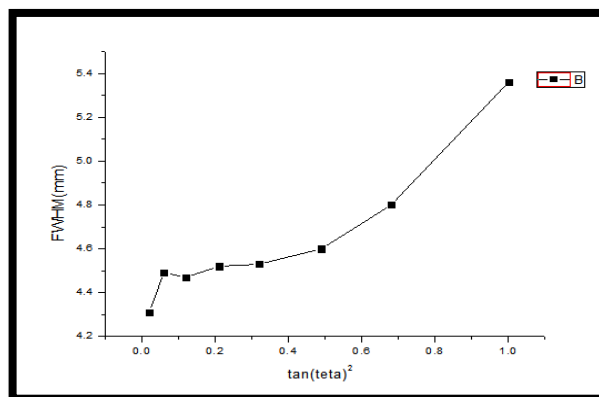
شکل ۴-۸: هندسه‌ی رسم شده توسط کد MCNP4C



شکل ۴-۹: نمودارهای A, B, C, D, E, F, G, H به ترتیب مربوط به پروفایل موازی‌ساز تک‌حفره همگرا است که بازه تغییرات  $\theta$  به این صورت است (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵). مخروط ایجاد شده درون استوانه‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر است.

جدول (۳-۴): FWHM مربوط به شکل ۴-۶

FWHM (mm)	$\tan \theta^2$	$\theta$
۴,۳۱	۰,۰۲	۱۰
۴,۴۹	۰,۰۶	۱۵
۴,۴۷	۰,۱۲	۲۰
۴,۵۲	۰,۲۱	۲۵
۴,۵۳	۰,۳۲	۳۰
۴,۶	۰,۴۹	۳۵
۴,۸	۰,۶۸	۴۰
۵,۳۶	۱	۴۵

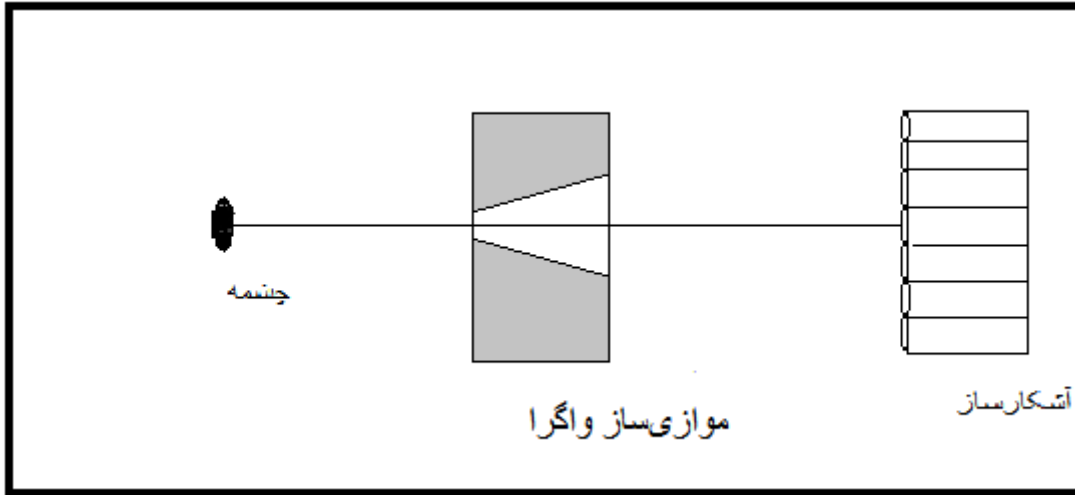


شکل ۴-۱۰: نمودار FWHM بر حسب قطر موازی‌ساز تک‌حفره همگرا

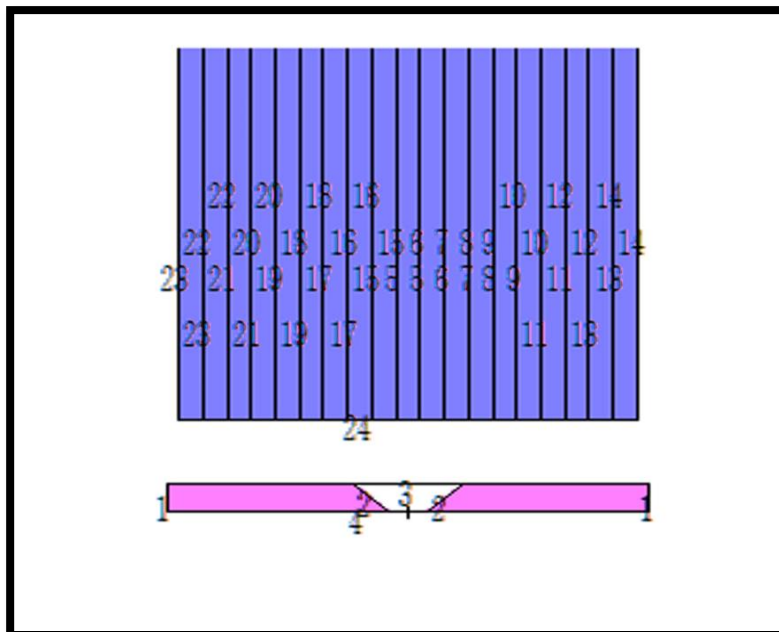
باتوجه به جدول ۳-۴، شکل ۴-۹ و ۴-۱۰ مشخص است که در این نوع موازی‌ساز هم با بزرگ شدن حفره موازی‌ساز (افزایش زاویه‌ی دهانه)، FWHM در حال افزایش است. زاویه‌ی ۱۰ درجه بالاترین و ۴۵ درجه پایین‌ترین توان تفکیک مکانی را داراست.



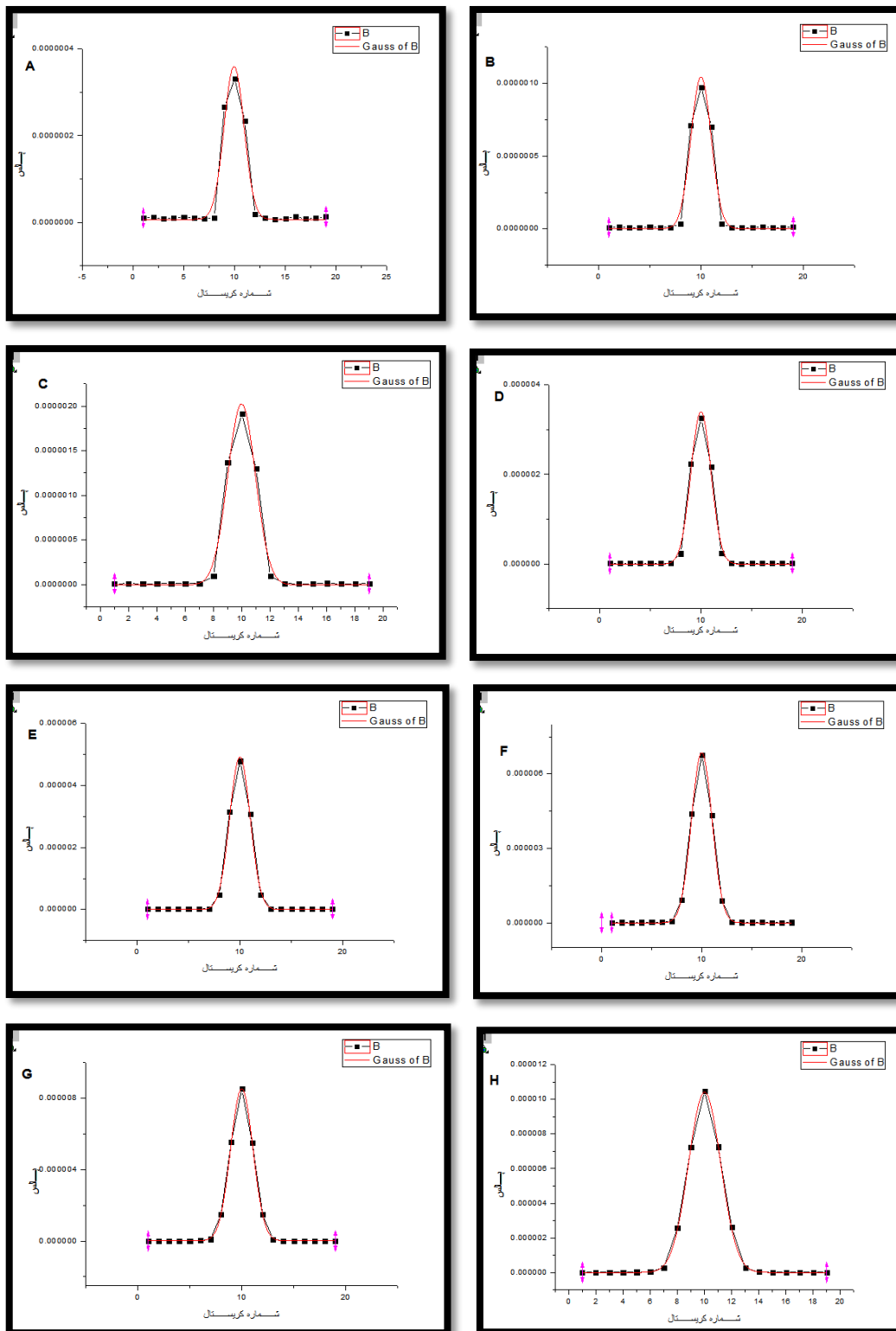
### ۵-۴ شبیه سازی موازی ساز تک حفره واگرا



شکل ۴-۱۱: هندسه‌ی شبیه‌سازی موازی‌ساز واگرا در سیستم دوربین گاما



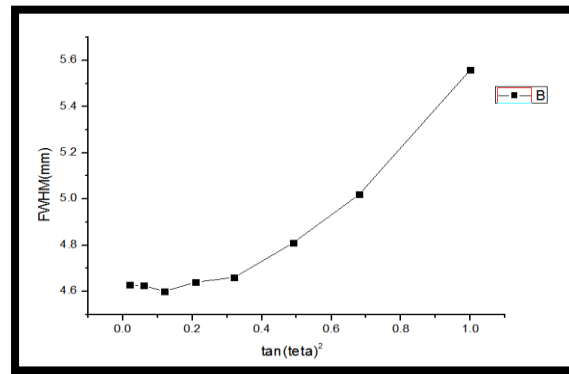
شکل ۴-۱۲: هندسه‌ی رسم شده توسط کد MCNP4C



شکل ۴-۱۳: نمودارهای A, B, C, D, E, F, G, H به ترتیب مربوط به پروفایل موازی‌ساز تک‌حفره واگرا است که بازه تغییرات  $\theta$  به این صورت است (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵). مخروط ایجاد شده درون استوانه‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر است.

جدول (۴-۴): FWHM (mm) مربوط به شکل ۴-۸

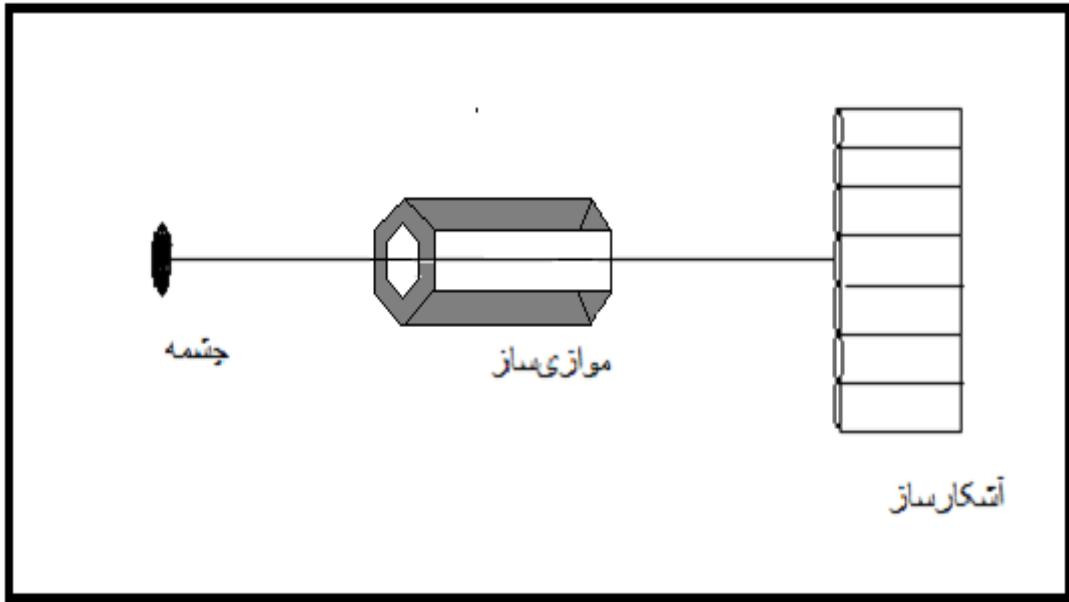
FWHM (mm)	$\tan \theta^2$	$\theta$
۴,۶۲۸	۰,۰۲	۱۰
۴,۶۲۵	۰,۰۶	۱۵
۴,۶	۰,۱۲	۲۰
۴,۶۴	۰,۲۱	۲۵
۴,۶۶	۰,۳۲	۳۰
۴,۸۱	۰,۴۹	۳۵
۵,۰۲	۰,۶۸	۴۰
۵,۵۶	۱	۴۵



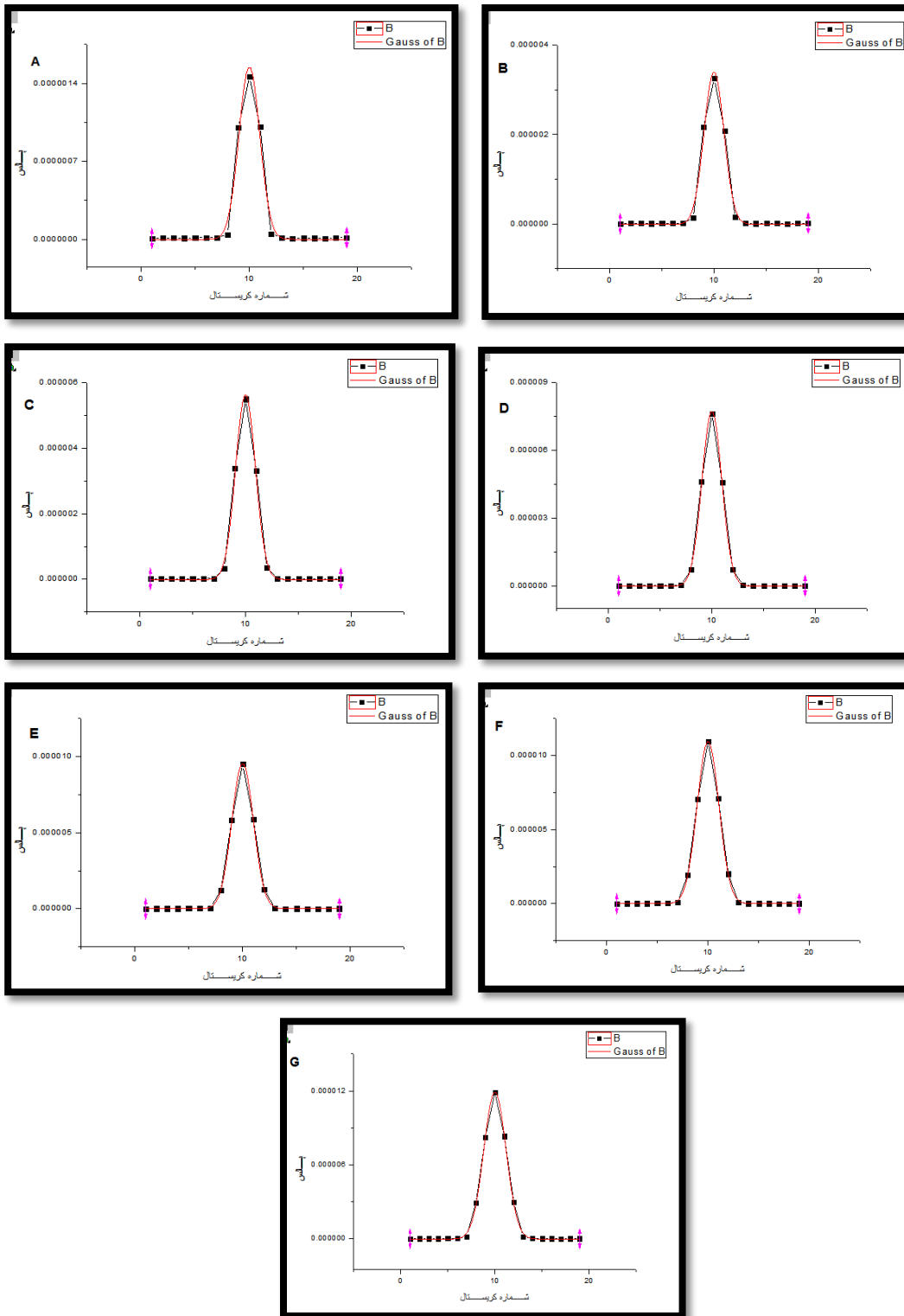
شکل ۴-۱۴: نمودار FWHM بر حسب قطر موازی‌ساز تک‌حفره واگرا

باتوجه به جدول ۴-۴، شکل ۴-۱۳ و ۴-۱۴ مشخص است که در این نوع موازی‌ساز هم با بزرگ شدن حفره موازی‌ساز (افزایش زاویه‌ی دهانه)، FWHM در حال افزایش است. زاویه‌ی ۲۰ بالاترین و ۴۵ درجه پایین‌ترین توان تفکیک مکانی را داراست.

۶-۴ شبیه‌سازی موازی‌ساز تک‌حفره با سطح مقطع شش ضلعی



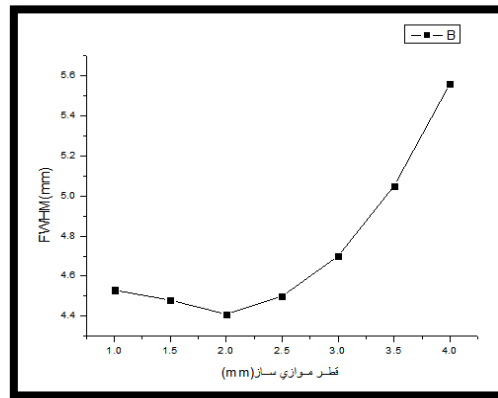
شکل ۴-۱۵: هندسه‌ی موازی‌ساز تک‌حفره شش‌ضلعی (هگزگونال)



شکل ۴-۱۶: نمودارهای A,B,C,D,E,F,H به ترتیب مربوط به پروفایل موازی‌ساز تک‌حفره شش‌ضلعی است که قطر داخلی موازی‌ساز به این شکل تغییر یافته (۱،۵،۲،۵،۳،۵،۴). طول قطر خارجی در حدود ۴۰ میلی‌متر است.

جدول (۴-۵): FWHM (mm) مربوط به شکل ۴-۱۴

FWHM(mm)	قطر (mm)
۳,۵۸	۱
۳,۹	۱,۵
۴,۱۴	۲
۴,۳	۲,۵
۴,۵۴	۳
۴,۷	۳,۵
۵,۳	۴



شکل ۴-۱۷: نمودار FWHM بر حسب قطر موازی سار تک حفره شش ضلعی

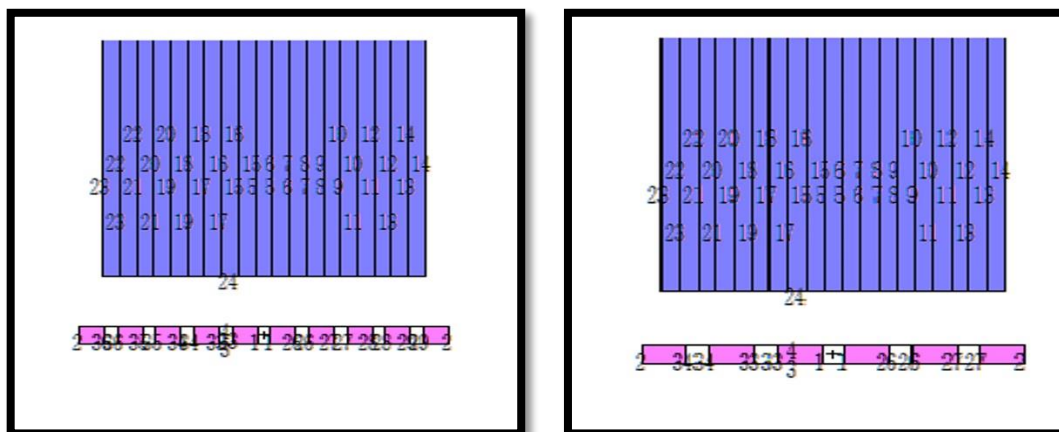
با توجه به جدول ۴-۵ و شکل ۴-۱۶ و ۴-۱۷ مشخص است که در قطر ۲ میلی متری توان تفکیک حداکثر و در قطر ۴ میلی متری توان تفکیک حداقل مقدار را دارد. با افزایش قطر موازی سار، FWHM ابتدا کاهش در ۲ به کمترین مقدار خود رسیده و سپس افزایش یافته است.

## ۷-۴ شبیه‌سازی موازی‌ساز حفره‌موازی استوانه‌ای

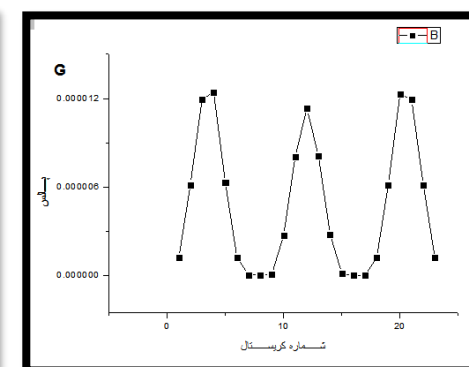
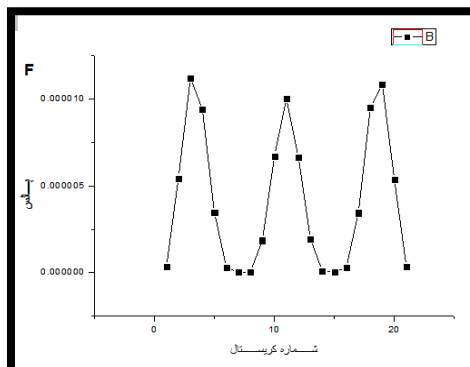
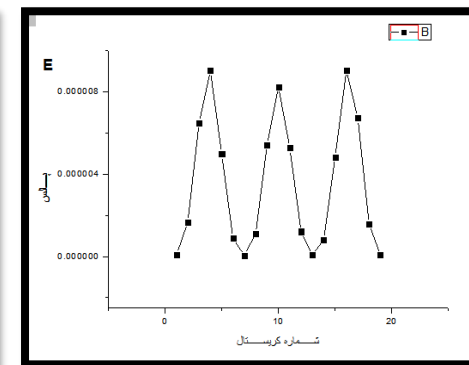
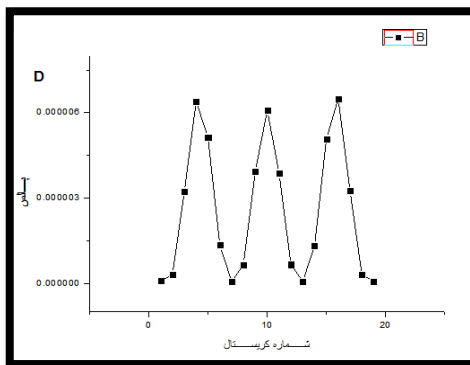
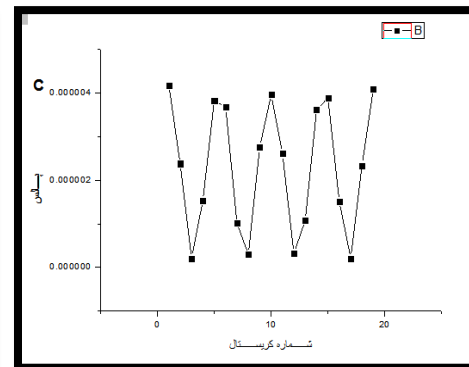
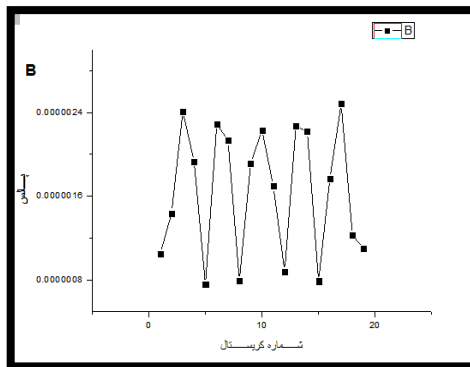
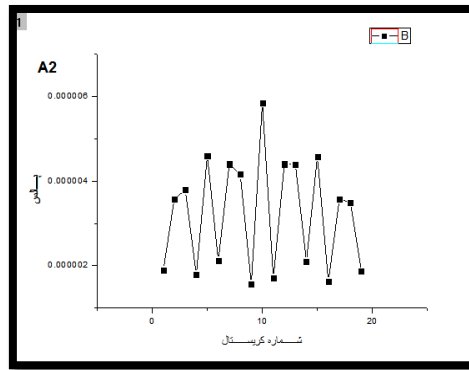
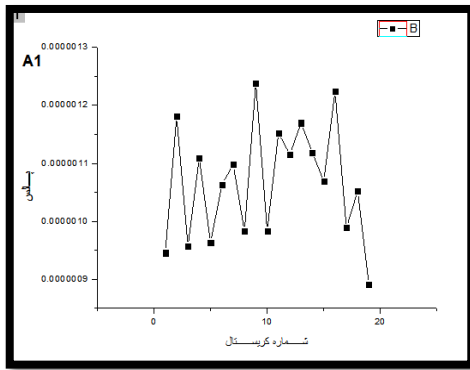
قبل از شبیه‌سازی موازی‌سازهای حفره‌موازی باید به این نکته توجه کرد که نفوذ جداری پارامتری مهم است که باید در نظر گرفته شود. در نتیجه طبق فرمول (۱-۱۵) ضخامت جداری را برای قطرهای مورد نظر به این صورت است.

جدول (۴-۶): ضخامت جداری بدست آمده برای هر قطر

قطر (mm)	ضخامت جداری (mm)
۱	۲
۱,۵	۳
۲	۴
۲,۵	۴,۵
۳	۵,۵
۳,۵	۶,۵
۴	۷

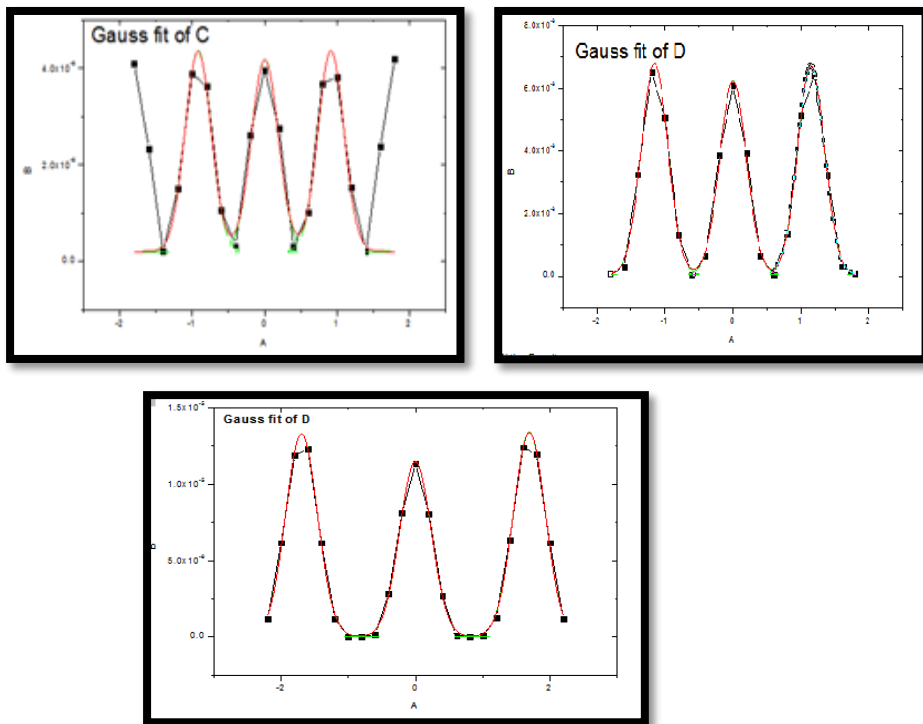


شکل ۴-۱۸: هندسه‌ی شبیه‌سازی شده توسط کد MCNP-4C (شکل سمت راست مربوط به قطر ۴ و شکل سمت چپ مربوط به قطر ۱,۵ میلی‌متر است. ( اعداد نوشته شده داخل شکل مربوط به شماره‌ی صفحات هندسه در کد می‌باشد)



شکل ۴-۱۹: نمودارهای A, B, C, D, E, F, G به ترتیب مربوط به پروفایل موازی‌ساز چندحفره استوانه‌ای است که قطر حفره‌ها به این شکل تغییر یافته (۱،۵،۲،۵،۳،۳،۵،۴). قطر استوانه‌ی خارجی در حدود ۴۰ میلی‌متر است. A2 در واقع همان A1 است با این تفاوت که این بار موازی‌ساز به آشکارساز نزدیک‌تر شده. همانطور که مشخص است A2 پروفایل بهتری نسبت به A1 است و از توان تفکیک بالاتری نیز برخوردار است.





شکل ۴-۲۰: نمونه‌هایی از برازش تابع گوسی شکل ۴-۱۹

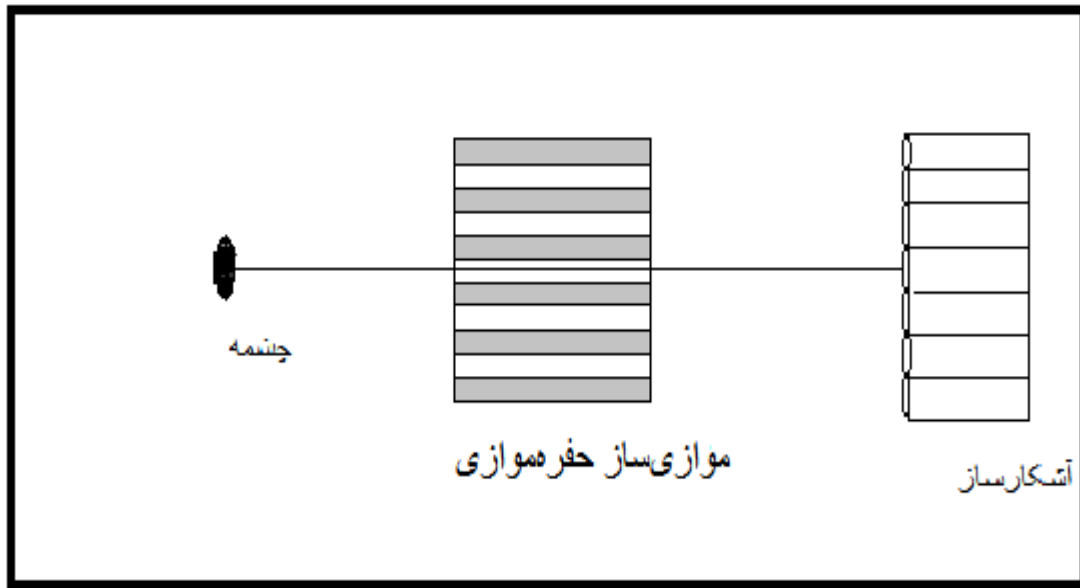
جدول (۴-۷): FWHM محاسبه شده مربوط به نمودارهای شکل ۴-۱۲

mm \	A2 (FWHM)	B (FWHM)	C (FWHM)	D (FWHM)	E (FWHM)	F (FWHM)	G (FWHM)
Pik1	۱,۲	۳,۵	۴,۲	۴,۵۹	۴,۶۷	۴,۹	۵,۵۷
Pik2	۰,۷	۲,۰۱	۴,۳	۴,۶۱	۴,۸	۵,۱	۵,۵۳
Pik3	۰,۶	۳,۶	۴,۲	۴,۶۲	۴,۷۳	۴,۸	۵,۵۹
Pik4	۰,۷	۱,۵					
Pik5	۰,۷	۳,۷					
Pik6	۰,۷						
Pik7	۱,۳						
FWHM	۲,۳۳	۶,۷۲	۷,۳۳	۷,۹۷	۸,۱۹	۸,۵۴	۹,۶۳

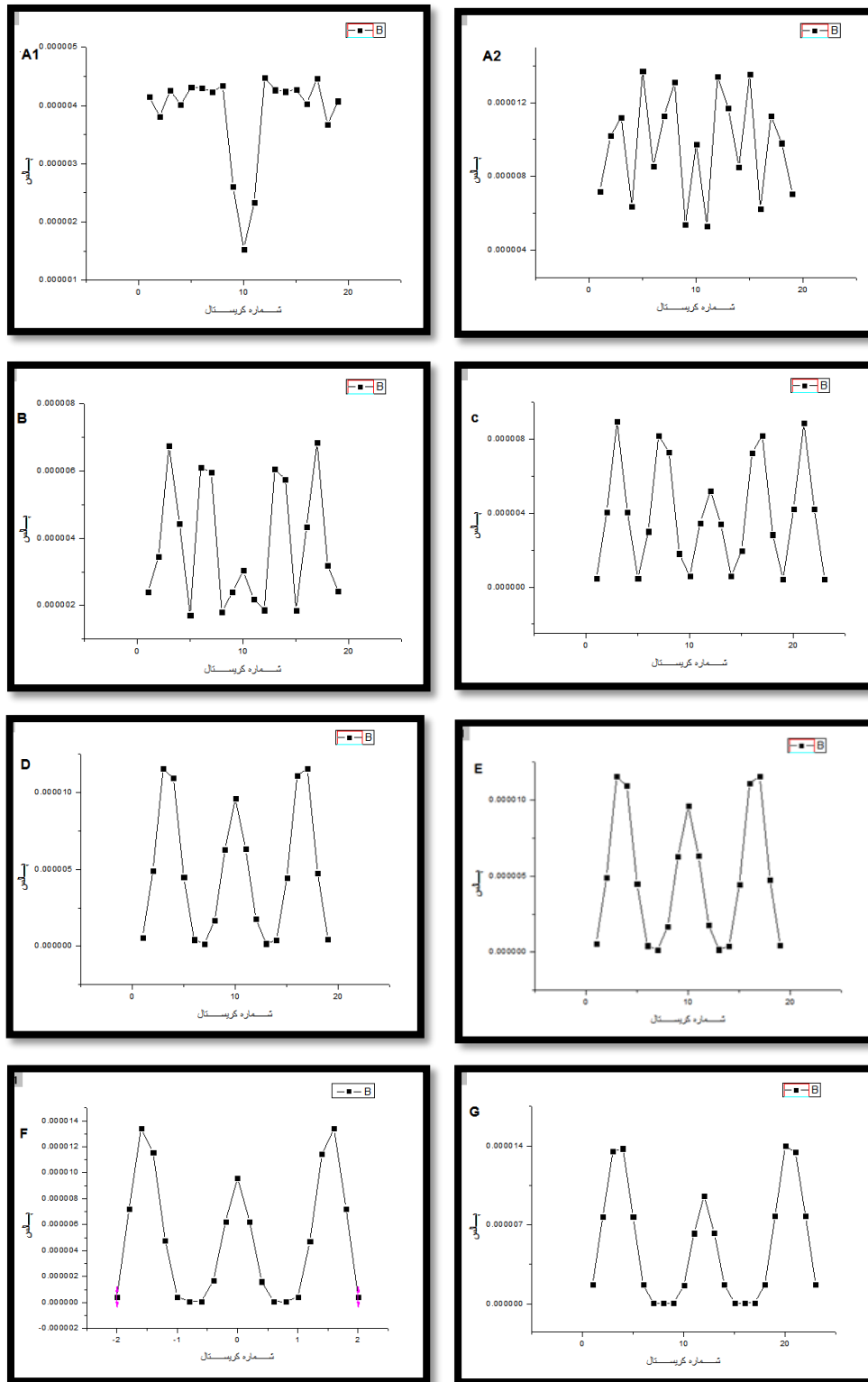
برای سیستم‌هایی که پروفایل آن‌ها از چند پیک تشکیل شده FWHM از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [1].

$$FWHM_{system} \approx \sqrt{FWHM_1^2 + FWHM_2^2 + FWHM_3^2 + \dots} \quad (۴-۱)$$

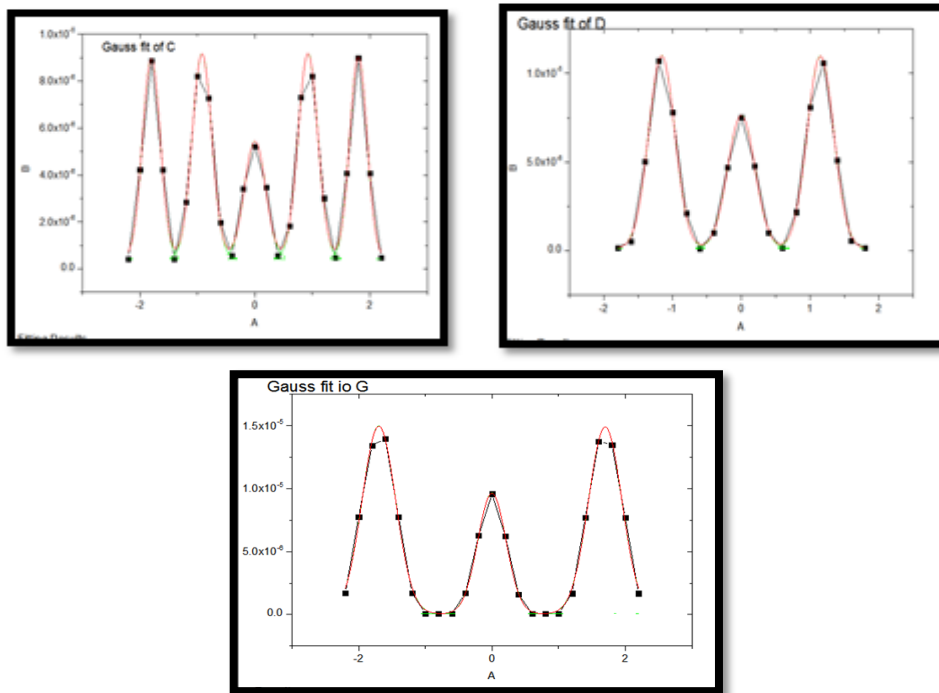
۸-۴ شبیه‌سازی موازی‌ساز حفره‌موازی با سطح مقطع مربعی



شکل ۴-۲۱: هندسه‌ی موازی‌ساز حفره‌موازی



شکل ۴-۲۲: نمودارهای A, B, C, D, E, F, G به ترتیب مربوط به پروفایل موازی‌ساز چندحفره مکعبی است که اضلاع حفره به این شکل تغییر یافته (۱،۱،۵،۲،۲،۵،۳،۳،۵،۴). طول ضلع خارجی در حدود ۴۰ میلی‌متر است. در A2 واقع همان A1 است با این تفاوت که این بار موازی‌ساز به آشکارساز نزدیک‌تر شده. همانطور که مشخص است A2 پروفایل بهتری نسبت به A1 است و از توان تفکیک بالاتری نیز برخوردار است.



شکل ۴-۲۳: نمونه‌هایی از برازش تابع گوسی شکل ۴-۲۲

جدول (۴-۸): FWHM محاسبه شده مربوط به نمودارهای شکل ۴-۱۴

(mm)	A2 (FWHM)	B (FWHM)	C (FWHM)	D (FWHM)	E (FWHM)	F (FWHM)	G (FWHM)
Pik1	۱,۳۱	۳,۴	۴	۴,۴	۴,۷	۵,۱	۵,۹
Pik2	۰,۸	۲,۱	۴,۳	۴,۶	۴,۹	۴,۹	۴,۹
Pik3	۲,۲	۳,۷	۴	۴,۵	۴,۸	۵,۱	۵,۹
Pik4	۰,۷	۱,۴					
Pik5	۲,۳	۳,۶					
Pik6	۰,۸						
Pik7	۱,۳۵						
FWHM	۳,۹۲	۶,۶۷	۷,۱۰	۷,۷۹	۸,۳۱	۸,۷۱	۹,۶۷

با توجه به داده‌های جداول ۴-۷ و ۴-۸ واضح است که با افزایش قطر موازی‌سازهای چندحفره نیز توان تفکیک مکانی رو به کاهش است. هر چه قطر حفره کمتر باشد از توان تفکیک مکانی بالاتری برخوردار است. به طور کلی هر چه قطر موازی‌سازها کمتر و طول آن، بیشتر باشد توان تفکیک مکانی بالاتر است.

## فصل پنجم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

امروزه دوربین گاما به صورت چشمگیری در روش‌های تشخیصی مورد استفاده قرار می‌گیرد و روز به روز بر پیشرفت آن افزوده می‌شود. از آنجایی که موازی‌ساز نقش مهم و بسزایی در کیفیت تصویر بدست آمده ایفا می‌کند طراحی موازی‌سازی که از توان تفکیک بالایی برخوردار است اهمیت ویژه‌ای در پزشکی هسته‌ای دارد. در تمام شبیه‌سازی‌ها خطای آماری زیر ۵ درصد است.

### مقایسه‌ی موازی‌سازها:

جدول (۵-۱): مقایسه‌ی FWHM بدست آمده در هر قطر برای ۳ نوع موازی‌ساز تک‌حفره شش‌ضلعی، مکعبی و استوانه‌ای

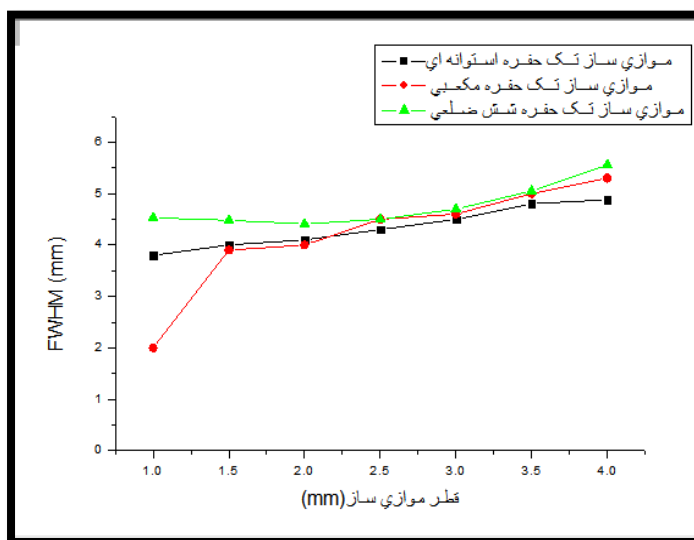
	تک‌حفره استوانه‌ای	تک‌حفره مکعبی	تک‌حفره شش‌ضلعی
d=1	FWHM=3.8	FWHM=2	FWHM=4.53
d=1.5	FWHM=4	FWHM=3.9	FWHM=4.48
d=2	FWHM=4.1	FWHM=4	FWHM=4.41
d=2.5	FWHM=4.3	FWHM=4.5	FWHM=4.5
d=3	FWHM=4.5	FWHM=4.6	FWHM=4.7
d=3.5	FWHM=4.8	FWHM=5	FWHM=5
d=4	FWHM=4.88	FWHM=5.3	FWHM=5.6

جدول (۵-۲): مقایسه‌ی FWHM بدست آمده در هر زاویه برای ۲ نوع موازی‌ساز تک‌حفره واگرا و همگرا

	واگرا	همگرا
$\theta=10$	FWHM=4.62	FWHM=4.31
$\theta=15$	FWHM=4.62	FWHM=4.49
$\theta=20$	FWHM=4.6	FWHM=4.47
$\theta=25$	FWHM=4.64	FWHM=4.52
$\theta=30$	FWHM=4.66	FWHM=4.53
$\theta=35$	FWHM=4.81	FWHM=4.64
$\theta=40$	FWHM=5.02	FWHM=4.8
$\theta=45$	FWHM=5.56	FWHM=5.36

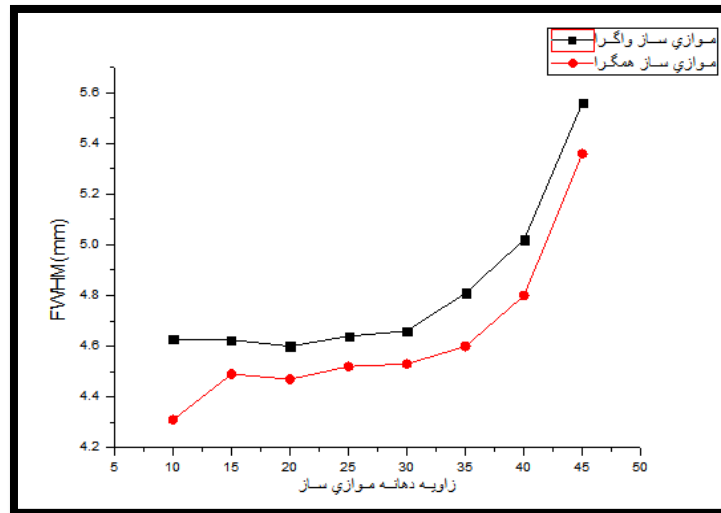
جدول (۳-۵): مقایسه‌ی FWHM بدست آمده در هر قطر برای ۲ نوع موازی‌ساز حفره موازی مکعبی و استوانه‌ای

	حفره موازی استوانه‌ای	حفره موازی مکعبی
d=1	FWHM=2.33	FWHM=3.92
d=1.5	FWHM=6.72	FWHM=6.67
d=2	FWHM=7.33	FWHM=7.1
d=2.5	FWHM=7.97	FWHM=7.79
d=3	FWHM=8.19	FWHM=8.31
d=3.5	FWHM=8.54	FWHM=8.71
d=4	FWHM=9.63	FWHM=9.67



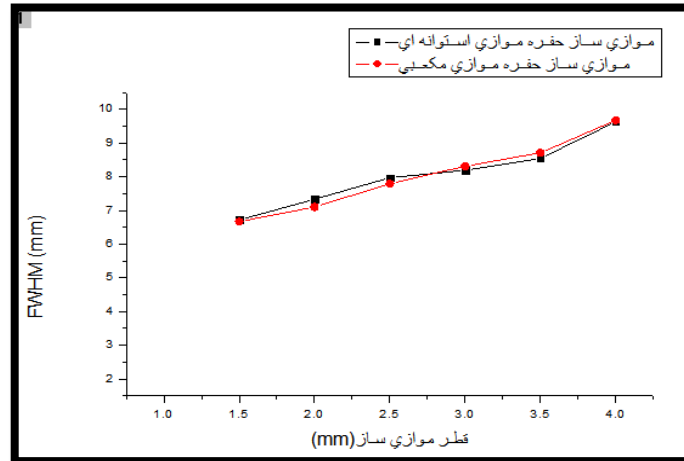
شکل ۵-۱: مقایسه‌ی سه موازی‌ساز تک حفره استوانه‌ای، مکعبی و شش ضلعی

با توجه به نمودار شکل ۵-۱ می‌توان نتیجه گرفت که به غیر از قطر ۱، هر سه موازی‌ساز به طور تقریبی از توان تفکیک یکسانی برخوردارند. این بدان معنی ایست که در موازی‌سازهای تک حفره شکل هندسی پارامتر چندان مهمی در توان تفکیک مکانی نیست و این قطر موازی‌ساز است که توان تفکیک را تغییر می‌دهد. چرا که با افزایش قطر، توان تفکیک هر سه موازی‌ساز کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۲: مقایسه‌ی دو موازی‌ساز همگرا و واگرا

با توجه به نمودار شکل ۵-۲ این نتیجه استدلال می‌شود که موازی‌ساز تک‌حفره همگرا توان تفکیک مکانی بهتری به نسبت موازی‌ساز واگرا داراست.



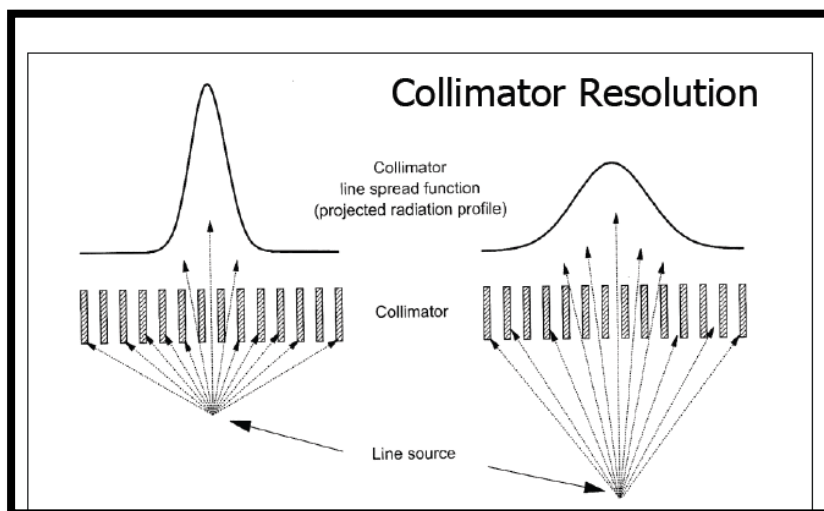
شکل ۵-۳: مقایسه‌ی دو موازی‌ساز حفره‌موازی استوانه‌ای و مکعبی

با توجه به نمودار شکل ۵-۳ و جدول ۵-۳ به جز قطر یک میلی‌متری که موازی‌ساز حفره‌موازی استوانه‌ای توان تفکیک بالاتری دارد، در بقیه قطرها هر دو موازی‌ساز به طور تقریبی از توان تفکیک یکسانی برخوردارند. این نمودار هم‌گویای این نکته است که شکل هندسی اینجا پارامتری مؤثر نیست و عامل مهم تغییر توان تفکیک مکانی قطر موازی‌ساز است.



## پیشنهادات:

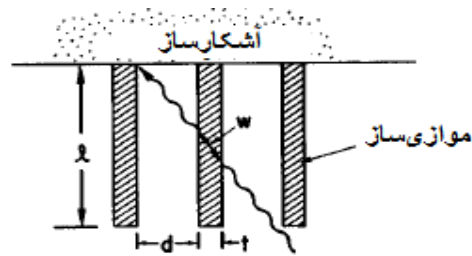
از آنجایی که موازی‌ساز و هندسه‌ی آن در توان تفکیک دوربین گاما نقش بسزایی دارد تغییر هندسه و پارامترها باعث تغییر توان تفکیک مکانی می‌شود. به طور مثال می‌توان موازی‌ساز حفره‌موازی همگراگونال را شبیه‌سازی و با موازی‌ساز حفره‌موازی مکعبی و استوانه‌ای مقایسه کرد. پارامتری که در این تحقیق متغیر است قطر موازی‌ساز است در حالی که طول موازی‌ساز و فاصله‌ی آن از چشمه و آشکارساز نیز در توان تفکیک مکانی بدست آمده مؤثر است. در نتیجه می‌توان یک قطر یا زاویه‌ی مشخص که توان تفکیک در آن بهینه است را ثابت در نظر گرفت و این‌بار طول موازی‌ساز را تغییر داد و طولی که توان تفکیک در آن بهینه است را بدست آورد. همانطور که در شکل ۴-۵ مشخص است با کاهش فاصله‌ی موازی‌ساز تا چشمه توان تفکیک افزایش یافته است. همچنین می‌توان تمام این شبیه‌سازی‌ها را برای تنگستن و پلاتینیوم نیز که در ساخت موازی‌ساز مورد استفاده قرار می‌گیرند انجام داد و توان تفکیک مکانی سرب، تنگستن و پلاتینیوم را با هم مقایسه کرد.



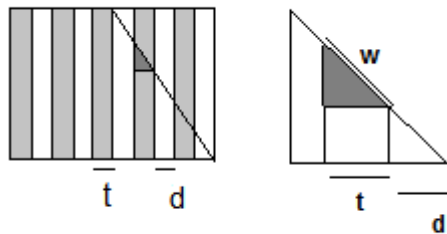
شکل (۴-۵): مقایسه‌ی توان تفکیک حاصل از دو موازی‌ساز حفره‌موازی که فاصله‌ی آن‌ها تا چشمه متغیر است [۱۸]

## پیوست الف:

### اثبات رابطه‌ی (۱-۱۳)، ضخامت جداری



شکل ۹-۱



شکل ۵-۵: اثبات رابطه‌ی ۱۳

از طریق برقراری رابطه‌ی تشابه بین مثلث رنگی شکل ۱ و مثلث سفید به رابطه‌ی ۱ می‌رسیم.

طول موازی‌ساز  $l$  و  $w$  کوتاهترین مسیری است که پرتو می‌تواند طی کند.

اگر قطر مثلث را  $w'$  بگیریم و  $w'$  را به طور تقریبی با ارتفاع مثلث که همان طول موازی‌ساز است مساوی بگیریم

$$\frac{2d+t}{t} = \frac{w'}{w}$$

در نتیجه رابطه‌ی فوق به این رابطه تبدیل می‌شود که همان رابطه‌ی ۱۳ است.

$$\frac{2d+t}{t} = \frac{l}{w}$$

## منابع

- [1] Simon R.Cherry, James A. Sorenson, Michael E. Philips ,**Physics In Nuclear Medicine chapter**, Third Edition
- [2] Anger HO, **Scintillation Camera**, Rev Sci Instr,1951
- [3] مایرهوف، ۱۳۷۹، **مبانی فیزیک هسته‌ای**، دکتر محمد فرهاد رحیمی، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۳۳-۱۳۴
- [4] J. H. Hubbel, S. M. Seltzer, **Tables of X- Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy Absorption Coefficients**, (1982)
- [5] [http//Physics.nist.gov](http://Physics.nist.gov)
- [6] Evans RD,**The Atomic Nuclear**, New York,McGraw-Hill,1972,p 628
- [7] Faycal Kharfi, **Principles and Applications of Nuclear Medical Imaging: A Survey on Recent Developments**, chapter 1
- [8] سید محمود سادات کیائی، محمد امین احمدی، فاطمه باقیان، شیرین عدل پرور، ۱۳۹۲، **کاربرد رادیوایزوتوپ‌ها در پزشکی هسته‌ای**، چاپ اول، انتشارات پژوهاک کیوان
- [9] D. Rezaei Ochbelagh,2009, **Investigation of Collimator Effect on Full-Width at Half-Maximum of NaI(Tl) Detector**,Asian J.Exp.Sci,Vol 23
- [10] Habib Zaidi, Ph.D,2006, **Quantitative Analysis in,Nuclear Medicine Imaging, Division of Nuclear Medicine**,Geneva University Hospital Geneva, CH-1211 Switzerland,chapter 1
- [11] علیرضا کمالی اصل، سعید سرکار، مهسا بهبهانیان، ۱۳۸۵، **شبیه‌سازی کامل دوربین گاما و بررسی تاثیر فاصله و محیط پراکنده ساز**، مجله‌ی فیزیک پزشکی ایران، دوره ۳، شماره ۱۳
- [12] J. F., **Briesmerister.MCNP-A General Monte Carlo, N-Particle Transport Code**,Version 4C, Los Alamos: National Laboratory, December 2000.
- [13] مهدی وفابخش، یاشار ریاضی، ۱۳۸۹، **راهنمای MCNP4C** چاپ اول، انتشارات اندیشه‌سرا
- [14] [photo.net/learn/optics/mtf](http://photo.net/learn/optics/mtf)
- [15] Kashian, Sedigheh1, Raisali, Gholamreza1, Eskandari, Mohammad RezanKhalafi, Hossein,1390, **Calculation of the BGO intrinsic efficiency by Monte Carlo and analytical method**, Physics Conference of Iran

- [16] Hosang Jeon, Hyunduk Kim , Bo Kyung Cha, Jong Yul Kim , Gyuseong Cho, 2009, **Performance Evaluation for Pinhole Collimators of Small Gamma Camera by MTF and NNPS: Monte Carlo Simulation Study**,Elsevier
- [17] Stevan W. Smith , **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**,chapter 25 , Second Edition 1999
- [18] Robert Miayoka, **The Scintillation Camera**, University Of Washington2009

## **Abstract**

In diagnostic nuclear medicine different factors affect image quality, for example collimator, septal penetration of collimator, structure of scintillation detector, electronic limitation and etc.

One way to evaluate these factors is using Monte Carlo simulation. So in this research the role of collimator (Geometry and dimension) on spatial resolution of gamma camera by using MCNP-4C is studied.

In order to investigate the effect of geometry and hole diameter on spatial resolution these collimators: cylindrical, cubic, hexagonal, converging and diverging pinhole, multi-pinhole cylindrical and multi-pinhole cubic collimator are simulated.

The results show that pinhole collimator like hexagonal, cubic and cylindrical that have approximately same geometry, have same process in changing spatial resolution by increasing hole diameter, also converging pinhole collimator has higher resolution than diverging pinhole collimator.

In multi-pinhole collimator except in one millimeter diameter, cylindrical collimator has high resolution while in other hole diameters, both multi-pinhole collimators have same process in spatial resolution changes.

The conclusions indicate that hole diameter is an effective parameter on spatial resolution for same geometry shapes.

---

Key Words: Collimator, Gamma Camera, Spatial Resolution



**Shahrood University**

**Department Of Physics**

**Evaluation Of Collimation Effect On Gamma Camera Resolution  
Using Monte Carlo Method**

**Soudeh Madady**

**Supervisor:**

**Dr. H. Tavakoli Anbaran**

**February 2015**