



دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

موضوع

امکان سنجی افزایش بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

ارائه دهنده:

محمد رنجبران

استاد راهنما:

دکتر حسین توکلی عنبران

شهریور ۱۳۹۳

تشکر و قدردانی

با نام و یاد خداوند متعال، بدینوسیله از حضور تمامی اساتیدی که به نحوی اینجانب را در پیش‌برد پژوهش حاضر راهنمایی نمودند، بخصوص جناب آقای دکتر حسین توکلی عنبران تشکر و قدردانی به عمل می‌آورم، همچنین از خانواده و دوستان عزیزم که پیوسته یار و پشتیبانم بودند و اینجانب را در طول دوره‌ی کارشناسی ارشد یاری نمودند بسیار متشکرم.

چکیده

باتری هسته‌ای وسیله‌ای است که انرژی حاصل از واپاشی رادیواکتیو را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این نوع باتری‌ها به سه دسته‌ی تبدیل مستقیم، تبدیل غیر مستقیم و باتری هسته‌ای شارژ مستقیم تقسیم می‌شوند. چگالی انرژی بالا و عمر بالا مزیت‌های باتری‌های هسته‌ای می‌باشند. اولین باتری هسته‌ای یک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بود که در سال ۱۹۱۳ توسط موزلی ساخته شد.

در این پژوهش به بررسی عوامل مؤثر در جهت افزایش بازده باتری‌های هسته‌ای شارژ مستقیم به کمک شبیه سازی قسمت‌هایی از این باتری توسط کد MCNP4C پرداخته‌ایم، در این نوع باتری ذرات بار داری که از یک چشمه‌ی رادیواکتیو گسیل می‌شوند به طور مستقیم توسط برخورد به یک صفحه در مقابل چشمه جمع آوری می‌شوند. اقداماتی که در جهت افزایش بازده این نوع باتری‌ها انجام شده عبارت هستند از انتخاب ماده‌ی مناسب جهت استفاده به عنوان چشمه‌ی رادیواکتیو در این نوع باتری، انتخاب شکل هندسی مناسب برای باتری، انتخاب مواد مناسب به عنوان زیرلایه و پوشش سطح جانبی برای چشمه‌ی رادیواکتیو جهت افزایش بازده چشمه، انتخاب ماده‌ی مناسب جهت استفاده به عنوان روکش سطح کلکتور به منظور افزایش بازده کلکتور و همچنین برآورد مقدار ضخامت مؤثر برای زیرلایه و پوشش سطح جانبی چشمه و پوشش سطح کلکتور.

در نهایت به بازده $16/5\%$ برای این باتری رسیدیم که در مقایسه با کارهای پیشین که بازده‌ای در حدود 12% داشتند در حدود 37% افزایش نسبی دارد.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه..... ۱

۱-۱ روش‌های تبدیل تلاشی رادیواکتیو به الکتریسیته..... ۱

۱-۱-۱ مبدل‌های گرمایی..... ۲

۱-۱-۲ مبدل‌های غیر گرمایی (باتری هسته‌ای)..... ۳

۱-۱-۳ باتری‌های هسته‌ای با تبدیل مستقیم..... ۳

۱-۳-۱-۱ باتری هسته‌ای بتا و لتائیک..... ۴

۱-۳-۱-۲ باتری هسته‌ای اختلاف پتانسیل اتصالی..... ۵

۱-۳-۱-۳ باتری هسته‌ای گسیل ثانویه‌ی الکترون..... ۶

۱-۳-۱-۴ سلول گاما الکتریک..... ۷

۱-۴-۱ باتری هسته‌ای با تبدیل غیر مستقیم..... ۸

۱-۴-۲ باتری هسته‌ای شارژ مستقیم..... ۸

۱-۵-۱-۱ تاریخچه‌ی باتری‌های هسته‌ای شارژ مستقیم..... ۸

۱-۵-۱-۲ خصوصیات باتری‌های هسته‌ای شارژ مستقیم..... ۱۰

۱-۵-۱-۳ عملکرد و بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم..... ۱۱

فصل ۲: بازده چشمه..... ۱۹

۲-۱ عوامل مؤثر بر بازده چشمه..... ۲۰

۲-۱-۱ اثر خودجذبی چشمه..... ۲۰

۲۲.....	۲-۱-۲ اثر زیرلایه
۲۵.....	۲-۲ نحوه‌ی شبیه سازی با کد MCNP4C
۲۶.....	۲-۲ بررسی عوامل مؤثر بر افزایش بازده چشمه‌ی Pm-147
۲۶.....	۱-۲-۲ بررسی بازده چشمه‌ی استوانه‌ای Pm-147 از نظر شکل هندسی.....
۳۰.....	۲-۲-۲ بررسی تغییرات بازده چشمه‌ی Pm-147 نسبت به تغییر مواد زیرلایه و پوشش سطح جانبی.....
۳۰.....	۱-۲-۲-۲ بررسی اثر زیرلایه‌ی آهن بر بازده چشمه‌ی Pm-147
۳۲.....	۲-۲-۲-۲ بررسی اثر پوشش سطح جانبی آهن بر بازده چشمه‌ی Pm-147
۳۵.....	۳-۲-۲-۲ بررسی اثر زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن بر بازده چشمه‌ی Pm-147
۳۸.....	۴-۲-۲-۲ بررسی زیرلایه‌های آنتیموان، طلا، و بیسموت بر بازده چشمه‌ی Pm-147
۴۲.....	۵-۲-۲-۲ بررسی اثر پوشش سطح جانبی آنتیموان، طلا و بیسموت بر بازده چشمه‌ی رادیواکتیو Pm-147
	۶-۲-۲-۲ محاسبه‌ی ضخامت مؤثر زیرلایه و پوشش سطح جانبی از آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت برای چشمه‌ی Pm-147
۴۶.....	۳-۲ نتیجه‌گیری کلی در مورد عوامل مؤثر بر بازده چشمه‌ی Pm-147
۵۳.....	۴-۲ بررسی عوامل مؤثر بر افزایش بازده چشمه‌ی Ni-63
۵۳.....	۱-۴-۲ بررسی بازده چشمه‌ی استوانه‌ای Ni-63 از نظر شکل هندسی
۵۶.....	۲-۴-۲ بررسی اثر زیرلایه‌ی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت بر بازده چشمه‌ی رادیواکتیو Ni-63
۶۰.....	۳-۴-۲ بررسی اثر پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت بر بازده چشمه‌ی رادیواکتیو Ni-63
	۴-۴-۲ برآورد ضخامت مؤثر زیرلایه و پوشش سطح جانبی از مواد آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت برای چشمه‌ی Ni-63
۶۴.....	

۵-۲ نتیجه گیری کلی در مورد عوامل مؤثر بر بازده چشمه‌ی Ni-63 ۶۸

فصل ۳: بازده کلکتور ۷۳

۱-۳ عوامل مؤثر بر بازده کلکتور ۷۴

۱-۱-۳ الکترون‌های پس‌پراکندگی ۷۴

۲-۱-۳ الکترون‌های ثانویه ۷۴

۲-۳ افزایش بازده کلکتور ۷۵

۱-۲-۳ انتخاب ماده‌ی مناسب ۷۵

۲-۲-۳ انتخاب ابعاد مناسب برای باتری کروی ۷۷

۳-۲-۳ تعیین ضخامت حدی برای پوشش کلکتور ۷۹

۳-۳ نتایج کلی در مورد بازده کلکتور ۸۰

فصل چهارم: نتیجه گیری ۸۳

۱-۴ بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم ۸۴

۲-۴ انتخاب چشمه ۸۴

۳-۴ بازده چشمه ۸۵

۴-۴ بازده کلکتور و انتخاب شکل هندسی ۸۶

مراجع ۸۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: چگونگی عملکرد سلول N-P..... ۴
- شکل ۱-۲: چگونگی عملکرد سلول CPD..... ۶
- شکل ۱-۳: اولین باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم..... ۹
- شکل ۱-۴: شکل شماتیک باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم..... ۱۱
- شکل ۱-۲: نسبت جریان خروجی از سطح یک قاعده به کل جریان خروجی از یک چشمه‌ی Pm-147 استوانه‌ای با شعاع $1\mu\text{m}$ در سه وضعیت، تئوری (رابطه ۱)، بدون حضور ماده‌ی چشمه و با حضور ماده‌ی چشمه..... ۲۸
- شکل ۲-۲: مقایسه‌ی چشمه‌ی Pm-147 در سه وضعیت، تئوری، بدون حضور ماده‌ی چشمه و با حضور ماده‌ی چشمه با سه شعاع $1\mu\text{m}$ ، $2\mu\text{m}$ و $3\mu\text{m}$ ۲۹
- شکل ۳-۲: مقایسه‌ی بازده چشمه‌ی Pm-147 به شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ با زیرلایه‌ی آهن و بدون زیرلایه‌ی آهن..... ۳۱
- شکل ۴-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آهن و شعاع متغیر..... ۳۲
- شکل ۵-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 به شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ با پوشش سطح جانبی آهن و بدون پوشش سطح جانبی آهن..... ۳۳
- شکل ۶-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن و بدون پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف..... ۳۴
- شکل ۷-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف..... ۳۵
- شکل ۸-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌ها و ضخامت‌های مختلف رسم گردیده و به منظور مقایسه‌ی ساده‌تر حالت‌های قبلی (چشمه‌ی عادی، چشمه با زیرلایه‌ی آهن و چشمه با پوشش

- ۳۶.....سطح جانبی آهن) نیز در هر مورد ترسیم گشته است.....
- شکل ۹-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف.....۳۷
- شکل ۱۰-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با شعاع $1\mu\text{m}$ و زیر لایه‌ی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت.....۳۹
- شکل ۱۱-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آنتیموان و شعاع‌های مختلف.....۴۰
- شکل ۱۲-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی طلا و شعاع‌های مختلف.....۴۰
- شکل ۱۳-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی بیسموت و شعاع‌های مختلف.....۴۱
- شکل ۱۴-۲: چشمه‌ی Pm-147 به شعاع $1\mu\text{m}$ با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، بیسموت و طلا.....۴۲
- شکل ۱۵-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آنتیموان و شعاع متغیر.....۴۳
- شکل ۱۶-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی طلا و شعاع متغیر.....۴۴
- شکل ۱۷-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی بیسموت و شعاع متغیر.....۴۴
- شکل ۱۸-۲: مقدار حدی بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا، بیسموت و بدون پوشش سطح جانبی نسبت به شعاع چشمه.....۴۶
- شکل ۱۹-۲: تغییرات بازده چشمه‌ی Pm-147 با شعاع قاعده‌ی 3Cm نسبت به تغییرات ضخامت زیرلایه از جنس آهن، آنتیموان، طلا، بیسموت.....۴۸
- شکل ۲۰-۲: تغییرات بازده چشمه‌ی Pm-147 با شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ و ضخامت $4\mu\text{m}$ نسبت به تغییرات ضخامت پوشش سطح جانبی از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت.....۴۹
- شکل ۲۱-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان.....۵۱
- شکل ۲۲-۲: نسبت جریان خروجی از سطح یک قاعده به کل جریان خروجی از سطوح یک چشمه‌ی Ni-63 استوانه‌ای با شعاع $1\mu\text{m}$ در سه وضعیت، تئوری، بدون حضور ماده‌ی چشمه و با در نظر گرفتن ماده‌ی چشمه.....۵۴

- شکل ۲-۲۳: مقایسه‌ی چشمه‌ی Ni-63 در سه وضعیت، تئوری، بدون حضور ماده‌ی چشمه و با در نظر گرفتن ماده‌ی چشمه با سه شعاع $1\mu\text{m}$ و $2\mu\text{m}$ و $3\mu\text{m}$ ۵۵
- شکل ۲-۲۴: بازده چشمه‌ی Ni-63 با شعاع $1\mu\text{m}$ و زیر لایه‌های آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت..... ۵۶
- شکل ۲-۲۵: بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی آهن و شعاع‌های مختلف..... ۵۷
- شکل ۲-۲۶: بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی آنتیموان و شعاع‌های مختلف..... ۵۸
- شکل ۲-۲۷: بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی طلا در شعاع‌های مختلف..... ۵۸
- شکل ۲-۲۸: بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی بیسموت در شعاع‌های مختلف..... ۵۹
- شکل ۲-۲۹: چشمه‌ی Ni-63 به شعاع $1\mu\text{m}$ با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت..... ۶۰
- شکل ۲-۲۹: بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف..... ۶۱
- شکل ۲-۳۱: بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی بیسموت و شعاع متغیر..... ۶۲
- شکل ۲-۳۲: بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی طلا و شعاع متغیر..... ۶۲
- شکل ۲-۳۳: بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی بیسموت و شعاع متغیر..... ۶۳
- شکل ۲-۳۴: مقدار حدی بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا، بیسموت و بدون پوشش سطح جانبی نسبت به شعاع چشمه..... ۶۴
- شکل ۲-۳۵: تغییرات بازده چشمه‌ی Ni-63 با شعاع قاعده‌ی 3Cm و ضخامت $1\mu\text{m}$ نسبت به تغییرات ضخامت زیرلایه از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت..... ۶۶
- شکل ۲-۳۶: تغییرات بازده چشمه‌ی Ni-63 با شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ و ضخامت $4\mu\text{m}$ نسبت به تغییرات ضخامت پوشش سطح جانبی آهن آنتیموان طلا و بیسموت..... ۶۷
- شکل ۲-۳۷: بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان..... ۶۹

شکل ۱-۳: بازده روکش کلکتور با چشمه‌ی رادیواکتیو Pm-147 برای Li, Be, B, C, Fe, Mo, I, Au و C_3F_6

(کپتون)..... ۷۶

شکل ۲-۳: بازده روکش کلکتور با چشمه‌ی رادیواکتیو Ni-63 برای Li, Be, B, C, Fe, Mo, I, Au و C_3F_6

(کپتون)..... ۷۶

شکل ۳-۳: تغییرات بازده کلکتور با روکش Be نسبت به افزایش فاصله از چشمه‌ی Pm-147 کروی به شعاع

۱Cm..... ۷۸

شکل ۴-۳: تغییرات بازده کلکتور با روکش Be نسبت به افزایش فاصله از چشمه‌ی Pm-147 کروی به شعاع

۱Cm..... ۷۸

شکل ۵-۳: تغییرات بازده کلکتور برای چشمه‌ی کروی Pm-147 با شعاع ۱Cm نسبت به تغییرات ضخامت پوشش

سطح کلکتور..... ۷۹

شکل ۶-۳: تغییرات بازده کلکتور برای چشمه‌ی کروی Ni-63 با شعاع ۱Cm نسبت به تغییرات ضخامت پوشش

سطح کلکتور..... ۸۰

فهرست جداول

جدول ۱-۱: پاره‌ای از خصوصیات مواد رادیواکتیو Tritium, Ni-63, Pm147, Sr-90..... ۱۵

جدول ۱-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 به ضخامت $0.2\mu m$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف، زیر مقدار

حدی..... ۵۲

جدول ۲-۲: بازده چشمه‌ی Pm-147 به ضخامت $1\mu m$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف، زیر مقدار

حدی..... ۵۲

جدول ۳-۲: بازده چشمه‌ی Ni-63 به ضخامت $0.2\mu m$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های

مختلف..... ۷۰

جدول ۴-۲: بازده چشمه‌ی Ni-63 به ضخامت $1\mu\text{m}$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف..... ۷۰

جدول ۴-۱: پارامترهای مؤثر بر بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه‌ی Pm-147..... ۷۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱ روش‌های تبدیل تلاشی رادیواکتیو به الکتریسیته

وسایلهایی که انرژی تلاشی رادیواکتیو را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند مولدهای رادیوایزوتوپ نام دارند. تحقیق و توسعه‌ی این وسایله‌ها از سال ۱۹۱۳ آغاز شد [۱].

چیزی که باعث شد مولدهای رادیوایزوتوپ مورد مطالعه قرار بگیرند عمر چندین و چند ساله‌ی آن‌ها بود.

مزیت دوم چگالی انرژی بالای آن‌ها می‌باشد که ده برابر سلول‌های هیدروژنی [۲] و هزار برابر باتری‌های شیمیایی است [۳-۴]، همچنین تحت تأثیر عوامل محیطی قرار نمی‌گیرند، این مولدها تحت رنج گسترده‌ای از دما و فشار و حتی در زیر آب و در فضا نیز کار می‌کنند.

از آنجایی که مولدهای رادیوایزوتوپی مستقل هستند، به بارگذاری یا پر کردن مجدد یا شارژ نیازی ندارند.

مولدهای رادیوایزوتوپ بر اساس نحوه‌ی تولید انرژی الکتریکی به دو دسته تقسیم می‌شوند، مبدل‌های گرمایی و غیر گرمایی.

۱-۱-۱ مبدل‌های گرمایی،^۱ (RTG) :

در یک مولد رادیوایزوتوپی ترموالکتریک (RTG) از این اصل استفاده می‌شود که مواد رادیواکتیو توسط واپاشی تولید گرما می‌کنند، و گرمای تولید شده توسط ترموکوپل به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

انواع اولیه‌ی این نوع مبدل‌ها دارای توانی در حد چندصد میلی وات بودند.

^۱-Radioisotope Thermoelectric Generator

مقدار ماده‌ی رادیواکتیو لازم برای تولید گرادیان گرمایی کافی در یک مبدل گرمایی کارا معمولاً بیشتر از یک گرم است. رادیوایزوتوپ‌هایی که در این مبدل‌ها به کار می‌روند باید ذرات آلفا یا بتایی با انرژی چند صد یا هزاران کیلو الکترون ولت داشته باشند. در این مبدل‌ها معمولاً از Pu-238 یا Sr-90 استفاده می‌شود [۵].

بازده انرژی برای RTG ها به ۸ الی ۱۰ درصد می‌رسد [۶]، انواع جدید RTG های ترموفوتوولتائیک به بازده بالای ۲۰ درصد می‌رسند [۷] و محاسبات تئوری پیش بینی می‌کند که این مقدار می‌تواند به ۳۰ درصد افزایش یابد [۸].

مقدار زیاد ماده رادیواکتیو به کار رفته در ساخت RTG ها به علت پرتو زائی بالا و خطرات مسمومیت رادیو اکتیو کار برد آن‌ها را محدود می‌کند [۹].

۱-۱-۲ مبدل‌های غیر گرمائی (باتری‌های هسته‌ای):

باتری‌های هسته‌ای با توجه به نحوه‌ی تبدیل انرژی تلاشی رادیواکتیو به الکتریسیته به سه دسته تقسیم می‌شوند.

۱- باتری‌های هسته‌ای با تبدیل مستقیم.

۲- باتری‌های هسته‌ای با تبدیل غیر مستقیم.

۳- باتری‌های هسته‌ای با شارژ مستقیم.

۱-۱-۳ باتری‌های هسته‌ای با تبدیل مستقیم:

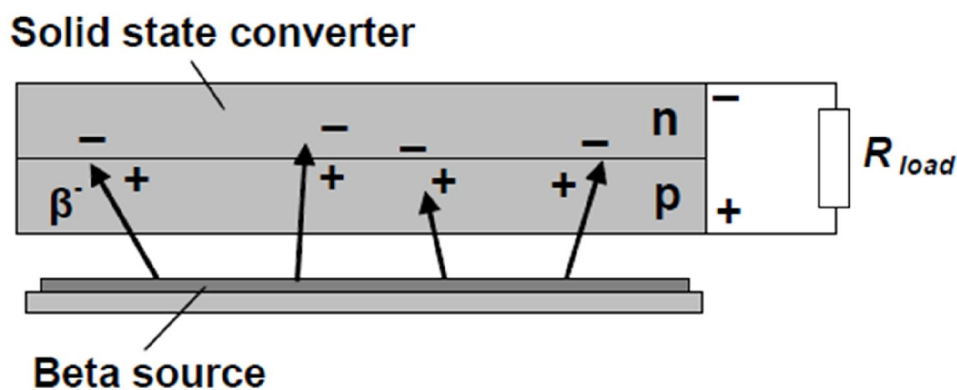
این نوع باتری‌ها بر مبنای اثر بتا و لتائیک یا پتانسیل متفاوت یا تابش ثانویه از سطح مورد تابش کار می‌کنند، در ادامه به توضیح در مورد انواع آنها می‌پردازیم:

۱-۳-۱-۱ باتری هسته‌ای بتا ولتائیک:

این نوع باتری هسته‌ای بر مبنای اثر بتا ولتائیک کار می‌کند، اثر بتا ولتائیک عبارت از تولید تعداد زیادی جفت الکترون حفره بر اثر برخورد ذرات بتا به پیوندگاه N-P از دو ماده‌ی نیم رسانای نوع N و P می‌باشد.

نحوه‌ی عملکرد سلول N-P این گونه می‌باشد که ذره‌ی بتا یک یا چند جفت الکترون حفره در محل پیوند N-P ایجاد می‌کند که به علت پتانسیل متفاوت در اتصال N-P مجزا می‌شوند و جریانی بر روی مقاومت بار به وجود می‌آورند.

نحوه‌ی عملکرد این سلول در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱-۱). چگونگی عملکرد سلول N-P. [۲۲]

ولتاژ مدار باز این باتری‌ها بین چند صد میلی ولت تا چند ولت می‌باشد که به انرژی تابش و پهنای گپ انرژی نیم رسانا بستگی دارد.

بازده کلی این نوع باتری‌ها هم به بازده چشمه در تولید شار ذرات بتا و هم به بازده مبدل

بتا ولتائیک (سلول N-P) که شار ذرات را جذب کرده و به الکتریسیته تبدیل می‌کند (بازده بتاولتائیک) بستگی دارد.

هرچه پهنای باند نیم‌رسانا بیشتر باشد، بازده بتاولتائیک بیشتر خواهد بود، مثلاً برای GaN یا AlN بازده بتاولتائیک به ۳۰٪ نیز می‌رسد.

بازده چشمه نیز به انرژی ذرات گسیل شده و ضخامت لایه‌ی رادیواکتیو بستگی دارد، در ادامه‌ی همین فصل در مورد بازده چشمه توضیحاتی داده می‌شود [۱۰].

در مجموع بازده عملی باتری‌های بتاولتائیک از ۲٪ بیش‌تر نمی‌باشد.

بر اثر گذشت زمان تابش بتا آسیب‌ها و شکستگی‌هایی در نیم‌رسانا ایجاد می‌کند که این پدیده باعث پایین آوردن بازده در نیم‌رسانا می‌شود، به علت کم شدن تلاشی رادیواکتیو و همچنین پایین آمدن کیفیت نیم‌رسانا بازده و توان باتری در اثر گذشت زمان پایین می‌آید.

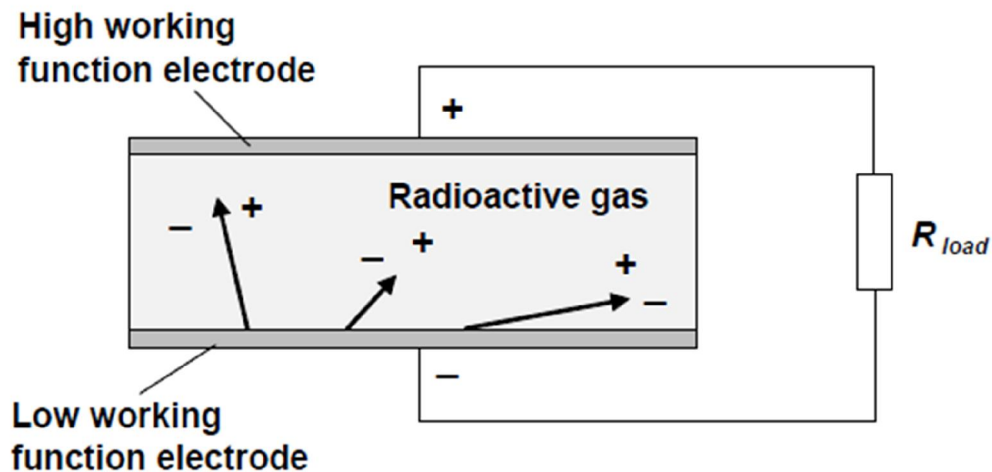
۱-۳-۲ باتری هسته‌ای اختلاف پتانسیل اتصال^۲ (CPD)

اولین بار این نوع باتری‌ها توسط کرامر در سال ۱۹۲۴ طرح ریزی شدند [۱۱].

نحوه‌ی عملکرد این نوع باتری به این صورت می‌باشد که ذره‌ای که از یک گاز یا جامد گسیل می‌شود با مولکول‌های یک گاز یا جامد دیگر برخورد می‌کند و یون‌های مثبت و منفی به وجود می‌آورد، که به طرف الکترودهای با بار مخالف حرکت می‌کنند.

ولتاژ تئوری که در سلول به وجود می‌آید توسط اختلاف توابع کار دو الکترود تعیین می‌شود.

^۲.contact potential difference



شکل (۲-۱). چگونگی عملکرد سلول CPD [۱۱].

سلول CPD با چشمه‌ی ScT_2 توسط Liu, et al در سال ۲۰۰۸ توصیف گردید [۱۲]، در این مورد میدان الکتریکی توسط توابع کار متفاوت میان الکترودهای نوار ScT_2 و پلاتینیم یا مس به وجود می‌آید.

باری که در دی الکتریک میان دو الکترود به وجود می‌آید جریانی را در مقاومت بار به وجود می‌آورد.

ولتاژ مدار باز ۰/۵V و جریان مدار کوتاه $2/67 \text{ nA}/\text{cm}^2$ برای این باتری به ثبت رسیده است.

به علت انرژی میانگین بالای لازم جهت تشکیل جفت یونی در گاز (در حدود ۳۰eV) [۱۴] بازده در این نوع باتری‌ها پایین است (۰/۵٪) [۱۳].

۳-۳-۱-۱ باتری هسته‌ای گسیل ثانویه‌ی الکترون

تئوری باتری‌های گسیل ثانویه‌ی الکترون بر پایه‌ی جمع‌آوری الکترون‌های ثانویه‌ای که بر اثر برخورد ذرات بتا یا فوتون‌های پر انرژی که از لایه‌ی نازکی از دی الکتریک بین الکترودها جدا می‌شوند می‌باشد.

تعداد الکترون‌های ثانویه خیلی بیشتر از الکترون‌های اولیه می‌باشد، ولی انرژی آنها از انرژی الکترون‌های اولیه کمتر است، بنابراین جریان خروجی این باتری در مقایسه با تعداد ذرات اولیه بیش‌تر می‌باشد اما ولتاژ خروجی باتری در مقایسه با جمع آوری مستقیم ذرات اولیه کم‌تر است.

این نوع باتری برای اولین بار توسط شوارتز^۳ در سال ۱۹۵۵ پیشنهاد شد [۱۵]، که به علت بازده کم آن نمونه‌ی عملی از آن ساخته نشده است، اما تحقیقات تئوری در این زمینه همچنان ادامه دارد.

۱-۳-۴ سلول گاما الکتریک

نحوه‌ی عملکرد سلول گاما الکتریک بر اساس جمع آوری الکترون‌هایی که با فوتون‌های فرودی از ماده‌ی رادیو اکتیو برخورد کامپتون انجام می‌دهند می‌باشد.

سلول گاما الکتریک می‌تواند توسط خلأ یا دی الکتریک جامد در میان الکترودها ساخته شود، در حالت اول کلکتور الکترون‌هایی که در امیتر تولید می‌شوند را جمع آوری می‌کند، و در حالت دوم کلکتور الکترون‌هایی که در دی الکتریک تولید شده‌اند را جمع آوری می‌کند [۱۶-۱۷].

نمونه‌ای از این نوع باتری با استفاده از دی الکتریک جامد که از چشمه‌ی Co-60 با شدت ۱۰۰۰ کوری که میانگین انرژی هر فوتون ۱/۲۵ MeV بود ساخته شد که ۵۰ mW توان خروجی و ۵۰۰ kV اختلاف پتانسیل داشت و بازده آن ۰/۳۵٪ بود.

اگر در ساخت این نوع باتری از ایزوتوپ‌هایی با انرژی گامای کمتری استفاده شود بازده آن حتی از مقدار فوق نیز کم‌تر خواهد بود [۱۸].

به علت کاربرد مقدار زیادی از ایزوتوپ رادیواکتیو با پرتو گامای پر انرژی، این نوع باتری‌ها نیازمند به یک پوشش پر حجم و سنگین‌اند و برای نیازهای کنونی کاربرد ندارند.

۳. Schwartz

۱-۱-۴ باتری هسته‌ای با تبدیل غیر مستقیم:

در این باتری‌ها انرژی تلاشی رادیواکتیو ابتدا در یک ماده‌ی رادیو لومینسانس (مانند فسفر) به اشعه‌ی ماوراء بنفش یا نور مرئی تبدیل می‌شود و سپس این نور توسط یک سلول فوتو ولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل خواهد شد [۹]، بازده این نوع باتری‌ها می‌تواند به ۲٪ با ولتاژ مدار باز ۳/۵V برسد [۱۴].

به طور خلاصه باتری‌های هسته‌ای با تبدیل غیر مستقیم دارای مشخصات زیر می‌باشند:

۱- ولتاژ مدار باز در حد چند ولت.

۲- بازده کلی تقریبی ۲٪.

۳- کاهش توان خروجی با گذشت زمان به خاطر کاهش اکتیویته و تنزل تابش در فسفر [۹].

۱-۱-۵ باتری هسته‌ای شارژ مستقیم:

نحوه‌ی عملکرد این نوع باتری‌ها که به اختصار $DCNB^4$ نامیده می‌شوند به این ترتیب است که ذرات بار داری که از یک چشمه به الکتروود مقابل تابیده می‌شوند به صورت مستقیم جمع‌آوری می‌شوند.

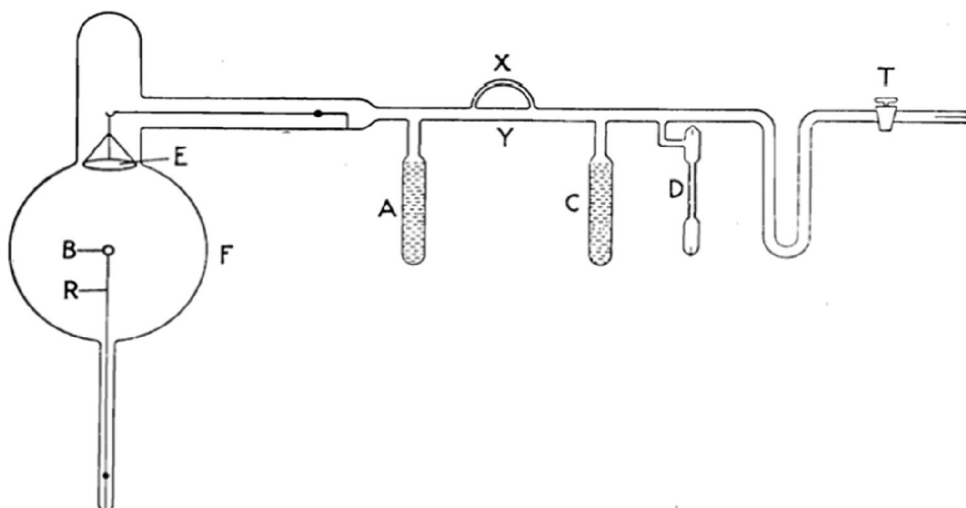
$DCNB$ می‌تواند از تابنده‌های α یا β ساخته شود.

۱-۱-۵-۱ تاریخچه‌ی باتری‌های هسته‌ای شارژ مستقیم:

اولین $DCNB$ توسط موزلی^۵ در سال ۱۹۱۳ با $Ra-226$ ساخته شد [۱۹]، ایزوتوپ رادیم در مرکز یک کره قرار گرفته بود و سطح داخلی کره به عنوان الکتروودهای ولتاژ توسط نقره پوشانده شده بود، پس از تخلیه‌ی هوا از فضای داخلی ولتاژ مدار باز ۱۵۰KV و جریان مدار کوتاه ۱nA/۰/۰ اندازه‌گیری شد.

۴. Direct Charge Nuclear Battery

۵. Moseley



شکل (۱-۳). اولین باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم [۱۹].

پس از آن در آزمایشگاه battele national با استفاده از گسیلنده‌ی آلفا باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با ولتاژ ۱۰۰ Kv ساخته شد [۲۰]، که به علت استفاده از گسیلنده‌ی آلفا برای متوقف کردن الکترون-های ثانویه نیازمند به یک توری با پتانسیل منفی بود و این یکی از معایب استفاده از گسیلنده‌ی آلفا در این نوع باتری‌ها می‌باشد، زیرا به علت حضور توری با پتانسیل منفی به استفاده از یک مولد دیگر نیاز دارد و در نتیجه دیگر نمی‌توان آن را یک مولد مستقل نامید.

بعدها باتری هسته‌ای با گسیلنده‌ی آلفا به طور مستقل ساخته شد که در آن برای تأمین پتانسیل منفی مش از یک باتری شارژ مستقیم با چشمه‌ی بتا استفاده شده بود. اولین باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم که در آن از $Sr-90$ (گسیلنده‌ی بتا) استفاده شده بود، توسط لیندر^۶ در سال ۱۹۵۲ ساخته شد [۲۱]، بازده رویهم رفته‌ی اکثر باتری‌های ساخته شده کمتر از ۳٪ بود، البته بازده باتری لیندر تقریباً به ۱۰/۵٪ می‌رسید.

۶.linder

۱-۱-۵-۲ خصوصیات باتری‌های هسته‌ای شارژ مستقیم:

باتری‌های هسته‌ای با تبدیل مستقیم و غیر مستقیم ولتاژهای مدار بازی کم‌تر از ۵V و بازده‌ای کمتر از ۲٪ دارند و نرخ کاهش توان آن‌ها ۲ الی ۳ بار سریع‌تر از طول عمر ماده‌ی رادیو اکتیو به کار رفته در آن‌ها می‌باشد، اما باتری‌های هسته‌ای با شارژ مستقیم دارای خصوصیات زیر می‌باشند:

- ولتاژ مدار باز آن‌ها در حد میانگین انرژی ذرات باردار (تقسیم بر یک الکترون ولت)، یعنی از مرتبه‌ی چندین کیلو ولت می‌باشد.

- بازده عملی آن‌ها در حد چند درصد است ولی بررسی‌های نظری نشان می‌دهد که بازده تئوری آن‌ها می‌تواند به ۱۵ الی ۱۷ درصد نیز برسد [۲۱-۲۲].

- در طراحی باتری‌های هسته‌ای با شارژ مستقیم خاصیت دمایی، فشاری و رطوبتی مواد مهم نیست، بنابراین این باتری‌ها می‌توانند در پهنه‌ی وسیعی از موقعیت‌های محیطی کار می‌کنند.

- بعضی از کاربردهای باتری‌های هسته‌ای مانند موتورهای الکترو استاتیکی که به ولتاژ بالایی نیاز دارند می‌توانند بدون افزایش دهنده‌ی ولتاژ تغذیه شوند.

این مزیت‌های باتری‌های هسته‌ای این باتری‌ها را به یک گزینه‌ی جذاب تبدیل کرده است، آنها یک ولتاژ بالای مستقل دارند، طول عمر بالایی دارند و برای شرایط محیطی مناسباند.

کار ما در این پژوهش بررسی عوامل مؤثر بر بازده این نوع باتری‌ها یعنی باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم و تغییر آن‌ها در جهت افزایش بازده این نوع باتری‌ها می‌باشد.

لازم به ذکر است که در این پژوهش برای این نوع باتری‌ها چشمه‌ی بتا در نظر گرفته شده است، زیرا همان‌طور که اشاره شد استفاده از گسیلنده‌ی آلفا باعث ایجاد الکترون‌های ثانویه‌ی زیادی می‌شود که کار باتری را مختل می‌نماید و به منظور سرکوب نمودن این الکترون‌های ثانویه نیاز به یک مش با

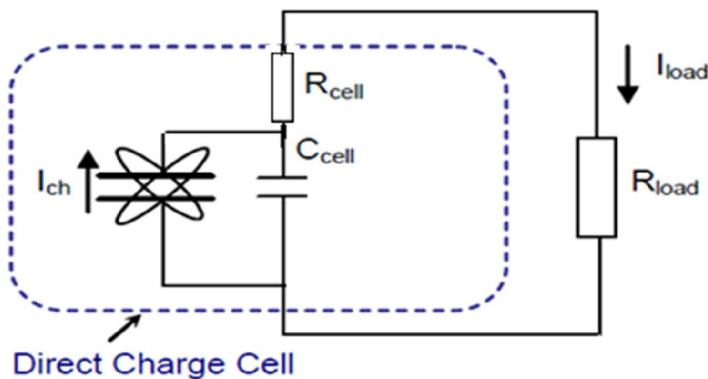
پتانسیل منفی می‌باشد، که خود این موضوع باعث کاهش بازده باتری می‌شود.

۳-۵-۱-۱ عملکرد و بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

عوامل مختلفی در تعیین بازده این نوع باتری‌ها نقش دارند که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم، اما قبل از معرفی این عوامل و شرح آنها نحوه‌ی عملکرد این نوع باتری را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم در ساده‌ترین حالت یک چشمه‌ی رادیو اکتیو بر روی یک ورقه می‌باشد که در مقابل ورقه‌ی فلزی دیگری که بارهای الکترواستاتیک حاصل از تابش چشمه بر روی آن انباشته می‌شوند قرار گرفته است، چشمه و فلز توسط یک دی‌الکتریک مجزا شده‌اند.

این باتری در داخل خود یک مقاومت داخلی و یک خاصیت خازنی نیز دارد که در شکل زیر نمایش داده شده است:



شکل (۴-۱). شکل شماتیک باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم [۹].

بازده باتری هسته‌ای عبارت است از میزان توان الکتریکی خروجی به توان تلاشی رادیواکتیو چشمه.

در حالت ایستا خاصیت خازنی باتری بی اهمیت می‌باشد زیرا پس از گذشت مدت زمان محدودی ولتاژ دو سر C_{cell} با ولتاژ دو سر باتری برابر گشته، دیگر جریانی از آن عبور نمی‌کند، و عملاً تبدیل

به یک المان بی اثر می شود.

مقدار توان کل، که توسط چشمه ی رادیواکتیو تولید می شود به صورت تقریبی عبارت است از:

$$P_{Rd} = A. \mathcal{E}_{avg} \quad (1-1)$$

که در رابطه ی بالا A اکتیویته ی چشمه و $\mathcal{E}_{avg}$ مقدار انرژی میانگین ذرات گسیل شونده از چشمه می باشد.

در شکل بالا P_{el} (توان الکتریکی بر روی بار) دارای مقدار بیشینه در

$$R_{load} = R_{cell} \quad (2-1)$$

می باشد.

در این حالت توان الکتریکی بیشینه ی خروجی برابر است با:

$$P_{el,max} = I_{ch} \frac{U}{2} \quad (3-1)$$

که در رابطه ی ۳-۱، U ولتاژ باتری می باشد و در حالت کلی I_{ch} به شار ذرات بتا بستگی دارد که توسط جریان بارهای شارژ کننده ی باتری تعیین می شود، کسر شار بتایی که به I_{ch} تبدیل می شود به دلایل زیر کمتر از کل شار ذرات بتایی است که از چشمه گسیل می شود:

۱- خود جذبی ذرات بتا توسط چشمه ی رادیواکتیو، که با بازده چشمه نشان داده می شود (η_s) و عبارت است از نسبت ذرات بتایی که از سطح چشمه جدا می شوند به کل ذرات بتایی که از درون چشمه تابیده می شوند.

۲- کم شدن ذرات بتا هنگامی که از چشمه به سمت کلکتور حرکت می‌کنند و با فاکتور شکل هندسی (K_g) نمایش داده می‌شود که K_g نسبت ذرات بتایی که به کلکتور می‌رسند است به ذرات بتایی که از سطح چشمه تابیده می‌شوند.

۳- کاهش (دفع) ذرات بتا به علت افزایش پتانسیل روی کلکتور که با فاکتور دافعه ($\eta_R(U)$) نشان داده می‌شود.

۴- در نهایت پس‌پراکندگی الکترون‌ها توسط کلکتور و جدا شدن الکترونهای ثانویه‌ی کم انرژی از روی کلکتور که I_{ch} را کاهش می‌دهد، بازپخش با b و الکترونهای ثانویه با s نشان داده می‌شوند. با توجه به عوامل بالا I_{ch} از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{ch} = q_e \cdot A \cdot \eta_s \cdot K_g \cdot \eta_R(U) \cdot (1 - s) \cdot (1 - b) \quad (۴-۱)$$

در رابطه‌ی بالا A اکتیویته‌ی چشمه و q_e بار الکتریکی ذرات بتا می‌باشد.

پس در حالتی که بیشترین توان از باتری گرفته می‌شود توان خروجی ماکسیمم برابر است با:

$$P_{el,max} = \frac{I_{ch}}{2} \cdot U = \frac{q_e \cdot A \cdot \eta_s \cdot K_g \cdot \eta_R(U) \cdot (1 - s) \cdot (1 - b)}{2} \cdot U \quad (۵-۱)$$

لذا برای بازده خواهیم داشت:

$$\xi = \frac{P_{el,max}}{P_{Rd}} = \frac{\frac{q_e \cdot A \cdot \eta_s \cdot K_g \cdot \eta_R(U) \cdot (1 - s) \cdot (1 - b)}{2} \cdot U}{A \cdot \mathcal{E}_{avg}} \Rightarrow$$

$$\xi = \frac{U \cdot \eta_R(U) \cdot q_e \cdot \eta_s \cdot K_g \cdot (1 - s) \cdot (1 - b)}{2 \cdot \mathcal{E}_{avg}} \quad (۶-۱)$$

که اگر $\mathcal{E}_{avg}$ را بر حسب الکترون ولت قرار دهیم خواهیم داشت.

$$\xi = \frac{U \cdot \eta_R(U) \cdot \eta_s \cdot K_g \cdot (1 - s) \cdot (1 - b)}{2 \cdot \mathcal{E}_{avg}} \quad (7-1)$$

یاد آور می‌شویم که در معادله‌های بالا U ولتاژ دو سر باتری، $\eta_R(U)$ فاکتور دافعه بر اثر انباشت ولتاژ، q_e بار ذرات بتا، A اکتیویته‌ی چشمه، η_s بازده چشمه، K_g فاکتور شکل هندسی، S نسبت الکترون‌های ثانویه به الکترون‌های فرودی برای کلکتور و b نسبت الکترون‌های پس پراکنده شده به الکترون‌های فرودی برای کلکتور می‌باشد.

در نتیجه اگر بخواهیم بازده باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم را افزایش دهیم باید یک یا چند یا تمام فاکتورهای $\eta_R(U)$ ، η_s ، K_g را بیشینه و s یا b یا $\mathcal{E}_{avg}$ را کمینه کنیم.

برای پایین آوردن $\mathcal{E}_{avg}$ می‌توان از یک ماده‌ی رادیواکتیو که ذرات بتایی با میانگین انرژی پایین گسیل می‌کند استفاده کرد، در انتخاب ماده‌ی رادیو اکتیو باید به موارد زیر توجه داشته باشیم.

۱- هرچه انرژی میانگین ذرات بتای گسیل شونده از چشمه بیشتر باشد مقدار پس‌پراکندگی و تابش ثانویه از سطح چشمه نیز افزایش می‌یابد، به همین دلیل نمی‌توان از چشمه‌هایی با میانگین انرژی ذرات بالا استفاده کرد.

۲- ولتاژ انباشت (حداکثر ولتاژ در حالتی که باتری به بار متصل نباشد) توسط مقاومت نشتی و دشارژ خود به خودی در ولتاژهای بالا محدود می‌شود، بنا بر این برای ساخت DCNB با بازده بالا ایزوتوپ‌های با انرژی میانگین نسبتاً پایین مانند تریتیم یا $Pm-147$ ترجیح داده می‌شوند.

۳- چشمه‌ی انتخاب شده نباید ذره‌ی دیگری غیر از الکترون گسیل کند، مثلاً اگر چشمه‌ی مورد استفاده به غیر از الکترون، پوزیترون نیز گسیل کند، پوزیترون‌های گسیل شده هنگام رسیدن به کلکتور اثر الکترون‌ها را خنثی می‌کنند و در نتیجه اثر منفی بر روی بازده باتری دارند، در مورد پرتو

آلفا نیز این موضوع صادق است، و اگر چشمه‌ی رادیو اکتیو به کار رفته در باتری به غیر از الکترون پرتو گاما نیز گسیل کند سبب ایجاد مسمومیت رادیواکتیو در محیط اطراف می‌شود [۹].

علاوه بر موارد فوق چشمه‌ی مورد استفاده در باتری هسته‌ای باشارژ مستقیم باید دارای نیمه عمری در حد طول عمری که ما از باتری انتظار داریم باشد.

جدول ۱-۱ پاره‌ای از خصوصیات مواد رادیواکتیو Sr-90 , Pm147 , Ni-63 , Tritium [۱۱-۱۲].

Parameter	Isotope				
	Tritium	Ni-63	Pm-147	Sr-90	
Half-life, y_1	12.32	100.1	2.62	28.9	
Decay constant, S^{-1}	$1.78 \cdot 10^{-9}$	$2.2 \cdot 10^{-10}$	$8.4 \cdot 10^{-9}$	$7.6 \cdot 10^{-10}$	
Chemical compound	Ti^3H_2 Sc^3H_2	^{63}Ni	$^{147}\text{Pm}_2\text{O}_3$	$^{90}\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	
Specific activity of the chemical compound, GBq/mg (Ci/mg)	41 (1.1)	2.1 (0.057)	30 (0.8)	2.1 (0.058)	
Matrix or binder	Titanium or scandium	Metallic nickel	Enamel	Silica-titana sol-gel	Graphite, ceramic
Specific activity of the radioactive layer, GBq/mg (Ci/mg)	37 (1.0)	0.37 (0.01)	0.37(0.01)	15 (0.4)	$0.37(0.01)$ $(0.74(0.02))^a$

ما از میان موارد فوق عناصر Pm-147 و Ni-63 را انتخاب نموده و شبیه سازی‌های خود را بر پایه‌ی این دو عنصر انجام داده‌ایم.

علت انتخاب این دو عنصر این است که این مواد حد پایین و بالای طول عمر را در میان سایر موارد فوق دارند و ذرات بتا با انرژی میانگین نسبتاً پایینی گسیل می‌کنند.

مورد دیگر در رابطه‌ی ۷-۱ بازده چشمه (η_s) می‌باشد.

بازده چشمه عبارت است از نسبت تعداد ذرات بتایی که از سطح چشمه گسیل می‌شوند به تعداد ذرات بتایی که از کل چشمه گسیل می‌شوند.

تعداد ذرات بتایی که از سطح چشمه گسیل می‌شوند با تعداد ذرات بتایی که از کل چشمه گسیل می‌شوند متفاوت است که این تفاوت به دلیل اثر خودجذبی و اثر زیرلایه ایجاد می‌شود که عبارتند از:

۱- اثر خودجذبی چشمه: تعدادی از ذرات بتایی که از درون چشمه گسیل می‌شوند قبل از رسیدن به سطح چشمه توسط خود چشمه متوقف می‌شوند، که به این پدیده اثر خودجذبی چشمه می‌گویند.

۲- اثر زیرلایه: عامل دیگری که بر روی بازده چشمه تأثیر به سزایی دارد اثر زیر لایه می‌باشد، زیرلایه سطحی است که چشمه بر روی آن قرار می‌گیرد، و هر چه میزان پس‌پراکندگی حاصل از اثر زیرلایه بیش‌تر باشد بازده چشمه بیش‌تر خواهد بود.

در فصل ۳ به شرح مفصل‌تر این اثرات می‌پردازیم.

ما در بررسی بازده چشمه از کد شبیه‌سازی MCNP4C استفاده کرده‌ایم و بازده چشمه را در وضعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار داده‌ایم که در فصل ۳ به شرح این مراحل می‌پردازیم.

فاکتور S در رابطه‌ی ۷-۱ نشان دهنده‌ی نسبت الکترون‌های ثانویه به الکترون‌های فرودی بر روی کلکتور می‌باشد، که باید به حداقل مقدار ممکن برسد.

فاکتور b در رابطه‌ی ۷-۱ نشان دهنده‌ی مقدار پس‌پراکندگی از سطح کلکتور می‌باشد، که این فاکتور نیز باید به حداقل مقدار ممکن برسد.

به منظور ساده شدن مطلب، عبارت $(1 - b) \cdot (1 - s)$ در رابطه‌ی ۷-۱ را در متغیری به نام بازده

کلکتور (η_c) خلاصه می‌نمائیم و آن را این‌گونه تعریف می‌کنیم:

بازده کلکتور عبارت است از نسبت تعداد الکترون‌هایی که جذب کلکتور می‌شوند به تعداد الکترون‌هایی که به سطح کلکتور می‌رسند (برخورد می‌کنند).

پس‌پراکندگی و گسیل الکترون‌های ثانویه از عواملی هستند که باعث کم شدن بازده کلکتور می‌شوند. روشن است که استفاده از موادی که تابع کار آن‌ها در مقایسه با انرژی ذرات گسیلی از چشمه بالاتر می‌باشد برای بالا بردن بازده باتری مفید است، زیرا هرچه تابع کار کلکتور بالاتر باشد الکترون‌های ثانویه کم‌تری گسیل می‌شود. به منظور دستیابی به بازده بالا برای کلکتور از طریق شبیه‌سازی توسط کد شبیه‌سازی MCNP4C مواد مختلفی به عنوان روکش سطح کلکتور برای چشمه‌های $Pm-147$ و $Ni-63$ مورد بررسی قرار گرفته شد که نتایج در فصل‌های بعد مشاهده می‌شوند.

فاکتور بعد در رابطه‌ی ۱-۷، فاکتور شکل هندسی یعنی K_g می‌باشد، این فاکتور بیان‌گر این موضوع می‌باشد که چه کسری از ذراتی که سطح چشمه را ترک می‌کنند به مانع یا دیواره‌ای برخورد نمی‌کنند و یا از فضای بین چشمه و کلکتور خارج نشده و به کلکتور می‌رسند (در حالتی که پتانسیل بین چشمه و کلکتور صفر باشد).

مقدار K_g به شکل هندسی چشمه و کلکتور بستگی دارد و برای اشکال مختلف قابل محاسبه می‌باشد، ولی به علت این‌که هدف ما افزایش بازده باتری تا حد امکان است، باید حالت‌هایی را در نظر بگیریم که K_g برای آن‌ها بیش‌ترین مقدار، یعنی ۱ را دارد. به عنوان مثال اگر چشمه بر روی یک صفحه‌ی مسطح و کلکتور بر روی یک صفحه‌ی مسطح دیگر در مقابل آن قرار داشته باشد (مانند شکل یک خازن تخت) مقداری از ذرات تابیده شده توسط چشمه از فضای بین دو صفحه خارج می‌شوند و در نتیجه برای این سیستم K_g کمتر از ۱ است.

حال اگر دو کره‌ی هم‌مرکز را در نظر بگیریم که کره‌ی داخلی چشمه و کره‌ی خارجی حکم کلکتور را داشته باشد، در مورد این شکل هندسی K_g برابر با ۱ است زیرا تمام ذراتی که چشمه را ترک

می‌کنند به مانعی برخورد نمی‌کنند و از فضای بین چشمه و کلکتور نیز خارج نمی‌شوند و به کلکتور می‌رسند، پس این شکل هندسی یک شکل مناسب می‌باشد، شکل‌های دیگری نیز وجود دارند که این چنین خاصیتی دارند مانند یک قرص در میان یک سطح کروی و غیره.

فاکتور بعدی و آخر، فاکتور دافعه‌ی الکتریکی بر اثر انباشت ولتاژ $\eta_R(U)$ می‌باشد، که این فاکتور را در فصل پنجم مورد بررسی قرار داده‌ایم.

فصل دوم

بازده چشمه

۲-۱ عوامل مؤثر بر بازده چشمه

در فصل اول مشاهده کردیم عوامل گوناگونی بر روی بازده باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم نقش داشتند که یکی از این عوامل بازده چشمه بود، پس یکی از راه‌های افزایش بازده باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم افزایش دادن بازده چشمه‌ی رادیواکتیو به کار رفته در این باتری می‌باشد.

همان طور که در فصل یک بیان شد، بازده چشمه عبارت است از نسبت تعداد ذرات بتایی که از سطح چشمه گسیل می‌شوند به تعداد ذرات بتایی که از کل چشمه گسیل می‌شوند.

ملاحظه کردیم که دو عامل در بازده چشمه نقش داشتند، اثر خودجذبی چشمه و اثر زیرلایه (البته به منظور بررسی دقیق‌تر، در شبیه سازی‌های خود اثر پوشش سطح جانبی را نیز لحاظ کرده‌ایم).

۲-۱-۱ اثر خودجذبی چشمه

تعدادی از ذرات بتایی که از درون چشمه گسیل می‌شوند قبل از رسیدن به سطح چشمه توسط خود چشمه متوقف می‌شوند، که به این پدیده اثر خودجذبی چشمه می‌گویند.

فرض کنید یک چشمه‌ی مسطح گسیلنده‌ی بتا به ضخامت t در هر ثانیه S ذره‌ی بتا در جهت مثبت محور X ها گسیل می‌کند، اگر خود جذبی وجود نداشته باشد، S بتا در هر ثانیه چشمه را ترک خواهند کرد (به سوی X های مثبت).

بتاهایی که در محدوده‌ی dx اطراف X تولید می‌شوند برای خروج از چشمه باید موفق شوند از ضخامت $(t-x)$ بگذرند.

احتمال فرار برابر با $e^{-\mu(t-x)}$ است، که در آن μ ضریب تضعیف برای ذرات بتا در ماده‌ای است که چشمه از آن ساخته شده است.

تعداد کل بتاهایی که فرار می کنند عبارت است از:

$$\int_0^t \frac{dx}{t} S e^{-\mu(t-x)} = \frac{S}{t\mu} (1 - e^{-\mu t}) \quad (1-2)$$

ضریب خود جذبی f_a به صورت زیر تعریف می شود.

$$f_a = \frac{\text{تعداد ذراتی که چشمه ی خود جاذب را ترک می کنند}}{\text{تعداد ذراتی که چشمه ی نا خود جاذب را ترک می کنند}} \quad (2-2)$$

با استفاده از نتیجه هایی که از بالا به دست آمد:

$$f_a = \frac{\left(\frac{S}{t\mu}\right) (1 - e^{-\mu t})}{S} = \frac{1}{\mu t} (1 - e^{-\mu t}) \quad 0 \leq f_a \leq 1 \quad (3-2)$$

در رابطه ی بالا t ضخامت چشمه و μ ضریب تضعیف جرمی برای ذره ی بتا می باشد، ضریب تضعیف جرمی از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\mu = 1.7 E_{\max}^{-1.14} \quad (4-2)$$

در رابطه ی بالا $E_{\max}$ انرژی جنبشی بیشینه ی ذرات بتای گسیل شونده از چشمه بر حسب MeV می باشد. [۲۵]

اکنون فرض می کنیم چشمه ی Pm-147 که قرار است از آن در باتری هسته ای استفاده کنیم از این رابطه پیروی کند.

برای این چشمه داریم $E_{\max} = 225 \text{ KeV}$ و فرض می‌کنیم ضخامت چشمه برابر با یک میکرو متر باشد، f_a را با استفاده از رابطه‌ی ۳-۳ محاسبه می‌کنیم:

$$\mu t = 1.7 \cdot 0.225^{-1.14} \cdot 722 \cdot 10^{-6} = 0.006721$$

$$f_a = \frac{1}{\mu t} (1 - e^{-\mu t}) = \frac{1}{0.006722} (1 - e^{-0.006721}) = 0.996$$

یعنی ۰/۹۹۶ از شار گسیل شده از چشمه خارج می‌شود و اگر ذرات خروجی از یک سمت چشمه را در نظر بگیریم با توجه به این که شار خروجی نصف می‌شود f_a برابر می‌شود با ۰/۴۹۸.

انتظار داریم مقدار حاصل از شبیه سازی کم‌تر از مقدار فوق شود، زیرا شار گسیل شده از چشمه در شبیه سازی در تمام جهات منتشر می‌شود و نه فقط در راستای محور X ، پس برای خروج از چشمه باید مسافت بیشتری را طی کند و احتمال جذبش در ماده بیشتر می‌شود.

اکنون به منظور مقایسه‌ی این مقدار و مقدار تجربی، چشمه‌ای با مشخصات فوق را توسط کد MCNP4C شبیه سازی می‌کنیم.

نتیجه‌ی حاصل از شبیه سازی برای f_a برابر با ۴۵٪ می‌باشد، یعنی به اندازه‌ی ۴/۸٪ از مقدار به‌دست آمده از روش تحلیلی کم‌تر است.

۲-۱-۲ اثر زیرلایه:

عامل دیگری که بر روی بازده چشمه تأثیر به سزایی دارد اثر زیر لایه می‌باشد، زیرلایه سطحی است که چشمه بر روی آن قرار می‌گیرد، و هر چه میزان پس‌پراکندگی حاصل از اثر زیرلایه بیش‌تر باشد بازده چشمه بیش‌تر خواهد بود، برای این اثر ضریب پس پراکندگی f_b را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f_b = \frac{\alpha}{\beta} \quad (5-2)$$

در رابطه‌ی بالا α تعداد ذرات خروجی از چشمه با زیرلایه و β تعداد ذرات خروجی از چشمه بدون زیرلایه می‌باشد.

پس پراکندگی به این معنا می‌باشد که یک ذره (در اینجا الکترون) پس از برخورد با سطح یک ماده دچار بازتاب شود و به عقب برگردد. روشن است که:

$$1 \leq f_b \leq 2 \quad (6-2)$$

این ضریب به سه متغیر وابسته است:

۱- ضخامت زیرلایه (b).

۲- انرژی جنبشی ذره (T).

۳- عدد اتمی زیرلایه (Z). [۲۶]

۱- ضخامت زیرلایه: باید انتظار داشت که وقتی ضخامت زیر لایه به سمت صفر میل می‌کند، پس پراکندگی چشمه (f_b) به ۱ میل کند و با افزایش ضخامت زیرلایه پس پراکندگی به یک مقدار اشباع برسد زیرا ذرات بار دار برد معینی در ماده دارند.

از این رو فاصله‌ی بیشینه‌ای وجود دارد که ذرات بتا می‌توانند در داخل ماده‌ی زیرلایه پیش روند، پس پراکنده شوند و سپس زیرلایه را در خلاف جهت بپیمایند و از آن خارج شوند، بنابراین حد بالای این ضخامت:

$$b = \frac{R}{2} \quad (۷-۲)$$

است، که R برد ذرات می باشد، آزمایش ها نشان داده اند که:

$$b_s = b(\text{saturation}) \approx 0.2R \quad (۸-۲)$$

یعنی اثر زیرلایه در این ضخامت به حد اکثر مقدار خود می رسد. [۲۷]

۲- انرژی جنبشی ذره: از قانون سطح مقطع پراکندگی کلاسیک رادرفورد برای الکترون ها از هسته ای اتم های هدف در زاویه ی فضایی دیفرانسیلی $d\omega$ و زاویه ی اصلی ϑ در سیستم آزمایشگاه داریم:

$$d\sigma = \frac{z^2}{4} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 \left(\frac{1 - \beta^2}{\beta^4} \right) \frac{1}{\sin^4 \left(\frac{\vartheta}{2} \right)} d\omega \quad (۹-۲)$$

که در معده ی بالا m_0 جرم سکون الکترون، Z عدد اتمی هدف و β سرعت الکترون تقسیم بر سرعت نور می باشد. روشن است که با افزایش انرژی جنبشی الکترون، سرعت آن افزایش پیدا می کند و در نتیجه β افزایش می یابد و با افزایش β در رابطه ی ۳-۹، $d\sigma$ یعنی سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی کاهش می یابد لذا سطح مقطع کل کاهش می یابد. پس نتیجه می گیریم با افزایش انرژی جنبشی ذرات، احتمال پس پراکندگی کاهش می یابد. [۲۸]

۳- عدد اتمی زیرلایه: در مورد یک ذره ی باردار سبک مانند الکترون پس پراکندگی هنگامی اتفاق می افتد که این ذره توسط اتم های جسم مورد تابش منحرف گردد، نیرویی که از طرف هسته ی یک اتم بر الکترون فرودی وارد می شود برابر است با:

$$F = \frac{Ze^2}{r^2} \quad (۱۰-۲)$$

و شتابی که این نیرو بر الکترون وارد می‌کند برابر است با:

$$a = \frac{Ze^2}{r^2 m_e} \quad (۱۱-۲)$$

با توجه به رابطه‌ی بالا نتیجه می‌گیریم که اگر ذره در محیطی با عدد اتمی (Z) بالا حرکت کند شتابش بیشتر از هنگامی است که در محیطی با عدد اتمی پایین حرکت کند، پس در نتیجه احتمال پس پراکندگی بیشتر خواهد بود. [۲۹]

۲-۲ نحوه‌ی شبیه سازی توسط کد MCNP4C

با پیشرفت در زمینه‌ی علوم کامپیوتر، روش مونت کارلو (حل مسائل ریاضی به کمک اعداد تصادفی) نیز پیشرفت‌های زیادی کرده و کامپیوتر در محاسبات مونت کارلو به کار گرفته شد. به این ترتیب در سال ۱۹۶۳ در لوس آلاموس^۱ اولین کد مونت کارلویی ترابرد ذرات به نام MCS نوشته شد.

در سال ۱۹۶۵ به دنبال MCS و MCN برای حل مسائل اندرکنش نوترون نوشته شده و در نهایت، در سال ۱۹۷۷، با توسعه و ادغام چندین برنامه که برای ذرات مختلف نوشته شده بود، کد MCNP^۲ که در آن زمان کد مونت کارلویی نوترون- فوتون نامیده می‌شد، تهیه گردید. باگذشت زمان، این کد توسعه داده شد و به صورت نسخه‌های مختلفی (از جمله MCNP3، MCNP4، MCNPX) به بازار عرضه گردید. نسخه‌ی MCNP4C، نتیجه‌ی تلاش تقریباً ۵۰۰ نفر- سال است که در سال ۲۰۰۰ منتشر شده است [۲۳، ۲۴].

^۱. Los Alamos

^۲. Mont Carlo N-Particles

در بررسی بازده چشمه از کد شبیه سازی MCNP4C استفاده کرده‌ایم و بازده چشمه را در وضعیت‌های مختلف و مواد مختلف به عنوان زیرلایه و پوشش سطح جانبی مورد بررسی قرار داده‌ایم.

در فایل ورودی این کد شکل هندسی جسم مورد شبیه سازی، مشخصات مواد تشکیل دهنده‌ی اجسام یا سلول‌های مورد شبیه سازی و مشخصات چشمه و همچنین خروجی مورد نظر (شار ذرات، جریان ذرات و ...) مشخص می‌گردد. در فایل خروجی آنچه که در ورودی کد توسط دستورات خروجی مشخص شده باشد ظاهر می‌گردد، به عنوان مثال اگر در فایل ورودی جریان عبوری از سطح شماره ۱ به عنوان خروجی مشخص شده باشد در فایل خروجی کد، جریان عبوری از سطح شماره ۱ به همراه خطای آماری ظاهر خواهد شد. برای آشنایی کامل با نحوه‌ی شبیه سازی توسط این کد می‌توان به مراجع ۲۳ و ۲۴ رجوع کرد.

۲-۳ بررسی عوامل مؤثر بر افزایش بازده چشمه‌ی Pm-147

۲-۳-۱ بررسی بازده چشمه‌ی استوانه‌ای Pm-147 از نظر شکل هندسی

در این بخش ابتدا جریان خروجی از سطوح قاعده‌ها و سطح جانبی یک چشمه‌ی Pm-147 استوانه‌ای با شعاع قاعده‌ی $1\text{ }\mu\text{m}$ و ارتفاع (ضخامت چشمه) متغیر از $0.2\text{ }\mu\text{m}$ تا $4\text{ }\mu\text{m}$ را با گام‌های $0.2\text{ }\mu\text{m}$ در دو وضعیت مختلف توسط کد شبیه سازی MCNP4C مورد بررسی قرار دادیم (تمامی نتایج و شکل‌ها در این فصل، حاصل از شبیه سازی با کد MCNP4C می‌باشند).

در وضعیت اول برای چشمه ماده‌ای در نظر گرفته نشد و در وضعیت دوم خود Pm-147 به عنوان ماده‌ی چشمه در نظر گرفته شد.

برای یک چشمه‌ی استوانه‌ای که ماده‌ای در آن حضور نداشته باشد بازده عبارت است از نسبت جریان

خروجی از سطح یک قاعده به جریان خروجی از کل سطوح استوانه، و بازده برای یک چشمه‌ی استوانه‌ای واقعی (چشمه‌ای که ماده‌ی چشمه در آن حضور داشته باشد) عبارت است از نسبت جریان خروجی از سطح یک قاعده‌ی چشمه به کل بار الکتریکی آزاد شده از بطن چشمه در واحد زمان. اگر یک استوانه را در نظر بگیریم نسبت سطح یک قاعده به سطح کل استوانه عبارت است از:

$$\frac{\text{سطح یک قاعده}}{\text{سطح کل}} = \frac{\pi r^2}{2\pi r l + 2\pi r^2} = \frac{r}{2 \cdot (l + r)} \quad (12-2)$$

که در معادله‌ی بالا r شعاع قاعده و l ارتفاع استوانه می‌باشد.

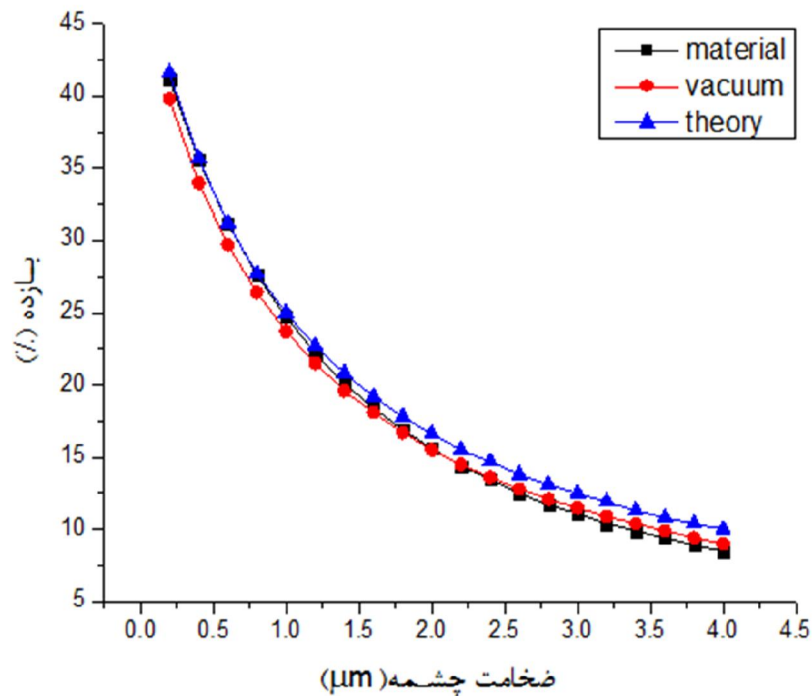
با توجه به این که چشمه‌ی شبیه سازی شده یک چشمه‌ی همگن (توزیع شار ذرات تابشی در تمام جهات یکنواخت است) می‌باشد، بازده چشمه در صورت عدم حضور ماده باید از رابطه‌ی ۱۲-۳ طبیعت کند، که برای اینکه به صورت درصد در بیاید آن را در ۱۰۰ ضرب می‌نماییم.

$$\eta(l, r) = \frac{r}{(l + r)} \cdot 50 \quad (13-2)$$

رابطه‌ی ۱۳-۳ نشان می‌دهد که بازده چشمه نسبت به افزایش ضخامت چشمه (l) روند کاهشی دارد. اگر شعاع چشمه را برابر با $1\mu\text{m}$ قرار دهیم داریم (ضخامت را نیز بر حسب میکرومتر در نظر می‌گیریم):

$$\eta(l)\% = \frac{1}{(l + 1)} \cdot 50 \quad (14-2)$$

اکنون این تابع و بازده برای چشمه‌ی شبیه سازی شده‌ی Pm-147 استوانه‌ای با شعاع $1\mu\text{m}$ بدون ماده‌ی چشمه و با ماده‌ی چشمه را در یک شکل رسم می‌نماییم:



شکل (۲-۱). نسبت جریان خروجی از سطح یک قاعده به کل جریان خروجی از یک چشمه ی Pm-147 استوانه ای باشعاع ۱μm در سه وضعیت، تئوری (رابطه ۱)، بدون حضور ماده ی چشمه و با حضور ماده ی چشمه.

با توجه به شکل ۲-۱ همان طور که انتظار داشتیم با افزایش ضخامت چشمه بازده آن کاهش می یابد. ملاحظه می نمائیم در ضخامت های خیلی کم بر خلاف انتظار بازده چشمه با ماده بیشتر از بازده چشمه بدون ماده می باشد، و علت این پدیده نیز ایجاد الکترون های ثانویه است، اما در ضخامت های بیشتر، اثر خود جذبی چشمه پر رنگ تر شده و خود را نشان می دهد، در نتیجه بازده چشمه با ماده از بازده چشمه بدون ماده کمتر می شود.

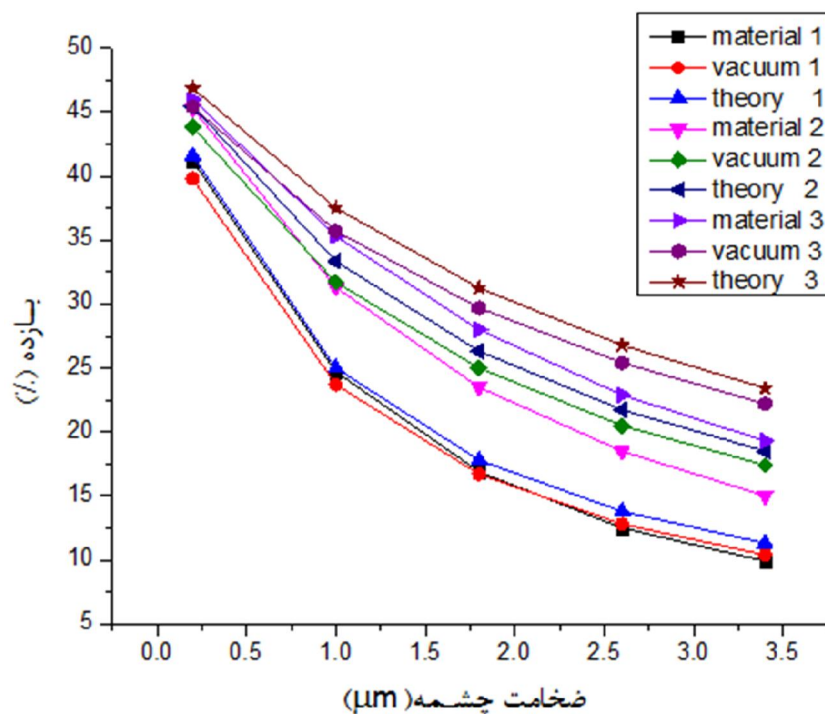
داده های تئوری و شبیه سازی انطباق خوبی با هم دارند و بیشترین اختلافی که با هم دارند ۱/۸٪ است، که به علت خطای آماری شبیه سازی مونت کارلو می باشد.

بازده چشمه با حضور ماده ی چشمه همواره کمتر از بازده تئوری می باشد و اختلاف بین این دو کمیت با افزایش ضخامت چشمه بیشتر می شود، زیرا همه ی الکترون هایی که از داخل چشمه گسیل می شوند به سطح چشمه نمی رسند. و تعدادی از آنها توسط خود چشمه جذب می شوند، این پدیده همان

اثر خودجذبی چشمه است، که با توجه به شکل ۳-۱ این اثر را می‌توان به وضوح مشاهده کرد. در ادامه

مراحل شبیه سازی چشمه‌ی بدون حضور ماده و با حضور ماده برای شعاع‌های قاعده‌ی $2\mu\text{m}$ و $3\mu\text{m}$

تکرار شد و نتایج مربوط به این مراحل در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است.



شکل (۲-۲). مقایسه‌ی چشمه‌ی Pm-147 در سه وضعیت، تئوری، بدون حضور ماده‌ی چشمه و با حضور ماده‌ی چشمه با سه شعاع $1\mu\text{m}$ و $2\mu\text{m}$ و $3\mu\text{m}$.

همان‌طور که انتظار داریم با بررسی شکل بالا به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش شعاع چشمه نسبت

به ضخامت آن بازده نیز افزایش می‌یابد، که فرمول ۲-۱۳ نیز برای بازده تئوری چشمه‌ی استوانه‌ای این

موضوع را تصدیق می‌کند:

$$\eta(l, r) = \frac{r}{(l + r)} \cdot 50 \quad (2-13)$$

اگر از رابطه‌ی فوق نسبت به شعاع مشتق بگیریم خواهیم داشت:

$$\frac{d\eta(l,r)}{dr} = \frac{2(l+r) - 2r}{4(l+r)^2} = \frac{2l}{4(l+r)^2} \quad (15-2)$$

در عبارت فوق r شعاع و l ضخامت چشمه می باشد.

رابطه‌ی ۱۵-۲ همواره مثبت است زیرا شعاع و ضخامت مقادیری مثبت هستند، پس همان طور که شکل نیز نشان می دهد بازده چشمه با افزایش شعاع افزایش می یابد.

۲-۳-۲ بررسی تغییرات بازده چشمه‌ی Pm-147 نسبت به تغییر مواد زیرلایه و

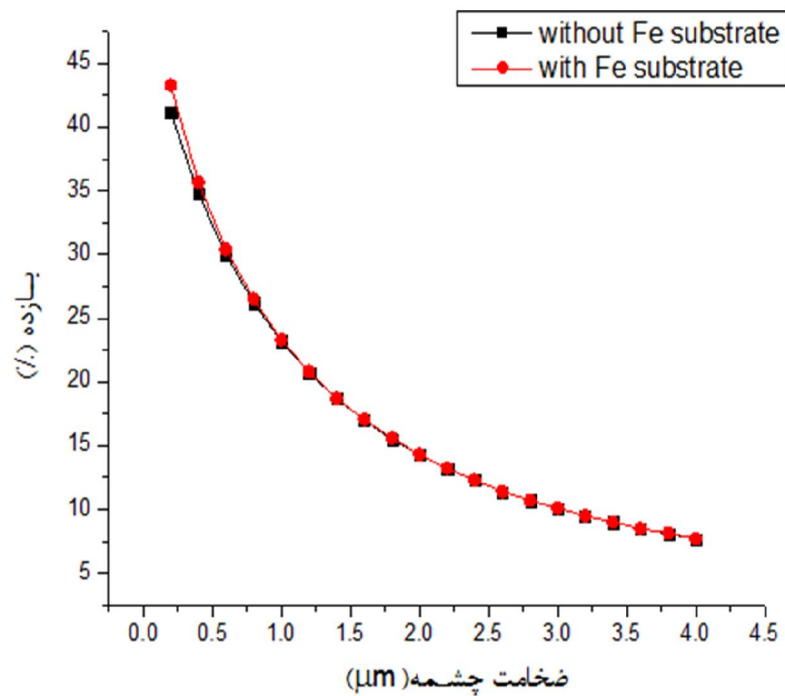
پوشش سطح جانبی

در این قسمت اقداماتی به منظور افزایش بازده چشمه‌ی Pm-147 انجام شد که به ترتیب به شرح آن ها می پردازیم:

۱-۲-۳-۲ بررسی اثر زیرلایه‌ی آهن بر بازده چشمه‌ی Pm-147

در این مرحله و مرحله‌ی بعد به منظور بررسی این مطلب که آیا زیرلایه و پوشش سطح جانبی اثر مطلوبی بر افزایش بازده دارند یا نه چشمه‌ی Pm-147 را با زیرلایه و پوشش سطح جانبی شبیه سازی کرده و به تحلیل نتایج پرداخته ایم.

ابتدا برای چشمه‌ی استوانه‌ای Pm-147 به شعاع قاعده‌ی $1\mu m$ زیرلایه‌ای از جنس آهن در نظر گرفته و آن را توسط کد MCNP4C شبیه سازی کرده و بازده آن را در بازه‌ی ضخامت چشمه از $0.2\mu m$ تا $4\mu m$ با گام $0.2\mu m$ به دست آورده و نتایج حاصل از شبیه سازی چشمه‌ی Pm-147 با همین ابعاد اما بدون زیر لایه‌ی آهن را نیز بدست آورده و به منظور مقایسه‌ی ساده تر این نتایج را در شکل ۳-۲ ترسیم نموده ایم.



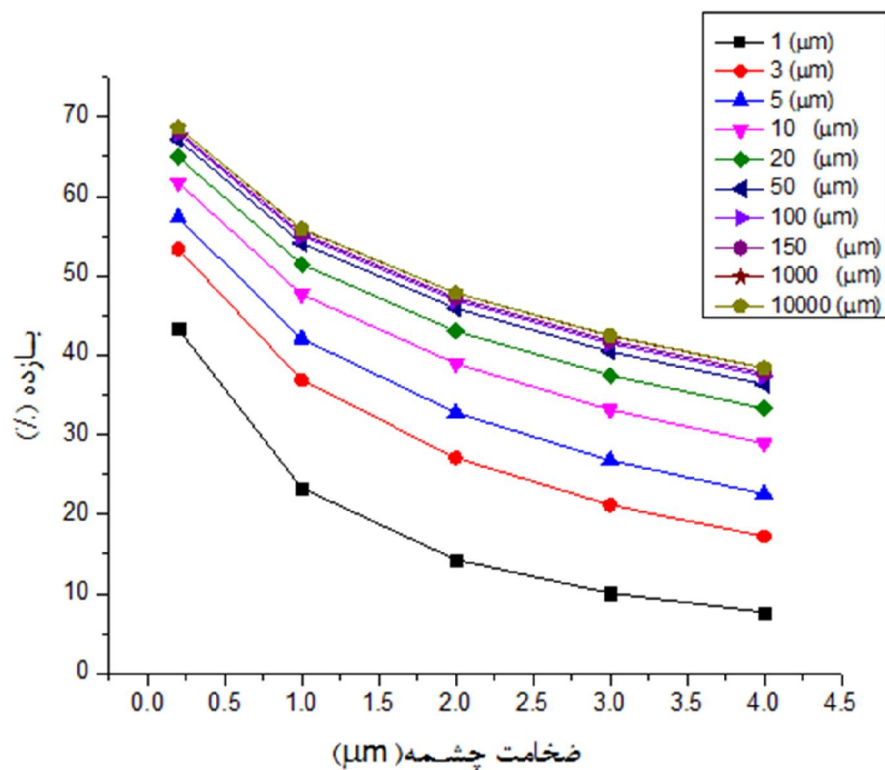
شکل (۲-۳). مقایسه‌ی بازده چشمه‌ی Pm-147 به شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ با زیرلایه‌ی آهن و بدون زیرلایه‌ی آهن.

با بررسی این شکل متوجه می‌شویم در ضخامت‌های کم بازده افزایش پیدا کرده اما در ضخامت‌های بیشتر مثلاً $4\mu\text{m}$ بازده با حالت اول یعنی بدون زیر لایه‌ی آهن تفاوتی ندارد، میزان اختلاف بازده در کمترین ضخامت برای چشمه در شکل بالا ۲/۱٪ می‌باشد.

علت انطباق دو منحنی در ضخامت‌های زیاد این است که با زیاد شدن ضخامت چشمه الکترون‌های پس پراکنده شده و ثانویه‌ای که از زیرلایه گسیل می‌شوند توسط خود چشمه جذب شده و به خارج از آن راه پیدا نمی‌کنند، در نتیجه در این وضعیت بازده چشمه با زیرلایه و بدون زیرلایه تقریباً برابر می‌شود.

در حالت بعد به منظور بررسی این موضوع که آیا با تغییر شعاع قاعده چشمه با زیرلایه، تغییری در بازده چشمه ایجاد می‌شود یا خیر، شعاع چشمه با زیرلایه را افزایش داده‌ایم، نتایج این حالت را در

شکل ۲-۴ ملاحظه می‌نمائید:

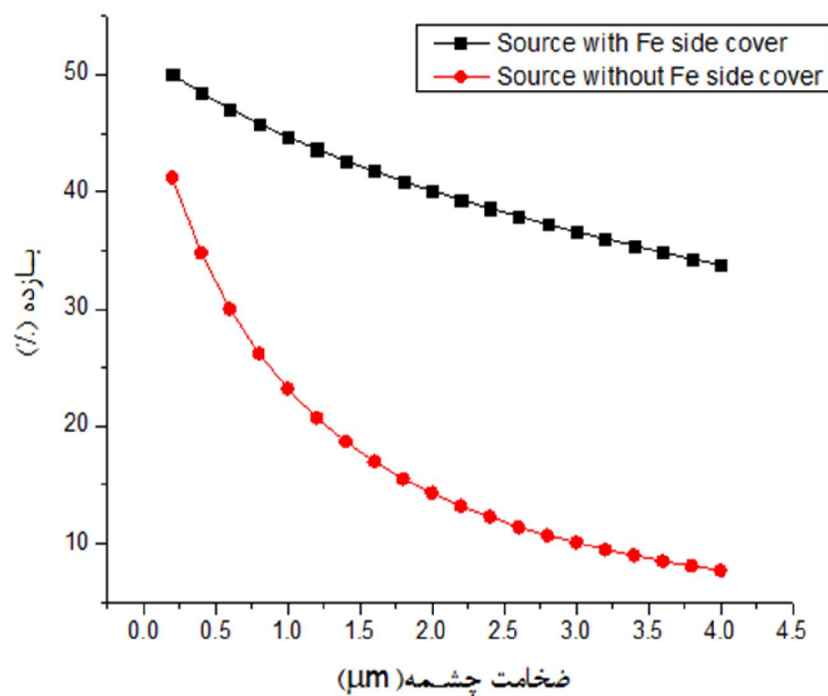


شکل (۲-۴). بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آهن و شعاع متغیر.

با توجه به شکل ۲-۴ به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش شعاع چشمه بازده نیز افزایش می‌یابد اما تقریباً در شعاع $150\text{ }\mu\text{m}$ روند افزایش بازده متوقف گشته و بازده در ضخامت کم (برای چشمه) به مقدار حدی $68/5\%$ می‌رسد.

۲-۲-۳-۲ بررسی اثر پوشش سطح جانبی آهن بر بازده چشمه‌ی Pm-147

در این مرحله به منظور افزایش بازده چشمه‌ی Pm-147 سطح جانبی آن را با آهن پوشانده‌ایم، نتایج این قسمت را در شکل ۲-۵ ملاحظه می‌نمائید.



شکل (۲-۵). بازده چشمه‌ی Pm-147 به شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ با پوشش سطح جانبی آهن و بدون پوشش سطح جانبی آهن.

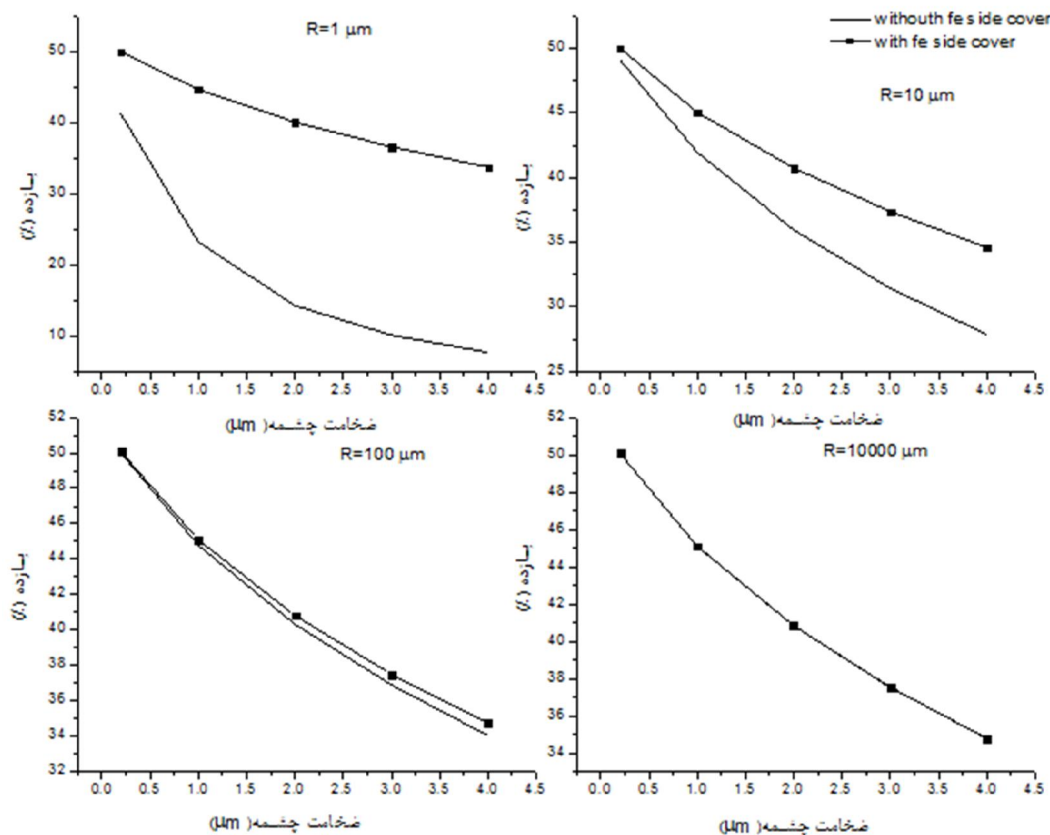
با توجه به شکل ۲-۵ به این نتیجه می‌رسیم که قرار دادن پوشش سطح جانبی آهن به دور چشمه بازده آن را به مقدار قابل توجهی هم در ضخامت‌های کم و هم در ضخامت‌های زیاد برای چشمه بالا برده است.

اختلاف بازده میان این دو حالت در کم‌ترین ضخامت چشمه $8/8\%$ و در بیشترین ضخامت چشمه $26/06\%$ می‌باشد که مقدار نسبتاً زیادی می‌باشد.

پس از این نتیجه به بررسی این موضوع پرداختیم که آیا این افزایش بازده که در نتیجه‌ی قرار دادن پوشش سطح جانبی آهن برای چشمه حاصل شده است نسبت به افزایش سطح قاعده‌ی چشمه پایدار است یا خیر.

به منظور بررسی این موضوع سطح چشمه را نسبت به مرحله‌ی قبل افزایش دادیم، نتایج مربوط به

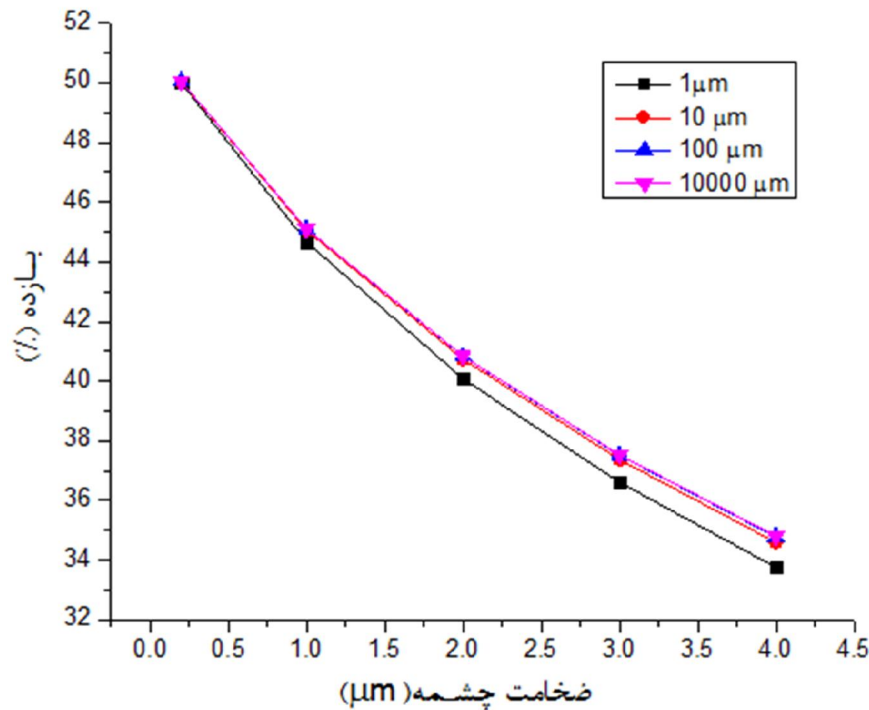
این قسمت در شکل ۶-۲ مشاهده می‌شود.



شکل (۶-۲). در این چهار شکل بازده چشمه ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف مشاهده می‌شود، و در هر مورد شکل چشمه ی Pm-147 بدون پوشش سطح جانبی نیز به منظور مقایسه ی راحت تر ترسیم گشته است.

با توجه به شکل ۶-۲ به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش شعاع چشمه اثر پوشش سطح جانبی کاهش می‌یابد و رفته رفته با افزایش شعاع چشمه، بازده چشمه با پوشش سطح جانبی و بدون پوشش سطح جانبی برابر می‌شوند.

اکنون به منظور مقایسه، بازده چشمه ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف را در یک شکل رسم می‌نمائیم.



شکل (۲-۷). بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف.

با توجه به شکل بالا به این نتیجه می‌رسیم که بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن تقریباً در ضخامت $10 \mu\text{m}$ به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد و پس آن با افزایش شعاع چشمه تغییر چندانی نمی‌کند.

با توجه به شکل ۲-۶ اگر بخواهیم یک چشمه‌ی Pm-147 داشته باشیم که شعاع آن زیر $100 \mu\text{m}$ باشد، قرار دادن پوشش سطح جانبی آهن برای آن در افزایش بازده چشمه مؤثر است، در غیر این صورت قرار دادن پوشش سطح جانبی آهن تأثیر چندانی در افزایش بازده چشمه‌ی Pm-147 ندارد.

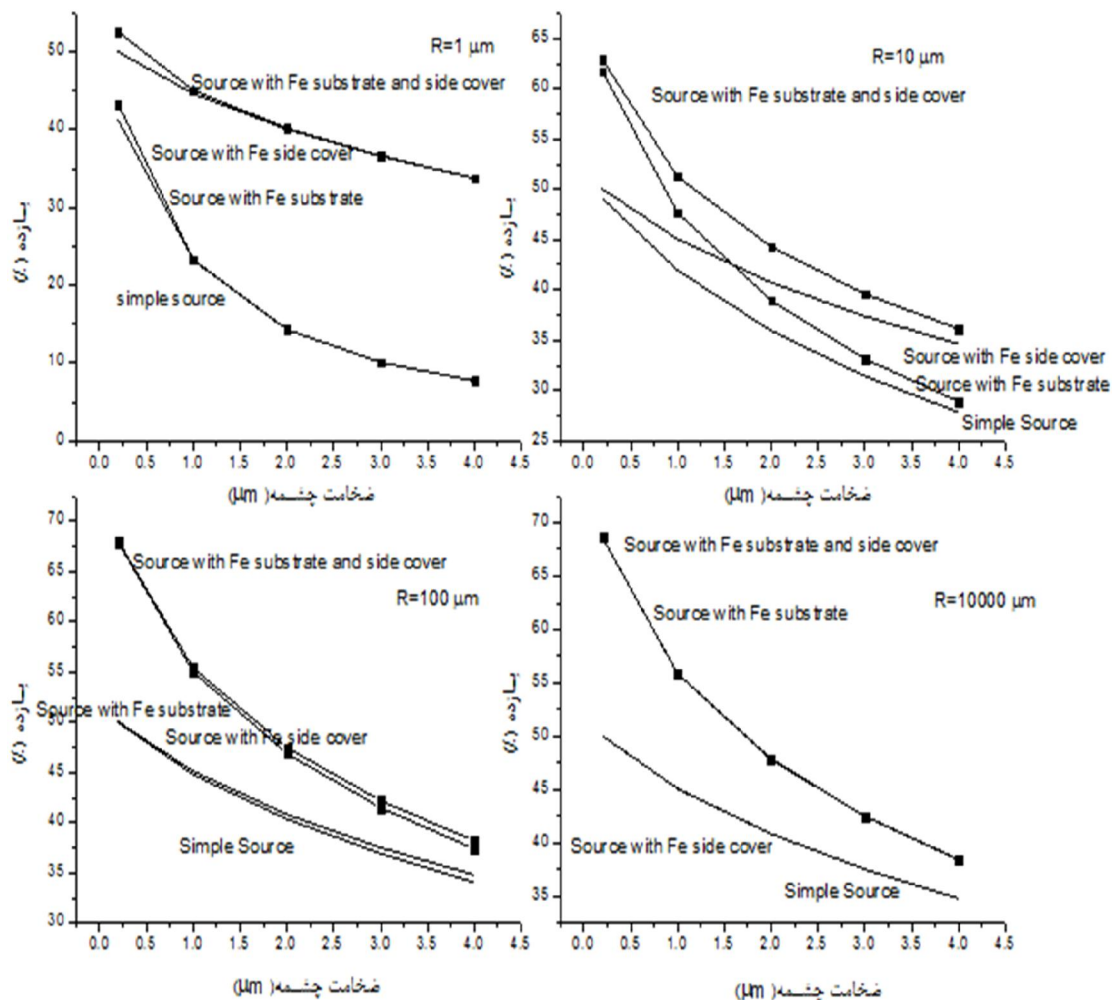
۳-۲-۳-۲ بررسی اثر زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن بر بازده چشمه‌ی

Pm-147

در مراحل قبل مشاهده شد که هر دو روش قرار دادن زیرلایه‌ای از جنس آهن و پوشش سطح جانبی از آهن برای چشمه‌ی Pm-147 تأثیر مثبتی در افزایش بازده چشمه‌ی Pm-147 دارد، با توجه به این

موضوع در مرحله‌ی بعد به منظور افزایش بازده چشمه‌ی Pm-147، برای آن هم زیر لایه‌ای از آهن و هم پوشش سطح جانبی از آهن در نظرمی‌گیریم.

نتایج مربوط به این قسمت را در شکل ۲-۸ مشاهده می‌نمائید.

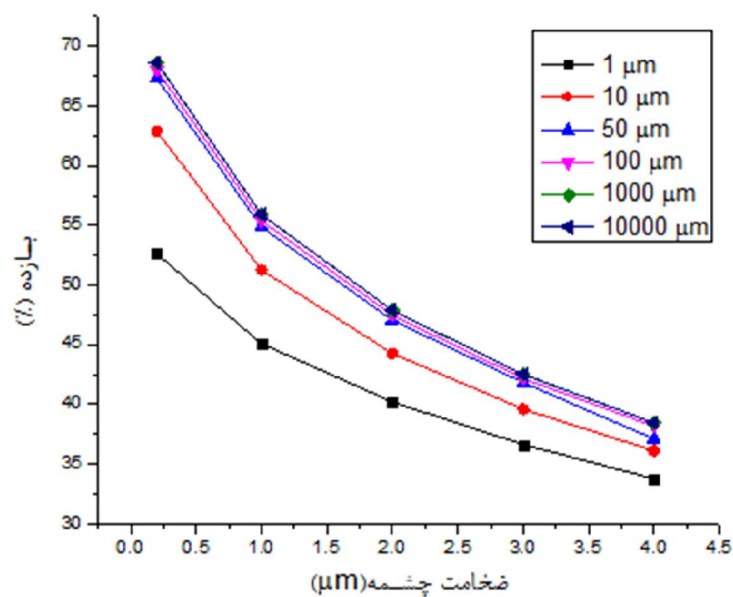


شکل (۲-۸). در شکل فوق بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌ها و ضخامت‌های مختلف رسم گردیده و به منظور مقایسه‌ی ساده‌تر حالت‌های قبلی (چشمه‌ی عادی، چشمه با زیرلایه‌ی آهن و چشمه با پوشش سطح جانبی آهن) نیز در هر مورد ترسیم گشته است.

با توجه به شکل ۲-۸ به این نتیجه می‌رسیم که در تمام ضخامت‌ها و شعاع‌ها، بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن از سایر موارد (چشمه‌ی عادی، چشمه با زیرلایه‌ی آهن و چشمه با پوشش سطح جانبی آهن) بیش‌تر می‌باشد، و بازده در این وضعیت با افزایش ضخامت

چشمه کاهش و با افزایش شعاع چشمه افزایش می‌یابد.

نتیجه‌ی دیگری که از شکل شماره ۲-۸ حاصل می‌شود این است که افزایش بازده در این مورد نیز نسبت به افزایش شعاع چشمه به یک مقدار حدی می‌رسد، و برای این که متوجه شویم تقریباً در چه شعاعی به بازده حدی می‌رسیم و مقدار حدی بازده چیست، بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن را در شعاع‌های مختلف در یک شکل ترسیم می‌نمائیم.



شکل (۲-۹). بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف.

با توجه به شکل بالا چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن تقریباً در شعاع ۱۰۰ μm به مقدار حدی می‌رسد، و مقدار بازده در این شعاع و در ضخامت ۰/۲ μm، ۶۸٪ می‌باشد.

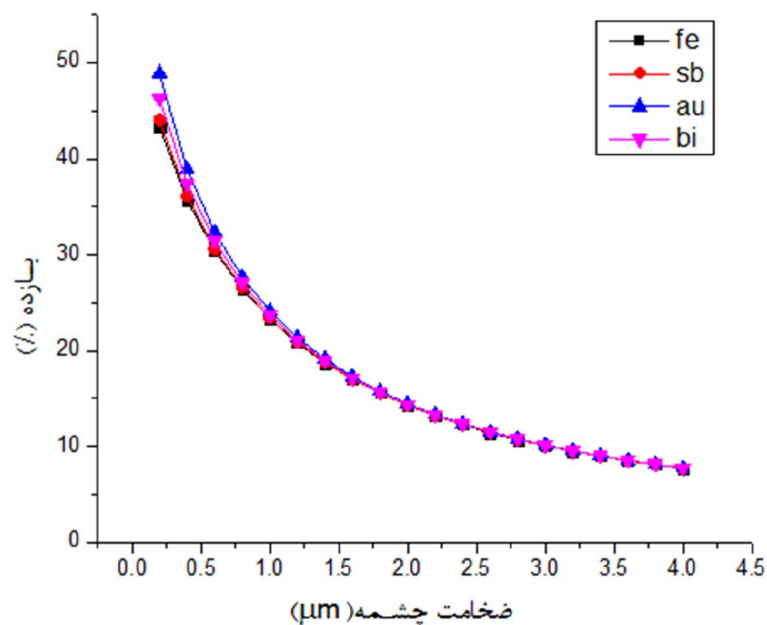
۲-۳-۲ بررسی زیرلایه‌های آنتیموان، طلا و بیسموت بر بازده چشمه‌ی

رادیواکتیو Pm-147

در این قسمت مراحل بخش‌های قبلی یعنی قرار دادن زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن برای چشمه‌ی Pm-147 را به همان ترتیب بالا با عناصر آنتیموان طلا و بیسموت تکرار کرده و مقادیر بدست آمده را در هر مرحله با هم مقایسه کرده‌ایم.

علت انتخاب آنتیموان این است که آنتیموان یک عنصر با تابش الکترون ثانویه‌ی بالا می‌باشد و انتظار داریم بر روی بازده چشمه تاثیر مثبت داشته باشد (البته اگر به عنوان پوشش سطح جانبی استفاده شود، زیرا انرژی الکترون‌های ثانویه در حد چند ده الکترون ولت است و اگر از زیرلایه گسیل شوند نمی‌توانند از چشمه بگذرند و به کلکتور برسند) و علت انتخاب طلا نیز این است که طلا به عنوان بدترین ماده برای استفاده به عنوان روکش سطح کلکتور شناسایی شد، یعنی بیشترین تابش الکترون ثانویه و پس پراکندگی را در میان مواد دیگری که به عنوان روکش سطح کلکتور به کار رفتند داشت، و برای زیر لایه و پوشش سطح جانبی ماده‌ای که انتخاب می‌شود بر خلاف روکش کلکتور، باید بیشترین مقدار پس پراکندگی و تابش ثانویه‌ی الکترون را داشته باشد تا بتواند به افزایش جریان خروجی از سطح چشمه کمک کند، لذا این ماده را نیز به عنوان زیرلایه و پوشش سطح جانبی مورد بررسی قرار دادیم و بیسموت نیز به این دلیل انتخاب گردید که در بین عناصر غیر رادیواکتیو بزرگترین عدد اتمی را دارد، هر چه عدد اتمی ماده بیشتر باشد احتمال پس پراکندگی الکترون بیشتر است و همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، چنین ماده‌ای برای استفاده به عنوان زیرلایه مناسب می‌باشد.

در ابتدا برای چشمه‌ی Pm-147 به شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ را با زیرلایه‌هایی از جنس آنتیموان، طلا و بیسموت شبیه سازی نمودیم، نتایج این قسمت را در شکل (۲-۱۰) مشاهده می‌نمائید:

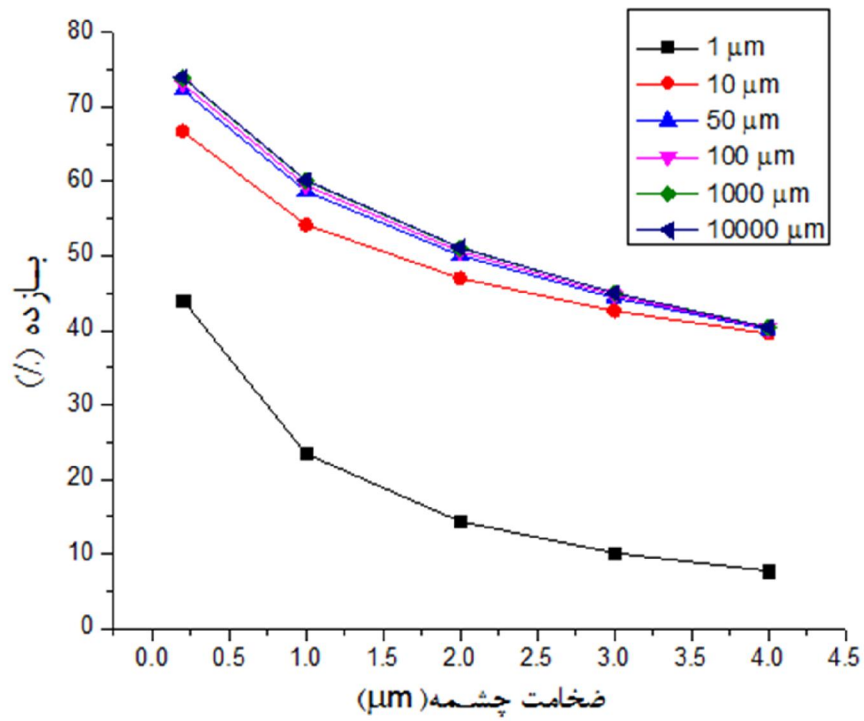


شکل (۲-۱۰). بازده چشمه‌ی Pm-147 با شعاع ۱ μm و زیر لایه‌ی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت.

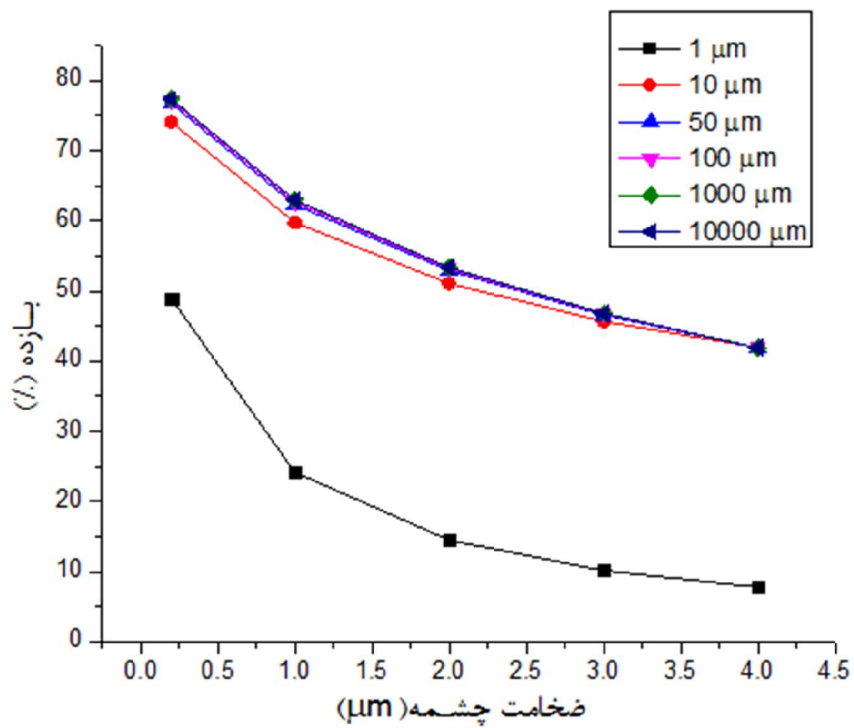
با بررسی شکل ۲-۱۰ به این نتیجه خواهیم رسید که در ضخامت‌های کم (برای چشمه) بازده چشمه با زیر لایه‌ی طلا از بازده چشمه با زیر لایه‌ی آهن، آنتیموان و بیسموت بیشتر می‌باشد، اما در ضخامت‌های بالا به دلیل کاهش اثر زیر لایه بازده چشمه با زیر لایه‌های مختلف تقریباً به یک مقدار مساوی می‌رسد.

در کم‌ترین ضخامت چشمه‌ی Pm-147 مربوط به این شکل (۲ μm) بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیر لایه‌ی آهن ۴۳/۳٪، با زیر لایه‌ی آنتیموان ۴۴٪، با زیر لایه‌ی طلا ۴۸/۹٪ و با زیر لایه‌ی بیسموت ۴۶/۲۸٪ می‌باشد، که نشان می‌دهد بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیر لایه‌ی طلا در ضخامت‌های کم از بازده چشمه با زیر لایه‌ی آهن و آنتیموان بیشتر است.

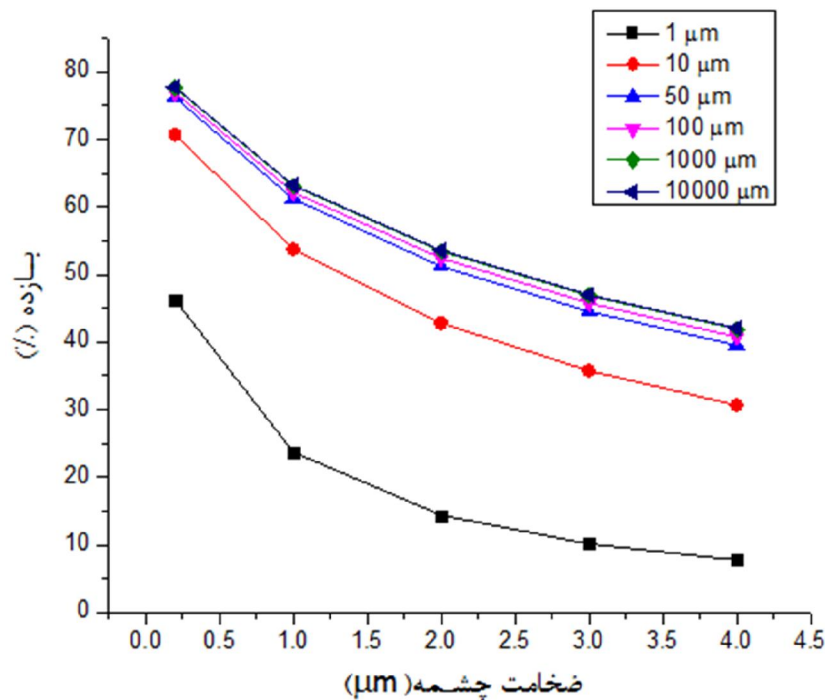
در مرحله‌ی بعد همین حالت را برای زیر لایه‌ی آنتیموان طلا و بیسموت با شعاع‌های بیشتری برای چشمه تکرار کردیم و نتایج در شکل‌های ۲-۱۱ و ۲-۱۲ و ۲-۱۳ مشاهده می‌شوند.



شکل (۲-۱۱). بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آنتیموان و شعاع‌های مختلف.



شکل (۲-۱۲). بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی طلا و شعاع‌های مختلف.



شکل (۲-۱۳). بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی بیسموت و شعاع‌های مختلف.

همان طور که ملاحظه می‌نمائید با افزایش شعاع چشمه بازده افزایش می‌یابد، ولی این افزایش بازده مانند موارد قبل نسبت به افزایش شعاع به یک مقدار حدی می‌رسد که پس از آن شعاع چشمه هر قدر هم بیشتر شود بازده تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند.

با توجه به شکل‌های بالا بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آنتیموان تقریباً در شعاع $100\text{ }\mu\text{m}$ با زیرلایه‌ی طلا در شعاع $50\text{ }\mu\text{m}$ و با زیرلایه‌ی بیسموت در شعاع $100\text{ }\mu\text{m}$ به مقدار ثابتی می‌رسد و پس از آن با افزایش شعاع چشمه تغییر چندانی در بازده چشمه حاصل نمی‌شود.

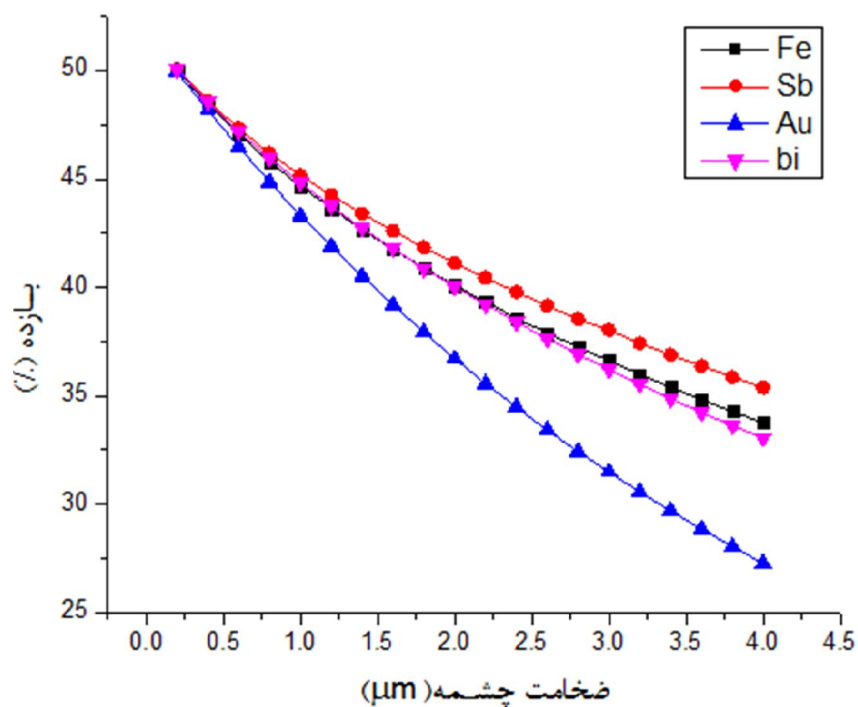
نتیجه‌ی دیگر که از شبیه سازی‌های فوق حاصل می‌شود این است که بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی بیسموت از بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آهن، طلا و آنتیموان در مقدار حدی بیشتر است، ولی اختلاف خیلی کمی با زیرلایه‌ی طلا دارد، در شکل‌های بالامقدار بازده در کمترین ضخامت برای چشمه، در مقدار حدی، برای زیرلایه‌ی آهن $68/6\%$ ، برای زیرلایه‌ی آنتیموان $73/9\%$ ، برای

زیرلایه‌ی طلا ۷۷/۴۱٪ و برای زیرلایه‌ی بیسموت ۷۷/۷۵٪ می‌باشد که با افزایش ضخامت چشمه اثر زیرلایه کمتر می‌شود.

۵-۲-۳-۲ بررسی اثر پوشش سطح جانبی آنتیموان، طلا و بیسموت بر بازده

چشمه‌ی رادیواکتیو Pm-147

در این بخش از مواد آنتیموان، طلا و بیسموت در شبیه‌سازی‌های خود به عنوان پوشش سطح جانبی به دور چشمه‌ی Pm-147 با شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ استفاده کرده‌ایم که نتایج در شکل ۱۴-۲ مشاهده می‌شوند.

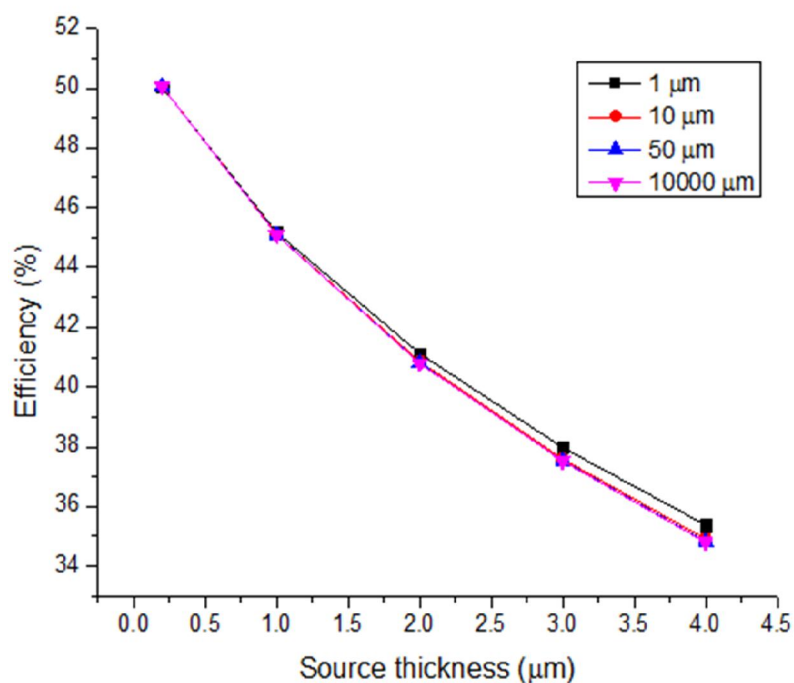


شکل (۱۴-۲). چشمه‌ی Pm-147 به شعاع $1\mu\text{m}$ با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، بیسموت و طلا.

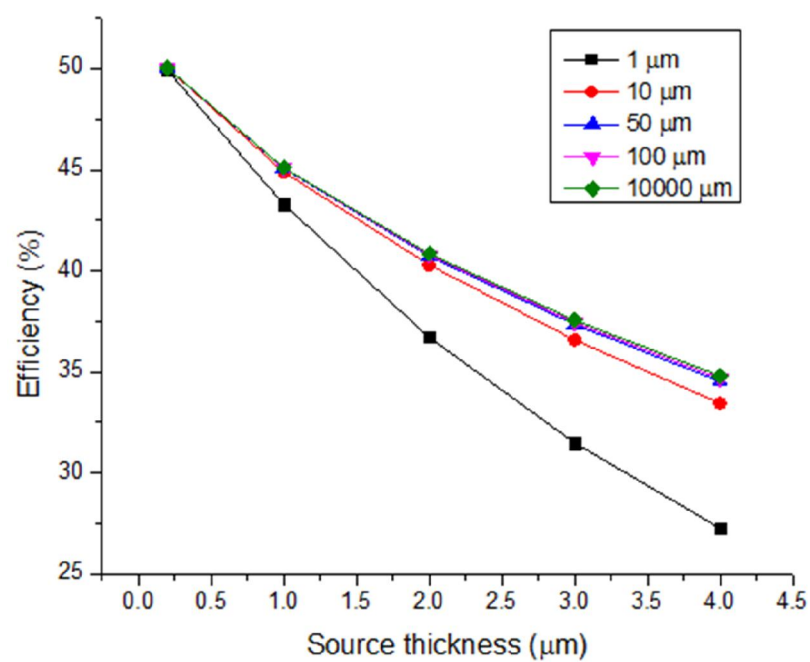
همان‌طور که ملاحظه می‌نمائید چشمه‌ی Pm-147 با پوشش‌های سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت برای سطح جانبی در ضخامت‌های کم (برای چشمه) تقریباً دارای بازده یکسانی است، اما در

ضخامت‌های بیشتر مشاهده می‌شود که بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آنتیموان از سایر موارد بیشتر می‌باشد.

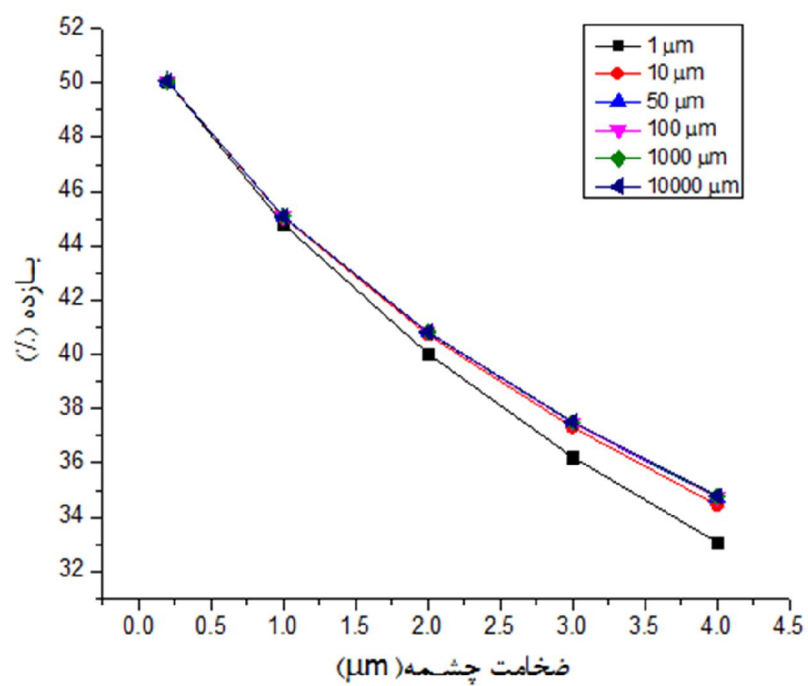
حالت بعد استفاده از پوشش سطح جانبی آنتیموان، طلا و بیسموت برای چشمه‌ی Pm-147 با شعاع‌های قاعده‌ی بزرگتری بود که نتایج به دست آمده را در شکل‌های شماره ۱۵-۲، ۱۶-۲ و ۱۷-۲ مشاهده می‌نمائید.



شکل (۱۵-۲). بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آنتیموان و شعاع متغیر.



شکل (۱۶-۲). بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی طلا و شعاع متغیر.



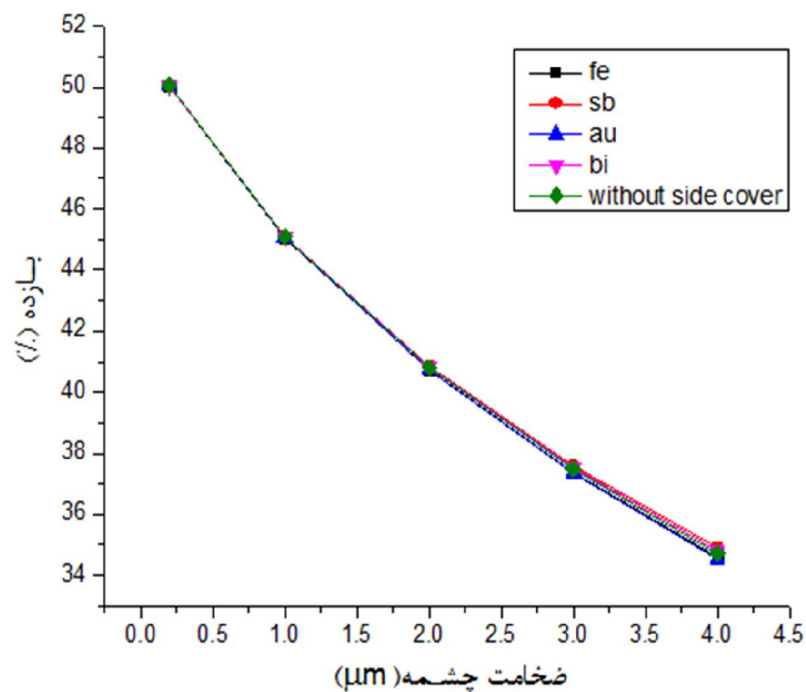
شکل (۱۷-۲). بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی بیسموت و شعاع متغیر.

با توجه به شکل‌های ۲-۱۵، ۲-۱۶ و ۲-۱۷ متوجه می‌شویم که با افزایش شعاع چشمه بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آنتیموان کاهش یافته و بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی طلا و بیسموت افزایش می‌یابد، در ادامه به توجیه این پدیده می‌پردازیم.

همان طور که قبلاً نیز اشاره گردید به طور کلی با افزایش شعاع چشمه‌ی استوانه‌ای بازده چشمه افزایش می‌یابد، لیکن با افزایش شعاع چشمه اثر پوشش سطح جانبی کم می‌شود، زیرا نسبت سطح جانبی چشمه به سطح کل کاهش می‌یابد.

پوشش سطح جانبی آنتیموان به علت تابش الکترون ثانویه‌ی بالاتر اثر قابل توجهی در افزایش بازده چشمه دارد و با افزایش شعاع چشمه اثر پوشش سطح جانبی کم می‌شود، لذا با افزایش شعاع چشمه، بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آنتیموان کاهش می‌یابد، و به علت این که پوشش سطح جانبی طلا اثر چندانی در افزایش بازده چشمه ندارند، و در حالت کلی با افزایش شعاع چشمه بازده افزایش می‌یابد، پس با افزایش شعاع چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی طلا و بیسموت بازده آن افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل‌های فوق بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آنتیموان در ضخامت $10\text{ }\mu\text{m}$ ، با پوشش سطح جانبی طلا در ضخامت $50\text{ }\mu\text{m}$ و با پوشش سطح جانبی بیسموت در ضخامت $10\text{ }\mu\text{m}$ به مقدار حدی می‌رسد. به منظور مقایسه بازده پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت در مقدار حدی، آن‌ها را در یک شکل رسم می‌نمائیم.



شکل (۲-۱۸). مقدار حدی بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا، بیسموت و بدون پوشش سطح جانبی نسبت به شعاع چشمه.

با توجه به شکل بالا در می‌یابیم که بازده چشمه‌ی Pm-147 با هر سه زیرلایه‌ی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت با افزایش شعاع به یک مقدار حدی برابر می‌رسد، که این مقدار حدی برابر است با مقدار حدی بازده چشمه‌ی Pm-147 بدون پوشش سطح جانبی، یعنی در شعاع‌های بزرگتر از مقدار حدی برای هر ماده به عنوان پوشش سطح جانبی اثر زیرلایه نامحسوس می‌شود.

۲-۳-۶ محاسبه‌ی ضخامت مؤثر زیرلایه و پوشش سطح جانبی از مواد آهن،

آنتیموان، طلا و بیسموت برای چشمه‌ی Pm-147

در تمام موارد بالا ضخامت پوشش سطح جانبی و زیرلایه به اندازه‌ی کافی زیاد در نظر گرفته شد (۴Cm)، لیکن میزان تغییرات بازده نسبت به تغییرات ضخامت زیرلایه و پوشش سطح جانبی باید مورد بررسی قرار گیرد، زیرا ممکن است در بعضی موارد محدودیت ساخت زیرلایه یا پوشش جانبی‌ای با ضخامت زیاد را داشته باشیم.

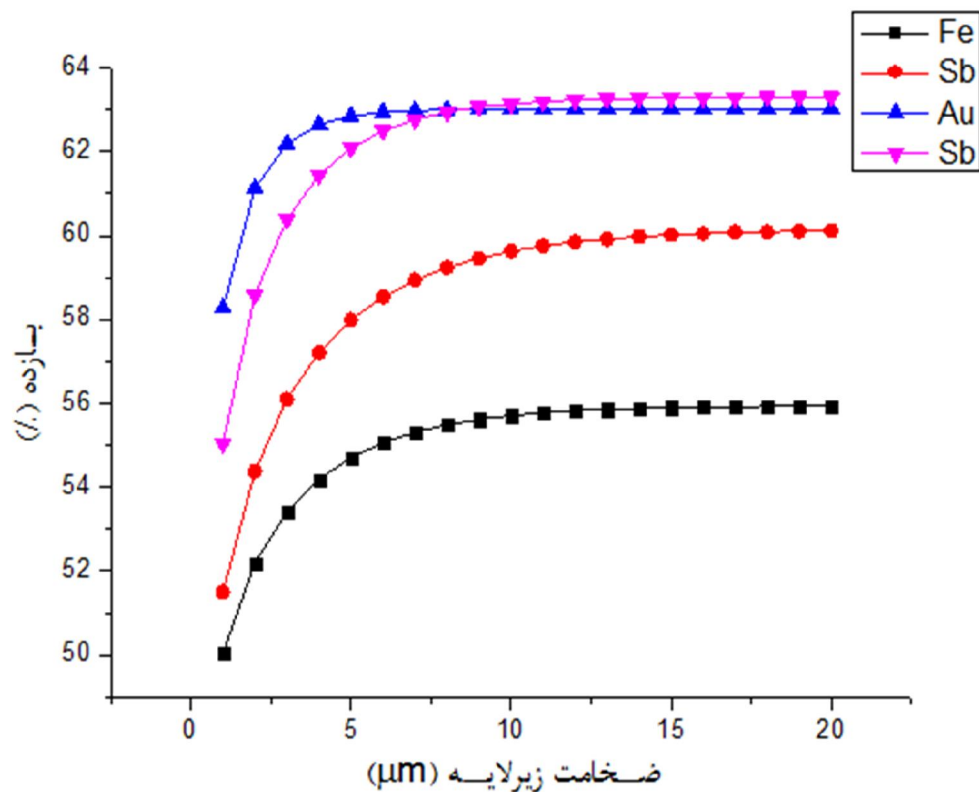
به منظور محاسبه‌ی ضخامت‌ی از زیر لایه یا پوشش سطح جانبی که در آن تغییرات بازده چشمه نسبت به افزایش ضخامت زیرلایه یا پوشش سطح جانبی به مقدار ناچیزی می‌رسد دو مرحله شبیه سازی زیر که مرحله‌ی اول مربوط به زیرلایه و مرحله‌ی بعد مربوط به پوشش سطح جانبی می‌باشد انجام گردید.

مرحله‌ی اول:

در مرحله‌ی اول که به منظور محاسبه‌ی ضخامت‌ی از زیر لایه که در آن تغییرات بازده چشمه نسبت به ضخامت زیرلایه به مقدار ناچیزی می‌رسد، چشمه‌ی استوانه‌ای Pm-147 با ضخامت نسبتاً کم ($1\mu\text{m}$) و شعاع نسبتاً زیاد (3Cm) را در نظر گرفته و ضخامت زیر لایه را با گام‌هایی به اندازه‌ی $1\mu\text{m}$ افزایش دادیم تا زمانی که تغییرات بازده نسبت به افزایش ضخامت زیر لایه از مرتبه‌ی چند هزارم درصد شود و این ضخامت را ضخامت مؤثر می‌نامیم.

در نظر گرفتن ضخامت کم و شعاع زیاد برای چشمه به این علت است که اثر جذب الکترون‌های ثانویه‌ی زیرلایه توسط چشمه، اثر زیر لایه را تحت تأثیر قرار ندهد.

مراحل فوق را برای زیرلایه‌هایی از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت اجرا نموده و نتایج را در شکل ۲-۱۹ ملاحظه می‌نمائید.



شکل (۲-۱۹). تغییرات بازده چشمه‌ی Pm-147 با شعاع قاعده‌ی ^{23}Cm نسبت به تغییرات ضخامت زیرلایه از جنس آهن، آنتیموان، طلا، بیسموت.

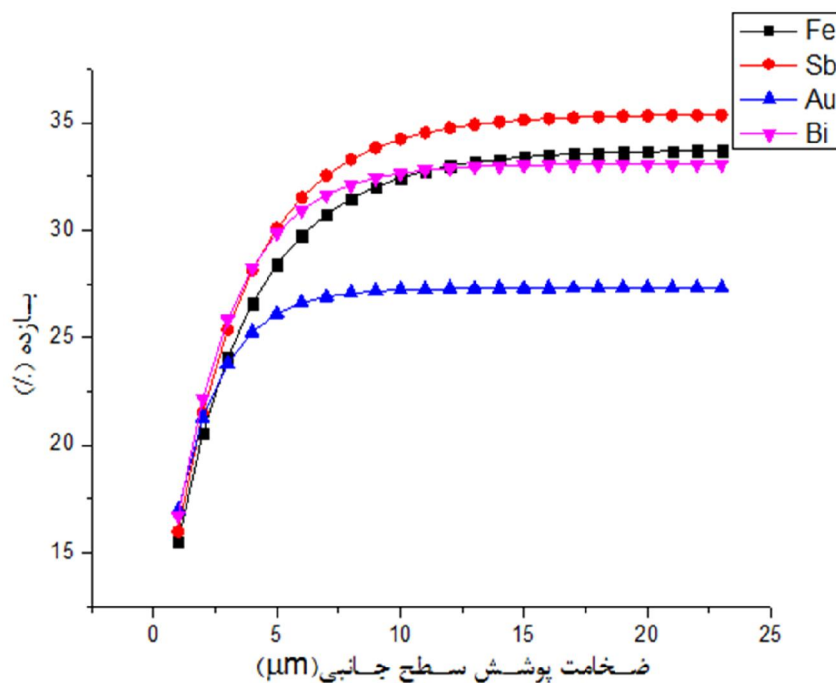
با توجه به شکل فوق درمی‌یابیم که بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آهن تقریباً در ضخامت $15/5\mu\text{m}$ به مقدار حدی $56/6\%$ بازیرلایه‌ی آنتیموان تقریباً در ضخامت $19\mu\text{m}$ به مقدار حدی $59/56\%$ ، با زیرلایه‌ی طلا در ضخامت $8/5\mu\text{m}$ به مقدار حدی 63% و با زیرلایه‌ی بیسموت در ضخامت $17\mu\text{m}$ به مقدار حدی $63/3\%$ می‌رسد.

با توجه به این نتایج می‌توان حدس زد که هرچه چگالی زیرلایه بیشتر باشد ضخامت مؤثر برای آن زیرلایه کم‌تر است، مثلاً برای طلا که چگالی آن از آهن و آنتیموان بیشتر می‌باشد ضخامت مؤثر از زیرلایه‌ی آهن و آنتیموان کمتر است.

مرحله‌ی دوم:

در مرحله‌ی دوم که به منظور محاسبه‌ی ضخامت‌ی از پوشش سطح جانبی که در آن تغییرات بازده چشمه نسبت به افزایش ضخامت پوشش سطح جانبی به مقدار ناچیزی می‌رسد، چشمه‌ی استوانه‌ای Pm-147 با ضخامت‌ی نسبتاً زیاد ($4\mu\text{m}$) و شعاع $1\mu\text{m}$ را در نظر گرفته و ضخامت پوشش سطح جانبی را با گام‌های به اندازه‌ی $1\mu\text{m}$ افزایش دادیم تا زمانی که تغییرات بازده نسبت به افزایش ضخامت از مرتبه‌ی چند هزارم شود.

علت در نظر گرفتن ضخامت زیاد و شعاع کم برای چشمه این است که با توجه به نتایجی که از شبیه سازی‌های گذشته حاصل می‌شود اثر پوشش سطح جانبی در این ابعاد بهتر نمایان می‌شود. مراحل فوق را برای زیرلایه‌هایی از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت اجرا نموده و نتایج در شکل ۲-۲۰ مشاهده می‌شوند.



شکل ۲-۲۰. تغییرات بازده چشمه‌ی Pm-147 با شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ و ضخامت $4\mu\text{m}$ نسبت به تغییرات ضخامت پوشش سطح جانبی از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت.

با توجه به شکل‌های فوق درمی‌یابیم که بازده چشمه‌ی Pm-147 با پوشش سطح جانبی آهن تقریباً در ضخامت $22/5\mu\text{m}$ به مقدار حدی $33/71\%$ ، با پوشش سطح جانبی آنتیموان تقریباً در ضخامت $21/5\mu\text{m}$ به مقدار حدی $35/3\%$ ، با پوشش سطح جانبی طلا در ضخامت $13/5\mu\text{m}$ به مقدار حدی $27/31\%$ و با پوشش سطح جانبی بیسموت در ضخامت $19\mu\text{m}$ به مقدار حدی $33/08\%$ می‌رسد.

۳-۳-۲ نتیجه گیری کلی در مورد عوامل مؤثر بر بازده چشمه‌ی Pm-147

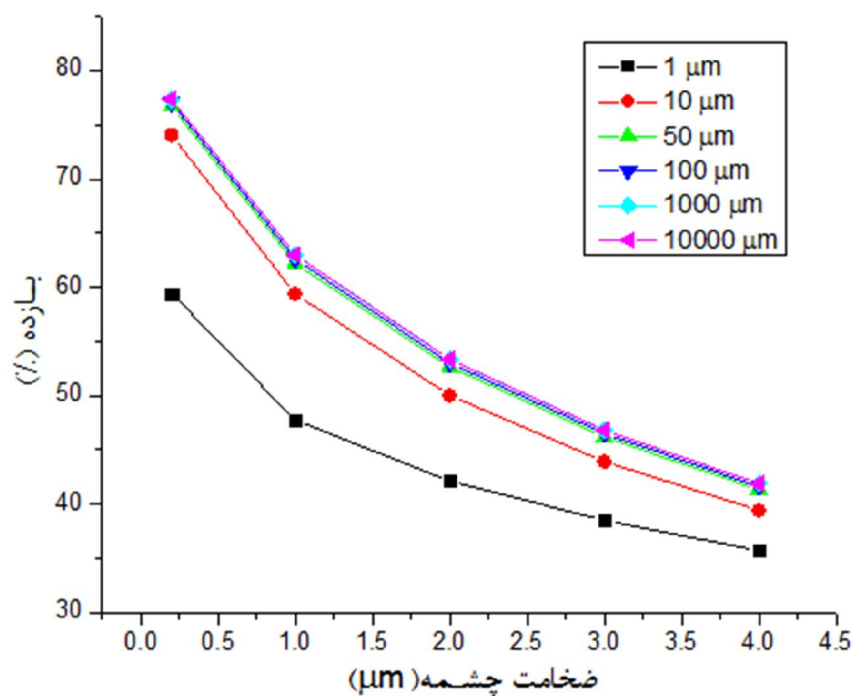
با بررسی نتایج و شکل‌های مربوط به شبیه سازی‌های بخش ۳-۲ به این نتایج کلی می‌رسیم:

۱- اگر بخواهیم چشمه‌ای استوانه‌ای با سطوح کوچک (شعاع کوچکتر از آن باشد که اثر پوشش سطح جانبی از بین رود) داشته باشیم، هم زیر لایه و هم پوشش سطح جانبی در بازده چشمه نقش قابل توجهی دارند و برای پوشش سطح جانبی و زیرلایه‌ی چشمه باید از ماده‌ی مناسبی استفاده شود، هرچه ضخامت چشمه بیشتر شود اثر پوشش سطح جانبی نیز بیشتر می‌شود، و هرچه سطح چشمه بزرگتر شود اثر پوشش سطح جانبی در افزایش بازده کم‌تر می‌شود.

۲- زیرلایه‌ای که برای چشمه در نظر گرفته می‌شود، چه در شعاع‌های کوچک و چه در شعاع‌های بزرگ (برای چشمه) بر روی بازده تأثیر گذار است و تأثیر آن در افزایش بازده با افزایش شعاع به مقدار حدی می‌رسد.

در بین چهار ماده‌ای که مورد بررسی قرار گرفتند طلا بهترین ماده برای استفاده به عنوان زیرلایه و آنتیموان بهترین ماده برای استفاده به عنوان پوشش سطح جانبی شناخته شد.

پس در قدم بعدی به منظور رسیدن به بیشترین بازده برای چشمه‌ی Pm-147 باید زیرلایه‌ای از جنس طلا و پوشش سطح جانبی‌ای از جنس آنتیموان در نظر بگیریم.



شکل (۲-۲۱). بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان.

با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت همان‌طور که انتظار داشتیم در شعاع‌های کم (برای چشمه) بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان از سایر حالاتی که مورد بررسی قرار گرفتند یعنی چشمه با زیرلایه‌ی آهن، زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن، زیرلایه‌ی آنتیموان، زیرلایه و پوشش سطح جانبی آنتیموان، زیرلایه‌ی طلا، زیرلایه و پوشش سطح جانبی طلا، زیرلایه‌ی بیسموت و زیرلایه و پوشش سطح جانبی بیسموت بیشتر می‌باشد.

به منظور مقایسه‌ی حالات فوق، مقادیر بازده چشمه‌ی Pm-147 به ضخامت $0.2 \mu\text{m}$ و $1 \mu\text{m}$ را در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف زیر مقدار حدی در جدول‌های ۲-۱ و ۲-۲ آورده‌ایم.

جدول (۱-۲). بازده چشمه‌ی Pm-147 به ضخامت $0.2\mu\text{m}$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف، زیر مقدار حدی.

نوع چشمه شعاع چشمه (μm)	Pm-147 بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی	Pm-147 با زیرلایه زیرلایه‌ی آهن	Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن	Pm-147 با زیرلایه- ی آنتیموان	Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آنتیموان	Pm-147 با زیرلایه- ی طلا	Pm-147 بازیرلایه و پوشش سطح جانبی طلا	Pm-147 بازیرلایه- ی بیسموت	Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی بیسموت	Pm-147 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان
۱	۴۱/۲	۴۳/۳	۵۲/۶۱	۴۴/۰۸	۵۳/۵۸	۴۸/۸۹	۵۹/۲۷	۴۶/۲۸	۵۶/۲۷	۵۹/۴۵
۱۰	۴۹/۱۱	۶۱/۷۲	۶۲/۸۹	۶۶/۶۹	۶۶/۷	۷۲/۷۷	۷۴/۰۴	۷۰/۷۴	۷۲/۰۳	۷۶/۰۶
۱۰۰	۴۹/۹۶	۶۷/۸۸	۶۸/۰۱	۷۳/۱۲	۷۳/۱۴	۷۶/۹	۷۷/۰۴	۷۷	۷۷/۰۷	۷۷/۰۸

جدول (۲-۲). بازده چشمه‌ی Pm-147 به ضخامت $1\mu\text{m}$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف، زیر مقدار حدی.

نوع چشمه شعاع چشمه (μm)	Pm-147 بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی	Pm-147 با زیرلایه زیرلایه‌ی آهن	Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن	Pm-147 با زیرلایه- ی آنتیموان	Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آنتیموان	Pm-147 با زیرلایه- ی طلا	Pm-147 بازیرلایه و پوشش سطح جانبی طلا	Pm-147 بازیرلایه- ی بیسموت	Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی بیسموت	Pm-147 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان
۱	۲۳/۲	۲۳/۳	۴۵/۰۸	۲۳/۴۵	۴۵/۸۶	۲۴/۴۱	۴۵/۶۵	۲۳/۷۴	۴۶/۲۲	۴۷/۷۶
۱۰	۴۱/۹۶	۴۷/۶۶	۵۱/۲۶	۴۵/۱۸	۵۳/۷۹	۵۵/۳۱	۵۹/۱۴	۵۳/۷۷	۵۷/۶۸	۵۹/۳۸
۱۰۰	۴۴/۷۸	۵۵	۵۵/۳۹	۵۸/۹۹	۵۹/۳۹	۶۲/۱۹	۶۲/۵۸	۶۲/۲	۶۲/۶۴	۶۲/۶۷

با توجه به جداول فوق همان‌طور که انتظار داشتیم بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آنتیموان از موارد دیگر بیشتر می‌باشد.

مقادیر ثبت شده در جداول فوق دارای خطای نسبی از مرتبه‌ی 10^{-4} هستند.

همه‌ی مراحل بالا برای چشمه‌ی Pm-147 انجام شد و همه‌ی مراحل و برنامه‌هایی که به‌منظور افزایش مقدار بازده برای این چشمه اجرا گردید برای چشمه‌ی Ni-63 نیز اجرا گردیده، و در ادامه به شرح این مراحل می‌پردازیم.

۲-۴ بررسی عوامل مؤثر بر افزایش بازده چشمه‌ی Ni-63

همه‌ی مراحل بخش ۲-۲ برای چشمه‌ی Pm-147 انجام شد و در این بخش همان مراحل تقریباً به همان ترتیب برای چشمه‌ی رادیواکتیو Ni-63 و به‌منظور افزایش مقدار بازده این چشمه اجرا گردیده که و در ادامه به شرح این مراحل می‌پردازیم.

۲-۴-۱ بررسی بازده چشمه‌ی استوانه‌ای Ni-63 از نظر شکل هندسی

در این بخش به بررسی بازده چشمه‌ی Ni-63 از دیدگاه هندسی می‌پردازیم.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد بازده یک چشمه‌ی استوانه‌ای در صورتی که ماده‌ای برای چشمه در نظر نگیریم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\eta(l, r) = \frac{r}{2 \cdot (l + r)} \cdot 100 = \frac{r}{(l + r)} \cdot 50 \quad (2-13)$$

که در معادله‌ی بالا r شعاع قاعده و l ارتفاع استوانه می‌باشد.

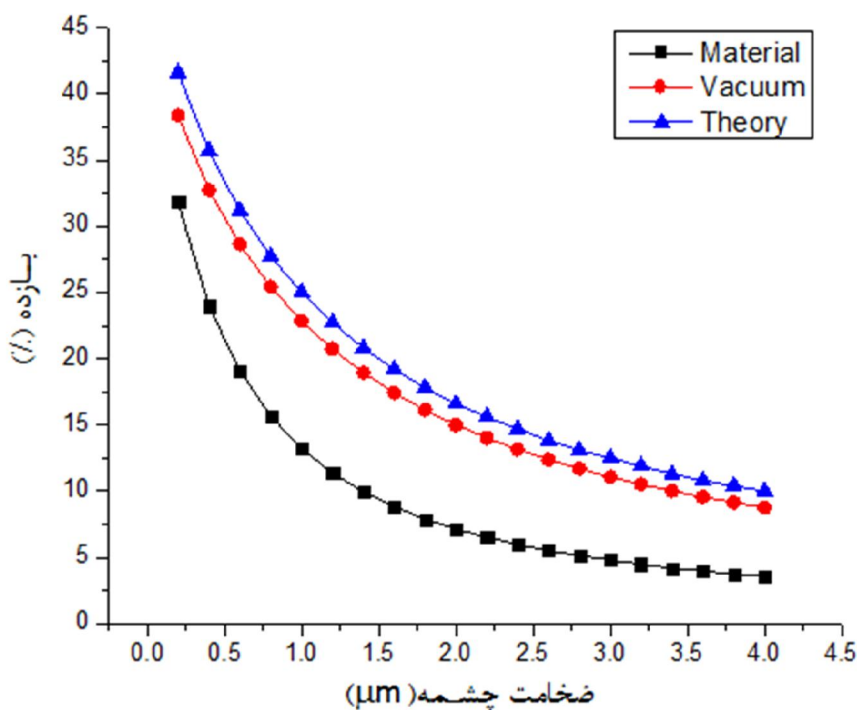
با توجه به این که چشمه‌ی شبیه‌سازی شده یک چشمه‌ی همگن می‌باشد و بازده چشمه عبارت از نسبت جریان خروجی از سطح یکی از قاعده‌ها به کل جریانی که از چشمه گسیل می‌شود، بازده

چشمه در صورت عدم حضور ماده (به علت عدم وجود خودجذبی) باید از رابطه‌ی ۲-۱۳ طبیعت کند.

اگر شعاع را برابر با $1\mu\text{m}$ قرار دهیم داریم (ضخامت را نیز بر حسب میکرومتر در نظر گرفتیم):

$$\eta(l) = \frac{1}{2(l+1)} \cdot 50 \quad (2-16)$$

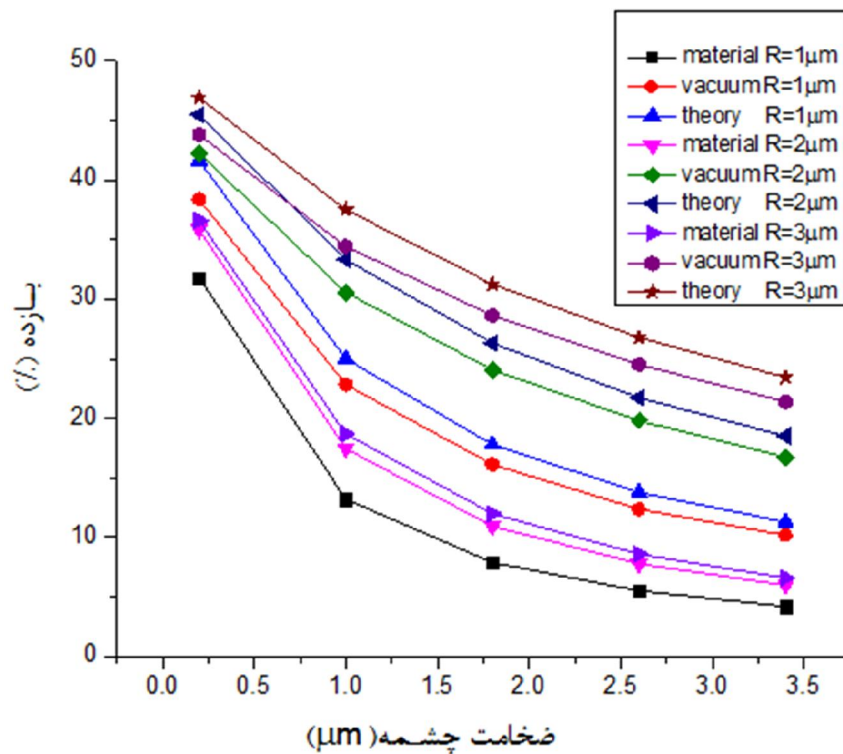
اکنون به منظور مقایسه، شکل مربوط به این تابع و شکل نسبت جریان خروجی از سطح یک قاعده‌ی چشمه به کل شار گسیلی از چشمه (بازده) را برای چشمه‌ی شبیه سازی شده‌ی Pm-147 استوانه‌ای با شعاع $1\mu\text{m}$ بدون ماده چشمه و با ماده چشمه را در یک دستگاه مختصات رسم می‌نمائیم:



شکل (۲-۲۲). نسبت جریان خروجی از سطح یک قاعده به کل جریان خروجی از سطوح یک چشمه‌ی Ni-63 استوانه‌ای با شعاع $1\mu\text{m}$ در سه وضعیت، تئوری، بدون حضور ماده‌ی چشمه و با در نظر گرفتن ماده‌ی چشمه.

داده‌های تئوری و شبیه سازی انطباق خوبی با هم دارند و حدوداً ۲/۵٪ با یکدیگر اختلاف دارند که به علت خطای آماری شبیه سازی مونت کارلو می‌باشد.

در قسمت بعد مراحل شبیه سازی چشمه ی بدون وجود ماده و با حضور ماده برای شعاع های قاعده ی ۱μm، ۲μm و ۳μm را تکرار کرده و نتایج مربوط به هر سه شعاع را در شکل ۲۹-۲ ترسیم نموده ایم.



شکل (۲۳-۲). مقایسه ی چشمه ی Ni-63 در سه وضعیت، تئوری، بدون حضور ماده ی چشمه و با در نظر گرفتن ماده ی چشمه با سه شعاع ۱μm و ۲μm و ۳μm.

همان طور که انتظار داریم با بررسی شکل بالا به این نتیجه می رسیم که با افزایش شعاع چشمه نسبت به ضخامت آن بازده نیز افزایش می یابد، که با فرمول ۲-۱۵ برای بازده تئوری چشمه ی استوانه ای سازگار است:

$$\frac{d\eta(l, r)}{dr} = \frac{2(l + r) - 2r}{4(l + r)^2} = \frac{2l}{4(l + r)^2} \quad (۱۵-۲)$$

در عبارات فوق r شعاع و l ضخامت چشمه می باشد.

عبارت ۲-۱۵ همواره مثبت است زیرا شعاع و ضخامت مقادیری مثبت هستند، پس همان طور که

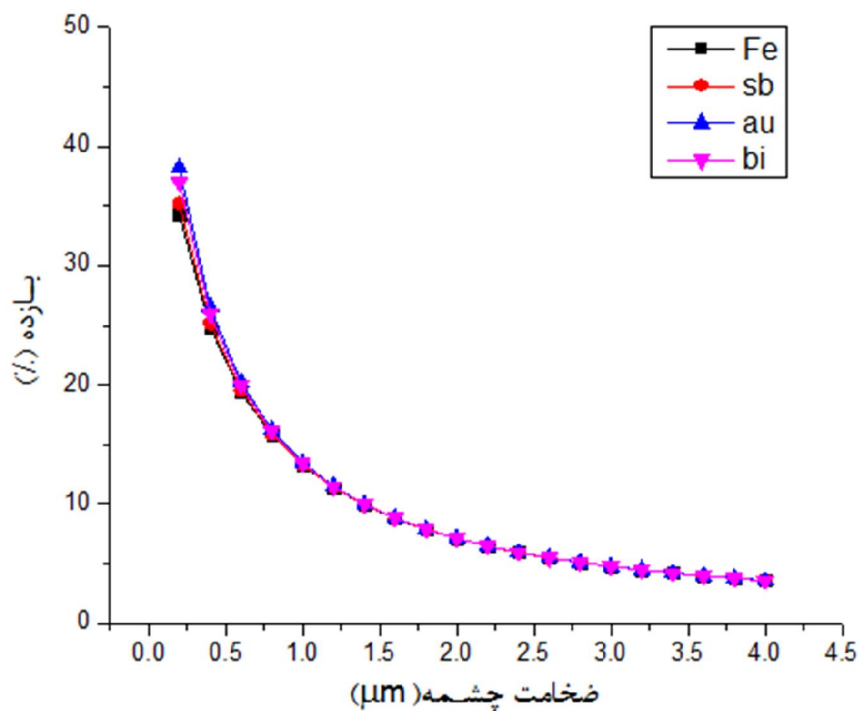
شکل ۲-۲۹ نیز نشان می‌دهد بازده چشمه با افزایش شعاع افزایش می‌یابد.

۲-۴-۲ بررسی اثر زیرلایه‌ی آهن، آنتیموان، طلا، و بیسموت بر بازده چشمه‌ی

رادیواکتیو Ni-63

در این بخش برای چشمه‌ی استوانه‌ای Ni-63 زیرلایه‌هایی از عناصر آهن، آنتیموان، طلا، و بیسموت در نظر گرفته و بازده را در هر مورد برآورد کرده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

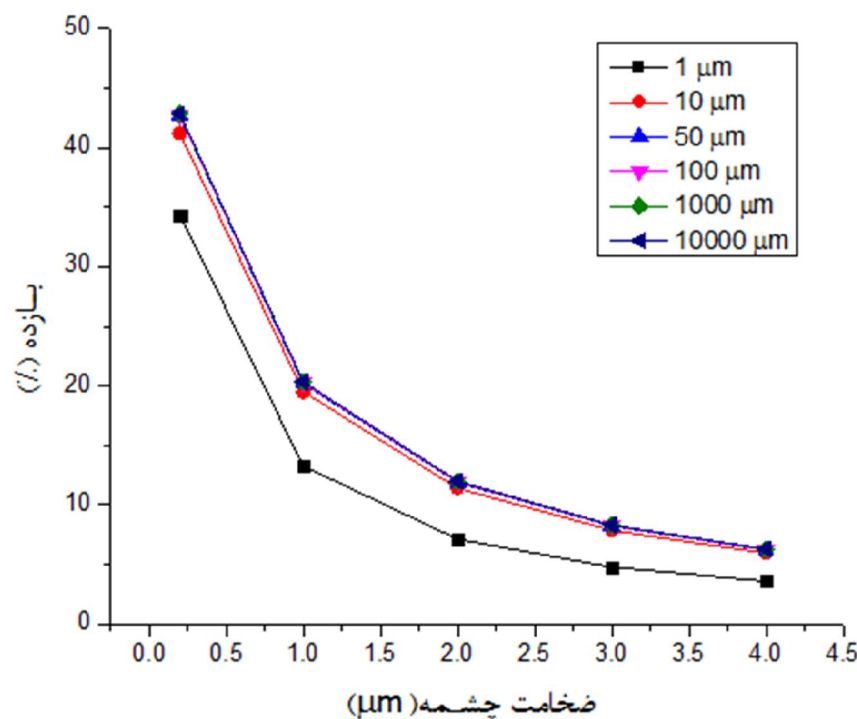
در ابتدا زیرلایه‌ای از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت برای چشمه‌ی رادیواکتیو Ni-63 با شعاع قاعده‌ی $1\mu\text{m}$ در نظر گرفته و ضخامت چشمه را از $0.2\mu\text{m}$ تا $4\mu\text{m}$ با گام‌های $0.2\mu\text{m}$ افزایش داده‌ایم نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۳-۳۰ مشاهده می‌شوند:



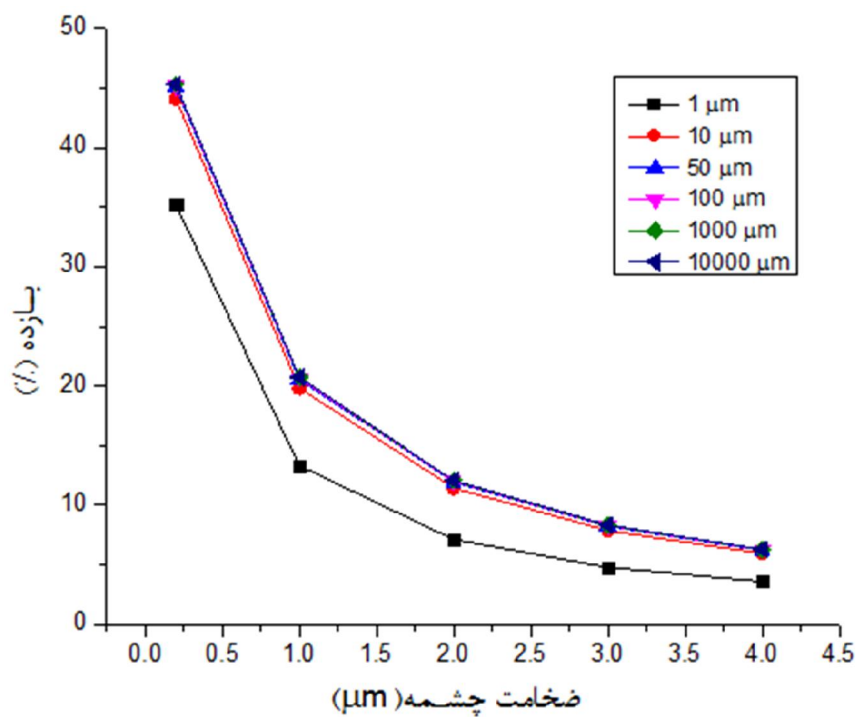
شکل (۲-۲۴). بازده چشمه‌ی Ni-63 با شعاع $1\mu\text{m}$ و زیر لایه‌های آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت.

با بررسی شکل ۲-۳۰ به این نتیجه خواهیم رسید که بازده چشمه با زیرلایه‌ی طلا از بازده چشمه با زیرلایه‌ی آهن، آنتیموان و بیسموت بیشتر می‌باشد، در کم‌ترین ضخامت چشمه مربوط به این شکل (۲/۰ μm) بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی آهن ۳۶/۳۴٪، با زیرلایه‌ی آنتیموان ۳۵/۲۲٪، با زیرلایه‌ی طلا ۳۸/۱۷٪ و با زیرلایه‌ی بیسموت ۳۶/۹۹ می‌باشد.

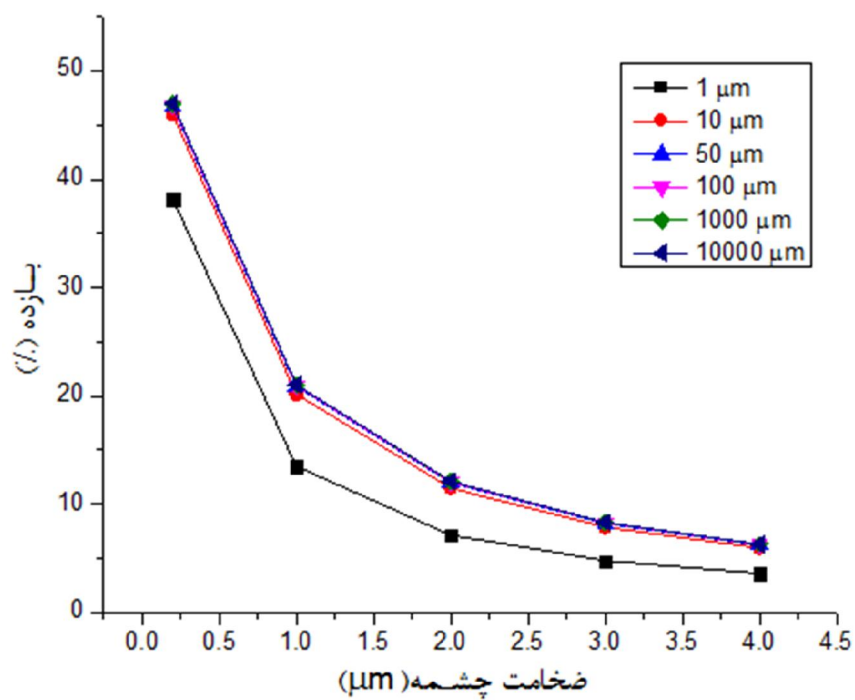
در مرحله‌ی بعد همین حالت را برای زیرلایه‌ی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت با شعاع‌های بیشتری برای چشمه‌ی Ni-63 تکرار کردیم و نتایج در شکل‌های ۲-۳۱، ۲-۳۲، ۲-۳۳ و ۲-۳۴ مشاهده می‌شوند.



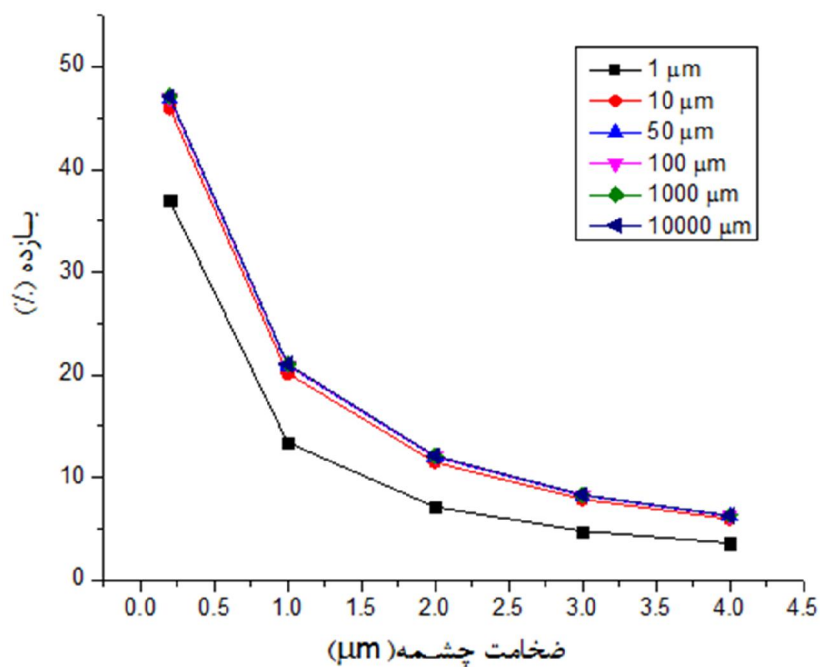
شکل (۲-۲۵). بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی آهن و شعاع‌های مختلف.



شکل (۲-۲۶). بازده چشمه ی Ni-63 با زیرلایه ی آنتیموان و شعاع های مختلف.



شکل (۲-۲۷). بازده چشمه ی Ni-63 با زیرلایه ی طلا در شعاع های مختلف.



شکل (۲-۲۸). بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی بیسموت در شعاع‌های مختلف.

همان طور که ملاحظه می‌نمائید با افزایش شعاع چشمه بازده افزایش می‌یابد، ولی این افزایش بازده مانند موارد قبل نسبت به افزایش شعاع به یک مقدار حدی می‌رسد که شعاع چشمه هر قدر هم از آن بیشتر شود بازده تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند.

با توجه به شکل‌های بالا بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آهن در شعاع ۵۰ μm، با زیرلایه‌ی آنتیموان در شعاع ۵۰ μm با زیرلایه‌ی طلا در شعاع ۵۰ μm و با زیرلایه‌ی بیسموت در شعاع ۱۰ μm به مقدار ثابتی می‌رسد، و پس از آن با افزایش شعاع چشمه تغییر چندانی در بازده چشمه حاصل نمی‌شود.

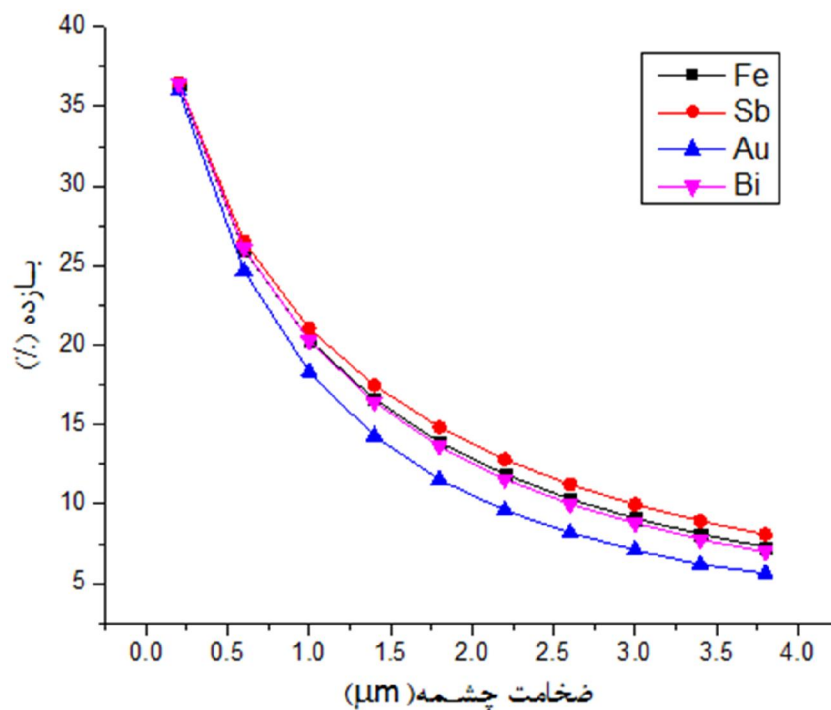
نتیجه‌ی دوم که از شکل‌های ۲-۲۵، ۲-۲۶، ۲-۲۷ و ۲-۲۸ برداشت می‌شود این است که بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی طلا از بازده چشمه‌ی Pm-147 با زیرلایه‌ی آهن، آنتیموان و بیسموت در مقدار حدی بیشتر است، مقدار بازده در کمترین ضخامت برای چشمه، در مقدار حدی، برای زیرلایه‌ی

طلا ۴۶/۷٪، برای زیرلایه‌ی آنتیموان ۴۵/۰۵٪، برای زیرلایه‌ی آهن ۴۲/۷٪ برای زیرلایه‌ی بیسموت ۴۵/۹۶٪ می‌باشد، و با افزایش ضخامت چشمه اثر زیرلایه کمتر می‌شود.

۲-۴-۳ بررسی اثر پوشش سطح جانبی آهن آنتیموان، طلا و بیسموت بر بازده

چشمه‌ی رادیواکتیو Ni-63

قدم بعدی قرار دادن آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت به عنوان پوشش سطح جانبی به دور چشمه‌ی Ni-63 با شعاع قاعده‌ی ۱ μm بود که نتایج در شکل شماره‌ی ۲-۲۹ مشاهده می‌شوند.

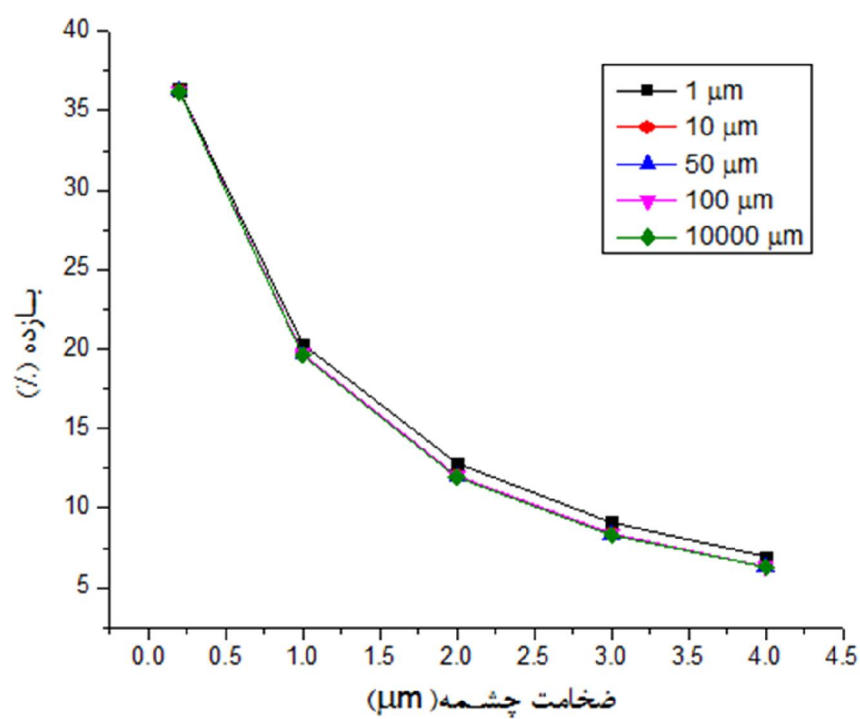


شکل (۲-۲۹). چشمه‌ی Ni-63 به شعاع ۱ μm با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت.

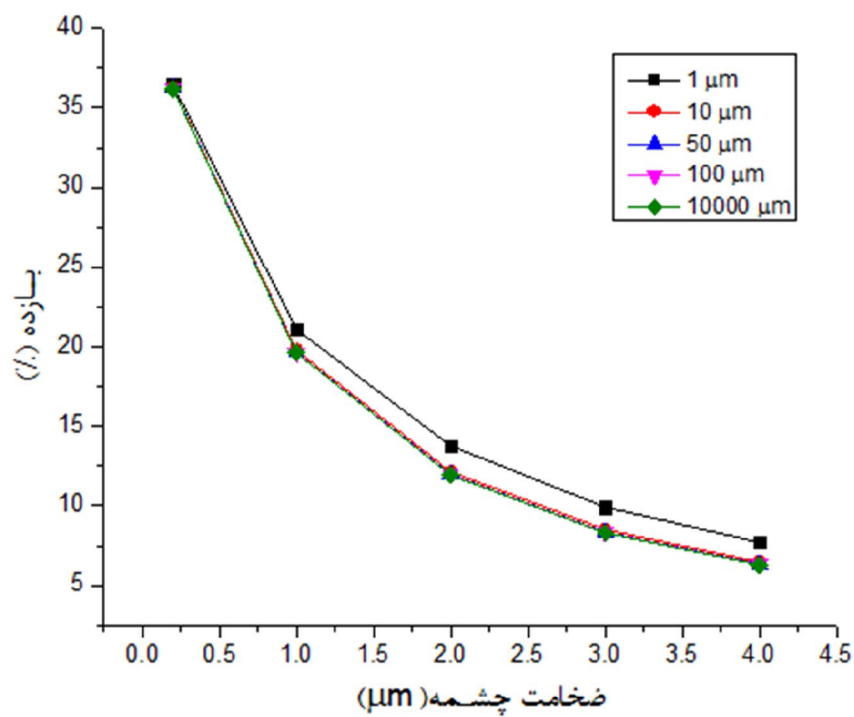
همان‌طور که ملاحظه می‌نمائید چشمه‌ی Ni-63 با پوشش‌های سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت برای سطح جانبی در ضخامت‌های کم (برای چشمه) تقریباً دارای بازده یکسانی است، اما در ضخامت‌های بیشتر مشاهده می‌شود که بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آنتیموان از بازده چشمه با پوشش سطح جانبی سایر مواد بیشتر است، و بازده با افزایش ضخامت چشمه کم‌تر

می‌شود.

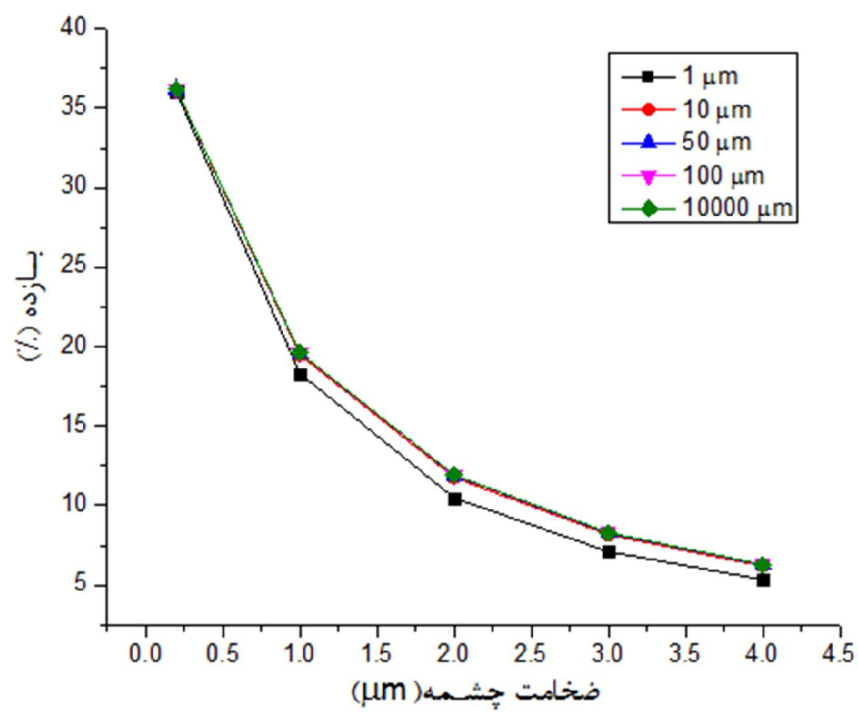
حالت بعد استفاده از پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت برای چشمه‌ی Ni-63 با شعاع‌های قاعده‌ی بزرگتری بود که نتایج به دست آمده را در شکل‌های شماره ۳۰-۲، ۳۱-۲، ۳۲-۲ و ۳۳-۲ مشاهده می‌نمائید.



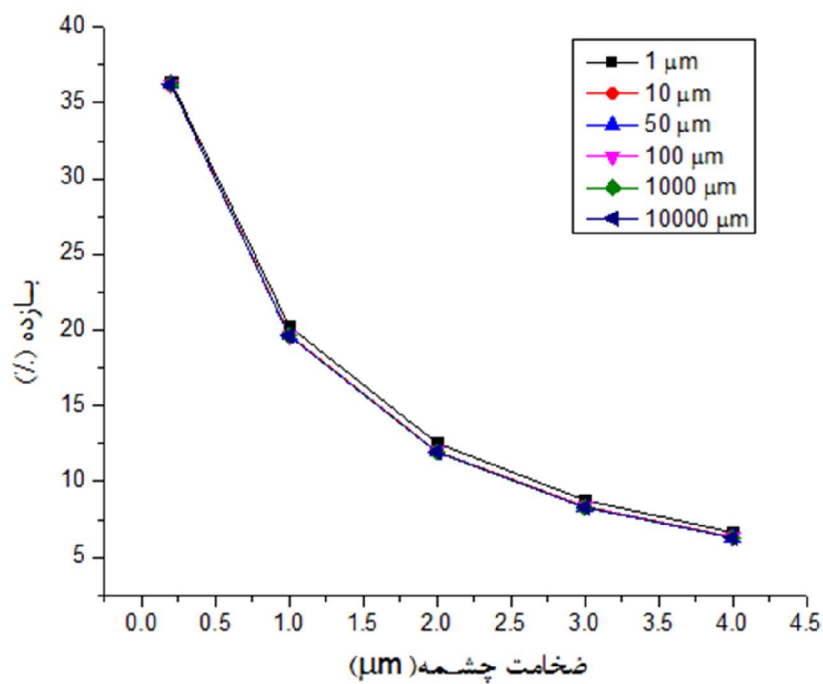
شکل (۳۰-۲). بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آهن در شعاع‌های مختلف.



شکل (۳۱-۲). بازده چشمه ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آنتیموان در شعاع های مختلف.



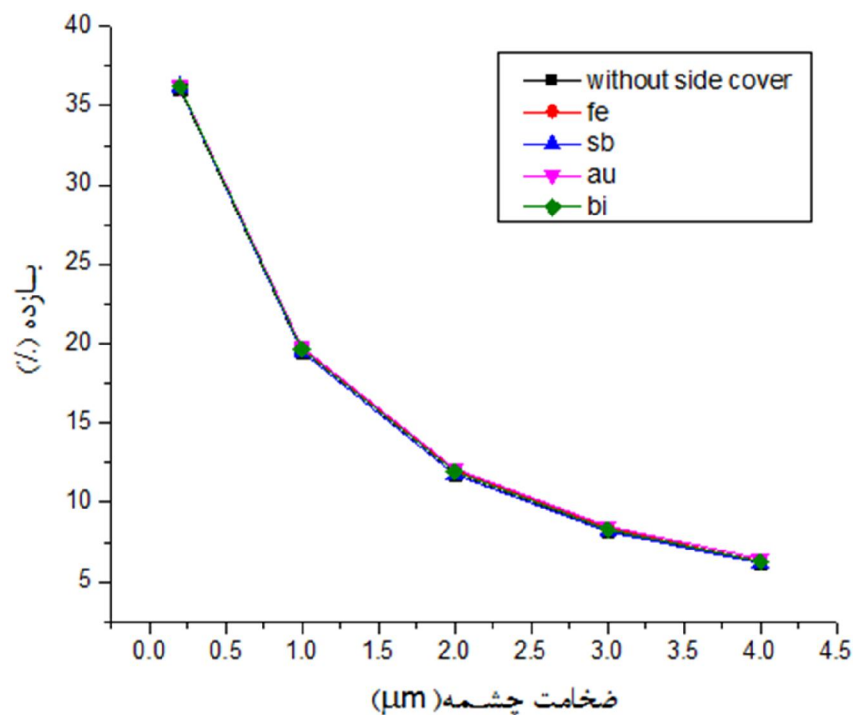
شکل (۳۲-۲). بازده چشمه ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی طلا و شعاع متغیر.



شکل (۳۳-۲). بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی بیسموت و شعاع متغیر.

با توجه به شکل‌های ۳۶-۲، ۳۷-۲، ۳۸-۲ و ۳۹-۲ بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آهن در شعاع ۱۰ μm، با پوشش سطح جانبی آنتیموان در شعاع ۱۰ μm، با پوشش سطح جانبی طلا در شعاع ۱۰ μm و با پوشش سطح جانبی بیسموت نیز در شعاع ۱۰ μm به مقدار حدی می‌رسد.

به منظور مقایسه بازده پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان و طلا در مقدار حدی، آن‌ها را در یک شکل رسم می‌نمائیم.



شکل (۲-۳۴). مقدار حدی بازده چشمه ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا، بیسموت و بدون پوشش سطح جانبی نسبت به شعاع چشمه.

با توجه به شکل بالا در می یابیم که بازده چشمه ی Ni-63 با هر چهار پوشش سطح جانبی آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت با افزایش شعاع به یک مقدار حدی برابر می رسد، که این مقدار حدی برابر است با مقدار حدی بازده چشمه ی Ni-63 بدون پوشش سطح جانبی، یعنی در شعاع های بزرگتر از مقدار حدی برای هر ماده به عنوان پوشش سطح جانبی اثر زیرلایه نامحسوس می شود.

۲-۴-۴ برآورد ضخامت مؤثر زیرلایه و پوشش سطح جانبی از مواد آهن،

آنتیموان، طلا و بیسموت برای چشمه ی Ni-63

در تمام موارد بالا ضخامت پوشش سطح جانبی و زیرلایه به اندازه ی کافی زیاد در نظر گرفته شد (۴cm)، لیکن میزان تغییرات بازده نسبت به تغییرات ضخامت زیرلایه و پوشش سطح جانبی باید مورد بررسی قرار بگیرد، زیرا ممکن است در بعضی موارد محدودیت ساخت زیر لایه یا پوشش سطح جانبی ای با ضخامت بالا را داشته باشیم.

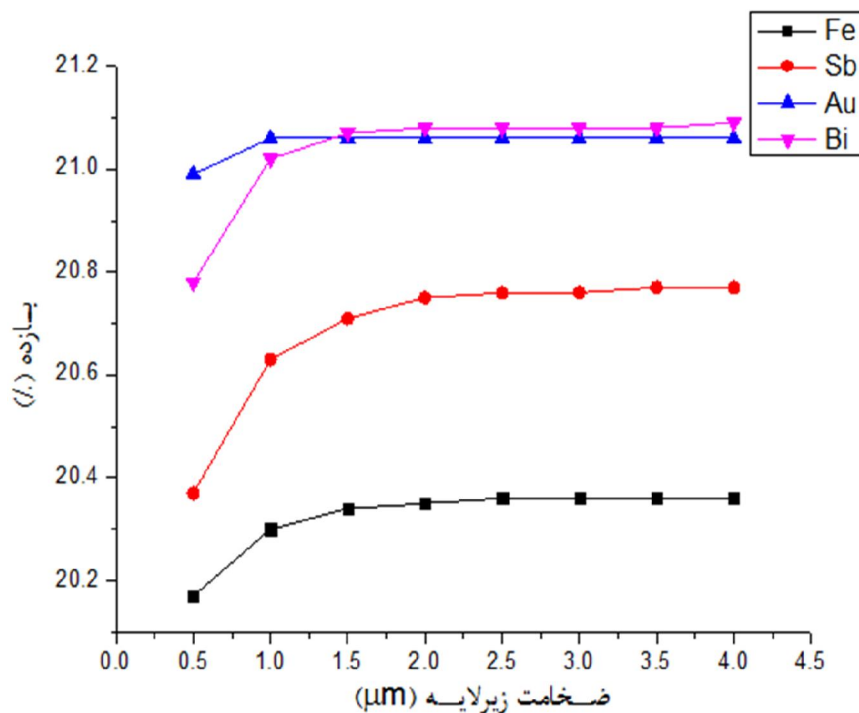
به منظور محاسبه‌ی ضخامت‌ی از زیر لایه یا پوشش سطح جانبی که در آن تغییرات بازده چشمه نسبت به ضخامت زیرلایه یا پوشش سطح جانبی به مقدار ناچیزی می‌رسد دو مرحله‌ی زیر که مرحله‌ی اول برای زیر لایه و مرحله‌ی بعد برای پوشش سطح جانبی می‌باشد اجرا گردید.

مرحله‌ی اول:

در مرحله‌ی اول به منظور محاسبه‌ی ضخامت‌ی از زیر لایه که در آن تغییرات بازده چشمه نسبت به ضخامت زیرلایه به مقدار ناچیزی می‌رسد، چشمه‌ی استوانه‌ای Ni-63 با ضخامت خیلی کم را در نظر گرفته وضخامت زیر لایه را با گام‌هایی به اندازه‌ی $0.5\mu\text{m}$ افزایش دادیم تا زمانی که تغییرات بازده نسبت به افزایش ضخامت زیرلایه از مرتبه‌ی چند هزارم شود.

علت در نظر گرفتن ضخامت کم برای چشمه این است که اثر جذب الکترون‌های پس پراکنده شده از زیرلایه توسط چشمه، اثر زیرلایه را تحت تأثیر قرار ندهد.

مراحل فوق را برای زیرلایه‌هایی از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت اجرا نموده و نتایج را در شکل ۲-۳۵ ملاحظه می‌نمائید.



شکل (۲-۳۵). تغییرات بازده چشمه‌ی Ni-63 با شعاع قاعده‌ی ^3Cm و ضخامت $1\mu\text{m}$ نسبت به تغییرات ضخامت زیرلایه از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت.

با توجه به شکل فوق درمی‌یابیم که بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی آهن تقریباً در ضخامت $2/5\mu\text{m}$ به مقدار حدی $20/36\%$ ، با زیرلایه‌ی آنتیموان تقریباً در ضخامت $2/5\mu\text{m}$ به مقدار حدی $20/76\%$ با زیرلایه‌ی طلا در ضخامت $1\mu\text{m}$ به مقدار حدی $21/06\%$ و با زیرلایه‌ی بیسموت در ضخامت $2\mu\text{m}$ به مقدار حدی $21/09\%$ می‌رسد.

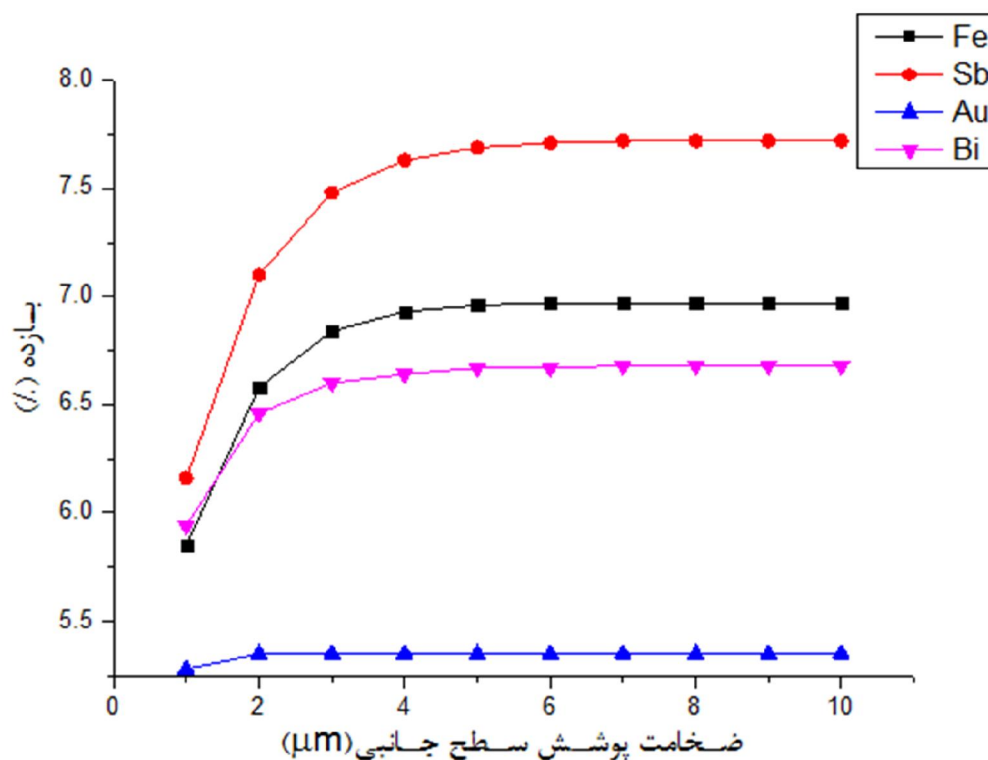
مرحله‌ی دوم:

در مرحله‌ی دوم که به منظور برآورد ضخامتی از پوشش سطح جانبی که در آن تغییرات بازده چشمه نسبت به تغییرات ضخامت پوشش سطح جانبی به مقدار ناچیزی (از مرتبه‌ی صدم درصد) می‌رسد، چشمه‌ی استوانه‌ای Ni-63 با ضخامتی نسبتاً زیاد ($4\mu\text{m}$) و شعاع $1\mu\text{m}$ را در نظر گرفته و ضخامت پوشش سطح جانبی را اندک اندک با گام‌هایی به اندازه‌ی $1\mu\text{m}$ افزایش دادیم تا زمانی که تغییرات

بازده نسبت به افزایش ضخامت از مرتبه‌ی چند هزارم شود.

علت در نظر گرفتن ضخامت زیاد و شعاع کم برای چشمه این است که اثر پوشش سطح جانبی در این ابعاد بهتر نمایان می‌شود.

مراحل فوق را برای زیرلایه‌هایی از جنس آهن، آنتیموان، طلا و بیسموت اجرا نموده و نتایج را در شکل ۲-۳۶ مشاهده می‌نمائید.



شکل (۳۶-۲). تغییرات بازده چشمه‌ی Ni-63 با شعاع قاعده‌ی ۱ μm و ضخامت ۴ μm نسبت به تغییرات ضخامت پوشش سطح جانبی آهن آنتیموان طلا و بیسموت.

با توجه به شکل‌های فوق درمی‌یابیم که بازده چشمه‌ی Ni-63 با پوشش سطح جانبی آهن تقریباً در ضخامت ۶ μm به مقدار حدی ۶/۹۷٪ با پوشش سطح جانبی آنتیموان تقریباً در ضخامت ۷ μm به مقدار حدی ۷/۷۲٪ با پوشش سطح جانبی طلا در ضخامت ۲ μm به مقدار حدی ۵/۳۵٪ و با پوشش سطح جانبی بیسموت در ضخامت ۵ μm به مقدار حدی ۶/۶۷٪ می‌رسد.

۲-۴-۵ نتیجه گیری کلی در مورد عوامل مؤثر بر بازده چشمه‌ی Ni-63

با بررسی نتایج و شکل‌های مربوط به شبیه سازی‌های چشمه‌ی Ni-63 به این نتایج کلی می‌رسیم.

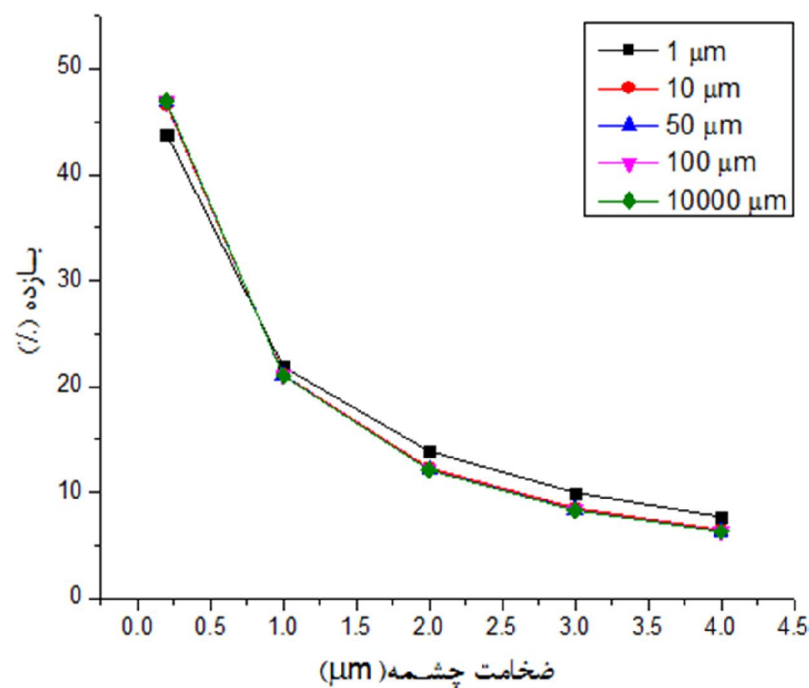
۱- با افزایش شعاع چشمه بازده آن افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت چشمه بازده آن کاهش می‌یابد

۲- اگر بخواهیم چشمه‌ای استوانه‌ای با سطوح کوچک (شعاع کوچکتر از آن باشد که اثر پوشش سطح جانبی نامحسوس شود) داشته باشیم، هم زیر لایه و هم پوشش سطح جانبی در بازده چشمه نقش قابل توجهی دارند و برای پوشش سطح جانبی و زیرلایه‌ی چشمه باید از ماده‌ی مناسبی استفاده شود، هرچه ضخامت چشمه بیشتر شود اثر پوشش سطح جانبی نیز بیشتر می‌شود، و هرچه سطح چشمه بزرگتر شود اثر پوشش سطح جانبی در افزایش بازده کم‌تر می‌شود.

۳- زیرلایه‌ای که برای چشمه در نظر گرفته می‌شود، چه در شعاع‌های کوچک و چه در شعاع‌های بزرگ (برای چشمه) بر روی بازده چشمه تأثیر گذار است و تأثیر آن در افزایش بازده با افزایش شعاع به مقدار حدی می‌رسد.

در بین چهار ماده‌ای که مورد بررسی قرار گرفتند طلا بهترین ماده برای استفاده به عنوان زیرلایه و آنتیموان بهترین ماده برای استفاده به عنوان پوشش سطح جانبی شناخته شد.

لذا در قدم بعدی به منظور رسیدن به بیشترین بازده برای چشمه‌ی Ni-63 زیرلایه‌ای از جنس طلا و پوشش سطح جانبی‌ای از جنس آنتیموان در نظر می‌گیریم.



شکل (۲-۳۷). بازده چشمه ی Ni-63 با زیرلایه ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان.

با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت همان طور که انتظار داشتیم در شعاع های کم (برای چشمه) بازده چشمه ی Ni-63 با زیرلایه ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان از سایر حالاتی که مورد بررسی قرار گرفتند یعنی چشمه با زیرلایه ی آهن، زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن، زیرلایه ی آنتیموان، زیرلایه و پوشش سطح جانبی آنتیموان، زیرلایه ی طلا، زیرلایه و پوشش سطح جانبی طلا، بیشتر می باشد.

به منظور مقایسه ی حالات فوق، بازده چشمه ی Pm-147 به ضخامت $0.2 \mu\text{m}$ و $1 \mu\text{m}$ را در حالات مختلف و به ازاء شعاع های مختلف زیر مقدار حدی در جدول های ۲-۳ و ۲-۴ آورده ایم.

جدول (۲-۳). بازده چشمه‌ی Ni-63 به ضخامت $0.2\mu\text{m}$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف.

نوع چشمه شعاع چشمه (μm)	Ni-63 بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی	Ni-63 با زیرلایه زیرلایه‌ی آهن	Ni-63 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن	Ni-63 با زیرلایه- ی آنتیموان	Ni-63 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آنتیموان	Ni-63 با زیرلایه- ی طلا	Ni-63 بازیرلایه و پوشش سطح جانبی طلا	Ni-63 بازیرلایه- ی بیس‌موت	Ni-63 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی بیس‌موت	Ni-63 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان
۱	۳۱/۸۲	۳۴/۳۶	۳۹/۳۶	۳۵/۲۱	۴۰/۵۷	۳۸/۱۷	۴۳/۳	۳۶/۹۹	۴۲/۴	۴۳/۸۸
۱۰	۳۵/۷	۴۱/۱۸	۴۲/۳۹	۴۴/۰۷	۴۴/۶۵	۴۶/۰۲	۴۶/۶۱	۴۵/۹۶	۴۶/۵۳	۴۶/۶۳
۱۰۰	۳۶/۱۴	۴۲/۷۴	۴۲/۷	۴۵/۱۸	۴۵/۲۲	۴۶/۸	۴۶/۹۲	۴۷	۴۷/۰۳	۴۷/۰۵

جدول (۲-۴). بازده چشمه‌ی Ni-63 به ضخامت $1\mu\text{m}$ در حالات مختلف و به ازاء شعاع‌های مختلف.

نوع چشمه شعاع چشمه (μm)	Ni-63 بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی	Ni-63 با زیرلایه زیرلایه‌ی آهن	Ni-63 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آهن	Ni-63 با زیرلایه- ی آنتیموان	Ni-63 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی آنتیموان	Ni-63 با زیرلایه- ی طلا	Ni-63 بازیرلایه و پوشش سطح جانبی طلا	Ni-63 بازیرلایه- ی بیس‌موت	Ni-63 با زیرلایه و پوشش سطح جانبی بیس‌موت	Ni-63 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان
۱	۱۳/۲۱	۱۳/۲۸	۲۰/۵۳	۱۳/۳۱	۲۱/۴	۱۳/۵	۱۸/۸۹	۱۳/۴۲	۲۰/۷۷	۲۱/۸۶
۱۰	۱۸/۸۹	۱۹/۵	۲۰/۳۵	۱۹/۸۳	۲۰/۷۷	۲۰/۱۶	۲۰/۸	۲۰/۱۶	۲۱/۰۲	۲۱/۱۳
۱۰۰	۱۹/۵۵	۲۰/۲۶	۲۰/۳۴	۲۰/۶۵	۲۰/۷۵	۲۰/۹۵	۲۱/۰۱	۲۰/۹۸	۲۱/۰۷	۲۱/۰۸

مقدار خطای نسبی در مقادیر ثبت شده در جداول فوق از مرتبه‌ی 10^{-4} می‌باشد.

با توجه به جداول فوق همان‌طور که انتظار داشتیم بازده چشمه‌ی Ni-63 با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان از موارد دیگر بیشتر می‌باشد.

نتیجه‌ی کلی‌تری که از فصل حاضر برداشت می‌شود این است که در مجموع بازده چشمه‌ی pm-147 از بازده چشمه‌ی Ni-63 بیشتر می‌باشد.

فصل سوم

بازده کلکتور

۳-۱ عوامل مؤثر بر بازده کلکتور

بازده کلکتور عبارت است از نسبت جریان ذراتی که توسط کلکتور جذب می‌شوند به جریان ذراتی که به کلکتور برخورد می‌کنند.

اگر تعداد ذراتی که به کلکتور برخورد می‌کنند برابر با تعداد ذراتی باشد که جذب می‌شوند، بازده کلکتور برابر با صد درصد خواهد بود، لیکن همان طور که در فصل اول نیز اشاره شد دو عامل سبب کاهش بازده کلکتور می‌شوند، پس پراکندگی و تابش الکترون‌های ثانویه.

۳-۱-۱ الکترون‌های پس پراکندگی

این الکترون‌ها بر اساس برخورد الاستیک الکترون‌های فرودی با هسته‌ی اتم‌های سطح کلکتور گسیل می‌شوند و همان طور که در فصل ۲ بیان شد، این پدیده به انرژی ذرات گسیلی از چشمه، عدد اتمی ماده هدف و ضخامت ماده هدف بستگی دارد، به طوری که هرچه انرژی ذرات گسیلی از چشمه کمتر و عدد اتمی هدف بزرگتر و ضخامت آن بیشتر باشد، پس پراکندگی بیشتر خواهد بود.

از آنجا که برخوردها الاستیک است، هیچ تغییری در انرژی الکترون‌های پس پراکنده شده رخ نخواهد داد. زاویه پراکندگی نیز می‌تواند از صفر تا ۱۸۰ درجه باشد.

۳-۱-۲ الکترون‌های ثانویه

این الکترون‌ها بر اساس برخورد غیر الاستیک بین الکترون‌های فرودی اولیه با الکترون‌های باند رسانش و گاهی با الکترون‌های باند ظرفیت به دست می‌آیند. انرژی الکترون‌های جدا شده که الکترون‌های ثانویه نامیده می‌شوند بین ۵ تا ۱۰ الکترون ولت می‌باشد.

همان طور که در فصل یک بررسی گردید برای کاهش پس پراکندگی باید از موادی که دارای عدد اتمی کوچکی هستند برای روکش کلکتور استفاده شود. مقدار الکترون‌های ثانویه نیز به انرژی ذرات گسیلی از چشمه بستگی دارد یعنی هر چه انرژی ذره بیشتر باشد الکترون‌های ثانویه‌ی بیشتری تولید

می‌کند.

۲-۳ افزایش بازده کلکتور

به منظور رسیدن به بازده بالا برای کلکتور ابتدا مواد و عناصر مختلفی را به عنوان روکش کلکتور برای یک باتری هسته‌ای کروی مورد بررسی قرار داده و از میان مواد مورد بررسی بهترین ماده را انتخاب نموده و سپس در گام بعدی بازده کلکتور را از نظر ابعاد باتری مورد بررسی قرار داده‌ایم و در گام نهایی ضخامتی از کلکتور را که در آن بازده به مقدار حدی می‌رسد را به دست آوردیم. تمام مراحل فوق از طریق شبیه سازی مونت کارلو با کد MCNP4C انجام شده است.

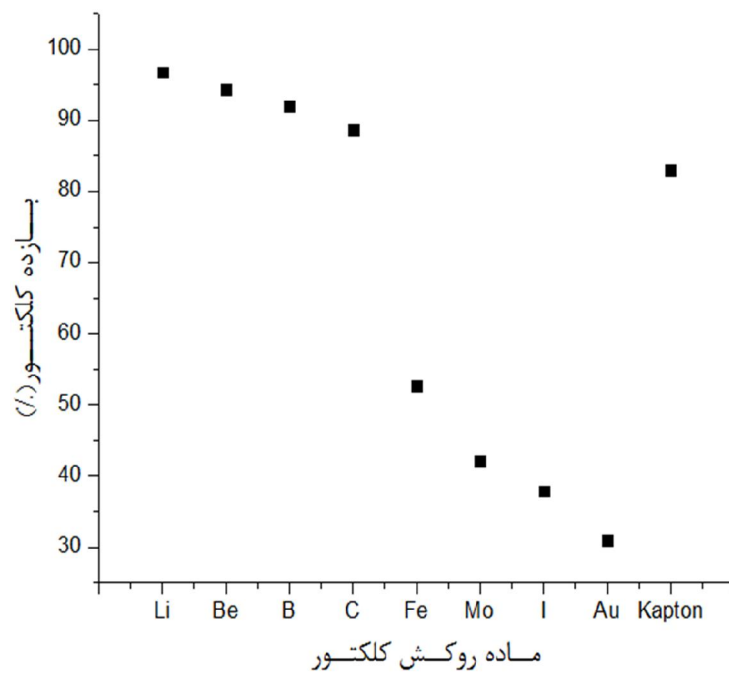
۱-۲-۳ انتخاب ماده مناسب

برای پیدا کردن ماده‌ی مناسب به منظور استفاده به عنوان روکش کلکتور عناصری با اعداد اتمی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این عناصر عبارتند از: طلا، آهن، مولیبدنیم، ید، کربن، بور، بریلیم، لیتیم. به غیر از عناصر فوق پلیمر کپتون^۱ (C_3F_6) نیز که در [۹] به عنوان یک ماده‌ی خوب برای روکش کلکتور معرفی شده بود نیز مورد بررسی قرار گرفت.

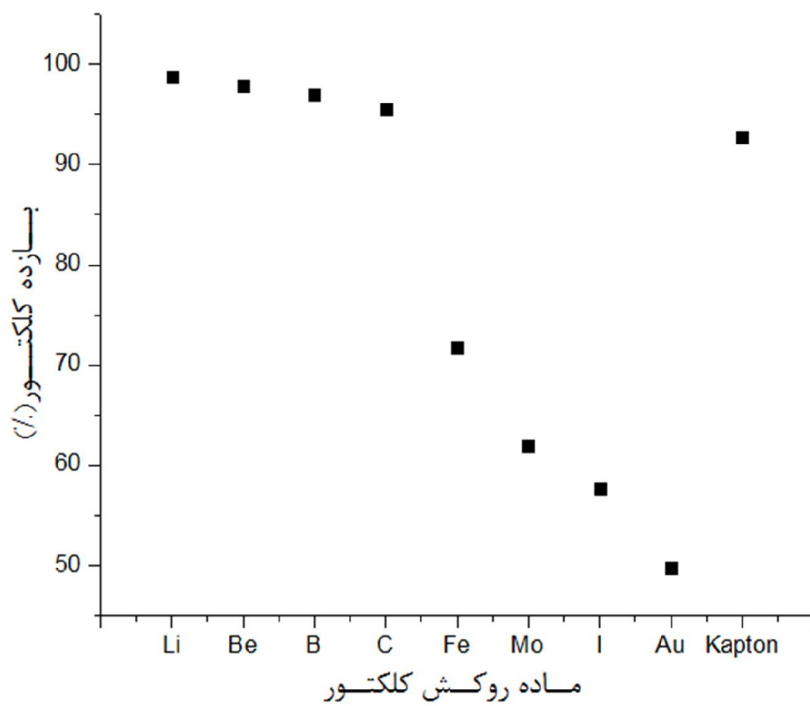
شکل هندسی این باتری را به صورت یک چشمه‌ی کروی به شعاع ۱Cm در نظر گرفتیم که در میان یک کلکتور کروی به شعاع ۲Cm قرار داشت، ضخامت چشمه $5\mu m$ در نظر گرفته شد زیرا تقریباً در این ضخامت چشمه به ضخامت مؤثر می‌رسد (حتی اگر ضخامت از این مقدار نیز بیشتر شود تأثیر چندانی بر جریان خروجی ندارد) و ضخامت روکش کلکتور برای این قسمت ۱Cm در نظر گرفته شد اما در مراحل بعدی ضخامت حدی برای روکش کلکتور برآورد شده است.

نتایج این قسمت در شکل‌های ۱-۳ و ۲-۳ مشاهده می‌شوند.

۱-Kapton



شکل (۱-۳). بازده روکش کلکتور با چشمه‌ی رادیواکتیو Pm-147 برای Li, Be, B, C, Fe, Mo, I, Au و C_3F_6 (کپتون).

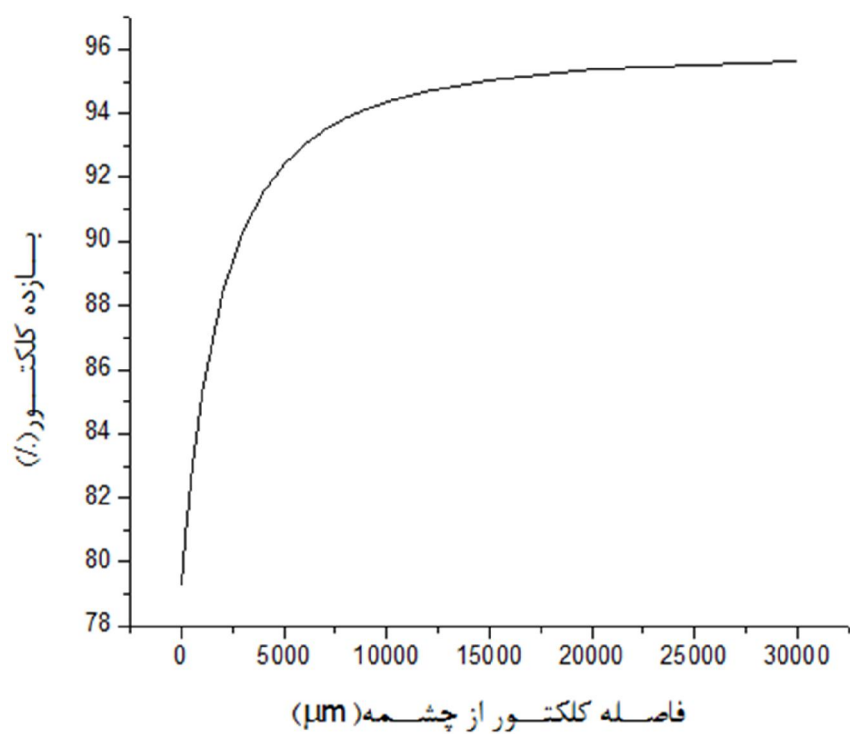


شکل (۲-۳). بازده روکش کلکتور با چشمه‌ی رادیواکتیو Ni-63 برای Li, Be, B, C, Fe, Mo, I, Au و C_3F_6 (کپتون).

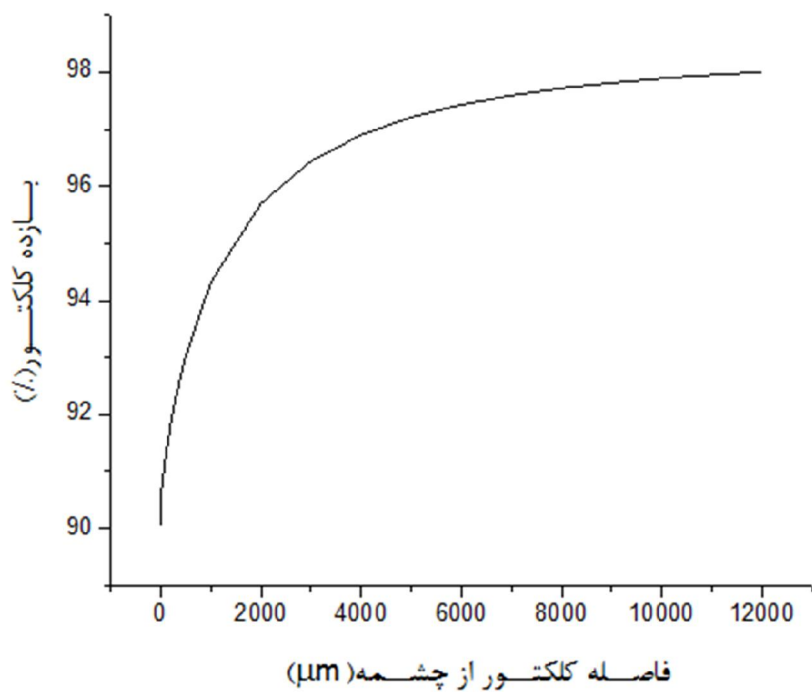
با توجه به شکل‌های بالا Li با بازده ۹۶/۷۸٪ برای Pm-147 و ۹۸/۷۶٪ برای Ni-63 بالاترین بازده را در میان مواد دیگر برای روکش کلکتور برای هر دو چشمه دارد، لیکن استفاده از Li به عنوان روکش کلکتور تقریباً غیر ممکن است، زیرا این عنصر میل ترکیبی بسیار بالایی دارد و حتی در هوای آزاد به سرعت با رطوبت هوا واکنش داده و اکسید می‌شود، لذا در ادامه‌ی شبیه سازی‌های خود از ماده‌ای که بعد از لیتیم بیشترین بازده را برای کلکتور داشت یعنی Be به عنوان روکش کلکتور استفاده می‌کنیم و این ماده را به عنوان روکش کلکتور انتخاب می‌کنیم، در شکل ۲-۳ بازده کلکتور با روکش بریلیم برای چشمه‌ی Pm-147، ۹۴/۳۹٪ و برای چشمه‌ی Ni-63، ۹۷/۸۸٪ می‌باشد.

۲-۲-۳ انتخاب ابعاد مناسب برای باتری کروی

برای پیدا کردن ابعاد مناسب ابتدا کلکتور را در فاصله‌ی یک میکرومتری از چشمه‌ی رادیو اکتیو قرار داده و بازده آن را به دست آوردیم و به تدریج فاصله‌ی آن را از چشمه افزایش داده تا به یک مقدار حدی برای بازده برسیم، شعاع چشمه برای این قسمت ۱Cm در نظر گرفته شده است، نتایج این شبیه سازی‌ها در شکل‌های ۳-۳ و ۴-۳ مشاهده می‌شوند.



شکل (۳-۳). تغییرات بازده کلکتور با روکش Be نسبت به افزایش فاصله از چشمه ی Pm-147 کروی به شعاع 1Cm .



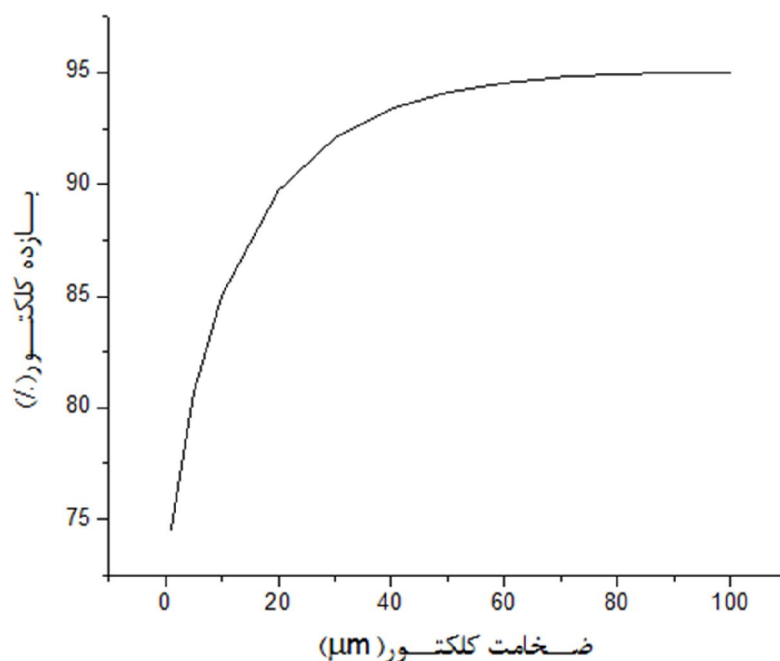
شکل (۴-۳). تغییرات بازده کلکتور با روکش Be نسبت به افزایش فاصله از چشمه ی Pm-147 کروی به شعاع 1Cm .

با توجه به نتایج به دست آمده از این قسمت بازده کلکتور با روکش Be برای چشمه‌ی Pm-147 حدوداً در فاصله‌ی ۱/۵ سانتیمتری از چشمه به مقدار حدی ۹۵/۰۴٪ می‌رسد و برای چشمه‌ی Ni-63 در فاصله‌ی یک سانتیمتری از چشمه به مقدار حدی ۹۷/۸۹٪ می‌رسد.

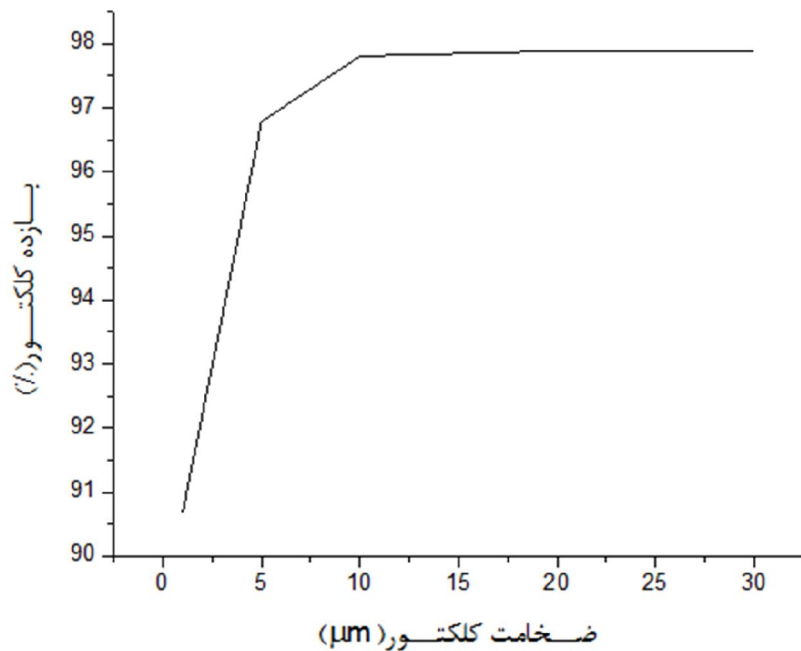
۳-۲-۳ تعیین ضخامت حدی برای پوشش کلکتور

مرحله‌ی نهایی، تعیین ضخامت حدی برای پوشش کلکتور است، یعنی تعیین ضخامتی از پوشش کلکتور که در آن بازده کلکتور به یک مقدار حدی می‌رسد و پس از آن افزایش پوشش کلکتور دیگر تأثیری در افزایش بازده چشمه نخواهد داشت.

برای این منظور ضخامت پوشش بریلیم برای سطح کلکتور را با همان شکل هندسی کروی که در بخشهای قبل استفاده شد در فاصله‌ی بهینه از یک میکرو متر تدریجاً افزایش داده تا به ضخامت حدی برای روکش کلکتور برسیم.



شکل (۳-۵). تغییرات بازده کلکتور برای چشمه‌ی کروی Pm-147 با شعاع ۱Cm نسبت به تغییرات ضخامت پوشش سطح کلکتور.



شکل (۳-۶). تغییرات بازده کلکتور برای چشمه‌ی کروی Ni-63 با شعاع ۱Cm نسبت به تغییرات ضخامت پوشش سطح کلکتور.

با توجه به نتایج به دست آمده از این قسمت مقدار ضخامت حدی روکش بریلیم برای کلکتور با چشمه‌ی Pm-147، $100\text{ }\mu\text{m}$ و با چشمه‌ی Ni-63، $20\text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد.

۳-۳ نتایج کلی در مورد بازده کلکتور

با توجه به حاصل شبیه سازی‌های این فصل به نتایج زیر می‌رسیم:

۱- لیتیوم به عنوان بهترین ماده برای استفاده به عنوان پوشش سطح کلکتور برای چشمه‌های Ni-63 و Pm-147 شناخته شد، اما به این دلیل که لیتیوم به شدت واکنش پذیر می‌باشد و با رطوبت هوا واکنش می‌دهد، نمی‌توان از آن استفاده نمود، در نتیجه از ماده‌ای که بعد از لیتیوم بهترین ماده برای پوشش سطح کلکتور بود یعنی بریلیم در شبیه سازی‌های خود استفاده کردیم.

۲- برای بازده کلکتور برای چشمه‌ی کروی Pm-147 به شعاع ۱Cm در فاصله‌ی 1.5Cm از چشمه با روکش بریلیم به مقدار حدی $95/04\%$ و برای چشمه‌ی کروی Ni-63 به شعاع ۱Cm در فاصله‌ی

۱ Cm از چشمه با روکش بریلیم به مقدار حدی $97/89\%$ رسیدیم.

۳- پوشش Be برای سطح کلکتور با چشمه ی Pm-147 در ضخامت $100\mu m$ و با چشمه ی Ni-63 در ضخامت $20\mu m$ به مقدار حدی می رسد و در ضخامت های بیش تر از این مقدار تغییر قابل توجهی در بازده کلکتور حاصل نمی شود.

فصل چهارم

نتیجه گیری

در این فصل به جمع بندی و بیان کلی مطالب و کارهای انجام شده در زمینه‌ی افزایش بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم می‌پردازیم.

۴-۱ بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

همان‌طور که در فصل اول بیان شد بازده باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم هنگامی که بیشترین توان از بار عبور می‌کند نسبت به ولتاژ دو سر باتری توسط رابطه‌ی زیر برآورد می‌شود:

$$\xi = \frac{U \cdot \eta_R(U) \cdot \eta_s \cdot K_g \cdot (1-s) \cdot (1-b)}{2 \cdot \mathcal{E}_{avg}} \quad (۱-۴)$$

یاد آور می‌شویم که در معادله‌ی بالا U ولتاژ دو سر باتری، $\eta_R(U)$ فاکتور دافعه بر اثر انباشت ولتاژ، q_e بار ذرات بتا، A اکتیویته‌ی چشمه، η_s بازده چشمه، K_g فاکتور شکل هندسی، s نسبت الکترونهای ثانویه به الکترونهای فرودی برای کلکتور و b نسبت الکترون‌های پس پراکنده شده به الکترون‌های فرودی برای کلکتور می‌باشد.

در نتیجه اگر بخواهیم بازده باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم را افزایش دهیم باید یک یا چند یا تمام فاکتورهای $\eta_R(U)$ ، η_s ، K_g را افزایش و $\mathcal{E}_{avg}$ یا s یا b را کاهش دهیم.

در رابطه‌ی ۱-۵ عبارت $(1-b) \cdot (1-s)$ را با η_c (بازده کلکتور) تعویض می‌کنیم و در نتیجه رابطه‌ی ۱-۵ به شکل زیر در می‌آید:

$$\xi = \frac{U \cdot \eta_R(U) \cdot \eta_s \cdot K_g \cdot \eta_c}{2 \cdot \mathcal{E}_{avg}} \quad (۲-۴)$$

۴-۲ انتخاب چشمه

در انتخاب چشمه باید از مواد رادیواکتیو با میانگین انرژی نسبتاً پایین و نیمه عمری در حد طول عمر باتری استفاده شود، افزایش $\mathcal{E}_{avg}$ باعث افزایش الکترون‌های ثانویه و دشارژ خود به خودی بر اثر

افزایش ولتاژ باتری و همچنین با توجه به رابطه‌ی ۴-۱ باعث کاهش بازده می‌شود، به همین دلیل در شبیه سازی‌های خود از چشمه‌های رادیواکتیو با میانگین انرژی ذرات نسبتاً پایین مانند Pm-147 با انرژی میانگین ذرات ۶۲ KeV و نیمه عمر ۲/۶۲ سال و NI-63 با انرژی میانگین ذرات ۱۷/۴ KeV و نیمه عمر ۱۰۰/۱ سال استفاده کرده‌ایم.

۴-۳ بازده چشمه

به منظور افزایش بازده چشمه یعنی η_s یک چشمه‌ی استوانه‌ای Pm-147 و Ni-63 را طراحی کرده و ابعاد چشمه را تغییر دادیم و مواد مختلفی را به عنوان روکش سطح جانبی و زیرلایه‌ی چشمه مورد بررسی قرار دادیم و در نهایت به این نتایج رسیدیم.

۱- بازده چشمه با افزایش سطح چشمه افزایش پیدا می‌کند و با افزایش ضخامت چشمه کاهش پیدا می‌کند.

۲- اگر بخواهیم چشمه‌ای استوانه‌ای با سطوح کوچک داشته باشیم، هم زیر لایه و هم پوشش سطح جانبی در بازده چشمه نقش قابل توجهی دارند و برای پوشش سطح جانبی و زیرلایه‌ی چشمه باید از ماده‌ی مناسبی استفاده شود، هرچه ضخامت چشمه بیشتر شود اثر پوشش سطح جانبی نیز بیشتر می‌شود، و هرچه سطح چشمه بزرگتر شود اثر پوشش سطح جانبی در افزایش بازده کم‌تر می‌شود.

۳- زیرلایه‌ای که برای چشمه در نظر گرفته می‌شود، چه در شعاع‌های کوچک و چه در شعاع‌های بزرگ (برای چشمه) بر روی بازده تأثیر گذار است و تأثیر آن در افزایش بازده با افزایش شعاع چشمه به مقدار حدی می‌رسد، اما با افزایش ضخامت چشمه اثر زیرلایه کاهش می‌یابد زیرا با افزایش ضخامت چشمه الکترون‌های پس‌پراکنده شده توسط زیرلایه نمی‌توانند از چشمه بگذرند و به سطح خارجی آن برسند.

۴- در بین چهار ماده‌ای که مورد بررسی قرار گرفتند، طلا بهترین ماده برای استفاده به عنوان زیرلایه

و آنتیموان بهترین ماده برای استفاده به عنوان پوشش سطح جانبی شناخته شد.

۵- در نهایت برای چشمه‌ی Pm-147 با ضخامت $0.2\text{ }\mu\text{m}$ و شعاع $100\text{ }\mu\text{m}$ با زیرلایه‌ی طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان به بازده ۷۷٪ رسیدیم و مقادیری که برای بازده این چشمه تاکنون به صورت تئوری به دست آمده بین ۴۰ تا ۶۷ درصد و مقدار تجربی به دست آمده برای بازده این چشمه بین ۳۴ تا ۶۱ درصد می‌باشد [۹] و برای چشمه‌ی Ni-63 با مشخصات فوق به بازده ۴۶/۹٪ رسیدیم.

۴-۴ بازده کلکتور و انتخاب شکل هندسی

قدم بعد در راستای افزایش بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم، افزایش بازده کلکتور بود. در این مرحله باتری هسته‌ای با شارژ مستقیم را به صورت دو کره‌ی هم مرکز در نظر گرفتیم که چشمه بر روی کره‌ی داخلی قرار گرفته بود و کلکتور به صورت یک پوسته‌ی کروی به دور چشمه قرار داشت.

علت انتخاب شکل هندسی کروی برای باتری به این دلیل بود که شکل کروی دارای فاکتور شکل هندسی یک یا به عبارتی ۱۰۰٪ می‌باشد، یعنی تمام ذراتی که از چشمه گسیل می‌شوند به کلکتور می‌رسند و هیچکدام از فضای بین چشمه و کلکتور خارج نمی‌شوند (اگر پتانسیلی بین سطوح چشمه و کلکتور وجود نداشته باشد).

در این مرحله عناصر ید، مولیبدنیم، آهن، طلا، لیتیم، برلییم، بور و پلیمر کپتون را برای استفاده به عنوان روکش کلکتور مورد بررسی قرار دادیم که در میان این مواد، کلکتور با روکش لیتیم بیشترین بازده را داشت، اما این عنصر به شدت واکنش پذیر است و به سرعت با رطوبت موجود در هوا واکنش می‌دهد، لذا استفاده از آن مشکل می‌باشد، در نتیجه برای شبیه سازی‌های خود از برلییم استفاده کردیم، زیرا این عنصر بعد از لیتیم بیشترین بازده را برای روکش کلکتور نتیجه داد.

برای بازده کلکتور در این قسمت برای چشمه‌ی کروی Pm-147 به شعاع ۱Cm به بازده ۹۵/۰۴٪ و برای چشمه‌ی کروی Ni-63 با شعاع ۱Cm به بازده ۹۷/۸۹٪ رسیدیم.

فاکتور نهایی عبارت است از فاکتور دافعه بر اثر انباشت ولتاژ $\eta_R(U)$. فاکتور $\eta_R(U)$ عبارت است از:

$$\eta_R(U) = \frac{\text{تعداد ذراتی که بر اثر نیروی دافعه به کلکتور نمی‌رسند} - \text{تعداد ذراتی که چشمه را ترک می‌کنند}}{\text{تعداد ذراتی که چشمه را ترک می‌کنند}} \quad (3-4)$$

در مجموع پارامترهای مؤثر بر بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه‌ی Pm-147 و مقادیری که برای این فاکتورها به دست آمد در جدول ۵-۱ مشاهده می‌شوند.

جدول (۴-۱). پارامترهای مؤثر بر بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه‌ی Pm-147

پارامترهای مؤثر بر بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم.	مقادیر مربوط به این پارامترها برای چشمه‌ی Pm-147
بازده چشمه (η_s)	۰/۷۷۳۷
بازده کلکتور (η_c)	۰/۹۵۰۵
فاکتور شکل هندسی (K_g)	۱
$U \cdot \eta_R(U) / \epsilon_{avg}$	۰/۴۵

که عبارت $U \cdot \eta_R(U) / \epsilon_{avg}$ در [۹] محاسبه شده است.

خطای نسبی مقادیر حاصل از شبیه سازی در جدول ۴-۱ (بازده چشمه و بازده کلکتور) از مرتبه‌ی 10^{-4} می‌باشد.

حال برای بازده باتری مورد بررسی در این پژوهش با چشمه‌ی Pm-147 از رابطه‌ی ۴-۲ به مقدار ۱۶/۵٪ می‌رسیم که حدوداً ۴/۵٪ از مقداری که تاکنون برای بازده این باتری به دست آمده بیش‌تر می‌باشد.

- [1] H. G. J. Moseley, and J. Harling, "The Attainment of High Potential by the Use of Radium, " Proc. R.Soc. (London) A, 88, 471 (1913).
- [2] <http://www.fuelcellsforpower.com/Energy-Density.html>
- [3] <http://www.batteryuniversity.com/partone-3.htm>
- [4] <http://homepages.cae.wisc.edu/blancher/res/BlanchardKorea.pdf>
- [5] W. R. Corliss, and D. J. Harvey, "Radioisotopic power generation," Englewood Cliffs: Prentice-Hall (1964).
- [6] Y. V. Lazarenko, V. V. Gusev, and A. A. Pystovalov, "Basic parameters of a radionuclide thermoelectric generator," Atomic Energy 64 (2), 131 (1988).
- [7] D. J. Anderson, W. A. Wong, et al., "An Overview and Status of NASAs Radioisotope Power Conversion Technology NRA," NASA/TM-2005-213980 (2005).
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
- [9] Nikolayevna G., (2010), PhD thesis, "Nuclear batteries with Tritium and Pm-147 radioactive sources", University of Illinois.
- [10] W. F. Windle, "Pm-147-Silicon Betavoltaic battery Feasibility," Report Sandia Corporation SC-RR-65-671 (1966)
- [11] J. V. Kramer, the Electrician, 93, 497 (1924) .
- [12] Liu, K. P. Chen, N. P. Kherany, et al., "Betavoltaics using Scandium tritide and contact potential difference," Applied Physics Letters 92, 083511 (2008).
- [13] A. G. Kavetsky , S. N. Nehkoroshkov, S. P. Meleshkov et al., "Radioactive materials, ionizing radiation sources, and radioluminescent light sources for nuclear batteries." In: K.
- [14] Y. V. Lazarenko, V. V. Gusev, and A. A. Pystovalov, "Basic Parameters of a radionuclide thermoelectric generator," Atomic Energy 64 (2), 131 (1988).

- [15] E. Schwartz, "Secondary-Emission Nuclear Battery," AD-66176 (1955).
- [16] G. H Miley, "Direct Conversion of Nuclear Radiation Energy," American Nuclear Society (1970).
- [17] H. T. Sampson, and G. H. Miley, "Gamma-Electric Cell," US Patent 3,591,860 (1968).
- [18] B. Gross, and P. V. Murphy, "Currents from Gammas Make Detectors and Batteries," Nucleonics 19, 86 (1961).
- [19] H. G. J. Mosely, and J. Harling, "The Attainment of High Potentials by the Use of Radium," Proc. R. Soc. (London) A, 88, 471 (1913).
- [20] J. N. Anno, "A Direct-Energy Conversion Device Using Alpha Particles," Nucl. News, 6, 3 (1962).
- [21] E. G. Linder and S. M. Christian, "Use of Radioactive Material for the Generation of High Voltage," J. Appl. Phys., 23, 11, 1213 (1952).
- [22] W. R. Corliss, and D. J. Harvey, "Radioisotopic power generation," englewood cliffs: Prentice-Hall(1964).

[۲۳] راهنمای استفاده از کد شبیه سازی MCNP4C، مهدی وفابخش، یاشار ریاضی، انتشارات اندیشه سرا، چاپ اول ۱۳۹۰.

[۲۴] کاربرد شبیه سازی MCNP در محاسبات مهندسی هسته‌ای، پژمان شیرمردی، علی طاهری، جمال امیری، انتشارات سنوبرگ، بهار ۸۹.

[۲۵] نیکلاس سولفانیدس، اسفند ۱۳۷۰، اندازه گیری و آشکار سازی تابش‌های هسته‌ای، دکتر رحیم کوهی، چاپ اول، انتشارات سیمین، صفحه ۳۸۲.

[۲۶] نیکلاس سولفانیدس، اسفند ۱۳۷۰، اندازه گیری و آشکار سازی تابش‌های هسته‌ای، دکتر رحیم کوهی، چاپ اول، انتشارات سیمین، صفحه ۳۸۵.

[۲۷] نیکلاس سولفانیدس، اسفند ۱۳۷۰، اندازه گیری و آشکار سازی تابش های هسته ای، دکتر رحیم کوهی، چاپ اول، انتشارات سیمین، صفحه ۳۸۷.

[28] Robley D. Evants, 1955, the atomic nucleus, page 593.

[۲۹] نیکلاس سولفانیدس، اسفند ۱۳۷۰، اندازه گیری و آشکار سازی تابش های هسته ای، دکتر رحیم کوهی، چاپ اول، انتشارات سیمین، صفحه ۱۸۱.

Abstract

Nuclear battery is a device that convert the energy that is released from radioactive decay to electric energy[1]. This kind of battery divides into the three groups; direct convert, indirect convert, and direct charge nuclear battery. High energy density and high longevity are the advantages of nuclear batteries [2,3]. The first nuclear battery was a direct charge nuclear battery that was built by moseley in 1913 .

In this research we study about the factors that affect on increasing the efficiency of direct charge nuclear battery with simulating parts of it with MCNP4C code. In this kind of battery the charged particles that emit from a radioactive source collect directly with a plane in front of source. The activities that have done for increasing the efficiency of this kind of battery was, selecting the proper material for radioactive source in this kind of battery, selecting the proper geometric shape for battery, selecting proper materials for substrate and side cover to increasing the efficiency of source, selecting the proper material for use in surface cover of collector to increase its efficiency and also estimation of effective thickness of substrate and side cover of source and surface cover of collector.

Finally we achieve to efficiency of 16.5%, this amount have 37% relative increasing in compare of latest works that have almost efficiency of 12%.



Shahrood University

Physics Department

Master of Science Thesis

Study of the feasibility of increasing the efficiency of a direct charge nuclear battery

Supervisor:

Dr. Hosein Tavakoli Anbaran

By:

Mohamad ranjbaran

September - 2014

