شبیه‌سازی و ساخت باتری بتاولتائیک به منظور استفاده در ضربان‌ساز قلب با استفاده از نیم‌رسانای کاربید سیلیکون و مقایسه چشمه‌های ^{63}Ni، ^{90}Sr

مهدیه میرزامحمدی، حسین توکلی عنبران*، محمد مقصودی

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود،ایران

چکیده

در این پژوهش، طراحی و شبیه‌سازی و ساخت یک باتری بتاولتائیک برای کاربرد در مولد انرژی نوسان‌سازهای قلب مبتنی بر چشمه ^{63}Niو ^{90}Sr با استفاده از نیم‌رسانای کاربید سیلیکون مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها به روش مونت کارلو و با استفاده از کد MCNPX انجام شد تا ضخامت بهینه لایه نیم‌رسانا و میزان انرژی جذب‌شده در لایه‌ها تعیین شود. و طبق آن ضخامت ۲ میکرومتر به عنوان ساختار بهینه معرفی شد وبراساس آن مقدار چگالی جریان اتصال کوتاه برابر با ۱۹/۲ نانوآمپربر سانتی متر مربع ، مقدار ولتاژ مدار بازبرابر با ۲/۴۷ ولت و درصد بازدهی برابر با ۳۵/۵ برای چشمه ^{63}Niو برای چشمه ^{90}Sr مقدار چگالی جریان اتصال کوتاه برابر با ۱۲۶/۲۵ نانوآمپربر سانتی متر مربع ، مقدار ولتاژ مدار بازبرابر با ۲/۵۶۰ ولت و درصد بازدهی برابر با ۱/۸ به دست آمد.

در مرحله ساخت، دو روش دکتر بلید و کندوپاش برای رسوب‌دهی لایه‌ها مورد استفاده قرار گرفت و چهار نوع زیرلایه شیشه، آلومینیوم، ویفر سیلیکونی و تنگستن ارزیابی شد. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از نیم‌رسانای کاربید سیلیکون و چشمه ^{63}Ni، ^{90}Sr همراه با بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها و انتخاب زیرلایه مناسب، امکان ساخت باتری‌های بتاولتائیک با عملکرد قابل اعتماد، ایمنی پرتویی بالا، طول عمر طولانی و چگالی انرژی بالا با پتانسیل اولیه برای کاربردهای توان پایین از جمله در مولد انرژی نوسان‌ساز قلب را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: *کد شبیه‌سازی MCNPX، نیم‌رسانای کاربید سیلیکون، چشمه ^{90}Sr، چشمه ^{63}Ni*

ایمیل نویسنده مسئول: Tavakoli-Anbaran@shahroodut.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۵/۰۲/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۲

۱-مقدمه

ابزارهایی که انرژی حاصل از فرآیند واپاشی پرتوزا را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند با عنوان باتری‌های هسته‌ای شناخته می‌شوند[۱]. این باتری‌ها از انرژی آزادشده در واپاشی هسته‌ای اتم‌های ماده رادیواکتیو، به عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند[۲]. چگالی انرژی بسیار بالا، طول عمر عملیاتی طولانی و قابلیت کوچک‌سازی از مهم‌ترین مزایای این باتری‌ها به شمار می‌روند [۳].

باتری‌های هسته‌ای به‌طور کلی بر اساس مکانیزم تبدیل انرژی به دو گروه حرارتی و غیرحرارتی تقسیم می‌شوند[۴]. باتری‌های حرارتی، مانند مولدهای ترموالکتریک رادیوایزوتوپی[۱]، گرمای تولیدشده در اثر واپاشی مواد پرتوزا توسط ترموکوپل‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، بازده تبدیل انرژی در این مبدل‌ها معمولاً در محدوده ۸ تا ۱۰ درصد گزارش شده است [۵].

باتری‌های غیرحرارتی شامل سه گروه اصلی باتری‌های با تبدیل مستقیم، تبدیل غیرمستقیم و باتری‌های شارژ مستقیم هستند. در میان این دسته‌ها، باتری‌های بتاولتائیک در گروه تبدیل مستقیم قرار دارند و عملکرد آن‌ها مبتنی بر اثر بتاولتائیک است. توان خروجی این باتری‌ها معمولاً در محدوده چند نانووات تا صدها نانووات قرار می‌گیرد [۶].

انتخاب نوع چشمه پرتوزا و نیم‌رسانای مناسب، نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده تبدیل انرژی باتری‌های بتاولتائیک دارد. نیم‌رساناهای پهن‌باند مانند کاربید سیلیکون[۲]، گالیوم نیترید و الماس به دلیل بازده تبدیل بالا و مقاومت مناسب در برابر تابش، گزینه‌های مطلوبی برای این کاربرد محسوب می‌شوند[۷] با این حال تحقیقات اخیر این فرضیه را که شکاف باند وسیع‌تر همیشه منجر به عملکرد بهتر می‌شود، به ویژه برای منابع با توان خروجی بالا به چالش کشیده است[۸] اما باید دانست در کاربردهایی مانند مولد انرژی نوسان‌سازهای قلب، استفاده از منابع پرتوزای با توان بالا امکان‌پذیر نیست، زیرا توان باید تنها در حد نیاز دستگاه باشد و از آسیب به بافت‌های اطراف جلوگیری شود. اولین باتری بتاولتائیک مورد استفاده در ضربان‌ساز قلب در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط لری سی. اولسن[۳] در آزمایشگاه مک‌دانل داگلاس مورد بررسی قرار گرفت[۹].

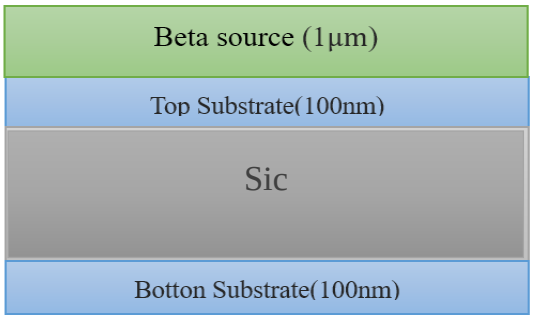
یک سلول بتاولتائیک از دو بخش اصلی چشمه رادیواکتیو و نیم‌رسانا تشکیل می‌شود. ناحیه پیوند در نیم‌رساناها می‌تواند از نوع p-n و p-i-n ویا شاتکی باشد[۱۰].

در این پژوهش، ساخت یک باتری دارای پتانسیل اولیه استفاده در مولد انرژی نوسان‌ساز قلب بر پایه نیم‌رسانای کاربید سیلیکون و مقایسه دو چشمه ^{63}Ni و ^{90}Sr به صورت شبیه‌سازی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول، با استفاد از شبیه‌سازی به روش مونت کارلو ضخامت بهینه نیم‌رسانا و انرژی جذب‌شده در لایه‌ها استخراج گردید. سپس در مرحله ساخت، دو روش دکتر بلید[۴] وکندوپاش[۵] برای تهیه لایه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. زیرلایه‌های مختلف ارزیابی شدند و مطلوب‌ترین زیرلایه انتخاب و آزمون‌های تکمیلی بر روی نمونه نهایی انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- اصول نظری

شکل یک نمایی از سطح مقطع باتری بتاولتائیک بررسی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمای شماتیک ساختار لایه‌ای باتری بتاولتائیک

[1] Radioisotope Thermoelectric Generator
[2] Silicon Carbide (SiC)
[3] Larry C. Olsen
[4] DoctorBlade
[5] Sputtering

با توجه به ساختار باتری‌های بتاولتائیک و مکانیسم اثر بتاولتائیک، بازدهی کل این نوع باتری را می‌توان به‌صورت حاصل ضرب بازده مراحل مختلف تبدیل انرژی تعریف کرد. به طور کلی، بازده کل باتری بتاولتائیک به صورت زیر بیان می‌شود[۱۱]:

$$\eta_t = \eta_\beta \times \eta_c \times \eta_s \qquad (۱)$$

که در این فرمول η_β بازدهی چشمه بتا[۶] و η_c بازدهی اتصال[۷] و η_s بازدهی نیم‌رسانا[۸] می‌باشد. برای به دست آوردن بازدهی بالا، بازدهی چشمه و اتصال نیم‌رسانا باید در بیشترین مقدار خود باشند[۱۱].

۲-۲- بازدهی چشمه η_β

بازدهی چشمه بتا، باتوجه به فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_\beta = \frac{N_\beta}{N_0} \qquad (۲)$$

N_0 تمام بتاهای تولید شده در چشمه و N_β بتاهای رسیده به نیم‌رسانا می‌باشند[۱۲] این بازدهی وابسته به چشمه بتازا است. اثر خود جذبی چشمه رادیوایزوتوپ و اتلاف جهتی به دلیل تابش همسانگرد ذرات بتا از عوامل اصلی ایجاد این بازدهی هستند. انتخاب رادیوایزوتوپ مناسب به‌عنوان چشمه پرتوزا یکی از اساسی‌ترین مراحل در طراحی باتری‌های بتاولتائیک است. چشمه‌ای برای استفاده در تحقیقات و ساخت باتری مطلوب خواهد بود که از نظر فاکتورهایی نظیر ایمنی پرتویی، میزان آسیب‌های ناشی از تابش، نیمه‌عمر، در دسترس بودن و سازگاری با نیازهای عملکردی سیستم، شرایط بهینه‌ای داشته باشد. به همین دلیل نمی‌توان از هر ایزوتوپ پرتوزایی در طراحی و ساخت باتری استفاده کرد[۱۳].

جدول ۱. برخی ازمنابع رادیو اکتیو بتازا[٤]

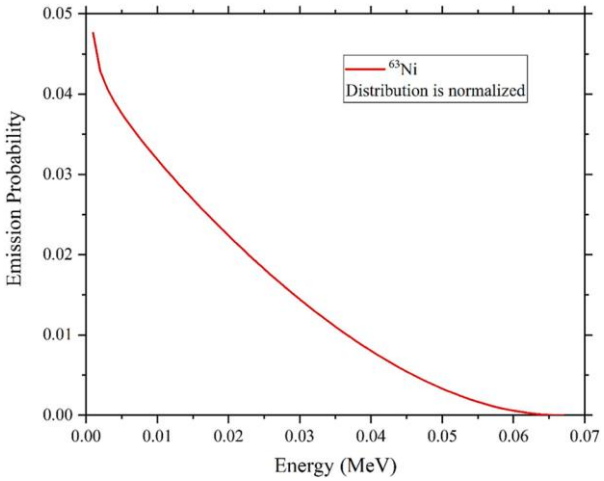
منبع رادیو اکتیو	نوع واپاشی	حداکثر انرژی بتا (KeV)	متوسط انرژی واپاشی(eV K)	نیمه عمر (سال)
^{3}H	بتا	۱۸/۶	۵/۷	۱۲/۳
^{147}Pm	بتا	۲۳۰	۷۳	۲/۶
^{90}Sr	بتا	۵۷۶	۱۹۶	۲۸/۶
^{63}Ni	بتا	۶۷	۱۷	۱۰۰
^{35}S	بتا	۱۶/۴۷۷	۵۳/۱	/۲۳۹۰

گسیلنده‌های آلفا به‌دلیل برخورداری از قدرت توقف خطی[۹] بالا، پس از ورود به ساختار نیم‌رسانا منجر به ایجاد نقص‌های ساختاری[۱۰] و تغییرات جدی در شبکه بلوری می‌شوند. این آسیب‌های تجمعی با گذشت زمان موجب کاهش بازدهی باتری می‌گردند. از سوی دیگر، پرتوهای گاما به‌دلیل احتمال پایین برهم‌کنش با ماده، نیازمند چشمه‌هایی با فعالیت پرتوزایی بالا هستند. این امر مستلزم استفاده از حفاظ‌های حجیم برای مهار پرتو گاما خواهد بود که باعث افزایش ابعاد باتری شده و کاربرد آن را در سامانه‌های ظریفی مانند ضربان‌سازهای قلبی محدود می‌سازد[۱۲]. با توجه به ویژگی‌های بیان شده در جدول ۱، از جمله سطح ایمنی، نوع تابش، نیمه‌عمر مناسب، و قابلیت استفاده در سامانه‌های حساس پزشکی، چشمه ^{63}Ni[۶] به‌عنوان اولین چشمه، مورد بررسی قرار گرفت. این ایزوتوپ دارای نیمه‌عمری برابر با ۱۰۰/۱سال بوده و از طریق واپاشی بتای خالص واپاشی می‌کند[۱۴].

[6] Beta Source Efficiency
[7] Coupling Efficiency
[8] Semiconductor Efficiency

[9] Linear Energy Transfer (LET)
[10] Point Defact

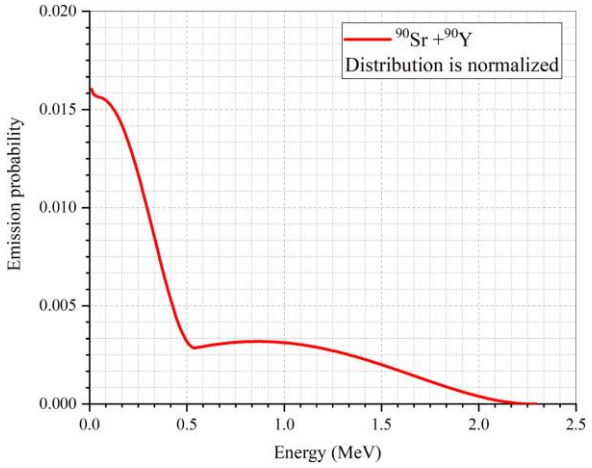
چشمه ^{63}Ni یک گسیلنده‌ی بتای خالص است که بیشینه انرژی ذرات بتای گسیل‌شده از آن برابر با ۶۶ کیلوالکترون‌ولت و انرژی متوسط آن‌ها حدود ۱۷ کیلوالکترون‌ولت می‌باشد[۱۵]. در شکل ۲، طیف انرژی ذرات بتای منتشرشده از چشمه ^{63}Ni نشان داده شده است. این طیف به صورت پیوسته بوده و محدوده انرژی آن از صفر تا ۶۶ کیلوالکترون‌ولت می‌باشد. و قابل توجه است که بدانیم در شبیه‌سازی مونت کارلو از این طیف استفاده شده است.



شکل۲. طیف بتای چشمه ^{63}Ni [۷]

به عنوان دومین چشمه، چشمه ^{90}Sr مورد بررسی قرار گرفت. این ایزوتوپ دارای نیمه عمری برابر با ۲۸/۶ سال بوده است.

بیشینه انرژی ذرات بتای گسیل شده این ایزوتوپ برابر با ۵۷۶ کیلوالکترون ولت و انرژی متوسط آن ۱۹۶ کیلوالکترون ولت و هسته دختر آن با بیشینه انرژی ۲۲۷۰ کیلو الکترون ولت و انرژی متوسط ۹۳۳ کیلو الکترون ولت نیز می‌باشد. در شکل ۳ طیف انرژی ذرات ^{90}Y /^{90}Sr نشان داده شده است. در شبیه مونت کارلو مربوط به این چشمه نیز از این طیف استفاده شده است[۱۴].



شکل۳. طیف انرژی چشمه ^{90}Sr /^{90}Y [۱۶]

با در نظر گرفتن مقدار عدد اتمی مؤثر کاربید سیلیکون برابر با ۱۱/۷ و استفاده از رابطه‌ی زیر :

$$T = 4 \times 10^{-4} Z_{eff} T_{av}^{2} \qquad (۳)$$

برای برآورد انرژی تلف‌شده به‌صورت تابش ترمزی، مشخص شد که سهم انرژی از دست‌رفته برای چشمه ^{63}Ni حدود 10^{-6} مگا الکترون ولت و برای چشمه ^{90}Sr در حدود 4×10^{-3} مگا الکترون ولت است. هرچند این مقادیر در مقایسه با انرژی کل چشمه ناچیز محسوب می‌شوند و با حفاظ گذاری مناسب قابل کنترل هستند. علاوه بر این، برای دستیابی به اکتیویته‌ی یکسان، جرم موردنیاز ^{63}Ni تقریباً ۳/۵ برابر جرم ^{90}Sr است. با این حال، نیمه‌عمر طولانی ^{63}Ni (در حدود ۱۰۰/۱ سال) در مقایسه با نیمه‌عمر ۲۸/۶ ساله‌ی ^{90}Sr یک مزیت بنیادین برای کاربردهای بلندمدت به‌ویژه در سامانه‌های پزشکی و ایمپلنت‌ها ایجاد می‌کند.

۳-۲- بازده اتصال η_c

بازدهی اتصال میزان ورود ذرات بتا به نیم‌رسانا و احتمال جمع آوری زوج الکترون–حفره را نشان می‌دهد و از رابطه زیر پیروی می‌کند[۸]:

$$\eta_c = (1 - \eta_{BSE}) c_\beta \qquad (۴)$$

در این فرمول c_β احتمال جمع‌آوری الکترون–حفره و η_{BSE} ضریب پس پراکندگی ذرات بتا از سطح نیم‌رسانا است. ضریب η_{BSE} به عنوان یک معیار ارزیابی در انتخاب نیم‌رسانا به عنوان مبدل سلول بتاولتائیک لحاظ می‌گردد و این ضریب به صورت کسری از الکترون های بازتاب شده از سطح نیم‌رسانا به کل تعداد ذرات بتای فرودی به نیم‌رسانا تعریف می‌شود و از رابطه(۵) به دست می‌آید[۸]:

$$\eta_{BSE} = \frac{N_{BSE}}{N_\beta} \qquad (۵)$$

در طراحی باتری‌های بتاولتائیک، به‌ویژه در شرایطی که از چشمه‌های بتازای با انرژی بالا استفاده می‌شود، باید سهم اتلاف انرژی ناشی از تابش ترمزی در نظر گرفته شود، چرا که این پدیده می‌تواند بازده تبدیل انرژی را کاهش داده و بر ایمنی سیستم تأثیرگذار باشد.

۲-۴- بازدهی نیم‌رسانا

عملکرد سلول‌های بتاولتائیک به شدت به میزان تولید جفت‌های الکترون–حفره وابسته است. چشمه‌های گسیلنده‌ی بتا، به‌دلیل ویژگی‌های انرژی تابشی خود، قابلیت استفاده مؤثر در ساختارهای متفاوتی را دارا هستند.

بازدهی نیم‌رسانا از فرمول ۶ پیروی می‌کند که در این فرمول q بار الکترون، V_{oc} ولتاژ مدار باز و FF فاکتور پرشدگی و ε متوسط انرژی برای تولید یک جفت الکترون–حفره می‌باشد[۴]:

$$\eta_s = \frac{qV_{oc}FF}{\varepsilon} \qquad (۶)$$

ε متوسط انرژی برای تولید یک جفت الکترون–حفره نام دارد که طبق فرمول زیر تعریف می‌شود[۱۷]:

$$\varepsilon = 2.8E_g + 0.5 \qquad (۷)$$

V_{oc} ولتاژ مدار باز سلول بتاولتائیک است که نشان‌دهنده بیشترین اختلاف پتانسیل تولیدشده در غیاب بار خارجی می‌باشد و به صورت فرمول ۸ تعریف می‌شود[۱۰]:

$$v_{oc} = \frac{KT}{q} Ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \qquad (۸)$$

جریان اتصال کوتاه I_{sc} بیشترین جریان تولیدی سلول بتاولتائیک در حالتی است که مقاومت بار صفر باشد و بیانگر توانایی ماده در تولید حامل‌های بار تحت تابش پرتوهای بتا است[۶]:

$$I_{sc}(A) = \frac{qA}{\varepsilon}\sum E(n)C(n) \qquad (۹)$$

که در این فرمول $E(n)$ برابر است با انرژی ذخیره شده در سلول و $C(n)$ برابر است با احتمال جمع آوری زوج الکترون– حفرها که با رابطه زیر محاسبه می‌شود[۱۷]:

$$C(n) = 1 - \tanh\left(\frac{d}{l}\right) \qquad (۱۰)$$

و در رابطه بالا d برابر با میزان فاصله از ناحیه تهی و L برابر با طول پخش حامل‌ها می‌باشد.

جریان اشباع معکوس I_0 جریان بسیار کوچکی است که در بایاس معکوس از پیوند عبور می‌کند و یکی از پارامترهای کلیدی تعیین‌کننده رفتار دیود و عملکرد سلول بتاولتائیک است[۶]:

$$I_0(A) = s \times 1.5 \times 10^5 exp\left(\frac{-E_g}{k_B T}\right) \qquad (۱۱)$$

فاکتور پرشدگی[11] شاخصی است که کیفیت منحنی جریان–ولتاژ را نشان می‌دهد و بیانگر میزان نزدیک‌بودن عملکرد سلول به حالت ایده‌آل در نقطه بیشینه توان است[۶]:

$$FF = \frac{V_{oc} - Ln(V_{oc}+0.72)}{V_{oc}+1} \qquad (۱۲)$$

بازده تبدیل در باتری‌های بتاولتائیک نشان‌دهنده نسبت توان خروجی به توان وابسته به ذرات بتا ناشی از واپاشی رادیوایزوتوپ است و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد این سامانه‌ها شناخته می‌شود. این بازده به عوامل متعددی همچون انرژی E و شدت ذرات بتا (A)، ساختار و ضخامت لایه‌های نیم‌رسانا، ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و همچنین فاکتور پرشدگی وابسته است. به طور کلی، افزایش جذب ذرات بتا در نیم‌رسانا و کاهش تلفات بازترکیب، موجب افزایش جریان و در

[11] Fill Factor

نتیجه ارتقای بازده تبدیل می‌شود. از سوی دیگر، بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها و انتخاب مواد با گاف انرژی مناسب، نقش کلیدی در دستیابی به بیشترین بازده دارد[۱۸]:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{AEq} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه P_m حداکثر توان خروجی، P_{in} توان وابسته به ذرات بتا است.

انتخاب نیم‌رسانای مناسب در باتری‌های بتاولتاییک نیازمند در نظر گرفتن عواملی همچون مقاومت در برابر آسیب‌های ناشی از تابش، میزان بازتاب و اتلاف الکترون‌های تابشی، و انرژی لازم برای تولید جفت‌های الکترون–حفره است. مواد با عدد اتمی پایین به دلیل کاهش بازتاب الکترون و کاهش تولید تابش ترمزی، گزینه‌های مناسب‌تری محسوب می‌شوند و بازده جمع‌آوری حامل‌ها را افزایش می‌دهند. در مقابل، نیم‌رساناهای با گاف انرژی پایین هرچند قادر به تولید زوج‌های الکترون–حفره بیشتری هستند و جریان اتصال کوتاه را افزایش می‌دهند، اما چگالی حامل‌های ذاتی زیاد در آن‌ها سبب افزایش جریان نشتی، تشدید بازترکیب و در نهایت کاهش ولتاژ مدار باز می‌شود. بنابراین، انتخاب ماده باید بر اساس ایجاد تعادل میان تولید مؤثر جفت‌های الکترون–حفره و حداقل‌سازی بازترکیب و جریان‌های ناخواسته صورت گیرد[۱۹]. در این پژوهش از کاربید سیلیکون به‌عنوان نیم‌رسانا استفاده شده است؛ زیرا این ماده با عدد اتمی پایین خود بازتاب الکترون را کاهش داده و بازده تبدیل انرژی را بهبود می‌بخشد، و با برخورداری از آستانه آسیب تابشی بالا، تحت تابش‌های بتا پایداری ساختاری مطلوبی نشان می‌دهد. علاوه‌براین، گاف انرژی کاربید سیلیکون جریان نشتی را کاهش داده و موجب حفظ ولتاژ مدار باز در سطح مناسب می‌شود؛ ضمن آنکه هدایت حرارتی بالا در این ماده به دفع مؤثر گرما و افزایش پایداری عملکرد در شرایط کاری طولانی‌مدت کمک می‌کند[۲۰].

۳- شبیه‌سازی به روش مونت کارلو

روش‌های مونت‌کارلو با بهره‌گیری از انتخاب‌های تصادفی و توزیع‌های احتمالاتی، امکان شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده را بدون نیاز به آزمایش‌های پرهزینه فراهم می‌کنند[۲۱]. در این پژوهش، برای مدل‌سازی دقیق برهم‌کنش پرتوهای بتا با لایه‌های باتری، از کد شبیه‌ساز MCNPX استفاده شد.

برای استفاده از این کد، ابتدا یک فایل ورودی تهیه می‌شود که شامل اطلاعات مسئله از جمله هندسه، مواد، چشمه تابش، خروجی‌های مورد نظر، تنظیمات فیزیکی، نحوه نمونه‌برداری از ذرات، دقت محاسبات و شرایط خاتمه اجرا است. هر فایل ورودی از سه بخش اصلی تشکیل شده است که هر بخش با یک خط خالی از بخش قبل و بعد جدا می‌شود: بخش اول مربوط به تعریف سلول‌ها است، به‌طوری که هر سلول یک ناحیه محدود شده توسط یک یا چند سطح هندسی، مانند فضای درون یک کره یا جعبه، محسوب می‌شود؛ بخش دوم به تعریف سطوح هندسی مورد استفاده اختصاص دارد؛ و بخش سوم شامل داده‌های فیزیکی مسئله از جمله چشمه تابش، ترکیب مواد، نوع خروجی‌های مورد نیاز و سایر تنظیمات است[۲۲].

با بهره‌گیری از شبیه‌سازی به روش مونت کارلو، ساختار دو باتری بتاولتائیک مبتنی بر چشمه ^{63}Ni و $^{90}Sr/^{90}Y$ به‌عنوان چشمه پرتوزا و نیم‌رسانای کاربید سیلیکون مدل‌سازی گردید. در طراحی اولیه، لایه‌ی چشمه‌ها با ضخامت ۱ میکرومتر و الکترود بالایی شامل طلا با ضخامت ۱۰۰ نانومتر و الکترود پایین نیز با ضخامت مشابه الکترود بالایی در نظر گرفته شد. به‌منظور بررسی اثر تغییر ضخامت لایه نیم‌رسانا بر عملکرد سیستم، مجموعاً ۳۶ شبیه‌سازی به‌صورت مرحله‌ای انجام گرفت.

در بیست شبیه‌سازی نخست، ضخامت نیم‌رسانا از ۱۰۰ نانومتر تا ۲ میکرومتر با گام‌های ۱۰۰ نانومتری افزایش یافت. در ادامه، طی ۱۶ شبیه‌سازی دیگر، این ضخامت از ۲ تا ۱۰ میکرومتر با گام‌های ۵۰۰ نانومتری مورد ارزیابی قرار گرفت تا انرژی ذخیره شده در لایه بررسی شود. در بیست برنامه اول چون تغییرات بسیار زیاد بود افزایش ضخامت ۱۰۰ نانومتری در نظر گرفته شد تا تغییرات انرژی ذخیره شده به خوبی بررسی شوند و در شانزده برنامه بعدی چون تغییرات ذخیره انرژی کاهش یافته بود گام های بزرگ‌تری در نظر گرفتیم. در کلیه‌ی شبیه‌سازی‌ها، چشمه و الکترودها بدون تغییر باقی مانده و تنها پارامتر متغیر، ضخامت لایه‌ی نیم‌رسانا بود.

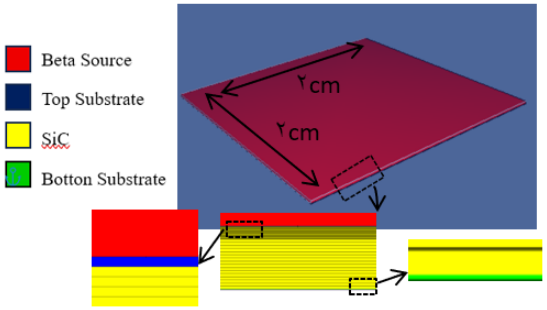
برای بررسی مقدار انرژی به جا گذاشته شده در نیم‌رسانا می‌توانیم از دو تالی F6 و F8 استفاده کنیم که هر یک از این تالی ها توضیح مربوط به خود را دادرا هستند.

F6: در این تالی در واقع مقدار انرژی حاصل از اندرکنش ذره بر واحد جرم یک سلول بیـان می شود.

F8: این تالی، تالی ارتفاع پالس[۱۲] نامیده می شود که در واقع مقدار فراوانی انرژی ثبت شده در هر سلول را بیان میکند[۲۳].

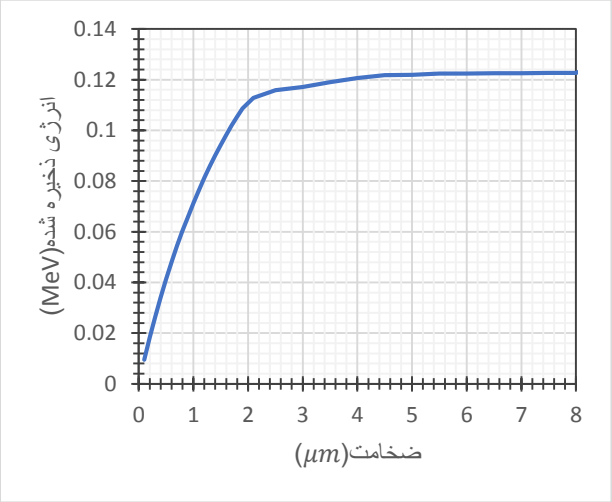
تالی F6 برحسب انرژی میانگین بیان می‌شود اما تالی F8 رد هر ذره حتی پرتوهای ثانویه آن را می‌گیرد و تمام جزئیات را ثبت می‌کند بنابراین برای محاسبه انرژی ذخیره شده این تالی دقیق تر است. و ما نیز از این تالی در کدMCNPX استفاده می‌کنیم.

برای انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تعداد ۱ میلیون تاریخچه ذره در نظر گرفته شد و خطای نسبی مربوط به انرژی ذخیره‌شده در هر حالت، کمتر از ۳ درصد به دست آمد.همه برنامه‌ها نیز بعد از اتمام با محیط ویرایشگر بصری [۱۳]رسم شدند تا این اطمینان حاصل شود که همه لایه‌ها درست در شبیه‌سازی قرار گرفته اند.



شکل٤. نمایی بزرگنمایی شده دوبعدی از باتری تعریف شده در کد MCNPX توسط Visual Editor

نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت نیم‌رسانا تا حدود ۲ میکرومتر، انرژی جذب‌شده افزایش محسوسی دارد؛ در حالی که پس از این مقدار، افزایش بیشتر ضخامت منجر به تغییر قابل‌توجهی در انرژی جذب‌شده نمی‌شود و منحنی به ناحیه تقریباً اشباع وارد می‌شود، قابل توجه است که بدانیم تقریبا ۸۶ درصد از انرژی چشمه ^{63}Ni در این ۲ میکرومتر به جای گذاشته می‌شود و در ۲ میکرومتر دوم تنها حدود ۸ درصد از انرژی به جا گذاشته می‌شود. بنابراین، ضخامت ۲ میکرومتر به‌عنوان ضخامت بهینه انتخاب شد، زیرا افزایش ضخامت بیش از این مقدار، بدون ایجاد افزایش معنادار در انرژی جذب‌شده، موجب افزایش حجم و ضخامت ساختار و افزایش فرآیند باز ترکیب خواهد شد. همچنین، برای نمایش تأثیر ضخامت نیم‌رساناها بر میزان انرژی ذخیره‌شده، نموداری رسم گردید (شکل ۵) که روند تغییرات انرژی جذب‌شده را نسبت به افزایش ضخامت لایه نیم‌رسانای کاربید سیلیکون را نشان می‌دهد. این نمودار در شکل ۶ ارائه شده‌است و به وضوح نشان می‌دهد که مقدار انرژی جذب‌شده تا ضخامت تقریباً ۲ میکرومتر افزایش یافته و پس از آن به حالت اشباع نزدیک می‌شود. بنابراین، برای این چشمه بازه اولیه تا ۱۰ میکرومتر برای بررسی کامل روند اشباع کافی بود.



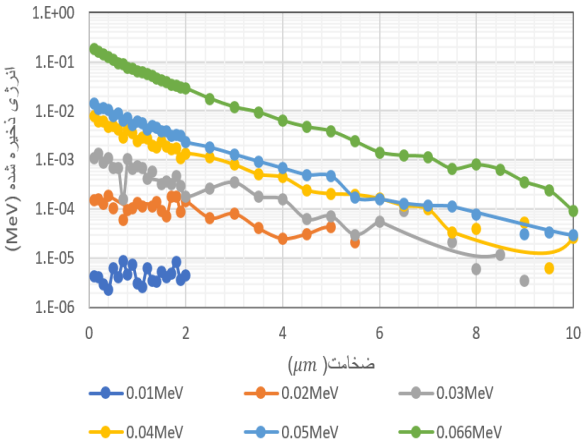
شکل۵. نمودار انرژی ذخیره شده بر حسب ضخامت نیم‌رسانای کاربید سیلیکون با طیف انرژی صفر تا ۰/۰٦٦ مگاالکترون ولت

به‌منظور تحلیل میزان نفوذ ذرات بتای ساطع‌شده از چشمه ^{63}Ni در لایه‌های نیم‌رسانا، محاسباتی بر اساس انرژی‌های مختلف این ذرات انجام گرفت. با توجه به این‌که طیف انرژی ^{63}Ni به‌صورت پیوسته از صفر تا ۰/۰۶۶ مگاالکترون‌ولت توزیع شده است، در این مطالعه چندین مقدار انرژی مشخص شامل ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵ و۰/۰۶۶ مگاالکترون‌ولت به عنوان نماینده‌ی

[12] Tally Height Pulse

[13] Visual Editor

بخش‌های مختلف طیف در نظر گرفته شد. برای هر یک از این انرژی‌ها، برد یا همان ضخامت طی‌شده‌ی الکترون در ماده با شبیه‌سازی محاسبه گردید و در شکل۶ نشان داده شد تا مشخص شود کدام ذرات با چه انرژی بیشترین نقش را در باتری دارند.



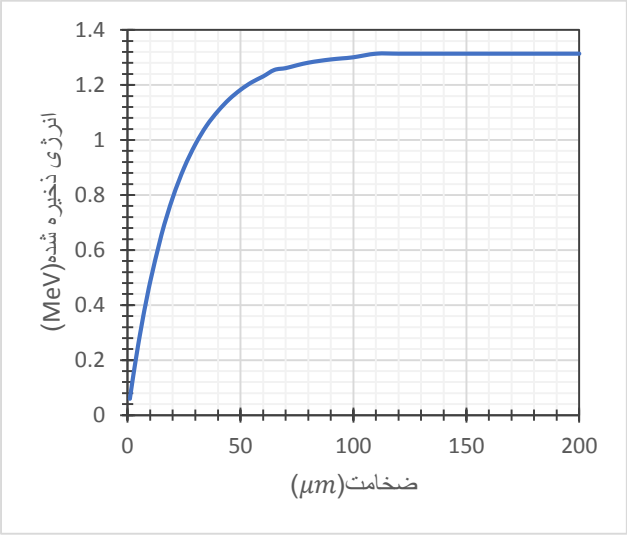
شکل٦. عمق نفوذ الکترون‌های ساطع‌شده از ^{63}Ni در مقادیر مختلف انرژی در کاربید سیلیکون

با توجه به شکل ۶ مشخص است که بیشترین سهم در انرژی رسوب‌کرده مربوط به ذراتی با انرژی نزدیک به ۰/۰۶۶ مگاالکترون‌ولت است؛ ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که الکترون‌های با انرژی بالا بیشترین اثر را در لایه نیم‌رسانا بر جای می‌گذارند. به‌کارگیری طیف کامل ذرات بتا به‌جای استفاده از انرژی متوسط، امکان اعمال توزیع واقعی‌ترِ اکتیویته چشمه و توزیع مکانی زوج الکترون–حفره‌های تولیدشده در ناحیه را فراهم می‌کند. در نتیجه، پارامترهایی مانند جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازده تبدیل با دقت بیشتری محاسبه می‌شوند. این دقت می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی طراحی میکروباتری‌های بتاولتائیک داشته باشد؛ به‌گونه‌ای که حجم، میزان اکتیویته موردنیاز و هزینه کاهش یافته و در نهایت بازده کل سامانه افزایش یابد.

در بررسی چشمه‌ی ^{90}Sr و دختر آن ^{90}Y ، به دلیل انرژی بسیار بالاتر ذرات بتا نسبت به چشمه‌های کم‌انرژی، عمق نفوذ در لایه‌ی کاربید سیلیکون به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد بر این اساس، ضخامت لایه نیم‌رسانا از ۱۰۰ نانومتر تا ۲۰۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت تا روند افزایش انرژی جذب‌شده و رسیدن آن به ناحیه اشباع به‌طور کامل مشخص شود.

در این مطالعه، برای ضخامت‌های ۱۰۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر، همانند بررسی انجام‌شده برای چشمه ^{63}Ni ، از ۳۶ شبیه‌سازی با گام‌های مشخص استفاده شد تا تغییرات انرژی جذب‌شده در ضخامت‌های کم با دقت کافی بررسی شود. سپس با توجه به افزایش قابل‌توجه برد ذرات بتا و گسترده‌تر شدن بازه ضخامت مورد نیاز، ضخامت لایه از ۱۰ میکرومتر تا ۲۰۰ میکرومتر با گام‌های ۱۰ میکرومتری افزایش داده شد. این انتخاب گام امکان بررسی روند تغییرات انرژی جذب‌شده در ضخامت‌های بالاتر را با تعداد محاسبات قابل‌قبول فراهم کرد.

نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش ضخامتSiC ، انرژی جذب‌شده در ابتدا افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن ضخامت به محدوده‌ی ۱۰۰میکرو متر ذرات بتا، روند افزایش انرژی به سمت اشباع شدن میل می‌کند. ازاین‌رو، بازه گسترده‌تر انتخاب‌شده برای این چشمه امکان تعیین دقیق‌تر ضخامت بهینه لایه SiC را فراهم می‌کند.



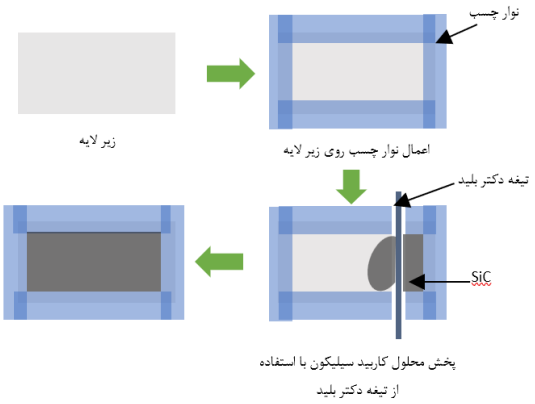
شکل ۷. نمودار انرژی ذخیره شده بر حسب ضخامت نیم‌رسانای کاربید سیلیکون با استفاده از چشمه ^{90}Y/^{90}Sr

۴– ساخت باتری

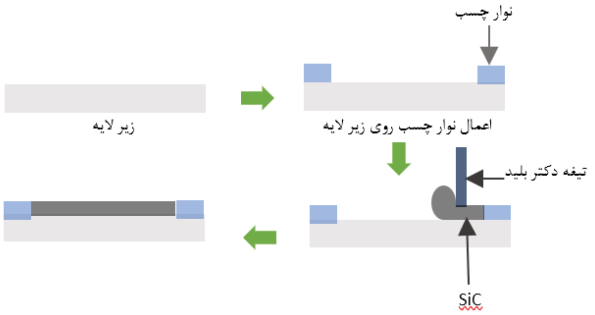
برای فرآیند ساخت لایه نیم‌رسانای کاربید سیلیکون، از دو روش دکتر بلید و کندوپاش استفاده شد. روش دکتر بلید این روش یک تکنیک ساده، کم‌هزینه و قابل‌کنترل برای تهیه لایه‌های ضخیم و پوشش‌دهی سطوح تخت است. در این فرایند، سوسپانسیون یا

دوغاب بر روی زیرلایه قرار گرفته و با حرکت تیغه در فاصله‌ای مشخص، ماده به‌طور یکنواخت گسترده می‌شود و پس از تبخیر حلال، لایه جامد تشکیل می‌گردد. ضخامت و یکنواختی نهایی با کنترل پارامترهایی مانند فاصله و سرعت حرکت تیغه، غلظت ماده و شرایط خشک‌شدن به‌دقت قابل تنظیم است [۲۴].

از مهم‌ترین مزایای این روش، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده یا خلأ و هزینه پایین آن است. این تکنیکِ مبتنی بر محلول، امکان پوشش‌دهی سطوح وسیع، استفاده از طیف گسترده‌ای از مواد (به‌صورت خمیر یا سوسپانسیون) و توسعه‌پذیری به فرایندهای مقیاس‌بزرگ را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها، دکتر بلید را به گزینه‌ای ایده‌آل برای تهیه لایه‌های اولیه و بررسی امکان تشکیل فیلم از مواد پودری (مانند نیم‌رساناها) تبدیل کرده است [۲۵].

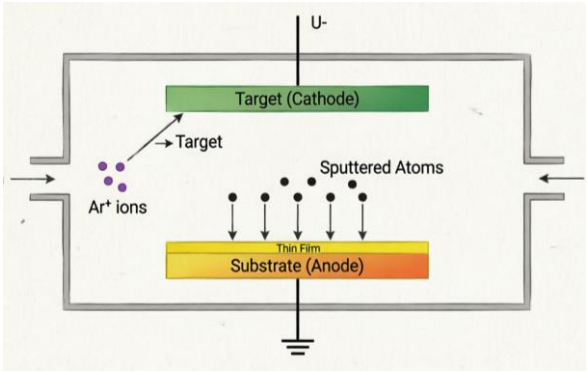


شکل ۸. نمای شماتیک مراحل لایه‌نشانی به روش دکتر بلید (از نمای بالا)



شکل ۹. نمای شماتیک مراحل لایه‌نشانی به روش دکتر بلید (از نمای بغل)

کندوپاش یک روش لایه‌نشانی فیزیکی از فاز بخار (PVD)[۱۴] است. در این فرایند، میدان مغناطیسی با متراکم‌کردن پلاسما در مجاورت هدف، باعث می‌شود یون‌های مثبت با شتاب به سطح هدف برخورد کرده و اتم‌های آن را جدا کنند. این ذرات سپس در محیط خلأ حرکت کرده و به‌تدریج روی زیرلایه رسوب می‌کنند تا لایه نازک موردنظر تشکیل شود [۲۶].



شکل ۱۰. روند لایه نشانی به روش کندوپاش

از مهم‌ترین مزایای این روش، امکان کنترل دقیق ضخامت (از طریق تنظیم توان، فشار گاز، زمان و فاصله هدف تا زیرلایه) است که در ساختارهای بتاولتائیک برای بهینه‌سازی جذب انرژی ذرات بتا و عملکرد الکتریکی باتری بسیار حیاتی است. سایر مزایا شامل تکرارپذیری بالا، یکنواختی و چسبندگی مناسب پوشش، تولید فیلم‌های متراکم با خلوص بالا (به دلیل شرایط خلأ) و قابلیت

[14] Physical Vapor Deposition (PVD)

تنظیم ریزساختار و خواص الکتریکی لایه است. این ویژگی‌ها، کندوپاش را به یکی از روش‌های پرکاربرد و مطمئن برای تهیه لایه‌های نازک نیم‌رسانا، فلزی و دی‌الکتریک تبدیل کرده است [۲۷].

به‌منظور تهیه لایه کاربید سیلیکون، از روش دکتر بلید، ابتدا سوسپانسیون کاربید سیلیکون با ترکیب پودر کاربید سیلیکون خریداری شده از شرکت(US Research Nanomaterials,Inc) با مشخصات (CAS No. 409-21-2)، از نوع کاربید سیلیکون بتا با ساختار مکعبی و دارای خلوص بیش از ۹۹ درصد و اندازه متوسط ذرات در محدوده ۴۵ تا ۶۵ نانومتر و مواد مورد نیاز به منظور دستیابی به مخلوطی یکنواخت، تحت هم‌زدن قرار گرفت. سپس سوسپانسیون آماده‌شده بر روی زیرلایه قرار داده شد و با استفاده از تیغه دکتر بلید، با سرعت و فشار یکنواخت در سطح زیرلایه پخش گردید تا لایه‌ای با پوشش یکنواخت تشکیل شود. پس از پوشش‌دهی، نمونه‌ها تحت فرایند خشک‌شدن ۲۴ ساعته در دمای محیط قرار گرفتند تا حلال و رطوبت موجود در لایه خارج شده و پوشش SiC بر روی زیرلایه تثبیت شود.

در این مرحله، چهار نمونه با شرایط ساخت متفاوت تهیه شد که مشخصات مربوط به ترکیب مواد، نوع زیرلایه و شرایط آماده‌سازی هر یک از نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول۲. اطلاعات تکمیلی نمونه‌های ساخته شده به روش دکتر بلید

پارامترها	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم
SiC (g)	۱	۱	۱	۱
PVA (g)	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۵
PEG (g)	۰	۰	۰/۱	۰/۵
DI (g) Water	۶/۲۵۰	۶/۲۵۰	۶/۲۵۰	۶/۲۵۰
نتایج مشاهده شده	مشاهده ترک‌های سطحی	مشاهده ترک های بسیار و جدا شدن لایه از زیر لایه	مشاهده ریز ترک های سطحی	عدم مشاهده ترک با چشم غیر مسلح

همان‌طور که از نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود، تغییر در پارامترهای تهیه سوسپانسیون و شرایط خشک‌کردن، تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت ظاهری لایه‌های کاربید سیلیکون تهیه‌شده به روش دکتر بلید داشته است. در نمونه‌های مختلف، تغییر مقدار پودر کاربید سیلیکون، مقدار و غلظت پلی وینیل الکل، استفاده از پلی اتیلن کلیکول به‌عنوان رقیق‌کننده با تغییر در میزان ترک‌خوردگی سطح همراه بوده است.

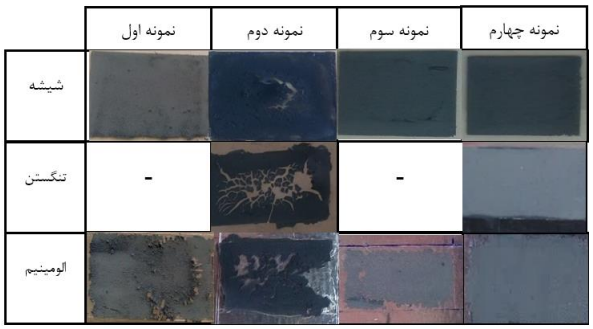
به‌منظور دستیابی به چسبندگی مناسب لایه پوشش‌دهی و جلوگیری از ایجاد ترک، چندین ترکیب مختلف از مواد اولیه مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه نخست، نسبت وزنی کاربید سیلیکون به پلی‌وینیل الکل (PVA) برابر با دوبه یک در نظر گرفته شد؛ بااین‌حال، پس از فرایند خشک‌شدن، ترک‌هایی در لایه پوشش‌دهی مشاهده گردید. در نمونه دوم، نسبت وزنی کاربید سیلیکون به پلی‌وینیل الکل (PVA) به یک به یک تغییر داده شد. نتایج نشان داد که لایه پوشش‌دهی از سطح زیرلایه جدا شده و علاوه بر کاهش چسبندگی، ترک‌خوردگی نیز در آن مشاهده شد. در نمونه سوم، نسبت وزنی کاربید سیلیکون به پلی‌وینیل الکل

(PVA)مجدداً به دو به یک بازگردانده شد و به‌منظور بهبود خواص لایه، پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) نیز به ترکیب افزوده گردید.

پلیمرهایی مثل پلی وینیل الکل (PVA) به تنهایی وقتی خشک می‌شوند، زنجیره‌های آن‌ها بسیار فشرده و سفت می‌شوند. این انقباض شدید باعث ایجاد تنش‌های کششی در لایه می‌شود که نتیجه‌اش ترک خوردن[15] است. پلی اتیلن گلیکول (PEG) با قرار گرفتن بین زنجیره‌های پلی وینیل الکل (PVA)، فضای بیشتری ایجاد کرده وانعطاف‌پذیری لایه را در حین خشک شدن بالا می‌برد. در واقع پلی اتیلن گلیکول (PEG) باعث می‌شود لایه بتواند تغییر حجم ناشی از تبخیر آب را بدون ترک خوردن، تحمل کند.با وجود این تغییرات، ترک‌خوردگی لایه همچنان مشاهده شد.

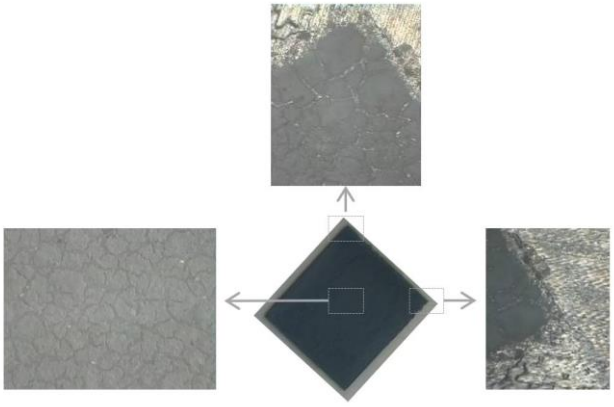
در نهایت، در نمونه چهارم، مقادیر و نسبت مواد تشکیل‌دهنده مطابق با داده‌های ارائه‌شده در جدول مربوطه اصلاح و بهینه‌سازی شد. بررسی ظاهری لایه حاصل نشان داد که این ترکیب از چسبندگی مناسبی به زیرلایه برخوردار بوده و پس از خشک‌شدن، هیچ‌گونه ترک‌خوردگی یا جداشدگی قابل مشاهده‌ای در سطح لایه مشاهده نشد.

شکل ۱۱ تصاویر ظاهری نمونه‌های ۱ تا ۴ تهیه‌شده به روش دکتر بلید و بررسی وضعیت سطح و ترک‌های ایجادشده در شرایط مختلف ساخت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. تصاویر ظاهری نمونه‌های ۱ تا ٤ ساخته شده به روش دکتر بلید

همانطور که گفته شد در نمونه چهارم، در بررسی ظاهری ترک‌های سطحی قابل مشاهده با چشم غیرمسلح مشاهده نشد و سطح لایه پس از خشک‌شدن از یکنواختی مناسبی برخوردار بود. ازاین‌رو، به‌منظور بررسی دقیق‌تر مورفولوژی و وضعیت سطح لایه، نمونه با استفاده از میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌ی چهارم ساخته شده به روش دکتر بلید

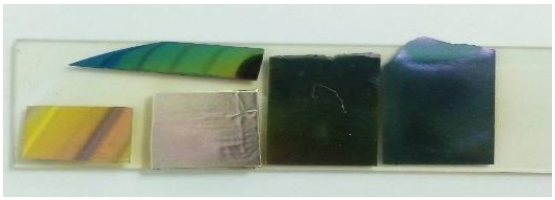
در بررسی میکروسکوپی، همان‌طور که در تصاویر فوق مشاهده می‌شود، مشخص شد که ترک‌های بسیار ریزی در سطح لایه وجود دارد. اگرچه این ترک‌ها در مقیاس میکروسکوپی قرار دارند، اما می‌توانند موجب ایجاد مسیرهای ناخواسته برای اتصال کوتاه شوند. بنابراین، با توجه به نتایج حاصل از بررسی چهار مرحله ساخت لایه به روش دکتر بلید و مشاهده ترک‌های سطحی در تمامی مراحل، ادامه فرایند ساخت با این روش متوقف شد و روش کند و پاش به‌عنوان روش جایگزین برای لایه‌نشانی مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه، به منظور تهیه لایه نازک کاربید سیلیکون، از روش لایه‌نشانی کندوپاش استفاده شد روش کندوپاش در این پژوهش با استفاده ازچهار زیر لایه شیشه، آلومینیم، ویفر سیلیکونی و تنگستن و منبع توان فرکانس رادیویی(RF)[16] به مقدار ۲۵۰ وات بهره گرفته شد. در گام نخست، به‌منظور حذف آلودگی‌ها و مولکول‌های باقی‌مانده در محفظه، فشار اولیه تا حدود حدود $۸٫۵\times۱۰^{-۵}$ تُر[17] کاهش داده شد تا شرایط خلأ بالا فراهم گردد. ایجاد این سطح از خلأ، مانع از حضور ناخالصی‌ها در مسیر انتقال یون‌ها و اتم‌های کنده شده و در نتیجه کیفیت لایه نهایی بهبود می‌یابد.

[15] Cracking

[16] Radio Frequency Power
[17] Torr

پس از ایجاد شرایط خلأ اولیه، با ورود گاز خنثی آرگون با دبی[18] ۱۰[19] sccm ، فشار کاری محفظه در زمان لایه‌نشانی در حدود ۴×۱۰^{-۳} تُر تثبیت شد. در این فشار، گاز آرگون با میدان RF برانگیخته شده و پلاسما تشکیل گردید. یون‌های مثبت آرگون حاصل از این پلاسما به سطح تارگت برخورد کرده و موجب کنده‌شدن اتم‌های سطحی ماده هدف شدند. این اتم‌ها با انرژی کافی به سمت زیرلایه حرکت کرده و در مدت زمان ۳۶۰۰ ثانیه بر روی سطح آن رسوب داده شدند. پس از اتمام فرآیند لایه‌نشانی، عملیات متوقف گردید و نمونه‌ها در شرایط خلأ قرار داده شدند تا مرحله خنک‌سازی به‌صورت تدریجی و کنترل‌شده انجام گیرد. استفاده از محیط خلأ در این مرحله، علاوه بر جلوگیری از اکسیداسیون سطح لایه‌های نشانی‌شده، مانع ایجاد آلودگی‌های سطحی ناشی از تماس با هوا گردید.



شکل ۱۳. نمونه های ساخته شده به روش کندوپاش

بررسی ظاهری نمونه‌های تهیه‌شده به روش کندوپاش نشان داد که هر چهار نمونه دارای سطحی یکنواخت و همگن بوده و پوشش به‌صورت مناسب بر روی زیرلایه تشکیل شده است. در بررسی چشمی، سطح نمونه‌ها صاف و یکدست به نظر می‌رسید و نواحی قابل‌توجهی از ناپیوستگی، پوسته‌شدن یا تجمع نامتعارف ماده مشاهده نشد. این نتایج اولیه نشان‌دهنده کیفیت مناسب و یکنواختی قابل قبول پوشش‌های حاصل از فرآیند کندوپاش پیش از انجام آزمون‌ها و مشخصه‌یابی‌های تکمیلی است.

در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر جنس زیرلایه بر عملکرد و ویژگی‌های ساختار باتری بتاولتائیک، چهارنوع زیرلایه شامل شیشه، آلومینیوم، ویفر سیلیکونی و تنگستن مورد بررسی قرار گرفتند. به‌طور کلی، زیرلایه‌ها را می‌توان بر اساس ویژگی‌های الکتریکی به سه گروه عایق ها و رساناها و نیم‌رساناها تقسیم‌بندی کرد. در صورت انتخاب مواد رسانا، تابع کار و رسانندگی الکتریکی از جمله پارامترهای مهم در انتخاب ماده هستند.

از آنجا که زیرلایه در ساختار مورد بررسی به‌عنوان یکی از الکترودها مورد استفاده قرار می‌گیرد، برخورداری از رسانندگی الکتریکی مناسب یک الزام اساسی است. همچنین، موقعیت زیرلایه در ساختار باتری، یعنی استفاده از آن به‌عنوان الکترود با اتصال اهمی و شاتکی ، در انتخاب ماده اهمیت دارد. در صورتی که ماده به‌عنوان الکترود با اتصال اهمی مورد استفاده قرار گیرد، انتخاب ماده با تابع کار پایین‌تر می‌تواند برای جمع‌آوری و انتقال مناسب حامل‌های بار مطلوب باشد؛ در مقابل، برای الکترود با اتصال شاتکی، استفاده از ماده‌ای با تابع کار بالاتر می‌تواند به ایجاد شرایط مناسب‌تر برای جداسازی و جمع‌آوری حامل‌های بار کمک کند. این اختلاف در ویژگی‌های الکترودها می‌تواند به ایجاد میدان الکتریکی مناسب در ساختار و انتقال مؤثر الکترون‌ها و حفره‌های تولیدشده در لایه نیم‌رسانا کمک کند. در صورتی که زیر لایه بخواهد به عنوان الکترود نزدیک به چشمه انتخاب شود باید دارای عدد اتمی و چگالی پایین باشد تا میزان پس پراگندکی را کاهش داده و باعث عبور اسان ذرات باردار شود، اما اگر زیر لایه بخواهد به عنوان الکترود پایینی مورد استفاده قرار گیرد باید دارای عدد اتمی و چگالی بالا باشد تا میزان پس پراکندگی افزایش یابد.

بر این اساس، شیشه به دلیل ماهیت عایق و رسانندگی الکتریکی بسیار پایین، نمی‌تواند به‌عنوان الکترود مورد استفاده قرار گیرد. در میان دو ماده فلزی باقی‌مانده، یعنی آلومینیوم و تنگستن، هردو ماده از نظر رسانندگی الکتریکی و ویژگی‌های سطحی، گزینه‌های مناسبی برای استفاده به‌عنوان زیرلایه رسانا هستند. با این حال، انتخاب نهایی زیرلایه تنها بر اساس ویژگی‌های الکتریکی انجام نشد و الزامات مربوط به مشخصه‌یابی ساختار نیز در نظر گرفته شد.

در مرحله بعد، به‌منظور بررسی مورفولوژی سطح و ضخامت لایه نیم‌رسانای کاربید سیلیکون، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی(FESEM)[20] از نمونه‌ها تهیه شد. در این

[18] Flow rate
[19] Standard Cubic Centimetersper Minute

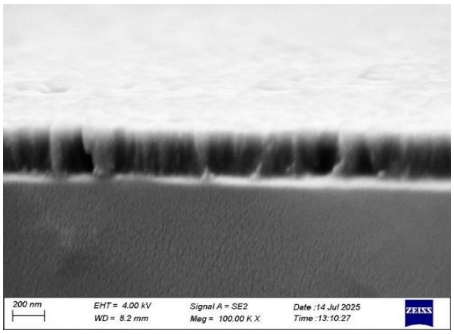
[20] Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

روش، برای تعیین دقیق ضخامت لایه، لازم است مقطع نمونه به‌گونه‌ای آماده شود که مرز میان زیرلایه و لایه نیم‌رسانا به وضوح قابل تشخیص باشد. از این رو، ویژگی‌های مکانیکی زیرلایه نیز در انتخاب آن اهمیت پیدا می‌کند. تنگستن به دلیل برخورداری از سختی و ویژگی‌های مکانیکی مناسب، امکان آماده‌سازی مناسب مقطع نمونه را فراهم می‌کند، در حالی که آلومینیوم به دلیل شکل‌پذیری، می‌تواند در فرایند آماده‌سازی مقطع و شکست نمونه برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی(FESEM) محدودیت ایجاد کند. بنابراین، از این نظر نیز تنگستن گزینه مطلوبی برای الکترود پایینی محسوب می‌شود.

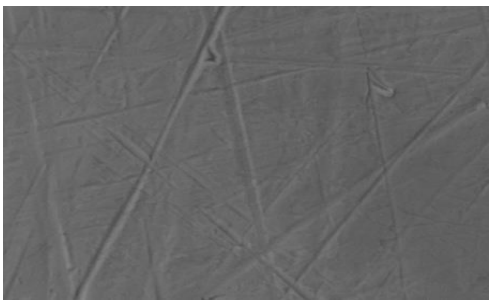
علاوه بر این، از آنجا که لایه نیم‌رسانای مورد بررسی در این پژوهش از کاربید سیلیکون تشکیل شده است، زیرلایه انتخابی نباید حاوی عناصر سیلیسیم و کربن باشد. وجود این عناصر در زیرلایه می‌تواند تشخیص مرز بین لایه کاربید سیلیکون و زیرلایه را در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) دشوار کرده و در نتیجه، تعیین دقیق ضخامت لایه نیم‌رسانا را با خطا مواجه کند. ویفر سیلیکونی شامل سیلیسیم است ولی تنگستن فاقد عناصر سیلیسیم و کربن است و از این نظر نیز امکان تشخیص واضح‌تر فصل مشترک زیرلایه و لایه کاربید سیلیکون را فراهم می‌کند.

در نهایت، با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل شامل رسانندگی الکتریکی، تابع کار، پایداری حرارتی، چگالی، عدد اتمی، الزامات مربوط به مشخصه‌یابی ساختار و قابلیت آماده‌سازی مقطع برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، و همچنین عدم وجود عناصر سیلیسیم و کربن در ترکیب زیرلایه، تنگستن به‌عنوان زیرلایه و الکترود با اتصال اهمی معرفی شد.

تنگستن به دلیل تطابق ضریب انبساط حرارتی با سیلیکون کاربید و پایداری شیمیایی فوق‌العاده، به‌عنوان الکترودی با اتصال اهمی پایدار معرفی شده است. این ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی باعث می‌شوند که مقاومت تماس ویژه آن در بازه دمایی گسترده ثابت باقی بماند[۲۹و۲۸].



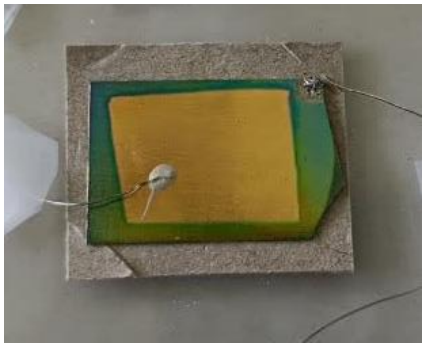
شکل۱۴. تصویر برداری FESEM از مقطع عرضی با مقیاس ۲۰۰ نانومتر



شکل۱۵. تصویر برداری FESEM موفولوژی سطح با مقیاس ۱۰ میکرمتر

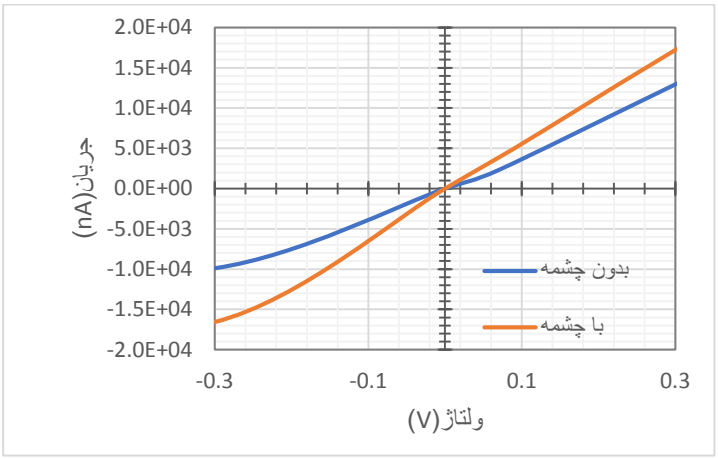
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نشان دادند که لایه کاربید سیلیکون با پوششی نسبتاً یکنواخت و پیوسته بر روی زیرلایه تشکیل شده است. همچنین، سطح لایه از نظر مورفولوژی، صاف و نسبتاً همگن بوده و ناپیوستگی یا تجمع قابل‌توجهی در سطح مشاهده نشد. علاوه بر بررسی مورفولوژی، با استفاده از تصویر مقطعی نمونه، ضخامت لایه لایه‌نشانی‌شده تعیین گردید.

در ادامه، به‌منظور تکمیل ساختار و ایجاد الکترود بالایی، یک لایه نازک از طلا بر روی لایه کاربید سیلیکون لایه‌نشانی و اتصالات سیمی متصل شدند.



شکل۱۶. نمایی از نمونه پس از ایجاد اتصالات سیمی به الکترودهای طلا و زیرلایه تنگستن

به‌منظور بررسی رفتار الکتریکی ساختار و ارزیابی اثر تابش بتا بر پاسخ جریان–ولتاژ، آزمون I-V نمونه ابتدا در شرایط تاریک و در محدوده مشخصی از ولتاژ اعمالی انجام شد. اندازه‌گیری در شرایط تاریک امکان بررسی پاسخ ذاتی ساختار، جریان عبوری و تغییرات شیب منحنی I-V را بدون تأثیر تابش خارجی فراهم می‌کند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری در شرایط تاریک نشان داد که منحنی I-V در محدوده مورد بررسی رفتاری بدون بروز مشخصه دیودی قابل توجه را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، با توجه به عدم دسترسی به چشمه ^{63}Ni در زمان انجام آزمون تکمیلی، مشخصه I-Vنمونه در حضور ^{90}Sr نیز اندازه‌گیری شد تا اثر تابش بتا بر پاسخ الکتریکی ساختار مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصل از این آزمون نیز در بخش عمده محدوده اندازه‌گیری، رفتار مشابهی با حالت تاریک نشان داد.



شکل۱۷. نمودار تست I-V قطعه ساخته شده با حضور چشمه و بدون حضور چشمه برای بررسی شیب نمودار

در یک محدوده مشخص از ولتاژ، افزایش شیب منحنی I-V در حضور چشمه ^{90}Sr نسبت به شرایط تاریک مشاهده شد. افزایش شیب منحنی در این ناحیه را می‌توان به افزایش تولید حامل‌های بار اضافی در اثر برهم‌کنش تابش بتا با ماده نیمه‌رسانا نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که انرژی منتقل‌شده توسط ذرات بتا موجب ایجاد زوج‌های الکترون–حفره شده و افزایش تعداد حامل‌های قابل‌مشارکت در انتقال جریان را به دنبال می‌آورد. بنابراین، اگرچه در هر دو شرایط، منحنیI-V رفتاری بدون بروز مشخصه دیودی قابل توجه نشان می‌دهد، تغییر شیب مشاهده‌شده در حضور^{90}Sr بیانگر حساسیت پاسخ الکتریکی ساختار به تابش بتا و تأثیر تابش بر فرآیند تولید حامل‌های بار است. لازم به ذکر است که استفاده از^{90}Sr در این مرحله با هدف بررسی کیفی پاسخ ساختار به تابش بتا انجام شده است و نتایج آن به‌عنوان جایگزین مستقیم عملکرد ^{63}Niدر نظر گرفته نمی‌شود؛ زیرا تفاوت در طیف انرژی و مشخصات تابشی این دو چشمه می‌تواند منجر به تفاوت در میزان تولید حامل‌های بار و در نتیجه پاسخ الکتریکی ساختار شود.

و در نهایت مشخصات حالت بهینه شبیه سازی شده پژوهش با سایرمراجع در جدول ۳ مقایسه شد.

جدول۳. مقایسه پارامترهای الکتریکی باتری بتاولتائیک شبیه سازی شده با کار سایرین

	[۳۰]	[۳۱]	[۳۲]	[۳۳]	این پژوهش
نوع بررسی	شبیه سازی	شبیه سازی	شبیه سازی	شبیه سازی	شبیه سازی
مساحت مبدل (cm^2)	۰/۶۴	۰/۰۳۱۴	–	۱	۴
اکتیویته چشمه	۱۰ $\frac{mCi}{cm^2}$	۱۱/۷ $\frac{mCi}{mg}$	–	۱۸/۷۶ $\frac{mCi}{cm^2}$	۲ mCi
چگالی جریان اتصال کوتاه (nA/cm^2)	۱۳۳	۱۳/۸۲	۶/۸۱	۲۹/۰۸۹	۱۹/۲
ولتاژ مدار باز (V)	۰/۱۶	۰/۲۶	۰/۹۸۰۱	۲/۴	۲/۴۷۰
بازده تبدیل(٪)	۲/۶۵	۰/۵۰	۱/۶۵۳	۲۰/۳۵	۳۵/۵
چگالی توان بیشینه ($\frac{nW}{cm^2}$)	۱۲/۳	۴۲۹	۱/۵۱۲	۹۳/۷۹	۱۸/۰۳
نوع پیوند	شاتکی	شاتکی	p-n	p-n	n-P

جدول ۳ به مقایسه تطبیقی پارامترهای الکتریکی ساختار بهینه‌سازی‌شده در این پژوهش با کارهای شبیه‌سازی شده در مراجع ([۳۰] تا [۳۳]) می‌پردازد. همان‌طور که در این جدول مشهود است، طراحی پیشنهادی در این پژوهش توانسته است با بهره‌گیری از هندسه بهینه و خواص ذاتی نیمه‌هادی عملکردی مطلوب تر از ساختارهای رایج ارائه دهد.

برجسته‌ترین دستاورد این شبیه‌سازی، دستیابی به بازده تبدیل توان ۳۵/۵ درصدی و ولتاژ مدار باز ۲/۴۷۰ ولت است. در مقایسه با سایر کارهای شبیه‌سازی شده که بازدهی در بازه ۰/۵ تا ۲۰/۳۵ درصد گزارش کرده‌اند، ساختار پیشنهادی ما با غلبه بر تلفات بازترکیب و بهینه‌سازی ضخامت لایه جاذب، توانایی بالاتری در تبدیل انرژی ذرات بتا به توان الکتریکی مفید از خود نشان می‌دهد.

در خصوص چگالی جریان اتصال کوتاه و چگالی توان بیشینه اگرچه مقادیر گزارش‌شده در برخی مراجع (مانند [۳۰] و [۳۳]) اعداد بالاتری را نشان می‌دهند، اما این امر مستقیماً ناشی از استفاده از اکتیویته‌های بسیار بالا و خاص (مانند ۱۰ یا ۱۸/۷۶ میلی‌کوری بر سانتی‌متر مربع) در آن پژوهش‌هاست. در مقابل، طراحی حاضر با استفاده از یک اکتیویته استاندارد و عملیاتی‌تر(۲ میلی‌کوری)، موفق به ثبت بالاترین بازده تبدیل شده است. این موضوع اثبات می‌کند که برتری اصلی ساختار پیشنهادی درکیفیت تبدیل انرژی و بهینگی ساختار است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک ساختار باتری بتاولتائیک مبتنی بر نیم‌رسانای کاربید سیلیکون با استفاده از دو چشمه پرتوزای ^{63}Ni و ^{90}Sr مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو با کد MCNPX نشان داد که ضخامت لایه نیم‌رسانا نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان انرژی جذب‌شده و عملکرد باتری دارد .در مورد چشمه ^{63}Ni، با افزایش ضخامت کاربید سیلیکون، انرژی جذب‌شده در ابتدا با نرخ قابل‌توجهی افزایش یافت و در حدود ۲ میکرومتر به ناحیه نزدیک به اشباع رسید؛ بنابراین این ضخامت به‌عنوان ضخامت بهینه لایه SiC برای ساختار مبتنی بر^{63}Ni در نظر گرفته شد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش بیشتر ضخامت، با وجود افزایش حجم ماده نیم‌رسانا، بهبود قابل‌توجهی در انرژی جذب‌شده ایجاد نمی‌کند.

در ادامه، رفتار چشمه ^{90}Sr نیز با توجه به انرژی بالاتر ذرات بتای آن بررسی شد. نتایج نشان داد که به دلیل نفوذ بیشتر ذرات

پرانرژی ^{90}Sr در کاربید سیلیکون، انرژی جذب‌شده در ابتدا با نرخ قابل‌توجهی افزایش یافت و در حدود ۱۰۰ میکرومتر به ناحیه نزدیک به اشباع رسید؛ بنابراین این ضخامت به‌عنوان ضخامت بهینه لایه SiC برای ساختار مبتنی بر^{90}Srدر نظر گرفته شد بنابراین، انتخاب ضخامت بهینه نیم‌رسانا باید متناسب با طیف انرژی چشمه پرتوزا انجام شود و نمی‌توان یک ضخامت ثابت را برای هر دو چشمه در نظر گرفت.

بنابراین جدول‌های زیر، نتایج شبیه‌سازی پارامترهای الکتریکی کلیدی ساختار بتاولتائیک را برای دو چشمه نشان می‌دهند:

جدول٤. پارامترهای الکتریکی باتری بتاولتائیک با چشمه ^{63}Ni محاسبه شده با استفاده از داده‌های شبیه سازی شده

بازده تبدیل (٪)	ولتاژ مدار باز (ولت)	چگالی جریان اتصال کوتاه(نانوآمپ ربر سانتی متر مربع)	جریان اتصال کوتاه (نانوآمپر)	ضخامت (میکرومتر)
۴/۳۵	۲/۴۱۹	۲/۸۹	۱۱/۵۸	۰/۱
۲/۳۶	۲/۴۵۰	۱۱/۳۳	۴۵/۳۴	۰/۵
۳/۴۷	۲/۴۶۵	۱۷/۰۲	۶۸/۰۸	۱
۳/۱۳	۲/۴۶۸	۱۸/۹۸	۷۵/۹۳	۱/۵
۳/۵	**/٤٧٠**	**۱۹/۲**	**۷٦/۸۰**	**۲**
۳۰/۹	۲/۴۶۵	۱۶/۷۰	۶۶/۸۳	۲/۵
۲/٤	۲/۴۶۰	۱۳/۸	۵۵/۲	۳

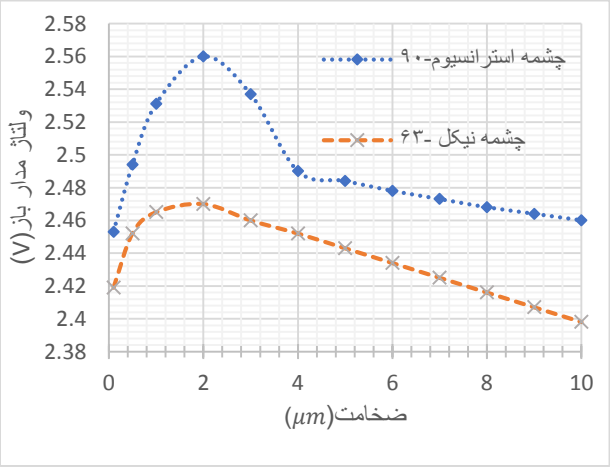
بررسی سیستماتیک تأثیر ضخامت لایه فعال کاربید سیلیکون بر عملکرد باتری بتاولتائیک مبتنی بر چشمه ^{63}Ni ، رفتار غیرخطی و وابستگی حیاتی بازده تبدیل به هندسه دستگاه را آشکار می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که در ضخامت‌های بسیار کم(۰/۱ میکرومتر)، علیرغم احتمال جمع‌آوری بالای حامل‌ها، به دلیل عبور بخش عمده‌ای از ذرات بتا بدون برهم‌کنش مؤثر، انرژی ذخیره‌شده ناچیز بوده و بازده تبدیل تنها به ۴/۳۵ درصد محدود می‌گردد. با افزایش ضخامت تا ۲ میکرومتر، تعادل بهینه‌ای میان جذب انرژی و جمع‌آوری حامل‌ها برقرار می‌شود؛ به طوری که بازده تبدیل به حداکثر مقدار خود یعنی ۳۵/۵ درصد رسیده وچگالی جریان اتصال کوتاه نیز با جذب کامل‌تر طیف انرژی بتا به اوج ۱۹/۲ نانوآمپربر سانتی متر مربع می‌رسد. این ضخامت با طول توقف ذرات بتا در SiC تطابق داشته و تضمین می‌کند که بیشترین سهم از تولید جفت‌های الکترون–حفره درون ناحیه تخلیه یا نزدیک به آن رخ دهد، جایی که میدان الکتریکی داخلی کارآمدترین مکانیزم برای جداسازی و هدایت حامل‌ها به سمت الکترودهاست.

با این حال، فراتر رفتن از این نقطه بهینه و افزایش ضخامت به ۳ میکرومتر، منجر به پدیده بازده نزولی می‌شود؛ جایی که بازده به ۲۵/۴ درصد کاهش یافته و چگالی جریان اتصال کوتاه نیز علی‌رغم افزایش انرژی ورودی، کاهش می‌یابد. این افت عملکرد ناشی از غلبه مکانیزم‌های بازترکیب حجمی در نواحی خنثی و دور از پیوند است، زیرا طول پخش کوتاه حامل‌های اقلیت اجازه نمی‌دهد حامل‌های تولید شده در اعماق بیشتر به ناحیه تخلیه برسند. نکته حائز اهمیت دیگر، پایداری ولتاژ مدار بازدر تمام ضخامت‌هاست که مستقیماً از ماهیت گاف عریض و جریان اشباع معکوس فوق‌العاده پایین نشأت می‌گیرد. در نهایت، ضخامت ۲ میکرومتر به عنوان ساختار بهینه معرفی شد وبرای آن مقدار چگالی جریان اتصال کوتاه برابر با ۱۹/۲ نانوآمپربر سانتی متر مربع ، مقدار ولتاژ مدار بازبرابر با ۲/۴۷ولت با مقدار خطای ۰/۰۰۵ درصد ، بیشینه درصد بازدهی برابر با ۳۵/۵ درصد به دست آمد

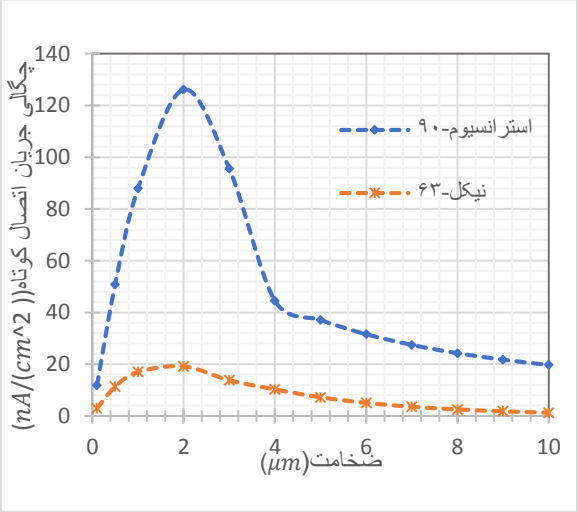
جدول۵. پارامترهای الکتریکی باتری بتاولتائیک با چشمه ^{90}Sr محاسبه شده با استفاده از داده‌های شبیه سازی شده

بازده تبدیل (٪)	ولتاژ مدار باز (ولت)	چگالی جریان اتصال کوتاه (نانوآمپ بر سانتی متر مربع)	جریان اتصال کوتاه (نانوآمپر)	ضخامت (میکرومتر)
۰/۱۵	۲/۴۵۳	۱۱/۸۱	۴۷/۲۵	۰/۱
۰/۷۱	/۴۹۴ ۲	۵۰/۸۷	۲۰/۴۹ ۳	۰/۵
۱/۲	۲/۵۳۱	۸۷/۹۲	۳۵۱/۷۱	۱
۱/۸	/۵۶۰ ۲	۱۲۶/۲۵	۵۰/۰۲ ۵	۲
۱/۳	۲/۵۳۷	۹۵/۶۸	۳۸۲/۷۲	۳
۰/۶۲	۲/۴۹۰	۴۴/۵۸	۱۷۸/۳۳	۴
۰/۵۲	۲/۴۸۴	۳۷/۱۳	۱۴۸/۵۵	۵
۰/۴۴	۲/۴۷۸	۳۱/۶۳	۱۲۶/۵۳	۶
۰/۳۸	۲/۴۷۳	۲۷/۴۸	۱۰۹/۹۲	۷
۰/۳۳	۲/۴۶۸	۲۴/۲۸	۹۷/۱۳	۸
۰/۳۰	۲/۴۶۴	۲۱/۷۶	۸۷/۰۶	۹
۰/۲۷	۲/۴۶۰	۱۹/۷۳	۷۸/۹۵	۱۰

بر اساس داده‌های شبیه‌سازی‌شده ارائه‌شده، روند تغییرات پارامترهای الکتریکی نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه فعال تا حدود ۲ میکرومتر، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز به دلیل جذب مؤثرتر انرژی ذرات بتا افزایش می‌یابد؛ اما در ضخامت ۱۰۰ میکرومتر، که معادل حداکثر برد نفوذ ذرات بتای گسیل‌شده از چشمه ^{90}Sr در کاربید سیلیکون است، افت شدیدی در عملکرد دستگاه (شامل کاهش چشمگیر جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازده تبدیل) مشاهده می‌شود. این رفتار غیرمنتظره در ضخامت‌های بالا، مستقیماً به محدودیت طول پخش حامل‌های اقلیت در ماده نیم‌رسانا مرتبط است. اگرچه ذرات بتا تا عمق ۱۰۰ میکرومتری نفوذ کرده و در طول مسیر خود زوج‌های الکترون–حفره تولید می‌کنند، اما از آنجا که طول پخش حامل‌های اقلیت در کاربید سیلیکون به‌مراتب کمتر از این مقدار است، حامل‌های بارِ تولیدشده در نواحی عمقی‌تر (دور از پیوند)، پیش از آنکه بتوانند به ناحیه تخلیه رسیده و در جریان الکتریکی مشارکت کنند، دچار بازترکیب می‌شوند. در نتیجه، برای دستیابی به بالاترین بازده، ضخامت لایه نیم‌رسانا باید به‌گونه‌ای بهینه‌سازی شود که با طول پخش حامل‌های اقلیت سازگاری داشته باشد و از هدررفت حامل‌های بار در اعماق غیرمؤثر ساختار جلوگیری گردد.



شکل۱۸. نمودارروند تغییرات ولتاژ مدار باز برای هر دو چشمه



شکل۱۹. نمودارروند تغییرات چگالی جریان اتصال کوتاه برای هر دو چشمه

از نظر ساخت، دو روش دکتر بلید و کندوپاش برای تشکیل لایه کاربید سیلیکون بر روی زیر لایه های مختلف شامل شیشه، آلومینیوم ، ویفر سیلیکونی و تنگستن مورد بررسی قرار گرفتند. ارزیابی ظاهری نمونه‌ها و نتایج مشخصه‌یابی نشان داد که روش کندوپاش نسبت به دکتر بلید امکان تشکیل پوشش‌های یکنواخت‌تر و متراکم‌تر را فراهم می‌کند. سپس با توجه به رسانایی الکتریکی، تابع کار، پایداری حرارتی ، چگالی و عدداتمی و با توجه به الزامات مربوط به مشخصه‌یابی ساختار، تنگستن به عنوان زیر لایه و الکترود با اتصال اهمی معرفی شد.

همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)پیوستگی و یکنواختی مناسب لایه لایه‌نشانی‌شده را تأیید کرده و امکان تعیین ضخامت لایه را فراهم کردند. در ادامه، با لایه‌نشانی الکترود بالایی طلا، ساختار نمونه برای انجام آزمون‌های الکتریکی تکمیل شد.

نتایج آزمون I-V نیز وجود تفاوت مشخص بین رفتار نمونه در شرایط دارای چشمه و بدون چشمه را نشان داد و نقش تابش بتا در ایجاد جریان اضافی در ساختار را تأیید کرد.

در نهایت، مقایسه دو چشمه نشان داد که ^{63}Ni به دلیل انرژی متوسط پایین‌تر و نیمه‌عمر طولانی، گزینه مطلوبی برای کاربردهای توان پایین و بلندمدت، به‌ویژه در سامانه‌های پزشکی و کاشتنی، محسوب می‌شود؛ در حالی که ^{90}Sr به دلیل انرژی بالاتر ذرات بتا، قابلیت تأمین جریان بیشتری دارد، اما به ضخامت بیشتری از ماده نیم‌رسانا برای جذب مؤثر انرژی نیازمند است. بر این اساس، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که هم‌زمانی بهینه‌سازی ضخامت کاربید سیلیکون، انتخاب چشمه پرتوزا، انتخاب روش لایه‌نشانی و تعیین زیرلایه مناسب، می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد و قابلیت ساخت باتری‌های بتاولتائیک مبتنی بر کاربید سیلیکون داشته باشد .

۶- مراجع

[1] Huffman, F. N., & Norman, J. C., Chest, 65(6), 667–672, (1974)

[2] Moseley, H. G., Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 88(605), 471–476, (1913)

[3] Prelas, M. A., Weaver, C. L., Watermann, M. L., Lukosi, E. D., Schott, R. J., & Wisniewski, D. A., Progress in Nuclear Energy, 75, 117–148, (2014)

[4] Movahedian, Z., & Tavakoli Anbaran, H., Nuclear Science and Techniques, accepted, (2018).

[5]Lazarenko, Y. V., Guseo, V. V., & Pystovalov, A. A., Atomic Energy, 64(2), 131, (1988)

[6] Movahedian, Z., & Tavakoli Anbaran, H., Materials Science in Semiconductor Processing, 172, 108700, (2024)

[7] Movahedian, Z., & Tavakoli-Anbaran, H. (2023). Calculation the difference created in Monte Carlo simulation results due to the use of the average energy of a beta source instead of its continuous beta spectrum. *The European Physical Journal Plus, 138*(5), 471. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-03965-8.

[8] Ghasemabadi, D., Advanced Materials in Engineering, 43(3), 47–63, (1403)

[9]U.S. Department of Energy, Radioisotope-powered cardiac pacemaker program. Clinical studies of the nuclear pacemaker model NU-5, Technical Report, (1980)

[10] Jahangiri, M. H., & Tavakoli Anbaran, H., Materials Science in Semiconductor Processing, 128, 105743, (2021)

[11] Maleki, P., & Ete'ati, G., Journal of Nuclear Science and Technology, 93(3), 41–50, (1399)

[12] Mathieu, C., Journal of Applied Physics, 53(6), R51–R80, (1982)

Coatings, 2023, 13, 425.
DOI: 10.3390/coatings13020425
[26] Borowski, P.; MyŚliwiec, J. “Recent Advances in Magnetron Sputtering: From Fundamentals to Industrial Applications.” *Coatings*, 2025, 15, 922.
DOI: 10.3390/coatings15080922.

[27] X. Wang, A. Wang, J. Gao, Z. Cheng, M. Wang, B. Zhao, W. Zou, X. Ma, “Review of the effect and progress in uniform films prepared by the magnetron sputtering method,” CrystEngComm, 2025, 27, 5936–5951. DOI: .10.1039/D5CE00515A.

[28] J. Kriz, K. Gottfried, C. Kaufmann, and T. Geßner, "Determination of ohmic contacts to n-type 6H- and polycrystalline 3C-SiC using circular transmission line structures," Diamond and Related Materials, vol. 7, no. 1, pp. 77-80, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0925-9635(97)00191-X.

[29]C. Jacob, P. Pirouz, H.-I. Kuo, and M. Mehregany, "High temperature ohmic contacts to 3C-silicon carbide films," *Solid-State Electronics*, vol. 42, no. 12, pp. 2329–2334, Dec. 1998, doi: 10.1016/S0038-1101(98)00234-2.

[30] S. I. Zaitsev, V. N. Pavlov, V. Y. Panchenko, M. A. Polikarpov, A. A. Svintsov, and E. B. Yakimov, "Comparison of the efficiency of 63Ni beta-radiation detectors made from silicon and wide-gap semiconductors," *J. Surf. Investig.*, vol. 8, pp. 843–845, 2014.

[31] A. Waris, Y. Kusumawati, A. S. Alfarobi, I. K. Aji, and K. Basar, "Preliminary design of betavoltaic battery using Co-60 and Pm-147 with GaAs substrate," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1719, p. 030053, 2016.

[32] G. Gui, K. Zhang, J. P. Blanchard, and Z. Ma, "Prediction of 4H–SiC betavoltaic microbattery characteristics based on practical Ni-63 sources," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 107, pp. 272–277, 2016.

[33] F. Bouzid, M. A. Saeed, R. Carotenuto, and F. Pezzimenti, "Design considerations on 4H-SiC-based p–n junction betavoltaic cells," *Appl. Phys. A*, vol. 128, p. 234, 2022.

[13] Prelas, M. A., Weaver, C. L., Watermann, M. L., Lukosi, E. D., Schott, R. J., & Wisniewski, D. A., Progress in Nuclear Energy, 75, 117–148, (2014)

[14] Maghsodi, M., & Tavakoli-Anbaran, H., Arabian Journal for Science & Engineering, 50, 15203, (2025)

[15] Kian-Taj, R., Feasibility study of constructing atomic batteries by deposition of radioactive materials on semiconductors, Master's thesis, Urmia University, Iran, (2006)

[16] Z. Movahedian and H. Tavakoli-Anbaran, "Exploratory study of betavoltaic nuclear battery using AlN P-N junction," J. Energy Storage, vol. 72, p. 108485, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108485.

[17] Honsberg, C., Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 102–105, (2005).

[18] XiaoBin, T., Ding, L., Peng, Y., & Da, C., Science China Press and Springer, 55(4), 990–996, (2012)

[19] Chandrashekhar, M., Demonstration of a 4H SiC betavoltaic cell (Master's thesis), Cornell University, Graduate School, (2007).

[20] Adams, T. E., A study of palladium thin-films for radioisotope storage in betavoltaic power sources designs (Master's thesis), Purdue University, (2011)

[21] Pelowitz, D. B. (Ed.), MCNPX™ user’s manual, version 2.6.0 (Report No. LA-CP-07-1473), Los Alamos National Laboratory, (2008).

[22] Briesmeister, J. F., MCNP™—A general Monte Carlo N-particle transport code (Version 4C, LA-13709-M, Vol. 2), Los Alamos National Laboratory, (2000)

[23] Y. Kasheh-saz and M. Hassan Zadeh, *MCNPX Code Training*, vol. 1, 1st ed. Tehran, Iran: Center for Training and Development of Computational Codes, 2015(Persian)

[24] for Thin Film Coating,” in Simple Chemical Methods for Thin Film Deposition: Synthesis and Applications, Springer Nature Singapore, 2023, pp. 509–530, DOI: 10.1007/978-981-99-0961-2_12.

[25] Ramos-Hernández, R.; Pérez-Gutiérrez, E.; Cerón, M.; Percino, M. J.
“Solvent Effect on Small-Molecule Thin Film Formation Deposited Using the Doctor Blade Technique”

Simulation and Fabrication of Betavoltaic Batteries for Pacemaker Applications Using SiC Semiconductor: A Comparative Study of Ni-63 and Sr-90 Sources

Mahdieh Mirzamohammadi, Hossein Tavakoli-Anbaran*, Mohammad Maghsodi

Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract:

In this study, the design, simulation, and fabrication of a betavoltaic battery for application in cardiac pacemaker power generators are investigated using Ni-63 and Sr-90 radioisotope sources in combination with silicon carbide (SiC) as the semiconductor material. Monte Carlo simulations were performed using the MCNPX code to determine the optimal semiconductor layer thickness and to evaluate the amount of energy deposited within each layer. Accordingly, a semiconductor layer thickness of 2 µm was identified as the optimal structure. The simulated electrical performance of the Ni-63 based device yielded a short-circuit current density of 19.2 nA/cm², an open-circuit voltage of 2.47 V, and an energy conversion efficiency of 35.5%. For the Sr-90 source, the corresponding values were obtained as a short-circuit current density of 126.25 nA/cm², an open-circuit voltage of 2.560 V, and an energy conversion efficiency of 1.8%, respectively.

During the fabrication stage, Doctor Blade and sputtering techniques were employed for layer deposition, and glass, aluminum, silicon wafer, and tungsten substrates were systematically examined. Overall, this work confirms that the combination of SiC semiconductor layers with Ni-63 and Sr-90 radioisotope sources, along with optimized layer thickness and appropriate substrate selection, enables the development of reliable betavoltaic batteries featuring high radiation safety, long operational lifespan, and elevated energy density, with initial potential for low-power applications, including cardiac pacemaker power generators.

Keywords: MCNPX simulation code, Silicon carbide semiconductor, ^{90}Sr source,^{63} Ni source

Corresponding Author. Email: Tavakoli-Anbaran@shahroodut.ac.ir

Received: 2026-05-12 Revised: 2026-08-26 Accepted: 2026-10-04