



شبیه‌سازی و ساخت باتری هسته‌ای بتا-رادیلومینسانس با چشمه Sr/Y90

سهیل حاجی بابا^۱، حسین مؤیدی^۲، محمدرضا عینیان^۳، غلامرضا اطاعتی^{۲*}

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران

۲. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده:

در این مقاله یک باتری هسته‌ای بتا-رادیلومینسانس بر پایه چشمه Sr/Y90 و ماده نورتاب ZnS:Cu توسط کد ترکیبی MCNP/MATLAB/SILVACO طراحی و شبیه‌سازی شده و نتایج خروجی با نتایج عملی مقایسه گردیده است. پارامترهای موثر بر خروجی باتری عبارتند از نوع و اکتیویته چشمه، ضخامت ماده نورتاب، ضخامت نیمه‌رسانا و میزان ناخالصی‌های آلاینده شده در آن. برای بررسی دقت شبیه‌سازی از پارامترهای اندازه‌گیری شده مشابه با نمونه عملی استفاده شده است. پارامترهای تجربی اندازه‌گیری شده و مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از چشمه Sr/Y90 با اکتیویته ۳۰ میلی کوری (سه چشمه میله‌ای هر کدام با اکتیویته ۱۰ میلی کوری)، ضخامت ۱۱۰ میکرومتر از ماده نورتاب ZnS:Cu و نیمه‌رسانا سیلیکونی با ضخامت ۵۰ میکرومتر. ولتاژ مدارباز بدست آمده از شبیه‌سازی ۳۸٫۷ میلی ولت و ولتاژ بدست آمده از اندازه‌گیری عملی ۴۲٫۴ میلی ولت است که نشان‌دهنده دقت بالای کد ترکیبی برای شبیه‌سازی و طراحی این نوع باتری‌ها است.

کلیدواژه‌ها: باتری هسته‌ای، مونت کارلو، متلب، سیلواکو

Simulation and fabrication of a beta-radioluminescence nuclear battery using Sr/Y90

Soheil Hajibaba¹, Hosein Moayedi², Mohammadreza Einian³, Gholamreza Etaati^{2*}

1. Department of Physics, University of Tehran

2. Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology

3. Department of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University

Abstract

In this paper we have designed and simulated a beta-radioluminescence nuclear battery based on Sr/Y90 source and ZnS:Cu phosphor material using MCNP/MATLAB/SILVACO hybrid code and compared it with experimental results. The effective parameters on output of battery include type and activity of source, thickness of phosphor material, thickness of semiconductor and doping concentrations. To investigate the accuracy of simulation we used same parameters as experimental setup. The experimental parameters include Sr/Y90 source with 30 mCi activity (Three cylindrical sources each with 10 mCi activity), 110 micrometers thickness of ZnS:Cu and Silicon semiconductor with thickness of 50 micrometers. The obtained value of open circuit voltage from simulation is 38.7 mV and value from experiment is 42.4 mV which shows the great accuracy of the hybrid code for simulation.

Keywords: Nuclear Battery, Monte Carlo, MATLAB, SILVACO

Email: etaati.reza@gmail.com

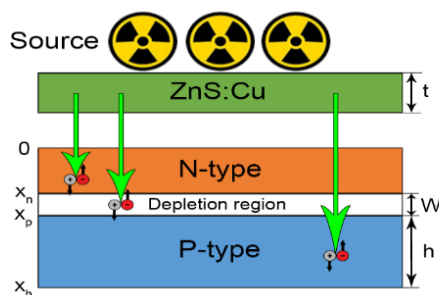
۱. مقدمه

باتری‌های هسته‌ای یکی از منابع انرژی با طول عمر بالا هستند که در سال‌های اخیر موضوع بسیاری از تحقیقات بوده‌اند. این باتری‌ها بر اساس مکانیزم به دو دسته تبدیل مستقیم و غیر مستقیم دسته‌بندی می‌شوند. در نوع تبدیل مستقیم، پرتوهای تابش شده مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌شوند اما در نوع تبدیل غیر مستقیم، پرتوها ابتدا به شکل دیگری از انرژی تبدیل شده و سپس به الکتریسیته تبدیل می‌شوند [۱].

از معروف‌ترین باتری‌های هسته‌ای تبدیل مستقیم می‌توان به باتری‌های بتاولتائیک و آلفاولتائیک اشاره کرد که در آن ذرات بتا یا آلفا مستقیماً به نیمه‌رسانا برخورد کرده و باعث تولید زوج الکترون-حفره می‌شوند. این نوع باتری‌ها بازده بالاتری نسبت به باتری‌های تبدیل غیرمستقیم دارند اما از معایب آن‌ها می‌توان به تخریب کریستال نیمه‌رسانا اشاره کرد که باعث کاهش عمر مفید باتری می‌شود [۲، ۳]. یکی از باتری‌های هسته‌ای تبدیل غیر مستقیم، باتری‌های رادیولومینسانس [۴] هستند که در آن‌ها از یک ماده نورتاب استفاده می‌شود. در این باتری‌ها پرتوهای تابش شده از چشمه ابتدا به ماده نورتاب برخورد کرده و پس از تحریک آن باعث تولید نور می‌شوند و این نور توسط یک سلول فوتولتائیک جذب شده و تبدیل به الکتریسیته می‌شود. این باتری‌ها نسبت به باتری‌های تبدیل مستقیم بازده کمتری دارند اما در عوض آسیب کمتری به نیمه‌رسانا می‌زنند و در نتیجه طول عمر بالاتری دارند. در دهه‌های اخیر با پیشرفت کامپیوترها و کدهای نرم‌افزاری، دقت شبیه‌سازی‌ها بسیار بالاتر رفته و برای کاهش وقت و هزینه، همواره پیش از پیاده‌سازی چیدمان آزمایشگاهی از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در این پژوهش ما یک باتری رادیولومینسانس بر پایه چشمه بتازای Sr/Y90 انتخاب و طراحی کردیم. سپس با استفاده از کد ترکیبی MCNP/MATLAB/SILVACO [۵، ۶، ۷] پارامترهای خروجی این باتری را محاسبه کرده و با نتایج عملی مقایسه کردیم.

۲. روش تحقیق

چشمه مورد استفاده در این پژوهش سه میله استوانه‌ای از رادیویزوتوپ Sr/Y90 هر کدام با اکتیویته ۱۰ میلی کوری است (مجموعاً ۳۰ میلی کوری). ماده نورتاب استفاده شده سولفید روی آلائیده شده با مس ZnS:Cu و نیمه‌رسانای استفاده شده سیلیکون تجاری است. ابعاد و چیدمان این باتری مطابق جدول ۱ و شکل ۱ است.

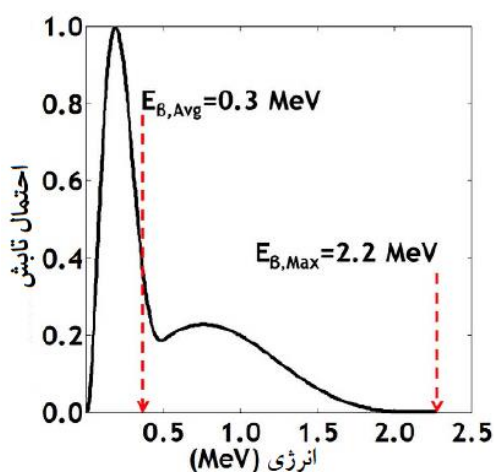


شکل ۱. چیدمان باتری هسته‌ای رادیولومینسانس

جدول ۱ ابعاد مورد استفاده برای باتری هسته ای بتا-رادیولومینسانس

ابعاد	مواد
1cm x 1cm x 110 μ m	ZnS:Cu
H=1cm r=2mm	Sr/Y-90
1cm x 1cm x 50 μ m	c-Si

طیف ذرات بتا چشمه Sr/Y90 در شکل ۲ آورده شده است [۸].



شکل ۲. طیف انرژی ذرات بتا Sr/Y90

وجود ناخالصی‌های موجود در چشمه‌های خالص بتازا می‌توانند پرتوهای گاما تولید کنند. در این پژوهش، چشمه مورد نظر، چشمه بتازای خالص در نظر گرفته شده است. بازه انرژی ذرات بتا اگر در محدوده ۸۰۰-۱۲۵ کیلو الکترون ولت باشد، می‌تواند به نیمه هادی آسیب برساند [۹]. مشخصات سلول نیمه‌رسانا در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات نیمه‌رسانای استفاده شده

ماده نیمه‌رسانا	مساحت (سانتی متر مربع)	ضخامت (میکرومتر)	بیشینه ولتاژ مدار باز (میلی ولت)	بیشینه جریان مدار کوتاه (میلی آمپر)	N غلظت ناخالصی (اتم بر سانتی متر مکعب)	P غلظت ناخالصی (اتم بر سانتی متر مکعب)
سیلیکون مونوکریستال	۱	۵۰	۵۵۲	۱.۴۱۲	1e15	1e14

هنگامی که انرژی ناشی از ذرات بتا در ماده نورتاب ذخیره می‌شود پدیده تابناکی رخ می‌دهد و کسری از انرژی ذخیره شده به نور تبدیل می‌شود. شدت نور ایجاد شده برابر است با [۱۰]:

$$I_0 = E_{dep} \times \frac{hv}{2.67E_g + 0.87} \quad (1)$$

که در آن E_{dep} انرژی ذخیره شده در ماده نورتاب، hv انرژی فوتون‌های رادیولومینسانس در طول موج قله تابشی و E_g شکاف انرژی ماده نورتاب است. برای $ZnS:Cu$ ، hv و E_g به ترتیب برابر $۲,۳۳$ و $۲,۸$ الکترون ولت است

جذب و پراکندگی فوتون‌های فلوروسانس هنگام ترابرد داخل ماده نورتاب قبل از رسیدن به سطح خارجی به عنوان اثر خودجذبی شناخته می‌شود شدت موثر رادیولومینسانس بعد از خودجذبی که به سطح خارجی ماده نورتاب می‌رسد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = I_0 e^{-(k+s)t} \quad (2)$$

که k ضریب جذب، s ضریب پراکندگی و t ضخامت ماده نورتاب است.

ژو و همکاران [۱۰] با استفاده از برازش خطی داده‌های عبوردهی در ضخامت‌های مختلف $ZnS:Cu$ ، حاصل جمع ضرایب جذب و پراکندگی را برابر $۰,۱۰۸۸ \mu m^{-1}$ بدست آوردند، مساحت لایه $ZnS:Cu$ برابر $۱ cm \times ۱ cm$ و ضخامت آن به N لایه با ضخامت δt تقسیم شد. بعد از محاسبه انرژی ذخیره شده در هر لایه، شدت رادیولومینسانس متناظر آن با استفاده از معادله ۱ بدست آمد. برای بدست آوردن شدت کل، فرض‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱. نصف فوتون‌های تولید شده در هر لایه به سمت جلو و نصف دیگر به سمت عقب انتشار پیدا می‌کنند.

۲. تنها کسری از فوتون‌ها، برابر $K = e^{-(k+s)\delta t}$ به لایه بعد انتقال پیدا می‌کنند.

۳. هنگامی که فوتون‌ها به لایه خارجی می‌رسند یا بازتاب می‌شوند و یا عبور می‌کنند.

با در نظر گرفتن تمام بازتاب‌ها بین سطوح ورودی و خروجی لایه نورتاب، کسری از فوتون‌ها که از لایه خروجی خارج

می‌شوند که برابر است با [۱۱] و [۱۲]

$$M_n = (1-R) \left[\frac{K^{N-n}}{1-K^{2N}R^2} + RK^{n+N} \frac{K^{2N}R^2}{1-K^{2N}R^2} \right] \quad (3)$$

بازتاب کلی R برابر است با:

$$R = \frac{(N-1)^2}{(N+1)^2} \quad (4)$$

که در آن n ضریب شکست ZnS:Cu در ۵۳۲ نانومتر و برابر است با ۳۸/۲ [۱۳].

اگر تمام لایه‌ها در نظر گرفته شود شدت کل خروجی فوتون‌های فلئورسانت از ماده نورتاب برابر است با:

$$I_{tot}(N) = \sum_{n=1}^N I_{0,n} M_n \quad (۵)$$

طیف فلئورسانت ZnS:Cu به صورت یک تابع گاوسی با طول موج پیک ۵۳۲ نانومتر است. بنابراین شدت طیفی $b_s(\lambda)$ را میتوان به صورت زیر مدل کرد: [۴]

$$b_s(\lambda) = ae^{-0.5 \left(\frac{\lambda - 532}{25} \right)^2} \quad (۶)$$

که در آن a از رابطه زیر بدست می آید:

$$\int b_s(\lambda) d\lambda = I_{tot} \quad (۷)$$

با فرض اینکه تمام فوتون‌های تولید شده به الکترون و حفره تبدیل شوند می‌توان چگالی جریان بیشینه نظری سلول را به صورت زیر حساب کرد [۱۴]

$$J_{sc}^{max} = q \int b_s(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (۸)$$

که در آن q بار الکترون است.

در ادامه، محاسبات بر اساس فیزیک سلول‌های خورشیدی انجام میشود: برای محاسبات قسمت نیمه رسانا معادله پخش حامل‌های اقلیت حل شده است که معادلات مرتبط و شرایط مرزی متناظر با آنها عبارتند از [۱۴]:

$$\begin{aligned} D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G(x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} &= 0 \\ p_n - p_{n0} &= 0; \quad x = n \end{aligned} \quad (۹)$$
$$D_p \left. \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} \right|_{x=0} = S_p (p_n - p_{n0})$$

برای ناحیه نوع N:

$$D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G(x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0$$

$$n_p - n_{p0} = 0; \quad W = n + xx$$

$$D_n \left. \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \right|_{x=H} = S_n (n_p - n_{p0}) \quad (10)$$

برای ناحیه نوع P.

در ناحیه نوع P، جایی که $P_n(n_p)$ و $P_n(n_{p0})$ به ترتیب غلظت حفره (الکترون) با و بدون تابش هستند. $(D_n)D_p$ ضریب پخش حفره (الکترون)، $(S_n)S_p$ سرعت باز ترکیب سطحی حفره (الکترون)، τ طول عمر حامل بار و G بیانگر نرخ تولید جفت الکترون حفره است که می‌تواند به صورت زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$G(x) = \int b_s(\lambda) \frac{\lambda}{hc} T(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)Zx} d\lambda \quad (11)$$

که در آن $T(\lambda)$ عبور به داخل سیلیکون، $\alpha(\lambda)$ ضریب جذب سیلیکون و Z طول مسیر اپتیکی بهبود یافته است و انتگرال به ازای تمامی λ ها گرفته شده است. بعد از محاسبات می‌توان $G(x)$ را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$G(x) = \alpha_1 e^{-\alpha_2 x} \quad (12)$$

عبارات چگالی جریان تولید شده در قسمت امیتر و بیس دیود نیمه رسانا را می‌توان به ترتیب از حل معادلات ۱۱ و ۱۲ بدست آورد [۱۵]:

$$J_p = q\alpha_1 \frac{L_p}{\alpha_2^2 L_p^2 - 1} \times \left[\frac{\left(\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) + \alpha_2 L_p \right) - e^{-\alpha_2 x_n} \left(\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \cosh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + \sinh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) \right)}{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \sinh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + \cosh \left(\frac{x_n}{L_p} \right)} - \alpha_2 L_p e^{-\alpha_2 x_n} \right] \quad (13)$$

$$J_n = q\alpha_1 \frac{L_n e^{-\alpha_2(x_n+W)}}{\alpha_2^2 L_n^2 - 1} \times \left[\alpha_2 L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left(\cosh \left(\frac{h}{L_n} \right) - e^{-\alpha_2 h} \right) + \sinh \left(\frac{h}{L_n} \right) + \alpha_2 L_n e^{-\alpha_2 h}}{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \sinh \left(\frac{h}{L_n} \right) + \cosh \left(\frac{h}{L_n} \right)} \right] \quad (14)$$

چگالی جریان تولید شده در منطقه تخلیه به صورت زیر است:

$$J_d = \int_{x_n}^{x_n+W} qG(x) dx = \frac{q\alpha_1}{\alpha_2} \left[e^{-\alpha_2 x_n} - e^{-\alpha_2(x_n+W)} \right] \quad (15)$$

جریان نشت به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:



$$J_0 = \frac{qn_i^2 D_p \left(\frac{D_p}{L_p}\right) \sinh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) + S_p \cosh\left(\frac{x_n}{L_p}\right)}{N_d L_p \left(\frac{D_p}{L_p}\right) \cosh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) + S_p \sinh\left(\frac{x_n}{L_p}\right)} + \frac{qn_i^2 D_n \left(\frac{D_n}{L_n}\right) \sinh\left(\frac{h}{L_n}\right) + S_n \cosh\left(\frac{h}{L_n}\right)}{N_a L_n \left(\frac{D_n}{L_n}\right) \cosh\left(\frac{h}{L_n}\right) + S_n \sinh\left(\frac{h}{L_n}\right)} \quad (16)$$

که در آن L_p و L_n طول پخش حاملهای اقلیت هستند. همچنین، N_d و N_a به ترتیب غلظت های اتمهای ناخالصی پذیرنده و دهنده در نیمه رسانا هستند.

جریان کل مجموع جریان ها در مناطق نوع N، نوع P و تخلیه است.

$$J_{sc} = J_n + J_p + J_d \quad (17)$$

ولتاژ مدار باز، فاکتور پرشوندگی [۱۷] و بازده تبدیل با معادلات زیر بیان می شود:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(1 + \frac{J_{sc}}{J_0}\right)$$

$$FF = \frac{\frac{qV_{oc}}{kT} - \ln\left(\frac{qV_{oc}}{kT} + 0.72\right)}{\frac{qV_{oc}}{kT} + 1} \quad (18)$$

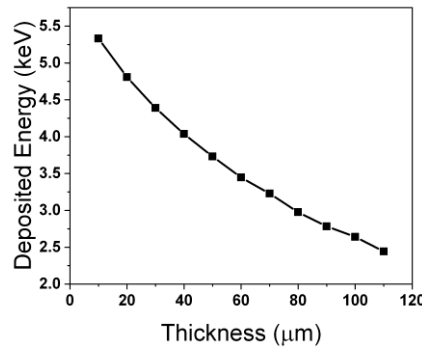
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{AE_{avg}}$$

که در آن k ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، FF فاکتور پرشوندگی، P_{in} توان ورودی، E_{avg} متوسط انرژی ذرات بتا و A میزان اکتیویته چشمه است.

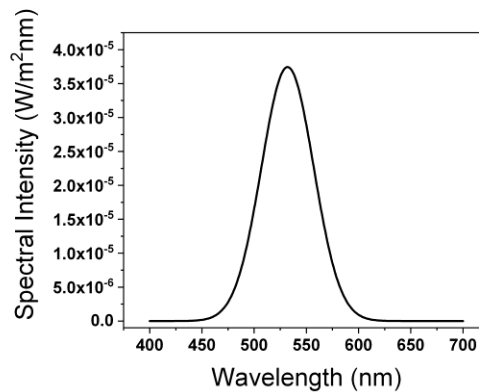
برای محاسبه انباشت انرژی از کد محاسباتی مونت کارلو MCNPX استفاده شده است. برای محاسبه طیف نور خروجی از ماده نورتاب از کد MATLAB استفاده شده است. برای محاسبه ولتاژ مدارباز و جریان مدار کوتاه سلول یکبار از کد MATLAB و بار دیگر از کد SILVACO استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

نمودار انرژی انباشت شده در ماده نورتاب و طیف نور خروجی از آن به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ آورده شده است.

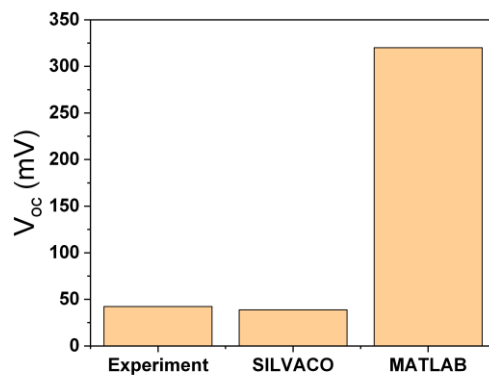


شکل ۳. انرژی انباشت شده در ماده نورتاب



شکل ۴. طیف نور خروجی از ماده نورتاب

چگالی جریان مدار کوتاه بدست آمده از کد MATLAB و SILVACO به ترتیب برابر ۵۸/۱ و ۶۲/۶ نانوآمپر بر سانتی متر مربع است که همخوانی خوبی با یکدیگر دارند، اما به دلیل نبود ابزاری برای اندازه‌گیری جریان‌های کوچکتر از ۱۰۰ نانوآمپر در آزمایشگاه نتوانستیم جریان عملی را اندازه‌گیری کنیم. بنابراین کمیت ولتاژ مدارباز (که اندازه‌گیری آن راحت تر است) برای مقایسه استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود ولتاژ مدارباز بدست آمده از کد SILVACO همخوانی بسیار خوبی با مقدار اندازه‌گیری شده دارد (کمتر از ۱۰ درصد خطا)، در حالی که کد MATLAB به دلیل استفاده از رابطه تحلیلی دیود ایده‌آل، ولتاژ بسیار بالاتری را نشان می‌دهد.



شکل ۵. ولتاژ مدارباز بدست آمده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی

از دلایل عمده اختلاف ولتاژ بدست آمده از کد SILVACO و ولتاژ اندازه‌گیری شده عملی می‌توان به دو علت زیر اشاره کرد:

۱. در شبیه‌سازی اثر برهمکنش ذرات بتا با نیمه‌رسانا نادیده گرفته شده و فرض شده تنها فوتون‌های تولید شده توسط ماده نورتاب باعث تولید زوج الکترون-حفره می‌شوند. در صورتی که در عمل مقداری از ذرات بتا به نیمه‌رسانا نفوذ کرده و باعث تولید زوج الکترون-حفره اضافی می‌شود.
۲. در شبیه‌سازی فرض شده چشمه میله‌ای ذرات بتا را به طور یکنواخت تابش می‌کند، در حالی که در عمل این تابش به صورت غیریکنواخت است.

با لحاظ کردن این دو عامل در شبیه‌سازی می‌توان دقت را از این هم بالاتر برد. خلاصه نتایج بدست آمده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. خلاصه نتایج بدست آمده

عملی	SILVACO	MATLAB	
۴۲٫۴	۳۸٫۷	۳۲۰	ولتاژ مدارباز (میلی ولت)
کمتر از ۱۰۰	۶۲٫۶	۵۸٫۱	چگالی جریان مدار کوتاه (نانوآمپر بر سانتی متر مربع)

۴. نتیجه‌گیری

یک باتری هسته‌ای رادیولومینسانس با استفاده از چشمه میله‌ای Sr/Y90 و ماده نورتاب ZnS:Cu توسط کد ترکیبی طراحی و شبیه‌سازی و با نتایج عملی مقایسه شد. ولتاژ مدارباز بدست آمده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی، اختلافی کمتر از ۱۰ درصد دارند و می‌توان با در نظر گرفتن اثر مستقیم ذرات بتا بر روی ماده نیمه‌رسانا این خطا را حتی کمتر کرد. در این پژوهش نشان داده شد که می‌توان با استفاده از کدهای ترکیبی، شبیه‌سازی‌های دقیقی انجام داده و چیدمان باتری‌های هسته‌ای را پیش از ساخت، طراحی و مهندسی کرد و با صرفه‌جویی در وقت و هزینه پارامترهای آن را بهینه نمود.

۵. مراجع

- [1] S. Harrison, "Betavoltaic Devices," Retrieved October, 22 (2014).
- [2] L. C. Olsen, P. Cabauy, and B. Elkind, "Betavoltaic power sources," Physics today, 65, 12, 35 (2012).
- [3] C. Eiting, V. Krishnamoorthy, S. Rodgers, T. George, J. D. Robertson, and J. Brockman, "Demonstration of a radiation resistant, high efficiency SiC betavoltaic," Applied Physics Letters, 88, 6, 064101 (2006).
- [4] Moayedi, H., Hajibaba, S., Afarideh, H., Ghergherehchi, M. and Mohamadian, M., 2021. Optimization of Beta Radioluminescent Batteries with Different Radioisotopes: A Theoretical Study. Nuclear Science and Engineering, pp.1-12.
- [5] Werner, Christopher J. "MCNP User's Manual-Code Version 6.2." Los Alamos National Laboratory, Los Alamos (2017).
- [6] Michael, S., Bates, A.D. and Green, M.S., 2005, January. Silvaco ATLAS as a solar cell modeling tool. In Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005. (pp. 719-721). IEEE.
- [7] Etter, D.M., Kuncicky, D.C. and Hull, D.W., 2002. Introduction to MATLAB. Prentice Hall.
- [8] Dixon, Jefferson, Aravindh Rajan, Steven Bohlemann, Dusan Coso, Ajay D. Upadhyaya, Ajeet Rohatgi, Steven Chu, Arun Majumdar, and Shannon Yee. "Evaluation of a silicon 90 Sr betavoltaic power source." Scientific reports 6, no. 1 (2016): 1-6.



- [9] H. Flicker, J. Loferski, and J. Scott-Monck, "Radiation defect introduction rates in n-and p-type silicon in the vicinity of the radiation damage threshold," *Physical Review*, **128**, 6, 2557 (1962).
- [10] Z. Xu, Z. Jin, X. Tang, Y. Liu, X. Guo, C. Peng, and H. Wang, "Designing performance enhanced nuclear battery based on the cd-109 radioactive source," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no.1, pp.508–517, 2019.
- [11] G. Saatsakis, N. Kalyvas, C. Michail, K. Ninos, A. Bakas, C. Fountzoula, I. Sianoudis, G. E. Karpetas, G. Fountos, I. Kandarakis, et al., "Optical characteristics of zncuins/zns (core/shell) nanociystal flexible films under x-ray excitation," *Crystals*, vol.9, no.7, p.343, 2019
- [12] N. Kalyvas, I. Valais, C. Michail, G. Fountos, I. Kandarakis, and D. Cavouras, "A theoretical study of csi:tl columnar scintillator image quality parameters by analytical modeling," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol.779, pp. 18 – 24, 2015.
- [13] S. Ozaki and S. Adachi, "Optical constants of cubic ZnS," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.32, pp. 5008–5013, Nov 1993
- [14] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, chap. Photons In, Electrons Out: Basic Principles of PV, pp.17–39. Imperial College Press, London, 2003.
- [15] K. McIntosh and S. BakerFinch, "Opal 2: Rapid optical simulation of silicon solar Cells," in *Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (Austin), 2012.
- [16] S. R. Kurtz, P. Faine, and J. M. Olson, "Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter," *Journal of Applied Physics*, vol.68, no.4, pp.1890–1895, 1990
- [17] X. Tang, D. Ding, Y. Liu, and D. Chen, "Optimization design and analysis of Si-63Ni betavoltaic battery," *Science China Technological Sciences*, 55, 4, 990 (2012); 10.1007/s11431-012-4752-6., URL <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4752-6>.