



افزایش بهره نوترون از طریق بهبود همگرایی باریکه یون های چشمه نوترون پایروالکترونیک

ولی خانی، مهدی* (۱) - حبیبی، مرتضی (۲) - ایرجی، داوود (۳)

دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه گداخت

چکیده:

در این مقاله، در ابتدا چشمه نوترون پایروالکترونیک (PCNS) شبیه سازی و بهره نوترون آن محاسبه شد. سپس با استفاده از تغییر در شکل بلور ها و چیدمان آن ها، تعدادی طرح جدید برای مولد نوترون پایروالکترونیک ارائه شد. در ادامه بهره نوترون مدل های جدید به صورت تئوری محاسبه شد که افزایش قابل توجهی در میزان بهره نوترون این طرح ها در مقایسه با چشمه ابتدایی بدست آمد. افزایش بهره نوترون حداقل ۶۷٪ و حداکثر ۸۱۰ درصد می باشد که افزایشی حدوداً ۹ برابری را در بهره نوترونی دستگاه نشان می دهد.

کلمات کلیدی: بلور پایروالکترونیک، چشمه نوترون، بهره نوترون

مقدمه:

ابتدا در سال ۲۰۰۵ نارانجو و همکارانش با استفاده از بلور پایروالکترونیک یون های دوتریم ایجاد شده از گاز دوتریم را به سمت هدف دوتریم دار شتاب دادند و توانستند به گداخت دوتریم- دوتریم دست پیدا کنند [۱]. دونالد گیلیچ و همکاران در دانشگاه پلی تکنیک رنسلیر بر روی یک سیستم طیف سنج جرمی جدید با استفاده از بلور پایروالکترونیک کار کردند و متوجه شدند که چه نوع یون دوتریومی در این سیستم تولید می شود [۲]. گیلیچ و همکارانش تلاش کردند تا با استفاده از نانومیله تنگستنی به افزایش بهره نوترون دست پیدا کنند و نتیجه کار آنها افزایش بهره نوترون از طریق ترکیب نانو میله و یک سوزن منفرد بود [۳]. کوانن و اعضای تیمش برای آزمایش میزان اهمیت الکترون ها در گداخت دوتریم- دوتریم ایجاد شده در مولد پایروالکترونیک، از سه بلور با اندازه متفاوت در شش بیشینه بندی مختلف بهره بردند [۴]. هیرویکی هوندا و دیگران از بلور پایروالکترونیک برای تولید اشعه ایکس استفاده کردند. آنها مولد اشعه ایکسی را ارائه کردند که می توانست به صورت پیوسته عمل نماید و همچنین به جهت افزایش اشعه ایکس بر روی جنس محفظه مطالعاتی را انجام دادند [۵]. تورنو و همکارانش به دنبال ساخت مولد نوترونی بودند که بدون استفاده از سوزن بتواند نوترون تولید نماید [۶].

بلور های پایروالکترونیک در شرایط معمول قطبیده هستند و در صورت تغییر دما متناسب با آن تغییر؛ از خود بار سطحی به نمایش می گذارند [۷]. در فشار اتمسفری، بار ایجاد شده فوراً توسط بار های موجود در هوا خنثی می شوند و اجازه



پیدا نمی کنند تا میدان الکتریکی لازم جهت یونیزه کردن گاز را ایجاد کند. اما در داخل محفظه خلا این تغییر بار تو سط تغییر دما می تواند باعث ایجاد الکترون در سطح بلور شود. در غیاب پوشش سریع سطح بلور با بار های انباشته شده در هوا (در خلاء)، قطبش خودبخودی (ΔP_s)، می تواند با تغییر دما (ΔT) و ضریب پیروالکترونیک (γ) با توجه به معادله (۱) ارتباط برقرار کند [۸]:

$$(1) \Delta P_s = \gamma \Delta T$$

ضریب پیروالکترونیک در واقع معیاری از قطبش خود به خودی بلور های پیروالکترونیک است. واحد ضریب پیروالکترونیک (C/m^2K) می باشد و $L_i T_a O_3$ با $190 \frac{\mu C}{m^2 K} \gamma$ از ضریب پیروالکترونیک نسبتا بالایی برخوردار است [۹]. با مدل سازی بلور ها و هدف به عنوان یک خازن با صفحات موازی ، ما می توانیم ولتاژ ایجاد شده بین بلور و هدف (V) را در ارتباط با معادله (۲) ببینیم [۱۰ ، ۱۱]:

$$V = (\gamma \Delta T) / (\frac{\epsilon_{cr}}{d_{cr}} + \epsilon_0 / d_{gap}). \quad (2)$$

که d_{cr} ضخامت بلور، d_{gap} فاصله بین بلور و هدف، ϵ ثابت گذردهی خلاء و ϵ_{cr} ثابت گذردهی نسبی بلور می باشد. سطح مقطع واکنش گداخت دوتریم-دوتریم در انرژی 20 keV در کاربرد های عملی صفر است و در 100 keV حدودا 16.3 mb می باشد [۱۲].

سوزن تنگستن استفاده شده، در جهت افزایش میدان الکتریکی است که می تواند یونیزا سیون گاز دوتریم را افزایش دهد. معادله (۳) در مورد محاسبه افزایش میدان الکتریکی در نزدیکی سوزن است. این معادله تحت عنوان معادله "hemisphere on a post" شناخته می شود [۱۳].

$$(3) \alpha = (2 + \frac{L}{\rho})(1 - \frac{L}{d})$$

که α ضریب تکثیر میدان الکتریکی، L طول سوزن، ρ شعاع نوک سوزن و d فاصله بین بلور و هدف می باشد.



در حالی که بلور پایروالکتریک قبلا برای مولد اشع ایکس مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵، ۱۶]، و کاربرد آن برای تولید یون مثبت به مرحله عملیاتی رسیده است [۱۶، ۱۷]، ولی تولید نوترون بوسیله بلور های پایروالکتریکی تقریبا روشی جدید محسوب می شود [۱۸، ۱۹]. مولد نوترون کوچک و سبک می تواند وسیله ای بسیار سودمند برای آشکار سازی مواد هسته ای خاص و مواد منفجره در بازرسی ها باشد [۲۰]. این روش مزایای منحصر به فردی دارد زیرا نوترون به راحتی می تواند در اغلب مواد نفوذ کند و پرتو های گامای مشخصه ایجاد نماید. این پرتو های تولید را می توان دریافت نمود و با آنالیز آنها به ترکیب مواد دست پیدا کرد [۲۱].

در این مقاله، ۶ طرح جدید برای مولد نوترون پایروالکتریک ارائه شده است. در ابتدا، مولد نوترون پایروالکتریک شبیه سازی شده است و به منظور صحت گذاری بر نتایج شبیه سازی، این مقادیر با یک کار آزمایشگاهی [۱] مقایسه شد. سپس طرح های جدید به همراه خصوصیات، نمودار ها و نتایج آورده شده است و در نهایت بهره نوترونی هر طرح به صورت جداگانه ارائه شده است.

شبیه سازی :

برای شبیه سازی، به منظور تعیین خصوصیات مسیر یون ها و انرژی یون های دوتریوم،^۱ PCNS با نرم افزار CST مدل سازی شد. سپس با استفاده از معادلات تئوری، سطح مقطع گداخت دوتریم-دوتریم برای انرژی یون ها محاسبه شد. بعد از مدل سازی و بدست آوردن انرژی یون های دوتریم و سپس سطح مقطع واکنش در آن انرژی، شار یون ها در اوج کاری دستگاه و چگالی دوتریم در هدف برای مدل تجربی [1] محاسبه گردید. در نهایت، با استفاده از روابط تئوری، بهره نوترون در بیشینه کاری مولد نوترون پایروالکتریک محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

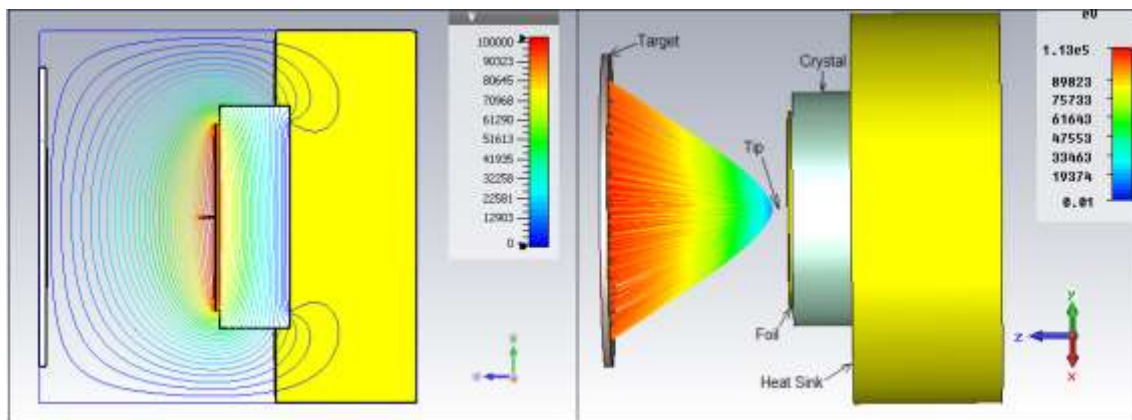
برای مدل کردن کریستال پایروالکتریک از یک استوانه از جنس کوارتز با شعاع ۱/۵ cm و ضخامت ۱ cm استفاده شد. یک سمت بلور به یک محفظه حرارتی متصل شد که از جنس مس خالص انتخاب شده است و ابعاد آن شعاع ۲/۵cm، ضخامت ۲ cm و فرورفتگی ۰/۲ cm برای قرار گیری بلور می باشد. سمت دیگر بلور با فویل مسی با شعاع ۱/۲۵ cm و ضخامت ۰/۰۵ cm جهت جمع آوری بار های الکتریکی پوشش داده شده است.

برای تولید ولتاژ در دو سمت بلور، دو صفحه رسانای الکتریکی در دو سمت بلور استفاده شد که یکی در بین بلور و محفظه حرارتی قرار گرفت و دیگری بر روی فویل جلویی بلور با ضخامت ۰/۰۱ cm و با شعاع ۱/۲۵ cm قرار داده شد.

با در نظر گرفتن این موضوع که حداکثر انرژی قابل حصول از اشعه های ایکس بدست آمده در مدل تجربی حدود ۱۰۰ keV است [22]، می توانیم به درستی این نتیجه را بگیریم که اختلاف پتانسیل ایجاد شده در دو سمت بلور kV ۱۰۰ است و بر این اساس ولتاژ ۱۰۰ kV به صفحه جلویی بلور و ولتاژ صفر ولت به صفحه بین بلور و محفظه حرارتی

^۱ Pyroelectric Crystal Neutron Source

اعمال گردید. در شکل ۱ خطوط هم ولتاژ مربوط به شبیه سازی به تصویر کشیده شده است. هدف انتخاب شده یک سیلندر از جنس مولیبدن با شعاع دو سانتی متر و عرض یک سانتی متر است که در فاصله $4/2 \text{ cm}$ به دور از بلور قرار داده شده است. در نهایت به منظور افزایش میدان الکتریکی با توجه به مدل تجربی [۱] یک سوزن تنگستن به بلور متصل شد. طول، شعاع پایه و شعاع نوک سوزن به ترتیب $0/23$ ، $0/004$ و $0/00001$ سانتی متر است. به منظور تولید یون دوتریوم، 574 چشمه ذره یون دوتریوم با انرژی $0/1 \text{ eV}$ و جریان $4/249 \text{ nA}$ مطابق با نتایج حاصل از آزمایش تجربی بر روی مدل شبیه سازی تعریف شد [۲۲]. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، انرژی یون های دوتریم در حین برخورد به هدف 113 keV می باشد.



شکل شماره (۱): مسیر حرکت یون های دوتریم و طیف انرژی آن ها (راست)، خطوط هم ولتاژ شبیه سازی شده (چپ)

با فرض اینکه نوترون های برخوردی با هدف تک انرژی اند، نرخ تولید نوترون به صورت زیر محاسبه می شود:

$$(4) R(x) dx = \Phi(x) N \sigma [E(x)] dx,$$

که $\Phi(x)$ ، $E(x)$ ، N و $\sigma [E(x)]$ به ترتیب؛ شار یون دوتریم، انرژی یون ها در عمق x ، چگالی دوتریم در هدف و سطح مقطع میکروسکوپی شبیه دوتریم - دوتریم می باشد. سطح مقطع تابعی از انرژی ذرات یون ورودی است و انرژی یون هم تابعی از عمق نفوذ در هدف است. با فرض اینکه شار یون مستقل از عمق نفوذ است:

$$(5) R = \Phi N \int \sigma [E(x)] dx,$$



که $E(x)$ را می توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود [19]:

$$(6) E(x) = E_0 - \int_0^x \frac{dE}{dx}(x) dx$$

مقدار $\frac{dE}{dx}(x)$ برای ErD_2 با کد مونت کارلویی SRIM محاسبه شد و سپس سطح مقطع انتگرال گیری شده برای یون های دوتریم با انرژی 113 keV ، $63/85$ بارن آنگستروم محاسبه گردید. با در نظر گرفتن جریان یون ها در بیشینه خودش یعنی $4/249 \text{ nA}$ [22]، تعداد یون های دوتریم (Q) 2.651×10^{10} بدست آمد. چگالی دوتریم موجود در هدف از طریق رابطه زیر محاسبه گردید [23]:

$$(7) N_D = p \frac{\rho_{mix} N_A}{M_{mix}}$$

که در آن N_D چگالی دوتریم، p تعداد دوتریم در مولکول، ρ_{mix} چگالی ترکیب، M_{mix} وزن مولکولی و N_A عدد آووگادرو می باشد. برای هدف از جنس ErD_2 ، $M_{mix} = 171/28 \text{ g/mol}$ ، $\rho_{mix} = 7/6 \text{ g/cm}^3$ ، و $p = 2$ می باشد. با قرار دادن این مقادیر در رابطه (۷) چگالی دوتریم در هدف $N_D = 5/344 \times 10^{-10} / \text{b}\text{\AA}$ بدست آمد. در نهایت با جاگذاری مقادیر مربوط به شار یون دوتریم، سطح مقطع گداخت دوتریم - دوتریم در انرژی 113 keV و چگالی دوتریم در هدف، بهره نوترون تولیدی در شرایط بیشینه کاری دستگاه محاسبه شد که مقدار $R = 904 \frac{\text{Neutron}}{\text{sec}}$ می باشد که بسیار نزدیک به مقدار بدست آمده از آزمایشات تجربی ($900 \text{ Neutrons s}^{-1}$) است [1].

روش های همگرایی باریکه یونی

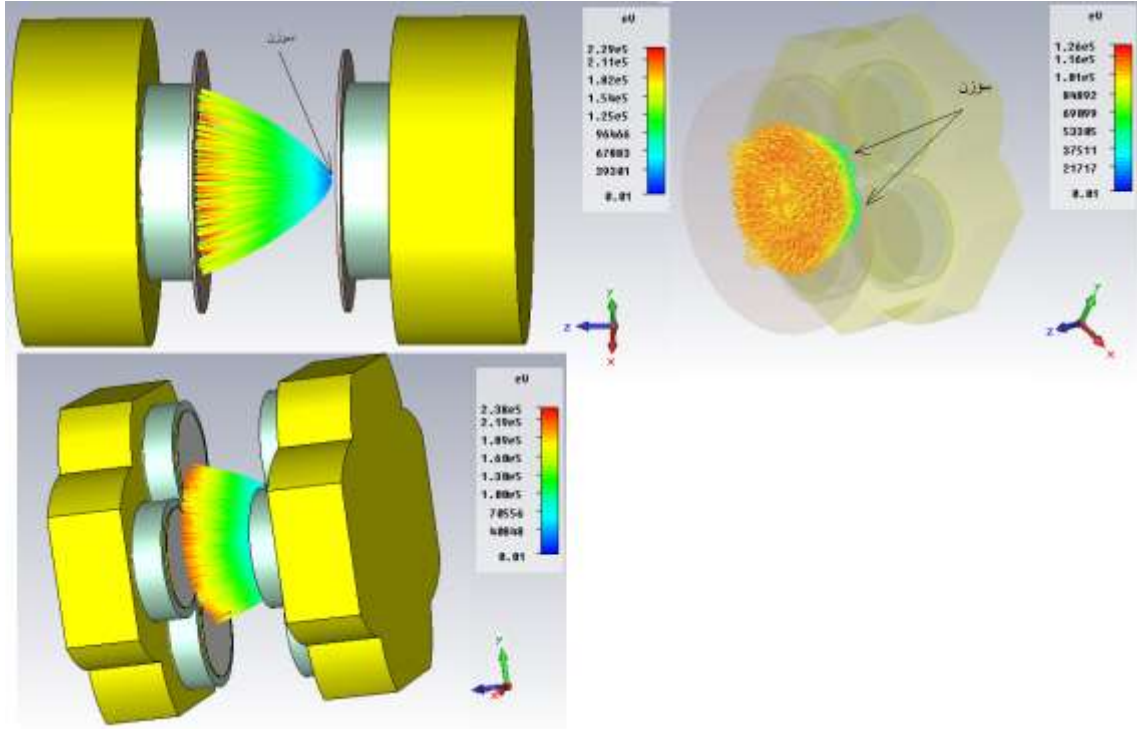
در این بخش مدل هایی که همگرایی نسبی باریکه یون دوتریم را در پی دارند آورده شده اند. هدف از ایجاد این همگرایی کاهش سطح برخورد یون های دوتریم با هدف است. با کاهش این سطح، بهره نوترون بالاتری قابل حصول است. از طرفی دیگر، با کاهش این سطح، انرژی یون ها در زمان برخورد به هدف کاهش می یابد که به دنبال آن سطح مقطع گداخت کاهش پیدا می کند. در این مدل ها، به منظور اعمال اثر کاهش سطح برخورد از یک ضریب تصحیح



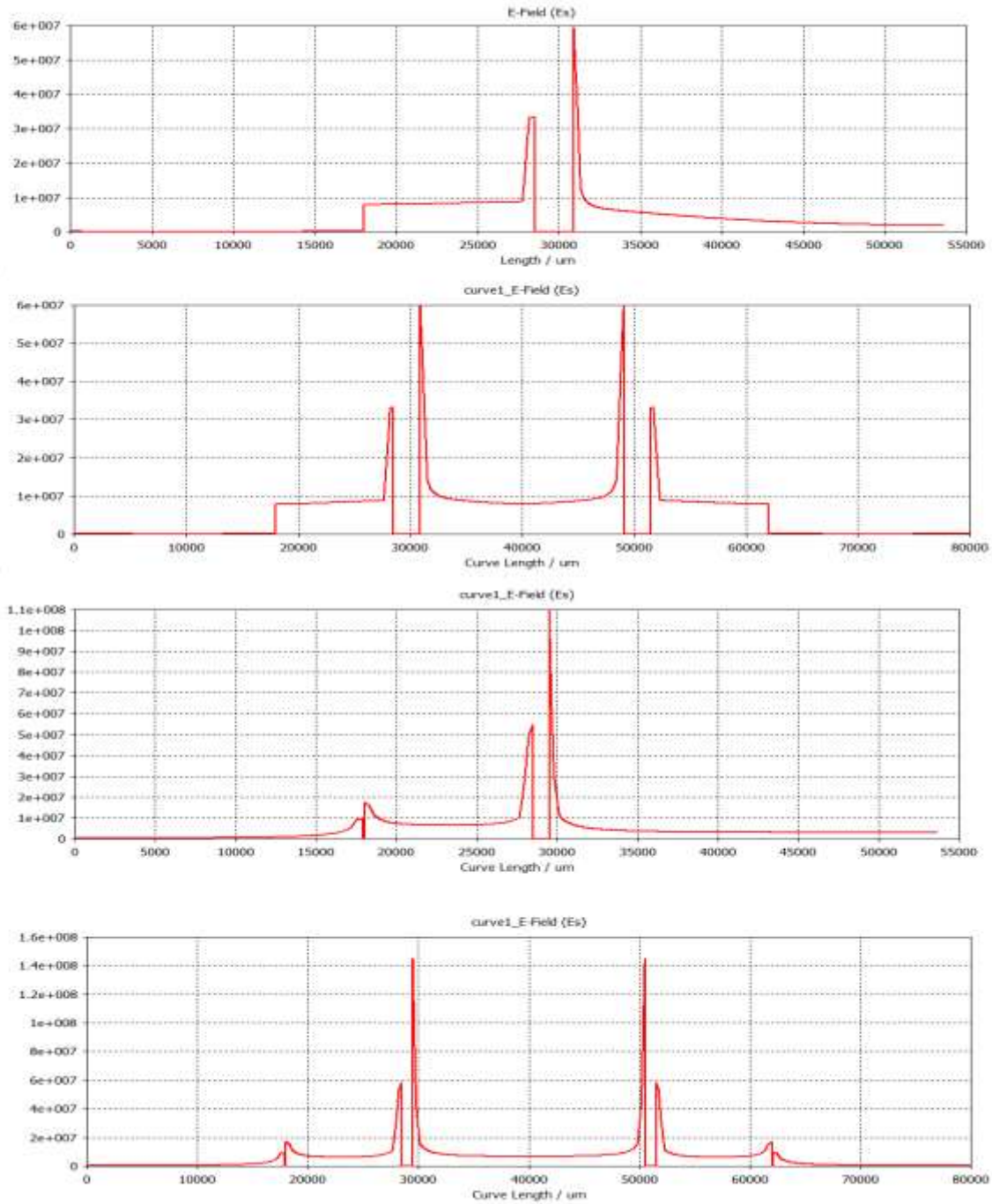
استفاده شده است که در معادله (۵) ضرب می شود. ضریب تصحیح خود از تقسیم سطح اولیه بر سطح ثانویه بدست می آید.

مدل ۱، همان مولد نوترون پایروالکترونیک با استفاده از دو بلور و دو سوزن روی سطوح بلور می باشد. با استفاده از سوزن دوم، در سیکل سرمایه‌گذاری می توان به بهره نوترونی دو برابر رسید. در این مدل که در شکل (۲) (بالا-چپ) نشان داده شده است، یک صفحه مولیدمی به سطح بیرونی بلور چسبانده شده است که سوراخی برابر با قطر بلور در داخل خود دارد. نتایج در جدول (۱) آورده شده است.

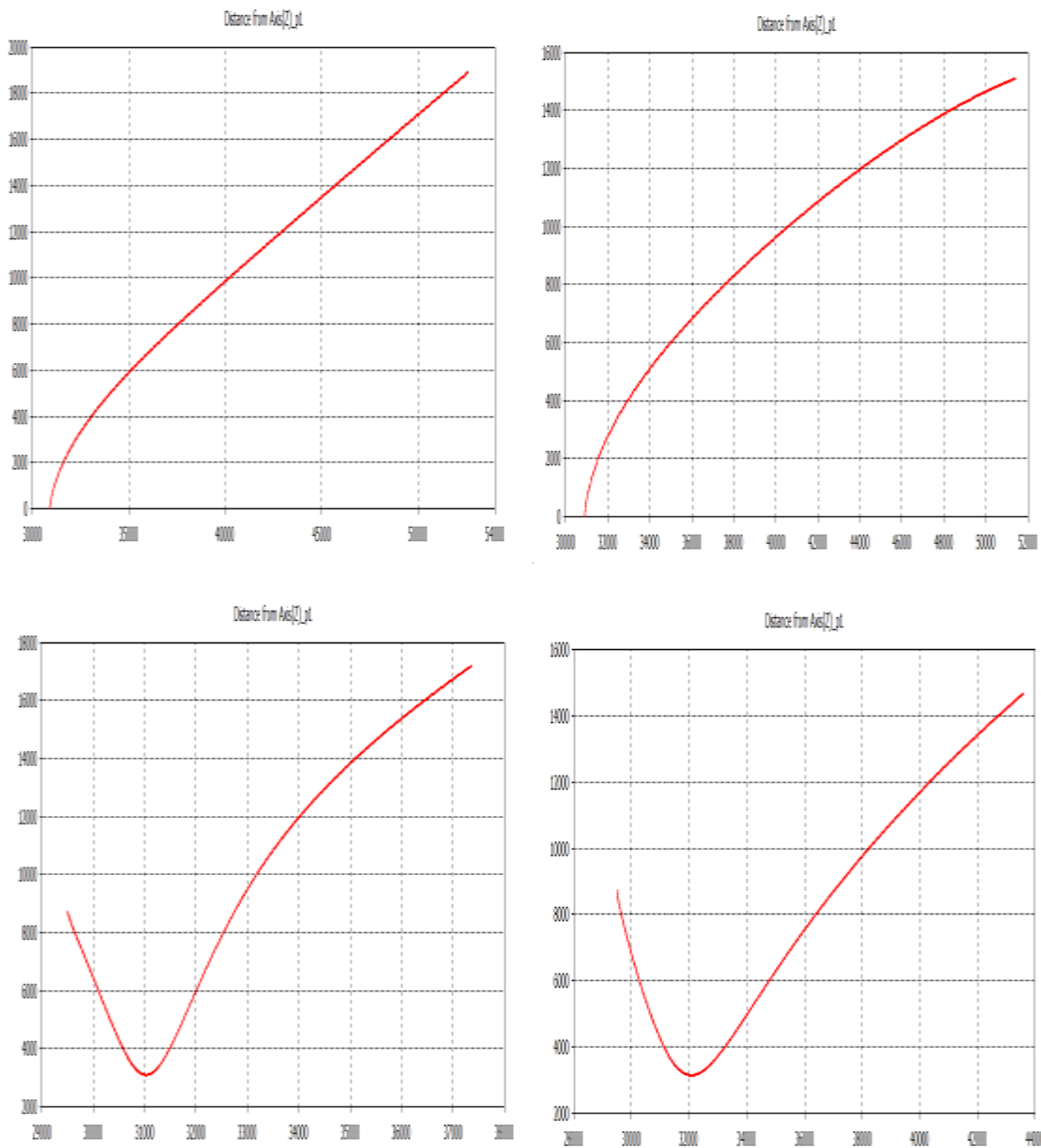
در مدل ۲، که چیدمان آن را می توان در شکل (۲) (بالا-راست) مشاهده کرد؛ از چهار بلور استفاده شده است. بخش مهم و متفاوت این مدل، قرار دادن سوزن در لبه بلورها می باشد. به دلیل اینکه میدان الکتریکی در لبه بلور بالاتر از وسط بلور می باشد این تصمیم گرفته شده است. با این روش می توان از سوزنی با طول کمتر ولی با همان میدان الکتریکی قبلی استفاده کرد که در نتیجه، طول کمتر سوزن همگرایی بالاتری را حاصل می کند. دلیل استفاده از چهار بلور جلوگیری از پراکندگی یون های دوتریوم می باشد. مدل شماره ۳ در واقع ترکیب مدل های شماره ۱ و ۲ می باشد. در ادامه سه چیدمان دیگر آورده شده است که شکل های مربوطه در شکل شماره (۵) قابل مشاهده است. نتایج حاصل شده از این مدل ها در جدول شماره (۱) آورده شده است. نکته بسیار حائز اهمیت این است که میدان الکتریکی در نوک سوزن افت نداشته باشد تا توان یونیزاسیون کاهش نیابد. به دلیل اهمیت این موضوع، در شکل ۳ نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی در راستای طولی دستگاه رسم شده است که بیشینه، میدان الکتریکی در نوک سوزن را نشان می دهد؛ در این اشکال می توان مشاهده کرد که میدان در نوک سوزن افت نمی کند.



شکل (۲): چیدمان مدل های ۱ (بالا- چپ)، ۲ (بالا - راست) و ۳ (پایین - چپ)

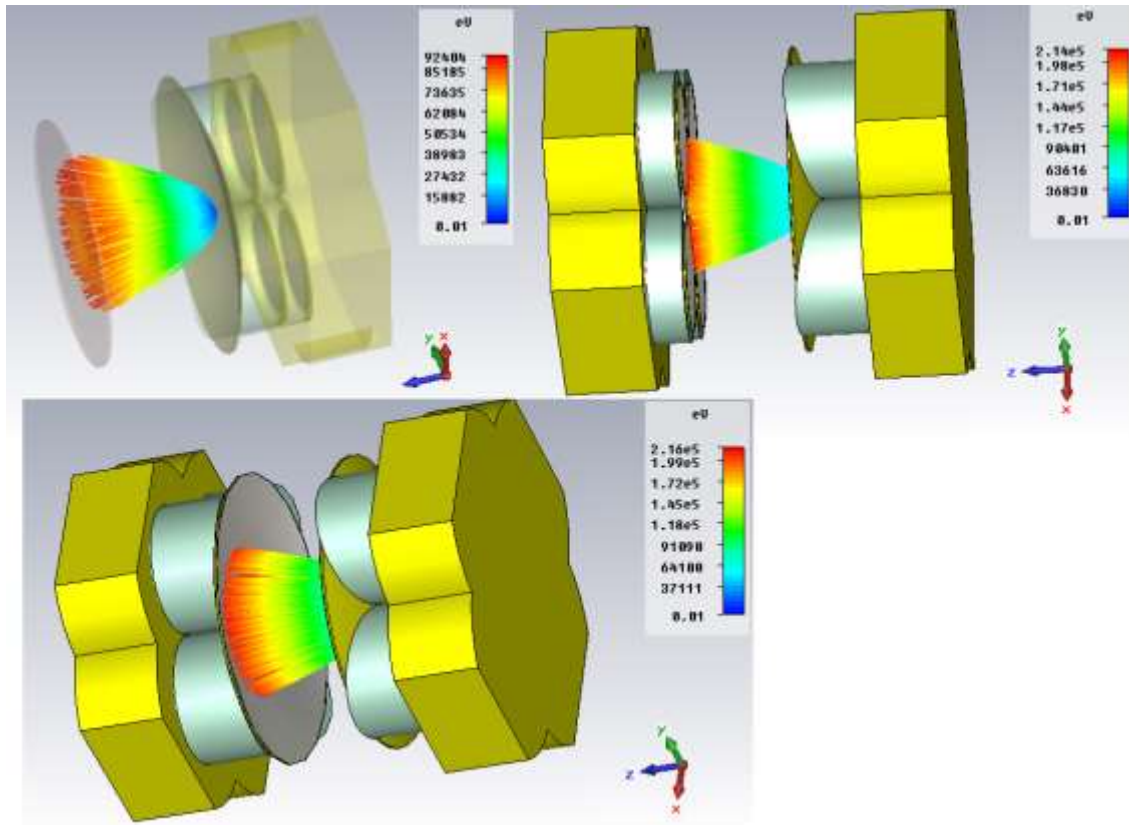


شکل (۳): میدان الکتریکی از بالا به پایین برای مدل تجربی، مدل ۱، ۲ و ۳



شکل (۴): دورترین نقاط مربوط به مسیر حرکت یون های دوتریوم. (بالا - چپ) مدل تجربی، (بالا - راست) مدل

۱، (پایین - چپ) مدل ۲ و (پایین - راست) مدل ۳



شکل (۵): چیدمان مدل های ۶ (بالا - چپ)، ۷ (بالا - راست) و ۸ (پایین)



جدول شماره (۱): نتایج مربوط به مدل های ارائه شده. L فاصله دورترین یون برخوردی به هدف، A سطح برخورد، E انرژی یون برخوردی، σ سطح مقطع واکنش گداخت در انرژی مربوطه و R بهره نوترون می باشد. * این سطح ها، مربوط به سطح کل تقسیم بر ۴ می باشد.

	L (mm)	A (mm^2)	E (keV)	(barn angstrom) σ	R (Number/Sec)
مدل تجربی	۱۸٫۹	1121	113	۶۳٫۸۵	904
۱	۱۷٫۲	929 (232)	126	۷۴٫۹۲	5125
۲	۱۴٫۷	678 (170)	238	۸۵٫۲۷	7960
۳	۱۴٫۱۶	629 (157)	۹۲٫۴	۶۱٫۰۹	6175
۴	۱۳٫۵	572 (143)	214	۷۴٫۱۹	8234
۵	۱۶٫۷	875 (219)	216	۷۷٫۰۴	5583

بحث و نتیجه گیری :

روش ما در این مقاله برای افزایش بهره نوترون مولد پیروالکتریک، ارائه مدل های جدیدی است که می تواند باریکه یون دوتریم برخوردی به هدف دوتریم دار را همگرا کند. لازمه این همگرایی این است که باید در حال بهینه باشد و انرژی یون های باریکه یون های برخوردی را کاهش ندهد زیرا در این صورت به دلیل کاهش سطح مقطع گداخت با کاهش بهره مواجه می شویم. برای رسیدن به این هدف، ۶ مدل معرفی گردید که نتایج مربوطه در جدول شماره ۱ قابل مشاهده و مقایسه می باشد. نتایج بدست آمده از این مدل ها همگرایی باریکه یون های دوتریم را نشان می دهد به گونه ای که اثر آن که تحت عنوان ضریب تصحیح معرفی گردید باید از اثر کاهش انرژی یون های دوتریم و سطح مقطع بیشتر باشد. حد همگرایی باریکه یون، یعنی حدی که در آن همگرایی بیشتر نمیتواند باعث افزایش بهره نوترون شود، می تواند موضوع مناسبی برای کار های آینده باشد.

مراجع :

- [1] B. Naranjo, J. Gimzewski, S. Putterman, Nature 434 (2005) 1115.
- [2] Don Gillich, Yaron Danon, Jeffrey A. Geuther, Becky Marus, Brain McDemott, " Deuterium Ionization For Pyroelectric Crystal Accelerators ", Detection Technology For Homeland Security Applications. (January 2007) 927.
- [3] Donald J. Gillich, Ranganath Teki, Travis Z. Fullem, Andrew Kovanen, Ezekiel Blain, Douglas B. Chrisey, Toh -Ming Lu, Yaron Danon. Nano Today (2009) 4,227- 234.
- [4] A. M. Kovaneh, D. J. Gillich, T. Z. Fullem, and Y. Danon. 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Record. N30-1.



- [5] Hiroyuki Honda, Shinji Fukao, Yang Guan, Yoshikazu Nakanishi, Yuukiato, Yoshia Ito and Shinzo Yoshkado. 2011 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 18 092034.
- [6] W. Tornow, S. M. Shafroth, and J. D. Brownridge. Journal of Applied Physics 104, 034905(2008).
- [7] G. Rosenman, D. Shur, Y. E. Krasik, and A. Dunaevsky, J. Appl. Phys. 88, 11 (2000).
- [8] Jeffrey A. Geuther, and Y. Danon, Journal of Applied Physics 97, 104916 (2005).
- [9] Sidney B. Lang, Sourcebook of Pyroelectric (Gordon and Breach, New York, 1974).
- [10] G. Rosenman, D. Shur, Ya. E. Krasik, and A. Dunaevsky, J. Appl. Phys. 88, 6109 (2000).
- [11] Jeffrey Geuther, Yaron Danon, Frank Saglime, and Bryndol Sones, in Abstracts from the Sixth International Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology, San Diego, CA (American Nuclear Society LaGrange, IL, 2003), p. 124.
- [12] Interpreted ENDF file, <http://t2.lanl.gov/cgi-bin/endf?3,50,inet/WWW/data/data/ENDF-deuteron/H/dd>.
- [13] J. P. Singh, T. Karabacak, T. -M. Lu, G. -C. Wang, N. Koratkar, Appl. Phys. Lett, 85 (2004) 3226.
- [14] J. D. Brownridge, Nature (London) 358, 287 (1992).
- [15] <http://www.amptek.com>.
- [16] J. D. Brownridge and S. M. Shafroth, Appl. Phys. Lett. 79, 3364 (2001).
- [17] J. A. Geuther and Y. Danon, J. Appl. Phys. 97, 074109 (2005).
- [18] Jeffrey Geuther and Yaron Danon, Transactions of the ANS Winter Meeting, Washington, DC (American Nuclear Society, LaGrange, IL, 2004) , P.885.
- [19] Jeffrey Geuther, Yaron Danon, and Frank Saglime. PRL 96, 054803 (2006).
- [20] J. L. Ellsworth, V. Tang, S. Falabella, B. Naranjo, S. Putterman. LLNL-PROC-569044 (2012).
- [21] V. Tang, J. Morse, G. Meyer, S. Falabella, G. Guethlein, P. Kerr, H. G. Park, B. Rusnak, S. Sempayan, G. Schmid, C. Spadaccini, L. Wang. LLNL-PROC-406224 (2008).
- [22] B. Naranjo, J. K. Gimzewski "Observation of nuclear fusion driven by a pyroelectric crystal". Nature, April 28, 2007.
- [23] Atomic Number Density, EEE 460-Handout, K. E. Holbert, Dec.2014.