



کتابچه مقالات

۳۱ امین کنفرانس هسته ای ایران

در این کتابچه، مقالات منتخب ارائه شده در ۳۱ امین کنفرانس ملی هسته ای ایران که از ۲۳ تا ۲۵ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ در مشهد برگزار شد، خواهید یافت.

امیدواریم آن را مفید و لذت بخش بیابید!

مقالات حوزه:

دستگاه‌های مولد پرتو و شتاب دهنده های ذرات



پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ایران



سازمان انرژی اتمی ایران



انجمن هسته ای ایران

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

پژوهشگران گرامی، اساتید ارجمند و همکاران محترم،

مایه افتخار و مسرت بنده است که به عنوان رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران، خیرمقدم گرم و صمیمانه خود را تقدیم شما عزیزان می‌نمایم. در ادامه موفقیت چشمگیر دوره‌های پیشین این کنفرانس، امسال نیز شاهد گردهمایی استثنایی و پربار دانشجویان، پژوهشگران و اندیشمندان برجسته از دانشگاه‌های کشور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران و کارشناسان صنعت هستیم. کنفرانس امسال، با توجه به بازخوردهای ارزشمند دوره‌های قبل و نیازهای روز جامعه علمی و صنعتی، با رویکردی جامع‌تر و کاربردی‌تر برگزار می‌شود. محورهای متنوع کنفرانس شامل تکنولوژی و ایمنی راکتورهای هسته‌ای، چرخه سوخت، مواد و پسماند هسته‌ای، غنی سازی و تولید ایزوتوپ پایدار، پرتوپزشکی و پزشکی هسته‌ای، کاربرد پرتوها در صنعت، کاربرد پرتوها در غذا، دامپروری و کشاورزی، شتابدهنده و دستگاه‌های مولد پرتو، آشکارسازی و دزیمتری، فیزیک و فناوری پلاسما و گداخت هسته‌ای، فیزیک هسته‌ای، فناوری کوانتومی، مطالعات راهبردی و نرم می‌باشد. با افتخار اعلام می‌کنم که امسال بیش از ۳۷۰ مقاله کامل پذیرفته شده برای ارائه در این کنفرانس خواهیم داشت که از میان ۷۳ ارائه به صورت شفاهی و ۳۰۱ ارائه به صورت پوستر خواهند بود. همچنین با توجه به استقبال گسترده سال‌های گذشته، حدود ۳۰ نشست تخصصی و نیز نمایشگاه جانبی با رویکردی کاربردی‌تر و متنوع‌تر برگزار خواهند شد. پیش‌بینی می‌شود با احتساب فعالیت‌های جانبی، در حدود ۱۰۰۰ پژوهشگر در این رویداد علمی-فرهنگی در شهر مقدس مشهد حضور یابند. یکی از اهداف اصلی کنفرانس امسال، ایجاد پل ارتباطی مؤثرتر میان دانشگاه و صنعت است. ما معتقدیم دستاوردهای علمی زمانی ارزشمندتر خواهند بود که در مسیر حل مسائل واقعی جامعه و صنعت به کار گرفته شوند. از این رو، بخش ویژه‌ای به ارائه فرصت‌های همکاری میان پژوهشگران و صنایع اختصاص یافته است. در پایان، برای تمامی شرکت‌کنندگان، تجربه‌ای سرشار از دستاوردهای علمی، آموزنده و تحول‌آفرین را آرزومندم و امیدوارم این کنفرانس بتواند در ایجاد مسیری هموارتر برای گسترش کاربردهای یافته‌های علمی در صنعت و زندگی روزمره فراهم سازد.

با احترام،

دکتر جواد کریمی ثابت

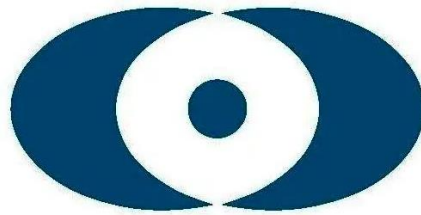
رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران



برگزار کنندگان:



انجمن هسته‌ای ایران



سازمان انرژی اتمی ایران



پرو، دانشگاه علوم و فنون هسته‌ای



حمایت کنندگان:



Sharif University
of Technology

دانشگاه صنعتی شریف



Amirkabir University
of Technology

دانشگاه صنعتی امیرکبیر



Shahid Beheshti
University

دانشگاه شهید بهشتی



FERDOWSI UNIVERSITY
OF MASHHAD

دانشگاه فردوسی مشهد



K. N. Toosi University
of Technology

دانشگاه خواجه نصیر

الدین طوسی



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

دانشگاه تحصیلات تکمیلی

کرمان



Isfahan University

دانشگاه اصفهان



Shiraz University

دانشگاه شیراز

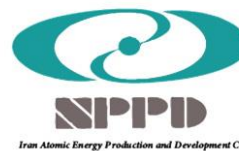


شرکت مصباح انرژی
(سهامی خاص)

شرکت مصباح انرژی



تولید مواد اولیه و سوخت
هسته‌ای ایران



Energy Industry
Development Engineering Co.

شرکت مهندسی و توسعه

صنایع انرژی نوین



شرکت فناوری‌های
پیشرفته ایران



مرکز ملی نظام کیفیت و استاندارد اتمی ایران

مرکز ملی نظام کیفیت و
استانداردسازی اتمی ایران



مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای
کشور



Radiation Application
Development Co.

شرکت توسعه کاربرد پرتوها



فهرست مقالات

- ۷..... مطالعه عددی تاثیر هندسه هدف در کیفیت باریکه پروتونی شتاب دهی شده لیزری (کد مقاله : ۱۰۸۱).....
- ۱۵..... مشخصه یابی باریکه های الکترونی با استفاده از اسکن کننده نوری (کد مقاله : ۱۰۹۶).....
- ۲۵..... مطالعه اثر دمای زیرلایه بر ساختار لایه تیتانیوم مورد استفاده در هدف دوتریومی و بهره نوترونی آن (کد مقاله : ۱۱۵۳) ..
- ۲۴۵..... طراحی و شبیه سازی پنجره رادیوفرکانسی باند S در سیستم رادیوفرکانسی شتابدهنده خطی با استفاده از مگنترون
- ۳۲..... گیگاهرتز (کد مقاله : ۱۲۸۵).....
- ۳۹..... طراحی موازی کننده نوترون برای شتابدهنده ES200 با استفاده از ابزار مونت کارلو Geant4 (کد مقاله : ۱۲۹۵)
- طراحی و شبیه سازی یک فیلتر دیجیتال سامانه فیدبک خوشه به خوشه طولی حلقه انبارش چشمه نور ایران و بررسی تاثیر آن بر پایداری باریکه ذرات (کد مقاله : ۱۳۱۱).....
- ۴۶.....
- ۵۳..... طراحی و شبیه سازی کاواک شتابدهی شتابدهنده موج ایستا باند ایکس (کد مقاله : ۱۳۴۶).....
- ۶۰..... طراحی و ساخت موجبر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه با هدف بکارگیری در چشمه یونی میکروموج (کد مقاله : ۱۳۶۴)
- ۶۷... مدل سازی دینامیک ذرات و انتقال انرژی در شتابدهنده های لیزر دی الکتریک با تغییر شکل پالس (کد مقاله : ۱۳۸۹)
- اعتبارسنجی نرم افزار GENESIS1.3 برای شبیه سازی ناحیه برهمکنش لیزر الکترون آزاد در ناحیه تراهرتز (کد مقاله : ۱۳۹۱)
- ۷۳.....
- ۸۰..... اندازه گیری ابعاد باریکه یونی آرگون چشمه یونی کافمن مولتی کاسپ با استفاده از آثار حرارتی آن (کد مقاله : ۱۴۵۰)
- بررسی تاثیر جنس فنجان فارادی بر آهنگ تولید فوتون های ثانویه تولید شده در یک شتابگر الکترواستاتیک
- ۲۰۰..... کیلو الکترون ولت (کد مقاله : ۱۴۵۵).....
- ۹۰.....
- ۹۰..... آستانه ضخامت هدف در شتابدهی با روش TNSA و با پیش پالس پیکوثانیه (کد مقاله : ۱۴۶۵).....
- ۱۰۲..... اندازه گیری ابعاد باریکه یونی آرگون چشمه یونی کافمن مولتی کاسپ با استفاده از سیم متحرک (کد مقاله : ۱۴۹۵)
- طراحی، انتخاب جنس و هندسه ی پنجره ی خروجی در شتابدهنده خطی پزشکی امید در حالت الکترونی (کد مقاله : ۱۵۰۷)
- ۱۰۹.....
- بررسی روش جوش نفوذی و تاثیر پارامترهای آن در اتصال دهی فلزات غیر هم جنس و هم جنس به کار رفته در ساخت کاواک
- ۱۱۶..... مسی RF شتابدهنده سینکروترون الکترون (کد مقاله : ۱۵۴۱).....
- تحلیل انتقال حرارت در فرآیند تولید رادیو ایزوتوپ Pd103 با شتابدهنده پروتون به روش شبیه سازی عددی (کد مقاله : ۱۵۴۵).....
- ۱۲۵.....



مطالعه عددی تأثیر هندسه هدف در کیفیت باریکه پروتونی شتاب دهی شده لیزری (کد مقاله :

(۱۰۸۱)

سیده مریم شاهری لنگرودی، سهیل خوشبین فر^۱
دانشگاه گیلان؛ دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

در این پژوهش به کمک روش شبیه سازی ذره در سلول (PIC) ۲- بعدی، کیفیت باریکه ذرات شتاب دهی شده در چارچوب سازوکار شتاب دهی TNSA به کمک هدف هیدروژنی یونیزه بررسی شده است. لیزری گاوسی با قطبش خطی، طول موج ۸۰۰ nm و بیشینه شدت 10^{20} W/cm^2 ، به صورت عمودی بر سطح هدف تابیده می شود. هدف هیدروژنی در چهار حالت شامل هدف تخت و سه هدف خمیده با شعاع انحنای ۴، ۷ و ۱۰ انتخاب شده اند. نشان داده می شود که بیشینه انرژی پروتون های شتاب دهی شده مربوط به هدف خمیده با شعاع انحنای ۴ به مقدار ۴۹ MeV است. همچنین، کمترین پراکندگی در توزیع زاویه ای نیز متعلق به همین هدف با مقدار $\text{FWHM} = 14^\circ$ می باشد.

کلمات کلیدی: شبیه سازی PIC، هدف تخت و خمیده، هدف هیدروژنی، طیف انرژی، توزیع زاویه ای

Numerical study of the effect of target geometry on the quality of laser-accelerated proton beam

Maryam Shaheri Langarudi; Soheil Khoshbinfar*

University of Guilan, Faculty of Science, Physics Department, Rasht, Iran

Abstract:

In this study, using the 2D particle-in-cell (PIC) simulation method, the quality of the accelerated particle beam in the TNSA acceleration mechanism using an ionized hydrogen target has been investigated. A linearly polarized Gaussian laser with a wavelength of 800 nm and a maximum intensity of 10^{20} W/cm^2 is irradiated normally onto the target surface. The hydrogen target has been selected in four cases, including a flat target and three curved targets with a curvature radius of 4, 7, and 10, respectively. It is shown that the maximum energy of the accelerated protons is 49 MeV for the curved target with a curvature radius of 4. Moreover, the lowest divergence also belongs to this target, equal to $\text{FWHM} = 14^\circ$.

Key words: PIC simulation, flat and curved target, hydrogen target, energy spectrum, angular distribution



۱- مقدمه:

پیشنهاد طرح اولیه افروزش سریع به وسیله تَبک و همکارانش در سال ۱۹۹۴ ارائه شد و در آن برای فشرده‌سازی و افروزش سوخت، دو مرحله جداگانه در نظر گرفته شد که برای مرحله افروزش سوخت از پیش فشرده از راه‌اندازی دیگر استفاده می‌شود [۱]. در روش افروزش سریع، ابتدا انفجار درونی سوخت همراه با افزایش چگالی آن با استفاده از لیزری متعارف و سپس تَرابرد خیلی سریع انرژی افروزش به سمت ناحیه مرکزی هدف انجام می‌گیرد به نحوی که حالت تعادل فشاری سیستم از بین می‌رود [۲]. افروزش سریع، غالباً به عنوان روشی برای افزایش بهره انرژی، کاهش انرژی راه‌انداز و کاهش الزامات فشرده‌سازی متقارن در همجوشی محصورسازی لختی پیشنهاد می‌شود. از مهمترین چالش‌های این رویکرد جدید، می‌توان از مواردی چون تولید باریکه ذرات تک انرژی، تَرابرد انرژی به نواحی پُرچگال پلاسما، پیش گرمایش نامناسب توسط الکترون‌ها داغ و تابش‌دهی نامتقارن تپ افروزنده نام برد [۳]. مسیری جایگزین برای افروزش سریع اولیه‌ی لیزری، تولید باریکه‌های پرشدت، کوتاه، پراثری و هدایت شده‌ی پروتون‌ها از سطح پشتی اهداف جامد (با ضخامت μm) به کمک لیزرهای پرشدت (10^{18} W/cm^2) و فراتر از آن پیشنهاد شده است. این روش،

”شتاب‌دهی پوشگر عمود بر هدف“ (TNSA) نام دارد و به نظر می‌رسد که پتانسیل دستیابی به الزامات افروزش سریع پروتونی را داشته باشند. پروتون‌ها در مقایسه با سایر گونه‌های یونی و الکترون دارای مزایای متعددی هستند. آنها، اولاً به دلیل بالاتر بودن نسبت بار به جرم، تا رسیدن به بیشینه انرژی، شتاب بیشتری دریافت می‌کنند؛ ثانیاً به دلیل وابستگی درجه دوم توان ایستاندگی به حالت بار (Z)، قادر هستند برای رسیدن به نواحی چگال، تا عمق بیشتری در هدف نفوذ کنند. افروزش سریع پروتونی (PFI)، نخستین بار توسط روث و همکاران در سال ۲۰۰۰ پیشنهاد شد که رویکرد جایگزینی برای افروزش سریع لیزری است و در آن، روش تولید و کنترل موثر، تَرابرد باریکه افروزنده و همچنین بازده بالای نهشت انرژی باریکه در سوخت را ارائه می‌دهد. [۴]

در این پژوهش به بررسی عددی تاثیر هندسه هدف بر شتاب‌دهی باریکه پروتونی می‌پردازیم. به همین منظور، از کد شبیه سازی ذره در سلول (PIC) از نسخه ۲-بعدی به نام EPOCH استفاده شده است. تلاش می‌شود تا به تحلیل پارامترهای مختلف هندسی و نحوه تأثیر آن‌ها بر روی توزیع فضایی باریکه شتاب‌دهی و طیف انرژی پرداخته شود. بر این اساس، در ادامه و در بخش ۲، معرفی اجمالی از روش شبیه سازی ذره در سلول و سپس جزئیات پیکربندی تپ لیزری و هدف هیدروژنی ارائه می‌شود. در بخش پایانی ۳، نتایج شبیه سازی و تحلیل آنها شامل میدان الکتریکی طولی و عرضی، چگالی پروتون و خصوصیات طیفی ارائه خواهد شد.

۲- روش کار:

۲-۱- پیکربندی هدف-باریکه در شبیه سازی ذره در سلول (PIC)

روش ذره در سلول (PIC)، به تکنیکی اشاره دارد که برای حل مرتبه معینی از معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌شود. در این روش، ذرات منفرد (با عناصر سیال) در چارچوب لاگرانژی در فضای فاز پیوسته ردیابی می‌شوند، در حالی که، ممان‌های توزیع چگالی و جریان به طور همزمان بر روی نقاط شبکه اوپلری محاسبه می‌شوند. نیروی لورنتس به عنوان هل دهنده ذره با معادله حرکت به دست می‌آید و معادلات ماکسول که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را تعیین می‌کنند، برای به دست آوردن (میدان) محاسبه می‌شوند.

در این پژوهش، برای شتاب‌دهی باریکه پروتونی به کمک کد EPOCH-2D[5]، از پارامترهای لیزر و مشخصات هدف‌های تخت و خمیده به شرح زیر استفاده شده است. لیزری با طول موج 800 nm در جهت $+X$ (به صورت عمودی) با قطبش



خطی (p) از مرز پنجره شبیه‌سازی $20 \times 20 \mu\text{m}$ وارد می‌شود. لیزر دارای مشخصات فضایی گاوسی با اندازه لکه ای با μm $\text{FWHM} = 30 \text{ fs}$ است. شدت بیشینه $I_{\text{max}} = 10^{20} \text{ W.cm}^{-2}$ و تابعیت زمانی سینوس مربعی با مدت دوام پالس $\text{FWHM} = 30 \text{ fs}$ است. برای این شدت لیزر، پتانسیل برداری بهنجار $a_0 = 6$ در حالت نسبیته است. لیزر به صورت عمودی به هدف هیدروژنی یونیزه با چگالی $n_{\text{crit}} = 5$ برخورد می‌کند. ضخامت هدف $1 \mu\text{m}$ و لبه آن در موقعیت مکانی $x = 10 \mu\text{m}$ است. این پارامترها اجازه می‌دهند تا هدف در رژیم سازوکار TNSA بررسی شود. همچنین، از اثرات برخوردی میان ذرات چشم پوشی شده است. شبکه به سلول های 15 nm با 100 درشت ذره در هر سلول، در هر گونه تقسیم می‌شود. ذرات در دمای اولیه 10 keV مقدار دهی می‌شوند. مطابق شکل (۱)، از دو پیکربندی هدف تخت و خمیده با شعاع های انحنای $4 \mu\text{m}$ و $10 \mu\text{m}$ استفاده می‌شود. در هدف خمیده، پالس لیزر با زوایای مختلف بر سطح تابیده می‌شود که

این امر بر جذب تابشی تاثیر مثبتی دارد که تایید آن در ادامه نتایج شبیه سازی مشاهده می‌گردد. پارامترهای لیزری برای هر دو هدف، در کل شبیه سازی یکسان باقی می‌مانند.

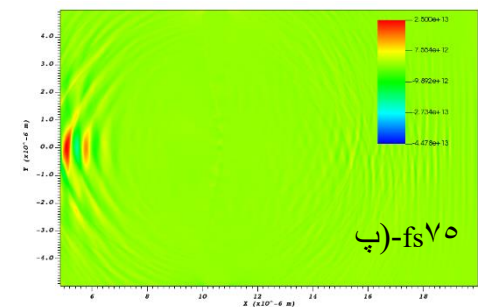
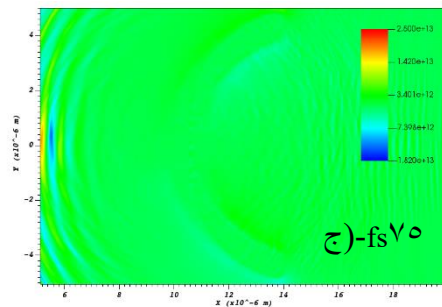
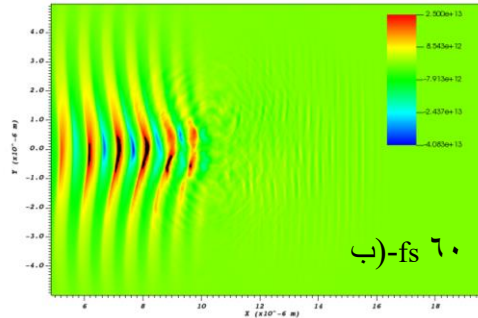
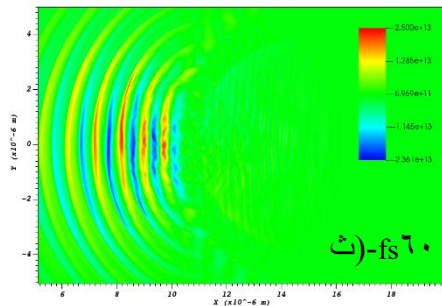
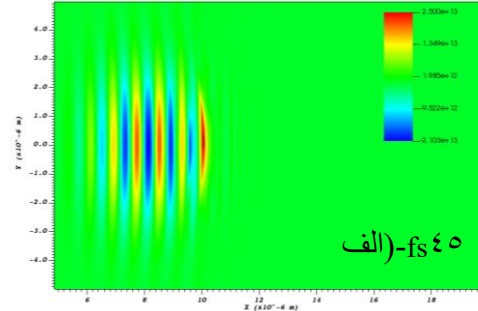
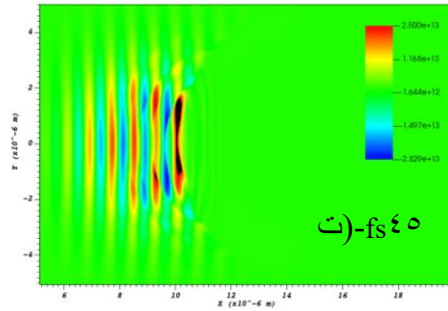


شکل (۲): (الف) هدف تخت (ب) خمیده محدب.

۳- بحث و نتیجه گیری:

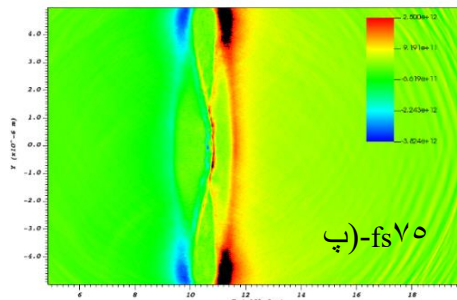
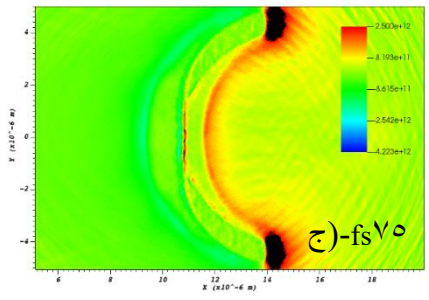
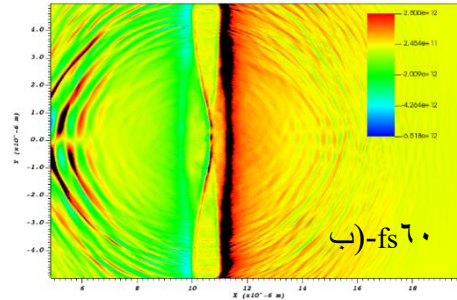
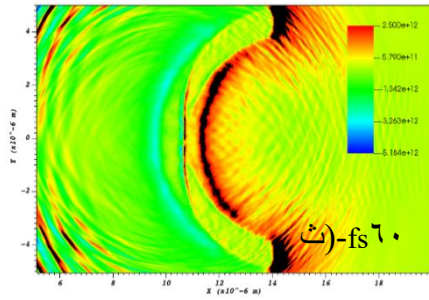
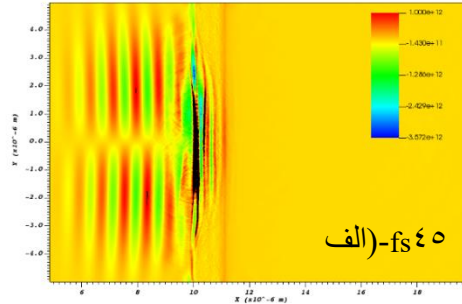
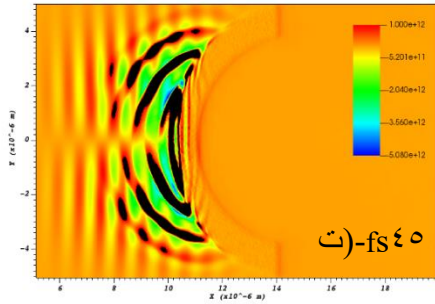
۳-۱ میدان الکتریکی طولی و عرضی

پالس لیزر پس از حدود 40 fs به هدف از مرز سمت چپ پنجره شبیه سازی می‌رسد. مرز هدف در موقعیت مکانی $10 \mu\text{m}$ قرار دارد. شدت مؤلفه های طولی E_x و عرضی E_y میدان الکتریکی لیزری از مرتبه بزرگی 10 TV/m است. در شکل (۲)، مؤلفه عرضی میدان الکتریکی لیزری، E_y ، پس از خاموشی تپ لیزری، در بازه های زمانی 15 fs از لحظه 45 fs تا 75 fs ، به ترتیب برای دو هدف تخت و خمیده رسم شده است. در این بازه زمانی، به دنبال خاموشی تپ لیزر، شدت میدان الکترومغناطیسی لیزر، به تدریج روندی کاهشی دارد. سپس، در زمان های بعدی، میدان های الکتریکی و مغناطیسی القا شده لیزر در هدف، تحول زمانی شتاب دهی ذرات را مدیریت می‌کند. در همه نمودار ها بیشینه بزرگی میدان الکتریکی مقدار 25 TV/m ثابت شده است. نواحی سیاه رنگ در این تصاویر، نشان دهنده مقادیر میدان الکتریکی بزرگتر از این بیشینه تنظیم شده می‌باشد. با مقایسه تصاویر ۲-الف و ۲-ب متوجه می‌شویم شدت برهمکنش تپ لیزری با بخش خمیده هدف قدرتمند تر است. نشان داده می‌شود که در برهمکنش لیزر-فویل با قطبش خطی، در صورت تابش تپ لیزری مایل، درصد جذب نور لیزر افزایش می‌یابد. در هدف خمیده به دلیل تغییر زوایای برهمکنشی میان لیزر و نقاط مختلف سطح هدف، چنین شرایطی به صورت خودکار فراهم می‌گردد. بر این اساس، مطابق شکل ۲-ب درصد بازتاب نور لیزر هدف تخت در زمان های مشابه نسبت به هدف خمیده بیشتر می‌شود.



شکل (۲): مؤلفه عرضی میدان الکتریکی لیزری E_y (V/m)، در هدف تخت در لحظات الف) ۴۵ fs، ب) ۶۰ fs و پ) ۷۵ fs پس از تابش پالس؛ مؤلفه عرضی میدان الکتریکی لیزری E_y (V/m)، در هدف خمیده در لحظات ت) ۴۵ fs، ث) ۶۰ fs و ج) ۷۵ fs پس از تابش پالس؛

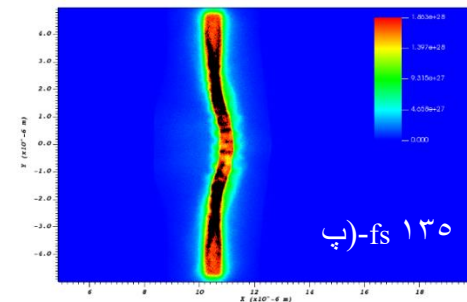
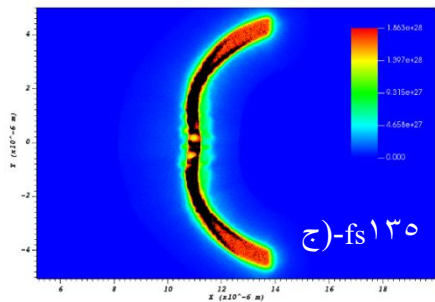
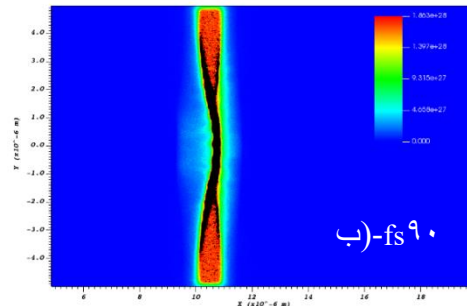
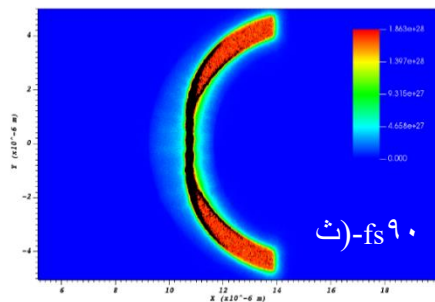
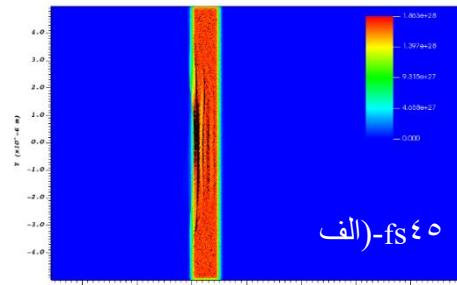
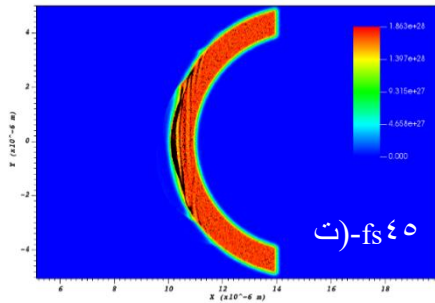
در شکل (۳)، مؤلفه طولی میدان الکتریکی، E_x ، لیزری در بازه های زمانی ۱۵ fs تا ۴۵ fs تا ۷۵ fs، پس از خاموشی تپ لیزر، برای دو هدف تخت و خمیده نمایش داده شده است. در همه نمودار ها بیشینه بزرگی میدان الکتریکی مقدار TV/m ثابت شده است. نواحی سیاه رنگ در این تصاویر، نشان دهنده مقادیر میدان الکتریکی بزرگتر از این بیشینه تنظیم شده می باشد. مشاهده می شود که در لحظه ۴۵ fs نزدیکی سطح جلویی هدف خمیده، بزرگی گستره میدان الکتریکی طولی به لحاظ اندازه و وسعت، بیشتر از حالت هم‌تای هدف تخت می‌باشد. الگوی کلی میدان الکتریکی در قسمت پشت هدف خمیده، شعاعی است که این موضوع به کانونی شدن باریکه پروتونی شتاب دهی شده کمک بیشتری خواهد کرد. اگرچه، الگوی سازوکار اولیه شتاب دهی پروتونی TNSA می‌باشد، اما به وضوح در شکل ۳-پ و اندکی تاخیر در شکل ۳-ج، حفره کنی لیزر و ورود به فاز شتاب دهی در سازوکار RPA با ظهور میدان الکتریکی ثانویه پیش رونده درون هدف دنبال می‌شود [۶].



شکل (۳): مؤلفه طولی میدان الکتریکی لیزری $(V/m) \cdot E_x$ در هدف تخت در لحظات الف) ۴۵ fs، ب) ۷۵ fs و پ) ۹۰ fs پس از تابش پالس؛ مؤلفه طولی میدان الکتریکی لیزری $(V/m) \cdot E_x$ در هدف خمیده در لحظات ت) ۴۵ fs، ث) ۷۵ fs و ج) ۹۰ fs پس از تابش پالس؛

۲-۳ چگالی عددی هدف

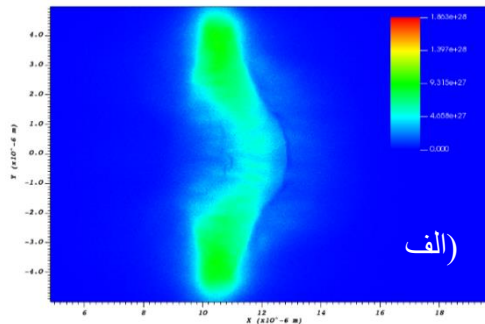
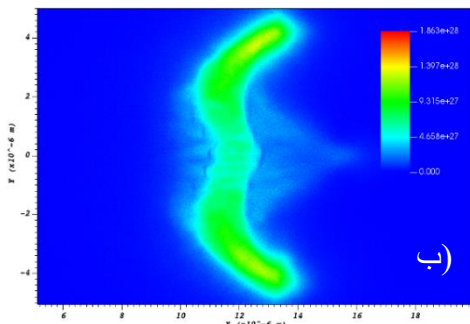
در شکل (۴)، چگالی عددی هدف هیدروژنی (m^{-3}) ، در لحظات ۴۵ fs، ۷۵ fs و ۹۰ fs پس از تابش پالس لیزری، برای دو هدف تخت و خمیده نمایش داده شده است. در همه نمودارها بیشینه بزرگی چگالی، برابر مقدار اولیه $10^{28} \times 86 m^{-3}$ ثابت شده است. نواحی سیاه رنگ در این تصاویر، نشان دهنده مقادیر میدان الکتریکی بزرگتر از این بیشینه تنظیم شده می باشد. همانگونه که مشاهده می شود، به دلیل انحنای هدف خمیده، حرکت ناحیه برهمکنشی لیزر-فویل نسبت به سمتای هدف تخت یکپارچگی و تاب بیشتری نسبت به شتاب رو به جلو می آورد. همین موضوع، موجب مقاومت بیشتر در مقابل از هم گسیختگی هدف خمیده و جلوگیری از واگرایی ذرات شتاب دار خواهد شد.



شکل (۴): چگالی عددی هدف هیدروژنی (m^{-3})، در هدف تخت در لحظات الف) ۴۵ fs، ب) ۹۰ fs و پ) ۱۳۵ fs پس از تابش پالس؛ چگالی عددی هدف هیدروژنی (m^{-3})، در هدف خمیده در لحظات ت) ۴۵ fs، ث) ۹۰ fs و ج) ۱۳۵ fs پس از تابش پالس؛

البته در زمان‌های فراتر از ۱۵۰ fs هر دو هدف به تدریج در ناحیه برهمکنشی تکه تکه شده و خوشه‌های پروتونی به سمت جلو شتاب می‌گیرند. با این تفاوت که در هدف خمیده حرکت آنها به شکل کانونگی پرتابه‌ای پیش می‌رود. این در حالی است که در هدف تخت به تدریج واگرا می‌شوند. این موضوع را می‌توان به وضوح چگالی هدف هیدروژنی، در پایان زمان شبیه‌سازی، ۳۰۰ fs، در شکل (۵) مشاهده کرد. در همه نمودارها بیشینه بزرگی چگالی، برابر مقدار اولیه $10^{28} \times 10^{-3} m^{-3}$ ثابت شده است. با تداوم زمانی، الگوی کانونی باریکه پروتونی کماکان حفظ شده و به آرامی به سمت راست حرکت می‌کند. با این وجود در مورد

هدف تخت، پروتون‌ها در گستره فضایی بیشتر و به شکل باریکه‌ای پهن به آرامی به سمت راست حرکت می‌کنند.

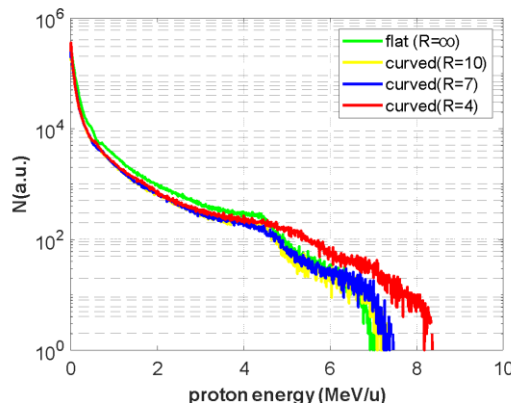
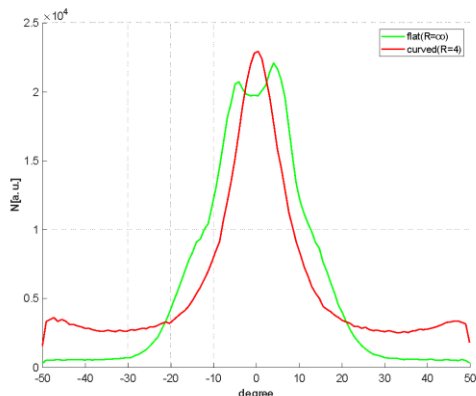


شکل (۵): چگالی عددی هدف هیدروژنی (m^{-3})، در الف) هدف تخت و ب) هدف خمیده در لحظه 300 fs

۳-۳ طیف انرژی و واگرایی فضایی

مطابق منحنی های میدان الکتریکی و چگالی ذرات انتظار می رود که فرایند شتاب دهی باریکه پروتونی در هدف خمیده با کیفیت تر از حالت هم‌تای هدف تخت باشد. برای ارزیابی این موضوع می توان طیف انرژی پروتونی را در این حالت ها با یکدیگر مقایسه کرد. به طور کلی، در سازوکار شتاب دهی TNSA، طیف انرژی پروتون شتاب دار دارای پهن شدگی است و با تداوم زمانی، این حالت به آرامی تشدید می گردد. یکی از شاخصه های کیفیت شتابدهی انرژی قطع باریکه پروتونی است. برای بررسی تاثیر شعاع انحناى هدف بر انرژی قطع، به جز دو هدف اشاره شده از دو هدف خمیده دیگر با شعاع های انحناى $7 \mu\text{m}$ و $10 \mu\text{m}$ نیز استفاده شد. بیشینه انرژی قطع هدف تخت و هدف خمیده با شعاع های انحناى $4 \mu\text{m}$ ، $7 \mu\text{m}$ و $10 \mu\text{m}$ به ترتیب $0.398/7$ ، $0.485/8$ ، $0.538/7$ MeV و $7/4244$ که بزرگترین مقدار مربوط به هدف خمیده با کمترین شعاع انحنا ($R=4 \mu\text{m}$) است. در این حالت، کسر بیشتری از تپ لیزری به صورت مایل با سطح هدف برخورد می کنند. همچنین، مطابق شکل (۶-الف)، طیف انرژی باریکه پروتونی برای هدف تخت و سه هدف خمیده با شعاع های انحناى $4 \mu\text{m}$ ، $7 \mu\text{m}$ و $10 \mu\text{m}$ نمایش داده شده است. مقادیر اعداد انرژی قطع گزارش شده از این منحنی ها نیز مشاهده می شود.

در شکل (۶-ب)، توزیع زاویه ای باریکه پروتونی در لحظه 300 fs برای دو هدف تخت و خمیده ($R=4$) در بازه انرژی فراتر از 0.5 MeV تا بیشینه انرژی پروتون ها نمایش داده شده است. محدوده زاویه ای پروتون ها در بازه 50° تا 5° در نظر گرفته شده است. در زوایای بزرگتر از 22° ، مشاهده می شود که تعداد جمعیت پروتون ها برای هدف خمیده بیشتر از هدف تخت می باشد که علت آن ناشی از حرکت مایل پروتون های شتاب دار از لبه های هدف خمیده است. این موضوع با کنترل بیشتر در هماهنگی میان پارامتر کمر باریکه لیزر (W_0) و شعاع انحناى هدف قابل تعدیل است. از این مهمتر، با انتخاب مخروط هدایتگر، در هدف خمیده، جمعیت پروتون های واگرا در زوایای بزرگ به شدت کاهش می یابند. نکته قابل تامل دیگر در این شکل، توزیع زاویه ای پروتون ها در امتداد محور تابش تپ لیزری است که برای هدف خمیده، منحنی تیزی دارد که نمایانگر شتاب دهی خوشه فشرده ای از پروتون ها به سمت جلو است و با نتایج شکل ۵-ب همخوانی دارد.



شکل (۶): الف) طیف انرژی باریکه پروتونی هدف تخت و خمیده در لحظه ۳۰۰ fs ؛ ب) توزیع زاویه ای پروتون های شتاب دهی شده در هدف تخت و خمیده در لحظه ۳۰۰ fs

۴- پس گفتار:

یکی از مهمترین چالش های اخیر در رهیافت افروزش سریع در انرژی گداخت لختی، تولید و تراژد باریکه افروزنده یونی است. تحقیقات دو دهه اخیر نشان داده است که باریکه های پروتونی شتابدهی شده لیزری، ظرفیت لازم برای برآورده کردن الزامات افروزش لکه داغ را دارند. البته، این موضوع کماکان با چالش های فنی کلیدی از جمله راندمان جفت شدگی لیزر-فویل، هندسه مناسب فویل، هدف های فویلی ساختار یافته، کانونگی باریکه شتابدهی شده و بروز خرده ناپایداری های روبرو است. از این میان، هندسه هدف نقشی کلیدی در بهبود شرایط کانونگی باریکه و تشکیل لکه داغ موضعی دارد. در این پژوهش، ارزیابی کیفیت باریکه پروتونی شتابدهی شده با هندسه تخت و خمیده در سازوکار TNSA به صورت عددی مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که شعاع انحنای مناسب هدف تاثیر مستقیمی بر پارامترهای کلیدی از جمله انرژی قطع و توزیع زاویه ای پروتون ها دارد.

۱ - منابع علمی:

- [1] Tabak, M., Hammer, J., et al., (۱۹۹۴), "Ignition and high gain with ultra-powerful lasers", *Physics of Plasmas*, ۱, ۱۶۲۶.
- [2] Atzeni, S., Tabak, M., (۲۰۰۵), "Overview of ignition conditions and gain curves for the fast ignitor", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, ۴۷, B۷۶۹.
- [3] Roth, M., Schollmeier, M., (۲۰۱۶), "Ion Acceleration—Target Normal Sheath Acceleration", *Proceedings of the ۲۰۱۴ CAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake Acceleration*, ۱, ۲۳۱.
- [4] Roth, M., Cowan, T.E., et al., (۲۰۰۱), "Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams", *Physical Review letters*, ۸۶, ۴۳۶.
- [5] Arber, T.D., Bennett, K., et al., (۲۰۱۵), "Contemporary particle-in-cell approach to laser-plasma modelling", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, ۵۷, ۱۱۳۰۰۱.
- [6] Henig, A., (۲۰۱۰), "Advanced Approaches to High Intensity Laser-Driven Ion Acceleration", PhD Thesis, Ludwig Maximilian University of Munich.



مشخصه یابی باریکه های الکترونی با استفاده از اسکن کننده نوری (کد مقاله : ۱۰۹۶)

عسکر بیوکی، محسن^۱ - تقی پور نیار، پریسا^۲ - شیرمردی، سید پژمان^۲

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پرتوفراپاند ایران مرکزی (یزد)

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران، پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها

چکیده

طراحی و ساخت اسکنر نوری برای مشخصه‌یابی از باریکه‌های الکترونی در این مقاله نشان داده می‌شود. این سیستم می‌تواند به صورت غیرمستقیم و با استفاده از لایه‌های اپتیکی پرتو دهی شده الکترونی، باریکه‌های لیزری و پلاسمایی را نیز اسکن کند. در این بیم اسکنر با استفاده از یک شکاف و یک لبه‌ی تیغ فضای مورد نظر اسکن به واحدهای کوچک فضایی با سطح مقطع-های دلخواه تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از چشمه و آشکارساز مناسب شدت نور عبوری از این واحدهای کوچک فضایی قرائت می‌گردد. این مقادیر با دز جذبی در هریک از واحدهای فضایی متناسب است. بنابراین می‌توان به راحتی توزیع فضایی دز را در لایه‌های اپتیکی قرائت شونده به دست آورد. در این تحقیق نمایه دوبعدی فضایی باریکه الکترونی بعد از سیستم اسکن شتاب‌دهنده رودترون، نمایه فضایی لیزر گاز کربنیک با توان 2.3 W و همچنین نمایه‌ی فضایی باریکه پلاسمایی سرد با دقت 1 mm^2 اندازه‌گیری شدند.

کلمات کلیدی: بیم اسکنر نوری، پلاسمای سرد، لایه‌ی اپتیکی پرتو دهی شده الکترونی، لیزر CO_2 ، نمایه فضایی باریکه.

Characterization of Electron Beam by Construction of Optical Beam Scanner

Askarbioki, Mohsen, Taghipour Niar, Parisa, Shirmardi, Seyed Pezhman*

Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

Abstract

In this study, design and construction of an optical beam scanner is presented. This system can also scan laser and plasma beam profiles by e-beam irradiated laminas indirectly. In the design, slightly space is divided into spatial small spaces by a splitter and a knife edge. Then using suitable optical source and detector, intensity of light that has transferred in small spaces is determined. These obtained quantities are proportional to absorption dose of each small space. So we can drive spatial dose distribution in optical laminas. In this work, 2D spatial profiles of electron beam of Rhodotron accelerator, 2.3 W CO_2 laser beam and cold plasma were measured and characterized with 1 mm^2 precision.

Keywords: Optical Beam Scanner, Cold Plasma, E-Beam Irradiated Lamina, CO_2 Laser, Spatial Beam Profile.



۱- مقدمه:

امروزه استفاده و ارتقاء شتاب‌دهنده‌ها به سرعت در حال افزایش است [۱-۳]. مشخصه‌یابی از کمیت‌های وابسته به شتاب‌دهنده نیز در توسعه و کاربرد هرچه بیشتر آن‌ها مؤثر است [۴، ۵]. کمیت‌هایی همچون نمایه فضایی باریکه‌های الکترونی و یونی، نمایه زمانی، واگرایی باریکه، انرژی و جریان از مهم‌ترین پارامترهای خروجی شتاب‌دهنده‌اند. به‌عنوان مثال نمایه فضایی باریکه‌های شتاب‌دهنده بیانگر عملکرد قطعاتی همچون چشمه RF، مگنت‌های همگرا کننده، تفنگ الکترونی و مولد ولتاژ بالا است [۶، ۷]. بنابراین اندازه‌گیری این کمیت تحلیلی درست از نحوه کارکرد وسایل جانبی شتاب‌دهنده در اختیار کاربران و کنترل‌کنندگان آن قرار می‌دهد.

برای اندازه‌گیری نمایه‌ی فضایی باریکه‌های الکترون روش‌های گوناگونی وجود دارد. معروف‌ترین آن‌ها روش Wire Scanning (WS) است [۸]. این روش صورت‌های گوناگونی دارد و اطلاعات نسبتاً مناسبی از توزیع فضایی ذرات الکترونی در نمایه خروجی آن‌ها را به دست می‌دهد [۹-۱۱]. اما استفاده از یک یا حتی دو سیم متعامد در روش‌های WS نمی‌تواند اطلاعات جامعی از توزیع فضایی ذرات باردار تهیه کند [۱۲]. در این روش‌ها باریکه به‌صورت المان‌های مستطیلی، برابر با سطح مقطع سیم، جاروب می‌شود. از طرف دیگر استفاده از آن‌ها در خلاء با دشواری‌هایی همراه است از جمله اینکه حرکت آن‌ها در خلاء باید سریع و تقریباً بدون اختلال روی باریکه باشد. حتی استفاده از آن‌ها در بیرون از محیط‌های خلاء نیز مشروط به طراحی مدارهای تقویت‌کننده مناسب است. به‌عنوان مثال قرائت نمایه فضایی باریکه در جریان‌های پس‌زمینه (Back Ground Current) نیاز به طراحی مدار تقویت‌کننده ایده‌آل دارد [۱۰]. در جریان‌های بالا نیز سیم‌های دستگاه WS آسیب می‌بینند و بعد از مدتی باید تجدید شوند [۱۱].

با وجود تمام این عیب‌ها این دستگاه تصویر تقریباً آبی را از نمایه فضایی الکترون‌ها نشان می‌دهد و هنوز مورد استفاده محققان است [۱۳، ۱۴]. برای مرتفع کردن این عیوب گروهی از محققان از روش Laser wire scanner استفاده کرده‌اند [۱۵]. در این روش باریکه یونی و یا الکترونی توسط یک پرتو لیزری جاروب می‌شود [۱۶]. سپس الکترون‌های جدا شده از باریکه اصلی ناشی از پراکندگی کامپتون یا فوتوایونش به سمت صفحه‌های جرقه زن (Scintillator) هدایت می‌شوند. در نهایت با استفاده از یک دوربین CCD نمایه فضایی فوتونی صفحه نورافشان که در واقع متناسب با نمایه فضایی ذرات برخوردی است، پردازش می‌گردد.

روش LWS یک روش بسیار مناسب برای استفاده در خلاء و بدون اختلال روی باریکه اصلی است. ولی این طراحی نیز همانند WS بر اساس المان‌های مستطیلی جاروبی است و در اکثر پژوهش‌ها از دو راستای متعامد اسکن لیزری صحبت شده است [۱۷]. این روش دشواری‌های دیگر خاص خود را دارد؛ مثلاً اینکه برای برخورد باریکه لیزری با باریکه یونی و الکترونی باید دریچه‌های شفاف روی لوله‌های انتقال ذرات یا کاواک طراحی شود که خود ایجاد خلاء را با چالش روبرو می‌کند. به‌هرحال روش LWS نیز یک روش اسکن آبی (On-line) است و پردازش سریعی از داده‌ها را در اختیار کاربران می‌گذارد.

در این مقاله روش جدیدی را ارائه می‌دهیم که می‌توان به‌صورت آبی و غیر آبی نمایه‌ی فضایی باریکه الکترونی و یا حتی نمایه باریکه‌های اتمی را قرائت کرد.

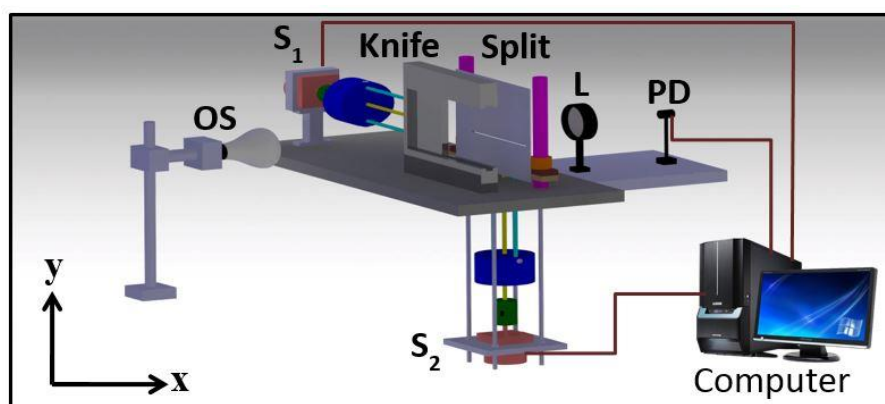


۲- روش کار:

همان‌طور که اشاره شد در روش WS یک سیم فلزی با ضخامت و سطح مشخص در مقابل باریکه الکترونی حرکت داده می‌شود. در اثر برخورد ذرات باردار با این سطح مقطع از سیم، جریانی از سیم می‌گذرد که متناسب است با تعداد ذراتی که به سطح مقطع مستطیلی سیم در هر گام برخورد کرده‌اند. بنابراین مبنای قرائت در روش WS، المان‌های مستطیلی متناظر با سطح مقطع سیم رساناست.

در روش قرائت صفحات نورافشان نیز دوربین CCD باریکه نوری روی صفحه نورافشان را که بر اثر برخورد ذرات باردار جدا شده از باریکه اصلی با این صفحه تشکیل شده است، به صورت دیجیتال نمایش می‌دهد. این روش نیز مثل WS بر اساس قرائت المان‌های مستطیلی متناظر با سطح مقطع مؤثر برخورد باریکه لیزری با باریکه الکترونی یا یونی است. اما دوربین‌های CCD قادر به قرائت بازه خاصی از بیناب امواج الکترومغناطیسی، معمولاً در نواحی مرئی بین ۴۰۰ nm تا ۸۰۰ nm است، و نمی‌توانند تابش‌های لومینسانس فرابنفش یا مادون قرمز ناشی از برخورد ذرات پرتانژی به صفحات نورافشان را آشکار کنند که این نیز باعث محدودیت کاربرد آن‌ها می‌شود.

برای این مهم، یعنی آشکارسازی نمایه فضایی باریکه الکترونی و یونی با مقیاس فضایی استاندارد و همچنین استفاده از سایر صفحات نورافشان لومینسانسی تابشی در سایر بازه‌های بینایی بیم اسکنر نوری مطابق شکل ذیل طراحی و ساخته شده است.



شکل (۱) نمایی از بیم اسکنر نوری؛ که در آن OS: Optical Source، S_1 : Step motor in x direction، S_2 : Step motor in y direction، L: Lens، عدسی با فاصله کانونی ۵ cm و PD: Photo Detector است.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، بیم اسکنر نوری از اجزای مختلفی تشکیل شده است. در این شکل OS چشمه نور اپتیکی است که می‌تواند یک LED یا چشمه نور نقطه‌ای باشد. S_1 و S_2 موتورهای با گام‌های ریز و قابل تنظیم هستند که به ترتیب لبه تیغ و شکاف را در دو راستای X و Y جابجا می‌کنند. L، عدسی همگرا کننده با فاصله کانونی $f = +5\text{ cm}$ و PD نیز آشکارساز نوری است.

اساس کار این دستگاه بر مبنای مشبک کردن فضای اسکنر است. بدین منظور شکاف را در موقعیت y_n و لبه تیغ را در موقعیت x_m در نظر بگیرید. فرض کنیم در این حالت مقدار باریکه فوتونی که از شکاف می‌گذرد در آشکارساز فوتونی تولید



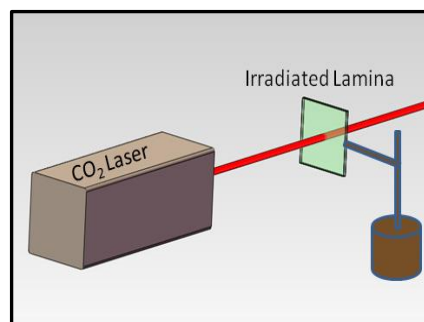
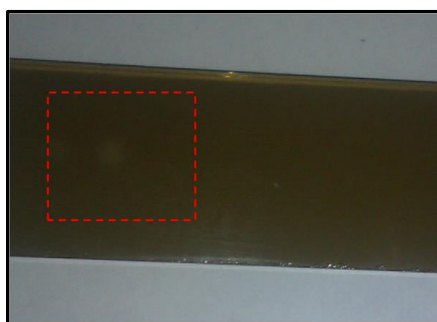
جریان i کند. اگر لبه تیغ را به اندازه Δx حرکت کند به طوری که به موقعیت جدید $x + \Delta x$ برسد در این صورت مقدار جریان جدید آشکارساز به i' می‌رسد. بی شک اختلاف جریان $\Delta i = i - i'$ جریان متناسب با فوتون عبوری از شبکه فضایی به مختصات $(x_m + \frac{\Delta x}{2}, y_n)$ و اندازه $\Delta x.l$ خواهد بود که l پهنای شکاف است. بنابراین می‌توان با این روش کل فضای فوتونی مقابل دهانه بیم اسکنر را به واحدهای کوچک فضایی تقسیم و آن‌ها را جاروب کرد.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده از یک عدسی همگرا کننده برای کانونی کردن باریکه خروجی فوتونی در آشکارساز استفاده شده است. انتخاب عدسی با قطر مناسب می‌تواند ابعاد فضای اسکن را ارتقاء دهد. آشکارساز در این بیم اسکن نوری نیز قابل تعویض است که این امر امکان بهره‌گیری از صفحات نورافشان با بیناب‌های گوناگون تابشی را نیز فراهم می‌سازد. این بیم اسکن نوری می‌تواند نمایه فضایی باریکه‌های الکترونی را، که به صفحات نورافشان مخصوص خود برخورد کرده‌اند، به صورت آنی جاروب کند. حتی با بهره‌گیری از صفحات نورافشان دیگر می‌توان باریکه‌های فوتونی همچون اشعه X را نیز اسکن کرد.

نکته جالب دیگر قابلیت این بیم اسکن نوری برای تحلیل غیر آنی باریکه‌های فوتونی و پلاسمایی است. گاهی اوقات آشکارساز مناسبی برای باریکه‌های لیزری و فوتونی در بازه‌های مختلف طول موجی وجود ندارد. برای پلازما نیز آشکارساز و مشخصه‌یاب‌های اندکی وجود دارند. باریکه‌های الکترونی می‌توانند در آشکارسازی این دو باریکه نیز مؤثر باشند که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

فرض کنید یک لایه شیشه‌ای با ضخامت ثابت را در مقابل پرتو یکنواخت الکترونی قرار دهیم. تولید پرتو یکنواخت الکترونی با استفاده از سیستم‌های اسکن به‌راحتی میسر است [۱۸]. سپس این لایه دز خورده را در معرض تابش باریکه لیزری و یا پلاسمایی می‌گذاریم. لایه شیشه‌ای دز خورده در اثر تابش فوتون‌های میکروویو و یا ذرات پلاسمایی سرد، که باعث ایجاد فوتون‌های حرارتی داخل ساختار شیشه می‌شوند، دز خود را از دست می‌دهند [۲۱]. مقدار و موقعیت دز از دست داده در سطح مقطع لایه شیشه‌ای متناسب با مقدار و موقعیت فوتون‌های میکروویو تابشی و یا ذرات پلازما است. به عبارت دیگر نمایه ایجاد شده بر روی لایه دز خورده متناسب است با نمایه فضایی لیزر میکروویو یا نمایه پلاسمایی سرد.

برای این کار ابتدا یک لایه شیشه‌ای با ابعاد $75 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ و چگالی $2.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ تحت پرتو دهی الکترونی با انرژی $E = 10 \text{ MeV}$ و دز 27 kGy قرار گرفت. سپس مطابق شکل زیر این لایه دز خورده تحت تابش لیزر CO_2 با توان 2.3 W و طول موج $10.6 \mu\text{m}$ گذارده شد.

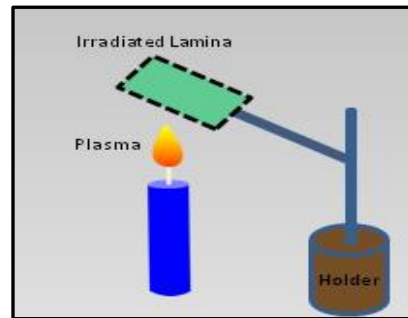
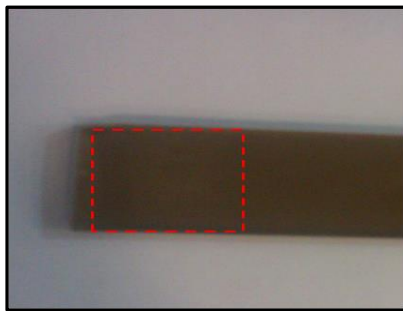




شکل (۲- الف) نمایی از پرتودهی لیزری لایه‌ی اپتیکی دز خورده. شکل (۲- ب) تصویر تغییر دز لایه اپتیکی پرتودهی شده ناشی از پرتودهی لیزر CO_2 .

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، لایه دز خورده بعد از پرتودهی لیزری در نقطه تابش دز خود را از دست داده و به حالت اولیه بازگشته است. اسکن نوری این لایه می‌تواند تصویر دقیقی از نمایه‌ی فضایی باریکه لیزری در اختیار قرار دهد. نتایج تجربی حاصل از اسکن نوری این لایه در بخش بعد ارائه می‌گردد.

به همین صورت اگر لایه‌ی دز خورده یکنواخت مشابه آنچه در قبل گفته شد در تماس با یک پلاسمای سرد همچون شعله شمع قرار داده شود ذرات آزاد شده از این پلازما به تیغه شیشه‌ای برخورد کرده و با تشکیل فونون‌های حرارتی در آن ذرات آن قسمت از لایه را از بین می‌برند [۲۱]. در نتیجه شیشه‌ی دز خورده در اثر این تماس به‌صورت جایگزیده و متناسب با چگالی ذرات شمع دز خود را از دست می‌دهد (شکل زیر را ببینید).

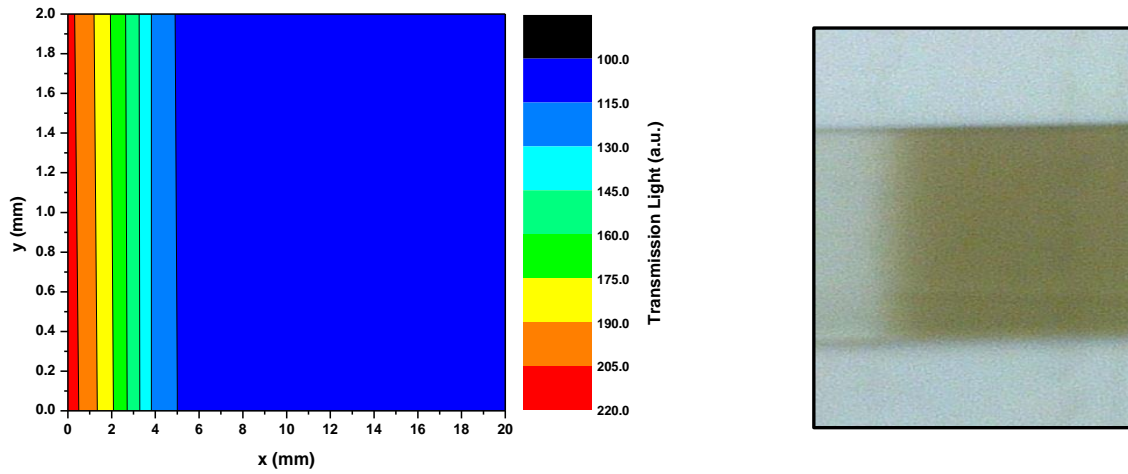


شکل (۳- الف) نمایی شماتیک از لایه اپتیکی دز خورده در مجاورت پلاسمای سرد. شکل (۳- ب) تصویر تغییر دز لایه اپتیکی پرتودهی شده ناشی از مجاورت با پلاسمای سرد.

در شکل (۳) شعله شمع به مدت $t=3s$ در تماس با لایه‌ی اپتیکی دز خورده قرار گرفت. شکل (۳- ب) به‌خوبی تأثیر پلاسمای شمع را روی لایه دز خورده نشان می‌دهد. با اسکن نوری این لایه برخوردی با پلازما می‌توان درک اولیه‌ای از توزیع ذرات موجود در پلازما داشت که نتایج تجربی آن در بخش بعد ارائه می‌گردد و درستی آن را نمایش می‌دهد.

۳- نتایج تجربی:

در ابتدا برای آنکه نشان دهیم بیم اسکن نوری نمایه فضایی اپتیکی را چگونه جاروب می‌کند، یک تیغه شیشه‌ای را، که نیمی از آن بدون پرتودهی و نیمی دیگر با پرتودهی 8 KGy الکترونی است، مطابق شکل (۴) اسکن می‌کنیم.

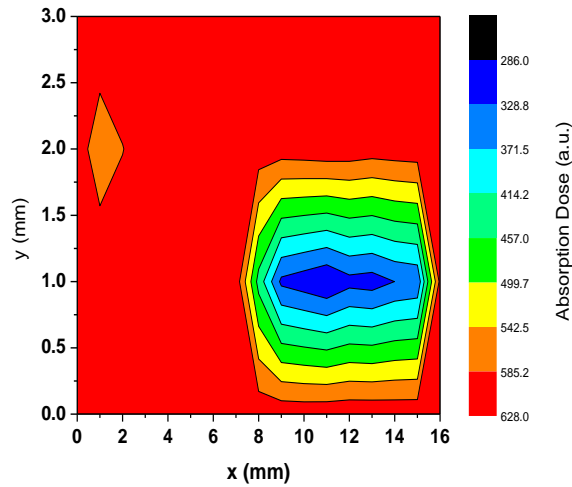


شکل (۴-ب) نمایه فضایی نوری اسکن شده لایه اپتیکی توسط بیم اسکن
نیمی از آن پرتودهی شده و نیمی دیگر بدون پرتودهی است.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، نمایه فضایی نوری عبوری از قسمت پرتودهی شده تیغه شیشه‌ای به صورت یکنواخت است. به عبارت دیگر این لایه اپتیکی هیچ‌گونه تغییری در نمایه عبوری باریکه‌های ایجاد نمی‌کند. بنابراین هرگونه تغییرات احتمالی در نمایه فضایی عبوری لایه دز خورده تنها ناشی از حضور فضایی دز در سطح مقطع آن خواهد بود.

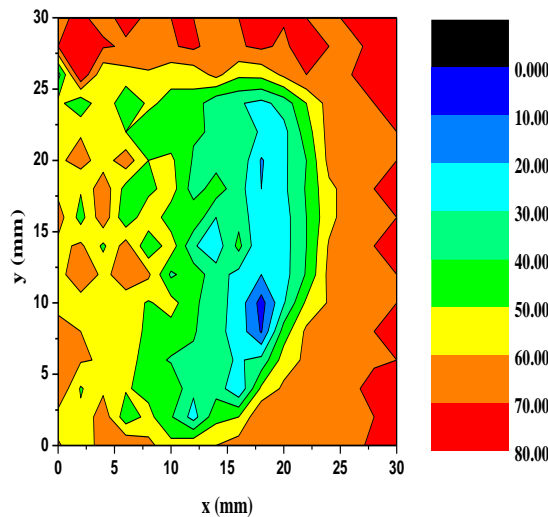
نتیجه تجربی حاصل از شکل (۴) نشان می‌دهد دز تابشی ناشی از دستگاه شتاب‌دهنده رودترون با استفاده از سیستم اسکن Horn روی لایه اپتیکی تقریباً یکنواخت است. بنابراین این روش می‌تواند گزینه بسیار مناسبی برای بررسی توزیع دز در حالت بدون اسکن باشد. در این صورت نمایه‌ی فضایی دز به شکل غیر آنی (Off-line) قابل تحلیل است.

شکل (۵) نیز توزیع دز - سطح لایه‌ی اپتیکی یکنواخت پرتودهی شده را که برای مدت $t=4s$ در معرض تابش لیزر CO_2 با توان $2.3 W$ قرار گرفته است، نشان می‌دهد.



شکل (۵) نمایی از توزیع سطحی دز به دست آمده از لایه اپتیکی تحت تابش لیزر CO_2 با استفاده از بیم اسکنر نوری. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود لایه پرتودهی شده، دز خود را به‌صورت جایگزیده و در محل تابش لیزر CO_2 از دست داده است. نمایه به وجود آمده در واقع بیانگر توزیع فوتون‌های اپتیکی در سطح مقطع لیزر CO_2 است که دزهای لایه‌ی اپتیکی را به‌صورت جایگزیده از بین برده‌اند. بنابراین با استفاده از لایه اپتیکی پرتودهی شده و سپس تابش لیزر CO_2 درک درستی از نمایه فضایی باریکه اتمی لیزر CO_2 به دست آورد. نمایه به دست آمده در این شکل نیز با نتایج تجربی و نظری پژوهشگران فیزیک اتمی مطابقت دارد [۱۹] که خود بیانگر درستی و دقت این روش است.

شکل (۶) توزیع سطحی لایه‌ی اپتیکی یکنواخت پرتودهی شده را مطابق با برپایی تجربی شکل (۳) نشان می‌دهد.



شکل (۶) نمایی از توزیع سطحی دز به دست آمده از لایه اپتیکی مجاور پلاسما شعله با استفاده از بیم اسکنر نوری. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، لایه اپتیکی دز خورده به‌صورت جایگزیده دز خود را در نواحی برخوردی با ذرات آزاد شده پلاسما از دست داده است. در نمایه فضایی شکل (۶-الف) در محل تماس نوک شعله کمترین مقدار دز و در



اطراف آن نسبتاً دز بیشتری وجود دارد. شکل (۶-ب) نیز به خوبی مقدار توزیع دز را در سطح مقطع اسکن شده نمایش می‌دهد. در یک نگاه کلی این توزیع دز عکس توزیع مرسوم ذرات پلاسمایی است [۲۰]. هرچند این روش یک دید کلی از ذرات پلاسمایی در اختیار می‌دهد اما با استفاده از آن می‌توان به نتایج جزئی و دقیقی در آینده دست یافت.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

در این پژوهش نحوه عملکرد بیم اسکنر نوری نشان داده شد. این سیستم می‌تواند نمایه فضایی باریکه‌های الکترونی را با دقت مناسب و قابل تنظیم اندازه‌گیری کند. برای این مهم کافی است تا نمایه فضایی تابش لومینسانس یا نمایه جامانده ناشی از پرتودهی الکترونی بر روی لایه‌های اپتیکی با استفاده از بیم اسکنر نوری قرائت گردد. در این تحقیق نمایه فضایی باریکه الکترونی یکنواخت، که توسط سیستم خروجی شتاب‌دهنده رودترون بر روی لایه‌های اپتیکی ایجاد شده بود با استفاده از بیم اسکنر نوری اندازه‌گیری شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت نمایه فضایی به صورت نسبتاً مناسب یکنواخت بود. بنابراین این لایه‌های اپتیکی پرتودهی شده می‌توانند حسگر مناسبی برای اندازه‌گیری نمایه فضایی دیگر باریکه‌ها، از جمله باریکه‌های لیزری و پلاسمایی که به راحتی قابل اندازه‌گیری نیستند، باشند. در ادامه لایه‌های پرتودهی شده الکترونی که تحت تابش لیزر CO_2 و همچنین پلاسمای سرد قرار گرفته بودند، با استفاده از بیم اسکنر نوری قرائت شدند. نتایج تجربی حاصل از این اسکن تطابق بسیار خوبی با پژوهش دیگر محققان و تئوری داشت. درستی نتایج، صحیح بودن عملکرد دستگاه بیم اسکنر و استفاده مناسب از لایه‌های پرتودهی شده الکترونی برای قرائت باریکه‌های دیگر را نشان می‌دهد.

۵- مراجع:

- [۱] J. Chen, Z. Guo, K. Liu, and L. Zhou, "Development of Accelerator Mass Spectrometry and Its Applications," *Reviews of Accelerator Science and Technology* ۰۴, (۲۰۱۱), ۱۱۷-۱۴۵.
- [۲] A. W. Chao, and W. Chou, "Editorial Preface," *Reviews of Accelerator Science and Technology* ۰۴, (۲۰۱۱), v-vi.
- [۳] E. v. d. Bij, J. Serrano, T. Wlostowski, M. Cattin, E. Gousiou, P. A. Sanchez, A. Boccardi, N. Voumard, and G. Penacoba, "Open Hardware for CERN's accelerator control systems," *Journal of Instrumentation* ۷, (۲۰۱۲), C۰۱۰۳۲.
- [۴] V. Nelson, D. McLean, and L. Holloway, "Thermoluminescent dosimetry (TLD) for megavoltage electron beam energy determination," *Radiation Measurements* ۴۵, (۲۰۱۰), ۶۹۸-۷۰۰.
- [۵] D. Teweldebrhan, and A. A. Balandin, "Modification of graphene properties due to electron-beam irradiation," *Applied Physics Letters* ۹۴, (۲۰۰۹), ۰۱۳۱۰۱-۰۱۳۱۰۳.
- [۶] D. A. Lee, J. K. Pozimski, C. Gabor, and P. Savage, "A Laserwire Beam Profile Measuring Device For The Ral Front End Test Stand," *Rutherford Appelton Laboratory, Oxford, UK*, (۲۰۱۱).



- [۷] S. G. Arutunian, M. R. Mailian, and K. Wittenburg, "Vibrating wires for beam diagnostics," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ۵۷۲, (۲۰۰۷), ۱۰۲۲-۱۰۳۲.
- [۸] R. Fulton, J. Haggerty, R. Jared, R. Jones, J. Kadyk, C. Field, W. Kozanecki, and W. Koska, "A high resolution wire scanner for micron-size profile measurements at the SLC," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ۲۷۴, (۱۹۸۹), ۳۷-۴۴.
- [۹] J. D. Gilpatrick, Y. Batygin, F. Gonzales, M. Cruchalla, V. Kutac, D. Martinez, C. Pillai, S. Rodriguez, J. Sedillo, and B. Smith, "Wire Scanner Beam Profile Measurements: LANSCE Facility Beam Development," Los Alamos, NM, USA, (۲۰۱۲).
- [۱۰] S. Rodriguez, B. Smith, A. Maestas, J. Raybun, J. Martinez, D. Sattler, J. D. Gilpatrick, J. Sedillo, and M. Gruchalla, "Mechanical Design And Evaluation Of The Mp-۱۱-Like Wire Scanner Prototype," in Instrumentation, Controls, Feedback and Operational Aspects (IEEE, New Orleans, Louisiana, USA, (۲۰۱۲), ۹۸۴-۹۸۶.
- [۱۱] N. Iida, T. Suwada, Y. Funakoshi, T. Kawamoto, and M. KIKUCHI, "A Method For Measuring Vibrations In Wire Scanner Beam Profile Monitors," KEK, ۱-۱ Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, ۳۰۵-۰۸۰۱, Japan, (۲۰۱۲).
- [۱۲] C. Gabor, G. Boorman, and A. P. Letchford, "A Two_Dimensional Wire Scanner For A Low Energy Ion Beam," RAL, Oxfordshire, UK, (۲۰۱۲).
- [۱۳] J. Sedillo, J. D. Gilpatrick, D. Martinez, S. Rodriguez, and M. Gruchalla, "Software Development For A Compactrio-Based Wire Scanner Control And Dataacquisition System," in Proceedings of IPAC۲۰۱۲, New Orleans, Louisiana, USA, (۲۰۱۲).
- [۱۴] J. D. G. e. al, "Wire Scanner Beam profile Measurements: LANSCE Facility Beam Development," in Proceedings of IPAC۲۰۱۲, Instrumentation, Controls, Feedback and Operational Aspects T۰۳ Beam Diagnostics and instrumentation, MOPPR۰۸۰, IEEE, New Orleans, Louisiana, USA, (۲۰۱۲).
- [۱۵] Y. Liu, C. Long, C. Huang, R. Dickson, and A. Aleksandrov, "Simultaneous ion beam profile scan using a single laser source," Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams ۱۶, ۰۱۲۸۰۱ (۲۰۱۳).
- [۱۶] Y. Honda, N. Sasao, S. Araki, Y. Higashi, T. Okugi, T. Taniguchi, J. Urakawa, Y. Yamazaki, K. Hirano, M. Nomura, M. Takano, and H. Sakai, "Upgraded laser wire beam profile monitor," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ۵۳۸, (۲۰۰۵), ۱۰۰-۱۱۵.
- [۱۷] A. Bosco, M. T. Price, G. A. Blair, S. T. Boogert, G. Boorman, S. Malton, C. Driouichi, T. Kamps, F. Poirier, K. Balewski, E. Elsen, V. Gharibyan, H. C. Lewin, S. Schreiber, N. Walker,



and K. Wittenburg, “A two-dimensional laser-wire scanner for electron accelerators,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ۵۹۲, (۲۰۰۸), ۱۶۲-۱۷۰.

[۱۸] A. A. Zavadtsev, “Electron beam scanning system,” in Particle Accelerator Conference, ۱۹۹۷. Proceedings of the ۱۹۹۷, ۳۸۶۳, (۱۹۹۷), ۳۸۶۰-۳۸۶۲.

[۱۹] M. Sparkes, M. Gross, and W. O’Neill, “A novel non-intrusive sampling technique for laser on-line beam monitoring utilising a silicon mirror,” Optics and Lasers in Engineering ۴۶, (۲۰۰۸), ۶۲۰-۶۲۷.

[۲۰] S. Svanberg, Atomic and Molecular Spectroscopy: Basic Aspects and Practical Applications ;Springer, (۲۰۰۴).



مطالعه اثر دمای زیر لایه بر ساختار لایه تیتانیوم مورد استفاده در هدف دوتریومی و بهره

نوترونی آن (کد مقاله : ۱۱۵۳)

گرائیلی، علیرضا^۱ - کریمی، مریم^{۱*} - میرزایی، حمیدرضا^۱ - شاکری جوئیباری بنین^۱
۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

چکیده

در این تحقیق لایه‌های نازک تیتانیوم با روش کندوپاش با باریکه یونی در دماهای مختلف زیر لایه، بر روی زیر لایه مسی انباشت شدند. اثرات دمای زیر لایه بر رفتار بلورنگاری و ریخت‌شناسی لایه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس فیلم‌ها نشان داد که جهت ترجیحی (۰۰۲) برای تیتانیوم با افزایش دمای زیر لایه تقویت شده است. تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی نیز کاهش زبری سطح لایه را با افزایش دما نشان داد. در ادامه، به منظور بهینه‌سازی تولید نوترون‌های پرنرژی، رفتار اهداف تیتانیومی با بمباران با باریکه دوترون خروجی از شتابگر الکترواستاتیک 150 keV مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شمارش نوترون نشان داد دمای بستر، بر بهره نوترونی اهداف تحت بمباران، تأثیری گذارد. واژگان کلیدی: لایه تیتانیوم، دمای زیر لایه، هدف، شتابگر.

Study on the Impact of Substrate Temperature on the Structure of the Titanium film in Deuterium Targets and Neutron Yield

Grayeli, Alireza¹ - Karimi, Maryam^{1*} - Mirzaei, Hamidreza¹ - Shakeri Jooybari, Banin¹

۱. Nuclear science and technology research institute, Physics and accelerator research school

Abstract:

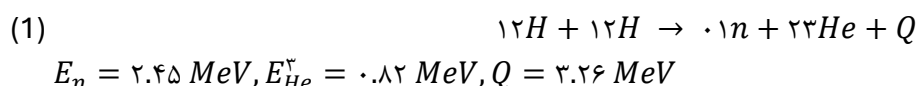
Titanium thin films were deposited on copper substrates using ion beam sputtering at various substrate temperatures. The impact of substrate temperature on the crystallographic and morphological properties of the films was examined. X-ray diffraction analysis revealed that the preferred (002) orientation of titanium became more prominent as the substrate temperature increased. Morphological analysis also indicated a reduction in surface roughness with higher temperatures. The behavior of titanium targets subjected to a deuteron beam from a 150 keV electrostatic accelerator was investigated. The results of neutron counting demonstrated that substrate temperature significantly influences the neutron yield of the bombarded targets.

Key Words: Titanium Thin Film, Substrate Temperature, Target, Accelerator.

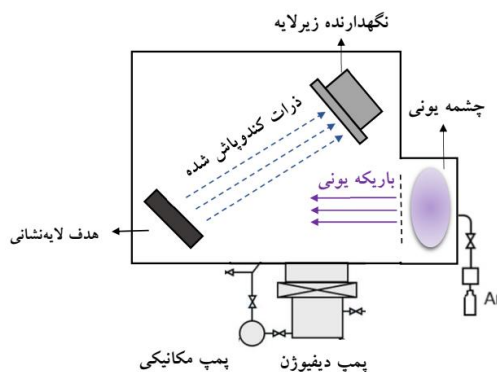


۱- مقدمه:

مولدهای نوترون کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف از جمله صنعت هسته‌ای دارند. هدف‌های مورد استفاده در مولدهای نوترونی معمولاً از یک لایه‌نازک فلزی بر روی بسترهای رسانا تشکیل می‌شود. تیتانیوم به‌عنوان لایه‌نازک فلزی بسیار مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است [۱-۳]. لایه‌نازک تیتانیوم با جذب دوترون طی واکنش D-D و بمباران با باریکه دوترون keV ۱۲۰ نوترون‌های ۲/۵ MeV تولید خواهد کرد.



برای بهینه کردن محصول نوترونی، خصوصیات فیزیکی هدف ساخته شده و تاثیر پارامترهای مختلف انباشت لایه‌نازک باید مورد بررسی قرار گیرد. لایه‌های نازک تیتانیوم باروش‌های مختلفی از جمله تبخیر حرارتی، تبخیر با تفنگ الکترونی، رسوب شیمیایی بخار و روش‌های مختلف کندوپاش تهیه شده‌اند. در این مطالعه، فرآیند انباشت لایه تیتانیوم بر روی زیرلایه مسی با استفاده از دستگاه کندوپاش با باریکه یونی انجام شد که به کمک چشمه‌های با انرژی ۲-۵ KeV و بیشینه جریان خروجی ۵-۱۰ mA پرتودهی می‌کند. شکل ۱ شماتیک دستگاه مورد استفاده جهت انباشت لایه هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیک سیستم لایه‌نشانی مورد استفاده

از جمله مزیت‌های روش کندوپاش یونی نسبت به سایر روشهای کندوپاش، آن است که جهت تولید پرتو یونی متمرکز، از یک چشمه یونی مجزا، استفاده می‌شود. این پرتو یونی بر مواد هدف برخورد نموده و کندوپاش صورت می‌گیرد. بنابراین می‌توان دانسیته جریان و انرژی یون‌های بمباران کننده را به‌طور مستقل کنترل نمود.

به‌طور کلی ساختار لایه‌های نازک تابع شرایط لایه‌نشانی مانند دمای زیرلایه، آهنگ انباشت، ضخامت لایه و مورفولوژی سطح زیرلایه می‌باشد. یکی از عوامل مهم در ساختار لایه‌های نازک، دمای زیرلایه می‌باشد که تأثیر مستقیم بر اندازه دانه دارد. با افزایش دمای زیرلایه، دانه‌ها به‌راحتی رشد کرده و اندازه دانه‌ها بزرگتر می‌شود [۴]. هدف از این مطالعه بررسی اثر دمای زیرلایه بر خصوصیات ساختاری و پیرو آن تاثیرگذاری بر شار نوترونی حاصل از واکنش D-D می‌باشد.

۲. روش کار:

زیرلایه‌های مورد استفاده در این تحقیق پولک‌های مسی به قطر ۳۱/۵ mm می‌باشد. قبل از شروع لایه‌نشانی باید زیر لایه‌ها تمیز شوند زیرا وجود هرگونه آلودگی در سطح زیرلایه می‌تواند مانع از تشکیل یک پوشش مناسب گردد. تمیز بودن سطح نمونه‌ها تأثیر بسیاری بر چسبندگی لایه‌ها دارد. گرمادهی به زیرلایه بدین صورت است که نمونه‌ها را قبل از عملیات لایه‌نشانی تا یک دمای معین گرم می‌کنند. در این تحقیق زیرلایه‌ها به ترتیب در دمای اتاق و دماهای ۱۰۰ °C و ۴۰۰ °C در حین لایه



نشانی حرارت داده شده اند. تارگت تیتانیوم مورد استفاده با ابعاد $100 \times 100 \text{ mm}^2$ و خلوص ۹۹/۹۹٪ می‌باشد (جدول ۱). نمونه‌ها پس از آماده شدن داخل محفظه دستگاه و روی نگهدارنده متصل به یک گرمکن، قرار داده میشوند. دمای زیرلایه به وسیله یک ترموکوپل متصل به نگهدارنده، کنترل میشود. پس از راه اندازی سیستم و ایجاد خلاء اولیه تا فشار 10^{-3} torr به وسیله پمپ های روتاری، پمپهای دیفیوژن که به طور سری به پمپهای روتاری و محفظه خلاء متصلاند، روشن میشوند. پس از ایجاد خلاء 10^{-6} torr و بالا رفتن دمای زیرلایه تا اندازه مورد نظر، گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ به سمت چشمه کافمن هدایت شده و بعد از یونیزه شدن داخل چشمه و تشکیل پلاسما، یون‌ها با ولتاژ شتابدهنده $2/2 \text{ kV}$ به سمت هدف شتابدار میشوند.

جدول ۱. شرایط انباشت لایه های نازک تیتانیوم

تیتانیوم	لایه
مس	زیرلایه
دمای اتاق، ۱۰۰ و ۴۰۰	دمای زیرلایه $^{\circ}\text{C}$
۸۰	فاصله زیرلایه تا هدف mm
10^{-4} -۶	فشار پایه torr
10^{-3} -۳	فشار کاری torr

در این مقاله از شتابگر الکترواستاتیک 150 keV استفاده شد. این شتابگر توانایی تولید باریکه دوترون با بیشینه انرژی 150 keV و بیشینه جریان 1 mA را دارا می‌باشد. همچنین قطر باریکه خروجی برابر 20 mm است. در این شتابگر از یک چشمه یونی بسامد رادیویی برای تولید یون مثبت استفاده شده است. یون‌های تولید شده در محیط پلاسمای چشمه با اختلاف پتانسیل میان آند و کاتد از چشمه بیرون رانده میشوند. ذرات خروجی از چشمه تحت یک اختلاف پتانسیل 150 kV در ستون شتابدهی، شتاب داده می‌شوند.

۳. نتایج:

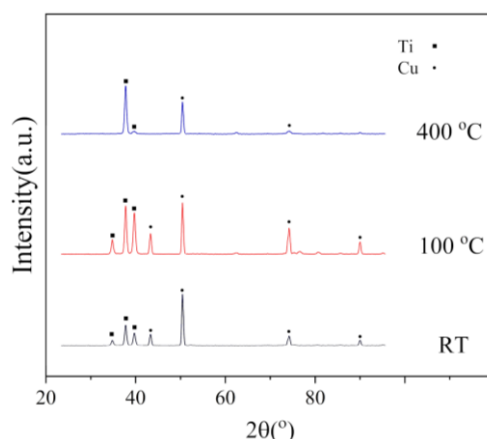
در این تحقیق لایه‌های تیتانیوم با روش کندوپاش با باریکه یونی تهیه شدند. دما به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شد و اثر آن بر روی خواص ساختاری و بهره نوترونی تحت بمباران مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به آنالیزهای انجام شده به بحث و ارائه نتایج آنها پرداخته می‌شود.

۳.۱. نتایج پراش پرتو X (XRD)

نمودارهای XRD مربوط به نمونه‌های لایه‌نشانی شده با پارامتر متغیر دمای زیرلایه، در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است فقط فازهای آلفای تیتانیوم (هگزگونال) برای شرایط مختلف انباشت وجود دارد. در طیف پراش تمام نمونه‌های مطالعه شده، قله Ti دارای بیشترین شدت می‌باشد. برای دو دمای 100°C و دمای اتاق لایه‌نازک در جهات ترکیبی (100) و (002) و (101) به ترتیب در زوایای $34/80$ و $37/78$ و $39/73$ درجه رشد کرده است و شدت مربوط به قله (100) و (101) ضعیف‌تر از (002) است. علاوه بر قله‌های تیتانیوم، الگوهای پراش دارای چهار پیک با جهت‌گیری‌های (200) ، (220) ، (311) و (111) به ترتیب در زوایای $43/31$ و $50/45$ و $74/12$ و $89/95$ درجه می‌باشد.



با افزایش دمای زیرلایه به 400°C بر شدت پیک صفحه (۰۰۲) افزوده می‌شود. با توجه به نتایج طیف XRD میتوان گفت که با افزایش دما تا 400°C بر میزان تک‌بلوری شدن لایه تیتانیوم افزوده می‌شود. لازم به ذکر است که در تمامی دماها جهت (۰۰۲) فاز تیتانیوم جهت ترجیحی باقی می‌ماند (شکل ۴). در حقیقت با افزایش دمای زیرلایه ذرات فرودی انرژی جنبشی لازم برای بازآرایی را کسب می‌کنند و به صورت منظم‌تری در جایگاه‌های شبکه‌ای خود قرار می‌گیرند. در نتیجه نظم ساختاری شبکه افزایش می‌یابد و به این ترتیب بلورینگی سیستم تقویت می‌شود. جهت ترجیحی با مقایسه بین پارامترهای ترمودینامیکی، مانند انرژی سطح آزاد و انرژی کشش معین می‌شود [۵]. بنابراین چنین نتیجه می‌شود که شرایط ترمودینامیکی در دماهای مورد استفاده در این تحقیق برای رشد صفحات (۰۰۲) مناسب‌تر است. با افزایش دما، انرژی جنبشی آنها می‌چند می‌گردد و فرایند پخش سطحی و نیز جابجایی مرز دانه‌ها شدت می‌گیرد. عوامل ذکر شده در بهبود خواص بلوری شدن لایه موثرند.



شکل ۲. طیفهای XRD نمونه‌های تیتانیوم در دماهای مختلف.

۳.۲. بررسی مورفولوژی سطح (AFM)

تصاویر دو و سه بعدی AFM نمونه‌های تیتانیوم بر روی زیرلایه مس در دماهای مختلف در مقیاس $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ در شکل ۳ آمده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری زبری متوسط (Ra) و متوسط مربع زبری (rms) برای نمونه‌های مختلف با استفاده از آنالیز AFM در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در شکل ۳ برای نمونه تولید شده در دمای اتاق، ساختار گنبدی شکلی مشاهده می‌شود که توزیع اندازه آن‌ها بر روی سطح یکنواخت نمی‌باشد. با افزایش دما تا 100°C به قطر دانه‌ها افزوده شده و توزیع اندازه دانه‌ها یکنواخت‌تر می‌گردد. در دمای 400°C مجدداً به قطر دانه‌ها افزوده می‌شود.

با توجه به مدل منطقه‌ای ساختاری (SZM)، در تمام نمونه‌ها نسبت T_s/T_m کمتر از 0.3 است [۶]. این امر نشان می‌دهد که لایه‌های تولید شده نباید بسیار متراکم باشند، در حالی که نمونه‌های تولید شده همراه با گرمادهی زیرلایه، نسبتاً متراکم هستند. دلیل این تفاوت این است که در مدل منطقه‌ای ساختاری (SZM)، تنها دماهای زیرلایه به عنوان نیروی محرکه هسته‌بندی و رشد در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در روش لایه‌نشانی مورد استفاده در این تحقیق، علاوه بر دمای زیرلایه، انرژی اتمهای پراکنش یافته نیز در تشکیل ساختار لایه موثر است.

افزایش دما موجب افزایش مکانیسم انتشار سطحی و تحرک مرز دانه‌ها شده و بر قطر دانه‌ها می‌افزاید. دلیل عدم توزیع یکنواخت اندازه دانه در سطح می‌تواند وجود فازهای کریستالی مختلف در لایه باشد که از نظر سینتیک رشد و ساختاری با هم متفاوتند. در دمای 400°C چون فاز غالب (۰۰۲) می‌باشد (با توجه به نتایج بلورنگاری) و لایه تقریباً متشکل از تکفاز تیتانیوم می‌باشد لذا یکنواختی توزیع نیز افزایش می‌یابد. اما در دمای 100°C چندفازی بودن ساختار می‌تواند از یکنواختی توزیع اندازه دانه بکاهد.



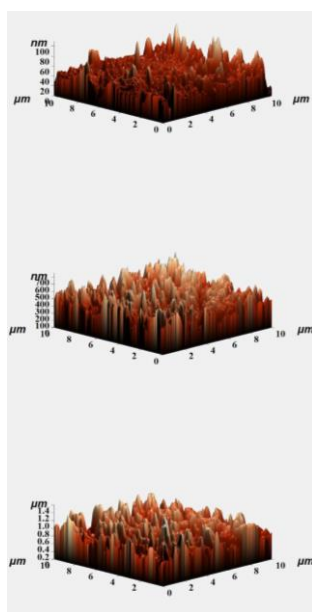
جدول ۲. مقادیر متوسط زبری (Ra) و متوسط مربع‌زبری (Rms) نمونه‌های تولید شده در دماهای مختلف زیر لایه.

نمونه	دمای زیر لایه (°C)	متوسط زبری سطح ((nm)	جذر متوسط زبری سطح (nm)
۱	دمای اتاق	۳۵/۱۵۷	۱۲/۱۹۶
۲	۱۰۰	۶۳/۷۴	۲۲/۹۴
۲	۴۰۰	۲۵/۱۷	۳۸/۲۰

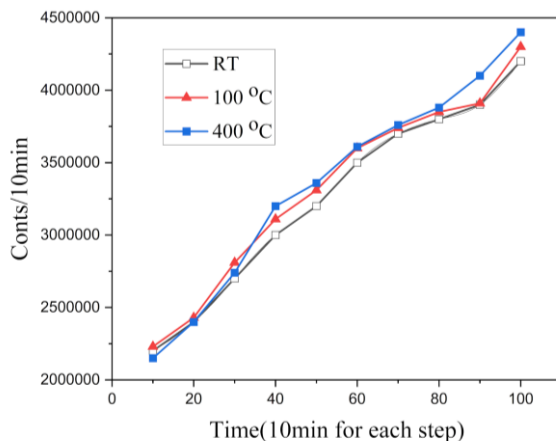
جدول ۲ اندازه زبری نمونه‌های تیتانیوم را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. با افزایش دما، ۱۰۰ °C زبری سطح به مقدار کمی کاهش یافته است و در دمای ۴۰۰ °C همچنان از زبری سطح لایه‌ها کاسته می‌شود. در دمای اتاق به دلیل تشکیل فازهای مختلف تیتانیوم لایه به یک شکل رشد نمی‌کند، پس توزیع دانه‌ها به صورت غیر یکنواخت می‌باشد و زبری لایه‌ها مقادیر بزرگتری است. در بحث همپوشانی با نتایج بلورنگاری می‌توان گفت در دمای ۴۰۰ °C با وجود تک فاز Ti(۰۰۲) یکنواختی سطح مشاهده می‌شود. در این دما، اندازه بلورکها افزایش می‌یابد. با توجه به مقادیر زبری داده شده به کمک AFM می‌توان اظهار داشت که علی‌رغم تغییرات جزئی مشاهده شده در زبری، نمونه‌های تهیه شده در زیر لایه‌های گرما داده شده، از سطحی نسبتاً صاف و هموار تشکیل شده‌اند.

۳.۳. اندازه‌گیری شار نوترونی

در این مطالعه گسیل نوترون با استفاده از شتابگر الکترواستاتیک ۱۵۰ keV بررسی شد. همه هدف‌های ساخته شده تحت بمباران با باریکه دوترون قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بالاترین بازدهی برای نمونه‌های تولید شده در شرایط دمای زیر لایه ۴۰۰ °C به دست آمده است.



شکل ۳. تصاویر دو و سه‌بعدی نمونه‌های تولید شده در دماهای مختلف زیر لایه: آ: دمای اتاق ب: ۱۰۰ °C ج: ۴۰۰ °C



شکل ۴ شمارش ثبت شده توسط آشکارساز BF3 در بازه‌های ده دقیقه‌ای برای هدف‌های ساخته شده در دماهای مختلف زیرلایه

بالاترین بهره نوترونی برای هدفی با کمترین تخلخل و بالاترین دمای زیرلایه حین انباشت، به دست آمده است. به نظر می‌رسد که ریخت‌شناسی اولیه لایه‌نازک یک گام تعیین‌کننده برای ساخت هدف می‌باشد. نتایج به دست آمده در این مطالعه با مدل موجان^۳ سازگار است [۶]. در این مدل، برای مورد خاص تیتانیوم، دمای زیرلایه 310°C یک دمای بحرانی برای زیرلایه حین انباشت محسوب شده است.

برای دماهای کوچکتر از 310°C میکروساختارهایی با تخلخل بالا و سرشار از حفره و نقص تولید شده‌اند. برای دماهای بین 310°C و 698°C اندازه دانه افزایش پیدا کرده و ساختارها فشرده‌تر می‌شوند. علاوه بر این، این مرجع نشان می‌دهد که بهره نوترونی با فشردگی لایه‌نازک تیتانیوم در ارتباط است [7]. طبق نتایج آزمون شمارش نوترون با شتابدهنده، ریخت‌شناسی لایه‌نازک هدف بر گسیل نوترون و همچنین خصوصیات مکانیکی تأثیر دارد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری:

در این مقاله با استفاده از روش کندوپاش یونی لایه‌نازک تیتانیوم بر روی یک بستر مسی در دماهای مختلف زیرلایه لایه نشانی شد. نتایج بلورنگاری نشان داد که در تمام دماها، جهت (۰۰۲) فاز تیتانیوم جهت ترجیحی باقی مانده است. افزایش دمای زیرلایه منجر به کسب انرژی جنبشی بیشتر توسط ذرات فرودی می‌شود، که باعث بهبود نظم ساختاری شبکه و تقویت بلورینگی سیستم می‌شود. با افزایش دمای زیرلایه به 400°C ، شدت قله (۰۰۲) افزایش یافته است. این افزایش در شدت نشان‌دهنده تقویت تک‌بلوری شدن لایه تیتانیوم است. در مبحث ریخت‌شناسی، عدم توزیع یکنواخت اندازه دانه‌ها در سطح می‌تواند به وجود فازهای کریستالی مختلف در لایه برگردد. این فازهای مختلف از نظر سینتیک رشد و ساختاری با هم متفاوت هستند و این تفاوت‌ها می‌تواند باعث عدم یکنواختی توزیع اندازه دانه‌ها شود. در دمای 400°C ، فاز غالب (۰۰۲) است و لایه تقریباً متشکل از تک‌فاز تیتانیوم می‌باشد. این شرایط باعث افزایش یکنواختی توزیع اندازه دانه‌ها می‌شود. در واکنش DD بازده نوترون ارتباط مستقیمی با یکپارچگی ساختاری لایه های نازک دارد و از طرفی دمای بستر به طور قابل توجهی بر یکپارچگی ساختاری لایه های نازک تأثیر می‌گذارد. دماهای زیر 310°C و بالای 698°C برای حفظ کیفیت ساختاری مورد نیاز کمتر مطلوب هستند. بنابراین می‌توان گفت دمای بستر نقشی محوری در واکنش DD ایفا می‌کند و بر تولید نوترون تأثیر می‌گذارد. در این مقاله محدوده دمایی بهینه (حدود 400°C) بالاترین بازده را برای تولید نوترون در چنین واکنش‌هایی نشان داد.



۵. مراجع:

- [1] J. Liu, J. Lu, X. Xu, C. Li, Y. Wang, H. He, Mater. Res. Express ۹ ۰۱۵۰۳۲۰۲۲
- [۲] P. Tayyebi, F. Abbasi, Workshop on Real Time Measurement, Instrumentation & Control, OshawaUniversity, Toronto, ۲۰۱۰ ۲۵-۲۶.
- [۳] A. S. Demin, E. V. Morozov, S. A. Maslyaev, V. N. Pimenov, V. A. Gribkov, E. V. Demina, I. P. Sasinovskaya, V. P. Sirotinkin, U. S. Sprygin, G. G. Bondarenko, A. N. Tikhonov, A. I. Gaidar, Inorg. Mater. Appl. Res. ۸, ۲۰۱۷ ۴۱۲-۴۱۸
- [۴] A, Kameneva, Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences ۶(۵) ۲۰۱۵ ۹۵۱-۹۶۰
- [۵] He, J.L. Setsuhara, Shimizu, Y. Miyake, I. S. Surface and Coatings Technology ۲۰۰۱ ۱۳۷, ۳۸-۴۲.
- [۶] A.M. Durand, A. Richardt, Le vide, les Couches Minces, les Couches dures, August ۱۹۹۴, IMB Vesoul, France, Editions in Fine.
- [۷] A.M. Durand, A. Richardt, Le vide, les Couches Minces, les Couches dures, August ۱۹۹۴, IMB Vesoul, France, Editions in fine.



طراحی و شبیه سازی پنجره رادیوفرکانسی باند S در سیستم رادیوفرکانسی شتابدهنده خطی

با استفاده از مگنترون ۲.۴۵ گیگاهرتز (کد مقاله : ۱۲۸۵)

تفتیش، فاطمه^{۱*} - صادقی، حسین^۱ - فاضل پور، سمانه^۲ - امراللهی، رضا^۱

۱. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، گروه گداخت هسته ای
۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و مهندسی گداخت

چکیده:

در این پژوهش، طراحی و شبیه‌سازی یک پنجره رادیوفرکانسی (RF) باند S از نوع پیل‌باکس برای استفاده در سیستم‌های RF شتابدهنده خطی ارائه شده است. هدف اصلی این تحقیق، بهینه‌سازی انتقال توان از مگنترون ۲.۴۵ گیگاهرتز به ساختار شتابدهنده، کاهش بازتاب و بهبود پایداری سیستم است. در طراحی این پنجره، از دیسک کوارتز به‌عنوان ماده دی‌الکتریک به دلیل ثابت گذردهی مناسب، تلفات کم و پایداری حرارتی بالا استفاده شده است. فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده و پارامترهای مهمی مانند تطبیق امپدانس، بازده انتقال، پایداری فرکانسی و میزان تلفات بررسی شده‌اند. طراحی پیشنهادی با کاهش انعکاس امواج و افزایش بازده انتقال، موجب بهبود عملکرد سیستم شتابدهنده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که پنجره پیشنهادی قادر است توان RF را با حداقل تلفات منتقل کرده و از آسیب‌های ناشی از امواج بازگشتی به منبع تغذیه جلوگیری کند. این ویژگی‌ها، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای شتابدهنده‌های خطی مبتنی بر منابع تغذیه مگنترونی تبدیل می‌کند.

کلمات کلیدی: شتابدهنده خطی، پنجره پیل باکس رادیوفرکانسی، کوارتز

Design and simulation of S-band radiofrequency window in linear accelerator radiofrequency system using ۲,۴۵ GHz magnetron

Taftish, Fatemeh^{۱*}, Sadeghi, Hossein^۱, Fazelpour, Samaneh^۲, Amrollahi, Reza^۱

۱. Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology, P.O. Box ۱۵۹۱۶۳۴۳۱۱ Tehran, Iran

۲. Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹, Tehran, Iran

Abstract:

In this study, the design and simulation of an S-band radio frequency (RF) pillbox-type window for use in RF linear accelerator systems are presented. The primary objective of this research is to optimize power transmission from a ۲,۴۵ GHz magnetron to the accelerator structure,



reduce reflection, and enhance system stability. In the design of this window, a quartz disc is used as the dielectric material due to its suitable permittivity, low loss, and high thermal stability. The simulation process is conducted using COMSOL software, and important parameters such as impedance matching, transmission efficiency, frequency stability, and power loss are analyzed. The proposed design improves the accelerator system's performance by minimizing wave reflection and increasing transmission efficiency. The results indicate that the proposed RF window can efficiently transmit power with minimal loss while preventing damage to the power source from reflected waves. These features make it an ideal choice for linear accelerators powered by magnetron-based RF sources.

Key words: Linear accelerator, RF pillbox window, quartz

۱ - مقدمه:

شتاب‌دهنده‌های خطی (Linear Accelerators) یکی از ابزارهای مهم در حوزه‌های مختلف علمی و صنعتی هستند که از آن‌ها برای تولید پرتوهای الکترونی یا یون‌های پرانرژی استفاده می‌شود. این ابزارها در کاربردهایی همچون تحقیقات بنیادی، پزشکی (مانند پرتودرمانی)، تولید پرتوهای ایکس با انرژی بالا، و حتی در حوزه‌های امنیتی (مانند اسکن بار) نقش مهمی دارند. یکی از اجزای مهم در شتاب‌دهنده‌های خطی، سیستم رادیوفرکانسی است که انرژی الکترومغناطیسی لازم را برای شتاب‌دهی ذرات فراهم می‌کند. در این سیستم‌ها، انتقال پایدار و با راندمان بالای توان رادیوفرکانسی از منبع تولید (مانند مگنترون) به ساختار شتاب‌دهنده، از اهمیت بالایی برخوردار است. [۱-۵]

پنجره رادیوفرکانسی به‌عنوان یک بخش مهم در سیستم‌های شتاب‌دهنده خطی وظیفه جداسازی محیط خلأ داخل شتاب‌دهنده از محیط بیرونی را دارد. علاوه بر این، این قطعه باید امکان عبور امواج الکترومغناطیسی با کمترین تلفات و بیشترین پایداری را فراهم کند. طراحی پنجره رادیوفرکانسی یک چالش محسوب می‌شود، زیرا باید به طور همزمان با فشار خلأ، توان بالا، و حرارت ناشی از جریان‌ها کنار بیاید. همچنین، در فرکانس‌های پایین‌تر مانند ۲.۴۵ گیگاهرتز که تطبیق امپدانس دقیق‌تر و کاهش تلفات بازتاب اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، نیاز به طراحی خاصی وجود دارد. [۱-۵]

مگنترون‌ها یکی از پرکاربردترین منابع تولید توان رادیوفرکانسی هستند و در سیستم‌های شتاب‌دهنده کوچک و مقرون‌به‌صرفه به کار می‌روند. فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز که معمولاً در مگنترون‌های صنعتی استفاده می‌شود، به دلیل در دسترس بودن تجهیزات مرتبط و کارایی بالا، گزینه‌ای مناسب برای بسیاری از کاربردهای صنعتی و پزشکی است. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی استفاده از مگنترون در شتاب‌دهنده‌های خطی، تطبیق امپدانس بین مگنترون و ساختار شتاب‌دهنده از طریق پنجره RF است. این تطبیق باید به گونه‌ای باشد که بازده انتقال توان به حداکثر و تلفات بازتاب به حداقل برسد.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی برای بهبود طراحی پنجره‌های RF انجام شده است. در برخی از این پژوهش‌ها، بر توسعه پنجره‌های باند S با پایداری بالا تمرکز شده و نشان داده شده است که طراحی مناسب هندسه و انتخاب مواد می‌تواند عملکرد این پنجره‌ها را بهبود بخشد [۱]. در تحقیقاتی دیگر، اهمیت استفاده از مگنترون با فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز در سیستم‌های شتاب‌دهنده بررسی شده و روش‌های افزایش بازده انتقال توان مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]. همچنین، در



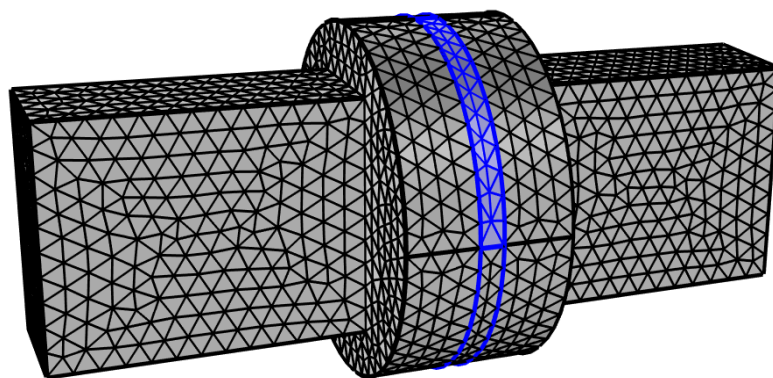
برخی مطالعات به طراحی پنجره‌هایی پرداخته شده که بتوانند در برابر بارهای حرارتی بالا و توان‌های ورودی زیاد، عملکرد قابل اعتمادی ارائه دهند [۳].

۲- روش طراحی و شبیه‌سازی

برای طراحی و شبیه‌سازی پنجره RF باند S، از نرم‌افزار کامسول که یک ابزار پیشرفته در تحلیل الکترومغناطیس است، استفاده شده است. نرم‌افزار COMSOL Multiphysics یک نرم‌افزار بسیار قدرتمند در شبیه‌سازی سه بعدی انواع سیستم‌ها با روش حل المان محدود (FEM)، معادله دیفرانسیل جزئی (PDE) است. [۴] ماژول‌های کلیدی مورد استفاده در این مطالعه شامل ماژول امواج الکترومغناطیسی برای مدیریت انتشار و انتقال موج، ماژول انتقال حرارت برای ارزیابی ویژگی‌های حرارتی است هندسه انتخاب شده برای این طراحی، ساختار معروف به "Pill Box" است که به دلیل ویژگی‌های تطبیق امپدانس عالی و پایداری در شرایط توان بالا، به طور گسترده در سیستم‌های RF استفاده می‌شود. این ساختار شامل دو موجبر مستطیلی و دو موجبر دایره‌ای است که توسط بخش مرکزی از جنس شیشه کوارتز به یکدیگر متصل شده‌اند. شیشه کوارتز، به عنوان یک ماده دی‌الکتریک با تلفات کم و استحکام مکانیکی بالا، در کاهش بازتاب امواج و بهبود انتقال توان نقش بسزایی دارد.

فرکانس کاری برای این پنجره RF برابر با ۲.۴۵ گیگاهرتز تنظیم شده است که با فرکانس تولیدی مگنترون کاملاً تطبیق دارد. توان ورودی نیز در مقدار ۱۰۰۰ وات تعیین شده تا شرایط واقعی عملکردی شبیه‌سازی شود. این مقدار توان معمولاً در سیستم‌های شتاب‌دهنده خطی کوچک و متوسط کاربرد دارد و بیانگر نیاز به یک طراحی مقاوم در برابر دما و فشارهای ناشی از انتقال توان بالا است.

در گام نخست، هندسه پنجره در محیط کامسول به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. دو موجبر مستطیلی با مد TE_{10} به یک موجبر دایره‌ای با مد TE_{10} وصل شده است و طول و عرض و ارتفاع موجبر مستطیلی که در نظر گرفته شده است، به ترتیب برابر با ۱۰، ۴، ۸ سانتی‌متر است. در شکل ۱، نمایی از هندسه پنجره رادیوفرکانسی مدلسازی شده نشان داده شده است.



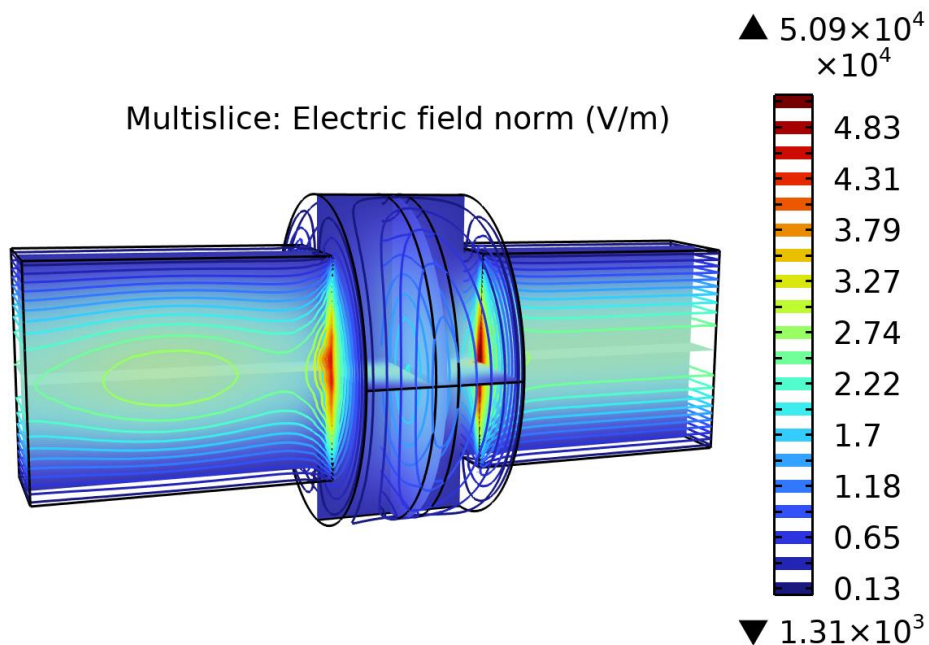
شکل ۱: نمایی از هندسه پنجره رادیوفرکانسی مدلسازی شده در نرم‌افزار کامسول

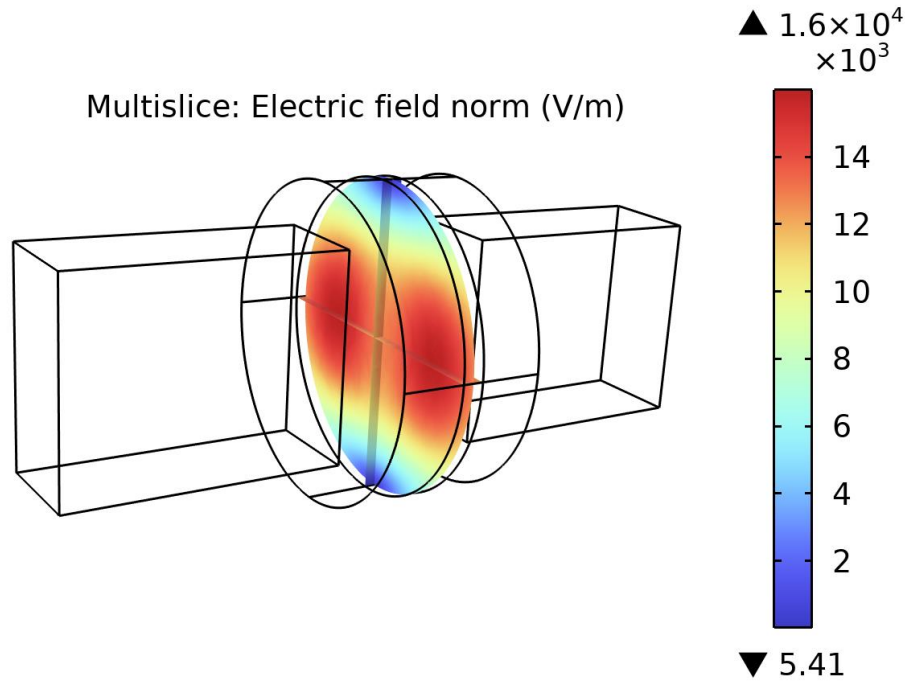


پس از مدل‌سازی هندسی، خواص مواد به هر بخش اختصاص داده شد. برای موجرها هوا به‌عنوان ماده شبیه‌سازی شده برای اجزای موجبر انتخاب می‌شود. باین‌حال، توجه به این نکته مهم است که در محیط شبیه‌سازی کامسول، هوا به‌عنوان رسانا در نظر گرفته می‌شود تا اثرات را که ممکن است از فعل‌وانفعالات الکترومغناطیسی به وجود بیاید، دریافت کند.

خواص مواد هوا در شبیه‌سازی شامل نمایشی از رسانایی آن است که به شبیه‌سازی اجازه می‌دهد هر پدیده مرتبط با رسانایی را که ممکن است بر انتشار موج و انتقال حرارت در موجبر تأثیر بگذارد، توضیح دهد. بر خلاف پنجره‌های RF موجود که از جنس‌های دیگری مانند آلومینا و یاقوت کبود ساخته شده‌اند، در این تحقیق از شیشه کوارتز به‌عنوان جزء اصلی پنجره RF استفاده شده است. استفاده از شیشه کوارتز به دلیل خواص الکتریکی بسیار خوب، تلفات کم و استحکام مکانیکی بالا، منجر به کاهش بازتاب امواج و بهبود انتقال توان در این پنجره RF شده است. همچنین از نظر اقتصادی به صرفه تر است. سپس، شرایط مرزی برای موجرها اعمال گردید تا میدان‌های ورودی و خروجی مطابق با شرایط کاری واقعی تعریف شوند.

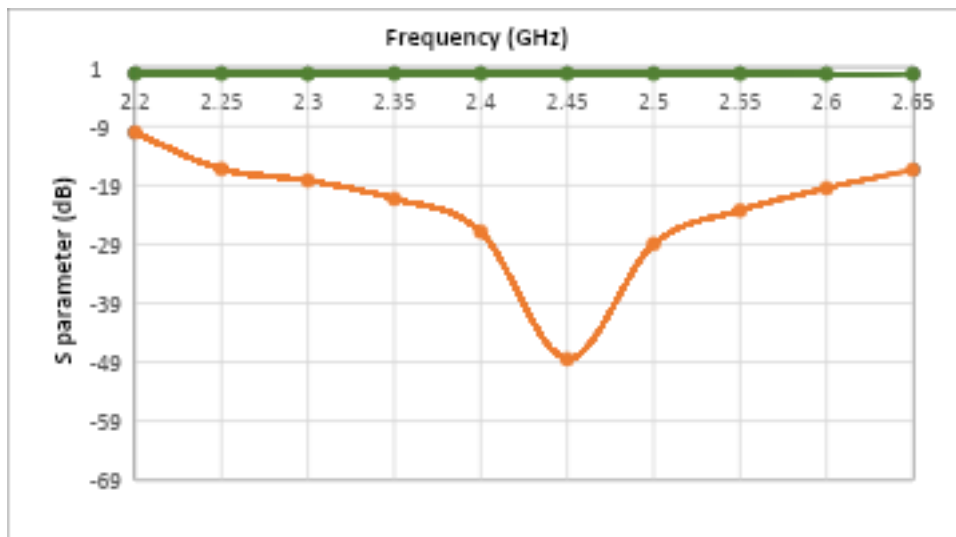
برای تحلیل عملکرد پنجره RF، پارامترهای کلیدی شامل ضرایب بازتاب S_{11} ، تطبیق امپدانس و توزیع میدان الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفتند. این پارامترها با استفاده از تحلیل حوزه فرکانسی در نرم‌افزار محاسبه شدند. علاوه بر این، توزیع میدان الکتریکی در بخش‌های مختلف پنجره به منظور ارزیابی بیشینه نقاط داغ و بررسی احتمال آسیب‌های حرارتی تحلیل شد. تغییرات میدان الکتریکی در موجرهای پنجره و کوارتز مابین موجرها در شکل ۲ نشان داده شده است.





شکل ۲: تغییرات میدان الکتریکی در موجبرهای پنجره و کوارتز مابین موجبرها

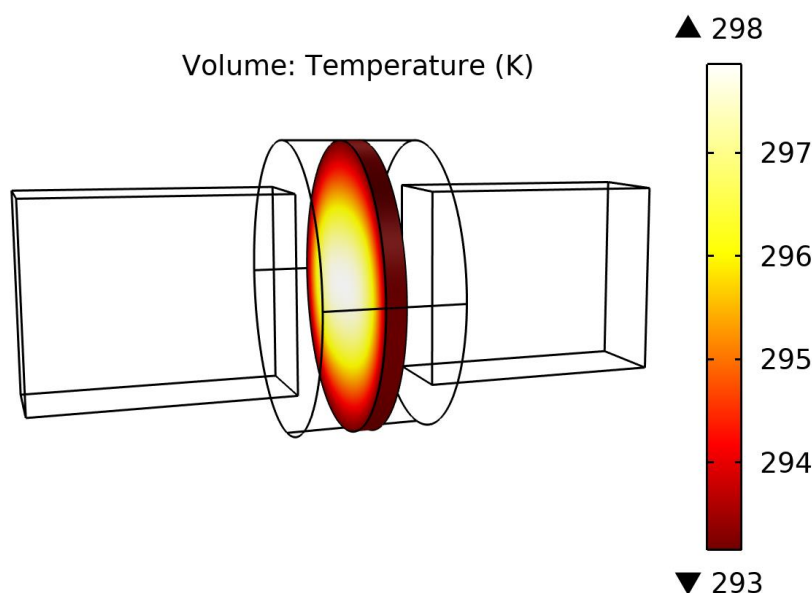
در مرحله بعدی، پارامترهای پراکندگی اعم از ضرایب S_{11} و S_{21} نسبت به تغییرات فرکانس مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۳، پاسخ فرکانسی پارامترهای S پنجره رادیوفرکانسی شبیه سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۳: پاسخ فرکانسی پارامترهای S پنجره رادیوفرکانسی شبیه سازی شده



این نمودار به تحلیل پارامترهای مرتبط با پنجره رادیو فرکانسی شتاب‌دهنده خطی (LINAC) در بازه فرکانسی ۲.۲ تا ۲.۶۵ گیگاهرتز اشاره دارد. محور عمودی مقادیر پارامتر S را به دسی‌بل نشان می‌دهد، که برای ارزیابی بازتاب و انتقال سیگنال استفاده می‌شود. منحنی نارنجی افت شدیدی در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز دارد و به مقدار حداقل حدود -۵۰ دسی‌بل می‌رسد. این نشان‌دهنده تطبیق بسیار خوب امپدانس در این فرکانس است. چنین افتی در پارامتر S (بازتاب) نشان می‌دهد که انرژی RF به طور بهینه به ساختار شتاب‌دهنده وارد می‌شود و تلفات انرژی ناشی از بازتاب کاهش یافته است. منحنی سبز، که ۲۱S (انتقال) را نشان می‌دهد، تقریباً در تمام بازه فرکانسی ثابت و نزدیک به ۰ دسی‌بل باقی می‌ماند. این بیانگر انتقال پایدار و کارآمد توان RF از منبع به شتاب‌دهنده است. در ادامه به بررسی حرارتی عایق کوارتز برای موج میکروویو ۲/۴۵ گیگاهرتز با توان ۱۰۰۰ وات پرداخته خواهد شد. پروفایل دمایی کوارتز در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: پروفایل دمایی کوارتز

در شکل ۴ توزیع دما به صورت محوری و شعاعی بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین دما در مرکز پنجره، جایی که انرژی امواج الکترومغناطیسی بیشتر جذب می‌شود، رخ می‌دهد و به رنگ زرد نمایش داده شده است. دما در لبه‌ها کمتر است و به سمت رنگ قرمز متمایل می‌شود. بازه دمایی بین ۲۹۳K در لبه‌ها تا ۲۹۸K در مرکز تغییر می‌کند.

تغییرات دمایی مشاهده شده در محدوده‌ای کنترل شده و متناسب قرار دارد، که نشان‌دهنده طراحی مناسب پنجره برای مدیریت حرارت ناشی از امواج RF است. این تغییرات محدود دما احتمال تنش‌های حرارتی و آسیب ساختاری را کاهش می‌دهد و عملکرد پایدار پنجره را تضمین می‌کند. تحلیل دمایی ارائه شده نشان می‌دهد که طراحی حرارتی بهینه‌سازی شده و از بروز اثرات مخرب مانند ترک خوردگی یا تغییرات مکانیکی در طول عملکرد شتاب‌دهنده جلوگیری می‌شود.



۳ - نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی یک پنجره RF در باند S با استفاده از نرم‌افزار کامسول بررسی شد. نتایج نشان داد که طراحی پیشنهادی می‌تواند انتقال پایدار توان از مگنترون به ساختار شتاب‌دهنده را به‌طور مؤثر تضمین کند. بیشترین شدت میدان در نزدیکی شیشه کوارتز مشاهده گردید که بر اهمیت انتخاب دقیق مواد دی‌الکتریک تأکید دارد.

توزیع یکنواخت توان در موجبرهای مستطیلی و دایره‌ای به‌خوبی تأیید شد و نشان‌دهنده عملکرد مطلوب طراحی در این بخش است. نتایج شبیه‌سازی با پیش‌بینی‌های تئوری هم‌راستا بوده و تطبیق بهینه امپدانس و بازده بالای انتقال توان، دقت طراحی را نشان می‌دهد.

استفاده از شیشه کوارتز به‌عنوان دی‌الکتریک مرکزی، علاوه بر کاهش تلفات، موجب بهبود مقاومت پنجره در برابر آسیب‌های حرارتی ناشی از توان بالا می‌شود. همچنین، نوآوری اصلی این تحقیق، استفاده از شیشه کوارتز در فرکانس کاری پایین‌تر (۲.۴۵ گیگاهرتز) است که در مقایسه با تحقیقات پیشین، ویژگی جدید و مهمی محسوب می‌شود.

مراجع:

۱. Joo, Y., et al. (۲۰۱۷). "Development of new S-band RF window for stable high-power operation in linear accelerator RF system." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ۸۶۶: ۱-۸.
۲. Rezon, K., et al. (۲۰۲۳). Design of S-Band accelerator structure utilizing ۲,۴۵ GHz magnetron. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing.
۳. Leggieri, A., et al. (۲۰۱۴). Tuned window for standing wave linear accelerators. Progress In Electromagnetic Research Symposium, Guangzhou
۴. Pryor, R. W. (۲۰۰۹). Multiphysics modeling using COMSOL®: a first principles approach, Jones & Bartlett Publishers.
۵. Matsumoto, H. (۱۹۹۹). Development of a high power RF-window at S-band. Frontiers of Accelerator Technology, World Scientific: 795-814.



طراحی موازی کننده نوترون برای شتاب‌دهنده ES200 با استفاده از ابزار مونت کارلو

Geant4 (کد مقاله : ۱۲۹۵)

طباہی، کیوان^۱ - میرزایی، حمیدرضا^۱ - امیرمحمد سامعی^۱
۱. پژوهشکده فیزیک و شتابگر، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای.

چکیده:

این پژوهش با هدف شبیه‌سازی سیستم تصویربرداری نوترون حرارتی برای شتاب‌دهنده ES200 پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای با استفاده از ابزار Geant4 انجام شده است و تمرکز اصلی بر طراحی موازی‌کننده نوترون برای کاهش واگرایی و بهبود کیفیت تصویر است. نتایج نشان داد که افزایش نسبت طول به قطر موازی‌کننده L/D شار نوترون‌های حرارتی را کاهش می‌دهد. اما این افزایش باعث کاهش واگرایی نوترون‌ها نیز می‌شود. نسبت L/D برابر ۵۰ به‌عنوان نقطه بهینه شناسایی شد. علاوه بر این، لایه‌های جاذب نوترون و محافظ گاما با مواد مناسب نقش مهمی در افزایش ایمنی و بهبود وضوح تصاویر داشتند. کلمات کلیدی: موازی‌کننده، کندکننده، نوترون، تصویربرداری

Neutron collimator design for ES^{۲۰۰} accelerator using Geant^۴ toolkit

Tabaei, Keyvan^{۱*}, Mirzaei, Hamidreza^۱, AmirMohammad Samei^۱

^۱. Physics and Accelerator School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI)

Abstract:

This study aims to simulate and optimize a neutron imaging system using the Geant^۴ tool. The primary focus was on designing a neutron collimator to reduce beam divergence and enhance image quality. The results indicated that increasing the collimator's length-to-diameter ratio (L/D) significantly reduces thermal neutron flux. However, this increase also reduces neutron divergence. An optimal L/D ratio of ۵۰ was identified as the balance point. Furthermore, neutron-absorbing and gamma-shielding layers, composed of suitable materials, played a crucial role in enhancing safety and improving image resolution.

Key words: Collimator, Moderator, neutron, imaging , Geant^۴



۱ - مقدمه:

فناوری تصویربرداری با نوترون یک روش مهم برای ارزیابی غیرمخرب است. بسته به انرژی نوترون، تصویربرداری با نوترون می‌تواند به تصویربرداری با نوترون سریع و تصویربرداری با نوترون حرارتی طبقه‌بندی شود. نسبت به تصویربرداری با نوترون سریع، تصویربرداری با نوترون حرارتی به علت رزولوشن بالا و کارایی بالای تشخیص، توجه قابل ملاحظه‌ای را جلب کرده است [1]. تصویربرداری با نوترون حرارتی با تصویربرداری با پرتو ایکس تفاوت دارد، چون کاهش شدت نوترون‌های حرارتی توسط عناصر به طور مستقیم متناسب با عدد اتمی عناصر نیست. در نتیجه، نوترون‌های حرارتی می‌توانند به راحتی از مواد فلزی عبور کنند، اما در زمان عبور از موادی با سطح مقطع بالا جذب نوترون، مانند هیدروژن، لیتیوم و بور، کاهش شدت قابل توجهی تجربه می‌کنند [1,2]. امروزه، مولدهای نوترون به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند و مزایای زیادی دارند؛ آنها در مقایسه با راکتورها و منابع نوترونی ایزوتوپی، مولدهای نوترون ایمن‌تر هستند، همچنین امکان روشن و خاموش شدن در زمان لازم دارند، که ایمنی عملیاتی و حمل و نقل آنها را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، سیستم‌های مبتنی بر شتاب‌دهنده قابل حمل و نسبتاً ارزان هستند که آنها را برای کاربردهای میدانی و تأسیسات کوچک عملی‌تر می‌کند. انعطاف‌پذیری این سیستم‌ها امکان تنظیم ویژگی‌های باریکه نوترونی، مانند طیف انرژی قابل تنظیم، را فراهم می‌کند که می‌توان آن را برای نیازهای تصویربرداری خاص بهینه کرد [3, 4]. از جمله واکنش‌های رایج برای تولید نوترون، واکنش D-D است که به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، واکنش‌های $T(D, n)^4He$ و سایر واکنش‌ها مانند $Be(D, n)^{10}B^9$ و $Li(D, n)^8Be^7$ نیز گزینه‌های مهمی برای تولید نوترون با انرژی‌های متفاوت هستند. در سال ۲۰۲۰، ادل^۵ و همکاران از MCNP برای طراحی یک کندکننده بهینه به منظور کاهش سرعت نوترون‌های سریع ناشی از یک تولیدکننده نوترون D-D استفاده کردند و موفق به تصویربرداری از چندین ترک شدند [6]. در سال ۲۰۲۴، هان چن و همکاران از SuperMC برای طراحی و شبیه‌سازی کندکننده و موازی کننده در یک سیستم تصویربرداری نوترونی مبتنی بر تولیدکننده نوترون D-T استفاده کردند. شبیه‌سازی‌های آنها نشان داد که این سیستم تمام پارامترهای عملکردی لازم برای تصویربرداری با نوترون را برآورده می‌کند، گرچه L/D نسبتاً پایین بود، منجر به تصاویر با رزولوشن پایین شد [7]. یکی از محدودیت‌های طراحی سیستم‌های تصویربرداری با نوترون حرارتی با استفاده از مولدهای نوترون، بازده نسبتاً پایین آنها در مقایسه با راکتورهای هسته‌ای است. از این رو، بهینه‌سازی و طراحی برای بهبود کیفیت تصویر در این سیستم‌ها ضروری است [8,9]. جیکوب^۶ و همکاران در سال ۲۰۲۲ با استفاده از نرم‌افزار MCNPX 2.4.0، یک سیستم تصویربرداری نوترونی را شبیه‌سازی کردند که از نوترون‌های حرارتی حاصل شده از یک شتاب‌دهنده پروتون با انرژی ۱۳ MeV بهره می‌برد. طراحی موازی کننده به گونه‌ای انجام شد که بالاترین جریان نوترون‌های حرارتی را تأمین کند. آنها نشان دادند افزودن یک فیلتر نوترون سریع به بهبود نسبت شار نوترون حرارتی به شار کل کمک می‌کند [5]. در این پژوهش تمرکز بر شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک موازی کننده نوترون با استفاده از ابزار Geant4 برای نوترون‌های تولید شده به وسیله شتاب دهنده الکترواستاتیک ES200، ساخته شده در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، است. این شتاب دهنده توانایی تولید باریکه دوتریوم تا انرژی ۲۰۰ keV و جریان $600 \mu A$ در حالت بهینه را دارد.

^۵ Yumna Adel

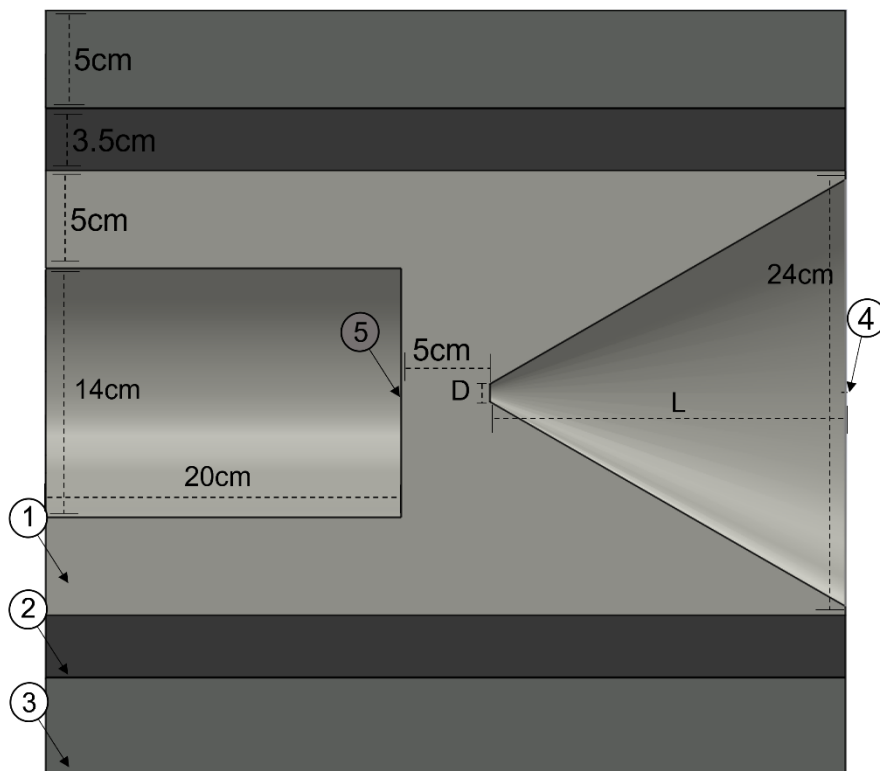
^۶ Jacob G. Fantidis



شکل ۱ شتابدهنده الکترواستاتیک ES200

۲ - شتاب دهنده الکترواستاتیک ES200:

یک شتاب‌دهنده 200 keV از نوع ککروف- والتون، شکل ۱، در حال حاضر در حال توسعه و نصب در پژوهشگاه علوم و فنون می‌باشد. سیستم شتاب‌دهنده شامل اجزای اساسی از جمله منبع یون، لوله شتاب‌دهنده، سیستم انتقال پرتو و تشخیص‌های چندمنظوره پرتو می‌باشد. پس از استخراج یون‌ها از چشمه یونی، آنها از طریق یک لوله شتاب می‌گیرند. این لوله دارای دو نوع متمایز از الکترودها است: (۱) الکترودهای کانونی با پتانسیل قابل تنظیم برای تنظیم دقیق ویژگی‌های دینامیکی پرتو، و (۲) الکترودهای شتاب‌دهنده با پتانسیل ثابت که تنها برای شتاب دادن به ذرات استفاده می‌شوند. پس از دستیابی به یک پروفایل باریکه تقریباً خطی، تمرکز اصلی به شتاب دادن به ذرات معطوف می‌شود. الکترودهای شتاب‌دهنده انرژی ذرات را با استفاده از یک میدان الکترواستاتیک افزایش می‌دهند. نتایج تجربی نشان داده اند که یک جریان باریکه 600 میکرو آمپر در شرایط بهینه قابل دستیابی می‌باشد. به طور کلی، طراحی و عملکرد این شتاب‌دهنده پتانسیل پیشرفت تحقیقاتی و کاربردهای باریکه یونی از جمله تصویر برداری نوترون را دارد [۱۰].



شکل ۲ شماتیک برش مقطعی از موازی کننده که با استفاده از نرم افزار سالیدورک رسم شده است. ۱- موازی کننده پلی اتیلن ۲- کندکننده پلی اتیلن بور-دار ۳- محافظ گاما سرب ۴- محافظ گاما بیسموت ۵- محل چشمه

۳ - روش کار:

نوترون‌های سریع که در واکنش تولید می‌شوند، نیاز به کند شدن و تعدیل به نوترون‌های حرارتی دارند تا بتوان از آنها در تصویربرداری استفاده نمود. برای رسیدن به این هدف، از ماده تعدیل کننده استفاده می‌شود که در آن، نوترون‌ها با هسته‌های اتم‌های ماده برخورد کرده و انرژی خود را از دست می‌دهند تا به تعادل حرارتی با حرکت اتم‌های اطراف خود برسند. برای اینکه یک ماده بتواند به صورت مؤثر به عنوان یک تعدیل کننده عمل کند، باید دارای سطح مقطع پراکندگی بالا و سطح مقطع جذب پایین باشد. علاوه بر این، مقدار انرژی که در هر برخورد از دست می‌رود، باید بالا باشد تا انرژی نوترون با حداقل تعداد برخوردها کاهش یابد که به نوبه خود، اندازه کلی تعدیل کننده را کاهش می‌دهد. برخی از مهم‌ترین ماده‌ها برای مواد تعدیل کننده شامل آب سبک، آب سنگین، گرافیت و پلی اتیلن هستند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در این پژوهش از ۵ cm پلی اتیلن برای کند کردن نوترون‌های سریع استفاده شده است [۱۱].

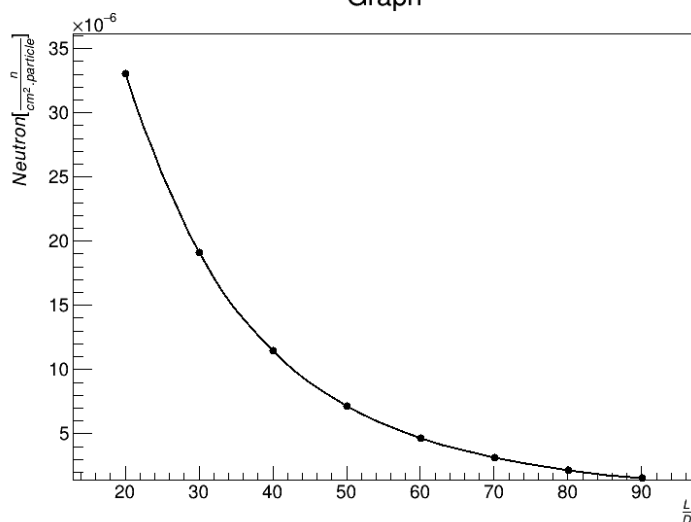
موازی کننده برای محدود کردن انحراف پرتو نوترون ورودی استفاده می‌شود. برای این منظور، یک دهانه به قطر ۱۰ mm ورود نوترون به موازی کننده را محدود می‌کند. نوترون‌هایی که در جهت مطلوب در طول موازی کننده حرکت نمی‌کنند، توسط مواد جاذب نوترون جذب می‌شوند. در هر سیستم تصویربرداری با نوترون حرارتی، پارامتر اصلی و قابل توجهی که کیفیت تصویر را تعیین می‌کند، نسبت $\frac{L}{D}$ است:

$$\phi_i = \frac{\phi_\alpha}{16\left(\frac{L}{D}\right)^2} \quad (1)$$

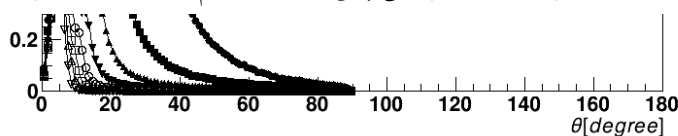


که در آن، مقدار شار نوترون در انتهای موازی کننده را نشان می‌دهد، شار نوترون در دهانه ورودی موازی کننده را توصیف می‌کند، L طول و D قطر دهانه ورودی موازی کننده را نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر در سیستم‌ها تصویر برداری نوترون حرارتی کمتر از ۱۰۰ است و در این پژوهش مقدار این پارامتر در بازه ۹۰ - ۲۰ در نظر گرفته شده است. از آنجا که نوترون‌های سریع تولید شده توسط شتابدهنده به طور همسانگرد انتشار می‌یابند، نوترون‌ها تنها از طریق موازی کننده منتشر نمی‌شوند، بلکه از جهات دیگر نیز از کندکننده خارج می‌شوند به همین دلیل قرار دادن یک لایه جاذب نوترون حرارتی به منظور حفاظ سازی در پشت کندکننده ضروری است. علاوه بر این، واکنش‌های جذب بین نوترون‌ها و هسته‌های اتم پرتوهای گاما تولید می‌کنند که افزودن بر اینکه می‌توانند سبب کاهش وضوح تصویر شوند، نیاز به حفاظ سازی نیز دارند. بنابراین، گنجاندن یک لایه محافظ گاما نیز لازم است. در این پژوهش لایه جذب نوترون شامل پلی اتیلن بوردار شده، که حاوی ۵٪ بور است، با ضخامت ۳.۵cm و در لایه محافظ گاما از جنس سرب با ضخامت ۵cm است. همچنین پس از دهانه دوم موازی کننده یک فیلتر با جنس بسموت و ضخامت ۲mm برای جذب گاما و بهبود در کیفیت تصویر قرار داده شده است. پس از هر لایه شار نوترون نوترون و گاما محاسبه می‌شود.

Graph



شکل ۴ تغییرات شار نوترون‌های حرارتی پس از دهانه دوم موازی کننده بر حسب L/D



رویکرد در نظر گرفته شده در انجام شبیه سازی این پژوهش بکارگیری Geant4 است که یک ابزار برای شبیه سازی ترابرد ذرات در ماده است. شکل ۳ توزیع زاویه ای شارنوترون‌ها هنگام عبور از دهانه دوم موازی کننده و با دسترسی متن-باز به شده و توسط محققان مختلف توسعه داده شده است [۱۲]. از این ابزار برای انجام مطالعات در زمینه های پزشکی، نجوم و صنعتی استفاده می‌شود. در هر شبیه سازی حداقل ۱۰^۸ نوترون تک انرژی ۲.۴۵MeV بصورت همسانگرد در ۴π گسیل می‌شوند.

۴ - نتایج

در این پژوهش، به منظور تصویربرداری با نوترون‌های حرارتی، از ترکیب مواد کندکننده و محافظ استفاده شد. نوترون‌های سریع تولید شده در شتابدهنده ابتدا با برخورد به ۵ سانتی متر پلی اتیلن کند شدند تا انرژی آن‌ها به سطح حرارتی کاهش



یابد و سپس به سمت موازی‌کننده هدایت شدند. شکل ۳ نشان‌دهنده ارتباط بین مقدار شار نوترون‌ها و نسبت L/D در موازی‌کننده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش مقدار L/D ، شار نوترون‌ها در انتهای موازی‌کننده به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. شکل ۴ توزیع زاویه‌ای شار نوترون‌ها هنگام عبور از دهانه دوم موازی‌کننده را نشان می‌دهد. باتوجه شکل، با افزایش مقدار L/D ، نوترون‌ها در زاویه‌های کوچکتر در انتهای موازی‌کننده توزیع میشوند.

۵ - بحث و نتیجه‌گیری:

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با استفاده از ابزار Geant^۴ نشان‌دهنده اهمیت طراحی بهینه پارامترهای سیستم تصویربرداری نوترونی است. شکل ۴ نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که با افزایش نسبت طول به قطر موازی‌کننده L/D ، شار نوترون‌های حرارتی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش شار اثر منفی بر کیفیت تصویر دارد و نیاز به افزایش زمان تصویربرداری برای جبران این کاهش را به‌وجود می‌آورد. بنابراین، برای حفظ کیفیت تصویر، نسبت L/D باید در حداقل ممکن نگه‌داشته شود. با این حال، در شکل ۳ نشان داده شده که افزایش نسبت L/D نیز موجب می‌شود که نوترون‌ها واگرایی کمتری داشته باشند. بنابراین، یافتن یک نقطه بهینه در بین این دو پدیده برای دستیابی به بهترین کیفیت تصویر ضروری است. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، به‌نظر می‌رسد نسبت L/D برابر ۵۰ به‌عنوان یک نقطه بهینه عمل کند؛ زیرا در این نقطه، زاویه نوترون‌ها دیگر به‌طور قابل‌توجهی کاهش نمی‌یابد و توزیع زاویه‌ای آن‌ها در یک بازه تقریباً ثابت باقی می‌ماند. علاوه بر این، بررسی‌های ما بر لزوم گنجاندن لایه‌های جاذب نوترون و محافظ گاما تأکید دارد. این لایه‌ها به افزایش ایمنی و کاهش اثرات منفی پرتوهای گاما بر کیفیت تصویر کمک می‌کنند. استفاده از پلی‌اتیلن بور-دار به‌عنوان جاذب نوترون و سرب به‌عنوان محافظ گاما با ضخامت‌های مشخص، به وضوح در نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها اثر مثبت داشته است. در نهایت، نتیجه‌گیری می‌شود که طراحی مؤثر بهینه‌شده پارامترهای سیستم‌های تصویربرداری نوترونی می‌تواند به بهبود کیفیت تصاویر به‌دست‌آمده کمک شایانی کند و همچنین زمینه‌ساز تحقیقات آتی در این حوزه باشد.

۶ - مراجع:

- [۱] Yu, Z., Zhang, Y., Zhang, H., Liu, C., Fang, Y., Wang, R., & Tang, B. (۲۰۲۴). Optimization study on the compact thermal neutron imaging system based on portable DT neutron generator. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۱۰۶۹, ۱۷۰۰۱۸.
- [۲] Fantidis, J. G., & Nicolaou, G. (۲۰۲۲, November). Thermal Neutron Radiography Facility Based on ۱۳ MeV Proton Linac on Be Target. In ۲۰۲۲ International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES) (pp. ۱-۴). IEEE.
- [۳] He, D. D., Jing, S. W., & Zheng, Y. L. (۲۰۲۱). Design and optimization of thermal neutron device based on deuterium-deuterium neutron generator. Fusion Engineering and Design, ۱۶۶, ۱۱۲۲۸۹.
- [۴] Hasemi, H., Kamiyama, T., Sato, H., Kino, K., Kiyanagi, Y., & Nakajima, K. (۲۰۱۷). Optimization of moderator size of thermal and epithermal neutron source based on a compact accelerator for neutron imaging. Physics Procedia, ۸۸, ۳۶۹-۳۷۵
- [۵] Fantidis, J. G., & Nicolaou, G. (۲۰۲۲, November). Thermal Neutron Radiography Facility Based on ۱۳ MeV Proton Linac on Be Target. In ۲۰۲۲ International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES) (pp. ۱-۴). IEEE.
- [۶] Adel, Y., Hamad, D. I., & Metwally, W. A. (۲۰۲۰). A feasibility study on the utilization of neutron generators in thermal neutron imaging. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, ۱۳(۱), ۲۸۸-۲۹۴.
- [۷] Li, H., Zhao, C., Qiao, S., & Zhang, T. (۲۰۲۰). Design of moderator and collimator for compact neutron radiography systems. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۹۵۹, ۱۶۳۵۳۵.



[۸] Chen, H., Qiao, S., Zhao, C., Zhang, T., & Yao, X. (۲۰۲۴). Design of moderator and collimator based on compact DT neutron source for neutron imaging. *Journal of Nuclear Science and Technology*, ۱-۷.

[۹] Wang, S., Deng, S., Tan, Z., Lu, H., Zhen, H., Hao, J., ... & Chen, J. (۲۰۲۳). The multifunctional neutron imaging system at GPPD: Design, principles and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, ۱۰۵۲, ۱۶۸۳۱۵.

[۱۰] Mirzaei, H., Sanaye, S. H., Yadollahzadeh, B., Shirshekan, M., Hasanpour, O., Mobaraki, Z. R., ... & Najafian, A. (۲۰۲۵). Development and performance analysis of the ۲۰۰ keV Cockcroft-Walton ion accelerator. *Results in Physics*, ۶۸, ۱۰۸۰۸۹.

[۱۱] Design and simulation of neutron/gamma shielding for coincidence Doppler Broadening Spectroscopy based on neutron generator using $^{113}\text{Cd} (n,\gamma) ^{114}\text{Cd}$ nuclear reaction

[۱۲] Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... & Geant ϵ Collaboration. (۲۰۰۳). GEANT ϵ —a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, ۵۰۶(۳), ۲۵۰-۳۰۳.



طراحی و شبیه سازی یک فیلتر دیجیتال سامانه فیدبک خوشه به خوشه طولی حلقه انبارش

چشمه نور ایران و بررسی تاثیر آن بر پایداری باریکه ذرات (کد مقاله : ۱۳۱۱)

بابائی، علی اکبر^۱ - صادقی پناه، آرش^۲ - خرسندی، مجید^۱

۱. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

۲. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، پژوهشکده ذرات و شتابگرها

۳. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طرح چشمه نور ایران

چکیده:

برای تضمین ارائه تابش سینکروترونی با درخشندگی بالا، پایداری باریکه الکترونی در صفحات طولی و عرضی ضروری است. عامل اصلی ناپایداری‌های طولی در شتابگرهای سینکروترون، مدهای مرتبه بالاتر تک قطبی کاواک‌ها است. برای کاهش این ناپایداری‌ها، از سامانه فیدبک خوشه-به-خوشه طولی استفاده می‌شود. در این مقاله، مدهای مرتبه بالاتری که منجر به ناپایداری باریکه می‌شوند شناسایی شده و فیلتر پردازشگر دیجیتال این سامانه برای حلقه انبارش چشمه نور ایران طراحی شده است. در نهایت عملکرد صحیح آن در جبران سازی ناپایداری‌ها با استفاده از شبیه‌سازی تعقیب ذرات صحت‌سنجی شده است.

کلمات کلیدی: سامانه فیدبک خوشه-به-خوشه طولی، دینامیک باریکه، جبران سازی ناپایداری‌ها، فیلتر FIR، حلقه انبارش.

Design and simulation of a digital filter for longitudinal bunch-by-bunch feedback system of Iranian Light Source Facility storage ring and Its Impact on Beam Stability

Babaie, Aliakbar^{۱*}, Sadeghipanah, Arash^۲, Khorsandi, Majid^۱

۲. Affiliation: Shahid Beheshti university, Nuclear Engineering faculty, Radiation Applications

۳. Affiliation: Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), School of Particles and

Accelerators

۴. Affiliation: Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Iranian Light Source Facility (ILSF)

Abstract:

To ensure high-brightness synchrotron radiation, maintaining the stability of the electron beam in both longitudinal and transverse planes is essential. The primary source of longitudinal instabilities in synchrotron accelerators is the monopole higher-order modes (HOMs) in RF cavities. To suppress these instabilities, a bunch-by-bunch longitudinal feedback system is implemented. This paper investigated the higher-order modes that contribute to beam instabilities and presents the design of a digital signal processing filter for the bunch-by-bunch feedback system in the ILSF storage ring. The effectiveness of the proposed system in compensating for these instabilities is validated through particle tracking simulations.

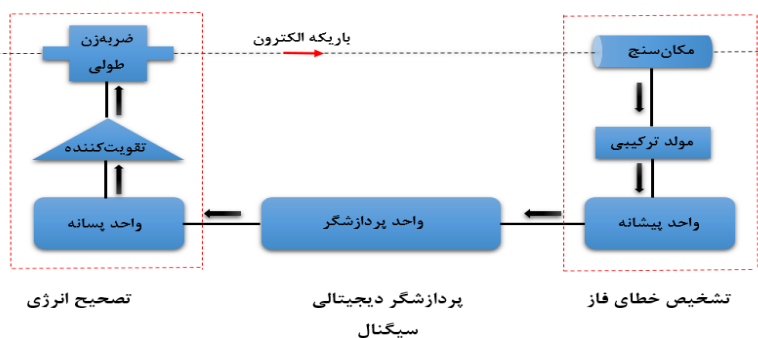


Key words: Longitudinal Bunch-By-Bunch feedback system, Beam dynamic, Instabilities compensation, Storage ring.

۷ - مقدمه:

طرح چشمه نور ایران، ساخت یک شتابگر از نوع سینکروترون الکترون با هدف استفاده از تابش سینکروترونی است. این شتابگر دارای مشخصات انرژی ۳ GeV، جریان ۴۰۰ mA، گسیلندگی کمتر از ۱ rad-nm و محیط حلقه انبارش ماشین تقریباً ۵۲۸ m است [۱].

به منظور ارائه تابش سینکروترون با درخشندگی بالا به کاربران، باریکه الکترونی باید در هر سه صفحه (دو صفحه عرضی و یک صفحه طولی) پایدار باشد. از آنجایی که خوشه‌های الکترون از طریق میدان پسر^۱ به یکدیگر متصل می‌شوند، تحت شرایط تشدید خاصی می‌توانند نوسانات خوشه‌ای منسجم را ایجاد کنند. چنین نوساناتی را ناپایداری حالت خوشه جفت شده^۲ می‌گویند [۲]. یکی از دلایل ناپایداری در یک شتابگر سینکروترون، مدهای مرتبه بالاتر^{۱۰} کاواک‌های شتابگر هستند که از بین این مدها، مدهای تک قطبی به دلیل ایجاد ضربه طولی، مهم‌ترین عامل ناپایداری‌های طولی به شمار می‌آیند [۳]. سامانه فیدبک طولی خوشه-به-خوشه^{۱۱} یکی از روش‌های جبران‌سازی این ناپایداری‌ها است که می‌تواند نوسانات طولی ناشی از عدم میرایی کامل مدهای مرتبه بالاتر را خنثی کند. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سامانه فیدبک طولی متشکل از سه قسمت کلی است؛ زیرسامانه تشخیصی خطای فاز، زیرسامانه پردازشگر دیجیتال سیگنال و زیرسامانه تصحیح انرژی. در بخش تشخیص خطای فاز، خطای فاز مربوط به خوشه‌ها به دست می‌آید. سپس خطای فاز تشخیص داده شده در قسمت پیشانه^{۱۲} در زیرسامانه پردازشگر، پردازش شده و سیگنال تصحیح مناسب برای از بین بردن این خطا محاسبه می‌شود [۴].



شکل (۵) نمایی از یک نمونه سامانه فیدبک طولی خوشه-به-خوشه [۸].

شکل (۲) نشان می‌دهد که چگونه سیگنال‌های پیشگر مکان باریکه موقعیت (BPM) شناسایی شده در حدود $10 f_{RF}$ به باند پایه انتقال داده می‌شوند. بدین منظور، یک واحد تجاری ارائه شده توسط دیمتل استفاده می‌شود، و این واحد دارای سه کانال مجزای پیشانه است که هر یک به یکی از صفحات اختصاص دارد [۵].

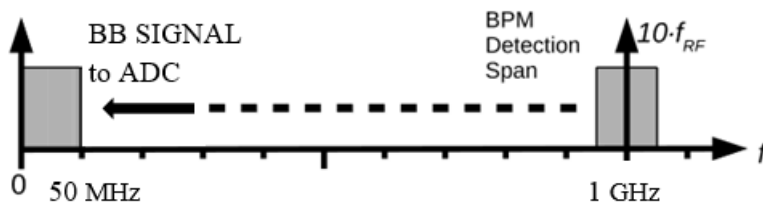
^۸ Wakefield

^۹ Coupled Bunch Mode Instabilities (CBMI)

^{۱۰} High order mode (HOM)

^{۱۱} Bunch-by-bunch feedback system

^{۱۲} Front-End



شکل (۶) انتقال سیگنال مکانسنج به باند پایه.

لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن فرکانس RF چشمه نور ایران که برابر با ۱۰۰ MHz است، حداقل پهنای باند مورد نیاز باید نصف فرکانس RF، یعنی ۵۰ MHz است.

از جمله وظایف کلیدی فیلتر FIR در فیدبک خوشه-به-خوشه طولی در حلقه انبارش می‌توان به پردازش سیگنال خطای دریافت شده از مکانسنج و حذف نویزهای فرکانس بالا و سایر مؤلفه‌های نامطلوب در سیگنال اشاره نمود. به عنوان مثال در حلقه انبارش SuperKEKB از FPGA^{۱۲} برای پردازش سیگنال سیستم فیدبک خوشه-به-خوشه استفاده شده است [۶].

زیرسامانه تصحیح انرژی شامل سه قسمت، تقویت‌کننده توان RF، پسانه^{۱۳} و ضربه‌زن^{۱۴} است. ضربه‌زن، قسمت فعال‌ساز سامانه فیدبک خوشه-به-خوشه است که در سامانه فیدبک طولی عموماً از کاواک ضربه‌زن استفاده می‌شود. کاواک ضربه‌زن با ایجاد یک میدان الکتریکی و اعمال انرژی متناسب با سیگنال تصحیح، وظیفه جبران‌سازی ناپایداری طولی خوشه‌های مورد نظر را بر عهده دارد. این فرایند بر اساس سیگنال تصحیح‌شده‌ای که از مرحله پردازش دریافت می‌شود، انجام می‌گیرد [۷].

۸ - روش کار:

با استفاده از کد الگانت^{۱۵} که برای شبیه‌سازی و تحلیل دینامیک باریکه در شتابگرهای ذرات استفاده می‌شود، حلقه انبارش شبیه‌سازی شده است. با توجه به جدول ۱ که مدهای مرتبه بالاتر طولی (تک قطبی) کاواک شتابگر چشمه نور ایران را نشان می‌دهد، تاثیر هر یک از مدهای مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مدل‌سازی مدهای طولی چند خوشه‌ای، امپدانس طولی حقیقی و موهومی هر یک از مدها به‌طور جداگانه به‌وسیله معادله (۱) محاسبه شده و مقادیر امپدانس شانت (RS)، ضریب کیفیت (Q) و بسامد (f) مربوط به هر یک از مدهای مرتبه بالاتر طولی را در کد مربوطه وارد نموده‌ایم. مدهایی که منجر به ناپایداری طولی شده و به‌طور خود به خودی میرا نمی‌شوند شناسایی، و سپس فضای فاز طولی خوشه‌های الکترونی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان داد که سه مد با بسامدهای ۱۴۳۲/۵۵ MHz، ۱۰۹۷/۴۷ MHz و ۱۳۸۷ MHz که به ترتیب مربوط به امپدانس شانت‌های ۱۱۵ KΩ، ۸۳۲ KΩ و ۴۰۰ KΩ است، منجر به ناپایداری طولی شده و بطور خود به خودی میرا نمی‌شوند.

$$Z_0^{\square} = \frac{R_s}{1 + iQ \left(\frac{\omega_r}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_r} \right)} \quad (1)$$

^{۱۲} Back-End

^{۱۴} Kicker

^{۱۵} ELEGANT



جدول ۱: مدهای مرتبه بالاتر طولی (تک قطبی) کاواک شتابگر چشمه نور ایران [۹].

ضریب کیفیت (Q)	امپدانس شانت (kΩ)	بسامد (MHz)
۳۵۰۶۹	۳۴	۴۱۲٫۷۷
۳۶۲۶۰	۲۴۶	۴۶۳٫۶۸۲
۳۱۰۷۹	۷۰٫۸	۶۲۴٫۶۷
۴۰۳۶۰	۵۱۰	۷۸۹٫۵۶
۴۳۰۲۹	۲۶۸	۹۱۶٫۵۴
۴۳۲۹۹	۲۳۳	۱۰۱۰٫۸
۳۵۴۰۳	۸۳۲	۱۰۹۷٫۴۷
۶۴۳۷۰	۸۶٫۳	۱۳۰۴٫۳۴۶
۶۲۸۴۶	۷۲٫۶	۱۳۱۱٫۷۸
۶۸۸۸۰	۸۳	۱۳۸۴٫۱۵۱
۵۳۱۶۳	۴۰۰	۱۳۸۷
۶۵۴۵۸	۱۱۵	۱۴۳۲٫۵۵
۵۵۳۳۲	۱۸٫۶	۱۵۳۶

در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار متلب فیلتر FIR مورد نیاز برای زیرسامانه پردازشگر دیجیتال فیدبک خوشه-به-خوشه طولی طراحی شده است. برای طراحی فیلتر، از پنجره کایزر^{۱۶} استفاده شده و مرتبه فیلتر ۲۸ در نظر گرفته شده است. در طراحی متداول فیلترهای FIR با استفاده از روش پنجره‌سازی برای دستیابی به پاسخ فاز خطی و تقارن مناسب، مرتبه فیلتر زوج انتخاب می‌شود. این انتخاب به فیلتر اجازه می‌دهد تا همزمان دارای تعداد ضرایب فرد و پاسخ ضربه‌ی متقارن باشد که به تحقق پاسخ فاز خطی کمک می‌کند [۱۰]. لازم به ذکر است با استفاده از کد الگانت، تنها استفاده از فیلترهایی با مرتبه کوچکتر از ۳۰ امکانپذیر می‌باشد.

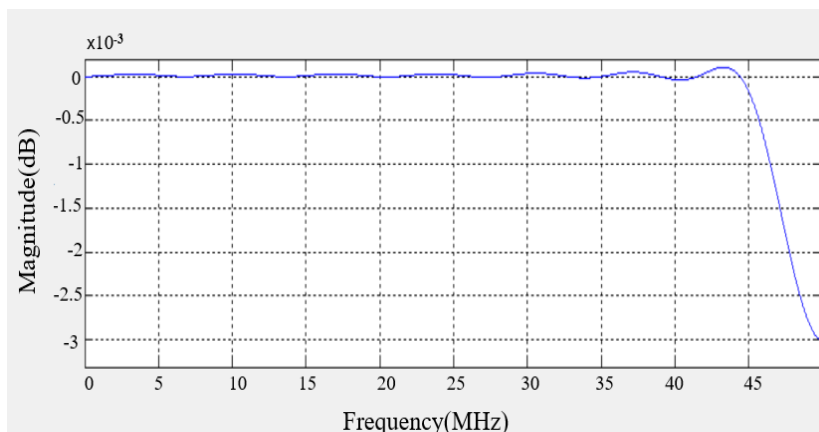
در مرحله آخر، شبیه‌سازی با روش تعقیب ذرات برای حلقه انبارش چشمه نور ایران در حضور مدهای مرتبه بالاتر تک قطبی کاواک‌ها، سامانه فیدبک طولی خوشه-به-خوشه و فیلتر طراحی شده، صورت گرفته است. تمام محاسبات برای ۱۴۱ خوشه متوالی (فاکتور پرشدگی^{۱۷} ۰٫۸)، ۱۰۰۰ ابرذره در هر خوشه و برای جریان باریکه ۱۰۰ mA با ۳۰۰۰۰ دور گردش در حلقه انبارش انجام شده است. بسامد نوسان کاواک ضربه‌زن سامانه فیدبک طولی چشمه نور ایران مشابه سامانه فیدبک طولی آزمایشگاه MAX IV سوئد، برابر با ۶۲۵ MHz انتخاب شده است.

۹ - نتایج:

شکل (۳) پاسخ فرکانسی فیلتر FIR طراحی شده برای زیرسامانه پردازشگر دیجیتال فیدبک طولی خوشه-به-خوشه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ MHz و قانون نایکوئیست، فرکانس قطع حدود ۵۰ MHz در نظر گرفته شده است.

^{۱۶} Kaiser

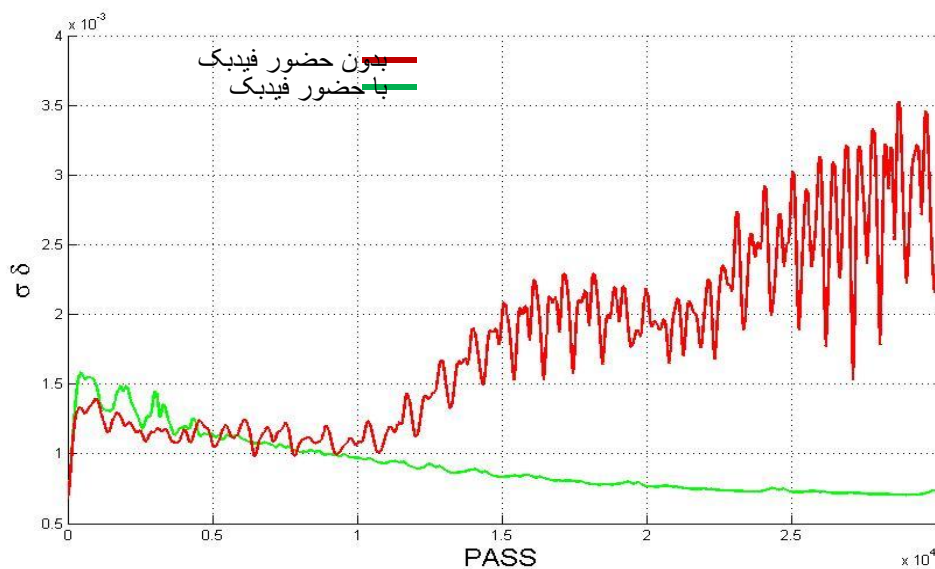
^{۱۷} Filling factor



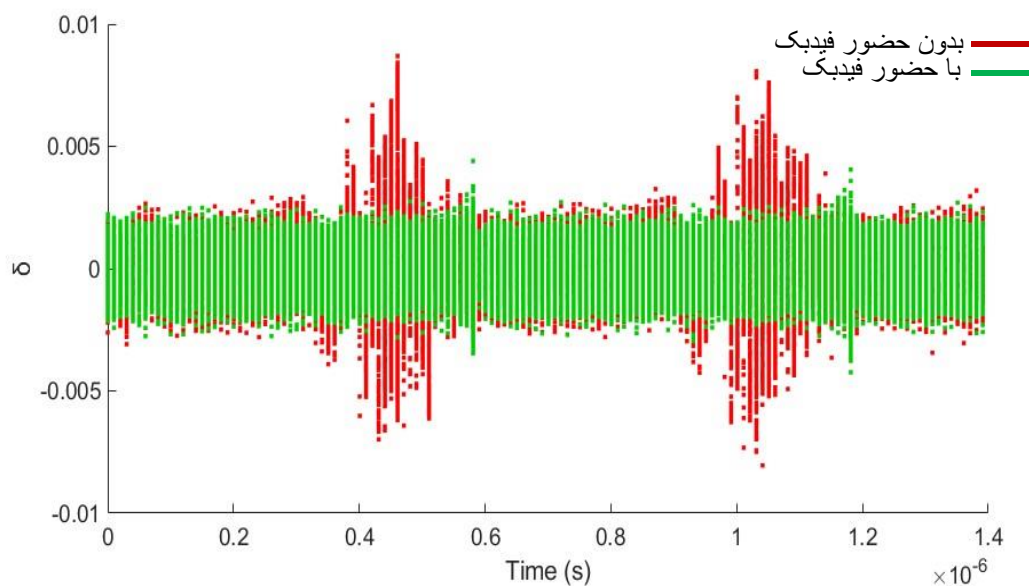
شکل (۷) پاسخ فرکانسی فیلتر FIR طراحی شده در این پژوهش.

پراکندگی انرژی باریکه و فضای فاز طولی خوشه‌های الکترونی با جریان 100 mA در طی 30000 چرخش در حلقه انبارش بدون حضور سامانه فیدبک و با حضور سامانه فیدبک در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، پراکندگی انرژی باریکه (محور عمودی) بدون حضور سامانه فیدبک، در طی چرخش افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده افزایش دامنه ناپایداری‌ها است. $\sigma\delta$ انحراف معیار پراکندگی انرژی و دلتا (δ) پراکندگی انرژی هر خوشه را نمایش می‌دهد که از معادله (۲) به دست آمده است. در این معادله E انرژی هر خوشه و E_0 انرژی متوسط باریکه است.

$$\delta = \frac{E - E_0}{E_0} \quad (2)$$



شکل (۸) پراکندگی انرژی باریکه با جریان 100 MA در طی 30000 چرخش در حلقه انبارش بدون حضور سامانه فیدبک و با حضور سامانه فیدبک.



شکل (۹) فضای فاز طولی خوشه‌های الکترونی با جریان 100MA در طی 30000 چرخش بدون حضور سامانه فیدبک و با حضور فیدبک

نتایج به وضوح نشان می‌دهند که با حضور سامانه فیدبک خوشه-به-خوشه طولی پراکندگی انرژی باریکه به تدریج کاهش یافته و این کاهش تدریجی بیانگر بهبود پایداری باریکه است. بررسی فضای فاز طولی و مقایسه رفتار خوشه‌های الکترونی در حضور سامانه فیدبک با حالت مشابه بدون آن، به روشنی مؤید این حقیقت است.

۱۰ - بحث و نتیجه گیری:

یکی از دلایل ناپایداری در یک شتابگر سنکروترون، مدهای مرتبه بالاتر کاواک‌های شتابگر هستند که از بین این مدها، مدهای تک قطبی به دلیل ایجاد ضربه طولی، مهم‌ترین عامل ناپایداری‌های طولی به شمار می‌آیند. بررسی‌های انجام شده بر روی تک تک مدهای مرتبه بالاتر نشان داد که سه مد با بسامدهای 1432.55 MHz ، 1097.47 MHz و 1387 MHz که به ترتیب مربوط به امپدانس شانت‌های $115\text{ K}\Omega$ ، $832\text{ K}\Omega$ و $400\text{ K}\Omega$ است، نوسانات ناپایدار داشته و باید توسط فیدبک طولی خوشه-به-خوشه مهار شوند. باقی مدهای مرتبه بالاتر برای باریکه مشکلی ایجاد نخواهند کرد. با توجه به نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی از حضور فیدبک مناسب در پراکندگی انرژی باریکه و فضای فاز طولی خوشه‌های الکترونی با وجود ناپایداری-ها، کاملاً واضح است که بعد از حدود 1000 چرخش پراکندگی انرژی شروع به کم شدن می‌کند و پس از حدود 10000 چرخش، پراکندگی انرژی باریکه تقریباً ثابت می‌شود که این نشانه پایدار شدن باریکه و عملکرد صحیح سامانه فیدبک طولی خوشه-به-خوشه است.



۱۱ - مراجع:

- [۱] Rahighi, J., Ghasem, H., Jafarzadeh, M., Sarhadi, K., Dehghani, J., Khosroabadi, H., ... & Eghbali, R. (۲۰۱۳). ILSF, a third generation light source laboratory in Iran. Proceedings of IPAC۲۰۱۳, Shanghai, China, TUOAB۲۰۲.
- [۲] Bassi, G., Blednykh, A., & Smaluk, V. (۲۰۲۲). Coupled-bunch instability for arbitrary multibunch configurations. Physical Review Accelerators and Beams, ۲۵(۱), ۰۱۴۴۰۲.
- [۳] Olsson, D., Malmgren, L., & Åhnberg, K. (۲۰۱۷, May). A Waveguide Overloaded Cavity Kicker for the MAX IV Bunch-by-Bunch Feedback System. In ۸th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'۱۷), Copenhagen, Denmark, ۱۴â ۱۹ May, ۲۰۱۷ (pp. ۴۲۸۹-۴۲۹۱). JACOW, Geneva, Switzerland.
- [۴] Olsson, D., Malmgren, L., & Karlsson, A. (۲۰۱۷). The bunch-by-bunch feedback system in the MAX IV ۳ GeV ring.
- [۵] Dimtel website. <http://www.dimtel.com/>.
- [۶] Tobiyama, M., Flanagan, J. W., & Drago, A. (۲۰۱۶). Bunch by bunch feedback systems for SuperKEKB rings. Energy (GeV), ۷, ۴.
- [۷] Gallo, A., Boni, R., Ghigo, A., Marcellini, F., Serio, M., & Zobov, M. (۱۹۹۶). A waveguide overloaded cavity as longitudinal kicker for the DA {Phi} NE bunch-by-bunch feedback system.
- [۸] Wu, W. Z., Kim, Y., Li, J., Wang, P., Busch, M., Swift, G., ... & Ko, I. S. (۲۰۰۹, May). Development and commissioning of bunch-by-bunch longitudinal feedback system for Duke storage ring. In Proceedings of ۲۳-rd Particle Accelerator Conference.
- [۹] Ahmadiannamin, S., Lamahi Racht, M., Abbasi Davani, F., & Rahighi, J. (۲۰۲۰). Higher order modes of ۱۰۰ MHz RF cavities and their effect on beam instabilities in the storage ring of Iranian Light Source Facility (ILSF). Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology (JONSAT), ۴۱(۴), ۱۷۲-۱۸۱.
- [۱۰] Paquelet, S., & Savaux, V. (۲۰۱۸). On the symmetry of FIR filter with linear phase. Digital Signal Processing, ۸۱, ۵۷-۶۰.



طراحی و شبیه سازی کاواک شتابدهی شتابدهنده موج ایستا باند ایکس (کد مقاله : ۱۳۴۶)

حسن زاده یاسمنی، فاطمه^۱؛ ابطحی، سید محمد مهدی^{۱*}؛ زارعی، سارا^۲
^۱ رشته مهندسی شتابگر ذرات، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ایران، قزوین
^۲ پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ایران، تهران

چکیده

شتابدهنده‌های خطی در باند ایکس به دلایل زیادی از جمله ابعاد کوچکتر، بهره‌وری بالاتر، خنک‌سازی ساده‌تر و هزینه کمتر مواد اولیه برای شتابدهنده خطی الکترون گزینه بسیار مناسبی هستند. اصلی‌ترین قسمت در طراحی شتابدهنده‌های خطی، تیوب شتابدهی آنها است. هدف از این پژوهش طراحی و شبیه سازی کاواک شتابدهی شتابدهنده موج ایستا باند ایکس می باشد.

در این پژوهش از کد سه بعدی سی اس تی ماژول فرکانس بالا (HF)^{۱۸} با ابزار حل گر مودهای ویژه^{۱۹} استفاده شد. فرکانس تشدید با توجه به فرکانس منبع بسامد رادیویی برابر با ۹۳۰۰ مگاهرتز در نظر گرفته شد. بیشینه میدان سطحی بر اساس رابطه کیلپاتریک تعیین شد. جهت طراحی به نکاتی مانند لبه های نوک تیز کمتر، عدم وابستگی فرکانس تشدید به طول کاواک، سهولت ایجاد تقارن برای کاهش میزان تلفات در شکل کاواک استوانه ای مورد توجه قرار گرفت. پارامترهای مهم الکترومغناطیسی برای طراحی کاواک شامل فرکانس تشدید، ضریب کیفیت، امپدانس موازی، عامل زمان گذار و نسبت بیشینه میدان سطحی به میانگین میدان محوری به دست آمد. بهینه سازی بر اساس پارامترهای الکترومغناطیسی مطلوب صورت گرفت که مطابقت مناسبی با پارامترهای الکترومغناطیسی سایر شتابدهنده های خطی ساخته شده دارند.

واژگان کلیدی: شتابدهنده خطی الکترون، طراحی کاواک شتابدهی، باند ایکس، نرم افزار CST

Design and Simulation of an X-Band Standing Wave Accelerator Cavity

^۱Hasanzadeh, Fatemeh^۱; Abtahi, Seyed Mohammad Mahdi^{۲*}; Zarei, Sara

^۱Particle Accelerator Department, Faculty of Basic Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^۲Physics and Accelerators Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

X-band linear accelerators are particularly well-suited for electron linear accelerators for several reasons, such as their smaller dimensions, higher efficiency, simpler cooling systems, and lower raw material costs. The most critical aspect of linear accelerator design is the acceleration tube.

This research focuses on designing and simulating the acceleration cavity of an X-band standing wave accelerator. It employs the 3D code from the high-frequency module CST and

^{۱۸}High frequency
^{۱۹}EigenmodeSolver



the EigenmodeSolver tool, which calculates resonance modes and resonant frequencies in electromagnetic structures.

The resonant frequency was set at 9300 MHz, based on the frequency of the radio frequency source. The maximum surface field was determined using the Kilpatrick relation. During the design process, considerations included minimizing sharp edges, ensuring the resonant frequency is independent of cavity length, and facilitating spherical symmetry to reduce losses in the cylindrical cavity shape.

Key electromagnetic parameters for cavity design, including resonant frequency, quality factor, parallel impedance, transition time factor, and the ratio of the maximum surface field to the average axial field, were gathered. Optimization was performed based on the desired electromagnetic parameters, aligning with those of other constructed linear accelerators.

Keywords: *Electron linear accelerator, cavity, X-band, CS*



مقدمه

شتابدهنده‌های خطی نسبت به سایر شتابدهنده‌ها در اندازه‌های کوچکتر و بصورت متمرکز هستند که می‌توان پرتودهی بیمار را از جهات مختلف انجام داد تا حداکثر دوز را بر روی تومور متمرکز کرد به گونه‌ای که از پرتودهی بافت‌های سالم تا حد ممکن جلوگیری شود [۱]. در کل یکی از ویژگی‌های شتابدهنده‌های خطی این است که در مقایسه با دیگر شتابدهنده‌های موجود، شدت باریکه بسیار بالایی توسط این گونه شتاب دهنده‌ها، حتی برای ذرات باردار دیگر نظیر پروتون قابل دستیابی است [۲]. پر کاربردترین انرژی در پرتودرمانی ۶ MeV و ۱۵ MeV است که بر اساس دستیابی به توزیع دوز بهینه در ناحیه هدف انتخاب می‌شود. مطالعات تحقیقاتی اخیر نشان داده است که اثر درمانی بین ۶ MeV و محدوده انرژی بالاتر به ویژه با پیشرفت در تکنیک‌های درمانی مانند پرتودرمانی با شدت تعدیل شده (IMRT) تفاوت معناداری ندارد. با این حال پرتوهای با انرژی بالاتر ممکن است منجر به عدم تعادل الکترونیکی و کاهش پوشش هدف به دلیل برد طولانی‌تر الکترون‌های پس زنی با انرژی بالاتر در محیط‌های با چگالی کم شوند. در نتیجه، اکثر دستگاه‌های پرتودرمانی اکنون ۶ MeV را به عنوان گزینه استاندارد ارائه می‌دهند و گزینه‌های انرژی بالاتر نیز در دسترس هستند [۳]. هدف این پژوهش طراحی و ارائه ابعاد کاواک تیوپ شتابدهی موج ایستا از نوع جفت شدگی جانبی است. به این منظور ابتدا اشاره‌ای به نحوه طراحی کاواک‌های بسامد رادیویی خواهد شد، سپس نحوه طراحی و ابزار مورد استفاده جهت طراحی توضیح داده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

در ابتدای ساخت و به کارگیری کاواک‌های تشدید برای شتاب دهنده خطی الکترون پیش از استفاده از محاسبات عددی قسمت‌های تیوب شتاب دهی ساخته و پس از بررسی نتایج آزمایش‌ها دوباره طراحی و تصحیح می‌شدند و این فرایند آن قدر انجام میشد تا اینکه پارامترهای مطلوب به دست آید. اما از چندین دهه قبل طراحی کاواک‌های تیوب شتاب دهی شتاب دهنده خطی به صورت عددی با استفاده از نرم افزارهای مختلف انجام شده است در برخی موارد (مانند ساختارهای بزرگ با اجزای خطوط باریکه زیاد به علت حجم بالای محاسبات و، زمان نمیتوان با استفاده از نرم افزارهای عددی کل ساختار را شبیه سازی کرد. در این موارد تنها قسمتی از ساختار شبیه سازی شده و نتایج با اندازه گیری تست سرد مقایسه می‌شود هنگامی که تنها بخشی از ساختار مدل شود خصوصیات باریکه الکترون را میتوان به صورت جداگانه در هر بخش تخمین زد.

اساس کلی طراحی کاواک‌ها

هر کاواک یک تشدیدگر بسامد رادیویی است که ابعاد اولیه آن با حل معادلات ماکسول قابل تخمین زدن است. با توجه به معادله (۱) که از حل معادلات ماکسول برای موجبر استوانه حاصل شده است تخمین اولیه شعاع کاواک به دست می‌آید.

$$\gamma = \frac{2.4 \times 10^8 C}{2\pi f} \quad (1)$$

در معادله (۱)، C سرعت نور، f بسامد تشدید و γ شعاع کاواک است.

به منظور همزمان کردن حرکت خوشه الکترون و میدان RF، بین طول ساختار تناوبی طول موج A و جابه جایی فاز بین دو کاواک مجانب، معادله (۲) برقرار است طول هر کاواک شتابدهی از معادله (۲) محاسبه میشود [۶].

$$l = \frac{\beta \lambda \varphi}{2\pi} \quad (2)$$

پایه نظری برای طراحی تیوب شتاب دهی جهت نوسان در بسامد تشدید با استفاده از مدل مداری برای شتاب دهنده خطی با جفت شدگی جانب توسط ناگل ارائه شده است [۶]. جفت شدگی در شتاب دهنده‌های خطی با جفت شدگی جانب توسط حفره‌های جفت شدگی انجام میشود که این حفره‌ها جایی قرار می‌گیرند که میدان مغناطیسی بیشینه و میدان الکتریکی کمینه باشد و در حقیقت توان از یک کاواک به کاواک مجاورش توسط القای متقابل انتقال داده میشود بر اساس رابطه اختلال



اسلاتر^{۲۱} [۷]. وجود حفره جفت شدگی در محل میدان مغناطیسی قوی باعث کاهش بسامد تشدید می شود. با تقریبی ساده از مدل مداری نشان داده میشود که مربع بسامد تشدید هر کاواک با عکس حاصل ضرب ظرفیت سلفی کاواک L و ظرفیت خازنی کاواک C متناسب است [۸]. بر اساس نظریه اختلال اسلاتر وجود حفره جفت شدگی ظرفیت سلفی را افزایش و در نتیجه بسامد تشدید را کاهش می دهد. در حالت کلی به منظور ثابت نگهداشتن بسامد تشدید بعد از ایجاد حذف یا تغییر حفره جفت شدگی ظرفیت خازنی کاواک های شتاب دهی توسط تغییر طول دماغه تنظیم می شود و ظرفیت سلفی با تغییر قطر کاواک تغییر میکند [۶]. نتایج حاصل از محاسبات و بهینه سازی ابعاد کاواک در جدول (۱) آمده است.

طراحی کاواک شتابدهی باندهای یکس در کد سی اس تی [۴]

امروزه طراحی کاواک های تیوپ شتاب دهی شتاب دهنده خطی به صورت عددی با استفاده از نرم افزارهای مختلف انجام می شود. به طور کلی برای طراحی انواع کاواک ها شتابدهی چندین مرحله طراحی وجود دارد. اولین مرحله طراحی، شبیه سازی کاواک به لحاظ الکترومغناطیسی با استفاده از نرم افزارهای دوبعدی یا سه بعدی مانند سوپرفیش، ماژول اچ.اف.اس.اس، انسیس، سی.اس.تی و کامسول است که بر اساس عبور امواج الکترومغناطیسی درون ساختارهای موجبری و حل معادلات ماکسول درون این ساختارها استوار است. در این پژوهش از کد سه بعدی سی اس تی استفاده شد که برای طراحی های الکترومغناطیسی دارای دقت و سرعت بالا می باشد. جهت طراحی کاواک های شتاب دهی مقدار مطلوب برخی پارامترهای مهم الکترومغناطیسی باید مشخص شود. اولین پارامتر فرکانس تشدید است که با توجه به فرکانس منبع بسامد رادیویی برابر با ۹۳۰۰ مگاهرتز در نظر گرفته می شود.

پارامتر مهم دیگری که در طراحی هندسه کاواک شتابدهی باید به آن توجه کرد بیشینه میدان سطحی است. این پارامتر بر اساس رابطه کیلپاتریک^{۲۲} [۵]. بصورت زیر:

$$f \text{ (MHz)} = 1,64 \text{ Ek}^2 e^{-8,5/Ek} \quad (3)$$

تعریف می شود که در آن E بیشینه میدان سطحی بر حسب مگاولت بر متر و f فرکانس تشدید کاواک است بیشینه میدان سطحی قبل از شکست الکتریکی برای فرکانس ۹۳۰۰ مگاهرتز برابر با $79/4$ مگاولت بر متر است که با در نظر گرفتن ضریب B (Brave factor) برابر با $1/8$ این مقدار $143/0$ مگاولت بر متر است. در نتیجه بیشینه میدان سطحی که در نواحی اطراف دماغه های مخروطی وجود دارد باید کمتر از 143 مگاولت بر متر باشد از آن جا که به دست آوردن بیشینه میانگین میدان محوری مطلوب است طراحی باید به گونه ای باشد که نسبت بیشینه میدان سطحی به میانگین میدان محوری تا حد ممکن کم شود تا میدان سطحی داخل کاواک از بیشینه میدان سطحی قابل قبول کمتر شود [۶]. پارامترهای الکترومغناطیسی مطلوب دیگر شامل ضریب کیفیت، امپدانس موازی و نسبت بیشینه میدان سطحی به میانگین میدان محوری می باشند. پس از تعیین پارامترهای عملکرد کاواک، طراحی و شبیه سازی بر اساس این پارامترها و بهینه سازی ابعاد جهت رسیدن به ابعاد دقیق کاواک انجام میشود. با توجه به وجود رابطه غیرخطی بین پارامترهای هندسی کاواک و معیارهای ذکر شده برای بررسی رفتار کاواک، لازم است تا ابعاد مختلف کاواک به دفعات مختلف شبیه سازی شده و نتایج هرکدام بررسی شود تا بتوان هندسه بهینه را مشخص کرد. با توجه به تعداد زیاد پارامترهای هندسی، انجام این کار به روش صحیح و خطا کاری بسیار زمانبر بوده و علاوه بر آن، در این روش اطمینان از بهینه بودن جواب نداریم. لذا در این مقاله از الگوریتم ژنتیک (GA) ^{۲۳} برای یافتن ابعاد بهینه کاواک استفاده کردیم. ضمناً برخی از ابعاد در کل طراحی به علت محدودیت های ساخت و یا فرض های اولیه ثابت نگه داشته می

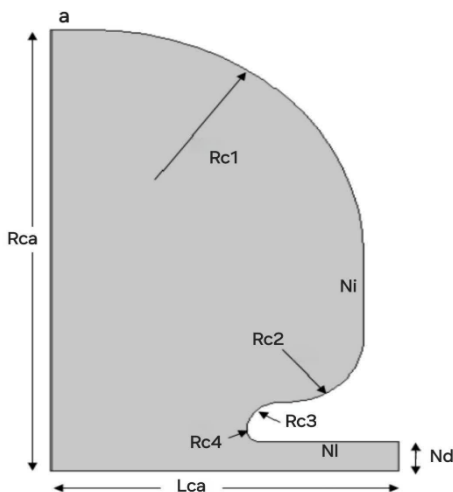
^{۲۱} Slater perturbation

^{۲۲} Kilpatrick limit
^{۲۳} Genetic Algorithm



شوند. این ابعاد عبارتند از زاویه دماغه مخروطی شکل و طول کاواک که در باند ایکس با توجه به معادله (۲)، $۸/۰۶۵$ میلی‌متر می‌باشد.

طرح پیشنهادی برای کاواک شتابدهی باند X مطابق شکل (۱) انتخاب شد. دلیل این انتخاب لبه‌های نوک تیز کمتر، عدم وابستگی فرکانس تشدید به طول کاواک، سهولت ایجاد تقارن کروی برای کاهش میزان تلفات در شکل کاواک استوانه‌ای می‌باشد [۵]. برای این منظور باید دانست که تغییر هر جز از هندسه کاواک تغییراتی غیرخطی این در حالیست که نحوه تغییر این پارامترها شبیه هم نیستند.



شکل ۱: سطح مقطع یک چهارم کاواک شتابدهی

جدول ۱: ابعاد بدست آمده کاواک بعد از بهینه‌سازی (mm)

مقدار	کمیت
$۸/۰۶۵$	Lca
$۱۲/۱۷$	Rca
$۵/۹۳۲$	Rc ^۱
$۱/۸۰۴$	Rc ^۲
$۰/۸۹۲۶$	Rc ^۳
$۰/۳۰۹۲$	Rc ^۴
$۰/۲۷۳۳$	Ni
$۲/۲۰۱۹$	Ni
$۱/۰۳۰۳$	Nd
$۱/۵۷۶۷$	S
$۰/۵۵۶۳$	a

پس لازم است تا شکل تقریبی پیشنهادی را به قسمت‌های مختلف با پارامترهای مشخص تقسیم نموده و با تغییر این پارامترها و اثری که هر کدام بر خواص کاواک می‌گذارند ابعاد بهینه مورد نظر (جدول ۱) را با توجه به این نکته که نتایج حاصل از محاسبات شبیه‌سازی نسبت به نتایج واقعی بعد از ساخت ۱۰-۱۵ درصد بیشتر است بطور دقیق بدست آوریم.

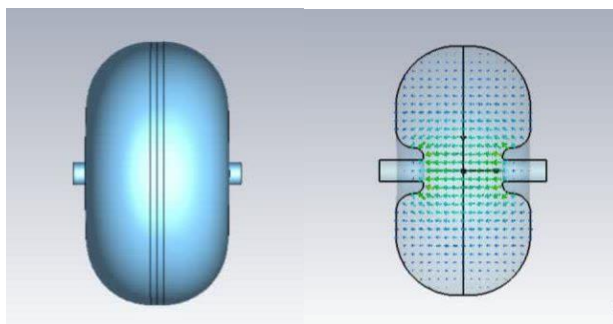


نتایج

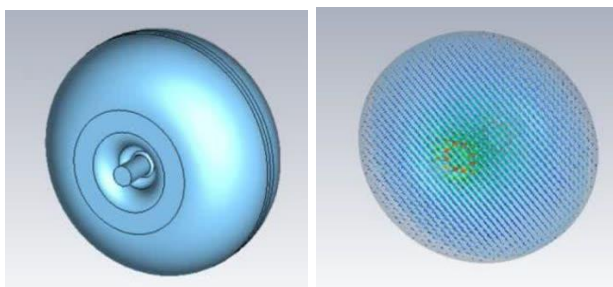
نتایج حاصل از طراحی سه بعدی کاواک شتابدهی در کد سی اس تی در جدول (۲) آمده است و همانطور که مشاهده می شود نتایج در پارامترهای مهم الکترومغناطیسی برای طراحی کاواک (فرکانس تشدید، ضریب کیفیت، امپدانس موازی، عامل زمان گذار و نسبت بیشینه میدان سطحی به میانگین میدان محوری) با نتایج ثبت شده در سایر مقالات معتبر علمی همخوانی دارد [۱۰][۹]. جدول ۲: مقدار بدست آمده در خروجی CST برای معیارهای معرفی شده

مقدار	کمیت
MHz ۹۳۰۰	فرکانس (f)
۰/۶۳۱۶	ثابت گذر زمان (T)
MΩ/m ۱۵۸/۰۹	امپدانس موازی (ZT ^۲)
۹۲۰۰	ضریب کیفیت (Q)
۳۲۰	ضریب شایستگی (r/Q)
۰/۳۸۴۴	بیشینه میدان سطحی (E _{max} /E _۰)

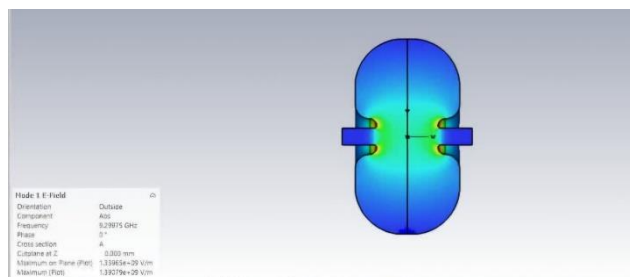
نمایی سه بعدی از طرح کاواک مورد نظر در دو سطح مقطع متفاوت را در شکل های (۲) و (۳) و تصویری از شبیه سازی کاواک به همراه نمایش فرکانس تشدید در شکل (۴) مشاهده می کنید. شکل ۵ نمودار فرکانس در یک تک کاواک شتابدهی باند ایکس را نمایش می دهد.



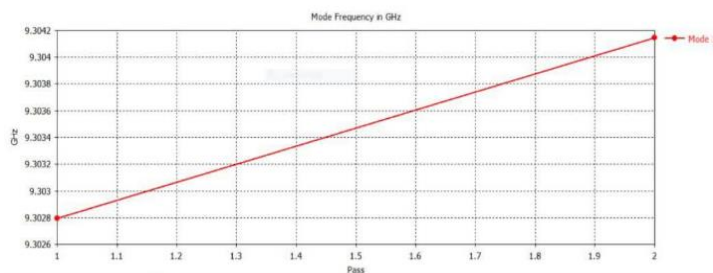
شکل ۲: طرح شبیه سازی شده سه بعدی کاواک شتابدهی



شکل ۳: طرح مقطع کاواک شتابدهی به همراه نمایش خطوط میدان الکتریکی



شکل ۴. تصویری از شبیه سازی کاواک به همراه نمایش فرکانس تشدید



شکل ۵. نمودار فرکانس در یک تک کاواک شتابدهی باند ایکس

نتیجه گیری

در این مقاله کاواک شتابدهی شتابدهنده خطی موج ایستا در باند ایکس و فرکانس ۹.۳ گیگاهرتز توسط کد سی اس تی شبیه سازی و طراحی شد. در این پژوهش بهینه سازی بر اساس پارامترهای الکترومغناطیسی مطلوب صورت گرفت که مطابقت مناسبی با پارامترهای الکترومغناطیسی سایر شتابدهنده های خطی ساخته شده دارند.

مراجع

- [۱] Podgoršak, Ervin B. ۲۰۱۶. Radiation Physics for Medical Physicists.
- [۲] Tsuboi, K. ۲۰۲۰. proton beam radiotherapy.
- [۳] Donghyup, Ha. ۲۰۲۴. ۶ MeV X-band linear accelerator for stereotactic body radiation therapy.
- [۴] Dassault Systemes, CST Microwave Studio ,<http://www.3ds.com/>.
- [۵] T.P. Wangler. ۲۰۰۸. RF Linear Accelerator. Wiley-VCH.
- [۶] J. St. Aubin. ۲۰۱۰. Three Dimensional Simulation and Magnetic Decoupling of The Linac in a Linac-MR System ,Ph.D. Thesis, Edmonton Alberta, Canada.
- [۷] C.J. Karzmark and C.S. Nunan. ۱۹۹۳. "Microwave Accelerator Structures", Medical Electron Accelerators.
- [۸] J.C. Slater. ۱۹۵۴. Microwave electronics, D. Van Nostrand Company Inc.
- [۹] Yong-Seok Lee, Sanghoon Kim. ۲۰۲۱. Medical X-band linear accelerator for high-precision radiotherapy.
- [۱۰] Donghyup Ha, SeungHyun Lee. ۲۰۲۴. ۶ MV X-band linear accelerator for stereotactic body radiation therapy.



طراحی و ساخت موجر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه با هدف بکارگیری در چشمه یونی میکرو موج (کد مقاله : ۱۳۶۴)

عباسی، ابوالفضل^{۱*} - میرزایی، حمیدرضا^۱ - رحیم پور، حمید^۱ - یدالهزاده، بهزاد^۱ - صدفی بیابلی، محمدحسین^۱

۱. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

چکیده:

چشمه یونی تشدید سیکلوترونی الکترون با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز امکان دسترسی به چشمه‌های جریان بالای را فراهم می‌آورد. چشمه یونی تشدید سیکلوترونی الکترون پس از ساخت جهت افزایش جریان در شتابگر الکترواستاتیک ES-۲۰۰ بکار گرفته خواهد شد. باریکه‌ی خروجی پروتون ۱۰ میلی‌آمپر با انرژی ۵۰ کیلوولت خواهد بود. به دلیل اینکه محفظه پلاسمای چشمه یونی در پتانسیل بالا قرار دارد با در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی، لذا جهت انتقال توان از یک ایزوله کننده ولتاژ موجبری چند لایه استفاده میشود. در این مقاله به طراحی، شبیه‌سازی و تستهای این قطعه پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: چشمه یونی، تشدید سیکلوترونی الکترون، ایزوله کننده موجبری، کامسول

Design and fabrication of multi-layer High Voltage D.C. Break waveguide for Microwave ion source

Abbasi, Abolfazl^{۱*}, Mirzaei, HamidReza^۱, Rahimpour, Hamid^۱, Yadollahzadeh, Behzad^۱, Sadafi biabli, MohammadHossein^۱

۱. Atomic Energy Organization, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI)

Abstract:

To achieve high-current ion sources, the Electron Cyclotron Resonance (ECR) ion source, operating at a frequency of 2.45 GHz, is employed. This ECR ion source will be integrated into the ES200 electrostatic accelerator to enhance its ion beam current. A 10 mA proton beam, with an energy of 50 keV, will be extracted. Due to the plasma chamber voltage, a multi-layer High Voltage DC Break waveguide is required to transfer power to the ion source. The design, simulation, and construction of this component will be described.

Key words: ion source, Electron Cyclotron Resonant, High Voltage D.C. Break, Comsol



۱ - مقدمه:

موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ بالا چند لایه (H.V. D.C. Break) اجزای حیاتی در طراحی و بهره‌برداری از چشمه‌های یونی میکروموج می‌باشند که به طور گسترده در کاربردهای مختلف صنعتی از جمله تولید پلاسما [۱] و استخراج باریکه یونی استفاده می‌شوند. این موجرها برای تسهیل انتقال توان میکروموج و در عین حال ایزولاسیون الکتریکی بین سیستم‌های ولتاژ بالا طراحی شده اند [۲-۴].

اکثر چشمه‌های یونی میکروموج در فرکانسی در حدود ۲/۴۵ گیگاهرتز کار می‌کند و از انرژی امواج الکترومغناطیسی برای یونیزه کردن گازها استفاده می‌کند و پلاسماهایی را ایجاد می‌کند که می‌توانند برای کاربردهای مختلف استفاده شوند. چالش در پیاده‌سازی سیستم‌های ولتاژ بالا در این زمینه در حصول اطمینان از انتقال موثر میکروویو و در عین حال حفظ خواص عایق ولتاژ بالا نهفته است. برای دستیابی به این هدف، از طرح‌های نوآورانه مانند تکنیک‌های عایق چند لایه استفاده می‌شود [۲، ۵-۷].

موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ چند لایه برای مقاومت در برابر ولتاژهای بیش از ۱۰۰ کیلو ولت طراحی میشوند [۷]. طرح‌های فلنج چوک محدود به کاربردهای ولتاژ پایین تر میباشدند. اثربخشی این موجبر توسط دو عامل اصلی تعیین می‌شود: راندمان انتقال میکروویو و قدرت دی الکتریک مواد عایق مورد استفاده و ایزولاسیون ولتاژ بالا. نیتريد بور (BN)، آلومینا (AlN) و عایق ۱۰G معمولاً به عنوان مواد عایق ارزیابی میشوند [۸، ۹].

جنبه حیاتی دیگر موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ چند لایه شامل مدیریت توزیع میدان الکتریکی در قطع DC است. هندسه اتصالات بین هادی، عایق و هوای اطراف نقش مهمی در جلوگیری از شکست دی الکتریک دارد [۶].

ملاحظات طراحی برای این موجرها نه تنها شامل هندسه و آرایش هادی‌ها و عایق‌ها، بلکه بهینه‌سازی طول هادی برای کاهش اتلاف تابش می‌شود. ابزارهای شبیه‌سازی، مانند کامسول، برای پیش‌بینی معیارهای عملکردی از دید موجبری و شبیه‌سازی میدان الکتریکی جهت اطمینان از عملکرد پایدار استفاده می‌شوند.

در این متن طراحی و شبیه‌سازی یک موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ چند لایه برای چشمه یونی میکروموج [۱۰، ۱۱] جهت بکارگیری در شتابگر الکترواستاتیک ES-۲۰۰ [۱۲] ارائه شده است.

۲ - طراحی

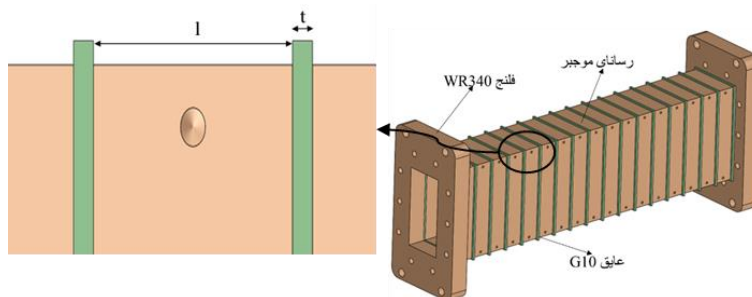
در ابتدا عایق دیالکتریک با در نظر گرفتن ثابت دیالکتریک و ویژگی‌های عایق الکتریکی انتخاب گردید. عایق ۱۰G که یک فایبرگلاس با لمینت اپوکسی ($\epsilon_r = 5.2^{24}$) و 32 keV/mm استقامت دی الکتریک^{۲۵} میباشد که دارای ویژگی‌های عایق الکتریکی و ماندگاری بالا ($\text{SUT} = 4 \text{ } \psi$) [۱۳] میباشد، به عنوان عایق انتخاب گردید.

^{۲۴} fiberglass epoxy laminate

^{۲۵} dielectric strength



همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ چند لایه از دو فلنج WR340، ۱۷ بخش آلومینیومی با طول ۲۰ میلی‌متر و ۱۸ بخش دیالکتریک (10G) با ضخامت ۲ میلی‌متر تشکیل شده است که بخشهای دیالکتریک میان بخشهای فلزی ساندویچ شده است.



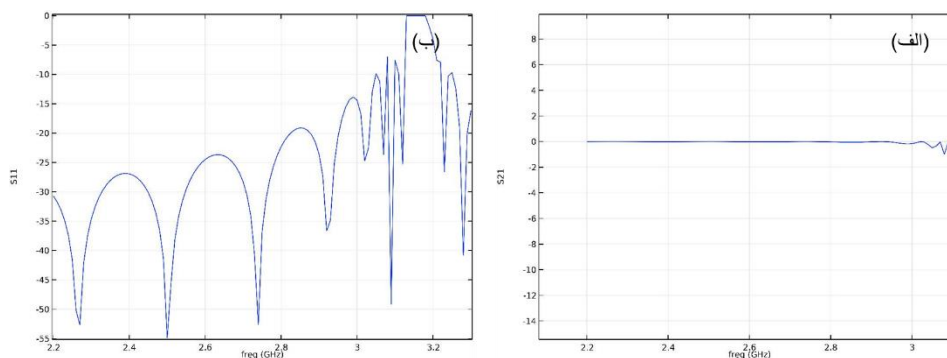
شکل (۱): ساختار موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ چندلایه و پارامترهای ابعادی اجزای آن

۳ - شبیه‌سازی:

مشخصات میکروموجی و میدان الکتریکی موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ چندلایه با استفاده از نرم افزار کامسول شبیه‌سازی شده است.

۱-۱ - شبیه سازی انتقال موج الکترومغناطیسی

با استفاده از ماژول RF کامسول پارامترهای طراحی شامل طول بخش فلزی (l) و ضخامت دیالکتریک (t) تعیین گردید. ضخامت دیالکتریک (t) در اصل ضریب انتقال و شدت میدان الکتریکی را تعیین میکند. همان طور که در شکل ۲ نمایش داده شده، به ازای مقادیر $l = 20 \text{ mm}$ و $t = 2 \text{ mm}$ ضریب انتقال موج در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، ۹۹٪ تعیین شده است.



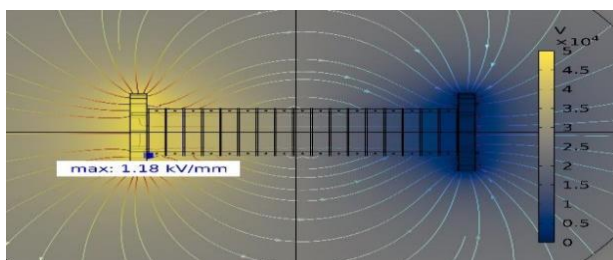
شکل (۲): (الف) پاسخ فرکانسی تلفات (S12) و (ب) پاسخ فرکانسی ضریب بازگشتی دهانه ورودی (S11) شبیه‌سازی شده

به ازای $l = 20 \text{ mm}$ و $t = 2 \text{ mm}$

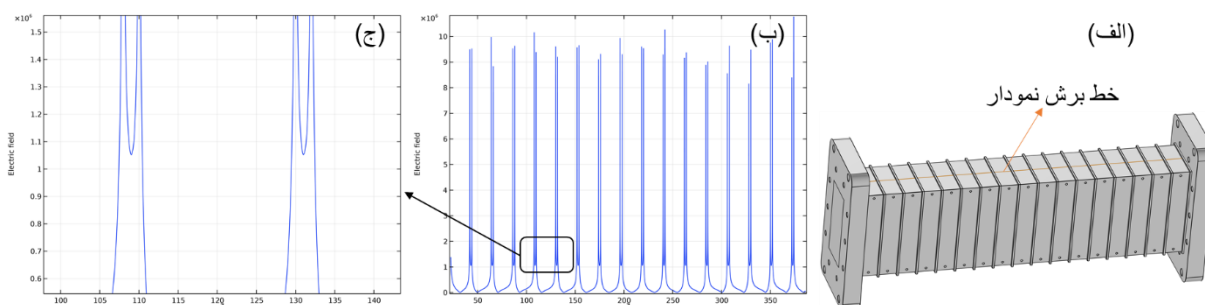


۱-۱- شبیه سازی میدان الکتریکی

برای تعیین بیشینه ولتاژ قابل تحمل موجبر ایزوله‌کننده ولتاژ چندلایه از ماژول الکترواستاتیک نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. بیشینه شدت میدان الکتریکی اعمال شده میان شکاف دو بخش موجبر، به ازای ولتاژ 50 kV اعمال شده، برابر با $1/18 \text{ kV/mm}$ میباشد که این مقدار از استقامت دی الکتریک (32 kV/mm) برای 10 G و میدان شکست 3 kV/mm برای هوا کمتر بوده و لذا از نقطه نظر عایقی قابل قبول میباشد. شکل ۳ شدت میدان الکتریکی در طول موجبر و بیشینه میدان الکتریکی در نقاط مختلف و همچنین شکل ۴ توزیع میدان الکتریکی در طول خط برش نشان داده شده را نمایش میدهد.



شکل (۳): پروفایل میدان الکتریکی در طول موجبر



شکل (۴): نمودار توزیع میدان الکتریکی در طول خط برش

۲- ساخت و تست:

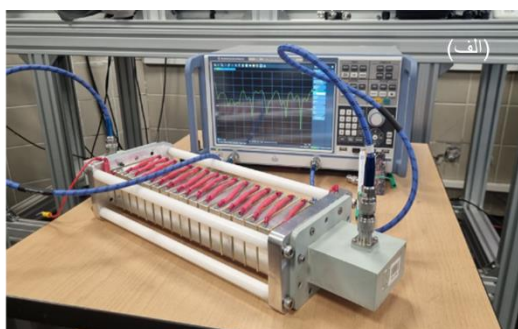
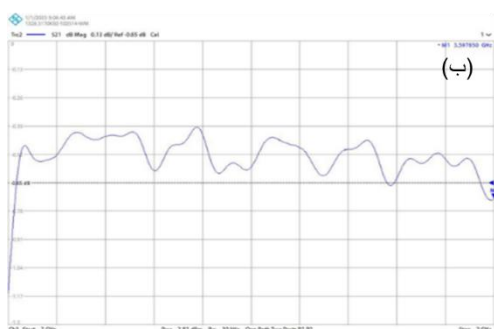
موجبر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه از تعداد ۱۷ رسانا و دو فلنج به طول ۲۰ میلی متر ساخته شده است که توسط عایق 10 G با ضخامت ۲ میلی متر از یکدیگر ایزوله شده‌اند. برای تقسیم ولتاژ میان رساناهای متوالی مقاومت‌های $10 \text{ M}\Omega$ به صورت سری مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۵) موجبر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه و اجزای تشکیل دهنده آن نمایش داده شده است.



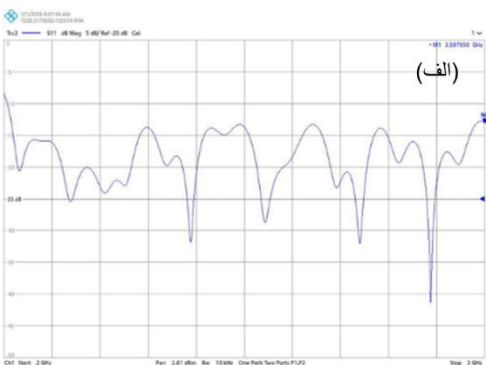
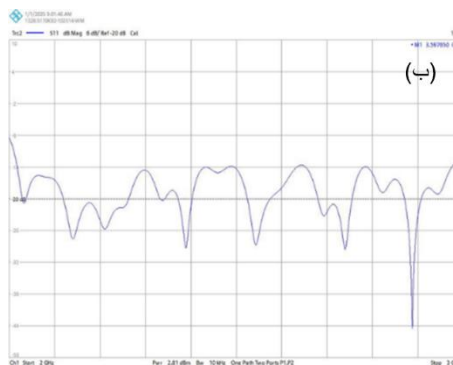
شکل (۵): موجبر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه ساخته شده

۲-۱- اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی

برای ارزیابی پارامترهای پراکندگی H.V.DC.B طراحی شده، از یک نتورک آنالایزر استفاده شده است. فرآیند اندازه‌گیری شامل بررسی ضرایب بازتاب و انتقال در بازه فرکانسی مورد نظر بوده است تا تطابق امپدانس، تلفات ورودی و ایزولاسیون طراحی شده، مورد ارزیابی قرار گیرد. برای کاهش تأثیر اجزای ولتاژ بالا بر دقت اندازه‌گیری، از تکنیک‌های کالیبراسیون مناسب و آداپتورهای فرکانس بالا استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده اطلاعات ارزشمندی در مورد رفتار الکترومغناطیسی کلید فراهم آورد و تطابق طراحی آن با محیط عملیاتی موردنظر و کاربردهای فرکانس بالا را تأیید کرد. شکل ۶ چیدمان و پاسخ فرکانسی اتلاف اندازه‌گیری شده را برای موجبر نمایش می‌دهد.



شکل (۶): (الف) چیدمان اندازه‌گیری (ب) پاسخ فرکانسی تلفات اندازه‌گیری شده H.V.DC.B.



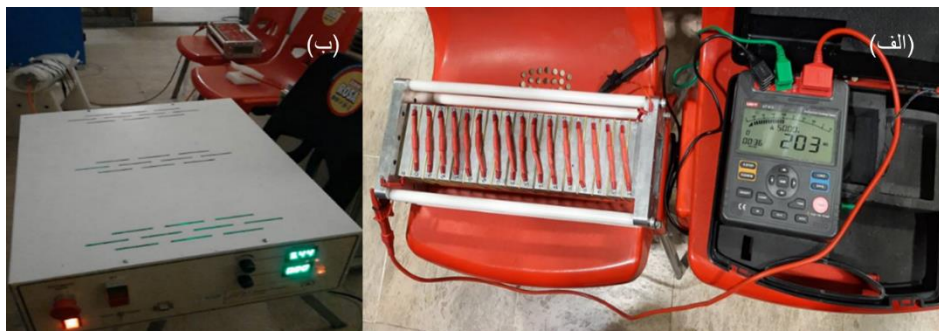
شکل (۷): (الف) پاسخ فرکانسی ضریب بازگشتی دهانه ورودی و (ب) پاسخ فرکانسی ضریب بازگشتی دهانه خروجی اندازه‌گیری شده H.V.DC.B با تحلیل گر شبکه



نمودارهای ضریب بازگشتی ورودی و خروجی H.V.DC.B طراحی شده که در شکل ۷ نمایش داده شده است، رفتار بازتاب امواج در این ساختار را نشان می‌دهند. مقادیر کم این ضرایب در بازه فرکانسی موردنظر، بیانگر تطابق امپدانس مناسب کلید با سیستم‌های متصل است. همچنین، نمودار تلفات عبور یا ۲۱S عملکرد انتقال انرژی الکتریکی را ارزیابی می‌کند. مقدار کم تلفات عبور نشان می‌دهد که طراحی انجام شده به‌طور مؤثری انرژی را بدون تضعیف قابل توجه منتقل می‌کند. تحلیل این نمودارها نشان می‌دهد که طراحی انجام شده نه تنها تطابق امپدانس خوبی ارائه می‌دهد، بلکه تلفات حداقلی را در مسیر انتقال انرژی فراهم می‌کند که برای کاربردهای ولتاژ بالا بسیار حائز اهمیت است.

۱-۱- تست ولتاژ بالا

اندازه‌گیری عملکرد عایقی موجبر در دو مرحله انجام شده است. ابتدا با استفاده از میگر مقاومت میان هر دو موجبر مجاور در ولتاژ ۲kV اندازه‌گیری شد. در این ولتاژ مقاومت میان تمام موجبرها مقدار ۱۰ مگا اهم خوانش گردید. در مرحله بعد با استفاده از منبع تغذیه ولتاژ بالا، اختلاف پتانسیل ۵۰kV به دو فلنج ابتدایی و انتهایی موجبر اعمال گردید که در این حالت نیز هیچ گونه شکست الکتریکی مشاهده نشد. چیدمان اندازه‌گیری عملکرد عایقی موجبر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، این موجبر از نظر عملکرد عایقی در ولتاژ بالا، آماده استفاده در شتابگر الکترواستاتیک ES۲۰۰ می‌باشد و می‌تواند انتظارات ما را برآورده نماید.



شکل (۸): چیدمان اندازه‌گیری عملکرد ولتاژ بالا موجبر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه. (الف) چیدمان تست میگر (ب) چیدمان تست شکست الکتریکی

۲- بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، هدف طراحی و ساخت موجبر ایزوله کننده ولتاژ چند لایه جهت استفاده و افزایش جریان در چشمه یونی شتابگر ES۲۰۰ می‌باشد. موجبر طراحی شده از ۱۷ بخش آلومینیومی و ۲ فلنج با طول ۲۰mm و ۱۸ بخش عایق از جنس G با ضخامت ۲mm ساخته شد. ضریب انتقال موج در فرکانس ۹۹٪، ۴۵/۲ GHz اندازه‌گیری گردید. از نظر عملکرد عایقی، بیشینه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده، ۱/۱۸kV/mm می‌باشد که این مقدار از استقامت دی‌الکتریک (۳۲kV/mm) و شکست هوا (۳kV/mm) کمتر می‌باشد. بنابراین با توجه به مقادیر اندازه‌گیر شده پارامترهای موجی و عایقی، این موجبر برای هدف استفاده در شتابگر ES۲۰۰ مناسب می‌باشد.



۳ - مراجع:

- [۱] H.R. Mirzaei, M. Kazemi, G. Etaati, M. Abbasi, M.K. Kafshgari, H.R. Jelodar, Analysis and design of microwave resonant plasma source for Iranian Space Plasma Simulation Chamber, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, ۱۶ (۲۰۲۲).
- [۲] R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas*, Routledge ۲۰۱۸.
- [۳] J. Helszajn, *Ridge waveguides and passive microwave components*, Iet ۲۰۰۰.
- [۴] V. Pandit, G. Pal, S. Thakur, P.S. Babu, A. Goswami, M. Chatterjee, R. Yadav, S. Srivastava, S. Bhattacharya, S. Roy, Microwave ion source and injection system for a high current compact cyclotron, *Proceedings of the second international workshop on accelerator-driven sub-critical systems and thorium utilization: abstract book*, ۲۰۱۱.
- [۵] Y.S. Cho, H.S. Kim, H.J. Kwon, K.T. Seol, Fabrication of Multi Layer Insulation DC Break for Microwave Ion Source, DOI (۲۰۱۱).
- [۶] S. Jain, D. Sharma, V. Senecha, P. Naik, P. Hannurkar, Study of microwave components for an electron cyclotron resonance source: Simulations and performance, *Sadhana*, ۳۹ (۲۰۱۴) ۹۰۱-۹۲۰.
- [۷] Y.-S. Cho, D.-I. Kim, H.-S. Kim, K.-T. Seol, H.-J. Kwon, Multi-layered waveguide DC electrical break for the PEFM microwave proton source, *Journal of the Korean Physical Society*, ۶۳ (۲۰۱۳) ۲۰۸۵-۲۰۸۸.
- [۸] J. Jo, S.H. Kim, J.T. Jin, S.R. Huh, Development of Waveguide DC Break for Power Transmission at ۲,۴۵ GHz and ۱۰۰-kV Insulation, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, ۳۰ (۲۰۲۰) ۳۳۹-۳۴۲.
- [۹] S. Jain, A. Jain, P. Hannurkar, Indigenous development of a low cost high power ۲ kW (CW), ۲,۴۵ GHz microwave system, DOI (۲۰۰۴).
- [۱۰] H. Mirzaei, M. Yarmohammadi Satri, H. Rahimpour, S. Fasih, Simulation study of the over dense plasma in an electron cyclotron resonance miniature ion source, *Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology (JONSAT)*, ۴۴ (۲۰۲۳) ۱۰۹-۱۱۹.
- [۱۱] H. Rahimpour, H. Mirzaei, M. Yarmohammadi Satri, Analysis and design of a ۲,۴۵ GHz RF power source for a miniature electron cyclotron resonance ion source, *Radiation Physics and Engineering*, ۳ (۲۰۲۲) ۷-۱۵.
- [۱۲] H. Mirzaei, S. Sanaye, B. Yadollahzadeh, M. Shirshekan, O. Hasanpour, Z.R. Mobaraki, F. Ghasemi, A. Mohammadi, M.S. Biabli, A. Abbasi, Development and performance analysis of the ۲۰۰ keV Cockcroft-Walton ion accelerator, *Results in Physics*, ۶۸ (۲۰۲۵) ۱۰۸۰۸۹.
- [۱۳] Y.-S. Cho, D.-I. Kim, H.-S. Kim, K.-T. Seol, H.-J. Kwon, I.-S. Hong, Compact microwave ion source for industrial applications, *Review of Scientific Instruments*, ۸۳ (۲۰۱۲).



مدل‌سازی دینامیک ذرات و انتقال انرژی در شتاب‌دهنده‌های لیزر دی‌الکتریک با تغییر شکل

پالس (کد مقاله : ۱۳۸۹)

مریم کریمی^۱*

۱. پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران، ایران، صندوق آدرس پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹

چکیده:

شتاب‌دهنده‌های لیزری دی‌الکتریک (DLAs) به دلیل ابعاد کوچک، بازده بالا و توانایی انتقال انرژی مؤثر به ذرات باردار مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. این فناوری نوظهور به دلیل استفاده از پالس‌های لیزری با فرکانس بالا، قابلیت ارائه شتابدهی دقیق و کارآمد را دارا است. در این پژوهش، مدل‌سازی دینامیک ذرات و انتقال انرژی در DLAs با در نظر گرفتن اثرات پراکندگی سرعت گروهی و قطبش دی‌الکتریک انجام شده است. به منظور بررسی دقیق مکانیسم‌های شتابدهی، معادلات نیروی لورنتس و میدان‌های الکترومغناطیسی بر پایه معادلات ماکسول حل شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها با سه نوع پالس لیزری سینوسی، گاوسی و سینوسی-گاوسی انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که استفاده از پروفایل‌های مختلف پالس تأثیر قابل توجهی بر توزیع مکانی ذرات، موقعیت متوسط و انرژی کل آن‌ها دارد. پالس گاوسی و ترکیبی سینوسی-گاوسی در مقایسه با پالس سینوسی عملکرد بهتری در شتابدهی ذرات نشان داده‌اند و موجب انتقال انرژی کارآمدتر به ذرات شده‌اند.

کلمات کلیدی: شتاب‌دهنده لیزری-دی‌الکتریک، دینامیک ذرات، شکل پالس، انتقال انرژی.

Modeling Particle Dynamics and Energy Transfer in Laser-Dielectric Accelerators with pulse profile

M. Karimi¹,

¹. Photonic and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran

Abstract:

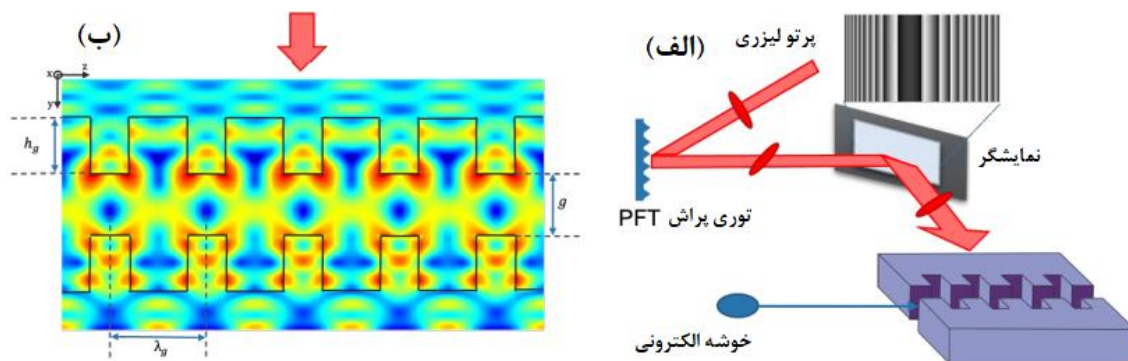
Dielectric laser accelerators (DLAs) have garnered significant attention due to their compact size, high efficiency, and effective energy transfer capabilities to charged particles. This emerging technology, leveraging high-frequency laser pulses, offers precise and efficient particle acceleration. In this study, the dynamics of particle motion and energy transfer in DLAs are modeled by considering the effects of group velocity dispersion and dielectric polarization. To accurately investigate the acceleration mechanisms, the Lorentz force equations and electromagnetic fields based on Maxwell's equations were solved. Simulations were conducted using three types of laser pulse profiles: sinusoidal, Gaussian, and sinusoidal-Gaussian. The simulation results indicate that different pulse profiles have a substantial impact on particle spatial distribution, average position, and total energy. The Gaussian and sinusoidal-Gaussian pulses demonstrated superior performance in particle acceleration compared to the sinusoidal pulse, leading to more efficient energy transfer to the particles.

Key words: Dielectric laser accelerator, particle dynamics, pulse profile, energy transfer.



۱۲ - مقدمه:

شتاب‌دهنده‌های لیزری دی‌الکترونیک (DLAS) یکی از فناوری‌های نوظهور در حوزه شتاب‌دهنده‌های ذرات هستند که از لیزر و ساختارهای دی‌الکترونیک برای شتاب دادن به ذرات باردار استفاده می‌کنند. این فناوری به دلیل پتانسیل بالای خود در کاهش اندازه و هزینه شتاب‌دهنده‌ها، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این شتاب‌دهنده‌ها به جای استفاده از میدان‌های رادیویی متداول در شتاب‌دهنده‌های سنتی، در DLAS از پالس‌های لیزری با فرکانس بالا (معمولاً در محدوده فرسرخ یا مرئی) استفاده می‌شود. این پالس‌ها میدان‌های الکترونیکی بسیار قوی ایجاد می‌کنند که ذرات را شتاب می‌دهند. ذرات باردار از داخل یا نزدیک ساختار دی‌الکترونیک عبور می‌کنند و با میدان‌های الکترونیکی نوسانی ایجاد شده توسط لیزر تعامل می‌کنند. این تعامل باعث انتقال انرژی از لیزر به ذرات و شتاب گرفتن آن‌ها می‌شود. می‌توانند به اندازه‌ای کوچک باشند که روی یک تراشه قرار گیرند. این ویژگی باعث می‌شود که این شتاب‌دهنده‌ها برای کاربردهای فشرده و قابل حمل ایده‌آل باشند. به دلیل استفاده از لیزر و ساختارهای دی‌الکترونیک، هزینه ساخت و نگهداری DLAS نسبت به شتاب‌دهنده‌های سنتی کمتر است. این شتاب‌دهنده‌ها می‌توانند انرژی را با بازده بالاتری به ذرات منتقل کنند. استفاده از لیزر به جای میدان‌های رادیویی، امکان دستیابی به فرکانس‌های عملیاتی بسیار بالاتر را فراهم می‌کند. در حال حاضر، DLAS برای شتاب دادن ذرات به انرژی‌های بسیار بالا (مانند آنچه در شتاب‌دهنده‌های بزرگ مانند LHC وجود دارد) مناسب نیستند. در حال حاضر شتاب‌دهنده‌های لیزری دی‌الکترونیک کاربردهای متعددی در پزشکی برای استفاده در دستگاه‌های پرتودرمانی و تصویربرداری پزشکی با اندازه‌های کوچک‌تر و هزینه کمتر، در صنعت برای کاربرد در بازرسی‌های غیر مخرب و آنالیز مواد، تحقیقات علمی، برای استفاده در آزمایش‌های فیزیک ذرات و علوم مواد و فناوری‌های دفاعی و امنیتی برای کاربرد در سیستم‌های تشخیصی و امنیتی قابل حمل دارد. با پیشرفت‌های اخیر در فناوری لیزر و نانوساختارها، انتظار می‌رود DLAS نقش مهمی در آینده شتاب‌دهنده‌ها ایفا کنند. شکل (۱)، چیدمان طراحی برای شتاب‌دهنده لیزر-دی‌الکترونیک را نشان می‌دهد. توری دی‌الکترونیک یک میلی‌متری به‌عنوان موج‌بر در این شتاب‌دهنده استفاده شده یک ساختار ساده پلکانی است [۱].



شکل (۱): الف - چیدمان طراحی برای شتاب‌دهنده DLAS، ب - توری دی‌الکترونیک یک میلی‌متری [۱].

تحقیقات فعلی بر روی بهبود بازده، افزایش انرژی نهایی ذرات و کاهش هزینه‌ها متمرکز است. این فناوری می‌تواند انقلابی در حوزه شتاب‌دهنده‌ها ایجاد کند و دسترسی به این دستگاه‌ها را در کاربردهای مختلف گسترش دهد.

۱۳ - اصول کار شتاب‌دهنده‌های لیزری دی‌الکترونیک

در DLAS از ساختارهای نانومتری دی‌الکترونیک (مانند سیلیکا یا نیتريد سیلیکون) استفاده می‌شود. این ساختارها به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که میدان‌های الکترومغناطیسی ایجادشده توسط لیزر، ذرات باردار (مانند الکترون‌ها) را شتاب دهند. برای بررسی مکانیسم شتاب‌دهی ذرات معادلات حرکت ذرات باردار تحت تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی توسط معادله نیروی لورنتس مورد بررسی قرار گیرد.



معادلات ماکسول رفتار میدان‌های الکترومغناطیسی را توصیف می‌کنند. برای شبیه‌سازی DLAs، باید معادلات ماکسول را در حضور ساختارهای دی‌الکتریک حل شوند [۲]:

$$\nabla \cdot D = \rho, \nabla \cdot B = 0, \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (1)$$

در آن، E ، و H میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، جابجایی الکتریکی و القای مغناطیسی، ρ و J چگالی بار و چگالی جریان هستند. حرکت ذرات باردار تحت تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی توسط معادله نیروی لورنتس توصیف می‌شود $\frac{dp}{dt} = q(E + v \times B)$ ، که در آن $p = \gamma m v_p$ تکانه ذره و γ ضریب لورنتس است. معادله لاپلاس $\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$ میدان‌های الکترواستاتیک در ساختارهای دی‌الکتریک را تعریف می‌کند. که در آن ϕ پتانسیل الکتریکی است. انرژی انتقال یافته به ذرات با معادله انتقال انرژی به صورت زیر بیان می‌شود $\Delta K = q \int E \cdot dr$ ، روش‌های عددی مختلفی برای حل معادلات پیشنهاد شده که شامل روش تفاضل محدود برای حل معادلات ماکسول در حوزه زمان استفاده می‌شود، روش اجزای محدود که برای حل معادلات پواسون یا لاپلاس در ساختارهای دی‌الکتریک با هندسه‌های پیچیده مناسب است. روش ذره-میدان^{۲۶}، این روش ترکیبی از حل معادلات ماکسول و معادله حرکت ذرات است. در این روش، ذرات باردار و میدان‌های الکترومغناطیسی به طور هم‌زمان شبیه‌سازی می‌شوند، روش طیفی^{۲۷}، برای حل معادلات در حوزه فرکانس، به‌ویژه زمانی که میدان‌های الکترومغناطیسی به صورت هماهنگ هستند به کار می‌رود.

۱۴ - مدل‌سازی دینامیک ذرات در شتاب‌دهنده لیزر دی‌الکتریک

مدل‌سازی دینامیک ذرات در شتاب‌دهنده‌های لیزری-دی‌الکتریک یکی از موضوعات پیشرفته در فیزیک پلاسما و فیزیک لیزر است. این شتاب‌دهنده‌ها به‌ویژه برای شتاب دادن ذرات باردار (مانند الکترون‌ها) به سرعت‌های نزدیک به سرعت نور استفاده می‌شوند. در این مدل‌سازی، اثرات مختلفی مانند میدان‌های الکتریکی لیزری، پاشندگی فاز گروهی، قطبش دی‌الکتریک ماده و اثرات دینامیک انرژی ذرات در نظر گرفته می‌شوند. در شتاب‌دهنده‌های لیزری-دی‌الکتریک، ذرات باردار تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (در صورت وجود) قرار می‌گیرند. دینامیک حرکت ذرات با استفاده از معادله حرکت نیوتنی (یا معادلات لورنس برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی) مدل می‌شود [۲ و ۳]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = q(E + v \times B) \quad (2)$$

که در آن x موقعیت ذره، m جرم ذره، q بار الکتریکی، v سرعت ذره، E و B به ترتیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی لیزری در اکثر مدل‌ها میدان مغناطیسی لیزر نادیده گرفته می‌شود زیرا میدان‌های الکتریکی لیزری به‌عنوان منابع اصلی انرژی برای شتاب دادن ذرات است. میدان‌های لیزری معمولاً امواج الکترومغناطیسی هستند که به‌صورت پالس‌های نوری یا موج‌های مداوم منتشر می‌شوند. این میدان‌ها می‌توانند بر حرکت ذرات باردار تأثیر بگذارند و باعث شتاب‌گیری آن‌ها شوند. به‌طور خاص، پاشندگی فاز گروهی زمانی اهمیت می‌یابد که لیزر دارای پهنای باند بزرگ یا فرکانس‌های مختلف باشد. پاشندگی فاز گروهی باعث تغییر در سرعت گروهی پالس‌های نوری و در نتیجه تغییرات در روند انتقال انرژی به ذرات می‌شود. در این مدل‌سازی، اثر پاشندگی فاز گروهی به‌صورت تغییرات فاز در طول زمان بر میدان لیزری اعمال می‌شود. عبارت مربوط به پاشندگی فاز گروهی به‌صورت زیر است:

^{۲۶} Particle-in-Cell - PIC

^{۲۷} Spectral Method



$$E_{laser}(x, t) = E_0 \cos(k_0 x - \omega_0 t + \frac{D^2}{2} t^2) \quad (3)$$

که در آن، E_0 ، دامنه میدان لیزری، k_0 ، عدد موج مرکزی لیزر، ω_0 ، فرکانس مرکزی لیزر، D^2 ، ضریب پاشندگی مرتبه دوم است که به تغییرات فرکانس و زمان وابسته است. اثر پاشندگی فاز گروهی در این مدل به‌طور مستقیم به تغییرات انرژی در طول زمان و موقعیت ذرات در میدان لیزری منجر می‌شود. ماده دی‌الکتریک موردنظر به‌عنوان یک محیط با خواص ویژه الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. این ماده می‌تواند میدان‌های الکتریکی را جذب کرده و قطبش ایجاد کند. اثر قطبش دی‌الکتریک بر روی میدان‌های الکتریکی به‌صورت غیرخطی عمل می‌کند و با افزایش میدان لیزری، مقدار قطبش $P = \chi_e \epsilon_0 E_{laser}$ نیز تغییر می‌کند. P ، قطبش دی‌الکتریک، χ_e ، پذیرفتاری الکتریکی ماده (الاستیسیته)، ϵ_0 ، نفوذپذیری خلأ، E_{laser} میدان الکتریکی لیزری است. این قطبش، تغییرات در میدان الکتریکی را به‌وجود می‌آورد که می‌تواند به ذرات باردار نیرو وارد کند و موجب تغییرات در سرعت و انرژی ذرات شود. نیروی وارد بر ذرات از اثر قطبش دی‌الکتریک به‌صورت گرادیان قطبش در فضا محاسبه می‌شود: در این مدل، قطبش ماده از رابطه $F_{dipole} = -\nabla P \cdot E_{laser}$ محاسبه می‌شود. این نیرو باعث تغییر در شتاب و سرعت ذرات خواهد شد. انرژی کل ذرات باردار در این مدل‌سازی ترکیبی از انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل

$$E_{total} = \sum_{i=1}^{Np} (\frac{1}{2} m v_i^2 + q \phi(x_i)) \text{ است.}$$

در اینجا، v_i سرعت ذره نام است و $\phi(x_i)$ پتانسیل الکتریکی ذره است که از میدان لیزری حاصل می‌شود. این انرژی شامل، انرژی جنبشی: تغییرات سرعت ذرات باردار و انرژی پتانسیل و اثر میدان الکتریکی لیزری بر ذرات باردار است.

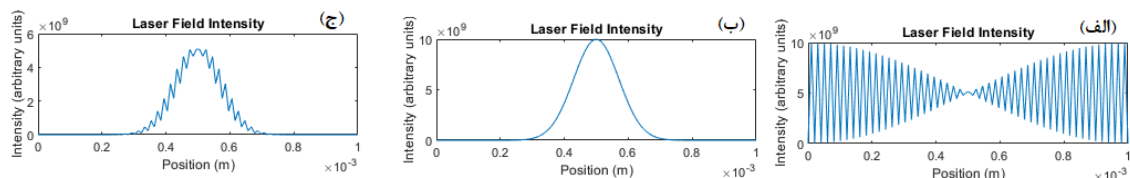
۱۵ - شبیه‌سازی و نتایج

برای شبیه‌سازی دقیق‌تر و جلوگیری از اثرات مصنوعی در مرزها، شرایط مرزی دوره‌ای به‌کاربرده می‌شود، بدین معنی که ذرات وقتی از یک طرف دامنه عبور می‌کنند، از طرف دیگر ظاهر می‌شوند. این امر به حفظ پایداری شبیه‌سازی کمک می‌کند. در شبیه‌سازی، به‌طور کلی از روش‌های عددی مانند روش جهشی^{۲۸} برای به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات در هر گام زمانی استفاده می‌شود. در الگوریتم جهشی موقعیت ذرات با استفاده از معادله $x_{n+1} = x_n + v_n \times dt$ در هر گام زمانی به‌روزرسانی می‌شود و نیروهای وارد بر ذرات محاسبه می‌شود. همچنین تعداد نقاط شبکه فضایی ($Nx=100$) و طول دامنه ($L=1e-3$ m) تنظیم شده‌اند. تعداد گام‌های زمانی ($Nt=1000$) و اندازه گام زمانی ($dt=1e-10$ s) تعیین شده‌اند. موقعیت اولیه ذرات به‌صورت تصادفی در دامنه $[0, L]$ تنظیم شده و سرعت اولیه همه ذرات صفر است. دی‌الکتریک به‌صورت یک توری با گام‌های متناوب است. شرط تشدید که منجر به بیشینه شدن شتاب ذرات می‌شود این است که تناوب توری با طول موج میدان لیزری مرتبط باشد $d_{grating} \approx 2\lambda_{laser}$ ، برای لیزرهای فمتوثانیه معمولاً حدود ۸۰۰ نانومتر (مثل تیتانیوم-سافایر) این مقدار برای تداخل سازنده امواج الکتریکی مناسب و تقویت شتاب ذرات است [۴]. بنابراین در اینجا $d_{grating} = 400nm$ در نظر گرفته می‌شود. در اینجا سه نوع پالس متناوب به‌صورت یک میدان سینوسی ساده $E_{sin} = E_{laser_peak} \sin(2\pi x_{grid} / d_{grating})$ میدان پروفایل سینوسی - گوسی $E_{gaussian} = E_{laser_peak} \exp(-(x_{grid} - x0)^2 / (2\sigma^2))$ و میدان پروفایل سینوسی - گوسی $E_{grating} = E_{laser_peak} \sin(2\pi x_{grid} / d_{grating}) \exp(-(x_{grid} - x0)^2 / (2\sigma^2))$ و تأثیر آن در خروجی ذرات شتابدهی

^{۲۸} Leapfrog

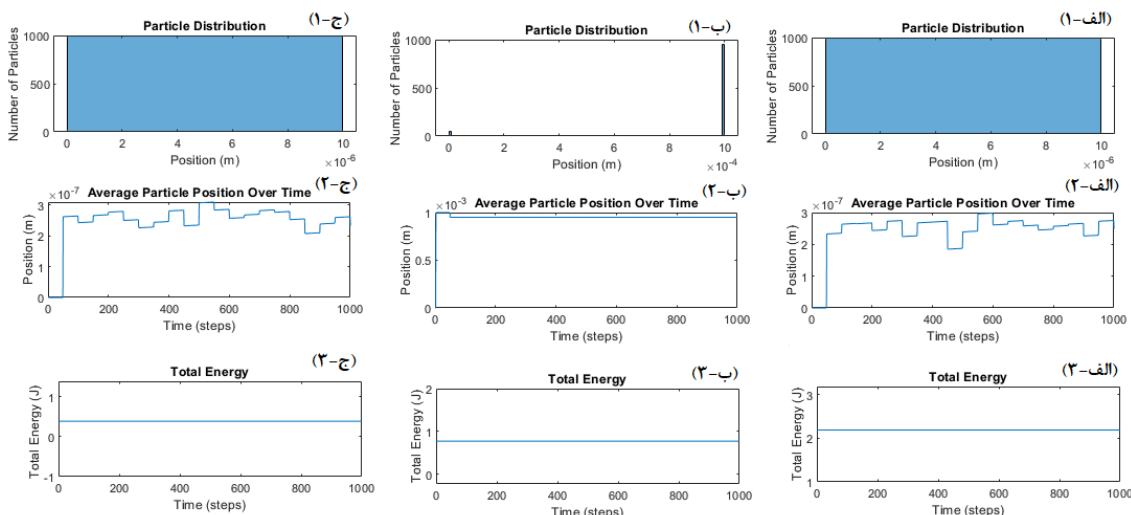


شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۲)، تغییرات شدت خروجی پالس لیزری با پروفایل‌های پیشنهادی قابل مشاهده است.



شکل (۲): پالس لیزری متناوب با پروفایل‌های مختلف، الف- سینوسی، ب- گاوسی، ج- سینوسی - گاوسی.

در شکل (۳)، نحوه توزیع الکترون‌ها بر حسب زمان و مکان و همچنین انرژی کل ذرات حاصل از شتابدهی توسط سه نوع پروفایل پالس پیشنهادی مشاهده می‌شود. همان‌طور که از شکل (۳)، مشاهده می‌شود در توزیع ذرات برای پالس، سینوسی، گاوسی و سینوسی-گاوسی نسبت به زمان به ترتیب، ثابت و به صورت یکنواخت، متغیر و گسترده نسبت به زمان، و ترکیبی از ویژگی‌های دو حالت قبلی را دارد. در خصوص موقعیت متوسط ذرات در سه پالس به ترتیب، تقریباً ثابت، و جود تغییرات مکان ذره نسبت به زمان، و ترکیبی از این دو حالت است. انرژی کل برای پالس سینوسی، گاوسی و سینوسی-گاوسی نسبت به زمان به ترتیب ثابت، کاهش در طول زمان، انرژی کل ثابت و کاهش بیشتری نسبت به دو حالت قبل دارد.



شکل (۳): نحوه توزیع الکترون‌ها شتابدهی بر حسب زمان و مکان و همچنین انرژی کل الکترون‌ها تحت شتابدهی با پروفایل پالس‌های مختلف، الف- سینوسی، ب- گاوسی، ج- سینوسی - گاوسی.

۱۶ - بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی شتاب‌دهنده‌های لیزری دی‌الکتریک و تأثیر پروفایل‌های مختلف پالس لیزری بر شتابدهی ذرات باردار پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از پالس سینوسی منجر به توزیع یکنواخت ذرات با موقعیت و انرژی ثابت می‌شود که قابلیت شتابدهی موثری را فراهم نمی‌کند. در مقابل، پالس گاوسی توزیع فضایی متغیر و کاهش انرژی کل را نشان داده که بیانگر انتقال انرژی بهتر به ذرات است. پالس سینوسی-گاوسی ترکیبی از ویژگی‌های دو حالت قبلی را ارائه



داده و موجب انتقال انرژی کارآمدتر به ذرات شده است. با پیشرفت فناوری‌های مرتبط با تولید پالس‌های لیزری و طراحی ساختارهای دی‌الکتریک، انتظار می‌رود این فناوری در کاربردهای پزشکی، صنعتی و تحقیقاتی نقش مهمی ایفا کند.

۱۷ - مراجع:

- [۱] A. Ody, S. Crisp, P. Musumeci, D. Cesar, and R. J. England, "SHarD: A beam dynamics simulation code for dielectric laser accelerators based on spatial harmonic field expansion arXiv:۲۱۰۷.۱۱۴۱۰v۱ [physics.acc-ph], ۲۰۲۱.
- [۲] N. Schönenberger and P. Hommelhoff, "Dielectric Laser Acceleration", arXiv:۲۰۰۸.۰۳۹۵۸v۱ [physics.acc-ph] ۱۰ Aug ۲۰۲۰.
- [۳] D. Cesar ۱, S. Custodio, J. Maxson, P. Musumeci, X. Shen, E. Threlkeld, R.J. England, A. Hanuka, I.V. Makasyuk, E.A. Peralta, K.P. Wootton & Z. Wu, "High-field nonlinear optical response and phase control in a dielectric laser accelerator", Commun. Phys., Vol. ۱, No. ۱, ۲۰۱۸.
- [۴] K. P. Wootton, J. McNeur, and K. J. Leedle, "Dielectric Laser Accelerators: Designs, Experiments, and Applications" Reviews of Accelerator Science and Technology Vol. ۰۹, pp ۱۰۵-۱۲۶, ۲۰۱۶.



اعتبارسنجی نرم‌افزار GENESIS 1.3 برای شبیه‌سازی ناحیه برهمکنش لیزر الکترون آزاد در ناحیه تراهرتز (کد مقاله : ۱۳۹۱)

فاطمه تدریسی^{۱*}، ناصر وثوقی^۱، شاهین صنایع حجری^۲، فرشاد قاسمی^۲، امین صدراایی جواهری^۳

۱ دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲ پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

۳ پژوهشکده لیزر و فوتونیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، عملکرد لیزر الکترون آزاد (FEL) در ناحیه تراهرتز با استفاده از کد شبیه‌سازی GENESIS ۱,۳ مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. تأثیر پهنای انرژی (۰٪، ۳٪، ۴٪) و گسیل‌پذیری باریکه الکترونی ($10^{-12}, 10^{-6}, 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{rad}$) بر توان اشباع و بهره لیزر الکترون آزاد بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش پهنای انرژی باعث کاهش توان اشباع از ۲ مگاوات به ۰.۸۵ و ۰.۲۵ مگاوات شده و افزایش گسیلندگی نیز افت شدید توان تابشی را در پی دارد. هم‌خوانی دقیق نتایج شبیه‌سازی با محاسبات تئوری، اعتبار بالای کد GENESIS ۱,۳ را جهت استفاده کاربر تأیید کرده و دقت آن را در مدل‌سازی لیزرهای الکترون آزاد تراهرتز نشان می‌دهد. این یافته‌ها چارچوبی قوی برای طراحی و بهینه‌سازی منابع نوری تراهرتز با بهره بالا ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: لیزر الکترون آزاد، پهنای انرژی، گسیلندگی، توان اشباع، شبیه‌سازی GENESIS ۱,۳، منابع نوری تراهرتز

Validation of GENESIS 1.3 Software for Simulating the Interaction Region of Free Electron Laser in Terahertz Range

Fatemeh Tadrissi^{1*}, Naser Vosoughi¹, Shahin Sanaie Hajari², Farshad Ghasemi², Amin Sadraie Javaheri³

۱. Energy Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

۲. Research Center for Physics and Accelerators, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.

۳. Laser and Photonics Research Center, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract:

This study investigates the performance of the GENESIS 1.3 simulation code for modeling the interaction region of free electron lasers (FELs) in the terahertz range. The effects of energy spread (0%, 3%, 4%) and emittance ($10^{-12}, 10^{-6}, 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{rad}$) on saturation power and gain were analyzed. Simulation results showed that increasing energy spread reduces saturation power, dropping from 2 MW to 0.85 MW and 0.25 MW for 3% and 4% energy spread, respectively. Additionally, higher emittance significantly lowers saturation power, demonstrating excellent agreement between simulation and theoretical predictions. These findings validate the accuracy and reliability of the GENESIS 1.3 code, making it a robust tool for FEL design and optimization in terahertz light sources.

Keywords:



Free Electron Laser (FEL), Energy Spread, Emittance, Saturation Power, GENESIS 1.3 Simulation, Terahertz Light Sources

۱- مقدمه

امواج تراهرتز در بازه ۰.۱ تا ۱۰ تراهرتز (طول موج ۳۰۰ میکرومتر و انرژی ۴.۲ میلی‌الکترون‌ولت) قرار دارند و به دلیل ویژگی‌هایی نظیر شفافیت نسبت به مواد غیرقطبی، غیر یونیزان بودن، و توانایی شناسایی مواد، کاربردهای متنوعی در پزشکی، صنایع و ارتباطات بی‌سیم دارند [۱-۲]. در پزشکی، حساسیت به محتوای آب در بافت‌ها امکان تشخیص زودهنگام بیماری‌ها را فراهم می‌کند، و در صنایع و ارتباطات بی‌سیم برای شناسایی نقص مواد و شبکه‌های نسل آینده استفاده می‌شوند. لیزرهای الکترون آزاد^{۲۹} با تولید تابش تراهرتز از باریکه‌های الکترونی نسبتی، به دلیل تنظیم‌پذیری طول موج و توان بالا، در جراحی‌های دقیق، تصویربرداری پزشکی، تعیین ساختار اتمی، کشف داروها و فناوری‌هایی نظیر میکروفاابریکاسیون و امنیت نقش دارند [۳-۵]. نرم‌افزار GENESIS ۱.۳ با مدل‌سازی دقیق و قابلیت پردازش موازی، ابزاری پیشرفته برای شبیه‌سازی لیزرهای الکترون آزاد است که امکان تحلیل دینامیک ذرات و میدان‌های تابشی را با انعطاف‌پذیری بالا و پشتیبانی از فرمت داده HDF فراهم می‌کند [۶-۸]. اهمیت اعتبارسنجی GENESIS ۱.۳ در تأیید دقت شبیه‌سازی‌های آن از طریق مقایسه با داده‌های تجربی نهفته است. این اعتبارسنجی نقش کلیدی در پیش‌بینی دقیق عملکرد و طراحی سیستم‌های لیزرهای الکترون آزاد ایفا می‌کند و استفاده از نرم‌افزار را در پروژه‌های پیشرفته، از جمله طراحی لیزرهای الکترون آزاد‌های نسل جدید، ممکن می‌سازد [۹].

۲- روش کار

Genesis ۱,۳ قادر است فرآیندهای رشد بهره^{۳۰} و اشباع^{۳۱} را به صورت کامل شبیه‌سازی کند، همچنین از دو حالت تک بار عبور^{۳۲} و چندبار عبور^{۳۳} پشتیبانی می‌کند. پارامترهای قابل تنظیم در Genesis ۱,۳ شامل: مشخصات باریکه الکترونی: انرژی باریکه، طول خوشه^{۳۴}، پهنای انرژی و بیشینه جریان^{۳۵}، مشخصات تابش الکترومغناطیسی: طول موج، فاز اولیه و مشخصات طیفی و پارامترهای آندولاتور: طول آندولاتور، ثابت آندولاتور و تعداد دوره‌ها می‌باشد.

۱-۲. روش‌های محاسباتی و شبیه‌سازی پیشرفته و خروجی‌های نرم‌افزار Genesis ۱,۳

این نرم‌افزار با استفاده از حل معادلات ماکسول و ویولت^{۳۶}، امکان شبیه‌سازی دقیق دینامیک تابش و باریکه الکترونی را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی اثرات غیرخطی، پراکندگی طیفی، تابش خودبه‌خودی و همدوس را دارد. خروجی‌های آن شامل پروفایل‌های زمانی و طیفی، نمودارهای رشد و اشباع تابش، و توزیع فضا-انرژی باریکه است، که آن را به ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی لیزرهای الکترون آزاد تبدیل می‌کند.

۲-۲. روش‌شناسی

برای مطالعه برهم‌کنش لیزر الکترون آزاد در ناحیه تراهرتز، از نرم‌افزار GENESIS ۱,۳ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت تعریف دقیق پارامترهای باریکه الکترونی و آندولاتور از طریق دو فایل ورودی در کد فراهم می‌کند. در این مطالعه، شبیه‌سازی‌ها برای بررسی تأثیر پهنای انرژی و گسیل‌پذیری‌های مختلف (ε) بر تابش لیزر الکترون آزاد انجام شده است.

FELs^{۲۹}
Gain^{۳۰}
Saturation^{۳۱}
Single-pass^{۳۲}
Oscillator Mode^{۳۳}
Bunch Length^{۳۴}
Peak Current^{۳۵}
Maxwell-Wavelet^{۳۶}



جدول ۱: پارامترهای باریکه الکترونی و آندولاتور.

پارامتر	مقدار
(γ) فاکتور لورنتز	مگا الکترون ولت ۱۶
گسیلندگی بهنجار در راستای (x)	16.0×10^{-12} m.rad
گسیلندگی بهنجار در راستای (y)	16.0×10^{-12} m.rad
(β_x) بتا ایکس	متر 2.25×10^6
(β_y) بتا وی	متر 2.25×10^6
دوره تناوب آندولاتور	متر ۰.۰۷۰
تعداد تناوب‌ها	۱۰۰
پارامتر آندولاتور	۰.۹

جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی، هدف بررسی تأثیر پهنای انرژی بر تابش تولید شده است. شبیه‌سازی‌ها برای سه مقدار مختلف پهنای انرژی (۰٪، ۳٪، ۴٪) انجام شد، در حالی که گسیلندگی بهنجار ثابت نگه‌داشته شد. خروجی‌های شبیه‌سازی شامل توان تابش، پهنای باند فرکانسی، میزان همدوسی تابش بررسی و تحلیل شدند. توان خروجی برای هر حالت پهنای انرژی محاسبه شده و تأثیر آن بر پهنای باند تابش و کیفیت پرتو تولید شده ارزیابی گردید. علاوه بر این، تأثیر گسیلندگی‌های مختلف نیز بررسی شد. برای پهنای انرژی ۰٪، ورودی‌ها برای حالات مختلف گسیل پذیری نیز تعریف شدند. گسیل پذیری‌های مورد بررسی شامل 10^{-6} m.rad، 10^{-12} m.rad، 10^{-4} m.rad بودند. باید توجه داشت که با تغییر گسیل پذیری، مقدار تابع بتا (β) نیز تغییر می‌کند. این تغییرات در شبیه‌سازی لحاظ شده و تأثیر آن‌ها بر توان تابش و همدوسی پرتو بررسی گردید. نتایج این تحلیل‌ها وابستگی مستقیم کیفیت تابش به گسیل پذیری و مقدار تابع بتا را نشان دادند.

۳-۲- محاسبات تئوری

در این مطالعه، پارامتر پیرس (ρ) مطابق رابطه ۱ معیاری برای قدرت جفت‌شدگی بین الکترون‌ها و میدان تابشی در سیستم لیزر الکترون آزاد است، محاسبه شد. این پارامتر با استفاده از جریان الکترون (I_e)، پارامتر نوسان ساز (K_0)، فاکتور بسل [JJ]، فاکتور لورنتز (γ)، اندازه RMS باریکه الکترونی (σ_x) و عدد موج نوسان ساز (k_u) تعیین گردید. مقدار پارامتر پیرس (ρ) که از توابع بسل مرتبه صفر و یک به دست آمده و تأثیر قابل توجهی در توصیف پویایی میدان تابشی دارد. این پارامترها در طراحی و تحلیل سیستم‌های FEL بسیار مؤثر هستند.

$$\rho = \left[\frac{I_e \cdot K_0^2 [JJ]^2}{16\gamma^2 \sigma_x^2 k_u^2} \right] \quad \text{رابطه ۱}$$

فاکتور بسل [JJ] از رابطه ۲ دست می‌آید:

$$J_1(\varepsilon) - J_0(\varepsilon) = [JJ] \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن $J_0(\varepsilon)$ و $J_1(\varepsilon)$ توابع بسل مرتبه صفر و یک هستند. با جایگذاری $\varepsilon = \frac{k^2}{4+2k^2} = 0.144$ مقدار $[JJ] = 0.978$ به دست آمد. با جایگذاری مقادیر جریان الکترونی ($I_e = 500$ A)، جریان آلفون ($I_A = 17000$ A)، پارامتر نوسان ساز (0.9)، $K = 16$ ، فاکتور لورنتز الکترون‌ها ($\gamma = 16$)، پارامتر ورودی برای توابع بسل $[JJ] = 0.978$ ، اندازه RMS باریکه الکترونی $\delta x = 1.5$



میلی‌متر، عدد موج نوسان‌ساز $k_u = \frac{2\pi}{\lambda_u}$ عدد موج نوسان‌ساز پارامتر پیرس به دست خواهد آمد. نتایج محاسبات نشان دادند که مقدار $\rho \approx 0.0264$ است. این مقدار نشان‌دهنده قدرت تابش و بهره سیستم است. همچنین برای محاسبه توان باریکه هم در یک سیستم لیزر الکترون آزاد از رابطه ۳ استفاده می‌شود:

$$P_{beam} = \frac{(\gamma - 1)mc^2}{e} I \quad \text{رابطه ۳}$$

با جایگذاری جریان باریکه الکترونی ($I=500A$)، فاکتور لورنتز باریکه الکترونی ($\gamma=1.6$)، انرژی سکون الکترون ($m_e = 0.511 MeV$)، بار الکترون ($e=1.6 \times 10^{-19} C$)، مقادیر توان باریکه:

$$P_{beam} = 8187.61 \text{ Mw}$$

در نهایت، نیاز به محاسبه توان اشباع در آندولاتور یا توان تابشی که بیانگر حداکثر توانی است که تابش همدوس تولید شده توسط باریکه الکترونی می‌تواند به آن دست یابد، داریم:

$$P_{sat} = \frac{1.6}{(1 + \Lambda)^2} \cdot \rho \cdot P_{beam} \quad \text{رابطه ۴}$$

که با جایگذاری پارامتر پیرس ($\rho=0.0257$)، توان باریکه ($P=8187.61 \text{ Mw}$)، ضریب کاهش بهره طولی (Λ) توان اشباع در حالت هاب مختلف محاسبه می‌شود. پارامتر Λ که بیانگر ضریب کاهش بهره طولی است، از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود. این رابطه شامل ضرایب ثابت و پارامترهای اتم ($\eta_d \eta_\epsilon \eta_\gamma$) هستند. که هر کدام بیانگر ویژگی‌های فیزیکی مشخصی از سامانه FEL هستند: η_d پارامتر پراش و η_ϵ پارامتر گسیلندگی و η_γ پارامتر پهنای انرژی می‌باشد. برای هر مقدار گسیلندگی و پهنای انرژی، باید مقدار Λ محاسبه شود. همچنین برای جلوگیری از خطاهای محاسباتی، علاوه بر محاسبات دستی این روابط و ضرایب به صورت کامل در کد پایتون نیز پیاده‌سازی شده است تا امکان محاسبه سریع و دقیق در حالات مختلف فراهم شود.

$$\Lambda = a_1 \eta_d^{a2} + a_2 \eta_\epsilon^{a4} + a_3 \eta_\gamma^{a6} + a_4 \eta_\epsilon^{a8} \eta_\gamma^{a9} + a_5 \eta_d^{a11} \eta_\gamma^{a12} + a_6 \eta_d^{a14} \eta_\epsilon^{a15} + a_7 \eta_d^{a17} \eta_\epsilon^{a18} \eta_\gamma^{a19}$$

جدول ۲: ضرایب ثابت پارامتر ضریب کاهش بهره طولی (Λ).

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
۰.۴۵	۰.۵۷	۰.۵۵	۱.۶	۳	۲	۰.۳۵	۲.۹	۲.۴	۵۱
	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}
	۰.۹۵	۳	۵.۴	۰.۷	۱.۹	۱۱۴۰	۲.۲	۲.۹	۳.۲

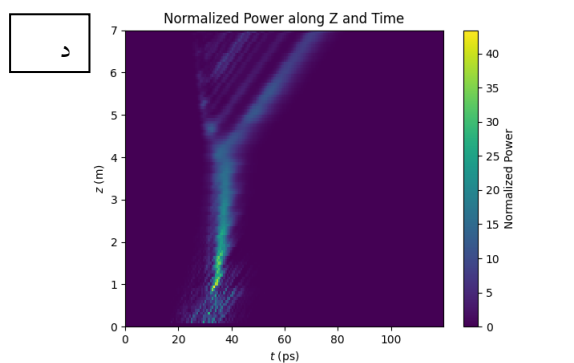
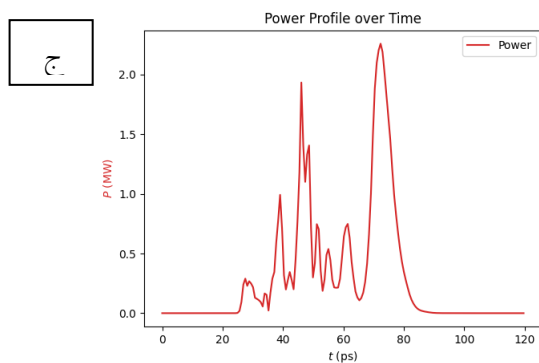
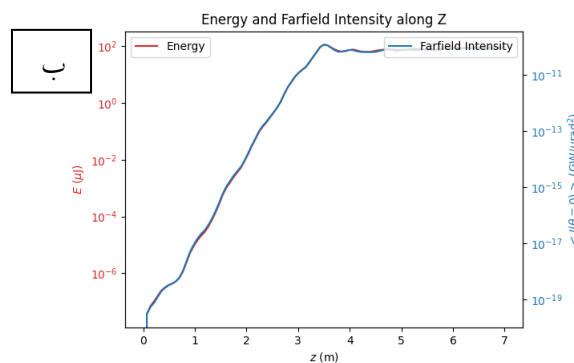
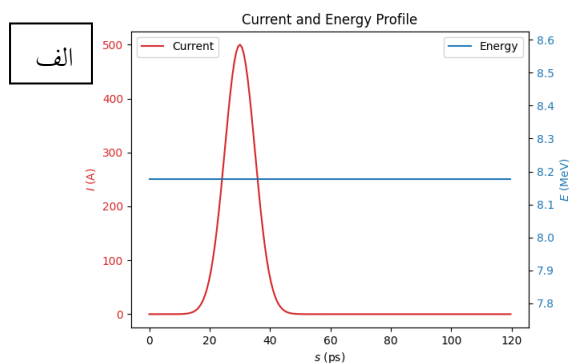
۳- نتایج:

۳-۱- تأثیر پهنای انرژی بر توان اشباع و طول اشباع در آندولاتور

در حالت گسیلندگی نزدیک به صفر و پهنای انرژی صفر، توان خروجی به صورت یکنواخت افزایش یافته و به مقدار بیشینه ۲ مگاوات می‌رسد. این نتایج بیانگر رشد پایدار تابش و کارایی بالای لیزر الکترون آزاد در شرایط ایده‌آل است. با افزایش پهنای



انرژی به ۳٪ و ۴٪ توان اشباع به ترتیب به ۰.۸۵ مگاوات و ۰.۲۵ مگاوات کاهش می‌یابد. همچنین، طول اشباع در آندولاتور افزایش یافته و فرآیند اشباع در نقاط دورتری از آندولاتور رخ می‌دهد. این تغییرات ناشی از افزایش پهنای انرژی در باریکه و کاهش همدوسی تابش است، که منجر به افت بهره تابشی و کارایی سیستم می‌شود.



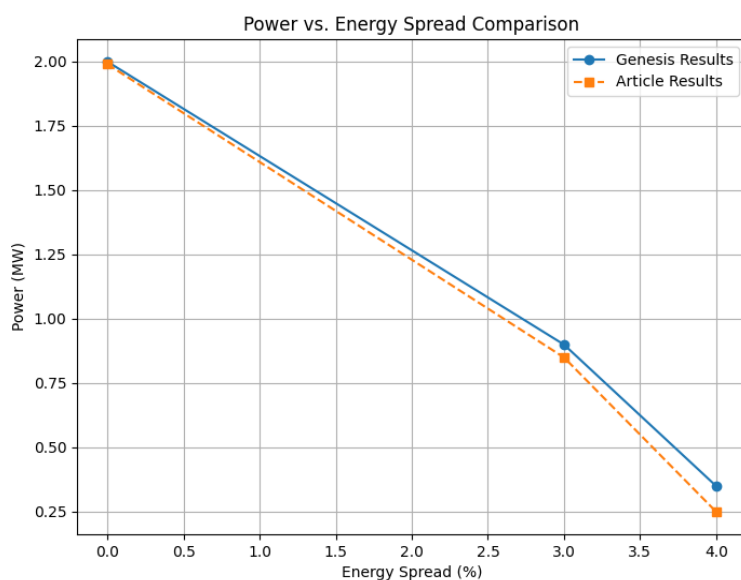
شکل ۱: نمودارهای الف، ب، ج و د به ترتیب: پروفایل جریان و انرژی باریکه الکترونی، پهنای انرژی و شدت تابش در طول آندولاتور، پروفایل توان برحسب زمان و توزیع توان نرمال شده در طول آندولاتور و زمان.

۳-۲- تأثیر گسیلندگی بر توان اشباع و طول اشباع در آندولاتور:

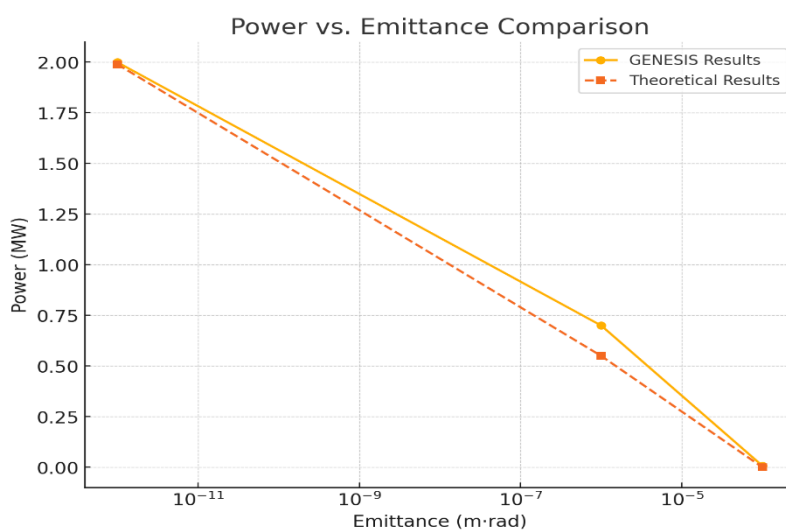
در شرایط پهنای انرژی صفر، با افزایش گسیلندگی از 10^{-12} m·rad به 10^{-6} m·rad و 10^{-4} m·rad، توان اشباع به ترتیب از ۲ مگاوات به ۰.۷ مگاوات و ۰ مگاوات کاهش می‌یابد. این کاهش نشان‌دهنده تأثیر مستقیم پراکندگی زاویه‌ای باریکه الکترونی بر کاهش بهره تابشی است. علاوه بر این، افزایش گسیلندگی منجر به طولانی‌تر شدن طول اشباع در



آندولاتور می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و محاسبات تئوری نیز انطباق مناسبی را نشان می‌دهد، به طوری که توان‌های محاسبه شده تئوری برای این گسیلندگی‌ها به ترتیب ۱.۹۹ مگاوات، ۰.۵۵ مگاوات و ۰ مگاوات است.



شکل ۲: مقایسه توان اشباع بر حسب پهنای انرژی.



شکل ۳: مقایسه توان اشباع بر حسب گسیلندگی.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با کد GENESIS ۱,۳ نشان‌دهنده تطابق قابل توجه با محاسبات تئوری است، به ویژه در بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی نظیر گسیلندگی و پهنای انرژی بر توان اشباع. نمودارها به وضوح کاهش توان



اشباعی را با افزایش گسیلندگی و پهنای انرژی نشان می‌دهند، و این روند در داده‌های شبیه‌سازی و محاسبات تئوری هم‌خوانی بسیار خوبی دارد. چنین انطباقی نه تنها دقت و صحت مدل‌سازی این کد را تأیید می‌کند، بلکه کارایی بالای آن را برای تحلیل و پیش‌بینی دقیق رفتار لیزرهای الکترون آزاد در شرایط مختلف به نمایش می‌گذارد. این نتایج نشان می‌دهند که تغییرات در پارامترهای باریکه الکترونی، مانند پهنای انرژی و گسیلندگی، تأثیر مستقیمی بر بهره تابشی و توان اشباع دارد و نیازمند تنظیمات دقیق برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم است. افزایش پهنای انرژی و گسیلندگی علاوه بر کاهش توان اشباع، منجر به طولانی‌تر شدن طول اشباع در آندولاتور می‌شود، که نشان‌دهنده افت کارایی و افزایش نیاز به طراحی بهینه‌تر است. در نهایت، شبیه‌سازی‌ها و محاسبات تئوری با استفاده از GENESIS پتانسیل بالای این کد را جهت طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های لیزری در کاربردهای پیشرفته، به‌ویژه در ناحیه تراهرتز، نشان می‌دهد.

۵- مراجع:

- [۱] Fritz, A., & Arnold, T. (۲۰۱۴). "Inspection of Packaged Integrated Circuits using Terahertz Radiation." *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, ۷(۵), ۱-۴. doi:۱۰,۲۱۳۰۷/ijssis-۲۰۱۹-۰۵۶.
- [۲] Sun, Y., Sy, M. Y., Wang, Y. X. J., Ahuja, A. T., Zhang, Y. T., & Pickwell-MacPherson, E. (۲۰۱۱). "A promising diagnostic method: Terahertz pulsed imaging and spectroscopy." *World Journal of Radiology*, ۳(۳), ۵۵-۶۵. doi:۱۰,۴۳۲۹/wjr.v۳.i۳,۵۵.
- [۳] Nguyen, D., Russell, S., & Moody, N. (۲۰۰۹). "Theory and Practice of Free-Electron Lasers." US Particle Accelerator School (USPAS) Lecture.
- [۴] Turner, S. (۱۹۹۰). "Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers." CERN Accelerator School (CAS) Lecture.
- [۵] Wille, K. (۲۰۰۰). *The Physics of Particle Accelerators*. Oxford University Press.
- [۶] GENESIS ۱,۳ Manual (Version ۴,۵,۱). September ۲۰۲۱. Details about installation, input configurations, output files, and post-processing capabilities.
- [۷] GENESIS ۱,۳ Overview. Description of simulation features, software execution, and advanced configurations.
- [۸] Reiche, S. (۲۰۰۰). "Numerical Studies for a Single Pass High Gain Free-Electron Laser." DESY Print, DESY-THESIS-۲۰۰۰-۰۱۲.
- [۹] Saldin, E. L., Schneidmiller, E. A., & Yurkov, M. V. (۲۰۰۰). *The Physics of Free Electron Lasers*. Springer.
- [۱۰] OpenMPI Documentation. Available at: <https://www.open-mpi.org/>. Accessed January ۱۲, ۲۰۲۵.



اندازه‌گیری ابعاد باریکه یونی آرگون چشمه یونی کافمن مولتی کاسپ با استفاده از آثار حرارتی آن (کد مقاله: ۱۴۵۰)

محمدباقری، فیاض^۱

۱. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، گروه پرتوهای یونی

چکیده:

اندازه‌گیری توزیع چگالی جریان باریکه در راستای محور x و y با هدف شناخت خواص باریکه و نحوه رفتار آن می‌تواند اطلاعات مناسبی از نحوه کارکرد صحیح دستگاه ارائه بدهد. اندازه‌گیری ابعاد باریکه چشمه یونی کافمن مولتی کاسپ مورد استفاده در دستگاه MBM100 برای اطلاع از نحوه توزیع چگالی جریان باریکه بسیار مهم است. دانستن ابعاد باریکه برای قرار دادن نمونه، جهت کاشت یون مهم است. در تحقیق حاضر به دنبال اندازه‌گیری *passive* نقش باریکه به جای اندازه‌گیری *active* هستیم؛ اگرچه در این حالت گرفتن پاسخ آزمون سریع نیست ولی با این حال نقش باریکه با دقت و رزولوشن بالایی به دست می‌آید و می‌تواند اندازه‌گیری نسبی و مطمئن و درعین حال کم‌هزینه را به ارمغان بیاورد. کلمات کلیدی: نقش باریکه، آثار حرارتی، چشمه یونی، یون آرگون

Measurement of Argon Ion Beam profile of Multicusp Kaufman Ion Source Using its thermal effects

Mohammadbagheri, Faiyaz^{۱*}

۱. AEOI, Nuclear science and technology research, School of physics and accelerators, Ion beams department

Abstract:

Measuring the beam current density distribution along the x and y axes with the aim of understanding the beam properties and how it behaves can provide appropriate information on how the device works properly. Measuring the beam dimensions of the Kaufmann Multicusp ion source used in the MBM 100 device is very important to know how the beam current density is distributed. Knowing the beam dimensions is important for sample placement, for ion implantation. In the present study, we are looking for passive measurement of the beam profile instead of active measurement; although in this case, obtaining the results is not fast, nevertheless, the beam profile is obtained with high accuracy and resolution and can cause relative and reliable low cost measurements at the same time.

Key words: beam profile, thermal effects, ion source, argon ion

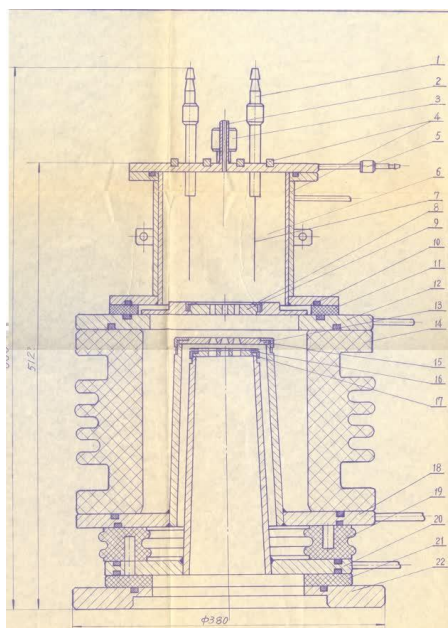


۱۸ - مقدمه:

اندازه‌گیری توزیع چگالی باریکه در راستای محور X و Y با هدف شناخت خواص باریکه و نحوه رفتار آن می‌تواند اطلاعات مناسبی از نحوه کارکرد صحیح دستگاه ارائه بدهد. اندازه‌گیری پروفایل باریکه به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. صفحات سوسوزن، پوششگرهای سیمی، نمایشگر گاز باقیمانده و نمایشگر الکترون ثانویه، فارادی کاپ آرایه‌ای، همگی برای اندازه‌گیری پروفایل باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری ابعاد باریکه چشمه یونی کافمن مالتی کاسپ مورد استفاده در دستگاه $MBM100$ برای اطلاع از نحوه توزیع چگالی جریان باریکه بسیار مهم است. دانستن ابعاد باریکه برای قرار دادن نمونه جهت کاشت یون و اطمینان رسیدن دز یکنواخت به نقاط نمونه لازم است. تلاش‌های زیادی در آزمایشگاه‌های جهان برای اندازه‌گیری ابعاد و مقدار باریکه انجام می‌شود، اما در کشور ما بررسی اندازه‌گیری ابعاد باریکه قدمت زیادی ندارد. پروفایل باریکه شتاب دهنده $200-ES$ مستقر در دانشگاه شهید بهشتی توسط یک نمایشگر الکترون ثانویه توسط ابراهیمی بسابی و همکاران [۱] انجام شده است. یک شبکه‌ای متشکل از ۳۲ سیم به صورت افقی و عمودی و به فاصله $1/5$ میلی‌متر در جلوی باریکه تعبیه گردیده است. ساخت فارادی کاپ آرایه‌ای توسط سید خلیل موسوی و همکاران [۲]. در مجتمع کاربرد پرتوهای یزد به منظور اندازه‌گیری باریکه الکترونی رودترون انجام شده است. در تحقیق حاضر به دنبال اندازه‌گیری *passive* نقش باریکه به‌جای اندازه‌گیری اکتیو هستیم؛ اگرچه در این حالت گرفتن پاسخ آزمون سریع نیست ولی باین حال نقش باریکه با دقت و رزولوشن بالایی به دست می‌آید و می‌تواند اندازه‌گیری نسبی مطمئن و درعین حال کم‌هزینه‌ای را به ارمغان بیاورد. البته از نظر دور نماند که در مقاله دیگری در مورد ساخت پویندهی سیمی جریان باریکه اندازه‌گیری‌هایی انجام و در همین کنفرانس ارائه شده است.

۱۹ - روش کار:

به منظور اندازه‌گیری پروفایل باریکه از نقش ایجاد شده یون‌های سنگین باریکه و در این تحقیق ذرات آرگون بر روی مواد مختلف استفاده شده است. در هنگام ساخت یک پوینده سیمی طرح ایجاد شده بر روی پلکسی این دستگاه نشان از ابعاد و الگوی باریکه داشته است. گرمای رسوب یافته از انرژی جنبشی ذرات سنگین باعث تغییر شکل سطح می‌گردد. این تغییر شکل می‌تواند الهام‌بخش الگوی باریکه باشد. در اینجا از نقش ایجاد شده بر روی یک‌لایه مایلار، توسط باریکه، گزارشی ارائه خواهیم کرد. در اینجا لازم است اشاره‌ای به دستگاه کاشت یون $MBM100$ بشود. این دستگاه قابلیت کاشت یون و نیز قابلیت لایه نشانی از طریق اسپاترینگ را دارد که در زمان سلامتی کامل دستگاه، قادر بوده است با حرکت دادن بستر و حرکت بین دو کاربرد خود، یک‌درمیان با لایه نشانی و کاشت یون به صورت ترکیبی بهره ببرد. در اینجا صرفاً به باریکه ایجاد شده توسط چشمه یونی کاشت اکتفا خواهیم نمود. چشمه یونی کافمن مالتی کاسپ دارای از یک سیستم سه الکترودی $ACCEL-DECCEL$ بهره می‌برد که علاوه بر گپ شتاب‌دهی، گپ دیگری به منظور جبران اثر بار فضایی و نیز متمرکز کردن باریکه دارد. در گپ دوم به دلیل معکوس بودن جهت خطوط میدان از سرعت ذرات کاسته می‌شود ولی باعث تمرکز باریکه می‌گردد. در شکل ۱ تصویری از چشمه کاشت ارائه شده است:



شکل ۱: تصویری از هندسه چشمه یونی کافمن مولتی کاسپ

الکترودهای این چشمه به صورت چند سوراخ (multiaperture) است که این خاصیت سبب بزرگ بودن ابعاد باریکه خروجی می‌گردد.

در شکل ۲ الف تا ج تصویر الکترودها به ترتیب از الکترو پلازما، الکترو شتاب‌دهنده، و الکترو شتاب گیرنده نمایش داده شده است.



الف ب ج

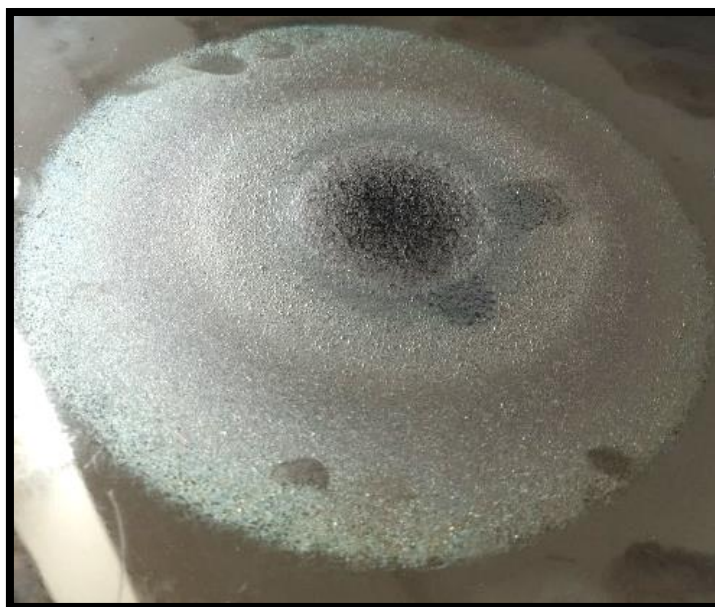
شکل ۲) الف الکترو پلازما (استخراج) ب) الکترو شتاب‌دهنده ج) الکترو شتاب گیرنده (تمرکز)

الکترودهای فوق با تشکیل سیستم سه الکترودی ذرات خارج شده از محفظه پلاسمایی را که وارد گپ شتاب‌دهی شده‌اند در گپ اول شتاب داده و به انرژی مورد نظر می‌رسانند. این سوراخ‌ها در این چشمه یونی باید دقیقاً زیر هم قرار گیرند. ذرات پس از عبور از این گپ وارد گپ شتاب گیری می‌شوند. در این گپ الکترون‌های حاصل از برخورد مولکول‌های خنثی با یون‌های پراثرژی سبب تولید الکترون می‌شود و باعث کاهش آثار دافعه‌ای یون‌ها بر همدیگر می‌گردد. از طرفی جهات خطوط میدان به نحوی است که سبب تمرکز در باریکه می‌گردد. قطر سوراخ الکترودها به ترتیب ۲.۵ میلی‌متر برای الکترو پلازما، ۵ میلی‌متر برای الکترو شتاب‌دهی و ۶ میلی‌متر برای الکترو شتاب‌گیری بوده، فاصله گپ اول ۲۴ میلی‌متر، فاصله گپ دوم ۴ میلی‌متر و فاصله الکترو تمرکز تا صفحه مایلر ۹۰ سانتی متر بوده اسن. فشار کاری پس از تزریق گاز آرگون یک در ۱۰ به توان منفی ۴ تور بوده است.



۲۰ - نتایج:

در هنگام ساخت یک دستگاه پوشگر سیمی (موضوع مقاله ارائه شده در همین کنفرانس) که بر روی صفحه پلکسی ساخته شده بود، تغییراتی در رنگ پلکسی مشاهده شد. و آثار باریکه بر روی آن مشهود بود. با تغییرات جریان از کناره‌ها به مرکز، شدت یافتن آثار مشاهده شد. با توجه به زیاد بودن جریان در مرکز باریکه آثار حرارتی در مرکز بیشتر بوده و تخریب شدیدتری در مرکز مشاهده شد. در شکل ۳ تصویری از پلکسی استفاده شده ارائه می‌شود.

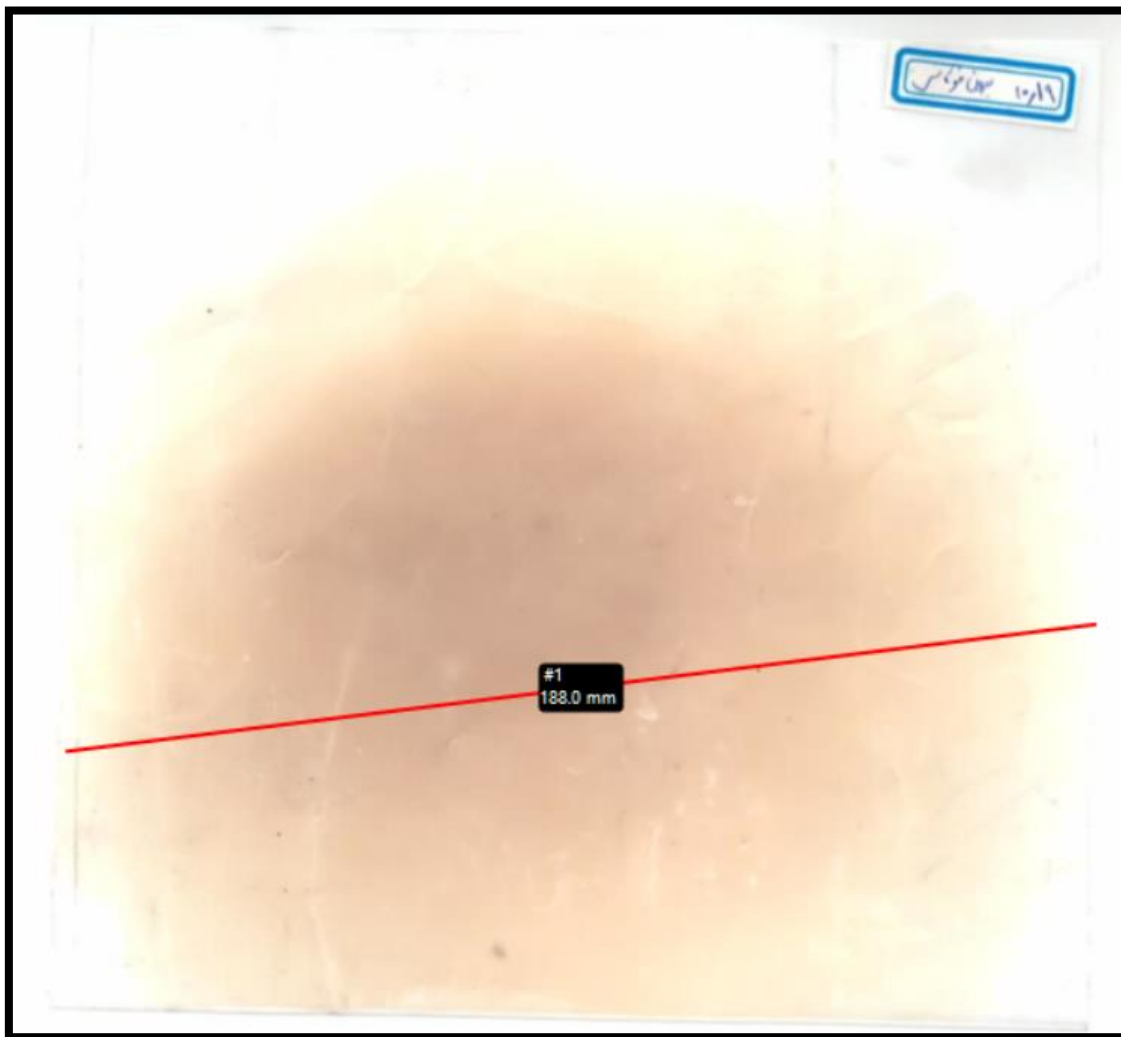


شکل ۳: تصویری از آثار باریکه آرگون بر روی یک ورق پلکسی

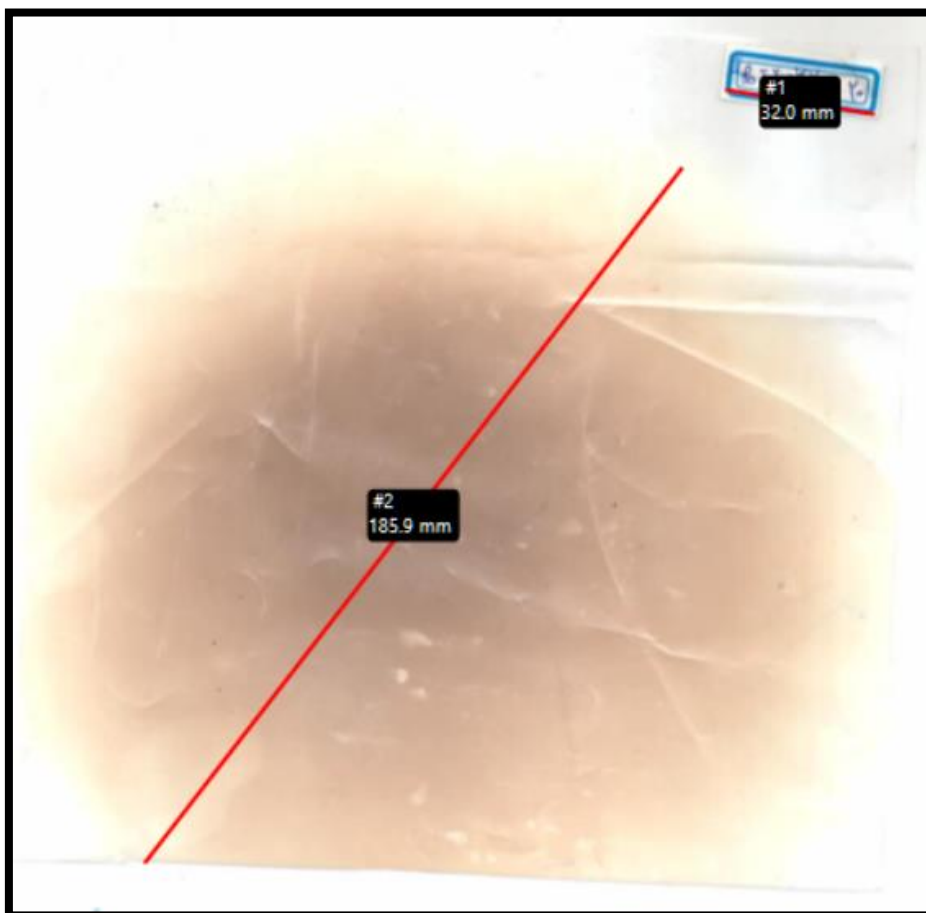
به نظر می‌آید بتوان از ماده‌ای ارزان‌تر نسبت به پلکسی، ثبت پروفایل باریکه را انجام داد. لذا استفاده از ورقه‌های مایلر با ضخامت ۱۲۵ میکرون جایگزین گردید. در شکل زیر آثار گرمای ایجاد شده حاصل از باریکه بر روی ورقه مایلر دیده می‌شود:



شکل ۴: آثار گرمای ایجاد شده حاصل از باریکه بر روی ورقه مایلار به ازای ولتاژ فیلامان ۱۵ ولت و ولتاژ تخلیه ۷۵ ولت و ولتاژ شتابدهی ۶۰ کیلوولت باریکه نیتروژن به مدت ۱۵ دقیقه تابش دهی به ازای ولتاژ فیلامان اندازه‌گیری شده است. شکل‌های زیر به‌عنوان نتیجه در ولتاژهای تمرکز^{۳۷} متفاوت ارائه شده است. این باریکه‌ها به مدت ۴ دقیقه بر روی ورقه مایلار تابیده شده‌اند.



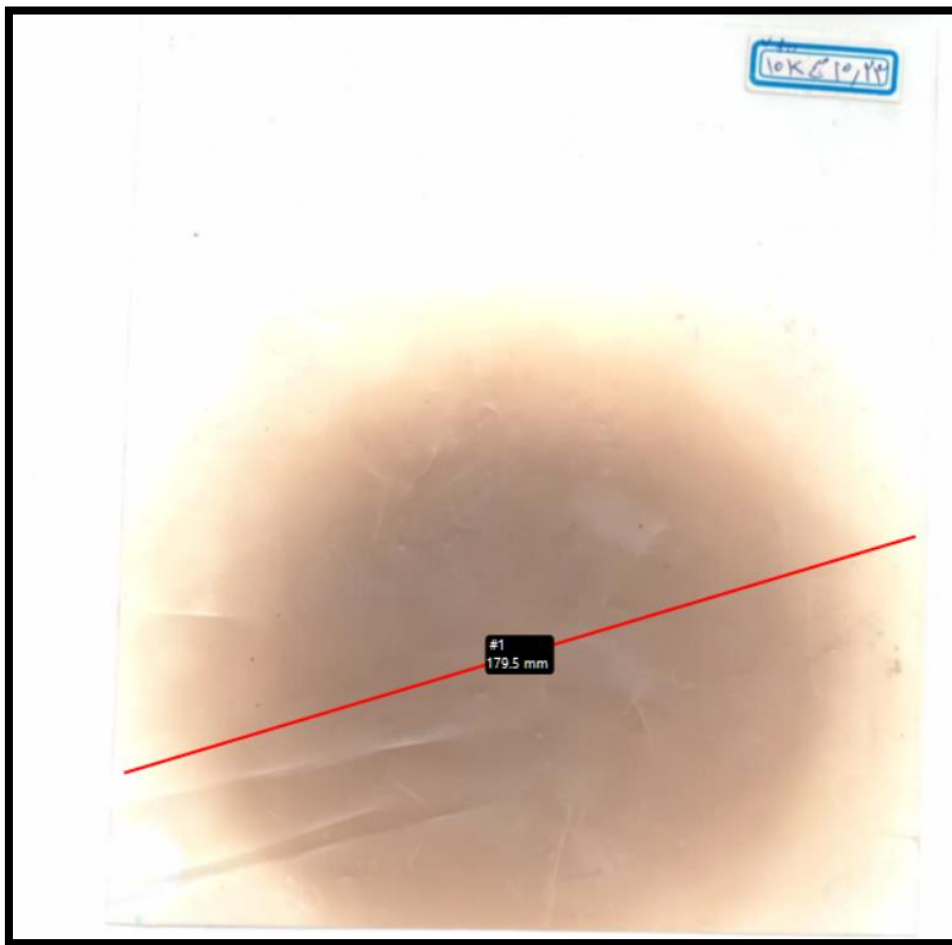
شکل ۵) نقش باریکه بر روی مایلار بدون ولتاژ تمرکز.



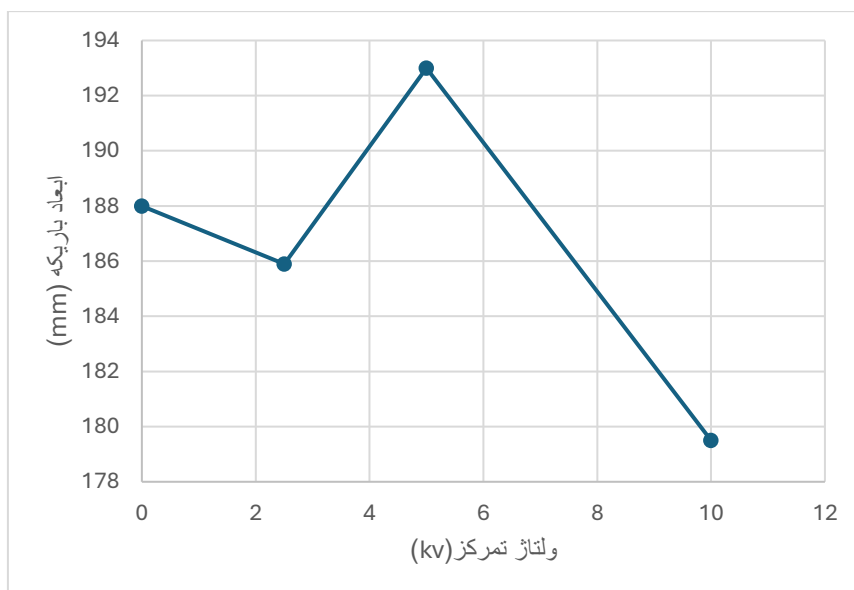
شکل ۶) نقش باریکه بر روی مایلار به ازای ولتاژ تمرکز ۲/۵ کیلوولت.



شکل ۷) نقش باریکه بر روی مایلار به ازای ولتاژ تمرکز ۵ کیلوولت



شکل ۸ نقش باریکه بر روی مایلار به ازای ولتاژ تمرکز ۱۰ کیلوولت.



شکل ۹) وابستگی ابعاد باریکه به ولتاژ تمرکز



۲۱ - بحث و نتیجه‌گیری:

اندازه‌گیری توزیع چگالی جریان باریکه در راستای محور X و Y با هدف شناخت خواص باریکه و نحوه رفتار آن برای اطلاع از کارکرد صحیح دستگاه لازم است. اندازه‌گیری ابعاد باریکه چشمه یونی کافمن مالتی کاسپ مورد استفاده در دستگاه MBM100 و اطلاع از نحوه توزیع چگالی جریان باریکه بسیار مهم است. استفاده از ورقه مایلر برای ثبت نقش باریکه در نقطه دلخواه با توجه به نتایج ارائه شده روشی ارزان، با دسترس پذیری برای همگان، و قابل اعتنا می‌باشد که در غیاب دستگاه‌های تشخیصی باریکه می‌تواند اطلاعات مفیدی ارائه بدهد، در کنار استفاده از سایر ابزارهای تشخیصی نیز این روش، مکمل بسیار مناسبی برای کسب اطلاعات از باریکه ایجاد شده می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود باریکه چشمه یونی در برخی ولتاژها باریکه‌ای نسبتاً یکنواخت می‌باشد. آثار تغییرات ولتاژ تمرکز بر مقدار جریان (شدت آثار حرارتی) و نیز ابعاد باریکه در نتایج مشهود است. با لحاظ نتایج و اوصاف فوق می‌توان از این روش برای به دست آوردن ابعاد باریکه و پروفایل یکنواختی بهره‌مند شد. همان‌طور که از شکل ۹ برداشت می‌شود، با افزایش ولتاژ تمرکز ابعاد باریکه کاهش می‌یابد و این کاهش بر طبق انتظار به دلیل اثر تمرکز دهی ولتاژ است. هر چه ولتاژ بیشتر تمرکز دهی بیشتر. ولی در ولتاژ میانی ۵ کیلوولت این اتفاق نیفتاده است دلیل این اتفاق افزایش شدت آثار حرارتی و به تعبیری افزایش جریان خروجی در این ولتاژ است. این افزایش جریان باعث افزایش بیشتر واگرایی باریکه و در نتیجه افزایش ابعاد باریکه شده است. به نظر می‌آید ولتاژ تمرکز ۵ کیلوولت بهترین حالت برای داشتن همزمان جریان بالا و ابعاد باریکه مناسب باشد.

۲۲ - مراجع

- [۱] احسان ابراهیمی بسابی و همکاران، "اندازه‌گیری نیمرخ باریکه شتاب دهنده ES-200 با استفاده از نمایشگر الکترون ثانویه"، مجله پژوهش فیزیک ایران، صفحه ۲۵۸-۲۵۳ [۱۳۹۴]
- [۲] سیدخلیل موسوی و همکاران، "طراحی و ساخت فنجان فارادی جهت اندازه‌گیری جریان باریکه‌های الکترونی در شتاب‌دهنده رودترون"، نوزدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، صفحه ۱۸۶-۱۸۱ [۱۳۹۱]



بررسی تاثیر جنس فنجان فارادی بر آهنگ تولید فوتون‌های ثانویه تولید شده در یک شتابگر الکترواستاتیک ۲۰۰ کیلو الکترون ولت (کد مقاله : ۱۴۵۵)

رحمان آبادی، طیبه^{۳*}، فقهی، سید امیر حسین^۱، یارمحمدی سطری، معصومه^{۲*}، جعفری، حمید^۱، صنایع
حجری، شاهین^۲

^۱. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، بلوار دانشجو، ولنجک، تهران
^۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگر، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

چکیده:

فنجان فارادی یکی از اجزای اندازه‌گیری اصلی در شتابگرها است که شدت جریان باریکه را اندازه‌گیری می‌کند و باریکه را متوقف می‌کند. به منظور بررسی لزوم حفاظ‌سازی در فنجان‌فارادی و محاسبه ضخامت و جنس حفاظ به منظور رعایت الزامات حفاظت در برابر اشعه در هنگام اندازه‌گیری با ابزارهای اندازه‌گیری بررسی میزان دز ایجاد شده در اطراف ابزار اندازه‌گیری دارای اهمیت ویژه است. تحقیق حاضر، به بررسی تاثیر جنس فنجان فارادی بر میزان دز تابشی ناشی از فوتون‌های ثانویه ساطع شده در هنگام اندازه‌گیری جریان پروتون شتابگر $ES-200$ می‌پردازد. برای مدل‌سازی و تحلیل دز فوتون‌های ثانویه تولید شده از کد مونت کارلوی $MCNPX$ استفاده شده است و نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که آلومینیوم بیشترین دز تابشی و برنج کمترین میزان دز را در تمام فواصل از فنجان نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: دزسنجی، کد $MCNPX$ ، فنجان فارادی، شتابگر الکترواستاتیک، جنس فنجان

Investigation of the Effect of Faraday Cup Material on the Secondary Photon Production in a 200 keV Electrostatic Accelerator

Rahmanabadi, Tayebe^{۱*}, Fegghi, Seyed Amir Hossein^۱, Yarmohammadi Satri, Masoomeh^۲, Jafari, Hamid^۱, Sanayeh Hajari, Shahin^۲

^۱. Department of Radiation Application, University of Shahid Beheshti, Tehran
^۲. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box ۱۴۳۹۵-۸۳۶, Tehran, Iran

Abstract:

The Faraday cup is one of the primary measurement components in accelerators, responsible for measuring the beam current and stopping the beam. To assess the necessity of shielding in the Faraday cup and to determine the appropriate material for radiation protection compliance, evaluating the radiation dose generated around the measurement device is of particular importance. This study examines the effect of the Faraday cup material on the radiation dose resulting from secondary photons emitted during the measurement of the proton beam current in the ES-200 accelerator. The Monte Carlo code MCNPX was utilized for modeling and analyzing the dose of secondary photons. Simulation results indicate that aluminum exhibits the highest radiation dose, whereas brass demonstrates the lowest radiation dose at all distances from the Faraday cup.

Key words: Photon dose, MCNPX code, Faraday cup, electrostatic accelerator, Faraday cup material



۱ - مقدمه:

در دهه‌های اخیر، شتابگرها به عنوان مولدهای باریکه ذرات باردار، در علوم فیزیک ذرات، پزشکی، و تولید انرژی هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دستگاه‌ها در فرایندهای مختلف از جمله ایجاد تابش‌های یونیزه‌کننده برای درمان سرطان یا تحقیقات فیزیک ذرات، به کار می‌روند. یکی از جنبه‌های کلیدی استفاده از شتابگرها، مدیریت تابش‌های خطرناک و کنترل دز تابشی در محیط‌های آزمایشگاهی است. این تابش‌ها می‌توانند تهدیدی جدی برای سلامت انسان‌ها و تجهیزات باشند [۱]. نقش ابزارهای تشخیصی از این جهت حائز اهمیت است که اطلاعات مفیدی از عملکرد و کارایی شتابگرها را ارائه می‌دهند [۲]. شدت باریکه خروجی از یک شتابگر ذرات باردار، اهمیت اساسی در نوع و نحوه کاربری آن دارد و سیستم‌های تشخیصی مختلفی از جمله فنجان فارادی^{۳۹} در شتابگر استفاده می‌شود [۳]. فنجان فارادی عمدتاً برای اندازه‌گیری شدت مطلق جریان باریکه و توقف کامل باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرد و نیازمند ملاحظات ویژه‌ای از منظر حفاظت در برابر اشعه است. این ابزار معمولاً از جنس مس، آلومینیوم، استیل ضد زنگ^{۴۰} و برنج^{۴۱} ساخته می‌شود. جنس فنجان فارادی تاثیر مستقیمی بر کارایی آن دارد، زیرا ویژگی‌های فیزیکی و الکتریکی مواد مختلف می‌تواند روی جذب و انعکاس تابش‌ها تاثیر بگذارد [۴]. از جمله ویژگی‌های اساسی که در عملکرد فنجان فارادی تاثیرگذارند عبارتند از: چگالی، هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی [۵]. از آنجایی که میزان تابش در شتابگرها می‌تواند به حدی بالا باشد که به تجهیزات و افراد آسیب برساند، انتخاب صحیح جنس فنجان فارادی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه دز تابشی و بهبود ایمنی شود [۶]. یک نوع از شتابگرها، الکترواستاتیک است، مانند ES-۲۰۰^{۴۲} که از یک میدان الکتریکی یکنواخت که در اثر اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه ولتاژ بالا و زمین به میزان ۲۰ کیلو ولت ایجاد می‌شود، و برای انرژی‌دادن به ذرات باردار استفاده می‌شود. یون‌های مثبت پس از استخراج از چشمه مولد باریکه یونی تحت اثر لenzهای الکترواستاتیکی که در ابتدای تیوب شتابدهی قرار دارند به صورت یک باریکه پیرامحور درآمده و تحت اثر میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند [۷]. برای اندازه‌گیری جریان تولیدشده از چشمه رادیوکانسی در شتابگر ES-۲۰۰، از یک لوله استوانه‌ای استفاده می‌شود که از نظر الکتریکی ایزوله شده است و ذرات و الکترون‌های ثانویه در سیستم کنترل می‌شوند [۸]. ذرات باردار، مانند پروتون‌ها، از طریق نیروهای کولنی بین بار مثبت آنها و بار منفی الکترون‌های مداری درون جاذب اتم‌ها با ماده تعامل دارند [۹]. در اثر برخورد ذرات خروجی از شتابگرها و برخورد با مواد فلزی فنجان فارادی پرتوی ایکس تولید می‌شود که می‌تواند برای محیط اطراف و کارکنان آن مضر باشد. اثرات نامطلوب پرتو بر بدن انسان و برخی ابزارهای حساس، انگیزه‌ای برای مطالعه و طراحی جنس مناسب برای ابزار اندازه‌گیری فنجان فارادی در شتابگر ES-۲۰۰ را ایجاد کرد. در این تحقیق، هدف بررسی تاثیر جنس‌های مختلف فنجان فارادی بر میزان دز تابشی در محیط یک شتابگر ES-۲۰۰ است. نتایج این تحقیق می‌تواند به

^{۳۹} Faraday Cup

^{۴۰} Stainless Steel

^{۴۱} Brass

^{۴۲} ۲۰۰ kV Electrostatic accelerator



بهبود طراحی سیستم‌های حفاظتی، ایمنی در شتابگرها و انتخاب جنس مناسب فنجان‌های فارادی در محیط‌های تابشی کمک کند.

یکی از راه‌های دستیابی به جنس مناسب برای فنجان فارادی، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی است. شبیه‌سازی ابزاری است که نتیجه مورد نظر با استفاده از آن و بدون آزمایش حاصل می‌شود و در زمان، هزینه، مواد و نیروی کار صرفه‌جویی می‌شود. برای بررسی تاثیر جنس فنجان فارادی در شتابگرها، پژوهشگران متعددی به مطالعه این موضوع پرداخته‌اند. به‌طور کلی این تحقیقات به بررسی تاثیر ویژگی‌های مواد مختلف در جذب تابش و کاهش میزان دز تابشی در فنجان فارادی توجه داشته‌اند. برای مثال یونگ چانگ و سئونگ^{۴۳} به مطالعه اثرات مواد مختلف فنجان فارادی در آزمایش‌های شتابگرها پرداخته‌اند [۱۰]. در همین راستا دیوید کیم و چوی هوانگ پارک^{۴۴} نیز به بررسی انتخاب مواد مناسب برای طراحی فنجان فارادی با توجه به ویژگی‌های حفاظت تابشی و هدایت حرارتی پرداخته‌اند [۱۱].

۲ - روش کار:

با به‌کارگیری کد MCNPX در مطالعه حاضر، میزان دز ایجاد شده در محیط اطراف یک فنجان فارادی در هنگام اندازه‌گیری جریان باریکه پروتون خروجی از شتابگر ES-۲۰۰، که یک شتابدهنده ذرات پر قدرت است، با جریان ۱/۱ میلی آمپر محاسبه شده است. به این منظور، فنجان فارادی از یک لوله استوانه‌ای ته‌بسته (فنجان) تشکیل شده است و باریکه پروتونی خارج شده از شتابگر الکترواستاتیک به نقاط مختلف فنجان فارادی برخورد کرده و منجر به تولید پرتوی ایکس می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱) چیدمان اندازه‌گیری جریان، شامل، استوانه انتقال دهنده باریکه و فنجان فارادی.

هندسه فنجان در MCNPX پیاده سازی شد و چهار جنس مختلف (مس، آلومینیوم، برنج و استیل ضدزنگ) از فنجان فارادی مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدا، شبیه‌سازی‌هایی با قرارگیری کره‌های دزیمتری در فاصله معیار یک‌متر در سه بخش بالا، پایین و سمت چپ (پشت) فنجان فارادی با استفاده از بیشینه انرژی باریکه پروتونی فرودی (۲۰۰ کیلو الکترون‌ولت) برای هر چهار جنس فنجان انجام شد. برای محاسبه میزان دز روی کره‌های دزیمتری، با استفاده از تالی^{*} ۸f میزان انرژی بر جای گذاشته

^{۴۳} Young Chang & Seong Lee

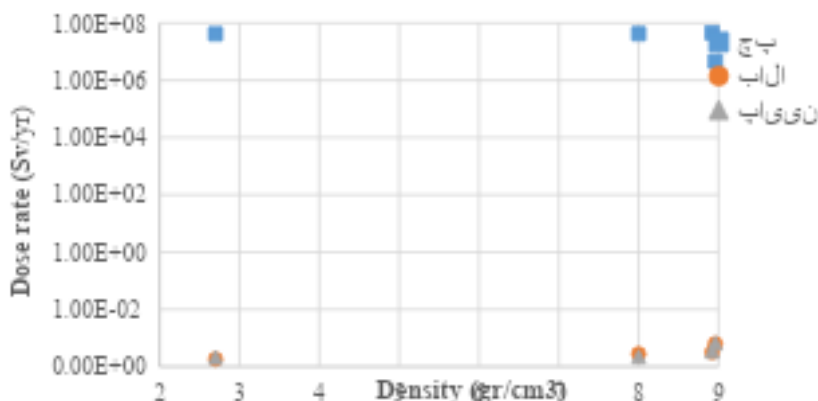
^{۴۴} David Kim & Choi Hwang Park



شده روی هر کره به دست می‌آید. با در نظر گرفتن رابطه چگالی و محاسبه جرم هر کره هوا و با استفاده از مقدار انرژی، جرم، میزان دز هر کره و شدت جریان شتابگر، آهنگ دز روی هر کره برای یک سال محاسبه شد.

$$I = q/t$$

با توجه به نمودار شکل ۲ میزان دز تابش در دو قسمت بالا و پایین فنجان بسیار کمتر از آستانه مجاز سالیانه می‌باشد، بنابراین شبیه‌سازی برای فواصل دیگر و انرژی‌های دیگر برای سمت چپ (پشت) فنجان اجرا و بررسی شد.



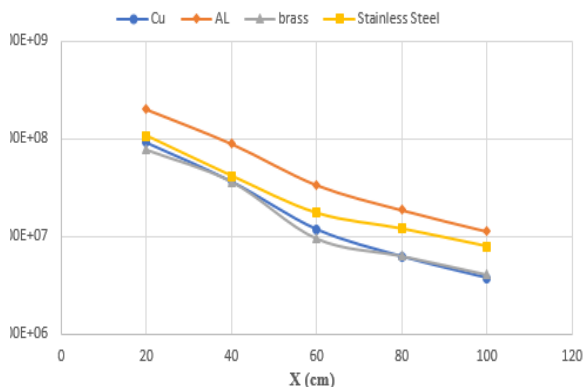
شکل (۲) آهنگ دز تولید شده در فاصله یک متری (بالا، پایین و چپ) از فنجان فارادی، ناشی از باریکه پروتون فرودی با انرژی ۲۰۰ کیلو الکترون ولت به فنجان فارادی با جنس‌های مختلف. چگالی برنج، مس، استیل ضد زنگ و آلومینیوم به ترتیب ۸.۵۳، ۸.۹۶، ۷.۹۸ و ۲.۷ گرم بر سانتی متر مکعب است.

در ادامه، دز فوتون ایجاد شده برای باریکه پروتون فرودی به فنجان فارادی با چهار انرژی مختلف ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلو الکترون ولت، برای چهار جنس مختلف (مس، آلومینیوم، برنج و استیل ضد زنگ) مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، در سمت چپ (پشت) فنجان فارادی، چند کره از جنس هوا در فواصل مختلف، برای سنجش دز تابش بر کره‌ها قرار گرفت (شکل ۳)

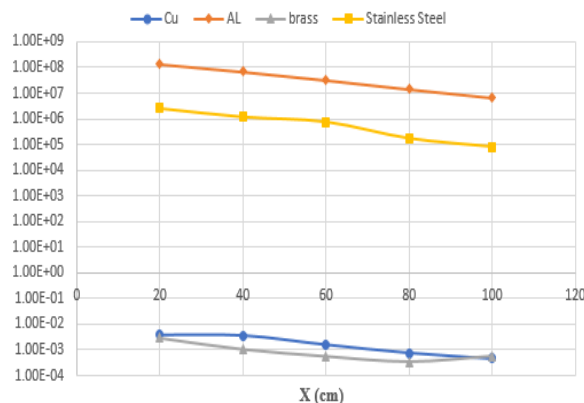


شکل (۳) چیدمان سه بعدی از قرارگیری کره‌های دزیمتری سمت چپ (پشت) فنجان فارادی.

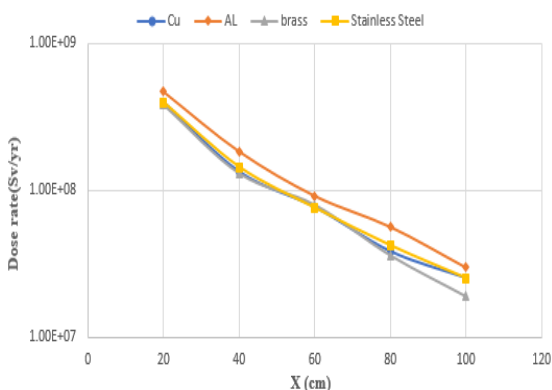
نمودارهای میزان آهنگ دز سالیانه محاسبه شده بر حسب فاصله هر یک از کره‌های دزیمتری از فنجان‌های فارادی در سمت چپ (پشت) فنجان، در شکل ۴ رسم شده است.



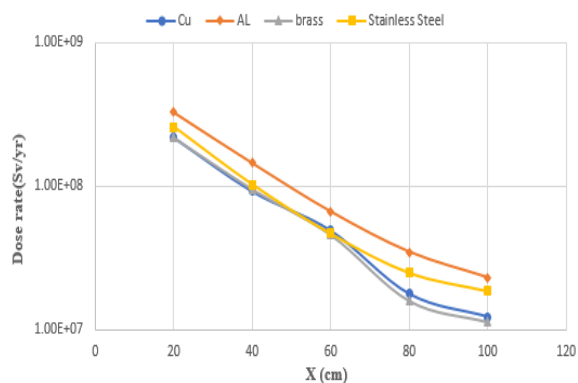
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۴) مقایسه آهنگ دز تابش برای جنس‌های مختلف فنجان فارادی ناشی از اندازه‌گیری باریکه پروتون فرودی شتابگر ES-۲۰۰، با انرژی الف (۵۰ کیلوالکترون‌ولت، ب) ۱۰۰ کیلوالکترون‌ولت، ج) ۱۵۰ کیلوالکترون‌ولت، د) ۲۰۰ کیلوالکترون‌ولت.

۳ - نتایج:

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده رابطه مستقیم میان انرژی تابش و آهنگ دز سالیانه است. افزایش انرژی باریکه فرودی پروتون از ۵۰ کیلوالکترون‌ولت به ۲۰۰ کیلوالکترون‌ولت به‌طور قابل توجهی باعث افزایش آهنگ دز در محیط اطراف فنجان فارادی می‌شود. علاوه‌براین، تحلیل داده‌ها حاکی از آن است که با افزایش فاصله از فنجان فارادی، میزان دز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این کاهش آهنگ دز در فواصل بیشتر تاکید بر اهمیت فاصله بهینه برای کاهش تابش دریافتی و حفظ ایمنی تابشی در طراحی شتابگرها و آزمایشگاه‌های تابش دارد. در انرژی ۵۰ کیلوالکترون‌ولت، دز تابشی خروجی برای مس و برنج به دلیل چگالی بالاتر و ضریب تضعیف بیشتر نسبت به آلومینیوم و استیل ضدزنگ، به‌طور قابل توجهی، کاهش می‌یابد. در این انرژی، اثر فوتوالکتریک به عنوان مکانیسم غالب برهمکنش پرتو با ماده عمل می‌کند و مواد با عدد اتمی بالاتر مانند مس و برنج، فوتون‌ها را به‌طور مؤثرتری جذب می‌کنند. بنابراین فوتون‌ها بیشتر در سطح مواد جذب شده و عمق نفوذ کمتری دارند. به همین دلیل، در انرژی ۵۰ کیلوالکترون‌ولت تابش خروجی از این مواد در مقایسه با سایر مواد به شدت کاهش می‌یابد.



آهنگ دز سالیانه در فواصل مختلف از فنجان فارادی برای چهار جنس: آلومینیوم، استیل ضد زنگ، مس و برنج نشان‌دهنده تغییرات معنادار در میزان دز تابش با توجه به جنس فنجان و فاصله از آن است. تفاوت قابل توجهی در میزان دز تابش برای هر جنس در همان فاصله وجود دارد. آلومینیوم به عنوان فلزی با کمترین چگالی، بیشترین میزان دز را از خود عبور می‌دهد. در مقابل برنج با چگالی بالا و ویژگی‌های آلیاژی خاص، کمترین دز تابش را نشان می‌دهد. استیل ضد زنگ و مس به ترتیب در میانه این طیف قرار دارند و دز تابش کمتری نسبت به آلومینیوم و بیشتری نسبت به برنج منتقل می‌کنند. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تاثیر چگالی و خواص جذب تابش در میزان دز عبوری از مواد مختلف است. این یافته‌ها می‌توانند به‌طور موثری در بهینه‌سازی انتخاب جنس فنجان‌های فارادی و طراحی سیستم‌های حفاظتی در شتاب‌دهنده‌ها و سایر محیط‌های تابشی کمک کنند. به طور خاص، استفاده از مواد با چگالی بالاتر می‌تواند به طور مؤثری تابش را کاهش داده و ایمنی بیشتر در برابر دز تابشی را فراهم آورد.

۴ - بحث و نتیجه گیری:

نتایج این پژوهش نشان داد که میزان دز تابشی در محیط اطراف یک شتابگر مولد پروتون ES-۲۰۰، به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر جنس فنجان فارادی قرار دارد. جنس بهینه فنجان فارادی باید بر اساس دو معیار اصلی انجام شود: میزان دز تابشی و ملاحظات اجرایی مانند هزینه ساخت و تولید، مقاومت به خوردگی، شرایط محیط و... . برنج بهترین عملکرد را در کاهش دز تابش دارد، اما هزینه تولید و خواص مکانیکی آن ممکن است در برخی کاربردها محدودیت ایجاد کند. استیل ضد زنگ با عملکرد حفاظتی نسبتاً مناسب و مزایایی همچون استحکام بالا، مقاومت به خوردگی و هزینه تولید مقرون به صرفه‌تر، می‌تواند گزینه‌ای متعادل برای طراحی فنجان فارادی در محیط‌های شتابگر باشد. مس در این مطالعه عملکردی بین استیل ضد زنگ و برنج داشت و از منظر کاهش دز تابشی، عملکرد مناسب‌تری نسبت به استیل ضد زنگ دارد، حال آنکه ضعیف‌تر از برنج عمل کرد. لازم به بیان است که مس به دلیل رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا، در برخی کاربردهای خاص مثل تخلیه بارهای الکتریکی ممکن است گزینه مناسبی باشد. با این وجود، هزینه نسبتاً بالا و احتمال اکسید شدن آن در شرایط خاص می‌تواند محدودیت‌هایی برای استفاده از آن ایجاد کند. آلومینیوم به دلیل عبور دز بالا، انتخاب مطلوبی نیست مگر در مواردی که وزن کم و هزینه پایین در اولویت باشد.

۵ - مراجع:

- [۱] Nash, J., ۲۰۱۰. Radiation Shielding and Measurement Techniques in Particle Accelerator. Wiley & Sons
- [۲] G. Benedetti, U. Iriso and A. Olmos, Beam measurements at the ALBA Linac, Proc. Of PAC'۰۹, Vancouver (Canada) ۲۰۰۹.
- [۳] P. Strehl, Beam Instrumentation and Diagnostics, vol. ۲, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, ۲۰۰۶, pp. ۱۲.
- [۴] Smith, A., Lee, C. and Johnson, H., ۲۰۱۰. Effect of Material Properties on Faraday Cup Efficiency in Accelerator Systems. Journal of Radiation Protection, ۱۲(۳), pp. ۳۴۵-۳۵۹.
- [۵] Johnson, M., ۲۰۱۸. Materials for Radiation Shielding.

- [۶] Lee, H. and Cho, J., ۲۰۲۰. Impact of Faraday Cup Materials on Radiation Dosimetry in High-Energy Accelerator Physics in Medicine and Biology, ۶۵(۴), pp. ۱۲۳۴-۱۲۴۶.
- [۷] M. Nazmabadi et al. Optimizing ۲۰۰kV Electrostatics Accelerator, Iranian J. of Phy. Research. ۱۵, ۱۲۹(۲۰۱۴) (In Persian)
- [۸] J. Harasimowicz, C.P. Welsch, Proceedings of BIW ۱۰, Santa Fe, NM, ۲۰۱۰, p. ۲۵۷.
- [۹] G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurements, vol. ۲, John Willey and Sons, Inc., New York, ۲۰۰۰, pp. ۳۰.
- [۱۰] Chang, Y., & Lee, S. (۲۰۱۸). Study of the impact of Various materials in Faraday Cup radiation shielding. Radiation Protection Dosimetry, ۵۷(۳), ۲۲۰-۲۲۶.
- [۱۱] Kim, D., & Park, C.H. (۲۰۲۰). Selection of appropriate materials for Faraday cup design conductivity. Radiation Research Journal, ۳۵(۴), ۸۹-۹۵.



آستانه ضخامت هدف در شتابدهی با روش TNSA و با پیش پالس پیکوثانیه (کد مقاله : ۱۴۶۵)

رضائی، سمیه*^۱-جعفری، محمدجعفر^۱

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

وجود پیش پالس لیزری با شدت‌های کم (کمتر از 10^{13} W/cm^2 با پهنای زمانی نانو ثانیه و شدت‌های کمتر از 10^{17} W/cm^2 با پهنای زمانی پیکوثانیه) یک مسئله اساسی در آزمایش‌های شتابدهی لیزری پروتون می‌باشد، که اغلب پارامترهای باریکه پروتون تولید شده توسط لیزرهای با شدت بالا را تغییر می‌دهد. در این مطالعه، برهم‌کنش پیش پالس پیکوثانیه‌ای مجموعه لیزری ATLAS با اهداف میکرومتری، با استفاده از شبیه‌سازی‌های سیالی بررسی شده است. تحول فضا-زمانی چگالی الکترون‌ها و میزان یونیزاسیون هدف برای دو ضخامت ۰/۵ و ۰/۲۵ میکرومتر تحلیل گردیده است. مطابق با نتایج شبیه سازی یک بعدی سیالی ضخامت بهینه برای این مجموعه لیزری در آزمایشات مربوط به TNSA ۰/۲۵ میکرومتر است که کمتر از آن وجود این پیش پالس موجب تبخیر و بهم ریختگی پشت هدف شده که در عملکرد شتابدهی پروتون تأثیر خواهد گذاشت. این نتایج برای بهینه‌سازی اهداف نازک در برنامه‌های شتابدهی لیزری ذرات حائز اهمیت هستند.
کلمات کلیدی: شبیه‌سازی هیدرودینامیکی، پیش پالس لیزر، به هم ریختگی پشت هدف

Threshold Target Thickness in TNSA Acceleration with a Picosecond Pre-Pulse

Somayeh Rezaei^{۱*}, Mohammad Jafar Jafari^۱

۱. Plasma and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

The presence of a laser pre-pulse with low intensities (less than 10^{13} W/cm^2 for nanosecond pulse widths and less than 10^{17} W/cm^2 for picosecond pulse widths) is a critical issue in laser-driven proton acceleration experiments. This pre-pulse often alters the characteristics of the proton beam generated by high-intensity lasers. In this study, the interaction of the ATLAS laser system's picosecond pre-pulse with micrometer-scale targets has been investigated using fluid simulations. The spatiotemporal evolution of electron density and temperature has been analyzed for two target thicknesses, $0.5 \mu\text{m}$ and $0.25 \mu\text{m}$. According to the results of one-dimensional fluid simulations, the optimal thickness for this laser system in TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) experiments is $0.25 \mu\text{m}$. For thinner targets, the presence of this pre-pulse leads to evaporation and deformation of the rear side of the target, which affects the proton acceleration performance. These findings are essential for optimizing thin targets in laser-driven particle acceleration applications.

Key words: Hydrodynamic simulation, Laser pre-pulse, Rear-side deformation of the target



۱. مقدمه:

تحقیقات نشان می‌دهد برهم‌کنش لیزر با شدت بالا با فویل‌های فوق‌نازک، تاکنون امیدبخش‌ترین مسیر برای افزایش چشمگیر انرژی پرتو یونی بوده است، که با چشم‌انداز کاربردهای مهم انجام می‌شود [۱]. دستیابی به شدت و انرژی‌های بالاتر برای پرتو پروتون، از طریق بهینه‌سازی شرایط برهم‌کنش همچنان ادامه دارد. مطالعات نشان می‌دهد، ضخامت هدف باید با شدت لیزر متناسب باشد تا حداکثر انرژی یونی حاصل شود [۲]. اخیراً بهینه‌سازی این شرایط، با هدف دستیابی به حداکثر انرژی ممکن برای پروتون‌ها در منابع [۳، ۴] مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، پیش‌بینی شده است که گرمایش حجمی اهداف با ضخامت بهینه می‌تواند پروتون‌هایی با انرژی ۱۰۰ مگا الکترون‌ولت را با یک لیزر ۳۰ ژولی، در شرایطی که هیچ پیش‌پالسی وجود ندارد، تولید کند [۵]. با این حال بهینه‌سازی پارامترهای پیش‌پالس لیزر که موجب تشکیل پیش‌پالاسما روی هدف می‌شود نیز لازم است در نظر گرفته شود. در آزمایش‌های تجربی [۶] مشخص گردیده است برای تعیین ضخامت بهینه هدف باید تأثیر پیش‌پالاسما در جلوی هدف در نظر گرفته شود. این پیش‌پالس ممکن است موج ضربه‌ای تولید کند که در عقب هدف شکسته شده و موجب تشکیل پالاسما در پشت هدف شود که بر فرایند شتابدهی تأثیر خواهد گذاشت [۶]. در مدل انبساط پالاسمای همدم، کاهش دامنه قله میدان الکترواستاتیک به دلیل تشکیل پالاسما در عقب هدف، به صورت عددی نشان داده شده است [۷]. اگرچه امروزه فناوری لیزر امکان دستیابی به شدت‌های فوق‌العاده بالا با وضوح پالس ۴۵ بالا در توان پتاواتی را فراهم کرده است اما همچنان وجود پیش‌پالس پیکوثانی‌ای در پالس‌های لیزری همپنان اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله با در نظر گرفتن شرایط واقعی پیش‌پالس مجموعه لیزری ATLAS، آستانه ضخامت هدف برای برهم‌کنش با پالس اصلی طبق نتایج شبیه‌سازی یک بعدی هیدرودینامیکی مشخص گردیده است. نتیجه اصلی این مقاله شرایط بهینه‌ای را برای هدف مشخص می‌کند که می‌توان در فرایند شتابدهی لیزری به کار گرفت. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد یک ضخامت آستانه برای هدف وجود دارد که در اهداف نازک‌تر از آن، موج ضربه ۴۶ که توسط مدولاسیون چگالی یون‌ها هدایت می‌شود در طول هدف منتشر می‌شود و باعث انبساط قابل توجه پشت هدف می‌شود.

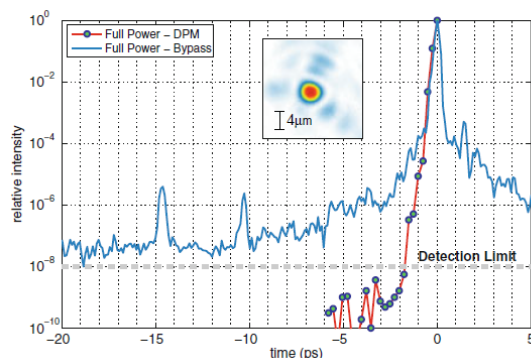
۲. نتایج شبیه‌سازی:

در قسمت مقدمه به اهمیت پروفایل چگالی اولیه هدف به هنگام برهم‌کنش پالس اصلی با هدف و نیز تأثیر پیش‌پالس لیزر در تعیین این پروفایل اشاره شد. در این بخش به منظور نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی‌ها با آزمایشات با در نظر گرفتن پروفایل زمانی پالس لیزری مجموعه ATLAS (شکل ۱) نتایج برهم‌کنش قسمت پیش‌پالس پیکوثانی‌ای آن را بررسی می‌کنیم. شکل ۱ پروفایل زمانی پالس لیزر این مجموعه لیزری را در حالتی که از یک آینه پالاسمایی برای از بین بردن پیش‌پالس نانوثانی‌ای استفاده شده است، نشان می‌دهد. در این شکل زمان صعود ۴۷ تا رسیدن به قله حدود ۲۰ پیکوثانیه (نمودار آبی رنگ) می‌باشد. هم‌چنین در این مجموعه، بازه زمانی پیش‌پالس تا حدود ۵ پیکوثانیه نیز کاهش داده شده است که در شکل با نمودار قرمز رنگ مشخص است. در آزمایش‌های TNSA حضور این پیش‌پالس تحت شرایط خاصی می‌تواند نقش مؤثری در عملکرد شتابدهی داشته باشد.

^{۴۵} Contrast

^{۴۶} Shock wave

^{۴۷} Rise Time

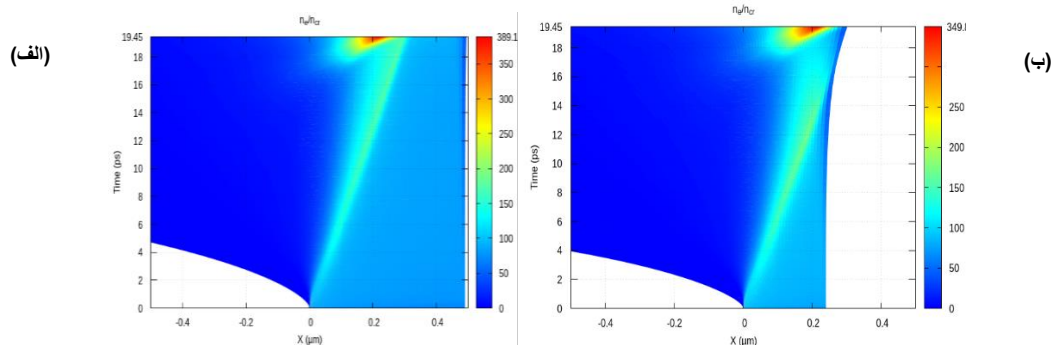


شکل ۱. پروفایل زمانی پالس مجموعه لیزری ATLAS پس از به کار بردن آینه پلاسمایی [۸].

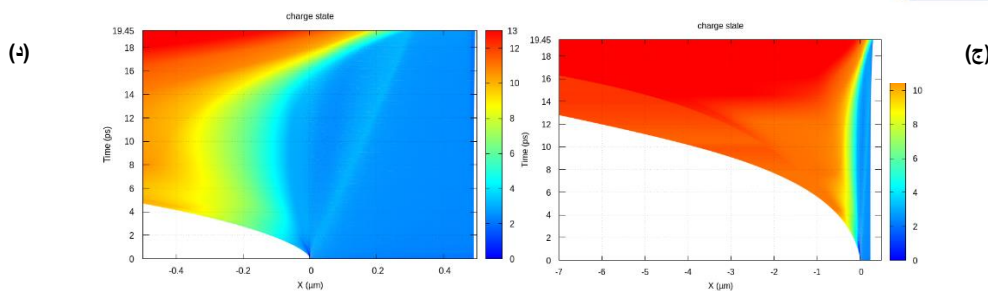
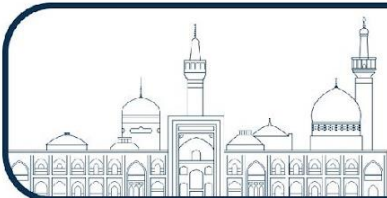
با توجه به بازه زمانی چندین هزار فمتوثانیه‌ای این پیش‌پالس، انجام شبیه‌سازی‌های ذره‌ای طی برهم‌کنش آن با هدف، بسیار طولانی و در عمل امکان‌پذیر نمی‌باشد. از طرفی با توجه به محدوده شدت دامنه پیش‌پالس در اکثر مجموعه‌های لیزری (10^{12} - 10^{10} W/cm²) با پهنای پالس نانو ثانیه-پیکوثانیه؛ معادلات هیدرودینامیکی-تابشی و تقریب سیالی در برهم‌کنش این پالس با هدف جامد حاکم بوده و ابزارهای شبیه‌سازی سیالی در بررسی تحول هدف معقول به نظر می‌رسد. لذا در ادامه با مبنا قرار دادن این شکل پالس لیزر، به بررسی هیدرودینامیکی تحول هدف و تاثیر این پیش‌پالس بر ساختار هدف در ضخامت‌های مختلف هدف می‌پردازیم. پارامترهای هدف در انتهای زمان پیش‌پالس که از کد سیالی استخراج می‌شود را می‌توان به عنوان شرایط اولیه در کد ذره‌ای و برای مطالعه دینامیک پالس و شتابدهی ذرات به کار گرفت. پروفایل زمانی پیش‌پالس لیزری (۲۰ پیکوثانیه ابتدای پالس) از شکل ۱، پس از رقمی شدن 10^8 با تابع

$$f(t) = 10^{(a+bx+cx^2)} \quad (1)$$

برازش و سپس در کد هیدرودینامیکی استفاده شده است. در رابطه بالا، $a=-2384$ ، $b=235$ ، $c=5/8$ و t متغیر زمانی در واحد پیکوثانیه می‌باشد. در این جا از کد هیدرودینامیکی تک بعدی مولتی افاس^{۴۹} [۹] استفاده شده است. در این کد برای توصیف هیدرودینامیکی اهداف جامد طی برهم‌کنش با لیزر، از رهیافت لاگرانژی شامل معادلات رسانندگی گرمایی الکترون و نیز ترابرد چندگروهی تابش استفاده می‌کنند. کد مولتی افاس از جدول معادله حالت سزای استفاده می‌کند و اثرات تابشی نیز با ضرایب جذب و گسیل وابسته به چگالی و دما که از کد اتمی SNOP استخراج می‌شود، بررسی می‌شود. شکل ۲ تحول فضا زمانی چگالی و میزان یونش الکترونی برای دو ضخامت ۰/۲۵ و ۰/۵ میکرومتر را در انتهای برهم‌کنش پالس (۱۹/۴۵ پیکوثانیه) نشان می‌دهد.



^{۴۸} Digitizing
^{۴۹} MULTI-FS



شکل ۲. تحول فضا زمانی چگالی الکترونی هدف با دو ضخامت الف) ۰/۵، ب) ۰/۲۵ میکرومتر و تحول فضا زمانی میزان یونیزاسیون هدف با دو ضخامت ج) ۰/۵ و د) ۰/۲۵ میکرومتر، در برهم کنش پیش پالس با پهنای زمانی ۲۰ پیکوثانیه و تابعیت زمانی با معادله (۱).

مطابق با شکل ۲ در هر دو ضخامت، گسترش پلاسما در جلوی هدف مشاهده شده است. در زمان‌های اولیه (حدود ۲-۴ پیکوثانیه)، ناحیه‌ای از چگالی بالای الکترونی در مرز $X = 0$ تشکیل می‌شود که نشان‌دهنده یونیزاسیون سریع ماده و ایجاد یک پلاسما متراکم در سطح جلوی هدف است. در زمان‌های بالاتر (بیش از ۱۰ پیکوثانیه)، یک ناحیه با گرادیان چگالی قابل توجه ایجاد شده است که ناشی از گسترش پلاسما در اثر تبخیر لیزری^{۵۰} است. و در زمان ۱۸ پیکوثانیه یک تراکم چگالی نیز در هدف منتشر می‌شود (ناحیه زرد و قرمز رنگ). این افزایش چگالی می‌تواند ناشی از یک موج ضربه بازگشتی در اثر برخورد جریان‌های پلاسمایی باشد، که باعث تراکم مجدد ماده در این ناحیه شده است. قله چگالی در هدف ضخیم‌تر ۰/۵ میکرومتر، بیشتر از هدف نازک است. این امر به این دلیل است که طی برهمکنش پیش پالس، کل هدف نازک ۰/۲۵ میکرومتر جابه جایی اندکی داشته که موجب کاهش قله چگالی در آن می‌شود. در انتهای زمان تابش پیش پالس (۱۹/۴۵ پیکوثانیه) همچنان موج ضربه ناشی از پیش پالس در هدف ضخیم ۰/۵ میکرومتر به پشت هدف نرسیده و می‌توان بیان کرد که سطح پشتی هدف در هنگام برهمکنش پالس اصلی با آن بدون تغییر باقی مانده است. در مقابل، در هدف ۰/۲۵ میکرومتر، ناحیه‌ای با چگالی پایین (آبی رنگ) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تبخیر پشت هدف و تشکیل پلاسما در آن ناحیه می‌باشد. این به هم ریختگی و تبخیر پشت هدف از نتایج میزان یونیزاسیون در دو هدف نیز مشاهده می‌شود (شکل ۲ ج و د).

۳. نتیجه گیری:

تأثیر پیش پالس پیکوثانیه‌ای لیزر بر اهداف میکرومتری در آزمایش‌های شتابدهی TNSA، با استفاده از شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی بررسی شد. تحول فضا-زمانی چگالی الکترون‌ها و میزان یونیزاسیون هدف برای دو ضخامت ۰/۵ و ۰/۲۵ میکرومتر تحلیل گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای مجموعه لیزری ATLAS، ضخامت بهینه‌ی هدف برای شتابدهی به روش TNSA حدود ۰/۲۵ میکرومتر است. در ضخامت‌های کمتر از این مقدار، پیش پالس موجب تبخیر سطح پشت هدف و بهم ریختگی آن می‌شود که می‌تواند عملکرد شتابدهی پروتون را مختل کند. این نتایج برای بهینه‌سازی اهداف نازک در بهبود عملکرد آزمایش‌های شتابدهی ذرات با لیزر حائز اهمیت است.

۴. مراجع:

- Macchi, A., M. Borghesi, and M. Passoni, *Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction*. Reviews of Modern Physics, ۲۰۱۳. ۸۵(۲): p. ۷۵۱-۷۹۳.
- Esirkepov, T., M. Yamagiwa, and T. Tajima, *Laser ion-acceleration scaling laws seen in multiparametric particle-in-cell simulations*. Physical review letters, ۲۰۰۶. ۹۶(۱۰): p. ۱۰۵۰۰۱.

^{۵۰} Laser ablation



۳. Andreev, A., et al., *Hybrid proton acceleration scheme using relativistic intense laser light*. Physics of Plasmas, ۲۰۱۳. ۲۰.(۳)
۴. Robinson, A., et al., *Radiation pressure acceleration of thin foils with circularly polarized laser pulses*. New journal of Physics, ۲۰۰۸. ۱۰(۱): p. ۰۱۳۰۲۱.
۵. Brantov, A., et al., *Synchronized ion acceleration by ultraintense slow light*. Physical Review Letters, ۲۰۱۶. ۱۱۶(۸): p. ۰۸۵۰۰۴.
۶. Kaluza, M., et al., *Influence of the laser prepulse on proton acceleration in thin-foil experiments*. Physical review letters, ۲۰۰۴. ۹۳(۴): p. ۰۴۵۰۰۳.
۷. Grismayer, T. and P. Mora, *Influence of a finite initial ion density gradient on plasma expansion into a vacuum*. Physics of Plasmas, ۲۰۰۶. ۱۳.(۳)
۸. Kiefer, D., *Relativistic Electron Mirrors: from High Intensity Laser–Nanofoil Interactions*. ۲۰۱۴: Springer.
۹. Eidmann, K., et al., *Hydrodynamic simulation of subpicosecond laser interaction with solid-density matter*. Physical Review E, ۲۰۰۰. ۶۲(۱): p. ۱۲۰۲.



اندازه‌گیری ابعاد باریکه یونی آرگون چشمه یونی کافمن مولتی کاسپ با استفاده از سیم متحرک (کد مقاله : ۱۴۹۵)

محمدباقری، فیاض^{۱*} - گرائیلی علیرضا^۱

۱. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، گروه پرتوهای یونی

چکیده:

اندازه‌گیری توزیع جریان باریکه در راستای محور X و Y با هدف شناخت خواص باریکه و نحوه رفتار آن می‌تواند اطلاعات مناسبی از نحوه کارکرد صحیح دستگاه ارائه بدهد. اندازه‌گیری ابعاد باریکه چشمه یونی کافمن مالتی کاسپ مورد استفاده در دستگاه MBM^{100} و اطلاع از نحوه توزیع چگالی جریان باریکه بسیار مهم است. دانستن ابعاد باریکه برای قرار دادن نمونه جهت کاشت یون و اطمینان از رسیدن دز یکنواخت به نقاط مختلف نمونه ضروری است. در این پژوهش ساخت دستگاه سیم متحرک جهت پویش و اندازه‌گیری نحوه توزیع جریان باریکه چشمه کاشت یون MBM^{100} انجام گردیده و نتایج آن ارائه شده است. با اندازه‌گیری توزیع جریان باریکه بر روی محور حرکت سیم برای ولتاژهای مختلف تخلیه پلاسما، اندازه‌گیری‌ها انجام شد. علاوه بر توزیع گوسی معلوم گردید که با افزایش ولتاژ تخلیه جریان یونی در نقاط مختلف و نیز به صورت کلی، افزایش متناسبی دارد.

کلمات کلیدی: سیم متحرک، ابعاد باریکه، پروفایل جریان باریکه

Measurement of Argon Ion Beam Dimensions of Multicusp Kaufman Ion Source Using a Moving Wire

Mohammadbagheri, Faiyaz^{1*}, Grayeli, Alireza¹

¹. AEOI, Nuclear science and technology research, School of physics and accelerators, Ion beams department

Abstract:

Measuring the beam current distribution along the x and y axes with the aim of understanding the beam properties and its behavior can provide appropriate information on how the device works properly. Measuring the dimensions of the Kaufmann Multicusp ion source beam used in the MBM^{100} device and knowing how the beam current density is distributed is very important. Knowing the dimensions of the beam is essential for placing the substrate for ion implantation and ensuring that a uniform dose reaches different points of the sample. In this research, a moving wire device was constructed to scan and measure the beam current distribution of the MBM^{100} ion implantation source, and its results are presented. Measurements were made by reading the beam current distribution along the wire movement axis at different plasma discharge voltages. In addition to the Gaussian distribution, it was found that with increasing discharge voltage, the ion current in different points and consequently total current increases proportionally.

Key words: moving wire, beam dimensions, beam current profile,



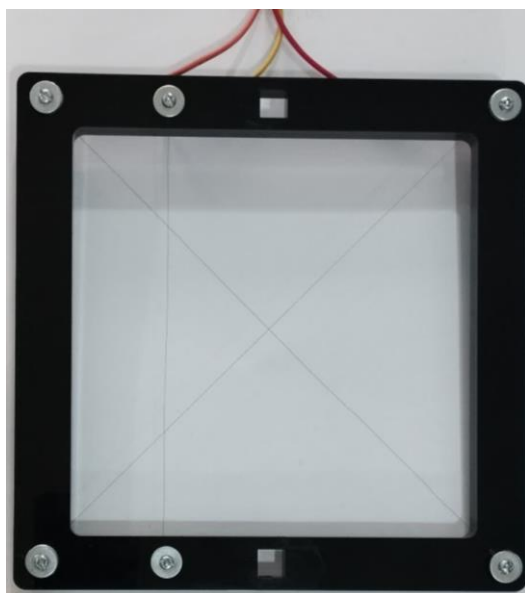
۱. مقدمه:

اندازه‌گیری توزیع چگالی باریکه در راستای محور X و Y با هدف شناخت خواص باریکه و نحوه رفتار آن می‌تواند اطلاعات مناسبی از نحوه کارکرد صحیح دستگاه ارائه بدهد.

اندازه‌گیری پروفایل باریکه به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. صفحات سوسوزن، پوشش‌های سیمی، نمایشگر گاز باقیمانده و نمایشگر الکترون ثانویه، فارادی کاپ آرایه‌ای، همگی برای اندازه‌گیری پروفایل باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری ابعاد باریکه چشمه یونی کافمن مالتی کاسپ مورد استفاده در دستگاه MBM ۱۰۰ برای اطلاع از نحوه توزیع چگالی جریان باریکه بسیار مهم است. دانستن ابعاد باریکه برای قرار دادن نمونه جهت کاشت یون و اطمینان رسیدن دز یکنواخت به نقاط نمونه لازم است. تلاش‌های زیادی در آزمایشگاه‌های جهان برای اندازه‌گیری ابعاد و مقدار باریکه انجام می‌شود، اما در کشور ما بررسی اندازه‌گیری ابعاد باریکه قدمت زیادی ندارد. پروفایل باریکه شتاب دهنده 200-ES مستقر در دانشگاه شهید بهشتی توسط یک نمایشگر الکترون ثانویه توسط ابراهیمی بسایی و همکاران [۱] انجام شده است. یک شبکه‌ای متشکل از ۳۲ سیم به صورت افقی و عمودی و به فاصله ۱/۵ میلی‌متر در جلوی باریکه تعبیه گردیده است. ساخت فارادی کاپ ارائه‌ای توسط سید خلیل موسوی و همکاران [۲] در مجتمع کاربرد پرتوهای یزد به منظور اندازه‌گیری باریکه الکترونی رودوترون انجام شده است. در تحقیق حاضر به دنبال اندازه‌گیری پروفایل باریکه با استفاده از یک سیم متحرک از جنس تنگستن هستیم. دو سیم تنگستنی عمود بر هم نصب شده بر روی یک قاب از جنس پلکسی در مقابل باریکه حرکت داده می‌شود. جریان ایجاد شده حاصل از برخورد یون‌ها به سیم در طول مسیر حرکت خوانده می‌شود و هر ۳۰ ثانیه عدد جریان توسط کامپیوتر ثبت می‌گردد.

۲. روش کار:

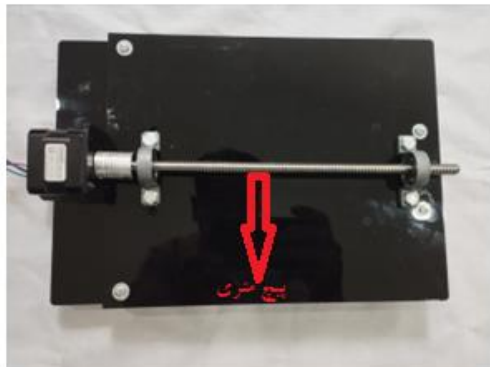
یک استپر موتور کنترل شده با یک درایور و میکروکنترلر بر روی مسیر مستقیم زیر باریکه به سمت جلو حرکت داده می‌شود. پیچ و لید اسکروی نصب شده بر روی استپر موتور، یک قاب که سیم تنگستنی بر روی آن نصب شده است را به حرکت درمی‌آورد. در شکل ۱ قاب اشاره و نیز سیم‌های تنگستنی نصب شده بر روی آن نشان داده شده است. پیچ متری و لید اسکروی نصب شده بر روی قاب در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: قاب و سیم‌های تنگستنی نصب شده بر روی آن

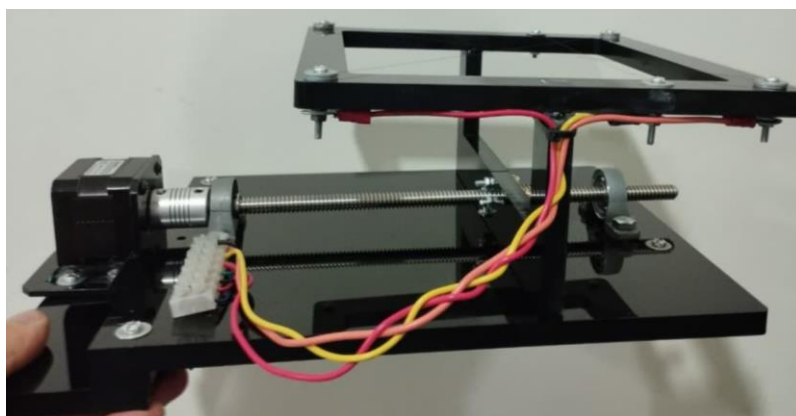


در شکل ۱ یک سیم عمود و دو سیم مورب تنگستنی به ضخامت ۵۰ میکرومتر دیده می‌شود که در این تحقیق صرفاً جریان بر روی سیم عمودی اندازه‌گیری شده است.

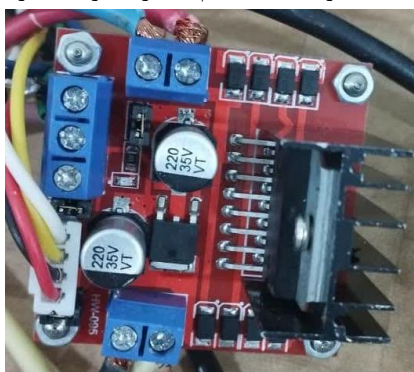


شکل ۲: لید اسکرو و پیچ متری استفاده‌شده برای حرکت دادن سیم

در شکل ۳ تصویر نهایی ساخته‌شده از این دستگاه ارائه شده است. قاب ساخته‌شده بر روی پیچ متری قرار گرفته و با استفاده از یک درایور و میکروکنترلر آردوینو اونو کنترل خواهد شد. شکل ۴ تصویر درایور ارائه شده است.



شکل ۳: تصویر نهایی ساخته شده از دستگاه سیم متحرک برای اندازه‌گیری نقش باریکه جریان

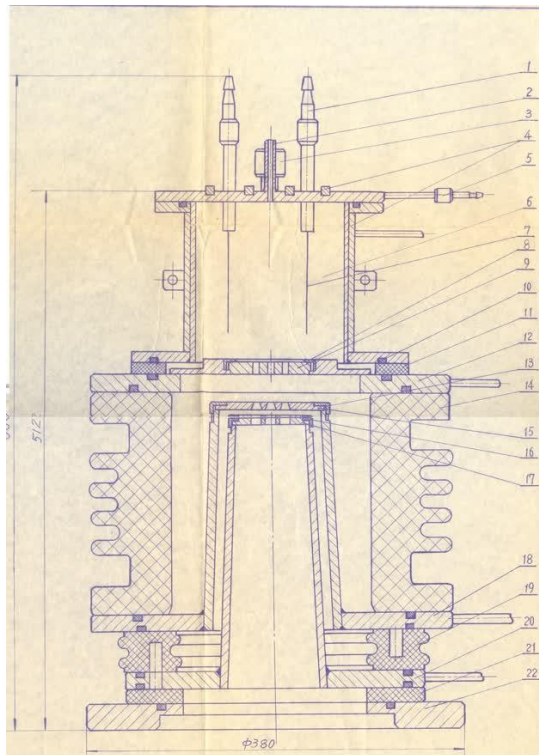


شکل ۴: درایور استفاده شده برای راه‌اندازی استپر موتور

با قرار دادن این سیم متحرک در زیر باریکه و حرکت دادن آن می‌توانیم پروفایل یک‌بعدی جریان باریکه را به دست آوریم. در این پژوهش هدف اندازه‌گیری پروفایل باریکه‌ی کاشت یون دستگاه ۱۰۰ MBM بوده است. ، لذا لازم است اشاره‌ای به دستگاه کاشت یون ۱۰۰ MBM بشود. این دستگاه قابلیت کاشت یون و نیز قابلیت لایه نشانی از طریق اسپاترینگ را دارد که در زمان سلامتی کامل دستگاه، قادر بوده است با حرکت دادن بستر و حرکت بین دو کاربرد خود، یک‌درمیان با لایه نشانی و



کاشت یون به صورت ترکیبی بهره برد. در اینجا صرفاً به باریکه ایجاد شده توسط چشمه یونی کاشت اکتفا خواهیم نمود. چشمه یونی کافمن مالتی کاسپ دارای یک سیستم سه الکترودی ACCEL-DECCEL است که علاوه بر گپ شتابیده ی ، گپ دیگری را به منظور جبران اثر بار فضایی و نیز متمرکز کردن باریکه دارد. در گپ دوم به دلیل معکوس بودن جهت خطوط میدان از سرعت ذرات کاسته می شود ولی باعث تمرکز باریکه می گردد. در شکل زیر تصویری از چشمه کاشت ارائه شده است:



شکل ۵: نقشه قطعات چشمه یونی

الکترودهای این چشمه به صورت چند سوراخ (multiaperture) می باشد که این خاصیت سبب بزرگ بودن ابعاد باریکه خروجی می گردد. در شکل های زیر تصویر الکترودها به ترتیب از الکترو پلازما، الکترو شتاب دهنده ، و الکترو شتاب گیرنده نمایش داده شده است.



ج



ب

الف

شکل ۶ الف) الکترو پلازما (ب) الکترو شتاب دهنده (ج) الکترو شتاب گیرنده

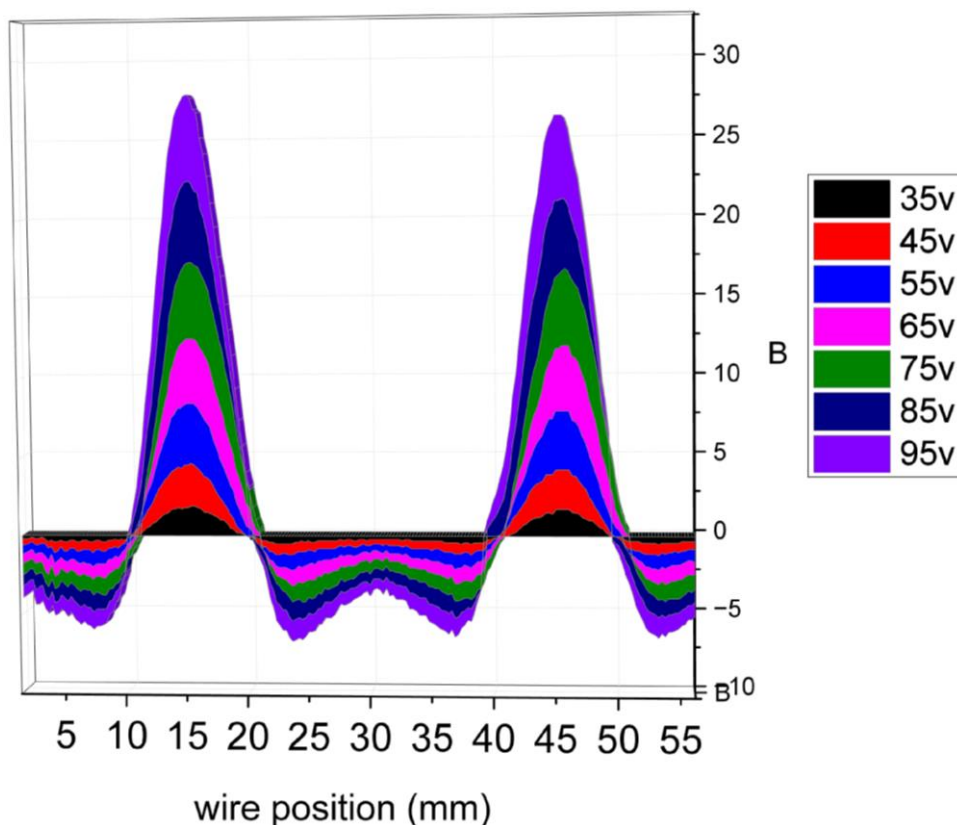
الکترودهای فوق با تشکیل سیستم سه الکترودی ذرات خارج شده از محفظه پلاسمایی را که وارد گپ شتابیده ی شده اند در گپ اول شتاب داده و به انرژی مورد نظر می رسانند. این سوراخها در این چشمه یونی باید دقیقاً زیر هم قرار گیرند. ذرات



پس از عبور از این گپ وارد گپ شتاب گیری می‌شوند. در این گپ الکترون‌های حاصل از برخورد مولکول‌های خنثی با یون‌های پراانرژی سبب تولید الکترون می‌شود و باعث کاهش آثار دافعه‌ای یون‌ها بر همدیگر می‌گردد. از طرفی جهات خطوط میدان به نحوی است که سبب تمرکز در باریکه می‌گردد.

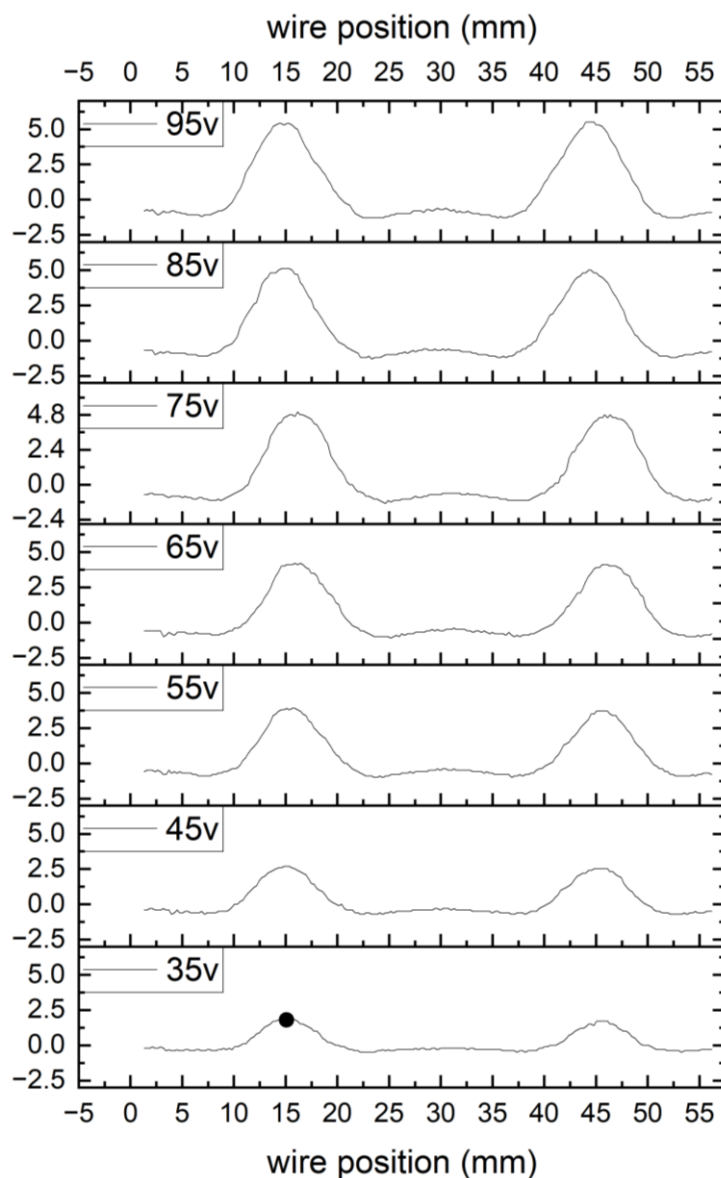
۳. نتایج:

با استفاده از سیم در حال حرکت پروفایل باریکه یون‌های آرگون قابل‌دستیابی است. در هر نقطه‌ای مسیر حرکت سیم، بارهای برخورد کننده با سیم ایجاد جریان الکتریکی می‌نماید در اینجا مجموع بارهای الکتریکی بر روی خط سیم که باریکه را قطع می‌کند، به‌صورت جریان الکتریکی در آمپر متر ثبت می‌شود. آمپر متر با دقت بالا در محدوده میکرو آمپر متر می‌باشد. و به یک سیستم کامپیوتری متصل است. این نرم‌افزار کامپیوتری قابلیت خواندن عدد جریان را به‌صورت هر چند ثانیه یک‌بار دارد. بنابراین مقدار جریان ثبت شده بر روی سیم بر حسب زمان قابل ترسیم است از آنجاکه حرکت سیم با یک سرعت یکنواخت انجام می‌شود هر پله زمانی اختیاری، معادل طی یک‌فاصله مکانی خواهد بود و نمودار ترسیمی جریان بر حسب زمان قابل تبدیل به نمودار جریان بر حسب مکان خواهد بود. در شکل ۷ نمودار جریان را برای باریکه آرگون با انرژی ۳۰ کیلو الکترون‌ولت به ازای ۱۲/۵ ولت ولتاژ فیلامان، ولتاژ ۵- کیلوولت برای الکتروود تمرکز، و ولتاژهای تخلیه مختلف، رسم شده است:



شکل ۷: نمودار جریان بر حسب موقعیت سیم به ازای ولتاژهای مختلف

شکل ۸ منحنی فوق را برای ولتاژهای مختلف ۳۵، ۴۵، ۵۵، ۶۵، ۷۵، ۸۵، ۹۵ ولتی همگی در یک نمودار نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر تأثیر ولتاژ تخلیه پلازما بر جریان باریکه ارائه می‌شود.



شکل ۸: نمودار جریان برحسب موقعیت سیم به ازای ولتاژهای مختلف

ابعاد باریکه را می‌توان از طریق به دست آوردن فاصله شروع و اتمام اوج‌گیری قله‌ها در نظر گرفت. با تفاضل محل اتمام فرود قله از محل شروع اوج‌گیری قله می‌توان ابعاد باریکه را به دست آورد. در جدول زیر این مقادیر ارائه شده است:

۹۵v	۸۵v	۷۵v	۶۵v	۵۵v	۴۵v	۳۵v	کمیت ابعاد/ ولتاژ تخلیه
۱۴.۸۴	۱۴.۳۰	۱۴.۸۳	۱۴.۸۴	۱۳.۸۷	۱۲.۴۵	۱۱.۱۳	ابعاد باریکه (cm)
۱۴.۸۴	۱۴.۸۴	۱۵.۹	۱۵.۶۳	۱۵.۱۰	۱۵.۱۰	۱۵.۱۰	مختصات قله (cm)
۵.۳	۵.۱	۴.۷	۴.۱	۳.۹	۲.۷	۱.۸	جریان بیشینه (uA)

جدول ۱: تغییر مشخصات باریکه برحسب تغییرات ولتاژ تخلیه پلاسما

۴. بحث و نتیجه‌گیری:

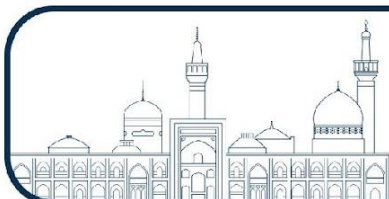
با توجه به اهمیت اندازه‌گیری پروفایل جریان باریکه نسبت به ساخت یک دستگاه سیم متحرک اقدام گردید. اندازه‌گیری جریان بر روی خط سیم به ازای موقعیت‌های مختلف با استفاده از یک سیم در حال حرکت و با استفاده از کنترلر آردوینو



انجام شد. سیم در حال حرکت از نقطه‌ای که خارج از باریکه است شروع به حرکت می‌نماید و با پوشش تمام باریکه از سمت دیگر خارج می‌شود. سپس با استفاده از یک میکروسویچ متوقف شده و طبق برنامه تعریف شده در جهت مخالف حرکت کرده و یک اندازه‌گیری دوباره را انجام می‌دهد و در نهایت بر اساس برنامه متوقف می‌گردد. جریان یونی توسط یک میکرو آمپر متر با یک کامپیوتر ثبت می‌گردد. بنابراین در هر منحنی به دلیل رفت و برگشتی بودن حرکت، دو بار اندازه‌گیری جریان انجام می‌شود و دو قله مشاهده خواهد شد. نتایج ارائه شده در بالا نشان از کارکرد صحیح دستگاه می‌دهد. جریان منفی ابتدا و انتهای پروفایل به دلیل الکترون‌های تولید شده در گپ شتاب گیری باشد چرا که این الکترون‌ها برخلاف یون‌ها که از سرعتشان کاسته می‌شود در این میدان شتاب گرفته و وارد ناحیه اندازه‌گیری باریکه می‌شوند. این الکترون‌ها به دلیل برخورد یون‌های پرانرژی با مولکول‌های خنثای گاز تولید می‌شوند. نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان‌دهنده ارتباط مستقیم جریان خروجی باریکه با ولتاژ تخلیه‌ی پلاسما است. افزایش ولتاژ تخلیه پلاسما سبب افزایش یون‌سازی در پلاسما شده و نتیجتاً باعث افزایش جریان باریکه می‌گردد، ابعاد باریکه نیز با افزایش جریان باریکه افزایش می‌یابد اما در ولتاژ ۶۵ ولت اشباع گردید. افزایش جریان باریکه باعث دافعه بیشتر یون‌ها گردیده و موجب افزایش واگرایی باریکه شده و ابعاد باریکه را افزایش بدهد. در حوالی همین ولتاژ می‌توان کاهش در افزایش جریان باریکه را مشاهده کرد. نتایج نشان داده شده کارکرد مناسبی از دستگاه ساخته شده ارائه می‌دهد. جابجایی قله جریان باریکه به دلیل دستی بودن شروع ثبت داده‌های کامپیوتری بوده و اگر می‌توانستیم فرایند خواندن جریان را هم‌زمان در برنامه یک آردوینوی واحد داشته باشیم از این اتفاق اعراض می‌شد.

۵. مراجع:

- [۱] احسان ابراهیمی بسابی و همکاران، "اندازه‌گیری نیمرخ باریکه شتاب دهنده ES-۲۰۰ با استفاده از نمایشگر الکترون ثانویه"، مجله پژوهش فیزیک ایران، صفحه ۲۵۸-۲۵۳ [۱۳۹۴]
- [۲] سید خلیل موسوی و همکاران، "طراحی و ساخت فنجان فارادی جهت اندازه‌گیری جریان باریکه‌های الکترونی در شتاب‌دهنده رودترون"، نوزدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، صفحه ۱۸۶-۱۸۱ [۱۳۹۱]



طراحی، انتخاب جنس و هندسه‌ی پنجره‌ی خروجی در شتابدهنده خطی پزشکی امید در حالت الکترونی (کد مقاله: ۱۵۰۷)

یزدانی نجف‌آبادی، مریم^۱* - مستأجران، مریم^۱ فخاری، یاسر^۲

۱. دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، گروه ذرات بنیادی و نظریه میدان‌ها
۲. شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان، شرکت دانش‌بنیان بهیار صنعت سپاهان

چکیده:

ساخت شتابدهنده خطی پزشکی در کشور، تحت عنوان شتابدهنده خطی پزشکی امید، توسط شرکت بهیار صنعت سپاهان بومی‌سازی شده است و در مراکز درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در راستای ارتقاء این دستگاه، می‌توان با بازطراحی و تغییر در ساختار شتابدهنده، از آن برای پرتودرمانی الکترون، استفاده نمود. پرتودرمانی الکترون برای درمان تومورهای سطحی، پرفایده و ایمن است. برای دستیابی به این هدف، تغییرات اساسی در ساختار شتابدهنده به ویژه طراحی و ساخت پنجره‌ی خروجی مناسب برای الکترون‌ها ضروری است. در این پژوهش، جنس و هندسه مناسب برای پنجره‌ی خروجی، بررسی و بهترین جنس و ضخامت برای آن انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: شتابدهنده خطی پزشکی، شتابدهنده خطی امید 6MeV ، پنجره خروجی الکترون، نرم‌افزار EGSnrc

Design, Material Selection, and Geometry of the Exit Window in the Omid Medical Linear Accelerator in Electron Mode

Yazdani Najafabadi, Maryam^{۱,۲}, Mostajeran, Maryam^۱*, Fakhari, Yaser^۲

۱. Yazd university, Physics Faculty, Department of Fundamental Particle Physics
۲. Science & technology town sanaati, Behyaar Sanaat Sepahan Co.

Abstract:

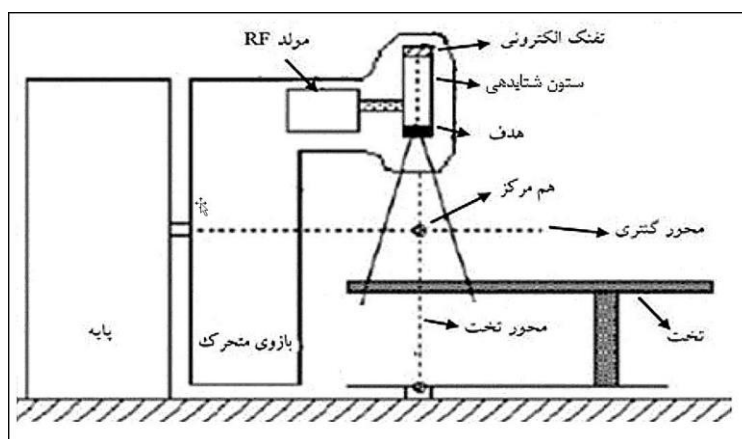
The medical linear accelerator in the country, known as the Omid Medical Linear Accelerator, has been localized by the Behyar Sanat Sepahan Company and is used in medical centers. To enhance this device, it can be redesigned and modified for use in electron beam radiation therapy. Electron radiation therapy is beneficial and safe for the treatment of superficial tumors. To achieve this goal, fundamental changes in the structure of the accelerator, especially the design and construction of a suitable exit window for electrons, are essential. In this study, the appropriate material and geometry for the exit window were investigated, and the best material and thickness for it were selected.

Keywords: Medical Linear Accelerator, Omid Medical Linear Accelerator (MeV6), Electron Exit Window, EGSnrc Software



۱ - مقدمه:

پرتودرمانی یکی از مهم‌ترین روش‌های درمان بسیاری از سرطان‌ها است. این روش درمانی به معنای استفاده از پرتوهای پرنانرژی یون‌ساز برای از بین بردن سلول‌های سرطانی است [۱، ۲]. استفاده از شتابدهنده‌های خطی، کاربردی‌ترین روش تولید پرتوهای مورد استفاده در پرتودرمانی سرطان‌ها است. شتابدهنده‌های خطی نسبت به دیگر شتابدهنده‌ها از نظر هزینه ساخت، اندازه و وسعت کاربرد، نسبتاً مقرون به صرفه و در دسترس هستند. در شتابدهنده‌های خطی پزشکی می‌توان هم از باریکه‌ی الکترونی و هم از باریکه‌ی فوتونی (پرتوی ایکس) در پرتودرمانی استفاده کرد. که در ادامه، تفاوت این دو حالت (الکترونی و فوتونی) را بیان می‌کنیم. ستون شتابدهی، سیستم تامین RF^۱ با توان بالا، اجزای سر شتابدهنده، سیستم‌های خلأ و خنک‌کننده، سیستم کنترل، بدنه نگهدارنده، سیستم چرخش و تخت درمان، اجزای اصلی شتابدهنده خطی پزشکی هستند. در شکل ۱ تصویر ساده‌ای از ساختار کلی شتابدهنده‌های خطی پزشکی نمایش داده شده است. در ادامه، به بررسی طرح ساده‌ای از شتابدهنده در حالت فوتونی و الکترونی پرداخته می‌شود.



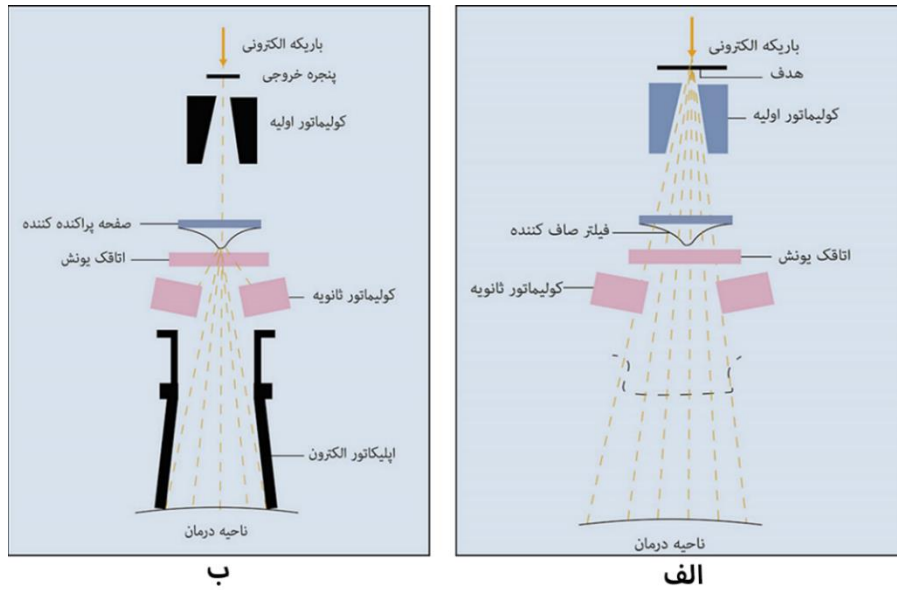
شکل (۱) طرح شتابدهنده خطی پزشکی کم انرژی در حالت فوتونی (۰.۶-۴ MeV)

در حالت فوتونی الکترون‌های آزاد تولید شده از تفنگ الکترونی توسط موج‌های الکترومغناطیسی در ستون شتابدهی، شتاب می‌گیرند و به انرژی آن‌ها افزوده می‌شود. سپس الکترون‌ها در برخورد با هدف (عمدتاً تنگستن) تحت فرآیند تابش ترمزی^۲ پراکنده شده و به علت کاهش سرعت، پرتوی ایکس تولید می‌کنند. در حالت فوتونی، پس از ایجاد پرتوی با انرژی مورد نظر، این پرتو توسط موازی ساز به صورت پیرامحور^۳ در آمده و توزیع شدت انرژی آن توسط فیلتر صاف‌کننده پرتو در تمامی نقاط، یکسان می‌شود و به ناحیه درمان تابیده می‌شود (شکل ۲-الف).

^۱ Radiofrequency

^۲ Bremsstrahlung

^۳ Coaxial



شکل (۲) طرح ساده از سر شتابدهنده خطی پزشکی در حالت فوتونی (الف) و در حالت الکترونی (ب) [۲].

در حالت الکترونی، از باریکه‌ی الکترونی برای پرتودرمانی استفاده می‌کنند. پرتودرمانی با الکترون عمدتاً برای درمان تومورهای سطحی استفاده می‌شود که روشی آسان، مقرون به صرفه و ایمن به شمار می‌رود. به منظور استفاده از باریکه‌ی الکترونی برای درمان، هدف از مسیر باریکه‌ی الکترونی حذف می‌گردد و به جای آن، پنجره خروجی^{۵۴} قرار می‌گیرد. پنجره خروجی علاوه بر حفظ خلأ به پرتوی الکترونی اجازه می‌دهد که طی عبور از خلأ و ورود به اتمسفر با کمترین محدودیت و اتلاف انرژی به ناحیه درمان برخورد کند [۳، ۴]. پنجره خروجی، فضای داخلی ستون شتابدهی را از فضای بیرونی جدا می‌کند. این پنجره باید نسبت به الکترون‌ها شفاف باشد، یعنی چگالی کمی داشته باشد تا نرخ نفوذ الکترون در آن بالا باشد. از طرفی باید ضریب جذب الکترون در آن پایین بوده و نقطه ذوب بالایی داشته باشد تا در برابر باریکه‌ی الکترونی پرتوی آسیب نبیند. این پنجره باید از نظر مکانیکی برای کنترل فشار در هر دو سمت، کارایی داشته باشد و پراکندگی الکترونی کمی داشته باشد تا منجر به تولید پرتوی ایکس نشود. باریکه‌ی الکترونی از پنجره خروجی عبور کرده و به صفحه پراکننده برخورد می‌کند تا پرتو پخش شده و جریان الکترونی و شدت انرژی یکنواختی را در سراسر ناحیه درمان ایجاد کند [۳-۵]. باریکه‌ی الکترونی خروجی از شتابدهنده، پرتویی خطی است که برای درمان باید هم پیرامحور و موازی باشد، هم به صورت کنترل شده، گستره‌ای بزرگتر را پوشش دهد به این منظور، از اعمال‌کننده^{۵۵} الکترون استفاده می‌شود که برای تابش باریکه‌ی الکترونی در انتهای سر شتابدهنده چسبانده می‌شود (شکل ۲-ب).

در این جا ذکر این نکته بجاست که شتابدهنده خطی پزشکی امید 6MeV ، که توسط شرکت بهیار صنعت سپاهان ساخته شده و در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حال حاضر در حالت فوتونی مورد استفاده قرار می‌گیرد و هدف آن در خلأ و

^{۵۴} Exit Window

^{۵۵} Applicator



در انتهای ستون شتابدهی تعبیه شده است که می‌توان با حذف هدف و تعبیه پنجره خروجی مناسب در انتهای ستون شتابدهی، خروجی شتابدهنده را از حالت فوتونی به حالت الکترونی تغییر داد و به باریکه‌ی الکترونی با انرژی بالا دست یافت. در شکل ۳ شتابدهنده خطی پزشکی امید در مرکز پرتودرمانی بیمارستان شهید مدنی تبریز نشان داده شده است.



شکل (۳) شتابدهنده خطی پزشکی امید در مرکز پرتودرمانی بیمارستان شهید مدنی تبریز.

ویژگی‌های پنجره خروجی مورد استفاده در حالت الکترونی:

اضافه کردن پنجره خروجی به ستون شتابدهی باید طوری انجام شود که خلأ داخل ستون شتابدهی را از بین نبرد. از سوی دیگر، باریکه‌ی الکترونی باید با کمترین اتلاف انرژی، تولید فوتون و پراکندگی الکترون به اتمسفر وارد شود. این پنجره علاوه بر کارایی بهینه‌ی مکانیکی و کنترل فشار، باید دارای ویژگی‌هایی نظیر چگالی کم، شفافیت نسبت به الکترون‌ها، ضریب جذب پایین، نقطه ذوب و نیمه عمر بالا باشد تا بتواند علاوه بر عبور الکترون‌ها در برابر آسیب‌های احتمالی از سوی باریکه‌ی الکترونی مقاومت کند.

انتخاب جنس مناسب برای پنجره‌ی خروجی، یکی از مهم‌ترین بخش‌های این پروژه است که در این پژوهش، از نظر شفافیت نسبت به الکترون و میزان تولید فوتون مورد بررسی قرار می‌گیرد و علاوه بر آن، محدودیت‌های ساخت و هزینه را نیز در نظر بگیریم. بررسی دیگر ویژگی‌های پنجره که در قبل به آن‌ها اشاره شد در ادامه و در پژوهش‌های دیگر انجام می‌پذیرد.

۲- طراحی و شبیه‌سازی

نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش، نرم‌افزار EGSnrc است که نرم‌افزار استاندارد جهانی برای شبیه‌سازی اجزای خروجی شتابدهنده‌هاست که قادر است، ترابرد فوتون و الکترون از انرژی ۱ کیلو الکترون ولت تا ۱۰ گیگا الکترون ولت را انجام دهد و می‌توان هر هندسه‌ای از شتابدهنده را توسط آن پیاده‌سازی نمود [۶]. با توجه به اینکه در نظر داریم میزان شفافیت پنجره خروجی نسبت به الکترون و میزان تولید فوتون را بررسی نماییم، نتایج شبیه‌سازی این نرم‌افزار که برای ما اهمیت دارند، میزان و نوع ذرات عبوری از پنجره خروجی و میانگین انرژی ذرات عبوری هستند. میزان ذرات عبوری از هر ماده به ما نشان می‌دهد که به ازای تعداد معینی ذره که به ماده برخورد می‌کنند، چه تعداد از این ذرات بدون افت چشمگیر انرژی از ماده خارج شده‌اند که می‌تواند نشان‌دهنده میزان شفافیت هر ماده نسبت به ذرات ورودی باشد. بررسی نوع ذرات عبوری نیز از این نظر حائز اهمیت است که گفتیم پنجره خروجی باید میزان تولید فوتون کمی داشته‌باشد.

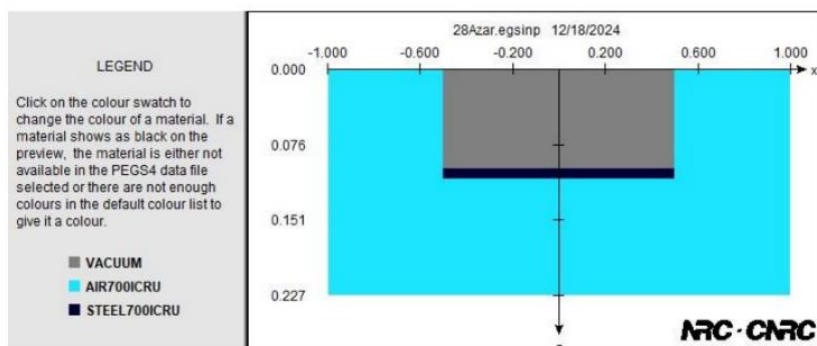


مدل‌سازی این نرم‌افزار به گونه‌ای است که مسیر حرکت باریکه را در راستای محور Z در نظر گرفته و اجزای شتابدهنده را به طور متقارن نسبت به محور Z و در صفحه XZ یا YZ نشان می‌دهد. یعنی تمامی ساختارهایی که در این نرم‌افزار در صفحه نشان داده می‌شوند حول محور Z تقارن دارند و می‌توان اشکال هندسی متنوع از جمله دیسک، استوانه و مخروط را توسط آن طراحی نمود.

طراحی پنجره خروجی در مدل ما به این صورت است که ابتدا خلأ درون ستون شتابدهی، سپس پنجره خروجی و پس از آن لایه‌ای از هوا که نماینده فضای اتمسفر خارج از ستون شتابدهی است را توسط ماژول‌های به ترتیب، SLABS, FLATFILT, SLABS این نرم‌افزار طراحی نمودیم.

با توجه به ساختار دهانه خروجی ستون شتابدهی شتابدهنده امید، ما دیسکی به شعاع $4/5$ میلی‌متر (در راستای X و Y) را به عنوان پنجره خروجی (سیاه) طراحی نموده که خلأ درون ستون شتابدهی (خاکستری) را از اتمسفر (آبی) جدا می‌کند شکل ۴. با توجه به مطالعات انجام شده در ارتباط با ویژگی‌های مواد مختلف، از بین موادی که پیش‌بینی می‌شد بتوان برای پنجره خروجی الکترون از آن‌ها بهره برد، استیل، آلومینیوم، برلیوم و تیتانیوم مورد بررسی قرار گرفت. از طرفی پنجره خروجی باید ملاحظات لازم در مورد شفافیت نسبت به الکترون و تولید فوتون کم را برآورده کند، پس نمی‌توان هر ضخامتی را برای آن در نظر گرفت. طبق مطالعات انجام شده، این ضخامت می‌تواند از ابعاد میلی‌متر باشد. در این راستا ما به این صورت عمل کردیم که طی دفعات متعدد شبیه‌سازی، یکی از این مواد برای جنس پنجره خروجی در نظر گرفته می‌شد و هر بار ضخامتی برای آن در نظر می‌گرفتیم و نتایج شبیه‌سازی را مورد بررسی قرار داده تا بهترین نتایج از نظر شفافیت و تولید فوتون در نظر گرفته شوند. یعنی جنس و ضخامت بهینه از طریق سعی و خطا و با توجه به نتایج شبیه‌سازی و از طرفی ملاحظات و محدودیت‌های ساخت و اتصال تعیین می‌شود.

برای شبیه‌سازی باریکه‌ی الکترونی فرودی مورد نظر، باریکه‌ای الکترونی با انرژی 6MeV را به عنوان باریکه‌ی فرودی و به صورت چشمه‌ای دایره‌ای با توزیع گاوسی و شعاع 1 میلی‌متر در مبدا مختصات در نظر می‌گیریم که به این ساختار برخورد می‌کند.



شکل (۴) شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی توسط نرم‌افزار EGSnrc.



برای سهولت و تسریع در کار شبیه‌سازی، تعداد ذرات فرودی را 10^6 الکترون و انرژی قطع الکترون را 0.7MeV و برای فوتون، 0.1MeV در نظر گرفتیم تا در فرآیند شبیه‌سازی، ذرات با انرژی کمتر از این مقادیر، تراپرد نشوند.

۱-۲- تحلیل نتایج

پس از انجام شبیه‌سازی، نتایج به دست آمده که شامل تعداد ذرات خروجی، میزان فوتون و انرژی میانگین ذرات خروجی است مورد بررسی قرار گرفت.

در این شبیه‌سازی، ضخامت بهینه پنجره خروجی، 0.1 میلی‌متر به دست آمد.

میزان شفافیت پنجره نسبت به الکترون در مواد ذکر شده نسبت تولید فوتون تولید شده در عبور از باریکه الکترونی از پنجره خروجی، در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱: میزان شفافیت پنجره خروجی نسبت به الکترون و نسبت میزان فوتون تولیدی به کل ذرات خروجی از پنجره خروجی الکترون.

ردیف	جنس پنجره خروجی الکترون به ضخامت 0.1 میلی‌متر	تعداد ذرات خروجی	انرژی میانگین ذرات خروجی (MeV)	نسبت تولید فوتون به کل ذرات خروجی
۱	استیل	۱۰۴۸۷۵۸	۹۴۷/۵	۴۰/۳ %
۲	آلومینیوم	۱۰۱۴۵۶۰	۹۶۳/۵	۷/۰ %
۳	برلیوم	۱۰۰۶۸۴۲	۹۷۵/۵	۲/۰ %
۴	تیتانیوم	۱۰۲۷۳۱۶	۹۴۴/۵	۸/۱ %

با توجه به تعداد ذرات فرودی، هرچه تعداد الکترون خروجی از پنجره خروجی بیشتر باشد نشان‌دهنده شفافیت پنجره نسبت به الکترون‌هاست.

از سوی دیگر، هر چقدر نسبت تعداد فوتون تولید شده در عبور باریکه الکترونی از پنجره خروجی کمتر باشد می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به جنس و ضخامت انتخابی برای پنجره خروجی، فوتون کمتری تولید شده و باریکه الکترونی با انرژی مناسب و با کمترین تعداد فوتون مزاحم، از پنجره خروجی عبور نموده است.



از نتایج به دست آمده مشهود است که کمترین میزان تولید فوتون در پنجره خروجی از جنس بریلیوم است. اما با توجه به امکانات در دسترس، محدودیت ساخت و اتصال، برای ساخت پنجره خروجی، تیتانیوم و استیل به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر را در نظر گرفتیم.

که مراحل ساخت و آبخاری این قطعات را انجام داده‌ایم. پس از اتصال آن‌ها به انتهای ستون شتابدهی، تست‌های تجربی لازم صورت می‌پذیرد که در نظر داریم نتایج حاصل از این تست‌ها را با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه نماییم.

۳- بحث و نتیجه گیری:

برای اینکه شتابدهنده خطی پزشکی امید در حالت الکترونی در پرتودرمانی مورد استفاده قرار گیرد، باید تغییراتی در ساختار آن صورت پذیرد. با توجه به اینکه هدف تنگستنی این شتابدهنده در خلأ و در قسمت داخلی ستون شتابدهی تعبیه شده است، می‌توان با حذف هدف از مسیر باریکه‌ی الکترونی و تعبیه پنجره خروجی الکترون، اولین گام را برای استفاده از این شتابدهنده برای پرتودرمانی الکترونی برداشت. به این منظور پس از مطالعات لازم در مورد مواد مختلف و شبیه‌سازی‌های لازم برای تعیین جنس و ضخامت بهینه برای پنجره خروجی، جنس استیل و تیتانیوم به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر را برای ساخت پنجره خروجی برگزیدیم که پس از ساخت و تدابیر لازم برای اتصال این قطعات به جای هدف تنگستنی، تست‌های تجربی لازم برای تعیین بهترین پنجره خروجی الکترون برای شتابدهنده خطی پزشکی امید انجام می‌پذیرد. امید است نتایج مطلوب در کارهای پژوهشی آینده ارائه گردد.

مراجع:

- [۱] Baskar, Rajamanickam, et al. "Cancer and radiation therapy: current advances and future directions." *International Journal of Medical Sciences*, ۹,۳ (۲۰۱۲): ۱۹۳.
- [۲] Zeman, Elaine M., Eric C. Schreiber, and Joel E. Tepper. "Basics of radiation therapy." In *Abeloff's Clinical Oncology*, Elsevier, (۲۰۲۰): ۴۳۱-۴۶۰.
- [۳] Karzmark, C. J., Craig S. Nunan, and Eiji Tanabe. "Medical electron accelerators." McGraw-Hill, Incorporated, Health Professions Division, (۱۹۹۳).
- [۴] Hanna, Samy. "RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications." Artech House, (۲۰۱۲).
- [۵] Ader, C. R., et al. "Accelerator Vacuum Windows: A Review of Past Research and a Strategy for the Development of a New Design for Improved Safety and Longevity for Particle Accelerators." *arXiv preprint arXiv:۱۹۱۲.۰۳۲۰۶* (۲۰۱۹).
- [۶] Kawrakow, I., et al. "EGSnrc: software for Monte Carlo simulation of ionizing radiation." National Research Council of Canada (۲۰۰۰).



بررسی روش جوش نفوذی و تأثیر پارامترهای آن در اتصال دهی فلزات غیر همجنس و همجنس به کار رفته در ساخت کاواک مسی RF شتاب‌دهنده سینکروترون الکترون (کد مقاله : ۱۵۴۱)

رحیمی^۱، عراقچی^۲، جهانبخش^۳

۱. دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مواد و متالورژی

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۳. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فیزیک

چکیده

کاواک مسی رادیو فرکانسی برای رساندن الکترون به سرعت‌های در شتابنده‌های الکترون نسبتی استفاده می‌گردد. در این پژوهش در راستای بومی سازی کاواک مسی، فرآیند اتصال دهی و جوش مس/مس و مس/فولاد زنگ‌نزن برای استفاده در شرایط خلاء بسیار بالا مورد بررسی قرار گرفت. برای اتصال دهی قطعات کاواک مسی، از جوشکاری حالت جامد جوش نفوذی استفاده گردید. نرخ نشتی نهایی بدست آمده از جوش نفوذی مجموعه جوش مس/مس و مجموعه مس/فولاد زنگ نزن برابر با 2.5×10^{-9} میلی بار بر لیتر ثانیه است. نمونه آزمون جوش داده شده از ترکیب مجموعه مس/مس و مس/فولاد زنگ نزن نیز تا خلاء 1.8×10^{-9} میلی بار رسانده شد.

کلمات کلیدی: جوش نفوذی، مس OFHC، خلاء بسیار بالا (UHV)، روش تاگوچی، اتصال همجنس و غیر همجنس.

Study of Diffusion Welding and its Parameters' Effects on the Dissimilar and Similar Joints used in the Fabrication of the Synchrotron Copper RF Cavity of Electron Accelerator

Rahimi¹, Araghchi², Jahanbakhsh³

۱. Iran University of Science and Technology

۲. Nuclear Science and Technology Research Institute

۳. Shahid Beheshti University, Physics Faculty

Abstract:

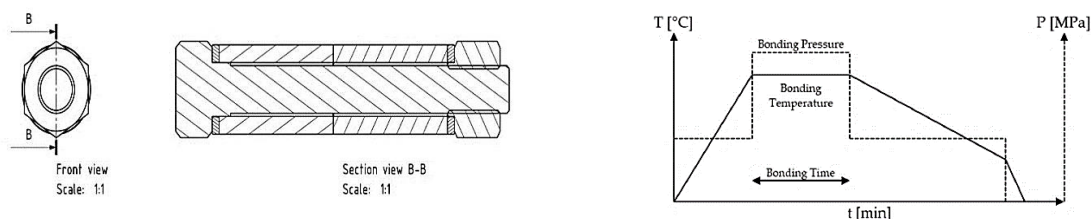
Radio Frequency Copper Cavity is utilized to reach electrons to relativity velocity in accelerators. In this study, to fabricate the copper cavity, cu/cu and cu/ss joints had been examined in different conditions that are related to ultra-high vacuum. A solid-state welding method, diffusion bonding, was the way of creating cu/cu joints. The final leak-rate of diffusion bonding joints was 2.5×10^{-9} mbar per liter second. Additionally, the acquired vacuum pressure was 1.8×10^{-9} mbar.

Key words: Diffusion Bonding, OFHC Copper, Ultra-High Vacuum, Taguchi Method, Similar and Dissimilar Joints.



۱- مقدمه:

یکی از اصلی‌ترین بخش‌های شتابدهنده ذرات باردار (مانند سینکروترون^{۵۶}) بخش بسامد رادیویی^{۵۷} (RF) است. این بخش از قسمت‌های مختلفی نظیر کاواک^{۵۸} مسی RF، منابع تولید توان رادیویی و خطوط انتقال آن تشکیل شده است. کاواک مسی RF، میدان الکتریکی مورد نیاز برای افزایش سطح انرژی الکترون‌ها و تداوم تولید فوتون برای کاربران را فراهم می‌کند [۱]. یکی از فرآیندهای اصلی در ساخت کاواک مسی RF، اتصال دهی و جوش آن است. با توجه به حساسیت کاواک مسی از جمله کارکرد آن در شرایط خلاء بسیار بالا^{۵۹} (UHV) و تنش‌های الکترومغناطیسی محیط، روش‌های مرسوم جوشکاری قابل اجرا نیست (بخصوص برای اتصال دهی مواد فلزی غیر هم‌جنس). از جمله روش‌های اتصال دهی مواد فلزی هم‌جنس و بویژه مواد فلزی غیر هم‌جنس مس/مس و جوش مواد غیر هم‌جنس مس/ فولاد زنگ‌نزن برای بهره بردن در شرایط UHV با استفاده از فرآیند جوشکاری نفوذی و بهینه سازی پارامترهای آن با استفاده از روش تاگوچی^{۶۰} مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. جوشکاری نفوذی یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که به وسیله آن سطوح آماده شده در دمای بالا و تحت فشار اعمال شده به هم متصل می‌شوند [۲].



شکل ۱. الگوی فرآیند جوشکاری نفوذی و پارامترهای مؤثر بر جوش نفوذی: فشار، دمای و زمان جوش [۵].
شکل ۲. فیکسچر طراحی شده برای انجام روش جوش نفوذی.

به دلیل تفاوت در خواص فیزیکی مواد فلزی غیر هم‌جنس، در طی فرآیند جوش نفوذی، کنترل ذوب در دو طرف دو ماده با هم ضروری است [۲]. اوهاشی و هاشیموتو به این نتیجه رسیدند که مکانیسم غالب برای تشکیل جوش نفوذی، تغییر شکل خزشی ناشی از فشار، دما و زمان جوشکاری است [۲]. شکل ۱ نمای کلی از فرآیند جوشکاری نفوذی اساسی و سه پارامتر مؤثر در آن گزارش شده ارائه می‌دهد [۳]: نمونه‌ها در فشار کم ثابت می‌شوند و تا رسیدن به دمای جوش مورد نظر با نرخ حرارت معینی گرم می‌شوند. هنگامی که دمای جوش مورد نظر به دست می‌آید، فشار معمولاً تا فشار جوشکاری مورد نظر افزایش می‌یابد. هم دمای جوش و هم فشار در طول زمان جوش ثابت نگه داشته می‌شوند (گاهی اوقات به عنوان زمان نگهداری یا زمان خیساندن نیز گفته می‌شود). پس از زمان تعیین شده جوشکاری، فشار معمولاً کاهش می‌یابد (در شکل ۱ به دمای اولیه که برای تثبیت نمونه استفاده می‌شود کاهش می‌یابد) و دما به تدریج به دمای اتاق کاهش می‌یابد. قانون اول فیک طبق رابطه (۱) وابسته به ضریب نفوذ (D) و دما (T) است، رابطه (۱) معمولاً برای نشان دادن فرآیند جوش نفوذی استفاده می‌شود که D ضریب فرکانس، Q انرژی فعال‌سازی و R ثابت گازها است [۴].

این افزایش برای مقدار مشخصی بوده و به دلیل افزایش زمان نفوذ عناصر است؛

^{۵۶} Synchrotron
^{۵۷} Radio Frequency (RF)
^{۵۸} Cavity
^{۵۹} Ultra-High Vacuum (UHV)
^{۶۰} Diffusion Welding
^{۶۱} Taguchi Method



$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT} \quad (1)$$

بنابراین فاصله نفوذ در جایی افزایش می‌یابد که از رابطه (۲)،

$$X = \sqrt{Dt} \quad (2)$$



شکل ۴. نمونه AISI ۳۱۶L و نمونه مس خالص مائین‌کاری شده برای جوش نفوذی.

پیروی کند. در این رابطه: X فاصله، D ضریب نفوذ، t زمان نفوذ است [۵]. بنابراین محلول جامد جایگزینی انجام می‌شود و برای مدت طولانی‌تری تخلخل در سمت مس افزایش می‌یابد که این ناحیه را شکننده‌تر می‌کند و در نتیجه استحکام جوش کاهش می‌یابد.

۲- روش کار:

۲-۱- مواد اولیه

مس خالص (OFHC) ۹۹.۹۹٪ (Cu) با کد (C1۰۱۰۰) مطابق با (ASTM volume ۰۲,۰۱) و آلیاژ فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶L به شکل سیلندر (قطر: ۳۰ میلی‌متر و طول: ۵۰ میلی‌متر) جهت اتصال دهی و جوش استفاده شد (شکل ۴). پیچی از جنس فولاد گرم کار ۲۳۴۴ وارد میلگرد مسی شده و توسط مهره و با توجه به گشتاور پیچشی موردنظر، فشار موردنیاز ما را اعمال خواهد نمود. شکل ۲ تصویر شماتیک یک فیکسچر را برای روش جوش نفوذی را نشان می‌دهد. فیکسچر از فولاد (AMS ۶۳۵۶) تشکیل شده است، پس از قرار دادن سطوح اتصال فیکسچر ثابت خواهد شد. فشار محفظه جوش نفوذی برابر با 5×10^{-5} میلی بار بوده است. مجموعه مس/مس و مجموعه مس/فولاد زنگ نزن به صورت جداگانه به ترتیب تا (۷۰۰-۵۰۰) و (۹۵۰-۷۰۰) درجه سانتی‌گراد گرم می‌گردند. به ترتیب تا مدت (۳۰-۱۸۰) دقیقه و (۳۰-۹۰) دقیقه در دماهای مذکور نگه داشته می‌شوند. نمونه‌ها با سرعت ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای موردنظر برای جوش حرارت داده شده و سپس دمای کوره تا دمای محیط خنک می‌شود. مجموعه مس/مس و مجموعه مس/فولاد زنگ نزن به صورت جداگانه به ترتیب بار فشاری تک‌محوری (۸-۳۹) و (۱۵-۵۰) مگاپاسکال در امتداد جهت خطی و به‌طور مستقیم به قطعات کار اعمال شده تا آن‌ها را در طول فرآیند جوشکاری در تماس نگه دارد.

۲-۲- طراحی شرایط انجام مراحل آزمایش‌ها

در این پژوهش از نرم‌افزار Mini tab برای بهینه‌سازی تأثیر پارامترهای جوشکاری نفوذی بر پارامترهای اتصالات جوشکاری استفاده گردید. کیفیت جوش نمونه‌های جوش داده شده با استفاده از آزمون کشش و سختی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات ریزساختاری و آنالیزهای آن با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۶۳} (SEM) و طیف‌سنجی پراکنده انرژی^{۶۴} (EDS) انجام شد. با استفاده از روش تاگوچی شرایط بهینه برای پارامترهای جوش نفوذی بدست آمد. مقادیر جداول ۱ و ۲ شرایط بهینه پارامترهای دما، فشار، مدت زمان است که باید بر اساس (۰.۵-۰.۸) دمای ذوب انجام اعمال شوند [۶]. بار اعمالی بر اساس تنش تسلیم فلز در دماهای مختلف و محدوده زمانی (۳۰-۱۸۰) دقیقه است.

^{۶۲} Oxygen Free High Conductivity
^{۶۳} Scanning Electron Microscope (SEM)
^{۶۴} Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX or EDS)



بوده کاری پارامترهای انتخاب شده برای بیپنه سازی فرآیند جوش مس/مس. جدول ۲. محدوده کاری پارامترهای انتخاب شده برای بیپنه سازی فرآیند جوش مس/فولاد زنگ نزن.

شماره آزمایش	دما (°C)	زمان (min)	فشار اعمالی (MPa)
۱	۷۰۰	۳۰	۳
۲	۸۰۰	۳۰	۶
۳	۹۰۰	۳۰	۱۰
۴	۷۰۰	۴۵	۶
۵	۸۰۰	۴۵	۱۰
۶	۹۰۰	۴۵	۳
۷	۷۰۰	۶۰	۱۰
۸	۸۰۰	۶۰	۳
۹	۹۰۰	۶۰	۶

شماره آزمایش	دما (°C)	زمان (min)	فشار اعمالی (MPa)	الی
۱	۵۰۰	۳۰	۸	۲۱
۲	۷۰۰	۳۰	۸	۲۱
۳	۵۰۰	۱۲۰	۸	۲۱
۴	۷۰۰	۱۲۰	۸	۲۱
۵	۵۰۰	۱۸۰	۳۹	۱۰۵
۶	۷۰۰	۳۰	۳۹	۱۰۵
۷	۵۰۰	۱۲۰	۳۹	۱۰۵
۸	۷۰۰	۱۸۰	۳۹	۱۰۵
۹	۵۵۰	۷۵	۲۴	۶۳
۱۰	۶۰۰	۵۲.۵	۲۴	۶۳
۱۱	۶۰۰	۹۷.۵	۲۴	۶۳
۱۲	۶۰۰	۷۵	۱۶	۴۲
۱۳	۶۰۰	۷۵	۲۴	۶۳

جهت محاسبه گشتاور پیچشی از رابطه (۳) استفاده شده است.

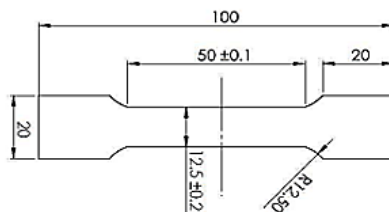
$$M_{kn} = \xi_1 F_w d / Z_1 \quad (3)$$

در رابطه (۳) M_{kn} گشتاور پیچشی، ξ_1 مقداری ثابت بوده که در حضور گریس ۰.۲۶ و در غیاب گریس ۰.۳۷ در نظر گرفته می‌شود. F_w نیروی مورد نظر، d قطر پیچ که برای پیچ ۸M۱ مقدار ۱۸ در نظر گرفته شده و نهایتاً Z_1 که تعداد مهره‌ها است.

۳- نتایج:

۳-۱- بررسی‌های متالوگرافی و ریزساختاری از نمونه‌های جوش نفوذی

نمونه‌های آزمون کشش براساس استاندارد (ASTM E۸-E۹) آماده شد (شکل ۳). سپس نمونه‌های ماشین‌کاری شده بر روی دستگاه آزمون مکانیکی با نرخ کرنش ثابت ۰.۵ میلی‌متر در دقیقه ارزیابی شدند. شکل ۵ و ۶ تصاویر میکروسکوپ ریزساختار ناحیه انتقال مشترک مسی در ناحیه متأثر از حرارت را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که ناحیه میانی نفوذ به آرامی بین هر دو ماده پایه رخ داده است [۶]. اتصالات سالم بوده و بدون تخلخل یا هیچ گونه عناصر اکسیدی و ناخالصی هستند. نمونه‌های مس/مس در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۸۰ دقیقه و تنش ۳۹ مگاپاسکال به عنوان شرایط بیپنه جوش شدند. نمونه‌های مس/فولاد زنگ نزن نیز در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه جوش شدند.



شکل ۳. نقشه شماتیک برای آزمایش کشش: ابعاد (mm) نمونه آزمایش کشش با ضخامت (۲ میلی‌متر) طبق ASTM E۸-E۹

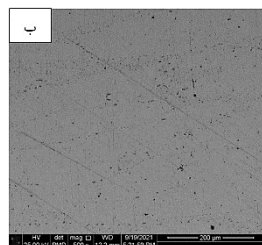
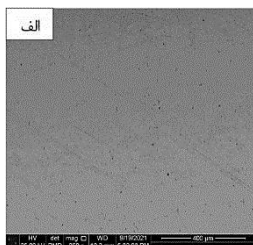
۲-۳- بررسی تصاویر SEM و آنالیز مقادیر نفوذ کرده در سطح اتصال

فرآیندهای نفوذ که به صورت حرارتی-مکانیکی فعال می‌شوند، به دلیل انتشار عناصر آلیاژی هر دو ماده، باعث تشکیل یک فاز میانی یا منطقه واکنش جدید می‌شوند (شکل ۷). بنابراین، تجزیه و تحلیل کیفی ناحیه نفوذ بر روی سطح مشترک بین مس و اتصال هم‌جنس مس انجام شد. در این اتصال‌ها، هیچ ترکیبی جدیدی مشاهده نشد که نشان می‌دهد ترکیبات بین فلزی تشکیل نشده‌اند.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ نوری از مشخصات ریزساختاری در محل اتصال و نفوذ در جوش مس به فولاد زنگ نزن.

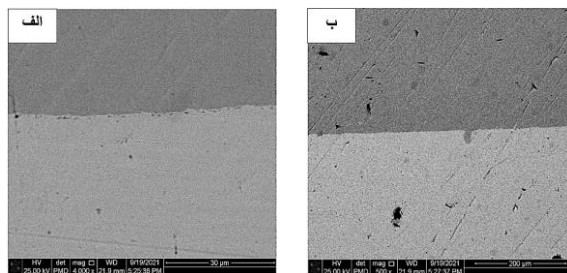
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از مشخصات ریزساختاری در سراسر اتصال و نفوذ در جوش نفوذی مس



به
مس.

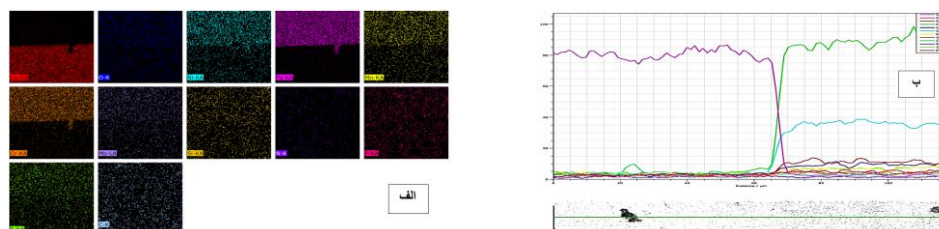
برای سطح مقطع‌های اتصال با شرایط جوش بهینه در بزرگنمایی ۱۲۰ SEM شکل ۷. نتایج میکروگراف‌های (ب) و نتایج اسکن خطی (ج). (الف)، X۲۵۰X۵۰۰ میکرومتر استفاده شد:

شکل ۸ مورفولوژی سطح شکست نمونه‌های تهیه شده با استفاده از جوش نفوذی Cu/۳۱۶L را نشان می‌دهد. فرآیندهای نفوذ که به صورت ترمو مکانیکی فعال می‌شوند، به دلیل نفوذ عناصر آلیاژی هر دو ماده، به‌ویژه عناصر نیکل



برای سطح مقطع‌های اتصال با شرایط جوش بهینه در طول ۱۲۰ میکرومتر SEM شکل ۸. نتایج میکروگراف‌های اعمال شد. ۵۰۰X (ب) در ۴۰۰X (الف): بزرگنمایی: الف)

و کروم، باعث تشکیل ناحیه واکنشی و نفوذی شدند؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل کیفی ناحیه نفوذی بر روی سطح مشترک بین مس و اتصال غیرهم‌جنس فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶L انجام شد. در این اتصال‌ها، هیچ نوع ترکیب جدیدی مشاهده نشد که نشان می‌دهد ترکیبات بین فلزی تشکیل نشده‌اند. شکل ۸ تصاویر SEM مقطعی معمولی و نتایج اسکن خط EDS اتصالات Cu/۳۱۶L را تحت حداکثر فشار در ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهد. شکل ۹ غلظت را با توجه به پروفایل‌های نفوذ آهن، مس و نیکل در سطح مشترک جوش را نشان می‌دهد. از آنجایی که فرآیند نفوذ با حمل و نقل جرم مرتبط است و از آنجایی که نیکل دارای ضریب نفوذ بالایی بر روی مس است، عنصر نیکل به شدت در مواد پایه مس نفوذ کرد [۶]. غلظت هر دو فلز با موقعیت متفاوت است. این نتایج نشان می‌دهد که اتم‌های نیکل به داخل مس مهاجرت کرده‌اند. یک رانش خالص اتم‌ها از مناطق با غلظت بالا (فولاد زنگ نزن) به مناطق کم غلظت (مس) وجود دارد. دلیل اصلی این جوش، نفوذ میان عناصر مس و نیکل، آهن و کروم است که می‌توان آن‌ها را با پروفایل غلظت آن‌ها در مناطق مشترک اتصالات نشان داد. همچنین، شکل ۹ نتایج تجزیه و تحلیل خط اسکن EDS نمونه‌های جوش داده شده را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.



و (ب) نتایج اسکن Cu/۳۱۶L عناصر آلیاژی هر دو جوش نفوذی فلزات EDS شکل ۹. الف) نتایج نقشه عنصری EDS خطی.

۳-۳- بررسی استحکام کششی و آنالیز نشتی اتصال جوش نفوذی مس به مس



نمونه‌های با ابعاد (۳۰mm×۵۰mm) از نمونه‌های جوش داده شده جهت آزمون کشش تهیه گردید (شکل ۱۰). ناحیه بین اتصال مشاهده شد و جوش فلزی بین دو ماده پایه پس از عملیات حرارتی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۸۰ دقیقه

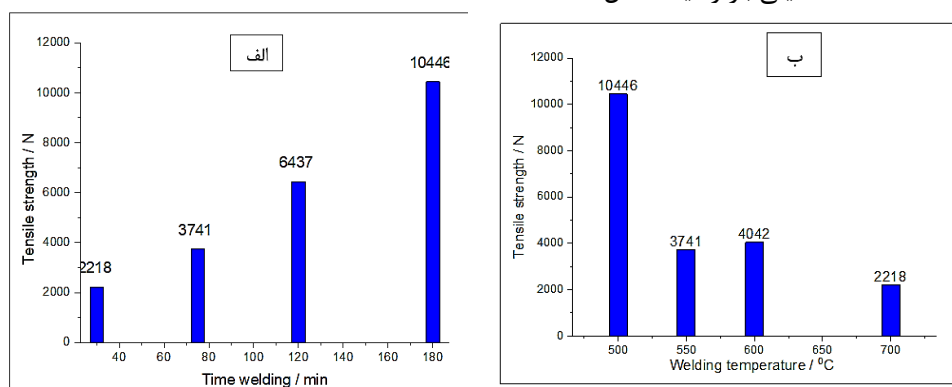


شکل ۱۰. نمونه آزمون کشش از اتصالات جوشکاری نفوذی در شرایط بهینه به دست آمده.

تشکیل شد. از شکل ۱۱ الف مشاهده می‌شود که افزایش زمان جوشکاری باعث افزایش استحکام اتصال می‌شود. شکل ۱۱ ب، اثر دمای جوش را بر استحکام کششی زمانی و البته با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، نشان می‌دهد. هنگامی که دمای جوش در محدوده ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است، با افزایش دما، تنش تسلیم کاهش، تغییر شکل پلاستیک فلزات جوش داده شده افزایش و نفوذ اتمی تسریع می‌گردد. سپس استحکام اتصال ضعیف خواهد شد. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، استحکام کششی جوش به حداکثر مقدار خود رسیده و با افزایش بیشتر دما تا ۷۰۰ درجه، استحکام جوش اندکی کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل رشد دانه و نرم شدن ریزساختار در دمای بالاتر است. نرخ نشی نمونه بهینه جوش نفوذی مس/مس در محدوده ۲.۲×10^{-9} میلی بار بر لیتر. ثانیه، بود که برای استفاده در محیط‌های UHV مناسب است [۷].

۳-۴- بررسی آنالیز نشی اتصال جوش نفوذی مس به فولاد زنگ نزن

نمونه‌های با ابعاد (۳۰mm×۵۰mm) از نمونه‌های جوش داده شده برش داده شد و مانند آزمون ریزساختار آماده شد (فقط از سنگ‌زنی و پرداخت استفاده شد)، سپس نمونه‌ها در نگه‌دارنده قرار گرفتند. اتصالات جوش نفوذی مس خالص با فولاد ضدزنگ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ناحیه میانی نفوذی مشاهده شد و پس از عملیات حرارتی پس از عملیات حرارتی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه، جوش فلزی بین دو ماده پایه تشکیل شد. آزمایش‌های نشی در چندین نقطه از ناحیه‌ی اتصال جوش انجام شد که استحکام عالی را برای کاربرد محیط‌های خلاء فوق‌العاده در تمام نمونه‌های تحلیل شده را نشان داد. برای نمونه بهینه جوش نفوذی مس/فولاد زنگ نزن، نرخ نشی در محدوده ۲.۵×10^{-9} میلی بار بر لیتر ثانیه بود. نمونه آزمون از اتصال ترکیبی مجموعه مس به مس و مجموعه مس به فولاد زنگ نزن نیز ساخته شد. فشار خلاء نمونه آزمون با موفقیت تا خلاء ۱.۸×10^{-9} میلی بار رسید (شکل ۱۳).



شکل ۱۱. تغییرات در استحکام کششی اتصالات جوش نفوذی به‌عنوان تابعی از زمان جوش (الف)، دمای جوش (ب).



شکل ۱۳. فلنج و نمونه جوش نفوذی هم‌جنس و غیر هم‌جنس.



شکل ۱۲. نمونه‌ای از جوش نفوذی مس به فولاد زنگ نزن در شرایط بهینه جوش نفوذی برای انجام آزمون نشتی.

۴- بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، اثرات پارامترهای جوش نفوذی فلزات هم‌جنس و غیر هم‌جنس بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات حاصل از جوش نفوذی تحت فشار مس به مس و مس به فولاد زنگ نزن، جهت استفاده در ساخت کاواک مسی رادیو فرکانسی شتاب‌دهنده ذرات، بررسی گردید. استحکام جوش با افزایش فشار جوش افزایش می‌یابد و بعد از انجام جوش به حداکثر مقدار خود رسیده و با گذشت زمان از محدوده بهینه شروع به کاهش می‌کند. حداکثر استحکام کششی جوش نفوذی (۱۰۴۴۶ نیوتن) در شرایط بهینه و قابل قبول برای اتصال دردمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۸۰ دقیقه به دست آمد. با توجه به نتایج آزمون کشش و آزمون سختی‌سنجی نمونه‌ها، با افزایش دما بیش از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر، تغییر شکل پلاستیک فلزات جوش داده شده افزایش یافته و نفوذ اتمی تسریع می‌شود و سپس استحکام اتصال ضعیف می‌گردد. برای نمونه بهینه جوش نفوذی مس به مس و مس به فولاد زنگ نزن نرخ نشتی در محدوده ۲.۵×10^{-9} میلی بار بر لیتر ثانیه می‌باشد که مناسب جهت ساخت کاواک مسی است. نمونه آزمون از اتصال ترکیبی مجموعه مس/مس با مجموعه مس/فولاد زنگ نزن با موفقیت تا فشار ۱.۸×10^{-9} میلی بار خلاء گردید.

۵- مراجع:

- [۱] J. B. Svensson, "Characterization of Higher Order Modes in the MAX IV Active ۱۰۰ MHz Cavities," *Department of Electrical and Information Technology, Faculty of Engineering, Lund University, MAX IV Laboratory*, pp. ۱-۷۴, ۲۰۱۵.
- [۲] O. Takashi Harumoto, "Copper-Base Diffusion Welding," *Material Technology*, vol. ۵۰, pp. ۲۰۳-۲۰۹, ۲۰۱۴.
- [۳] H. AlHaza, "Diffusion Bonding and Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Type ۳۰۴ and ۳۱۶ Austenitic Stainless Steel: A Review of Similar and Dissimilar Material Joints," *Metals*, vol. ۶۱۳, no. ۵, ۲۰۲۰.
- [۴] N. Kazakov, *Diffusion Welding of Material*, Oxford, UK: Elsevier, ۱۹۸۵.
- [۵] M. Cox, M. Kim and R. Carpenter, "Interface Nanochemistry Effects on Stainless Steel Diffusion Welding," *Metall. Mater. Trans.*, p. ۴۳۷-۴۴۲, ۲۰۰۲.
- [۶] H. Akbar, "Optimization of Diffusion Welding of Pure Copper (OFHC) with Stainless Steel ۳۰۴L," *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol. ۱۴, no. ۲, pp. ۳۰-۳۹, ۲۰۱۸.



[۷] Leybold, "How to achieve and maintain UHV and XHV levels"<https://www.leybold.com/en-in/knowledge/blog/how-to-achieve-and-maintain-uhv-and-xhv-levels>



تحلیل انتقال حرارت در فرآیند تولید رادیو ایزوتوپ ^{103}Pd با شتابدهنده پروتون به روش

شبیه‌سازی عددی (کد مقاله: ۱۵۴۵)

هاشمی، حسین^۱ - تاجیک، مجتبی^{۱*} - میرزایی، محمد^۲ - یوسف نیا، حسن^۳

۱. دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته ای

۲. سازمان انرژی اتمی، مرکز تحقیقات کشاورزی و سلامت البرز، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۳. سازمان انرژی اتمی تهران، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

مطالعه سیکلوترون در تولید رادیوایزوتوپ‌ها اغلب در اهداف جامد مورد علاقه است. برهم‌کنش رایج ^{103}Pd در $^{103}\text{Rh}(p, n)$ در یک سیکلوترون کوچک به دلیل قیمت بالای هدف ^{103}Rh در فرآیند تولید ^{103}Pd ، هنگام انتقال حرارت کم در سیستم تارگری تغییر شکل هدف و نتایج بازده پایین در تولید را موجب می‌شود. کار حاضر پاسخ‌های حرارتی در تولید رادیوایزوتوپ ^{103}Pd را با استفاده از (Cyclone- IBA) cyclotron مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج توزیع دما از هدف تحت بمباران پروتون انرژی بالا با استفاده از قابلیت‌های برنامه COMSOL، ابزار MultiPhysic و کد SRIM برای شبیه‌سازی هندسه و انتقال حرارت می‌تواند مدلی کاربردی در مطالعه سایر اهداف جامد توسط شتابدهنده برای تولید رادیوایزوتوپ‌ها با بازده بالا واقع شود. کلمات کلیدی: سیستم تارگری، رسانش گرمایی، رادیو ایزوتوپ ^{103}Pd ، کد SRIM و COMSOL.

Heat transfer analysis in the production process of ^{103}Pd radioisotope with proton accelerator using numerical simulation method

Hashemi, Hossein¹, Tajik, Mojtaba^{1*}, Mirzaei, Mohammad² Yousefnia, Hassan³

۱. Damghan University, Faculty of Physics and Engineering

۲. Nuclear Science and Technology Research Institute, Agricultural, health and Research Institute

۳. Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Research Institute

Abstract:

study of cyclotrons in the production of radioisotopes is often interest in solid targets. common ^{103}Pd in $^{103}\text{Rh}(p, n)$ interaction in a small cyclotron is due to the high cost of ^{103}Rh target in the ^{103}Pd production process, If heat transfer is low in the target system, it will cause deformation of the target and consequently low production yield. present work investigates the thermal responses in the production of the radioisotope ^{103}Pd using an cyclotron (Cyclone - IBA). Temperature distribution of the target under high-energy proton bombardment using COMSOL program capabilities and MultiPhysic tools and SRIM code to simulate geometry and heat transfer, It can be a useful model in studying other solid targets using accelerators to produce radioisotopes with high yield.

Key words: Targetry system, Thermal conductivity, ^{103}Pd radioisotope, SRIM Code, Comsol.



۱. مقدمه:

رادیویزوتوپ ^{103}Pd با نیمه عمر ۱۶.۹۹ روز و گسیلنده پرتوهای گاما ۲۱.۶ KeV یکی از رادیونوکلئیدهای بسیار مهم در درمان سرطان می‌باشد. رادیویزوتوپ‌های پزشکی هسته‌ای اغلب دارای نیمه‌عمر بسیار کوتاه هستند چرا که آنها باید پس از تولید در بازه‌ی زمانی کوتاه در طرح درمان استفاده گردد. استفاده از سیکلوترون در تولید این رادیویزوتوپ‌ها اغلب در اهداف جامد مورد علاقه است. فرآیند تولید ^{103}Pd در برهم‌کنش پروتون یا دوترون با هدف ^{103}Rh مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو فرایند اصلی با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها ^{103}Pd از $^{103}\text{Rh}(p, n)$ و ^{103}Pd از $^{103}\text{Rh}(d, \gamma n)$ معمولاً برای تولید ^{103}Pd در دسترس هستند. برهم‌کنش رایج ^{103}Pd از $^{103}\text{Rh}(p, n)$ در یک سیکلوترون کوچک با محدوده انرژی پروتون $E_p = 20\text{MeV}$ مناسب‌تر است. در حالی که برهم‌کنش ^{103}Pd از $^{103}\text{Rh}(d, \gamma n)$ سیکلوترون دوترون شامل هزینه‌های مالی، تعمیر و نگهداشت بیشتر نسبت به سیکلوترون پروتون می‌باشد. علاوه بر این، عملکرد اهداف با ضخامت نازک در برهم‌کنش پروتون با هدف ^{103}Rh نسبت به دوترون مقرون به صرفه است. اگرچه سطح انرژی و جریان و در فرآیند تولید ^{103}Pd از $^{103}\text{Rh}(d, \gamma n)$ نسبتاً بالاتر گزارش می‌شود اما سطح تولید رادیویزوتوپ‌های مزاحم دیگر در طی مراحل جداسازی و خالص‌سازی ^{103}Pd مستلزم هزینه و زمان بیشتری خواهد بود [۱، ۲].

به دلیل قیمت بالای هدف ^{103}Rh در فرآیند تولید ^{103}Pd ، انتقال حرارت کم در سیستم تارگری موجب تغییر شکل هدف و در نتیجه بازده پایین در تولید این رادیونوکلئید می‌شود لذا طراحی خنک‌کننده برای اهداف تولید می‌تواند بسیار مهم باشد تا ضمن انتقال حرارت حین برهم‌کنش از ذوب شدن یا آسیب دیدن هدف اصلی ^{103}Rh در هنگام بمباران پروتونی جلوگیری به عمل آورد. تحقیقات مربوط به خواص حرارتی سیکلوترون مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. پس بنابراین مطالعه دقیق در پاسخ‌های حرارتی فرآیند ^{103}Pd از $^{103}\text{Rh}(p, n)$ توسط یک سیکلوترون با انرژی متوسط ضروری است.

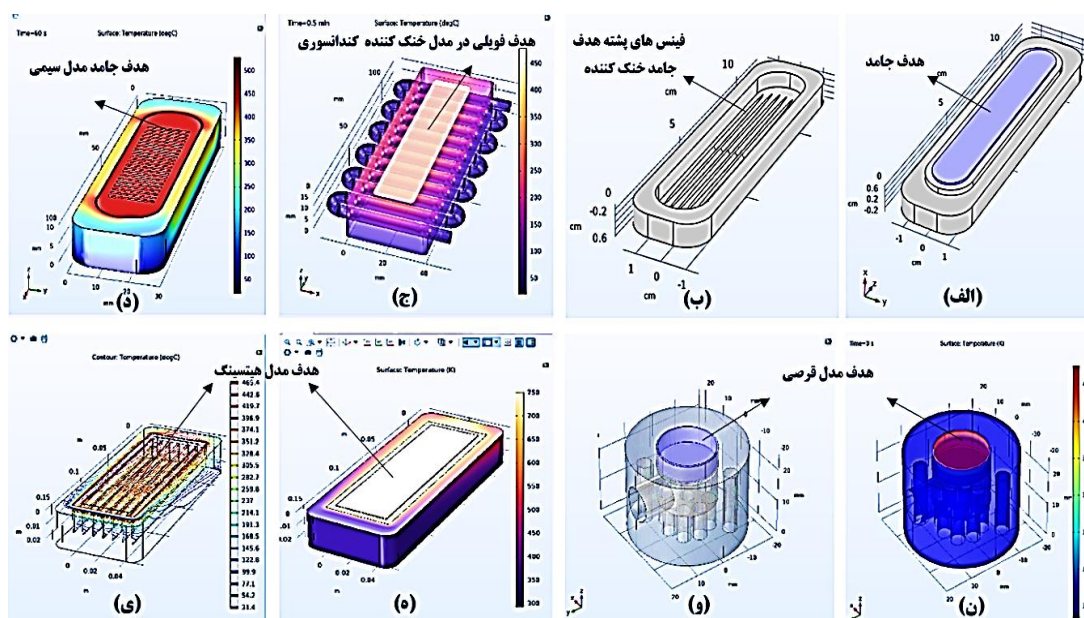
کار حاضر پاسخ‌های حرارتی در تولید رادیویزوتوپ ^{103}Pd را با استفاده از (Cyclone- ۳۰ IBA) ۳۰ MeV cyclotron مورد بررسی قرار می‌دهد. توزیع دما از هدف تحت بمباران پروتون پرنرژی با استفاده از قابلیت‌های بالای نرم‌افزارکد COMSOL و تنظیمات MultiPhysic و کد SRIM به منظور شبیه‌سازی هندسه و انتقال حرارت عناصر به صورت عددی محاسبه می‌شود. مطالعه پارامترهای جریان پرتو یونی، انتقال حرارت و ابعاد هدف ^{103}Rh و نگهدارنده هدف مورد بحث قرار گرفته است.

۲. روش کار:

سیکلوترون (Cyclone- ۳۰ IBA) ۳۰ MeV cyclotron کاربردی در تولید رادیویزوتوپ‌هایی مانند ^{111}In ، ^{67}Ga ، ^{64}Cu ، ^{123}I ، ^{11}C ، ^{15}N ، ^{18}O ، ^{18}F با اهداف جامد به کار می‌رود، جریان پرتو این شتاب‌دهنده دارای شدت اسمی در حدود μA ۳۵۰ برای پروتون‌ها در محدوده انرژی ۱۵ تا ۳۰ Me قرار دارد. روش‌های مختلف برای طراحی هدف در تولید رادیونوکلئیدهای مختلف وجود دارد. پیکربندی اهداف جامد برای تولید ^{103}Pd در سیستم Cyclone- ۳۰ IBA به صورت پشته‌مسی شامل یک جداره با باله‌ها به عنوان کانال آب خنک‌کننده، یک مقطع پله‌ای به عرض ۲cm، طول ۱۰cm و ارتفاع ۲mm در بخش مرکزی قرار دارد. ماده هدف ^{103}Rh روی پشته‌مسی قرار داده می‌شود. کانال‌ها با زاویه 30° با سطح مقطع مثلث به عمق ۳ میلی‌متر در پشته‌مسی طراحی شده و از طریق باله‌ها آب با دمای 20°C با فشار بالاتر از ۱۵ اتمسفر و سرعت بالا حدود ۱۹ لیتر بر دقیقه به عنوان خنک‌کننده هدف پشته‌مس عبور می‌کند (شکل (۱) الف و ب). همین‌طور مدل‌های دیگر از طراحی



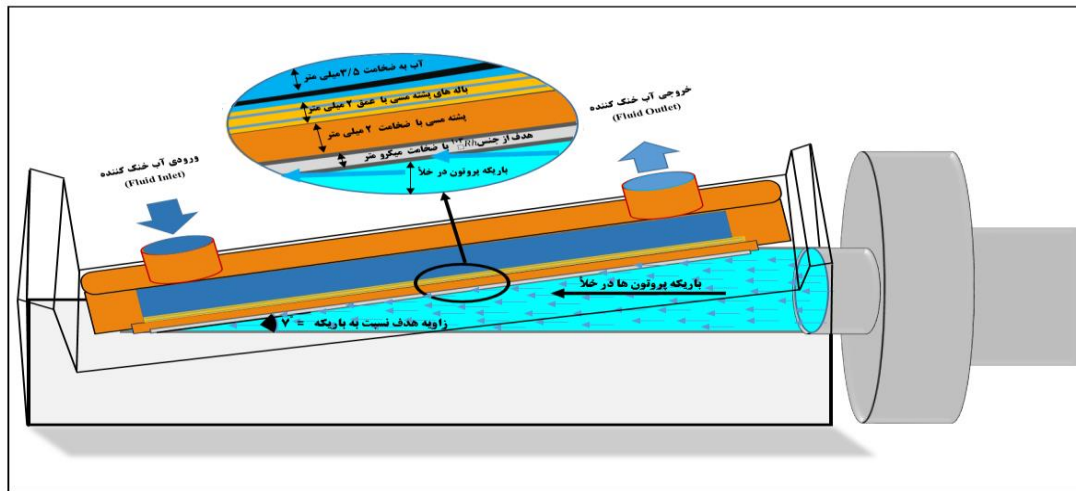
هدف و سیستم خنک‌کننده را در (شکل ۱) ج-ی) مشاهده می‌کنید. کار حاضر به منظور ارزیابی انتقال حرارت برای دو روش کاربردی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.



شکل ۱ (الف, ب) پشته‌مسی و هدف جامد، (ج) مدل کندانسوری و هدف جامد به روش تکنیک فویل‌های انباشته، (د) نمایی از مدل هدف با مقطع سیم، (ن, و) هدف مدل قرص برای اهداف پودر و مایع، (ه, ی) نمایی از مدل هیتسینک.

۳.۲. روش هدف جامد

برای طراحی سیستم‌های تارگری جامد، ماده هدف در طی فرآیند الکترولیز شیمیایی بر روی پشته مسی در حدود ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر آباری می‌شود که ضخامت هدف به ازای انرژی شتابدهنده و جریان آن می‌تواند توسط آزمایشگر تعیین شود. ضخامت مورد نظر، زاویه باریکه پروتون‌ها نسبت به سطح هدف (۷ تا ۱۰°) و انرژی انتخابی با استفاده از توابع برانگیختگی، سطح مقطع واکنش و جریان باریکه پروتون‌ها با بهره‌گیری از کدهای SRIM و Talys تعیین می‌گردد [۴-۵]. با استفاده از کد SRIM انرژی MeV ۲۰، جریان $20\ \mu A$ و زاویه هدف نسبت به باریکه پروتون 7° در نظر گرفته شد. مجموعه سیستم تارگری هدف جامد را در شکل ۲ مشاهده می‌کنید.



شکل (۲) مجموعه سیستم‌تارگری برای هدف جامد

۲.۲. روش فویل‌های انباشته

در این مدل فویل‌ها انباشته، فویل ^{102}Rh هدف با ضخامت $78\mu\text{m}$ بین دوفویل آلومینیوم که ورقه‌بالایی با ضخامت $250\mu\text{m}$ در مقابل هدف به عنوان کاهنده انرژی باریکه فرودی پروتون بهینه می‌شود. ورقه Al با ضخامت 3mm زیر هدف به عنوان جداکننده هدف از پشته‌مسی فشرده می‌شود که لایه‌زیرین با دو مزیت: اول برای حذف مرحله الکترولیزشیمیایی در مقایسه با روش هدف جامد و دوم به دلیل جلوگیری از ایجاد آلودگی ایزوتوپی پس از پایان بمباران الکترونی (عدم ترکیب ^{102}Pd و ایزوتوپ‌های مس در نتیجه پیچیده شدن فرآیند جداسازی) طراحی می‌شود. مجموعه هدف فویل‌های انباشته مشابه به شکل (۲) بر روی پشته‌مسی برای خنک‌سازی قرار می‌گیرد تا هدف در پرتو خارجی سیکلوترون 30 MeV با پروتون‌ها بمباران شود. محدوده انرژی بهینه برای تولید ($5\text{ MeV} \rightarrow 20$)، زاویه γ° و ضخامت توسط رابطه $L_{\text{Target Thickness}} = \text{Range} \times \sin(\alpha)$ با تعیین بردیون‌ها در هدف توسط کد SRIM محاسبه می‌گردد.

۲.۲. محاسبات دما و انتقال حرارت

مطالعه توزیع دما در اهداف جامد طی فرآیند تولید ^{102}Pd به دلیل هزینه بسیار بالای ^{102}Rh در انجام و امکان بروز خطا در تکرار آزمایش تجربی، برنامه جامع COMSOL می‌تواند تحلیل اندازه‌گیری دما در هدف جامد هنگام پرتو دهی پروتون را به خوبی برآورد نماید. در این محاسبات براساس جفت نمودن روش المان محدود عناصر برنامه COMSOL به بررسی شار گرمای سطح در دومدل نیمه نامحدود هدف جامد و هدف پشته‌های فویلی بدون تغییر فاز مورد بررسی قرار گرفت. شار گرمایی یکنواخت در قسمت پشته‌مسی ثابت فرض شد. ضریب انتقال حرارت h در هدف ^{102}Rh مقدار $10^6 \times 1/36 \text{ W/m}^2\text{C}$ با استفاده از روابط (۱) و (۲) بدست آمد. نرخ گرمایش سطحی ایجاد شده طی برخورد پروتون با هدف و مقطع $10\text{cm} \times 2\text{cm}$ با قدرت 4000W در 60 ثانیه اول بمباران پروتونی توسط رابطه (۳) مقدار عددی $2 \times 10^6 \text{ J/m}^2\text{s}$ حاصل گردید.

$$h = \frac{k}{d} Nu \quad (1)$$

$$Nu = 0.27 Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2)$$

که h ضریب انتقال حرارت ($\frac{W}{m^2.C}$)، k هدایت حرارتی سیال خنک کننده ($\frac{W}{m.K}$)، d قطر کانال هیدرولیک با مقطع مثلث پشته مسی (m)، Nu عدد ناسلت (بدون بعد)، Re عدد رینولد ($\frac{\rho dv}{\mu}$)، Pr عدد پرانتل ($\frac{c \mu}{K}$)، ρ چگالی سیال آب ($\frac{Kg}{m^3}$)، v



سرعت جریان سیال آب (m/s)، C گرمای ویژه ($\frac{J}{kg \cdot C}$)، μ ویسکوزیته دینامیکی در دمای سیال و μ_w ویسکوزیته دینامیکی در دمای دیواره کانال خنک کننده ارزیابی می‌شوند [۶]. پارامترهای انتقال حرارت برای محاسبه‌ها در جدول ۱ ذکر شده است.

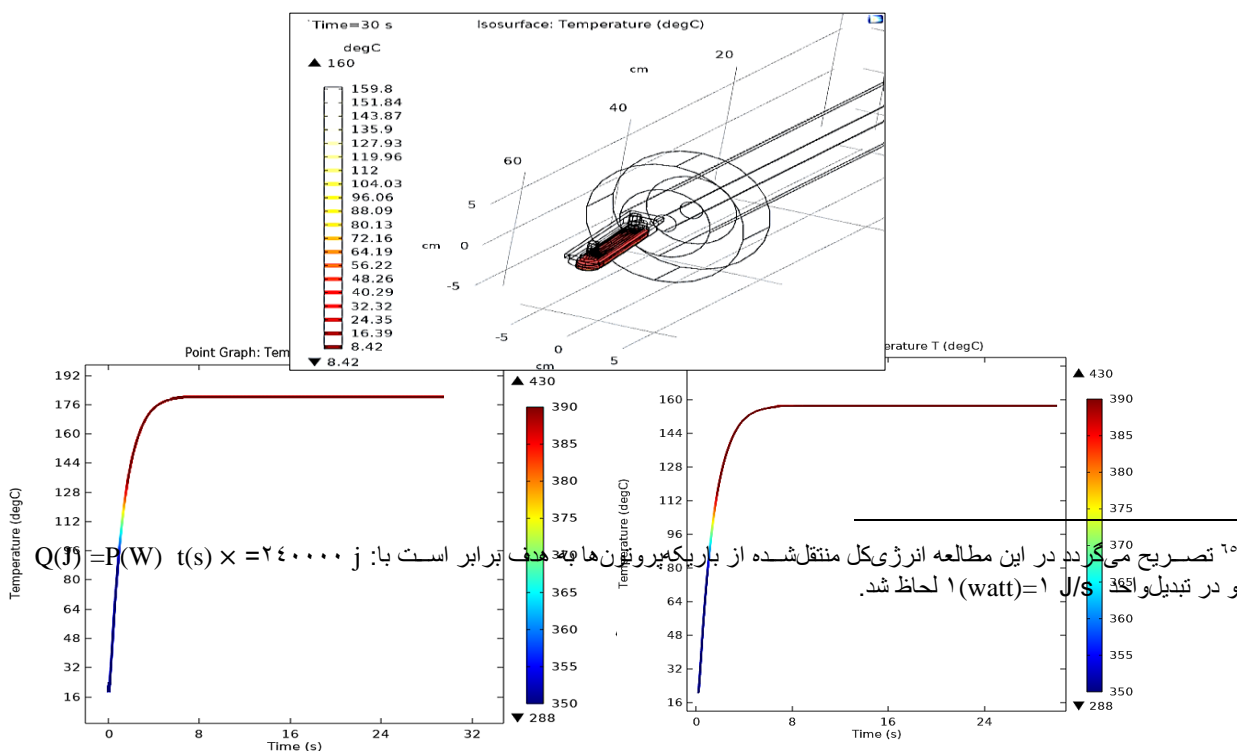
$$Q'' \left(\frac{J}{m^2 \cdot s} \right) = \frac{P \text{ (Watt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} \quad (3) \quad \text{نرخ گرمایش سطحی (Q'')} \text{ برابر است با:}$$

جدول ۱: پارامترهای حرارتی برای محاسبه‌ها

ردیف	ماده	گرمای ویژه (J/Kg.C°)	رسانندگی گرم (W/m.K°)	گرمای نهان ذوب (J/kg)	چگالی (kg/m³)	ضخامت
۱	مس	۰/۳۸۵	۴۰۱	۲۰۵	۸۹۴۰	۴mm
۲	رودیوم	۰/۲۴	۱۵۰	۱۶۷	۱۲۴۰۰	۷۸ μm
۳	آلومنیوم	۰/۸۹۷	۲۷۳	۳۹۸	۱۰۰۷۰	۲۵۰ μm و ۳mm
۴	آب	۴/۱۸	۰/۶	-	۱۰۰۰	mm

۳. نتایج:

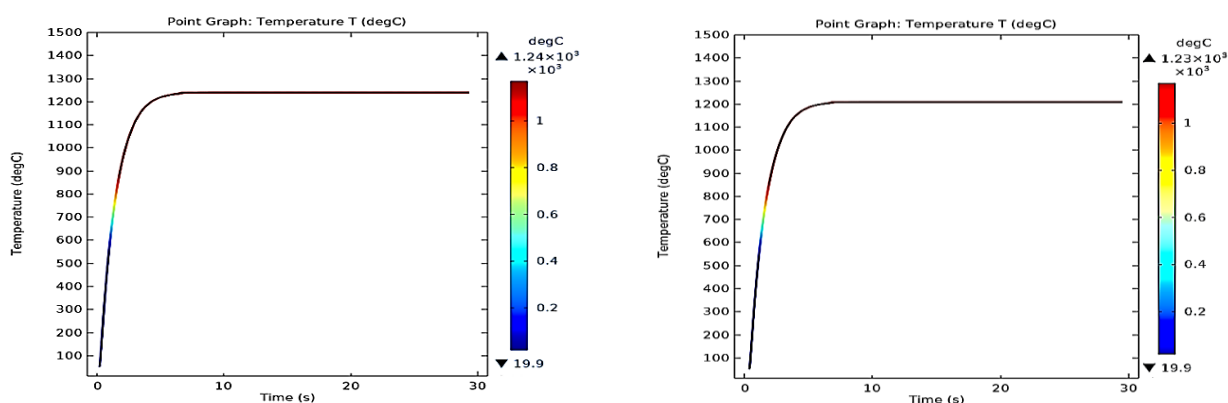
به ازای برهم‌کنش $^{103}\text{Rh}(p, n) \rightarrow ^{103}\text{Pd}$ در شتابدهنده (Cyclone- IBA)، بازده تولید ^{103}Pd تقریباً $10 \text{ Mbq}/\mu\text{m.Ah}$ است که حدود ۵۰٪ از مقدار نظری $22 \text{ Mbq}/\mu\text{m.Ah}$ را می‌تواند در پایان بمباران (EOB) نتیجه دهد [۷، ۸]. در تعریف جریان $20 \mu\text{A}$ و انرژی پروتون 20 MeV ، ممکن است مقادیر قابل توجه ^{103}Rh به دلیل گرمای انباشته در هدف دچار آسیب و یا تغییر شکل شود. مدل‌های هدف جامد و فویل‌های انباشته برای ارزیابی توزیع دما از هدف با تعیین شرایط مرزی بین خنک‌کننده و هدف تعریف شد. در بین ^{103}Rh با ضخامت $78 \mu\text{m}$ و پشته‌مسی در طول بمباران پروتونی ضمن تعریف خلا گپ‌هوا تعریف نشد. شکل ۳ حداکثر دمای موجود در سطح اهداف تابعی از زمان بمباران پروتون ^{103}Rh با رسانندگی 150 W/m.K° را نشان می‌دهد. در طی ۶ الی ۸ ثانیه اول دمای سطح بسیار سریع افزایش می‌یابد. بیشینه دما ۳۰ ثانیه اولیه برای دو مدل هدف جامد و هدف پشته‌های فویلی با حضور سیال خنک‌کننده آب با دمای اولیه 20°C بترتیب به حداکثر دما 158°C و 179°C می‌رسد. این دماها در هر دو مدل پایین‌تر از نقطه ذوب ^{103}Rh (1964°C)، مس (1085°C) و کمتر از نقطه ذوب آلومنیوم (661°C) در مدل فویل‌های انباشته است. افزایش دما در مدل فویل‌های انباشته نسبت به مدل جامد به علت وجود لایه آلومنیوم با ضخامت 3 mm رسانندگی گرمایی پایینی نسبت به مس بین هدف و پشته‌مس تفاوت دمایی در حدود 31°C را ایجاد می‌کند.





شکل ۳ (بالا) تصویر سیستم تارگتری (سمت راست) حداکثر دما در سطح هدف جامد و (سمت چپ) بیشینه دمای هدف پشته‌های فویلی در حضور خنک‌کننده

با فرض سناریوی بدترین حالت یعنی اگر سیستم خنک‌کننده از مدار خارج شود، نتایج حداکثر توزیع دما روی سطح اهداف بدون خنک‌کننده برای دومدل هدف جامد و پشته‌های فویلی به ترتیب 1203°C و 1236°C را در شکل ۴ نشان می‌دهد. این دماها پایین‌تر از نقطه ذوب ${}^{103}\text{Rh}$ (1964°C) است، اما در مدل فویل انباشته طی ۳۰ ثانیه اول در دمای بیشتر از نقطه ذوب آلومنیوم (661°C) می‌تواند با ذوب و خالی شدن لایه‌های آلومنیوم سطوح زیر و روی هدف ${}^{103}\text{Rh}$ ، مجموعه تارگتری را برای بمباران پروتونی غیرقابل بهره‌برداری نماید.



شکل ۴ (سمت راست) حداکثر دما در سطح هدف جامد، (سمت چپ) همان در پشته‌های فویلی بدون خنک‌کننده

۴. بحث و نتیجه گیری:

در کار حاضر پاسخ‌حرارتی در طی فرآیند تولید ${}^{103}\text{Pd}$ توسط دو روش حالت جامد و فویل‌های انباشته و تابش پروتون‌ها به اهداف جامد ${}^{103}\text{Rh}$ توسط برنامه جامع COMSOL مورد بررسی قرار گرفت. جریان پرتو مناسب بمباران پروتون $200\ \mu\text{A}$ و انرژی $20\ \text{MeV}$ برای اهداف کنونی تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد دمای هدف به رسانندگی گرمایی و طراحی هندسی هدف بستگی دارد. بازده تولید با توجه به زمان، انرژی و جریان پرتو به عملکرد و طراحی صحیح سیستم خنک‌کننده نیز وابسته است. در یک پرتودهی با سیکلوترون جریان بالا برای جلوگیری از شوک حرارتی و یا آسیب هدف ${}^{103}\text{Rh}$ سرویس دوره‌ای سیستم پمپ‌های سیال خنک‌کننده بسیار حیاتی است چرا که کوچکترین ایراد در سیستم خنک‌کننده، فرآیند تولید رادیوایزوتوپ را به علت بالا رفتن دمای هدف مختل می‌نماید. علاوه بر جریان پرتو یونی برخی از عوامل حرارتی نسبی مانند انرژی پروتون‌ها، برنامه زمان‌بندی تابش، سرعت جریان سیال در طراحی خنک‌کننده همچنان شایسته مطالعات بیشتر به منظور ارتقاء میزان بازده در تولید ${}^{103}\text{Pd}$ هستند.

۵. مراجع:

- [۱] S.Sudar, F.Cserpak, S.M. Qaim "Measurements and nuclear model calculations on proton induced reactions on ${}^{103}\text{Rh}$ up to $40\ \text{MeV}$: evaluation of the excitation function of the ${}^{103}\text{Rh}(p,n){}^{103}\text{Pd}$ reaction relevant to the production of the therapeutic radionuclide ${}^{103}\text{Pd}$ " Applied Radiation and Isotopes, (۲۰۰۲).



- [۲] J.Y.Kim, J.H.Ki et al "production of ^{103}Pd radioisotope by using Cyclotron" Transaction of the Korean Nuclear Society Spring Meeting May ۱۰-۱۱, (۲۰۰۷)
- [۳] I. Silverman, E. Lavie, A. Arenshtam, D. Kijel "Study on production of ^{103}Pd and characterisation of possible contaminants in the proton irradiation of ^{103}Rh up to ^{28}Me " Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B ۲۶۱ ۷۴۷-۷۵۰ (۲۰۰۷)
- [۴] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler and J. P. Biersack, "SRIM— The Stopping and Range of Ions in Matter," Nuclear Instruments and Methods in Physics (۲۰۱۳)
- [۵] A. Koning, S. Hilaire " Nuclear reaction calculations with the TALYS code" XII International Symposium on Nuclei in the Cosmos ۵-۱۰ Cairns , (۲۰۱۲).
- [۶] Holman, J.P., "Heat Transfer Book", p.۱۰۵-۲۰۶, McGraw-Hill. (۱۹۷۶)
- [۷] Mateusz Sitarz, "Radionuclide Yield Calculator (version ۲,۰) MANUAL"(۲۰۱۸).
- [۸] H. Hashemi, M. Tajik, M. Mirzaei, H. Yousefnia., "Investigation of the physical parameters of the production of ^{103}Pd radioisotope by MonteCarlo method", International Conference on Nuclear Science and Technology, ۶-۸ May, isfahan-Iran (۲۰۲۴)



یکی از ما شوید!
انجمن هسته ای ایران

انجمن برتر کشور در سال ۱۴۰۲

 NSI.IR  INFO@NSI.IR

سی و یکمین
کنفرانس
هسته‌های
ایران



۲۳-۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۴ | مشهد

I N C 3 1 . N S I . I R



سازمان انرژی اتمی ایران



انجمن هسته‌ای ایران