

## تمرکز پرتو الکترونی در میدان مغناطیسی یک منبع تبخیر پرتو الکترونی خمیده

مصطفی سلحشور، علی اصغر زواریان و فاطمه حافظی

گروه پژوهشی فناوری خلأ، سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران

پست الکترونیکی: salahshoor@jds Sharif.ac.ir

### چکیده

در این مقاله، ابتدا لایه نشانی در خلأ با استفاده از منبع تبخیر پرتو الکترونی بررسی و نقش میدان مغناطیسی در عملکرد آن تبیین شده است. پس از آن، توزیع میدان مغناطیسی ناشی از پیکربندی اجزای مغناطیسی یک نمونه منبع تبخیر تجاری با تفنگ پرتو الکترونی با چرخش ۲۷۰ درجه (ساخت سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف)، به وسیله نرم‌افزار المان محدود ANSYS شبیه سازی شده است. صحت نتایج شبیه سازی از طریق مقایسه با نتیجه اندازه گیری میدان مغناطیسی توسط کاوشگر اثر هال ارزیابی گردید. علاوه بر این، با استفاده از قابلیت نرم افزار برای ردیابی پرتو، قدرت عدسی مغناطیسی این سامانه برای تمرکز پرتو الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. مکان پیش بینی شده برای پرتو در محل هدف، تطابق بسیار خوبی با مشاهدات تجربی دارد.

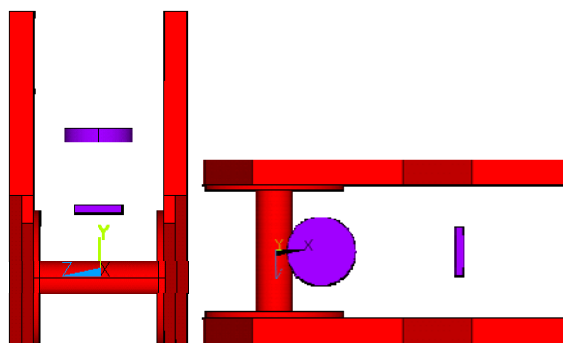
واژه‌های کلیدی: پرتو الکترون، عدسی مغناطیسی، تبخیر در خلأ

### ۱. مقدمه

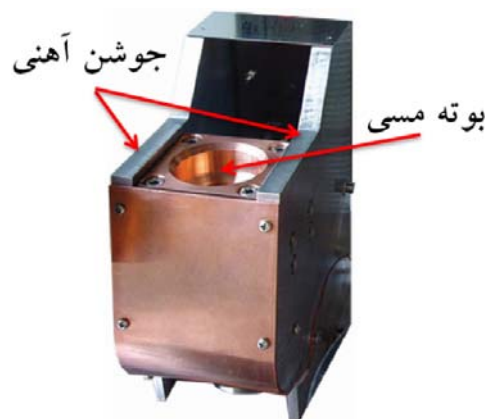
گرمایشی شامل تبخیر مقاومتی، پرتوهای الکترون پرنرژی (و کم انرژی) و گرمایش القایی است. تبخیر مقاومتی برای دماهای کمتر از ۲۵۰۰ درجه و پرتوهای الکترون برای دماهای بزرگ تر از ۲۵۰۰ درجه نیز استفاده می شود. پرتوهای الکترون پرنرژی متمرکز برای تبخیر مواد دیر گداز مانند اکثر سرامیک‌ها، شیشه‌ها، کربن و فلزات دیرگداز استفاده می شود [۳].

در گرمایش پرتو الکترونی معمولاً از یک رشته برای تولید الکترون (به روش گسیل گرمایونی)، از الکترودهای ولتاژ بالا (۱۰ تا ۲۰ کیلوولت) برای شتابدهی الکترون ها و تولید پرتو و از میدان های الکتریکی و مغناطیسی برای متمرکز کردن و هدایت پرتو الکترونی به سمت ماده تبخیرشونده استفاده می شود. توان عملیاتی تفنگ های پرتو الکترون برای تبخیر در

لایه نشانی بخار فیزیکی، یکی از کاربردهای مهم مرتبط با فناوری خلأ بالا است و در بخش عمده‌ای از فعالیت‌های پژوهشی در زمینه فناوری لایه‌های نازک و ساختارهای نانو مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۲]. تبخیر در خلأ یکی از روش‌های اصلی لایه نشانی بخار فیزیکی است که در آن اتم‌ها و مولکول‌ها از یک منبع تبخیر حرارتی، بدون برخورد با گاز زمینه، به محل زیرلایه می‌رسند. تبخیر در خلأ معمولاً در فشار کمتر از ۴ میلی‌تور انجام می‌گیرد. برای حذف آلودگی‌ها و تولید فیلم‌های با خلوص بالاتر، از خلأ بالاتر استفاده می‌شود. برای تبخیر در خلأ، ضروری است سطح ماده تا دمایی گرم شود که یک فشار بخار قابل توجه به دست آید. فنون رایج برای تبخیر



شکل ۲. اجزای اصلی منبع تبخیر الکترونی در دو نمای مختلف.



شکل ۱. منبع تبخیر الکترونی محصول جهاد دانشگاهی صنعتی شریف.

شتاب دهنده (که در پتانسیل زمین قرار دارد) تشکیل شده است. پرتو الکترونی تولید شده توسط این تفنگ دارای یک توزیع فضایی به گستردگی ابعاد رشته است. پرتو خارج شده از تفنگ از طریق یک عدسی مغناطیسی منحرف شده و پس از چرخش  $270^\circ$  درجه‌ای به محل بوته اصابت می‌کند. عدسی مغناطیسی شامل یک آهنربای الکتریکی بوده که در میان دو جوشن آهنی قرار گرفته است. مدار مغناطیسی منبع به گونه‌ای است که جوشن‌ها دو قطب مغناطیسی را تشکیل داده و یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در فضای میان آنها ایجاد می‌گردد. عدسی مغناطیسی، علاوه بر هدایت پرتو، نقش متمرکز کردن (کاهش توزیع فضایی) آن را نیز بر عهده دارد.

### ۳. شبیه‌سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار المان محدود ANSYS برای شبیه‌سازی منبع تبخیر الکترونی استفاده شده است. قابلیت نرم‌افزار برای شبیه‌سازی میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از منابع مختلف الکتریکی و مغناطیسی در مراجع [۴، ۵، ۶] تشریح شده است. در شکل ۲، پیکربندی اجزای مغناطیسی منبع تبخیر الکترونی به همراه طرح واره یک تفنگ فرضی (برای تعیین مکان پرتاب اولیه الکترون‌ها) و طرح واره یک هدف (برای تعیین محل اصابت پرتو) نشان داده شده است. محورهای مختصات نیز در این شکل مشخص است.

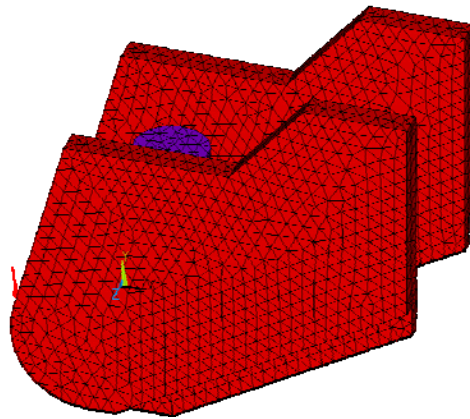
خلأ، معمولاً  $3$  تا  $20$  کیلووات است. در اکثر طراحی‌ها، پرتو الکترون توسط میدان مغناطیسی تا زوایای بزرگ‌تر از  $180^\circ$  درجه منحرف شده تا از لایه نشانی ماده تبخیر شده بر روی رشته مولد الکترون و عایق‌های الکتریکی آن جلوگیری گردد. پرتو به سمت ماده‌ای متمرکز می‌شود که درون یک بوته مسی خنک شونده با آب قرار دارد. می‌توان با به کارگیری چند بوته و با حرکت آنها و یا با حرکت پرتو، مواد مختلف را، فقط با یک تفنگ، تبخیر نموده و فیلم‌های چندلایه‌ای تولید کرد [۳].

در این مقاله، با توجه به نقش کلیدی میدان مغناطیسی در هدایت و تمرکز پرتو الکترونی، حرکت پرتو در منبع تبخیر الکترونی شبیه‌سازی می‌گردد. از اینرو، ابتدا منبع تبخیر الکترونی ساخته شده توسط جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف معرفی شده و پس از آن مدل و نتایج شبیه‌سازی تشریح گردیده است. سپس خروجی شبیه‌سازی با مشاهدات تجربی مقایسه گردیده است. در پایان در مورد نتایج به دست آمده بحث و نتیجه‌گیری شده است.

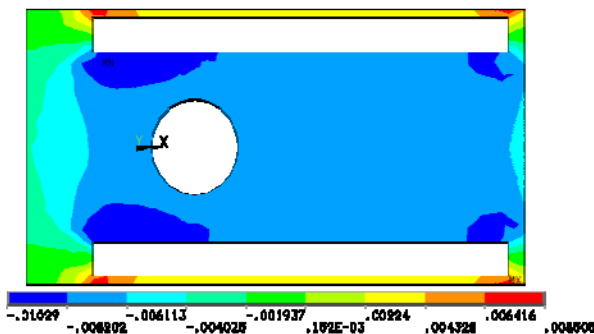
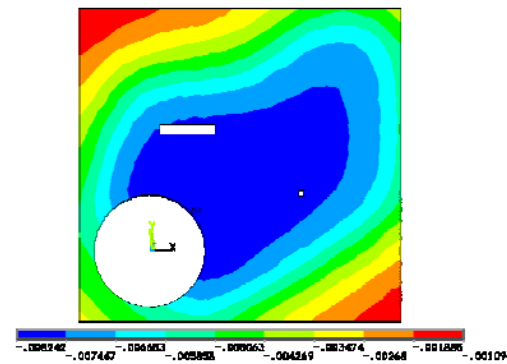
### ۲. منبع تبخیر الکترونی

اجزای مختلف منبع تبخیر الکترونی ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

تفنگ الکترونی منبع از یک رشته تنگستن، الکترودهای جریان و ولتاژ بالا ( $6$  کیلوولت منفی)، پایه شناور و الکترودها



شکل ۳. مدل المان محدود منبع تبخیر الکترونی.

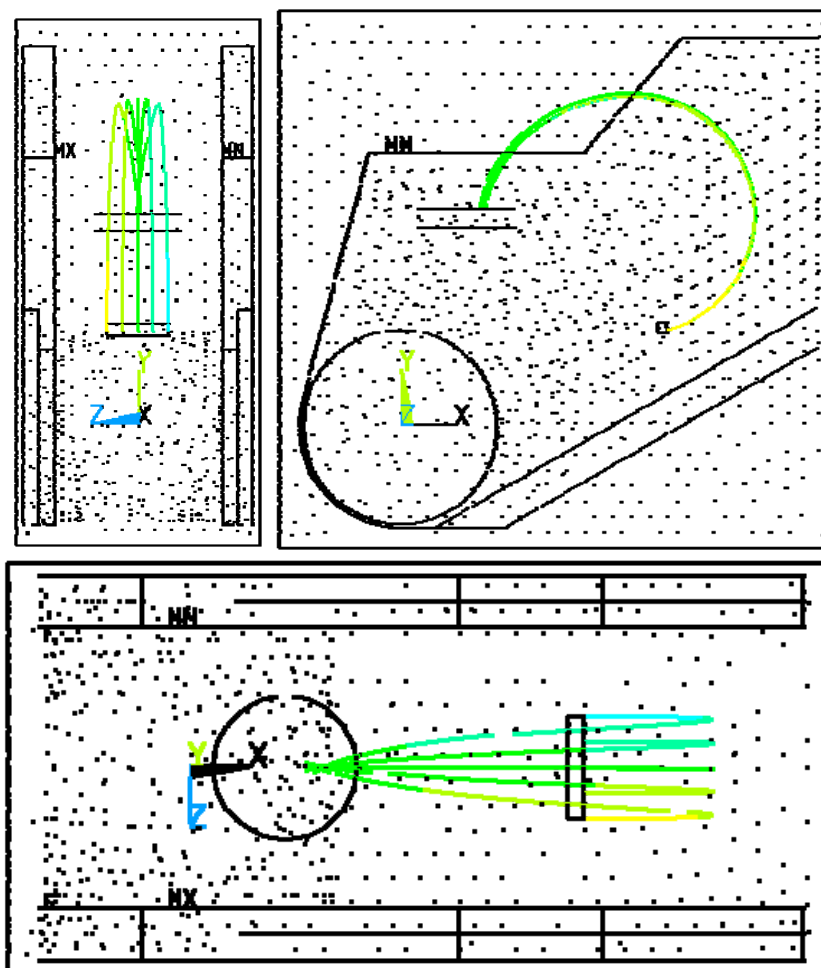
شکل ۵. توزیع میدان مغناطیسی (Bz) در اطراف آهنربای الکتریکی و در حضور جوشن‌ها در صفحه  $Y=63\text{mm}$ .شکل ۴. توزیع میدان مغناطیسی در اطراف آهنربای الکتریکی و در حضور جوشن‌ها در صفحه  $X-Y$ .

حقیقی، کمیت CUR است. این کمیت معرف حاصل ضرب تعداد دورهای آهنربای الکتریکی در جریان عبوری از سیم آن است. مقدار کمیت CUR برابر با ۴۵۰ دور-آمپر در نظر گرفته شده است. خاصیت مغناطیسی جوشن‌های آهنی با نفوذپذیری مغناطیسی ثابت فرضی ۱۰۰۰ مشخص شده است.

در شکل‌های ۴ و ۵، نمایش‌های کانتوری مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی ( $B_z$  بر حسب تسلا) در اطراف آهنربای الکتریکی و در حضور جوشن‌ها، به ترتیب در صفحه‌های  $X-Y$  و  $Y=63\text{mm}$  نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها نشان دهنده توزیع غیریکنواخت میدان مغناطیسی در فضای بین جوشن‌ها است. در شکل ۴ که نشان دهنده توزیع میدان در صفحه تقارن منبع تبخیر الکترونی است کمینه و بیشینه مؤلفه  $Z$  شدت میدان مغناطیسی به ترتیب تقریباً برابر با ۱۱ و ۸۲ گاوس است. با این

برای تبدیل مدل هندسی به یک مدل المان محدود دقیق و متقارن، مشخصات اندازه المان‌ها در تعداد زیادی از خطوط مدل، با استفاده از ابزار کنترلی شبکه بندی، تعیین گردید. المان‌های به کار رفته در مدل عبارتند از: SOLID۹۶، INFIN۱۱۱ و SOURC۳۶. در کل مدل شبیه‌سازی، تعداد تقریبی المان‌ها و گره‌ها به ترتیب بیش از ۱۷۱۰۰۰ و ۳۱۰۰۰ است که دقت بسیار بالای مدل را نشان می‌دهد. در شکل ۳ مدل المان محدود منبع تبخیر الکترونی نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی آهنربای الکتریکی از المان SOURC۳۶، که در ANSYS برای طراحی سه بعدی پیچیده‌های استاندارد لحاظ گردیده، استفاده شده است. پیچیده استاندارد نیاز به رسم مدل هندسی ندارد ولی باید ثوابت حقیقی آن را، که مشخص کننده ابعاد و نیز جریان آن است، تعریف کرد. یکی از این ثوابت

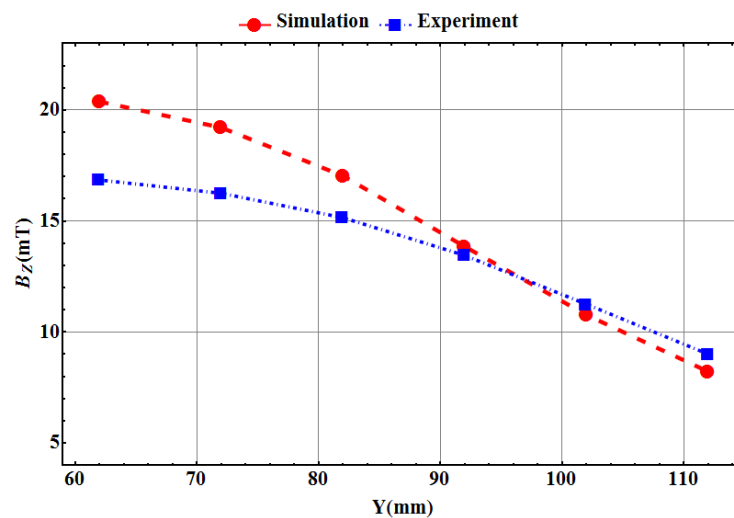


شکل ۶. مسیر حرکت الکترون‌ها در منبع تبخیر الکترونی در نماهای مختلف.

برای این منظور، فقط ۵ الکترون در نظر گرفته شده است که با انرژی ۵/۸ کیلو الکترون ولت و از مکان‌های اولیه مختلف از تفنگ خارج می‌شوند. فاصله دو الکترون متوالی ۵ میلی‌متر است. راستای اولیه پرتاب الکترون‌ها با اندازه‌گیری مقدار انحراف آنها از محور افقی، در یک مشاهده تجربی عملکرد تفنگ بدون حضور میدان مغناطیسی به دست آمد. بر این اساس زاویه پرتاب الکترون‌ها برابر  $+15^\circ$  درجه نسبت به محور افقی (X) لحاظ گردید. در شکل ۶ مسیر حرکت الکترون‌ها در منبع تبخیر الکترونی در نماهای مختلف نشان داده شده است. همان گونه که از شکل ۶ مشخص است اثر عدسی مغناطیسی به گونه‌ای است که نه تنها ۵ الکترون را با چرخش  $270^\circ$  درجه‌ای به محل بوته می‌رساند بلکه در نزدیکی محل بوته، آنها را به

حال در شکل ۴ اندازه شدت میدان در فضای بین جوشن‌ها بزرگ‌تر از  $50$  گاوس است. مطابق شکل ۵ که در آن توزیع میدان در مقطع عرضی منبع تبخیر الکترونی و در صفحه موازی با سطح بوته نشان داده شده است علامت مؤلفه  $Z$  شدت میدان مغناطیسی در اطراف جوشن‌ها تغییر می‌کند. در شکل ۵ بیشینه شدت میدان در فضای بین جوشن‌ها تقریباً برابر با  $103$  گاوس است.

در پژوهش حاضر، نحوه تولید و شتاب الکترون‌ها و تشکیل پرتو اولیه در نظر گرفته نشده است. در واقع، در شبیه‌سازی فرض شده است پرتو الکترونی با انرژی و راستای مشخص از تفنگ خارج می‌شود. هدف اصلی شبیه‌سازی، بررسی نقش عدسی مغناطیسی در هدایت پرتو و متمرکز ساختن آن است.



شکل ۷. مقایسه داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی برای میدان مغناطیسی. محور افقی نمایانگر فاصله بر حسب میلی‌متر و در یک مسیر مشخص در صفحه X-Y و محور عمودی نشان دهنده مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی بر حسب میلی‌تسلا است.

همدیگر نزدیک می‌کند. به عبارت دیگر نتایج شبیه‌سازی مؤید نقش مؤثر عدسی مغناطیسی در هدایت و کانونی ساختن پرتو در محل هدف است.

حساب میلی‌متر)، در صفحه X-Y، نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، نتایج به دست آمده از خروجی شبیه‌سازی توافق خوبی با داده‌های تجربی دارد به گونه‌ای که بیشینه اختلاف نتایج کمتر از ۲۰ درصد است.

۴. مقایسه با نتایج تجربی

پیش‌بینی نرم‌افزار در مورد محل اصابت پرتو، تطابق خوبی با مشاهدات آزمایش‌های انجام شده در این زمینه دارد. علاوه بر این، برای تأیید تجربی نتایج شبیه‌سازی، چگالی شار مغناطیسی به وسیله تسلا متر (مجهز به کاوشگر اثر هال) در نقاط مختلف فضای بین جوشن‌ها اندازه‌گیری و با خروجی شبیه‌سازی مقایسه شد. این مقایسه برای وضعیتی انجام گرفت که در آن حاصل ضرب تعداد دور در جریان برابر با ۱۲۰۰ دور-آمپر است. در شکل ۷ مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی (بر حسب میلی‌تسلا) در امتداد یک خط مشخص در راستای Y (بر

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از طریق تحلیل میدان مغناطیسی منبع تبخیر الکترونی به وسیله نرم‌افزار ANSYS، مسیر پرتو، ردیابی شده است. بر اساس نتایج این شبیه‌سازی، قدرت عدسی مغناطیسی به کار رفته در منبع برای هدایت پرتو به محل هدف و متمرکز سازی آن ارزیابی شده است. با اندازه‌گیری توزیع میدان مغناطیسی سامانه ساخته شده، نتایج شبیه‌سازی تأیید شد. همچنین پیش‌بینی نرم‌افزار در مورد محل اصابت پرتو در تطابق خوبی با مشاهدات آزمایش‌های انجام شده در این زمینه است.

## مراجع

- Vincent, *Appl. Phys. Lett.*, **106** (2015) 193102.
- D M Mattox, "Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Noyes Publications", (1998).
- Z Xiao, and K Kisslinger, *J. Vac. Sci. Technol. B* **33** (2015) 042001.
- N P Blanchard, A Niguès, M Choueib, S Perisanu, A Ayari, P Poncharal, S T Purcell, A Siria and P

۴. م سلحشور، ج نوری و ب شکری، "شبیه سازی پیشراننده پلاسمایی ثابت"، SPT-۱۰۰ در هشتمین کنفرانس سالانه انجمن هوافضای ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، (۱۳۸۷).
۵. م سلحشور، ک حمزه و ع ازواریان، "مقایسه نیمرخ های خوردگی هدف و توزیع میدان مغناطیسی کاتد مگنترون اسپاترینگ ۳- / اینچ"، در چهارمین کنفرانس ملی خلأ ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۸).
۶. م سلحشور، ک حمزه و ع ازواریان مجله علوم و مهندسی سطح ایران، ۱۱ (۱۳۹۰) ۷۷.