

# طراحی ساختار مغناطیسی یک کاتد کندوپاش مگنترون با استفاده از شبیه سازی میدان مغناطیسی و بررسی نرخ لایه نشانی

مصطفی سلحشور، کوروس حمزه و علی اصغر زواریان

گروه پژوهشی فناوری خا، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف، تهران

( دریافت مقاله : ۸۸/۹/۲۰ - پذیرش مقاله : ۸۹/۹/۲۸ )

## چکیده

در این مقاله با بهینه سازی پیکربندی اجزای مغناطیسی کاتد کندوپاش مگنترون تخت گرد توسط نرم افزار اجزای محدود ANSYS، یک طرح جدید برای چیدمان قطعات مغناطیسی کاتد پیشنهاد شده است. در این طرح با مایل قرار دادن آهنربای کناری نسبت به سطح هدف و بکارگیری یک مهار در زیر آن، خطوط شار مغناطیسی در ناحیه نسبتاً وسیعی در بالای هدف موازی سطح آن شده است. علاوه بر این، یک نمونه کاتد بر اساس این طراحی ساخته و پارامترهای عملکردی آن اندازه گیری شده است. این پارامترها شامل بازدهی مصرف هدف و نرخ لایه نشانی است که در فشار ۵۰ میلی تور و توان ۱ کیلووات به ترتیب مقادیر ۵۶ درصد و ۱۶ نانومتر بر ثانیه برای آنها بدست آمد.

واژه های کلیدی کاتد کندوپاش مگنترون، شبیه سازی میدان مغناطیسی، بهینه سازی میدان مغناطیسی، بازدهی مصرف هدف.

## Design of Magnetic Structure of a Magnetron Sputtering Cathode by Magnetic Field Simulation and Investigation of Deposition Rate

M. Salahshoor, K. Hamzeh and A. A. Zavarian

Vacuum Technology Research Group, ACECR-Sharif University Branch, Tehran

### Abstract

A new design for magnetic structure of a circular planar magnetron sputtering cathode has been proposed through optimizing the configuration of its magnetic components by means of finite element software, "ANSYS". In this design, magnetic flux lines were collimated in a wide region above the target surface by setting lateral magnet oblique with respect to target surface and by applying a shunt below the target. In addition, according to this design, a cathode was fabricated and its operational parameters were measured. At a pressure of 50 mTorr and a dc power of 1kw, we obtained 56% and 16 nm/s for target utilization and deposition rate respectively, as the most important parameters.

**Keywords:** Magnetron Sputtering Cathode, Magnetic Field Simulation, Magnetic Field Optimization, Target Utilization.

**E-mail of corresponding author:** salahshoor@jdsharif.ac.ir

## مقدمه

فناوری کندوپاش مگنترون به طور گسترده در بسیاری از تولیدات صنعتی برای نشان دادن فیزیکی لایه‌های نازک استفاده می‌شود. مسأله اصلی در طراحی سامانه‌های نوعی مگنترون تخت برای کاربردهای صنعتی، بازدهی مصرف نسبتاً کم هدف<sup>۱</sup> (حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد) است که بر نرخ لایه‌نشانی و یکنواختی لایه‌ها نیز تأثیر می‌گذارد. در مصارف صنعتی علاوه بر اینکه بازدهی مصرف هدف در مورد مواد گران‌قیمت بسیار مهم است، هزینه چرخه بازگردانی هدف و مدت استراحت دستگاه پوشش‌دهی برای تعویض هدف و هزینه نیروی انسانی برای نگهداری دستگاه نیز به آن افزوده می‌شود؛ لذا در کاربردهای صنعتی بایستی افزایش بازدهی مصرف هدف و در نتیجه طول عمر زیاد آن را مدنظر قرار داد. در کنار این ملاحظات، کار در فشارهای پایین‌تر، نرخ کندوپاش زیادتر و افزایش گستره یکنواختی لایه، برای انجام فرآیند لایه‌نشانی مطلوب است [۱-۳].

مهمترین عامل تأثیرگذار در بازدهی مصرف هدف و نرخ کندوپاش، توزیع میدان مغناطیسی در بالای سطح هدف است؛ از این رو توسعه‌های اخیر سامانه‌های کاتد مگنترون کندوپاش، به منظور افزایش کارآمدی آن در مصارف صنعتی، به طور عمده به بهینه‌سازی آرایش اجزای مغناطیسی کاتد اختصاص یافته است [۴-۱۷]. در همه این کارها مقصود اصلی، ایجاد شکل مناسب خطوط شار مغناطیسی جهت افزایش محدوده یکنواختی پلاسما و در نتیجه افزایش بازدهی مصرف هدف و طول عمر آن بوده است. خطوط شار مغناطیسی در شرایط بهینه، در ناحیه بالای هدف موازی سطح آن است. علاوه بر این سعی شده است با اعمال شدت میدان مغناطیسی زیادتر، چگالی پلاسما بیشتر شود تا ضمن آن چگالی یون‌های بمباران‌کننده سطح هدف و در پی آن نرخ کندوپاش و لایه‌نشانی افزایش یابد. البته پیامدهای دیگر پیکربندی بهینه اجزای مغناطیسی کاتد، مانند کاهش فشار کار، در کارآمدی بیشتر آن نقش دارد؛ چون در فشارهای

پایین‌تر می‌توان از آلودگی‌ها کاست و نیز فاصله زیرلایه تا هدف را افزایش داد بدون اینکه بازده لایه‌نشانی کم شود. اقداماتی که برای بهینه‌سازی پیکربندی مغناطیسی کاتد کندوپاش مگنترون انجام شده بسیار متنوع است. در یک دسته‌بندی کلی دو روش عمده برای دسترسی به این مقصود گزارش شده است:

۱- حرکت دادن محل محبوس‌سازی<sup>۲</sup> پلاسما در بالای هدف با استفاده از ترکیب‌های مختلف آهنرباهای ثابت، چرخان و نیز آهنرباهای الکتریکی با جریان متغیر [۴-۱۱].

۲- افزایش ناحیه محبوس‌سازی پلاسما با استفاده از ترکیب‌های مختلف آهنرباهای ثابت و آهنرباهای الکتریکی با جریان ثابت [۱۲-۱۷].

استفاده از آهنرباهای چرخان و الکتریکی باعث افزایش پیچیدگی کاتد، مشکلات ساخت، تعمیرات و نگهداری آن می‌شود که فقط در کاتدهای بزرگ برای کاربردهای صنعتی قابل توجیه است. از سوی دیگر، آزادی عمل در چینش آهنرباهای دایمی، امکان دسترسی آسان به آرایش بهینه آنها را فراهم می‌کند. از این رو در این پژوهش سعی شده است فقط با استفاده از آرایش بهینه آهنرباهای دایمی غیرمتحرک و اجزای مغناطیسی دیگر کاتد، میدان مغناطیسی لازم بدست آید. علاوه بر این، چون بهینه‌سازی پیکربندی مغناطیسی به روش تجربی شامل ساخت و اندازه‌گیری مکرر پارامترهای مربوط، بسیار پرهزینه و زمان‌بر است؛ به جای روش تجربی از روش شبیه‌سازی برای دستیابی به ساختار بهینه استفاده شده است

در این مقاله ابتدا مختصری از مبانی نظری تخلیه کندوپاش مگنترون و نقش میدان مغناطیسی در عملکرد آن بیان شده است. پس از آن راهبرد شبیه‌سازی انجام‌شده برای دستیابی به آرایش بهینه اجزای مغناطیسی کاتد تشریح گردیده است. سپس نتایج تجربی به دست آمده از کاتد ساخته شده ارایه شده و در پایان در مورد نتایج بدست آمده بحث و نتیجه‌گیری شده است.

<sup>2</sup> Confinement

<sup>1</sup> Target

حلقه‌ای حرکت کنند و منجر به ایجاد جریان حلقوی بسته‌ای در بالای سطح هدف شوند (شکل ۱-ب).

$$\vec{V}_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad \text{معادله ۱}$$

ولتاژ اعمالی به کاتد به طور معمول در محدوده چند صد ولت و اندازه شدت میدان مغناطیسی بکاررفته در سطح هدف نیز در محدوده چند ده میلی‌تسلا می‌باشد. حرکت سوقی برای یون‌ها، که به علت جرم بسیار بزرگشان نسبت به الکترون‌ها توسط میدان مغناطیسی مگنترون محبوس نمی‌شوند، قابل چشم‌پوشی است.

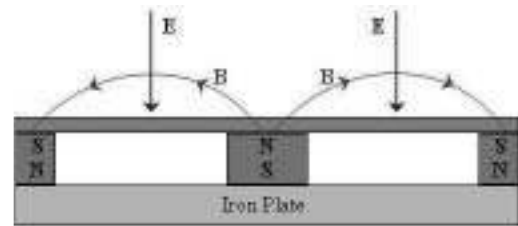
محبوس‌سازی الکترون‌ها در ناحیه حلقوی مذکور، عامل اصلی یونش مولکول‌های گاز و تشکیل پلاسمای درخشان در آنجا است. هرچه خطوط شار مغناطیسی در منطقه وسیعتری در بالای هدف موازی سطح آن باشند این جریان حلقوی نیز در ناحیه وسیعتری اتفاق می‌افتد و حلقه پلازما پهن‌تر می‌شود. همچنین هرچه شدت میدان مغناطیسی در این ناحیه بزرگتر باشد محبوس‌سازی الکترون‌ها و یونش مولکول‌های گاز بیشتر می‌شود و چگالی پلازما افزایش می‌یابد.

یون‌های تولیدشده در ناحیه تخلیه در اثر ولتاژ کاتد به سمت هدف شتاب می‌گیرند و با برخورد به هدف، ضمن کندوپاش و خوردگی آن، باعث آزادسازی الکترون‌های ثانوی می‌شوند. الکترون‌های ثانوی با شتاب گرفتن در میدان الکتریکی در جهت عکس حرکت یون‌ها و برخورد یونیزه‌کننده با اتم‌های گاز مقابل سطح هدف، نقش مهمی در حفظ تخلیه ایفا می‌کنند. اتم‌های کنده‌شده از سطح هدف نیز بر روی زیرلایه، که در فاصله چند سانتی‌متری از هدف قرار گرفته است، می‌نشیند و لایه نازک موردنظر شکل می‌گیرد.

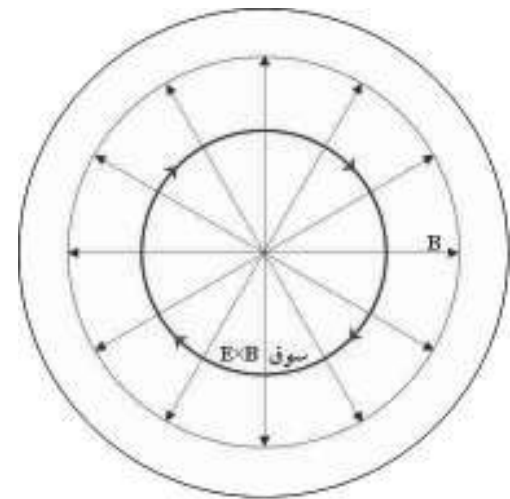
هرچه پهنای پلاسمای حلقوی در بالای هدف بیشتر باشد بازدهی مصرف آن بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر هرچه چگالی پلازما بیشتر باشد میزان جریان یون فرودی به هدف افزایش می‌یابد و نرخ کندوپاش بیشتر می‌شود. به این ترتیب برای افزایش بازدهی مصرف هدف و بالابردن

### مبانی نظری کاتد کندوپاش مگنترون

مبانی نظری کاتد کندوپاش مگنترون در منابع ۱۸ و ۱۹ تشریح شده است. طرحواره دوبعدی کاتد مگنترون گرد تخت در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



الف



ب

شکل ۱. الف) طرحواره دوبعدی کاتد مگنترون گرد تخت، ب) نمای بالایی کاتد و جهت جریان الکترونی ناشی از سوق

$$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

در تخلیه الکتریکی مگنترون، از یک سو اعمال ولتاژ منفی به کاتد (هدف) باعث ایجاد میدان الکتریکی عمود بر سطح هدف می‌شود و از سوی دیگر قطب‌های مغناطیسی مرکزی و کناری باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی شعاعی می‌شوند که خطوط شار آن در بخشی از ناحیه بالای هدف موازی سطح آن است. به این ترتیب حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی متعامد باعث می‌شود تا الکترون‌ها مطابق معادله ۱، با یک سرعت سوقی در امتداد عمود بر هر دو میدان، در راستای سمتی و در یک مسیر

مغناطیسی ثابت (خاصیت خطی)، منحنی B-H یا جدول عددی متناظر با آن (خاصیت غیرخطی) وارد شود، تغییر محسوسی در نتایج مربوط به نواحی مورد بررسی حاصل نمی‌گردد. البته در تحلیل‌های گذرا<sup>۵</sup> یا نوسانی، اثرات غیرخطی بسیار مهم می‌شود [۲۰].

برای دستیابی به شدت میدان بالاتر، از آهنرباهای NdFeB استفاده شده است. خواص مغناطیسی این آهنربا بوسیله دو کمیت نفوذپذیری مغناطیسی و نیروی مغناطیس‌زدای ثابت مشخص می‌شود که در مرجع ۲۱ آمده است.

از آنجایی که فعالیت‌های انجام شده در این پژوهش، جهت استفاده عملی بوده است؛ لذا می‌بایست برخی از ملاحظات اجتناب‌ناپذیر در ساخت کاتد در نظر گرفته می‌شد. این ملاحظات عبارتند از: ۱- قطر ۳ اینچی هدف، ۲- وجود آبگرد مسی برای خنک کردن سطح زیرین هدف. علاوه بر این، تنوع آهنرباهای موجود در بازار داخلی محدود بوده و تهیه آهنرباهای مدل‌های فرضی با هر شکل و خصوصیات دلخواه ممکن نیست. از این رو در این پژوهش ابتدا تعدادی از آهنرباهای موجود در بازار که امکان بکارگیری آنها در دستگاه حاضر وجود داشت خریداری گردید و سپس از ابعاد و خواص آنها در مدل‌های مورد بررسی، استفاده شد.

ترسیم مدل هندسی قطعات غیرمغناطیسی کاتد لازم نیست، زیرا قطعات غیرمغناطیسی (نظیر قطعات مسی و استیل و عایق‌ها) تأثیری بر میدان مغناطیسی ندارند. بنابراین تمام این قطعات به عنوان یک ماده (هوا) و با یک خاصیت مغناطیسی تعریف شده‌اند. المان‌هایی که در کلیه مدل‌های دوبعدی بکار رفته‌اند عبارتند از: PLANE53 و INFIN110 که در کتابخانه ANSYS تعریف شده‌اند. برای تبدیل مدل هندسی به یک مدل المان محدود دقیق و متقارن، با استفاده از ابزار کنترل شبکه‌بندی، تعداد و اندازه المان‌ها روی برخی از خطوط مدل، تعیین شده است.

نرخ کندوپاش بایستی اول خطوط شار مغناطیسی در ناحیه بیشتری از بالای هدف موازی سطح آن باشد و دوم شدت میدان مغناطیسی در بالای هدف زیادتر باشد.

### شبیه‌سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار المان محدود ANSYS برای شبیه‌سازی مگنترون استفاده شده است. این نرم‌افزار در رهیافت الکترومغناطیس خود، قابلیت شبیه‌سازی توزیع مکانی و تحول زمانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از منابع مختلف الکترومغناطیسی را دارد. در ANSYS با استفاده از روش تحلیل مغناطیسی ایستای دوبعدی<sup>۱</sup> و بکارگیری فرمول‌بندی پتانسیل برداری مغناطیسی<sup>۲</sup> می‌توان میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباهای دایمی و جریان‌های مستقیم (DC) را بدست آورد [۲۰].

در کاتد حاضر، میدان مغناطیسی توسط جریان الکتریکی خارجی ایجاد نمی‌شود. زمان اجرای طولانی برنامه به علت کندی رایانه‌ها برای مدل‌های سه‌بعدی و نیز قابلیت تعمیم نتایج مدل دوبعدی به مدل سه‌بعدی، ما را بر آن داشت تا کلیه مدل‌ها را به صورت دوبعدی و متقارن‌محوری حل کنیم.

در نرم‌افزار ANSYS آنچه که به عنوان خاصیت مغناطیسی ماده پذیرفته می‌شود یکی یا دو مورد از داده‌های مربوط به منحنی پسماند B-H، نفوذپذیری مغناطیسی<sup>۳</sup> و نیروی مغناطیس‌زدا<sup>۴</sup> است. در تمامی برنامه‌های اجرا شده با نرم‌افزار، خاصیت مغناطیسی مواد آهنی (با تراوایی بالا) به علت موجود نبودن منحنی پسماند B-H آهن‌های موجود، با نفوذپذیری مغناطیسی ثابت فرضی ( $\mu = 1000$ ) مشخص شده است. صحت بکارگیری این فرض به این ترتیب اثبات شده است که اگر در تحلیل ایستای مغناطیسی در ANSYS، برای آهن با تراوایی بالا، بجای نفوذپذیری

<sup>1</sup> 2-D Static Magnetic Analysis

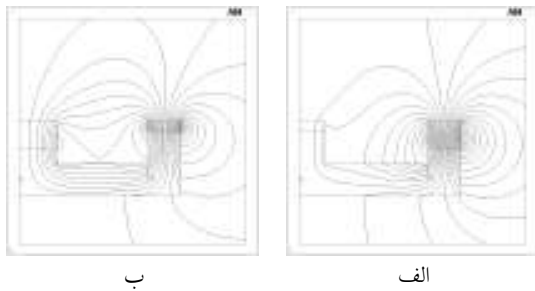
<sup>2</sup> Magnetic Vector Potential Formulation - MVPF

<sup>3</sup> Permeability

<sup>4</sup> Coercive Force

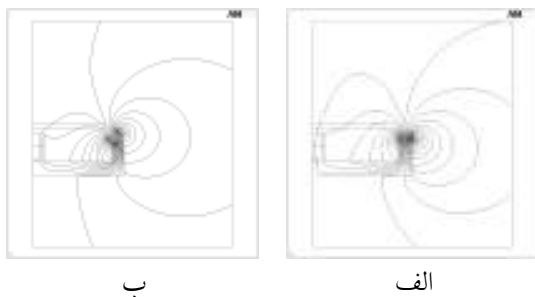
<sup>5</sup> Transient

### طراحی بهینه



شکل ۳. تأثیر ابعاد نسبی آهنرباها بر توزیع میدان مغناطیسی: الف) آهنربای مرکزی با قطر ۱۰ م.م. و ارتفاع ۲ م.م.، آهنربای کناری با پهنا و ارتفاع ۵ م.م. ب) آهنربای مرکزی با قطر ۲۰ م.م. و ارتفاع ۵ م.م.، آهنربای کناری با پهنا ۵ م.م. و ارتفاع ۲ م.م.

۵- مایل قراردادن آهنربای کناری موجب افزایش همزمان یکنواختی خطوط شار و شدت میدان در ناحیه بالای هدف می‌گردد (شکل ۴).



شکل ۴. تأثیر زاویه دادن به آهنرباهای کناری بر توزیع میدان مغناطیسی: الف) زاویه آهنربای کناری نسبت به سطح هدف ۹۰ درجه، ب) زاویه آهنربای کناری نسبت به سطح هدف ۴۵ درجه

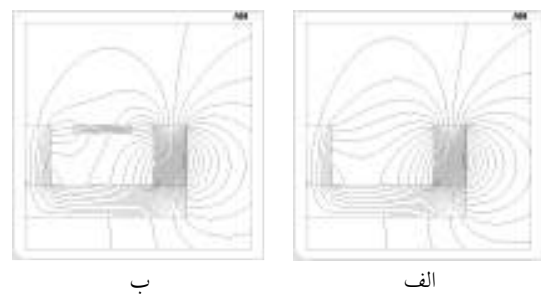
۶- قرارگیری آهنربای مرکزی در ارتفاع بالاتری نسبت به آهنربای کناری باعث افزایش یکنواختی خطوط میدان در بالای هدف می‌شود.

در مرحله بعد، بر اساس نتایج بدست آمده جهت بهبود کیفیت خطوط شار مغناطیسی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های حاکم بر طرح کاتد جدید، بهینه‌سازی به مدل‌هایی محدود شد که در آنها: ۱- قطر آهنربای مرکزی تا حد امکان بزرگ و قطر آهنربای کناری تا حد امکان کوچک بود، ۲- آهنربای کناری به صورت مایل قرار گرفت، ۳- از یک شانت در زیر هدف استفاده گردید، ۴- فاصله بین آهنربای مرکزی و آهنربای کناری تا حد ممکن بیشینه انتخاب شد. در این مرحله، از ابعاد آهنرباهای موجود در بازار داخل برای

ابتدا فقط به کمک شبیه‌سازی نرم‌افزاری، به طور کیفی تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر ابعاد، مکان و نحوه قرارگیری قطعات مختلف مغناطیسی موجود در کاتد (شامل آهنرباها، جوشن و شانت) روی شکل و شدت میدان مغناطیسی کاتد بررسی شد که در اینجا فقط به خلاصه شش نتیجه مهم از مدل‌های مختلف بررسی شده با نرم‌افزار که ایده‌ای جهت بهبود میدان مغناطیسی بدست دادند و در طراحی پایه کاتد بسیار تأثیرگذار بودند اشاره می‌شود. این نتایج عبارتند از:

۱- به سهولت می‌توان به کمک شبیه‌سازی ابعاد مختلف جوشن را تا حدی که بر توزیع میدان در سطح هدف تأثیر نگذارد، کاهش داد.

استفاده از شانت به شکل یک واشر نازک در زیر هدف، در موازی‌سازی خطوط شار با سطح هدف بسیار مؤثر است (شکل ۲)، ولی در عین حال شدت میدان در بالای شانت (و لذا بالای هدف) به شدت کاهش می‌یابد. تغییر ضخامت شانت به میزان ۵۰ درصد نیز تأثیر چندانی روی شکل خطوط و شدت میدان ندارد. تغییر سایر ابعاد و موقعیت مکانی شانت تأثیر مطلوبی ندارد.



شکل ۲. تأثیر شانت بر توزیع میدان مغناطیسی: الف) مدل بدون شانت، ب) مدل با شانت

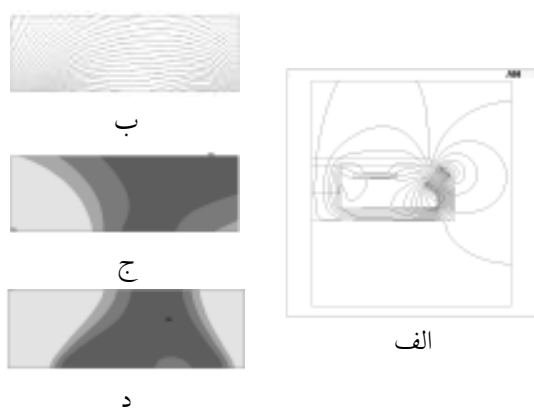
۳- کوچک بودن ابعاد آهنربای کناری نسبت به آهنربای مرکزی و همچنین بزرگ بودن قطر آهنربای مرکزی در موازی‌سازی خطوط شار مغناطیسی در بالای هدف مؤثر است (شکل ۳).

۴- افزایش فاصله بین آهنرباها با وجود کاهش شدت میدان در یکنواخت‌سازی خطوط میدان تأثیر بسزایی دارد.

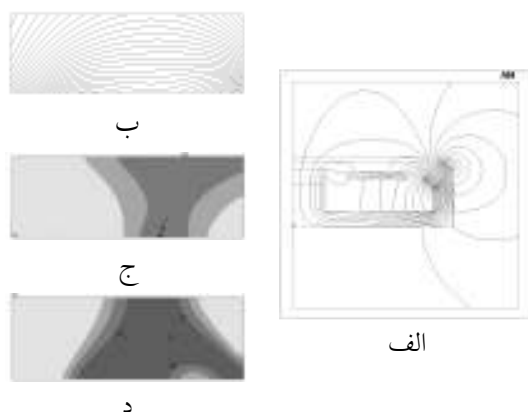
در شکل ۶ فقط نتایج یک مدل از شبیه‌سازی‌های متعددی که انجام شده آورده شده است.

با مقایسه نتایج مدل‌های مختلف و با ملاحظه طراحی آبگرد یکپارچه که سطح آهنربای مرکزی را بپوشاند در نهایت مدل شکل ۷ بدست آمد.

در این طرح بهینه، شدت میدان در ناحیه بالای هدف به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد شده است بنحوی که در نقطه مشخص شده در شکل ۷-ب، کمینه شدت میدان روی سطح هدف ۲۳ میلی تسلا است. علاوه بر این، مساحت ناحیه‌ای که



شکل ۶: مدل فرضی (آهنربای مرکزی با قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۰ میلیمتر و آهنربای کناری مایل کوچک به همراه یک شانت)، شامل نمایش‌های کانتوری: الف) خطوط شار مغناطیسی در کل مدل، ب) خطوط شار مغناطیسی در ناحیه بالای هدف، ج) چگالی شار مغناطیسی در ناحیه بالای هدف، د) پارامتر  $m$  در ناحیه بالای هدف



شکل ۷: مدل بهینه نهایی، شامل نمایش‌های کانتوری: الف) خطوط شار مغناطیسی در کل مدل، ب) خطوط شار مغناطیسی در ناحیه بالای هدف، ج) چگالی شار مغناطیسی در ناحیه بالای هدف، د) پارامتر  $m$  در ناحیه بالای هدف

شبیه‌سازی استفاده گردید. در تمامی مدل‌ها یک هدف ثابت به ضخامت ۲ میلیمتر و شعاع ۴۲ میلیمتر استفاده شد. ضخامت جوشن ۵ میلیمتر و شعاع جوشن ۵۰ میلیمتر (متناسب با قطر داخلی دیواره کاتد) در نظر گرفته شد. ضخامت شانت ۲ میلیمتر و مکان آن در زیر هدف انتخاب گردید. برای سیستم آبگرد نیز حداقل فاصله‌ای به اندازه ۱۰ میلیمتر بین جوشن و شانت در زیر هدف لحاظ شد. ناحیه مورد بررسی (ناحیه بالای هدف) در تمامی مدل‌ها، مستطیلی به عرض ۳۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۰ میلیمتر در مقطع نیمه‌راست کاتد و دقیقاً بالای هدف بود بنحوی که فاصله‌ی گوشه‌چپ پایینی این مستطیل از وسط آهنربای مرکزی ۶ میلیمتر بود.

برای مقایسه‌ی دقیق‌تر مدل‌ها، علاوه بر نمایش کانتوری خطوط شار و اندازه چگالی شار مغناطیسی، از نمایش کانتوری کمیت  $m$ ، به عنوان شیب خطوط میدان مغناطیسی در این ناحیه، استفاده گردید که تعریف این کمیت بدون بعد به صورت معادله ۲ است:

$$m = \frac{|B_y|}{|B_x|} \quad \text{معادله ۲}$$

در این معادله  $|B_y|$  و  $|B_x|$  به ترتیب معرف اندازه مؤلفه‌های عمودی و افقی چگالی شار مغناطیسی در مختصات دوبعدی دکارتی است. در تمامی شکل‌های مربوط به نمایش کانتوری چگالی شار مغناطیسی و پارامتر  $m$ ، مقدار عددی متناظر با مرز رنگ‌های مختلف مطابق شکل-های ۵-الف و ب است.

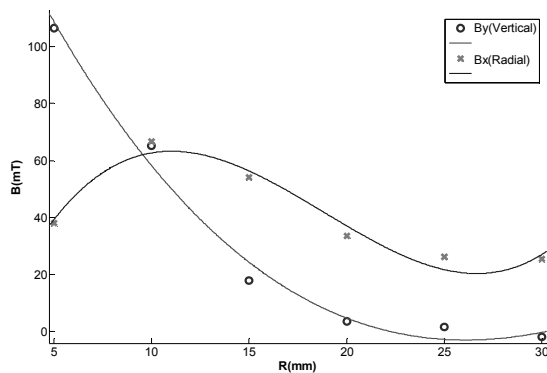
الف) چگالی شار مغناطیسی:



ب) شیب خطوط شار:



شکل ۵: مقدار عددی متناظر با مرز رنگ‌های مختلف در نمایش کانتوری: الف) چگالی شار مغناطیسی ب) پارامتر  $m$

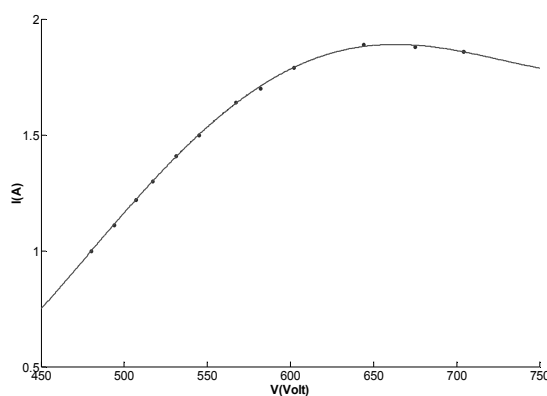


شکل ۸. مؤلفه افقی (X) و عمودی (Y) چگالی شار مغناطیسی در امتداد شعاع کاتد (محور افقی فاصله از مرکز کاتد بر حسب میلیمتر و محور عمودی چگالی شار مغناطیسی بر حسب میلی‌تسلا می‌باشد)

نتایج بدست آمده با خروجی شبیه‌سازی شده کاتد در شکل ۷ در توافق است. حداقل شدت میدان کاتد جدید بیش از ۲۰ میلی‌تسلا اندازه‌گیری شده است.

## ۲- مشخصه ولتاژ- جریان تخلیه

وضعیت تشکیل پلاسما ارزیابی گردید. هیچگونه اختلال یا ناپایداری در تشکیل پلاسما در ولتاژهای مختلف حتی در کمترین فشار کار کاتد ملاحظه نشد. نمودار شکل ۹ رابطه بین جریان و ولتاژ تخلیه را در کاتد جدید در فشار ۵۰ میلی‌تور نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمودار جریان- ولتاژ تخلیه کاتد جدید در فشار ۵۰ میلی‌تور

با افزایش توان، خنک‌سازی کاتد مسأله مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. در این کاتد بیشینه توان اعمالی به بیش از یک کیلووات رسیده است.

در آن خطوط شار موازی سطح هدف است به میزان چشمگیری افزایش یافته است. در شکل ۷- ج مرزهای ناحیه‌ای که در آن شیب خطوط شار کمتر از ۰/۲ (متناظر با زاویه تقریبی ۱۱ درجه نسبت به افق) می‌باشد با سه پیکان نشان داده شده است. این دو نتیجه همان چیزی است که بایستی بر اساس اصول نظری مگنترون کندوپاش برای میدان مغناطیسی بهینه لحاظ شود.

## نتایج و بحث

با استفاده از طرح بهینه جدید، مجموعه کاتد طراحی و ساخته شد. کاتد جدید در محفظه خلأ سامانه EDS100 ساخت مرکز فناوری خلأ بالا به کمک یک منبع تغذیه DC مورد آزمایش قرار گرفت. این منبع تغذیه مرکب از اتوترانسفورمر کاهنده برق شهر و تنظیم سطح ولتاژ ورودی، ترانسفورمر افزایش‌دهنده ولتاژ تا ۱۰۰۰ ولت و حداقل جریان ۲ آمپر با حداقل بار ثابت ۵۵ کیلو اهم و مدار یکسوساز تمام موج با خازن ۱۰ میکروفاراد بود. ولتاژ و جریان کاتد با دو ولت‌متر رقمی قرائت می‌شد.

سامانه خلأ EDS100 مجهز به پمپ دیفیوژن و خلأسنج‌های پیرانی و پنینگ برای یک محفظه کوآرتز ۱۵ لیتری بود. فشار گاز آرگون بوسیله رگولاتور در فشار ۱ بار تنظیم و جریان گاز توسط شیر سوزنی کنترل می‌گردید. فشار محفظه با تنظیم جریان گاز و نیمه‌بسته نگهداشتن شیر اصلی محفظه در محدوده مورد نظر قرار داده می‌شد. در هر آزمایش یک هدف مسی با سطح کاملاً تخت و صیقل داده شده استفاده می‌گردید.

## ۱- میدان مغناطیسی

برای تأیید تجربی نتایج شبیه‌سازی، چگالی شار مغناطیسی ( $\vec{B}$ ) بوسیله تسلا متر (مجهز به پروب اثر هال) در نقاط مختلف فضای بالای هدف اندازه‌گیری شد. در شکل ۸ مؤلفه‌های عمودی و افقی چگالی شار مغناطیسی در امتداد شعاع کاتد نشان داده شده است.

### ۳- نرخ لایه‌نشانی

بررسی رابطه بین محدوده خورده شده با میدان مغناطیسی، ارزیابی عملکرد طرح جدید برای کندوپاش مواد مغناطیسی، بررسی تأثیر جنس هدف بر بازدهی مصرف هدف، بررسی تأثیر فشار بر نرخ لایه‌نشانی و تعیین فاصله بهینه زیرآیند از کاتد برای نیل به حداکثر یکنواختی ضخامت و حداکثر آهنگ لایه‌نشانی، مباحثی هستند که در مراحل بعد این تحقیق قابل بررسی می‌باشند.

### نتیجه‌گیری

در این پروژه، از طریق تحلیل میدان‌های مغناطیسی کاتد به وسیله نرم‌افزار ANSYS و با تعیین شرایط حدی مناسب، یک طرح جدید برای ساختار اجزای مغناطیسی مگنترون بدست آمد که در آن خطوط شار مغناطیسی در ناحیه وسیعی از بالای هدف موازی سطح آن است. بر اساس این طرح و با ملاحظه محدودیت‌های فیزیکی و فنی ساخت، طرح جانمایی اجزای کاتد ارتقاء یافت. با اندازه‌گیری توزیع میدان مغناطیسی کاتد ساخته‌شده نتایج شبیه‌سازی تأیید شد. همچنین طبق نتایج آزمایش‌های گزارش شده، دستاوردهای زیر حاصل گشت:

- ۱- حداکثر توان به بیش از یک کیلووات (در فشار کمتر از ۵۰ میلی‌تور) افزایش یافت.
- ۲- متوسط نرخ لایه‌نشانی ۱۶ نانومتر بر ثانیه (در توان یک کیلووات و در فاصله ۵ سانتیمتر برای مس) به دست آمد.
- ۳- بازدهی مصرف هدف مسی (طی یک ساعت عملیات کندوپاش در توان ۱ کیلووات) به ۵۶٪ رسید که در مقایسه با مقدار ۳۰٪ برای کاتدهای رایج مشابه، به طور قابل ملاحظه‌ای بالا است.
- ۴- پایداری پلازما در شرایط مختلف فشار و توان فراهم گردید.

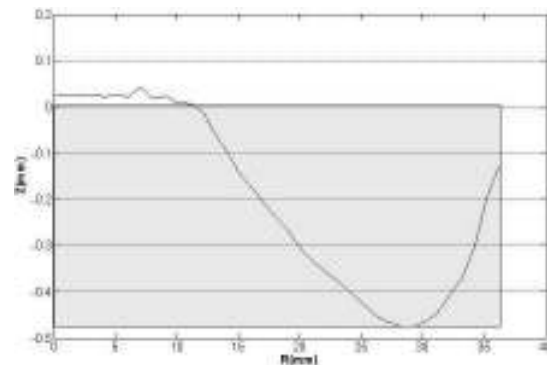
### تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری جهاد دانشگاهی جهت استفاده در تولید کاتدهای کندوپاش مگنترون سامانه‌های لایه‌نشانی ساخت مرکز فناوری خلأ

نرخ لایه‌نشانی هدف مسی در توان‌های مختلف توسط ضخامت‌سنج کریستال کوارتز اندازه‌گیری شد. در آزمایشی که فاصله کریستال ضخامت‌سنج از هدف حدود ۳/۵ سانتیمتر بود، بیشینه نرخ لایه‌نشانی در توان یک کیلووات برابر ۱۹ نانومتر بر ثانیه قرائت گردید. همچنین طی یک ساعت لایه‌نشانی پیوسته در توان یک کیلووات، ضخامت لایه مس روی زیرآیندی در فاصله ۵ سانتیمتر از هدف، برابر ۵۸ میکرومتر گردید که معادل آهنگ متوسط لایه‌نشانی ۱۶ نانومتر بر ثانیه است. این اندازه‌گیری مستقل از دقت و کالیبراسیون ضخامت‌سنج کریستالی است.

### ۴- خوردگی هدف

در پایان، وضعیت خوردگی هدف مسی با دستگاه CMM اندازه‌گیری شد. شکل ۱۰ سطح مقطع خوردگی هدف مسی را پس از یک ساعت خوردگی در توان یک کیلووات، در امتداد شعاع نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. نمودار خوردگی نیمه راست هدف مسی گرد

بازدهی مصرف هدف که همان نسبت حجم خورده‌شده به حجم کل هدف (با ضخامت معادل بیشه عمق خوردگی) است، در این آزمایش برابر ۵۶ درصد بدست آمد. این مقدار به وضوح بیشتر از مقادیر گزارش‌شده (۲۰ تا ۳۰ درصد) برای کاتدهای مگنترون گرد تخت معمولی [۶،۹،۱۶] است. صحت محاسبات از طریق مقایسه با نتیجه اندازه‌گیری کاهش جرم هدف مورد تأیید قرار گرفت.



منابع

1. W. D. Bosscher and H. Lievens, *Advances in magnetron sputter sources*, Thin Solid Films, 351(1999)15-20.
  2. P. J. Kelly and R. D. Arnell, *Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications*, Vacuum, 56(2000)159-172.
  3. Y. Xian, W. Chengbiao, L. Yang, Y. Deyang, and X. Tingyan, *Recent Developments in Magnetron Sputtering*, Plasma Science & Technology, 8(3)(2006)337-343.
  4. S. Kadlec and J. Musil, *Optimized magnetic field shape for low pressure magnetron sputtering*, Journal of Vacuum Science and Technology A, 13(1995)389-393.
  5. H. Harada, Y. Kamatani, A. Hirata and T. Koyanagi, *Improvement of Sputtering Target Utilization Using Dynamic Plasma Processing*, Jpn. J. Appl. Phys., 36(1997) 884-888.
  6. M. Komath, G. M. Rao and S. Mohan, *Studies on the optimization of unbalanced magnetron sputtering cathodes*, Vacuum, 52(1999)307-311.
  7. K. Kawabata, T. Tanaka, A. Kitabatake, K. Yamada, Y. Mikami, H. Kajioka and K. Toiyama, *High rate sputtering for Ni films by an rf-dc coupled magnetron sputtering system with multipolar magnetic plasma confinement*, Journal of Vacuum Science and Technology A, 19(2001)51-55.
  8. R. Stelter, M. Schilling, A. Welk, Ch. Padua, Ch. Li and M. Devine, *Method to Design Magnetrons that Match Preferred Erosion Patterns*, 47th Annual Technical Conference Proceedings, Dallas, TX, USA, April 24-29, (2004)1-4.
  9. T. Iseki, *Flat erosion magnetron sputtering with a moving unbalanced magnet*, Vacuum, 80(2006)662-666.
  10. X. B. Zhang, J. Q. Xiao, Z. L. Pei, J. Gong, and C. Sun, *Influence of the external solenoid coil arrangement and excitation mode on plasma characteristics and target utilization in a dc-planar magnetron sputtering system*, Journal of Vacuum Science and Technology. A, 25(2)(2007)209-214.
  11. T. Iseki, H. Maeda and T. Itoh, *Wide erosion nickel magnetron sputtering using an eccentrically rotating center magnet*, Vacuum, 83(2009)470-474.
  12. G. Mohan Rao and S. Mohan, *Optimization studies on magnetic field geometry for planar magnetron sputtering targets*, J. Vac. Sci. Technol. A, 9(6)(1991)3100-3104.
  13. Q. H. Fan and H. Y. Chen, *Effects of magnetic field on the target erosion in the symmetrical magnets magnetron sputtering method*, Thin Solid Films, 229(1993)143-145.
  14. R. Ai, K. Wasa and Y. Ichikawa, *Magnetron sputtering cathode with confined magnetic flux*, Vacuum, 59(2000)466-471.
  15. S. Ejima and Y. Shimizu, *Magnetic dome configuration for magnetron sputtering*, Review of Scientific Instruments, 72(5)(2001)2374-2379.
  16. Y. M. Sung, *Magnetic null discharge sputtering with full target erosion*, Surface & Coatings Technology, 193(2005)123-128.
  17. Q. Qiu, Q. Li, J. Su, Y. Jiao and J. Finely, *Simulation to improve the magnetic field in the straight section of the rectangular planar DC magnetron*, Vacuum, 82(2008)657-66.
  18. S. M. Rosnagel, *Magnetron Plasma Deposition Processes*, in Handbook of Plasma Processing Technology, fundamentals, etching, deposition, and surface interactions, Noyes Publications, (1990) 160-182.
  19. M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, Second Edition, John Wiley & Sons, (2005) 559-564.
  20. Release 11 Documentation for ANSYS.
۲۱. حمزه کوروس، مصطفی سلحشور و زواریان علی‌اصغر، گزارش نهایی طرح بهینه‌سازی کاتد مگنترون اسپاترینگ (کد ۱۲۵۳)، جهاد دانشگاهی، مهر ۱۳۸۸.