



## اثر میدان مغناطیسی انحنا دار بر ولتاژ قوس و میزان مصرف کاتد در فرآیند قوس کاتدی

جلال شیروی خوزانی<sup>۱</sup>، سید حجت‌اله حسینی<sup>۲</sup>، محمدرضا ابراهیمی فردوئی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>. پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر (تهران)، (دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

<sup>۲</sup>. پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر (تهران)، (دکتری مهندسی مواد)

<sup>۳</sup>. پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر (تهران)، (کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

### چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از قوس کاتدی به دلیل ایجاد پوشش‌های با چگالی بالا، نرخ رسوب زیاد و استحکام چسبندگی مناسب نسبت به سایر روش‌های رسوب فیزیکی بخار، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. از مهم‌ترین چالش‌ها در این فرآیند کنترل حرکت نقطه کاتدی به منظور جلوگیری از حرکت آن به سمت لبه‌های کاتد می‌باشد. یکی از مهم‌ترین روش‌ها جهت جلوگیری از فرار نقطه کاتدی و در نتیجه افزایش پایداری قوس، استفاده از میدان مغناطیسی مناسب بر روی سطح کاتد است. اما اعمال میدان مغناطیسی به سبب محدود کردن حرکت نقطه کاتدی در یک نوار باریک، کاهش مصرف کاتد را در پی خواهد داشت. در این مقاله اثر اعمال میدان مغناطیسی انحنا دار بر مصرف کاتد و ولتاژ قوس فرآیند، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند با استفاده از یک سیم‌پیچ حول کاتد، و تغییر جریان آن تا ۱/۵A می‌توان نوار سایش ایجاد شده توسط آهنربای شعاعی SmCo را تغییر داده و میزان استفاده از کاتد را افزایش داد. از سوی دیگر افزایش جریان سیم‌پیچ از ۰A تا ۱/۵A سبب افزایش ولتاژ قوس از ۱۶V تا ۳۰V می‌شود که جهت حفظ پایداری قوس به منبعی با ولتاژ مدار باز بیشتری نیاز است.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب‌دهی قوس کاتدی؛ قوس هدایت‌شده؛ ولتاژ قوس؛ میدان مغناطیسی

<sup>۱</sup>. jalalshiravi@yahoo.com

## مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از قوس کاتدی به دلیل ایجاد پوشش‌های با چگالی بالا، چسبندگی و نرخ رسوب زیاد، نسبت به سایر روش‌های رسوب فیزیکی بخار، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱]. در فرآیند قوس کاتدی، از انرژی قوس الکتریکی برای تبخیر ماده و رسوب آن بر روی زیرلایه استفاده می‌شود. قوس در نقاط نورانی کوچکی (میکرومتری) بر روی سطح کاتد ایجاد شده و با حرکت این نقاط بر روی سطح کاتد (به سبب از بین رفتن یک نقطه و تشکیل در مکان دیگر) پایدار می‌ماند. این نقاط که با عنوان نقاط کاتدی شناخته می‌شوند مراکز تبخیر و ایجاد پلازما بین آند و کاتد هستند [۲].

از مهم‌ترین چالش‌ها در فرآیند رسوب‌دهی قوس کاتدی، کنترل حرکت نقطه کاتدی بر روی سطح کاتد و وجود ماکروذرات در پوشش هستند که سبب کاهش کیفیت پوشش می‌شوند [۳]. نقطه کاتدی بر روی سطح کاتد به صورت تصادفی حرکت کرده و تمام سطح کاتد را می‌پیماید. علاوه بر این، در حرکت تصادفی قوس، نقطه کاتدی معمولاً به سمت لبه کاتد می‌رود و مجدداً در داخل سطح کاتد تشکیل می‌شود [۴]. قرارگیری و حرکت نقطه کاتدی در لبه کاتد باعث تخریب حفاظ کاتد و تجهیزات جانبی دستگاه قوس می‌شود. تخریب حفاظ کاتد که معمولاً از جنس سرامیک است، باعث آلودگی پوشش می‌شود [۵ و ۴]. قوس هدایت‌شده علاوه بر کنترل حرکت نقطه کاتدی در سطح کاتد با افزایش سرعت حرکت نقطه کاتدی در سطح کاتد و کاهش اندازه حوضچه مذاب باعث کاهش ماکروذرات نیز می‌شود [۱].

برای کنترل حرکت نقطه کاتدی، و در نتیجه جلوگیری از حرکت آن به سمت لبه کاتد، از روش قوس هدایت‌شده (اعمال میدان مغناطیسی بر روی سطح کاتد)، استفاده می‌شود [۱]. میدان مغناطیسی توسط دو قانون حرکت برگشتی و زاویه حاده، حرکت نقطه کاتدی را کنترل می‌کند. بر طبق قانون حرکت برگشتی، نقطه کاتدی تمایل به حرکت در خلاف جهت آمپریان ( $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ) که  $\mathbf{J}$  بردار دانسیته جریان و  $\mathbf{B}$  بردار میدان مغناطیسی است) دارد (شکل ۱-الف). قانون زاویه حاده نشان می‌دهد که جدا از جهت  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ، نقطه کاتدی تمایل به حرکت در جهت باز زاویه حاده‌ی بین بردار میدان مغناطیسی  $\mathbf{B}$  و تصویر آن بر روی سطح کاتد دارد (شکل ۱-ب). با توجه به این قوانین، دو وضعیت اصلی برای اعمال میدان مغناطیسی بر روی سطح کاتد، شامل میدان "عبوری" و "انحنادار" امکان‌پذیر است. در میدان مغناطیسی عبوری، خطوط میدان مغناطیسی عمود بر سطح کاتد و در میدان مغناطیسی انحنادار، خطوط میدان انحنایی مانند تونل بر روی سطح کاتد ایجاد می‌شوند [۵]. از میدان مغناطیسی عبوری فقط در کاتدهای با حرکت نقطه کاتدی محوری (دارای مولفه حرکت در راستای عمود بر سطح کاتد) مانند کاتد مخروطی شکل و از میدان‌های انحنادار در کاتدهای دیسکی مسطح استفاده می‌شود. از روش‌های متداول ایجاد میدان انحنادار استفاده از آهنربای شعاعی زیر کاتد است اما این روش باعث ایجاد یک نوار سایش باریک شده، و میزان مصرف کاتد را کاهش می‌دهد. در این پژوهش جهت کنترل حرکت نقطه کاتدی از یک آهنربای شعاعی در زیر کاتد استفاده شده است. همچنین برای بهبود مصرف کاتد

از یک سیم پیچ مغناطیسی در اطراف کاتد استفاده شده و اثر جریان سیم پیچ بر چگونگی جابجایی نوار سایش و ولتاژ قوس مورد بررسی قرار گرفته است.

### مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از یک دستگاه رسوب دهی قوس کاتدی با ولتاژ مدار باز  $90V$  و حداکثر جریان  $500A$  استفاده شد. رسوب دهی در جریان قوس  $80A$  انجام گردید. از یک قطعه آلومینیمی با قطر  $60mm$  و ضخامت  $12mm$  با سیستم آبگرد مستقیم، به عنوان کاتد استفاده شد. آند مسی حلقوی با قطر  $60mm$  و ارتفاع  $55mm$  در فاصله  $5mm$  از سطح کاتد استفاده شد. برای ایجاد میدان مغناطیسی انحنادار، یک آهنربای شعاعی از جنس  $SmCo$ ، به فاصله  $6mm$  از زیر کاتد قرار گرفت. بیشینه میدان مغناطیسی آهنربا بر روی سطح کاتد برابر  $0.1T$  است. همچنین یک سیم پیچ مسی به قطر داخلی  $175mm$  و با تعداد  $1245$  دور سیم، برای تغییر مکان نوار سایش در حول کاتد قرار گرفت. شماتیک نحوه چیدمان کاتد، آند، آهنربا و سیم پیچ در شکل ۲ نشان داده شده است. ولتاژ قوس بین آند و کاتد با تغییرات جریان سیم پیچ ( $0A-0.3A-0.5A-1.5A$ ) توسط مولتی متر مدل SA-8515 اندازه گیری شد. برای شبیه سازی نحوه توزیع و شدت میدان مغناطیسی بر روی کاتد و همچنین محل قرارگیری نوار سایش بر روی سطح کاتد، از نرم افزار  $Femm4.2$ ، استفاده شد. این نرم افزار با استفاده از روش المان محدود و در حالت دو بعدی مسائل را شبیه سازی می کند.

### نتایج و بحث

شکل ۳-الف یک کاتد آلومینیمی تبخیر شده توسط قوس تصادفی را نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می شود تمام سطح کاتد حتی مناطق لبه ای آن در اثر حرکت تصادفی نقطه کاتدی دچار سایش شده است. در قسمت هایی از لبه کاتد، هیچ سایشی مشاهده نمی شود که مربوط به قرارگیری حفاظ کاتد در آن قسمت ها است (در شکل ۳-الف با علامت + نشان داده شده است). مقدار ولتاژ قوس در حین این فرآیند برابر  $177$  اندازه گیری شد.

خطوط میدان مغناطیسی آهنربا  $SmCo$ ، حاصل از شبیه سازی در شکل ۴-الف نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود این خطوط انحنایی را بر روی سطح کاتد تشکیل می دهند (میدان مغناطیسی انحنادار). طبق قوانین حرکت برگشتی و زاویه حاده که در قسمت مقدمه به آن اشاره شد، نقطه کاتدی در اثر اعمال میدان مغناطیسی به مکانی که در آن  $B_n=0$  است، رانده شده و شروع به چرخش در آن منطقه می کند. با توجه به خطوط میدان به دست آمده از شبیه سازی،  $B_n=0$  (منحنی ■ در شکل ۵) در فاصله  $22mm$  رخ می دهد. بنابراین فاصله نوار سایش در فاصله  $22mm$  از مرکز کاتد خواهد بود. نوار سایش بدست آمده با آهنربای  $SmCo$  در شکل ۳-ب نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود، مکان نوار سایش بدست آمده با نتایج شبیه سازی دارای تطابق خوبی است. ولتاژ قوس در این حالت برابر  $167$  بدست آمد که از ولتاژ قوس در حالت

تصادفی نیز کمتر است. دلیل این امر را می توان به تعداد بالای خطوط میدان مغناطیسی که از سمت کاتد آغاز و به سمت آنند کشیده شده اند مربوط دانست (شکل ۴-الف). در واقع الکترون ها به علت سبک بودن، تحت اثر میدان مغناطیسی قرار گرفته و در جهت میدان مغناطیسی حرکت می کنند. به عبارت دیگر این میدان مغناطیسی، پتانسیل مورد نیاز برای انتقال الکترون ها از سمت کاتد به آنند را کاهش داده و در نتیجه ولتاژ قوس کاهش می یابد.

علی رغم کنترل بهینه نقطه کاتدی و کاهش ولتاژ قوس در حضور این نوع از پیکربندی میدان مغناطیسی، میزان مصرف کاتد پایین است، از این رو با افزودن یک سیم پیچ حول کاتد و تغییر مکانی که در آن  $B_n=0$  است، موقعیت نوار سایش تغییر داده می شود تا میزان مصرف کاتد بهبود یابد. جهت جریان اعمال شده در سیم پیچ (ساعتگرد- پادساعتگرد) بر نحوه توزیع خطوط میدان مغناطیسی اثر گذار است. اثر جهت جریان سیم پیچ بر خطوط مغناطیسی در شکل ۴-ب و ۴-ج نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-ب مشاهده می شود در جریان سیم پیچ به صورت ساعتگرد، بر آیند خطوط میدان مغناطیسی آهنربا و سیم پیچ مانند حالت قبل (SmCo تنها) انحنایی را بر روی سطح کاتد تشکیل می دهد، با این تفاوت که مکانی که در آن  $B_n=0$  است، با جریان سیم پیچ تغییر می کند و به سمت مرکز کاتد انتقال می یابد. تغییر مکان نوار سایش ( $B_n=0$ ) با جریان، برای حالت ساعتگرد در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش جریان تا ۱/۵A، مکان نوار سایش به فاصله ۹mm از مرکز کاتد منتقل می شود (منحنی ● در شکل ۵). افزایش پهنای منطقه سایش یافته در اثر تغییر جریان سیم پیچ (ناشی از جابه جایی نوار سایش) در شکل ۳-ج نشان داده شده است. این موضوع به این معناست که با تغییر جریان سیم پیچ، نوار سایش جابه جا گشته، در قسمت های مختلفی از کاتد تشکیل شده، در نتیجه بخش بیشتری از کاتد قابل استفاده خواهد شد. علی رغم افزایش بهبود مصرف کاتد، افزایش شدت جریان سیم پیچ، منجر به بالا رفتن ولتاژ قوس می شود. تغییرات ولتاژ قوس با جریان سیم پیچ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، افزایش جریان سیم پیچ از ۰A به ۱/۵ A سبب افزایش ولتاژ قوس از ۱۶V به ۳۰V می شود.

دو دلیل برای افزایش ولتاژ قوس در حضور میدان مغناطیسی ذکر شده است. اول این که الکترون های موجود در پلازما در حضور میدان مغناطیسی به صورت مارپیچی به سمت آنند حرکت می کنند و لذا مسیر حرکت الکترون ها از کاتد به آنند افزایش می یابد. همچنین الکترون ها در محیط پلازما و در حضور نیروی حاصل از میدان مغناطیسی دچار برخورد بیشتری با یکدیگر و با یون ها شده و در مسیر حرکت خود به سمت آنند دچار مشکل می شوند. همچنین افزایش مسیر حرکت الکترون ها و تعداد تصادم ها آن ها، افزایش مقاومت پلازما و در نتیجه افزایش ولتاژ قوس را به همراه خواهد داشت [۷]. همان طور که در شکل مشاهده می شود، افزایش شدت جریان سیم پیچ در جهت ساعتگرد، تعداد خطوطی که از کاتد آغاز شده و به آنند می رسند، به میزان زیادی کاهش یافته (شکل ۴-ب) و میدان مغناطیسی به عنوان مانعی در برابر حرکت الکترون ها به سمت آنند عمل

می نماید. در نتیجه مقدار ولتاژ قوس با شیب زیادی افزایش یافته و باعث کاهش پایداری قوس خواهد شد (شکل ۶).

با اعمال جریان سیم پیچ به صورت پادساعتگرد، یک میدان عبوری ایجاد می شود که با توجه به قانون زاویه حاده، نقطه کاتدی را به سمت لبه کاتد هدایت می کند و می تواند باعث آسیب رسیدن به حفاظ کاتد شود. در این حالت میزان افزایش ولتاژ قوس، کم تر از جریان ساعتگرد است، به طوری که در جریان  $1/5A$  میزان ولتاژ قوس برابر  $22V$  است (۴-ج و ۷). همچنان که در شکل ۴-ج مشاهده می شود، مقدار خطوط کشیده شده از کاتد به آند نسبت به جریان ساعتگرد بیشتر است، در نتیجه ولتاژ قوس با شیب کمتری نسبت به حالتی که جریان سیم پیچ به صورت ساعتگرد است، افزایش می یابد. چنین میدانی به دلیل قرار گرفته نقطه کاتدی در لبه کاتد مفید نیست.

### نتیجه گیری

۱) در فرآیند قوس کاتدی، اعمال میدان مغناطیسی انحنادار توسط یک آهنربای شعاعی SmCo باعث کنترل حرکت نقطه کاتدی در یک نوار سایش باریک در فاصله  $22mm$  از مرکز کاتد تشکیل شده و از خروج نقطه کاتدی به لبه کاتد جلوگیری می کند ولی میزان مصرف کاتد کاهش می یابد.

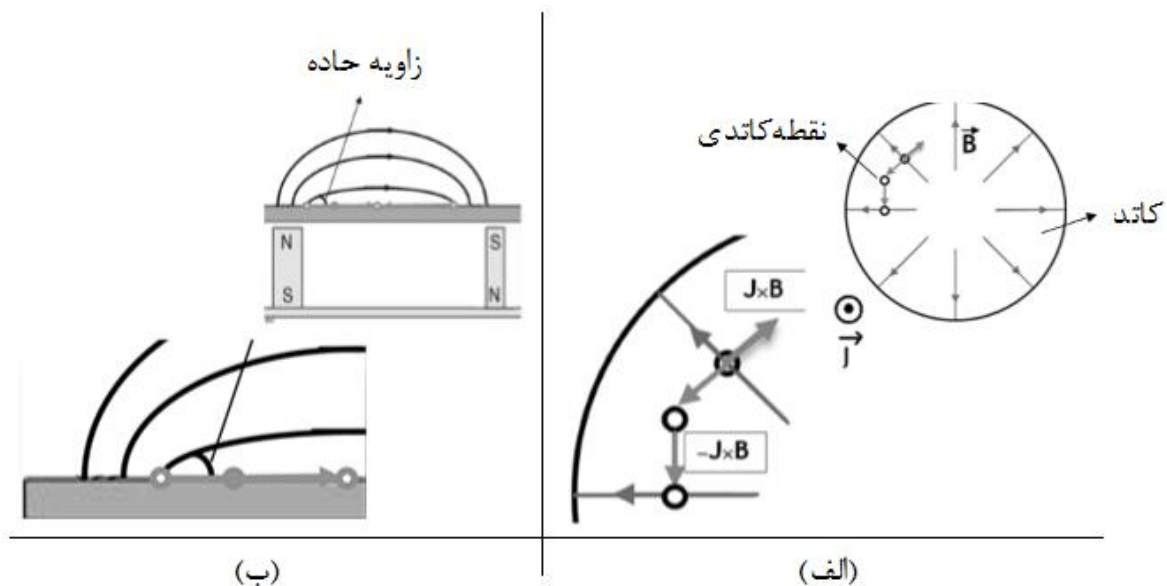
۲) با افزودن سیم پیچ حول کاتد و کنترل جریان آن می توان مکان نوار سایش را تغییر داد. تغییر جریان سیم پیچ بین  $0A$  تا  $1/5A$  در جهت ساعتگرد، مکان نوار سایش را از فاصله  $22mm$  از مرکز کاتد به  $9mm$  آن جابه جا می کند. در نتیجه سطح بیشتری از کاتد توسط نقطه کاتد روبش شده و میزان مصرف کاتد بهبود می یابد. اما این بهبود مصرف کاتد همراه با افزایش ولتاژ قوس خواهد بود به صورتی که در جریان  $0A$  ولتاژ قوس برابر  $16V$  و در جریان سیم پیچ  $1/5A$  برابر  $30V$  خواهد بود که منبعی با ولتاژ مدار باز بیشتری جهت حفظ پایداری قوس نیاز خواهد بود.

۳) در جریان سیم پیچ پاد ساعتگرد حرکت نوار سایش به سمت لبه کاتد خواهد بود. حرکت نوار به سمت لبه تخریب حفاظ و قطع قوس را به همراه خواهد داشت. بنابراین انتخاب درست جهت جریان در سیم پیچ مهم بوده و نباید به صورت پاد ساعتگرد (برای سیستم مورد بررسی در این مقاله) قرار داده شود.

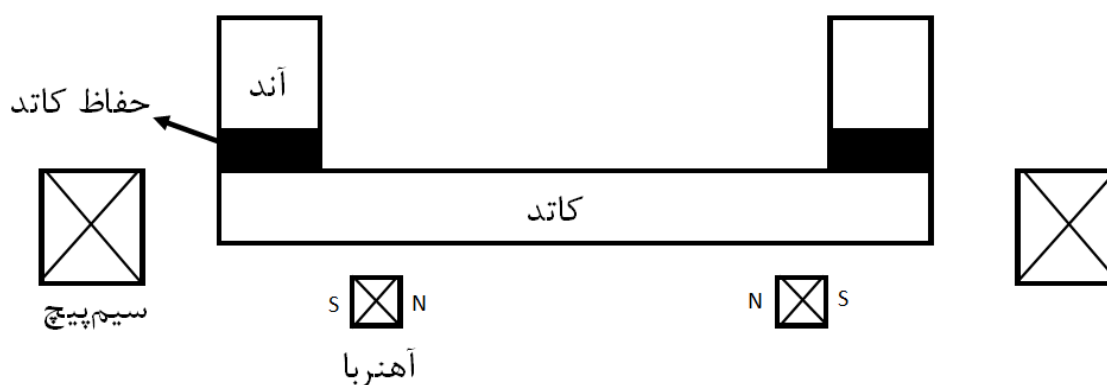
### مراجع

1. A. Anders, "Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation", *Springer Science & Business Media*, vol. 50, 2009.
2. R. L. Boxman, "Recent developments in vacuum arc deposition", *Plasma Sci. IEEE Trans*, vol. 29, no. 5, 2001, 762-767.
3. W. C. Lang, J. Q. Xiao, J. Gong, C. Sun, R. F. Huang, and L. S. Wen, "Study on cathode spot motion and macroparticles reduction in axisymmetric magnetic field-enhanced vacuum arc deposition", *Vacuum*, vol. 84, no. 9, 2010, pp. 1111-1117.
4. V. N. Zhitomirsky, R. L. Boxman, and S. Goldsmith, "Unstable arc operation and cathode

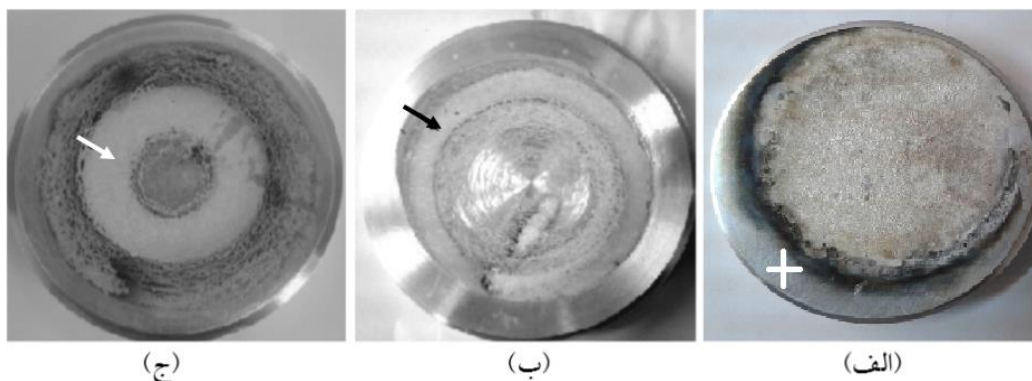
- spot motion in a magnetically filtered vacuum-arc deposition system” , *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 13, no. 4, 1995, pp. 2233–2240.
5. R. L. Boxman and V. N. Zhitomirsky, “Vacuum arc deposition devices” , *Rev. Sci. Instrum*” , vol. 77, 2006 no. 2, p. 21101.
6. P. J. Walke, R. New, and C. M. Care, “Behaviour of a steered cathodic arc as a function of steering magnetic field” , *Surf. Coatings Technol.*, vol. 59, no. 1, 1993, pp. 126–128.
7. M. S. A. R. Holmes, “Arcing voltage of the metal vapour vacuum arc” , *J. Phys. D Appl. Phys*, vol. 17, 1984, pp. 757–767.
8. A. P. Ehiasarian, P. E. Hovsepian, R. New, and J. Valter, “Influence of steering magnetic field on the time-resolved plasma chemistry in cathodic arc discharges,” *J. Phys. D. Appl. Phys*” , vol. 37, no. 15, p. 2101, 2004.



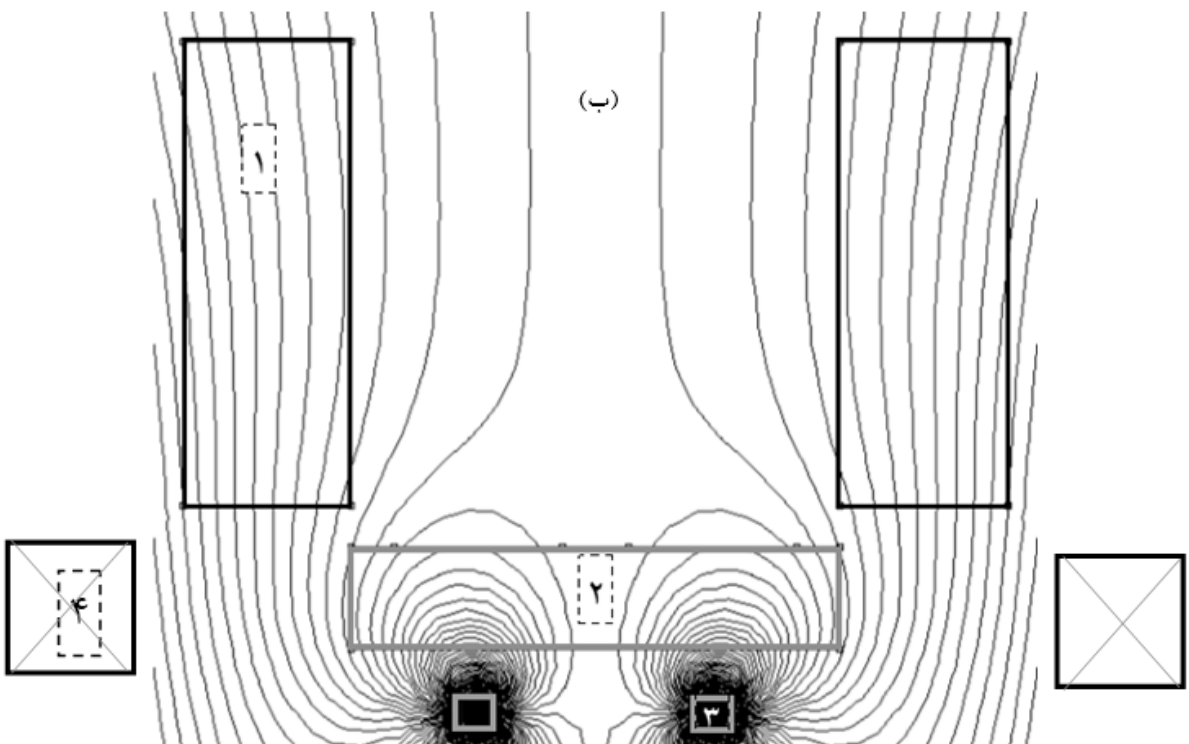
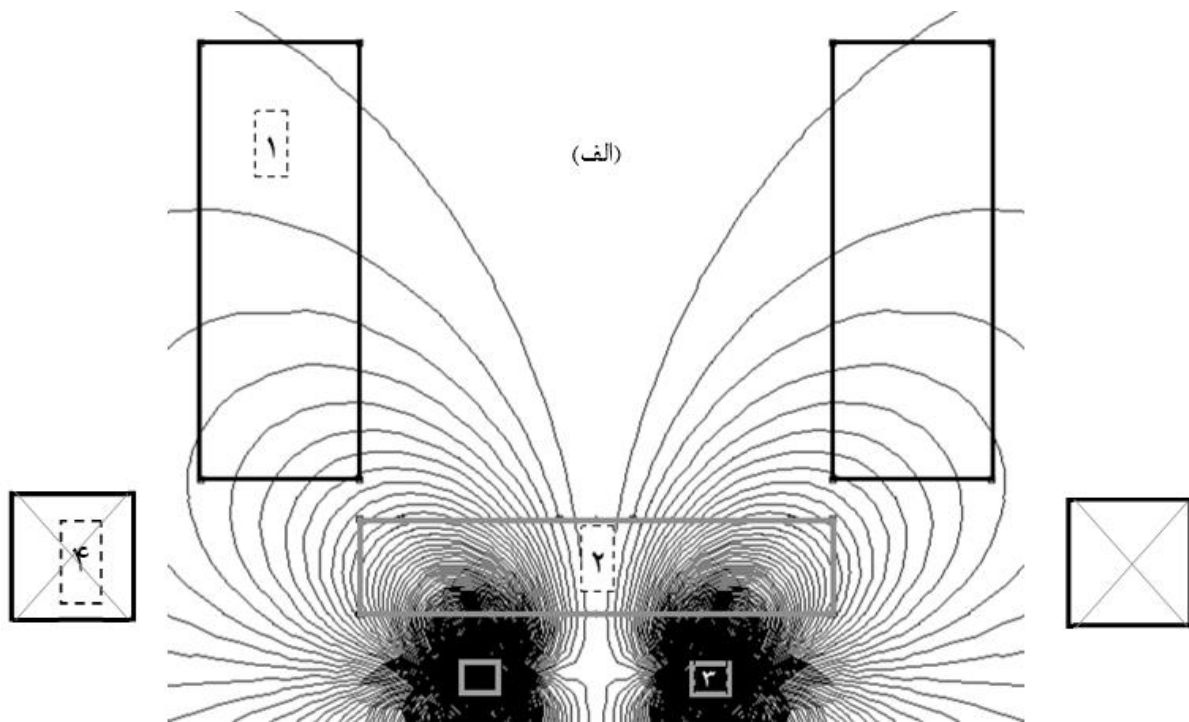
شکل ۱: (الف) اساس حرکت نقطه کاتدی با توجه به قانون حرکت برگشتی (ب) نحوه حرکت نقطه کاتدی طبق قانون زاویه حاده.



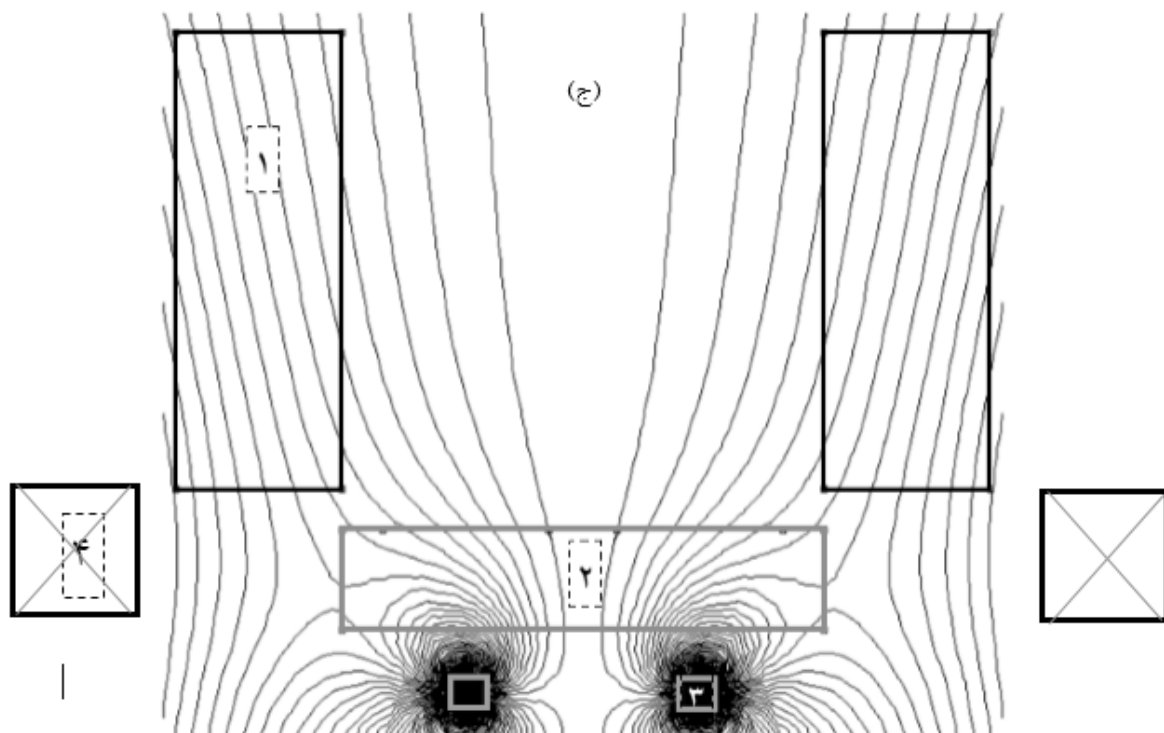
شکل ۲: شماتیک نحوه پیکربندی سیستم میدان مغناطیسی در فرآیند قوس کاتدی.



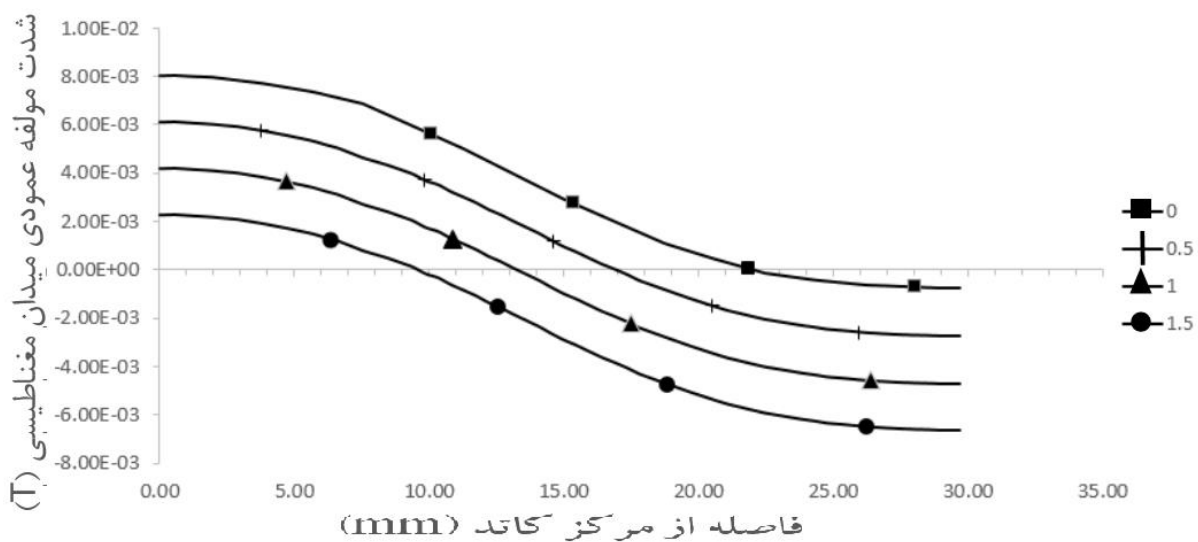
شکل ۳: اثر سایش به جا مانده از حرکت نقاط کاتدی بر روی سطح کاتد در (الف) عدم حضور میدان مغناطیسی. (ب) حضور آهنربای دائمی ( $I_{coil}=0$ ). (ج) حضور آهنربای دائمی و تغییر جریان سیم پیچ از  $0.5A$  تا  $1.5A$ . پیکان‌ها نشان دهنده مکان نوار سایش هستند.



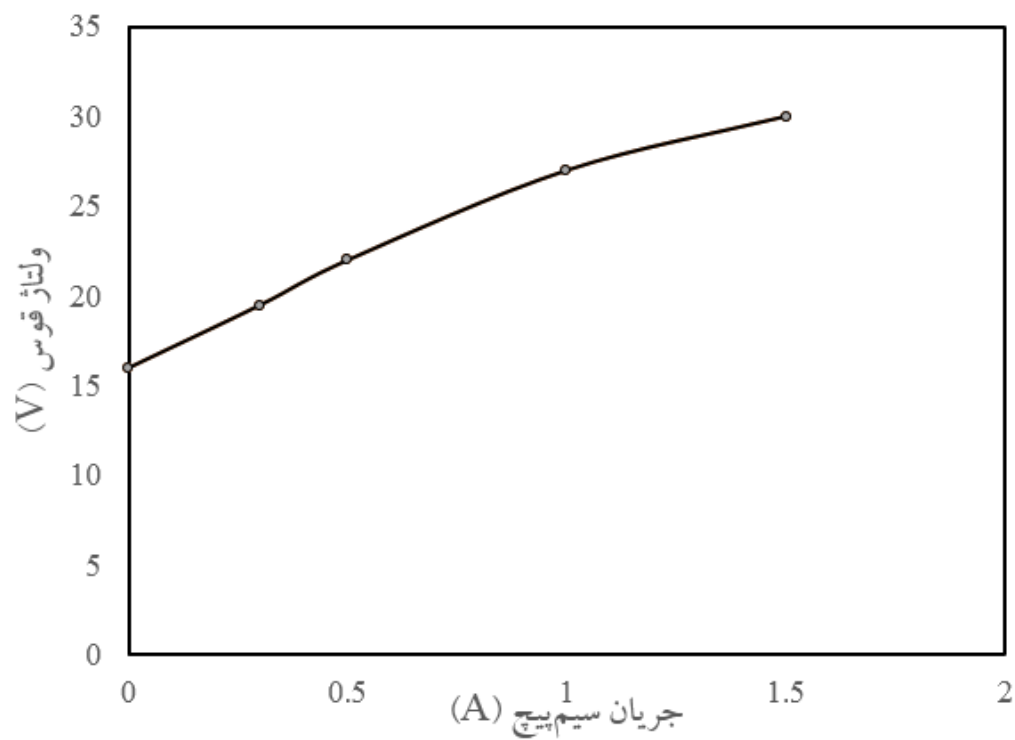




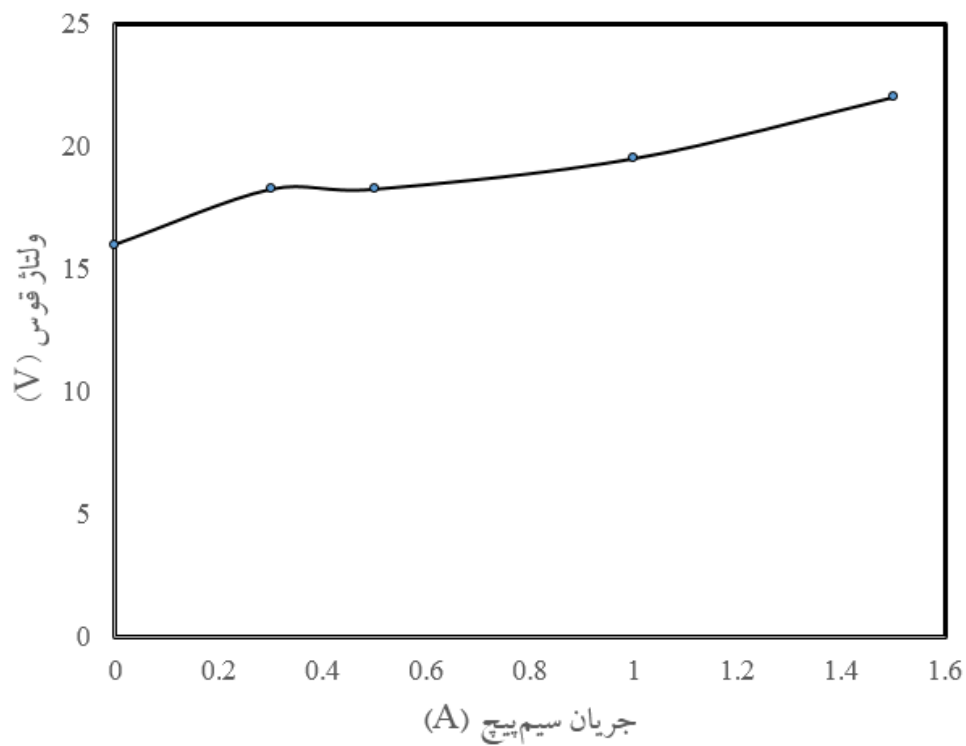
شکل ۴: نحوه توزیع خطوط میدان مغناطیسی در فضای بین آند و کاتد. الف)  $I_{coil} = 0 A$  ب)  $I_{coil} = -1 A$  به صورت ساعتگرد و ج)  $I_{coil} = 1 A$  به صورت پادساعتگرد (۱ آند ۲ کاتد ۳ آهنربای دائمی ۴ سیم پیچ).



شکل ۵: تغییر شدت مولفه عمودی میدان مغناطیسی ( $B_n$ ) با فاصله از مرکز کاتد در شدت جریان‌های مغناطیسی متفاوت.



شکل ۶: نحوه تغییرات ولتاژ قوس با تغییر جریان سیم پیچ (جریان به صورت ساعتگرد اعمال شده است).



شکل ۷: نحوه تغییرات ولتاژ قوس با تغییر جریان سیم پیچ (جریان به صورت پادساعتگرد اعمال شده است).