

## بررسی تأثیر شکل دهی سهموی کاتد بر عملکرد مگنترون نسبیتی

حسن زیبایی نژاد<sup>۱</sup>، حبیب‌اله عبیری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۶/۰۸/۱۳؛ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۲)

### چکیده

در این مقاله نشان داده شده است که شکل دهی کاتد مگنترون در راستای محور تقارن، منجر به تغییر منحنی‌های هال و هارتری آن می‌شود به طوری که مجموعه‌ای از منحنی‌ها به جای دو منحنی ایجاد می‌شود. این امر سبب می‌شود که احتمال تحریک همه مدها و هارمونیک‌ها فراهم شود. در نتیجه یک لامپ پهن‌بند به وجود می‌آید. برای نمونه بدون اعمال تغییر در ساختار آند مگنترون، کاتد مگنترون نسبیتی A6 با حفظ تقارن محوری در راستای محور به طور سهموی شکل داده شد و با استفاده از یک شبیه‌ساز سه‌بعدی ذره در سلول، نشان داده شد که توان خروجی به بیش از ۴۰۰ MW می‌رسد در حالی که گستره فرکانسی ۲۰-۵ GHz می‌باشد.

### واژگان کلیدی

مگنترون نسبیتی، شکل دهی کاتد، شبیه‌سازی ذره در سلول، پهن‌بند

### ۱- مقدمه

شده که می‌توان با استفاده از مگنترونی که کاتد آن با حفظ تقارن محوری به طور سهموی در راستای محور شکل داده شده، یک منبع تولید امواج میکروویو پرتوان پهن‌بند تولید کرد. در این مقاله برای سهولت، در متن، مگنترون پیش از شکل دهی کاتد، مگنترون پایه و کاتد آن، کاتد پایه نام یافته است. همچنین مگنترون بعد از شکل دهی کاتد، مگنترون جدید و کاتد آن، کاتد شکل دهی شده نامیده شده است.

مگنترون نسبیتی به عنوان یکی از منابع تولید امواج میکروویو پرتوان معرفی شده است [۱-۳]. اصول کلی حاکم بر این لامپ شبیه مگنترون معمولی (غیر نسبیتی) است بدین معنی که الکترون‌های خارج‌شونده از کاتد در فضای استوانه‌ای بین کاتد و آند تحت تأثیر میدان‌های متقاطع الکتریکی (در راستای شعاع  $r$ ) و مغناطیسی (در راستای محور  $z$ )، حرکت دورانی می‌کنند و اگر ساختار رزونانسی مگنترون به گونه‌ای طراحی شده باشد که سرعت فاز موج RF مربوط به یکی از مدهای نوسانی لامپ با سرعت زاویه‌ای الکترون‌ها هم‌اندازه باشد، در نتیجه خوشه‌هایی<sup>۱</sup> از الکترون‌ها تشکیل می‌شود و این خوشه‌ها هم فاز با موج RF حرکت می‌کنند و موج RF را تقویت می‌نمایند [۴ و ۵]. مگنترون‌ها به‌ویژه مگنترون‌های نسبیتی به عنوان منبع تولید موج تک‌فرکانس در رادارها همواره مدنظر بوده‌اند و مطالعه و تحقیق درباره انواع مگنترون‌ها در محدوده‌های فرکانسی متنوع همچنان ادامه دارد [۶-۸]. در این مقاله با استفاده از یک روش جدید و ساده یعنی شکل دهی کاتد، یک لامپ پهن‌بند طراحی شده است که می‌تواند به عنوان اخلاکگر کاربرد داشته باشد. در این جا در ابتدا از منظر تئوری تأثیر شکل دهی کاتد بر روی منحنی‌های هارتری و هال مورد بررسی قرار گرفته است و سپس نشان داده

### ۲- شکل دهی کاتد و تأثیر آن بر منحنی‌های هال و

#### هارتری

معمولاً در مگنترون‌ها از کلاهک کاتد<sup>۲</sup> در دو طرف کاتد استفاده می‌نمایند این کار باعث ایجاد یک میدان محوری در لبه‌های کاتد می‌شود که نیرویی به سمت مرکز آند، به الکترون‌ها اعمال می‌کند و صرفاً باعث می‌شود بخشی از الکترون‌ها، از فضای کاتد- آند خارج نشوند. در اینجا، با فراتر گذاشته شد و کاتد به طور کلی تغییر شکل یافته به گونه‌ای که ضمن حفظ تقارن محوری، اندازه شعاع کاتد با مختصه محور تقارن ( $z$ ) تغییر کند. اگر  $r_c = f(z)$  باشد، در این وضعیت، شرایط مرزی ایجاب می‌کند که میدان‌های مماسی بر سطح کاتد صفر باشند. در نتیجه، میدان الکتریکی، فقط مؤلفه‌ی عمودی روی سطح کاتد خواهد داشت و از آنجا که بردار نرمال سطح کاتد جدید یک

\* نویسنده مسئول: abiri@shirazu.ac.ir

$$\frac{\partial L}{\partial z} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) \quad (۶)$$

از آنجا که همچنان لاگرانژی  $L$  تابعی از  $\varphi$  نیست می‌توان رابطه (۵) را به صورت  $\frac{\partial L}{\partial \varphi} = \text{Cons.}$  نوشت یا به عبارتی  $\frac{\partial L}{\partial \varphi} \Big|_{r=r_c} = \frac{\partial L}{\partial \varphi} \Big|_{r=r_a}$  از سویی با توجه به رابطه (۲)، می‌توان نوشت:  $\frac{\partial L}{\partial \varphi} = r p_\varphi + q r A_\varphi / c$  در نتیجه با توجه به این رابطه و ناچیز بودن سرعت ذره در لحظه خروج از کاتد می‌توان نوشت:

$$p_\varphi \Big|_{r=r_a} = \frac{-q(r_a^2 - r_c^2)}{2cr_a} B_z \quad (۷)$$

توجه شود که در مگنترون پایه، برای مختصه  $z$  هم می‌شد نوشت؛  $\frac{\partial L}{\partial z} = \text{Cons.}$  در حالی که بعد از شکل‌دهی کاتد، لاگرانژی  $L$  تابعی از مختصه  $z$  است و نمی‌توان این‌گونه نوشت مگر آنکه اثر میدان الکتریکی محوری ناچیز انگاشته شود.

از روابط (۲) و (۶) می‌توان نوشت  $\frac{d}{dt}(p_z + qA_z) = qE_z$  اما از آنجایی که در اینجا میدان مغناطیسی صرفاً در راستای  $z$  است مقدار  $A_z$  صفر است، پس  $\frac{d}{dt}(p_z) = qE_z$  و یا به عبارتی دیگر:

$$p_z = \int qE_z dt \quad (۸)$$

اما همچنان لاگرانژی به‌طور صریح مستقل از زمان است لذا هامیلتونی یک ثابت حرکت است<sup>۱</sup>. در نتیجه مقدار آن برای هر ذره روی کاتد و آند یکسان است یعنی  $H|_{r_a} = H|_{r_c}$  با توجه به اینکه پتانسیل الکتریکی کاتد و آند به ترتیب برابر با  $-V_0$  و  $0$  است و همچنین سرعت الکترون‌ها در لحظه خروج از کاتد صفر است، می‌توان با توجه به رابطه (۳) نوشت:

$$m_0 c^2 - qV_0 = \left[ (m_0^2 c^4 + c^2 p_r^2 + c^2 p_\varphi^2 + c^2 p_z^2)^{1/2} \right]_{r=r_a} \quad (۹)$$

از آنجا که شرط قطع هال ایجاد می‌کند که الکترون‌ها هیچ مؤلفه شعاعی سرعت در  $r = r_a$  نداشته باشند بنابراین  $p_r|_{r=r_a} = 0$  است و با جای‌گذاری روابط (۷) و (۸) در رابطه (۹)، چنین به دست می‌آید:

$$1 - q \frac{V_0}{m_0 c^2} = \left[ 1 + \frac{(r_a^2 - r_c^2)^2}{4r_a^2} B_z^2 + c^2 \left( \frac{q}{m_0 c^2} \right)^2 \left( \int_{t_c}^{t_a} E_z dt \right)^2 \right]^{1/2} \quad (۱۰)$$

مؤلفه در راستای محور تقارن مگنترون ( $z$ ) دارد، در نتیجه یک میدان الکتریکی محوری در فضای برهم کنش ایجاد می‌شود. اگر شکل‌دهی کاتد به گونه‌ای باشد که مقدار این میدان محوری قابل چشم‌پوشی نباشد، تقریباً همه‌ی الکترون‌ها تحت اثر میدان الکتروستاتیک یک حرکت دورانی سه‌بعدی را پس از خروج از کاتد به سمت مرکز آند تجربه می‌کنند. در اینجا نشان داده خواهد شد که این میدان محوری باعث تغییر در منحنی‌های هال و هارتری می‌شود. بدین منظور، دوباره روابط قطع هال و هارتری را به دست آمده است.

## ۲-۱- تغییر منحنی هال پس از شکل‌دهی کاتد

به‌طور ساده برای یافتن منحنی هال در مگنترون می‌توان از روش لاولیس<sup>۱</sup> و یانگ<sup>۲</sup> [۹] استفاده کرد. بدین ترتیب که می‌توان برای یک الکترون، هامیلتونی را بدین صورت نوشت.

$$H = r \frac{\partial L}{\partial r} + \dot{\varphi} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} + \dot{z} \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} - L \quad (۱)$$

که در آن، علامت نقطه، بیانگر مشتق زمانی و  $(r, \varphi, z)$  بیانگر مختصات در دستگاه استوانه‌ای و  $L$ ، لاگرانژی مناسب برای حرکت نسبی ذره باردار با جرم سکون  $m_0$  و بار الکتریکی  $q$  با سرعت  $\vec{v}$  در پتانسیل الکتریکی  $V$  و پتانسیل مغناطیسی  $A$  است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$L = -m_0 c^2 \sqrt{1 - (v/c)^2} - qV + q \vec{v} \cdot \vec{A} / c \quad (۲)$$

و  $c$  سرعت نور است. در نتیجه، هامیلتونی این‌گونه نوشته می‌شود:

$$H = (m_0^2 c^4 + c^2 p_r^2 + c^2 p_\varphi^2 + c^2 p_z^2)^{1/2} + qV \quad (۳)$$

که در آن،  $p_r$ ،  $p_\varphi$  و  $p_z$  مؤلفه‌های تکانه حرکت ذره هستند.

همان‌طور که گفته شد، شکل‌دهی کاتد، باعث ایجاد یک مؤلفه محوری میدان الکتریکی ( $E_z$ ) می‌شود، به عبارت دیگر پتانسیل الکتریکی در مگنترون جدید برخلاف پتانسیل الکتریکی در مگنترون پایه که تنها تابعی از مختصه  $r$  بود تابعی از مختصه  $z$  هم می‌شود. یعنی  $V = V(r, z)$ . پس برخلاف مگنترون پایه، لاگرانژی ذره، تابعی از هر دو مختصه  $r$  و  $z$  است. همچنین با توجه به معادله لاگرانژ، می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial L}{\partial r} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} \right) \quad (۴)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) \quad (۵)$$

که در آن،  $t_c$  و  $t_a$  به ترتیب زمان خروج ذره از کاتد و زمان رسیدن ذره به آند است. مقدار  $E_z$  در جمله‌ی آخر درون کروشه تابعی از پتانسیل کاتد است. همچنین انتگرال مربوطه، وابسته به مسیر حرکت ذره و مکان خروج ذره از روی کاتد است. از آنجا که این انتگرال فقط تابعی از مختصات  $z$  از مکان خروج ذره  $(z_{c,p})$  است، با دست کاری رابطه (۱۰) می‌توان نوشت؛

$$1 - q \frac{V_0}{m_0 c^2} = \left[ 1 + \frac{(r_a^2 - r_c^2)^2}{4 r_a^2} B_z^2 + c^2 \left( \frac{q}{m_0 c^2} \right)^2 \left( \int_{t_c}^{t_a} E_z dt \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$R(V_0, z_{c,p}) = \frac{q}{m_0 c} \int_{t_c}^{t_a} E_z dt$$

که در آن، همان‌طور که مشخص است اگر شکل دهی کاتد انجام نشود، مقدار  $E_z$  قابل صرف نظر کردن است و مقدار  $R(V_0, z_{c,p})$  برابر صفر می‌شود و رابطه (۱۱) به رابطه متداول حال تبدیل می‌شود. اضافه شدن جمله  $[R(V_0, z_{c,p})]^2$  باعث می‌شود که در یک پتانسیل ثابت، با مقدار کمتری از میدان مغناطیسی، ذره خارج شده از کاتد، با آند، مماس شود و شرط حال اتفاق افتد. از آنجایی که  $R(V_0, z_{c,p})$  وابسته به مسیر است برای چند ذره با  $z_{c,p}$ ‌های مختلف باید منحنی حال را به صورت عددی به دست آورد.

## ۲-۲- تغییر منحنی هارتری

فرض کنید مگنترون جدید در معرض یک میدان الکترومغناطیس چرخشی اختلالی به علاوه میدان‌های ساکن الکتریکی و مغناطیسی متعامد قرار گیرد. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، در مگنترون‌های نسبیتی با کاتد شکل داده، پتانسیل الکتریکی ساکن در فضای برهم کنش تابعی از مختصه  $r$  و مختصه  $z$  است یعنی  $V = V(r, z)$ . در ادامه با بازنگری روش لاولیس<sup>۱</sup> و یانگ<sup>۲</sup> [۹]، منحنی هارتری به دست می‌آید. کل پتانسیل را به صورت جمع پتانسیل ساکن به علاوه یک پتانسیل اختلالی RF می‌توان در نظر گرفت (روابط ۱۲ و ۱۳).

$$V = V_0(r, z) + \delta V(r, \varphi, z, t) \quad (12)$$

$$A = A_0(r) + \delta A(r, \varphi, z, t) \quad (13)$$

توابع اختلالی در دو رابطه (۱۲) و (۱۳) به صورت تابعی از  $f$  و  $g$  به شکل  $\delta V(r, \varphi, z, t) = f(r, \varphi - \omega_0 t, z)$

$$H|_{r_a} = H|_{r_c} \quad (14)$$

برای به دست آوردن شرط نسبیتی هارتری در مگنترون‌های نسبیتی، رابطه (۱۴) به یک الکترون که از حال سکون از کاتد خارج می‌شود و در روی سطح آند  $r = r_a$  با سرعت فاز میدان RF همگام می‌شود، اعمال می‌شود. در روی کاتد  $r = r_c$ ، مرزی بیان می‌دارد که  $\dot{r} = 0$ ،  $\dot{z} = 0$ ،  $\dot{\varphi}' = -\omega_0$  و روی سطح آند شرایط مرزی به صورت  $\dot{r} = 0$ ،  $\dot{z} = 0$ ،  $\dot{\varphi}' = 0$  می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱۴)، رابطه هارتری به صورت زیر به دست می‌آید؛

$$\frac{-qV_0}{m_0 c^2} = -1 + \frac{1 - \frac{r_a^2 \omega^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{r_a^2 \omega^2 + (\dot{z}|_{r=r_a})^2}{c^2}} - \frac{q\omega B_z}{m_0 c^2} \left( \frac{r_a^2 - r_c^2}{2r_a} \right)} \quad (15)$$

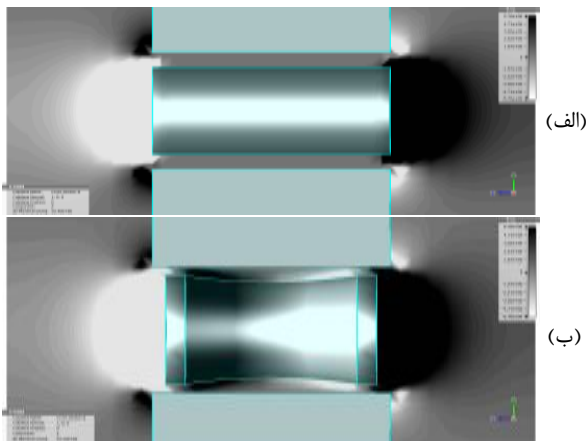
همان‌طور که مشخص است اگر شکل دهی کاتد انجام نشود، مقدار  $r_c$  برابر  $r_{cathode}$  خواهد بود و مقدار  $\dot{z}|_{r=r_a}$  بسیار ناچیز می‌شود و در نتیجه رابطه (۱۵) به رابطه  $\frac{-qV_0}{m_0 c^2} = \sqrt{1 - \frac{r_a^2 \omega^2}{c^2}} - \frac{q\omega B_z}{m_0 c^2} \left( \frac{r_a^2 - r_c^2}{2r_a} \right)$  تبدیل می‌شود که همان رابطه متداول هارتری است. از رابطه (۱۵) مشخص است که منحنی هارتری جدید روی صفحه  $B - V$  تغییر می‌کند به گونه‌ای که برای الکترون‌هایی با  $z_{c,p}$  متفاوت، اگر مقدار  $\dot{z}|_{r=r_a}$  صفر نباشد، مقدار  $V_0$  به ازای  $B_z$  مشخص، افزایش می‌یابد. همچنین از آنجا که  $r_c$  تابعی از مختصه  $z$  است، مقدار  $\frac{q\omega}{m_0 c^2} \left( \frac{r_a^2 - r_c^2}{2r_a} \right)$  تعیین کننده شیب نمودار هارتری است، تابعی از مختصه  $z$  خواهد بود.

## ۳- شکل دهی سهموی کاتد

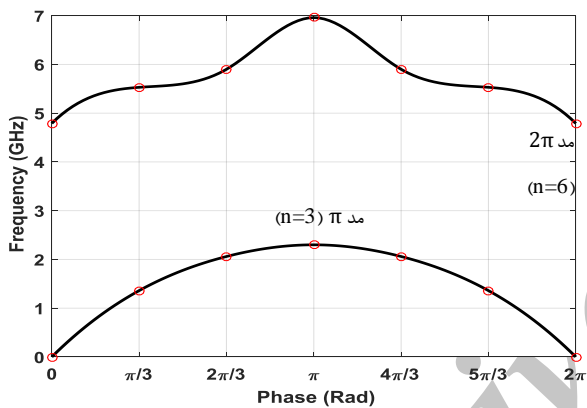
در این مقاله کاتدی در نظر گرفته شده است که شعاع آن با توجه به رابطه سهموی زیر شکل داده شود؛

$$r_c = \frac{4(r_{cap} - r_{cathode})}{h_c^2} z^2 + r_{cathode} \quad (16)$$

1- Lovelace  
2- Young



شکل (۲): توزیع میدان الکتریکی  $E_z$  در سطح مقطعی از (الف) مگنترون پایه و (ب) مگنترون جدید

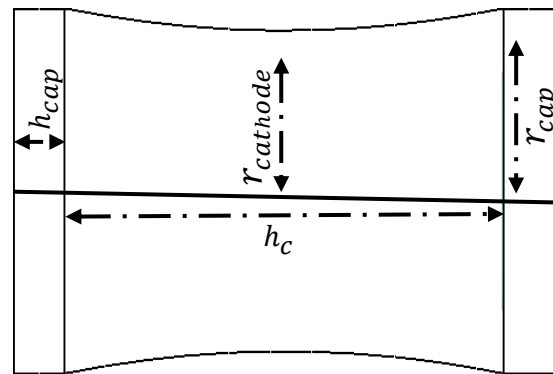


شکل (۳): منحنی پاشندگی مگنترون جدید

منحنی هارتری در فرکانس  $4/76$  GHz (مد  $2\pi$ ) و منحنی حال به صورت عددی (با تقریب ۱٪ خطا در محاسبه شعاع مسیر حرکت) برای الکترون‌هایی با  $z_{c,p}$  های مختلف به صورت زیر به دست آمده است و در شکل (۴) رسم شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود برخلاف حالت معمول، روابط هارتری و حال منجر به یک منحنی نمی‌شوند و به صورت دسته‌ای از منحنی‌ها خواهند بود که منطبق بر یکدیگر نیستند. از شکل (۴) مشخص است که هیچ نقطه‌ای در صفحه  $(V, B)$  وجود ندارد که در آن، همه منحنی‌های هارتری بر هم منطبق باشند. این بدین معنی است که مقدار  $V$  و  $B$  را نمی‌توان به گونه‌ای انتخاب کرد که سرعت زاویه‌ای همه الکترون‌ها با  $z_{c,p}$  های مختلف، برابر با سرعت فاز مد  $2\pi$  باشد و در نتیجه سرعت زاویه‌ای برخی از آنها بیشتر و یا کمتر خواهد بود. همچنین همان‌طور که از منحنی پاشندگی (شکل ۳) مشخص است، سرعت فاز مد  $\pi$  (مد  $n = N/2$ ) و مدهای  $n = N/2 - 1$  و  $n = N/2 - 2$  بیشتر از سرعت فاز مد  $2\pi$  است. لذا الکترون‌هایی که با سرعت

که در آن، شعاع کاتد  $r_{cathode}$ ، شعاع کاتد پایه، شعاع کلاهک و ارتفاع کاتد باشد. به عبارتی در  $z = 0$  مقدار شعاع کاتد جدید، برابر شعاع کاتد پایه و در  $z = \frac{h_c}{2}$  برابر با شعاع کلاهک خواهد شد. پروفایل کاتد پس از شکل‌دهی در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): کاتد شکل‌دهی‌شده با رابطه سهموی (۱۶)

در این جا مگنترون نسبتی A6 به عنوان مگنترون پایه در نظر گرفته شده است. شعاع بخش گسیل<sup>۱</sup> کاتد برابر با  $1/58$  cm است. آند این مگنترون شامل شش حفره<sup>۲</sup> است که فاصله زاویه آنها از هم ۶۰ درجه است. زاویه دهانه<sup>۳</sup> هر حفره برابر ۲۰ درجه و پهنای پره<sup>۴</sup> ها برابر با ۴۰ درجه است. ارتفاع آند برابر  $7/2$  cm است. شعاع داخلی و بیرونی هر حفره به ترتیب برابر  $2/11$  cm و  $4/11$  cm است.

در رابطه (۱۶) کمینه شعاع کاتد شکل‌دهی‌شده برابر با  $1/58$  cm و بیشینه آن برابر با  $1/8$  cm است. در شکل (۲) میدان الکتریکی  $E_z$  به ازای یک ولتاژ منفی  $350$  KV اعمالی به کاتد در فضای برهم کنش در سطح مقطع مگنترون A6 (شکل ۲-الف) و در مگنترون با کاتد شکل‌دهی‌شده (شکل ۲-ب) نشان داده شده است. این شبیه‌سازی به‌طور سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار CST STUDIO SUITE انجام شده است [۱۰]. واضح است که در فضای برهم کنش مگنترون با کاتد شکل‌دهی‌شده، مقدار  $E_z$  قابل توجه است.

فرکانس مدهای مختلف و منحنی پاشندگی این مگنترون با استفاده از نرم‌افزار CST STUDIO SUITE به دست آمده و در شکل (۳) رسم شده است. مطابق این شکل فرکانس مد  $2\pi$  برابر با  $4/76$  GHz است.

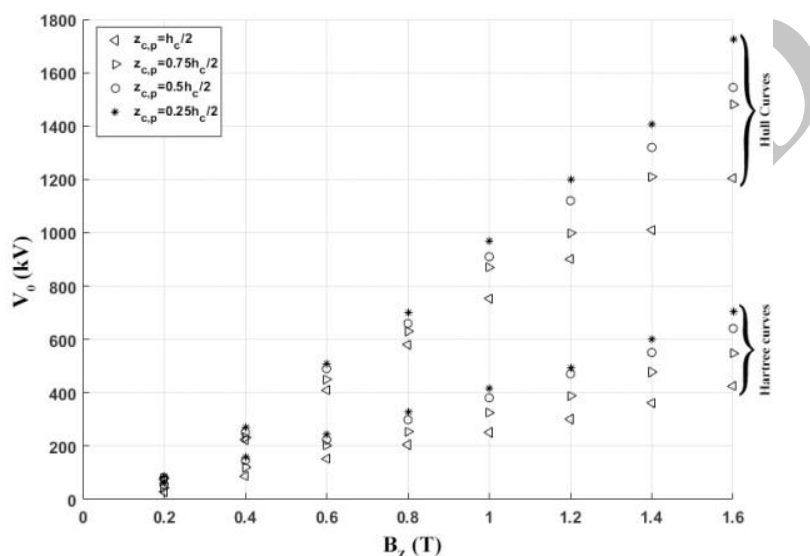
- 1- Emitting
- 2- Cavity
- 3- Opening Angle
- 4- Vanes

محوری در مگنترون به صورت  $B = \omega / \Delta T$  و ولتاژ آند برابر صفر و مقدار ولتاژ کاتد، به طور جداگانه سه مقدار  $V = -350 \text{ kV}$ ،  $V = -370 \text{ kV}$  و  $V = -390 \text{ kV}$  قرار داده شد. همچنین پتانسیل الکتریکی به صورت یک تابع شیب زمانی با عرض پالس  $50 \text{ ns}$  و با زمان خیز  $10 \text{ ns}$  به کاتد لامپ اعمال شده است.

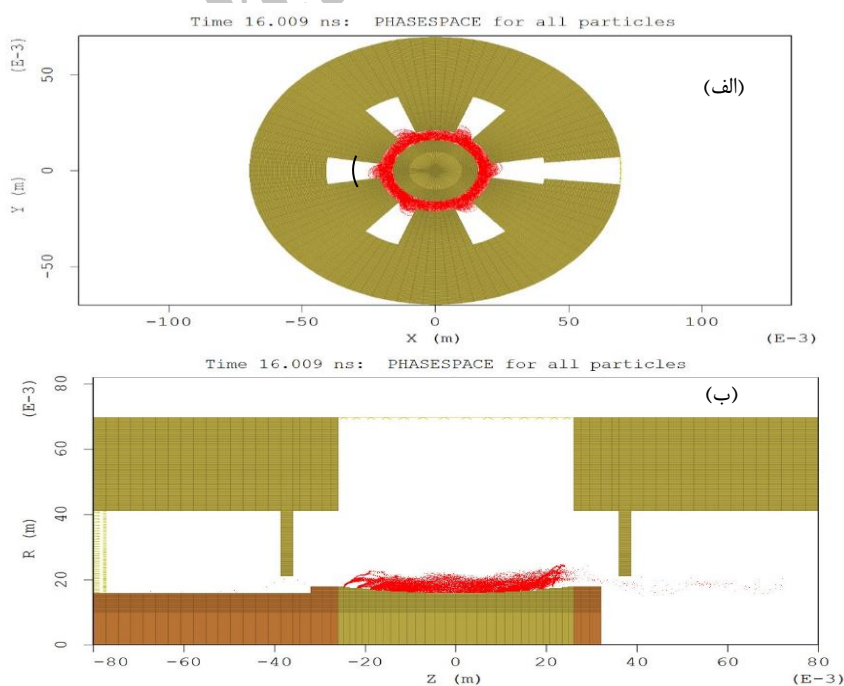
توزیع مکانی الکترون‌ها در مگنترون جدید در دو سطح مقطع مختلف، پس از گذشت  $16 \text{ ns}$ ، در شکل (۵) به ازای ولتاژ اعمالی کاتد برابر با  $-370 \text{ kV}$  نشان داده شده است.

زاویه‌ای بیشتر حرکت می‌کنند می‌توانند با یکی از این سه مد هماهنگ شوند و الکترون‌هایی که با سرعتی کمتر حرکت می‌کنند می‌توانند با مدهای بالاتر هماهنگ شوند. لذا همزمان احتمال وقوع همه مدها کم و بیش وجود دارد.

جهت بررسی این موضوع، عملکرد تست گرم مگنترون جدید باید مورد مطالعه قرار گیرد. بدین منظور از نرم‌افزار MAGIC Tool Suite، که یک نرم‌افزار سه‌بعدی شبیه‌سازی برهم کنش موج و ذره است و شبیه‌سازی آن، برپایه‌ی روش ذره در سلول<sup>۱</sup> است، استفاده شد [۱۲ و ۱۱]. چگالی شار مغناطیسی



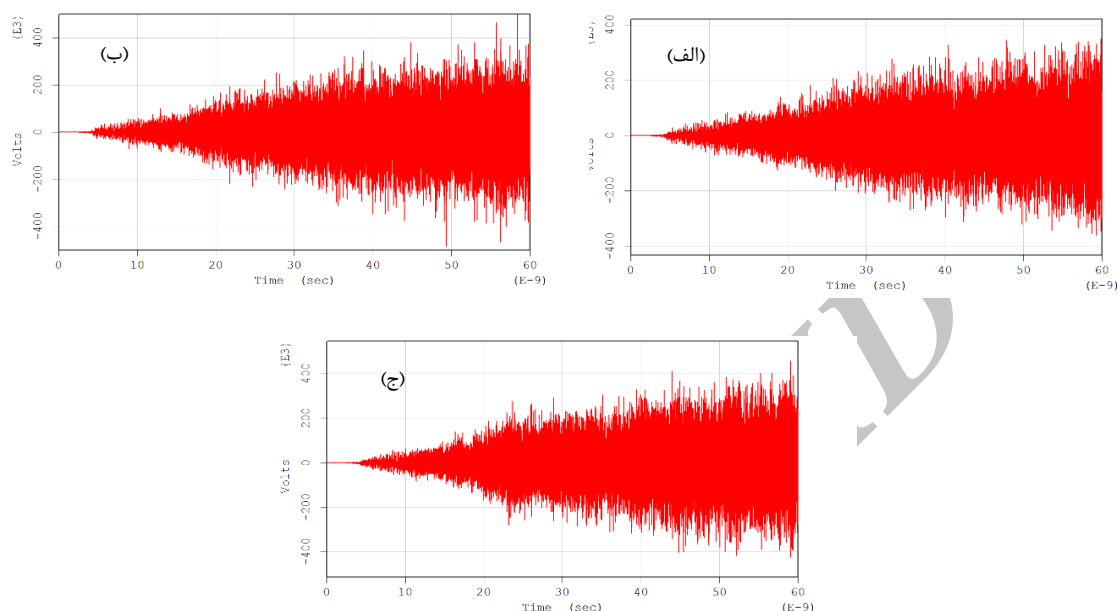
شکل (۴): دسته منحنی‌های هال و هارتری در مگنترون جدید در مکان‌های متفاوت خروج ذرات روی محور  $Z$  ( $Z_{c,p}$ )



شکل (۵): توزیع مکانی الکترون‌ها در زمان  $16 \text{ ns}$  در دو سطح مقطع (الف)  $z = 0$  و (ب)  $y = 0$

در شکل (۶) ولتاژ (انتگرال خطی از میدان الکتریکی سمتی) موج RF تولیدی، در وسط یکی از حفره‌های آند (روی مسیر S در شکل ۵) به‌ازای سه ولتاژ کاند با مقادیر  $350\text{ kV}$ ،  $370\text{ kV}$  و  $390\text{ kV}$  - ترسیم شده است و تبدیل فوریه متناظر، در شکل (۷) به‌طور هم‌زمان ترسیم شده است.

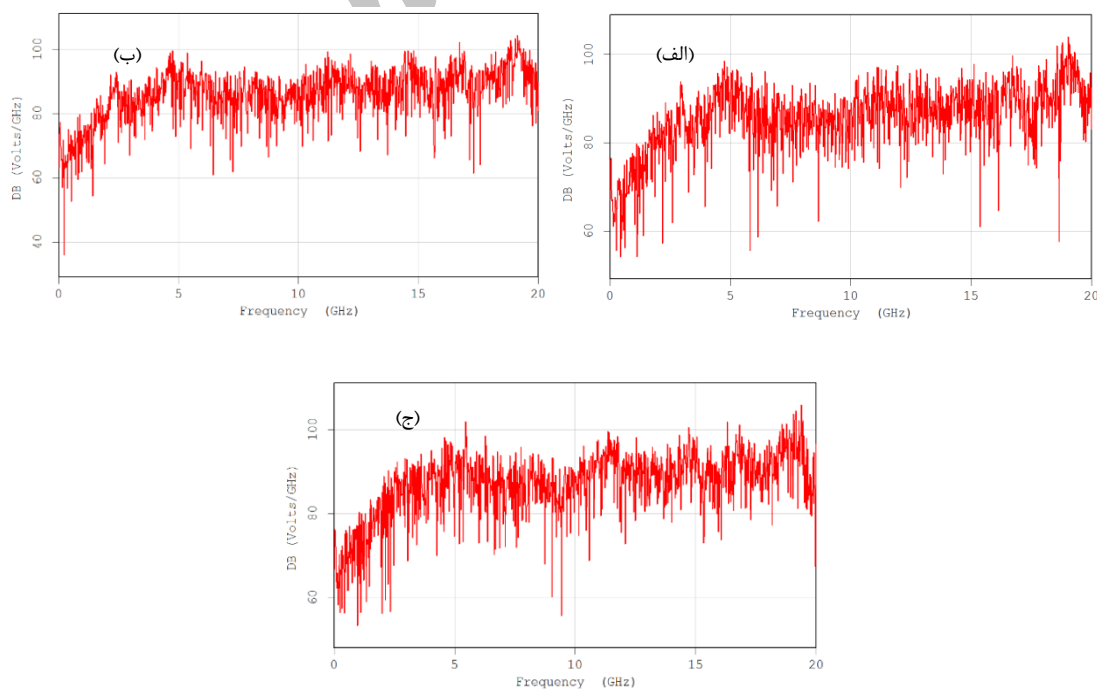
در شکل (۶) ولتاژ (انتگرال خطی از میدان الکتریکی سمتی) موج RF تولیدی، در وسط یکی از حفره‌های آند (روی مسیر S در شکل ۵) به‌ازای سه ولتاژ کاند با مقادیر  $350\text{ kV}$ ،  $370\text{ kV}$  و  $390\text{ kV}$  - ترسیم شده است و تبدیل فوریه متناظر، در شکل (۷) به‌طور هم‌زمان ترسیم شده است.



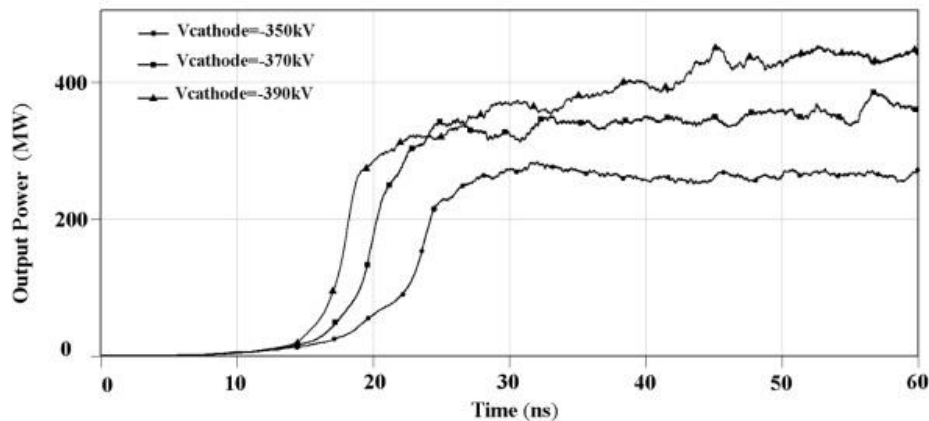
شکل (۶): انتگرال خطی از میدان الکتریکی سمتی موج rf روی مسیر S در شکل (۵)، به‌ازای سه ولتاژ کاند؛ (الف)  $V = -350\text{ kV}$ ، (ب)  $V = -370\text{ kV}$  و (ج)  $V = -390\text{ kV}$

همان‌طور که از شکل (۷) بر می‌آید گستره‌ی فرکانسی از فرکانس  $2/2\text{ GHz}$  تا  $20\text{ GHz}$  می‌باشد اما تمرکز توان، حول فرکانس‌های ۵، ۱۲، ۱۵، ۱۷ و  $20\text{ GHz}$  گیگاهرتز است که نشان

همان‌طور که از شکل (۷) بر می‌آید گستره‌ی فرکانسی از فرکانس  $2/2\text{ GHz}$  تا  $20\text{ GHz}$  می‌باشد اما تمرکز توان، حول فرکانس‌های ۵، ۱۲، ۱۵، ۱۷ و  $20\text{ GHz}$  گیگاهرتز است که نشان



شکل (۷): پاسخ فرکانسی متناظر ولتاژهای موج RF در شکل (۶)



شکل (۸): توان خروجی به ازای سه ولتاژ کاتد سه مقدار  $V = -350\text{KV}$ ،  $V = -370\text{KV}$  و  $V = -390\text{KV}$

- bore magnetron,” *Physics of Fluids*, vol. 22, pp. 978-85, 1979.
- [3] G. Bekefi and T. Orzechowski, “Giant Microwave Bursts Emitted from a Field-Emission, Relativistic-Electron-Beam Magnetron,” *Physical Review Letters*, vol. 37, pp. 376-82, 1976.
- [4] G. B. Collins, “Microwave Magnetrons,” McGraw-Hill, New York, 1948.
- [5] A. S. Gilmour, “Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons,” Artech House, Boston, 2011.
- [6] Sh. Li, F. Li, J. Yang, T. Yan, B. Du, and W. Shi, “Development of a Miniaturized W-Band Spatial Harmonic Magnetron,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 7, pp. 2925-2929, 2016.
- [7] M. Fuks, S. Prasad and E. Schamiloglu, “Efficient Magnetron With a Virtual Cathode,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 44, no. 8, pp. 1298-1302, 2016.
- [8] D. F. Shi, B. L. Qian, H. G. Wang, W. Li, and G. X. Du, “A frequency tunable relativistic magnetron with a wide operation regime,” *AIP Advances*, vol. 7, pp. 025010-1-025010-12, 2017.
- [9] R. V. Lovelace and T. Young, “Relativistic Hartree condition for magnetrons: Theory and comparison with experiments,” *Physics of Fluids*, vol. 28, pp. 2450-2452, 1985.
- [10] CST, “About CST Studio Suite Software,” [www.cst.com/products/csts2](http://www.cst.com/products/csts2), 2017.
- [11] B. Goplen, L. D. Ludeking, D. Smithe, and G. Warren, “User-Configurable MAGIC for electromagnetic PIC calculations,” *Computer Physics Communications*, vol. 87, pp. 54-86, 1985.
- [12] Northropgrumman, “About MAGIC Software,” [www.northropgrumman.com/Capabilities/PICCodeSoftware/MAGIC/Pages/About-Magic.aspx](http://www.northropgrumman.com/Capabilities/PICCodeSoftware/MAGIC/Pages/About-Magic.aspx), 2017.

همان طور که مشخص است با افزایش ولتاژ ورودی از مقدار  $350\text{ kV}$  به  $390\text{ kV}$  سطح توان خروجی از مقدار  $270\text{ MW}$  به  $442\text{ MW}$  افزایش می یابد زمان راه اندازی<sup>۱</sup> نیز از  $25\text{ ns}$  به  $19\text{ ns}$  تقلیل یافته است. شبیه سازی نشان داد که توان خروجی به ازای  $V_{\text{cathode}} = -390\text{ kV}$  پس از  $90\text{ ns}$  به  $500\text{ MW}$  می رسد. همچنین شبیه سازی نشان داد که افزایش ولتاژ بیش از این مقدار، منجر به تحریک جزئی برخی مدها و کاهش توان خروجی می شود. این بدان دلیل است که مقدار ولتاژ اعمالی به کاتد در میدان مغناطیسی  $0.52\text{ T}$  بالاتر از برخی از منحنی های هال قرار می گیرد و ذرات متناسب به این منحنی ها در فرآیند برهم کنش شرکت نمی کنند.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد شکل دهی سهموی کاتد مگنترون در راستای محور  $z$ ، منجر به ایجاد مجموعه ای از منحنی های هال و هارتری می شود. همچنین مشخص شد که منحنی های هارتری در هیچ نقطه ای با یکدیگر برخورد ندارند و بدین ترتیب در صفحه  $V-B$  هیچ نقطه ای را نمی توان یافت که سرعت زاویه ای همه الکترون های تابشی از کاتد با سرعت فاز یکی از مدها برابر باشد. این امر منجر به تحریک همه مدها و بسیاری از هارمونیک های بالاتر شده و در نتیجه، یک لامپ با توان خروجی زیاد با گستره فرکانسی زیاد به دست آمد که می تواند به عنوان یک اخلاگر پهن باند مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵- مراجع

- [1] J. Benford, J. Swegle, and E. Schamiloglu, “High-Power Microwaves,” Taylor & Francis Group, New York, 2007.
- [2] T. Orzechowski and G. Bekefi, “Microwave emission from pulsed, relativistic e-beam diodes I: The smooth

Archive of SID