

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آهن‌ربای چهارقطبی جهت همگرایی باریکه الکترونی در شتاب‌دهنده پر قدرت صنعتی الکترون

سید خلیل موسوی^۱، علی محمدپور صالح^۱، سعید حاصل طلب^۱، مجتبی مرتضوی^۱، عباس بهجت^۲،
محمد عاطفی^۱

۱. مجتمع پژوهشی کاربرد پرتوها یزد، شرکت ساخت و توسعه شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آن‌ها (تکنوسان)

معاونت توسعه کاربرد پرتوها، سازمان انرژی اتمی ایران

۲. گروه اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

چکیده

در این مقاله با استفاده از نرم افزار CST Studio به طراحی و شبیه‌سازی یک آهن‌ربای چهارقطبی و اپتیک باریکه الکترونی در آن پرداخته شده است و بر اساس آن نسبت به ساخت یک چهارقطبی مغناطیسی جهت استفاده در خط انتقال اولین شتاب‌دهنده پر قدرت صنعتی الکترون ساخت ایران اقدام شده است. برای ایجاد میدان مغناطیسی مناسب، جنس، هندسه هسته‌ها و همچنین تغییرات جریان سیم‌پیچ‌ها بر اندازه و خطوط میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای آزمون آهن‌ربای چهارقطبی در انرژی باریکه الکترونی ۱۰ مگا الکترون ولت، گسیلندگی باریکه ورودی به چهارقطبی $0.5 \pi \text{ mm mrad}$ در نظر گرفته شده است. مشاهده شد باریکه به هنگام عبور از چهارقطبی مغناطیسی در یک جهت همگرا و در جهت عمود بر آن واگرا می‌شود. فاصله بهینه بین دو چهارقطبی مغناطیسی برای باریکه دارای گسیلندگی کم به دست آمد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سازگاری خوبی با آزمون‌های عملی دارد.

واژه‌های کلیدی: باریکه الکترونی، میدان مغناطیسی، گسیلندگی باریکه، چهارقطبی مغناطیسی، نرم افزار CST studio

۱. مقدمه

همگرا کردن و هدایت باریکه‌ها استفاده می‌شود که این آهن‌رباها می‌توانند دوقطبی، چهارقطبی، شش قطبی و چند قطبی‌های بالاتر باشند [۳، ۴]. شتاب‌دهنده‌های ذرات باردار از سه قسمت اصلی تفنگ الکترونی یا منبع یونی، محفظه شتاب و همچنین خط انتقال باریکه تشکیل شده است. در خط انتقال باریکه، باریکه ذرات باردار در یک مسیر مشخص و در

در شتاب‌دهنده‌ها برای همگرا و هدایت باریکه الکترونی با انرژی پایین از الکترودها و سیم‌پیچ‌ها استفاده می‌شود [۱، ۲]. زمانی که ذرات باردار دارای انرژی بالا می‌باشند دیگر نمی‌توان از الکترودها به علت نیاز به ولتاژ بالا برای هدایت و همگرا کردن باریکه استفاده کرد، به همین دلیل از آهن‌رباها برای

سمت هدف انتقال می‌یابند. در انتقال باریکه ذرات باردار از میدان‌های الکتریکی استفاده نمی‌شود بلکه برای هدایت و همگرا کردن از میدان‌های مغناطیسی استفاده می‌شود، بنابراین ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت و با شدت مناسب مهم است.

۱.۲. نیروی لورنتس

به ذرات باردار هنگام عبور از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نیروی لورنتس وارد می‌شود رابطه (۱) نیروی لورنتس که به ذره باردار در هنگام عبور از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی وارد می‌شود را بیان می‌کند.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}), \quad (1)$$

در رابطه (۱) q و \mathbf{v} به ترتیب بار و سرعت ذره باردار و \mathbf{B} ، \mathbf{E} میدان مغناطیسی و الکتریکی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شده در شتاب‌دهنده‌ها انرژی بالا در لوله رانش میدان الکتریکی وجود ندارد و فقط از میدان‌های مغناطیسی برای هدایت باریکه استفاده می‌شود، بنابراین نیروی لورنتس که به ذره باردار وارد می‌شود به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (2)$$

میدان‌های مغناطیسی چهارقطبی، خطی و در یک صفحه xy عمل همگرایی را در یک بعد و واگرایی را در بعد دیگر انجام می‌دهند. قطب‌ها و سیم پیچ در یک عدسی^۱ چهارقطبی مغناطیسی در شکل ۱ نمایش داده است

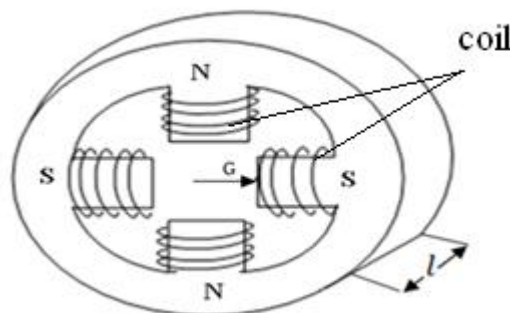
۲.۲. میدان مغناطیسی

رابطه بین میدان مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی به صورت معادله (۳) بیان می‌شود.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (3)$$

که در آن μ_0 ، ضریب نفوذ پذیری مطلق است که مقدار آن برابر $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/M}$ و μ_r ضریب نفوذ پذیری نسبی محیط و \mathbf{H} شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. مولفه‌های x و y میدان مغناطیسی در چهارقطبی مغناطیسی از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$B_y = \frac{B_0 x}{G}, \quad B_x = \frac{B_0 y}{G}, \quad (4)$$



شکل ۱. سطح مقطع عدسی چهار قطبی مغناطیسی.

محفظه‌ای عاری از میدان الکتریکی (لوله رانش) هدایت می‌شوند. برای همگرا و هدایت کردن ذرات باردار در لوله رانش روش‌های گوناگونی وجود دارد که برای همگرا کردن ذرات باردار با انرژی بالا از چهارقطبی‌های مغناطیسی استفاده می‌شود. هنگام عبور باریکه ذرات باردار از چهارقطبی مغناطیسی در فضای دو بعدی عمود بر هم x و y ، باریکه در یک راستا همگرا و در راستای دیگر واگرا می‌شود، بنابراین هنگام استفاده از چهارقطبی در مسیر حرکت باریکه ذرات باردار از دو چهارقطبی با یک فاصله و اختلاف فازی مشخص بین قطب‌های دو چهارقطبی نسبت به هم استفاده می‌شود تا بتوان در هر دو راستا همگرایی باریکه داشت.

در این مقاله بعد از طراحی و شبیه‌سازی، چهارقطبی مغناطیسی ساخته و اثرات جنس هسته‌ها، تعداد دور و جریان سیم‌پیچ‌های هسته‌ها بر میدان مغناطیسی و تغییرات شدت میدان مورد بررسی قرار گرفته شده است و در ادامه فاصله بین دو چهارقطبی برای استفاده در خط انتقال باریکه الکترونی (باریکه الکترونی در خط انتقال دارای انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت می‌باشد) مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای اپتیکی و مغناطیسی اندازه‌گیری شد و چهارقطبی مغناطیسی در خط انتقال باریکه الکترونی در شتاب‌دهنده پر قدرت صنعتی الکترون مورد استفاده قرار گرفت.

۲. بررسی نظری مسئله و روش کار

ذرات باردار در خط انتقال شتاب‌دهنده‌ها با انرژی ثابت به

۱. Magnetic Lens

۳.۲. گسیلندگی باریکه ذرات باردار

روش‌های مختلفی برای محاسبه گسیلندگی وجود دارد و به علاوه می‌توان گسیلندگی‌های مختلفی از جمله عرضی، طولی، به‌هنگار شده برای باریکه‌های ذرات باردار تعریف کرد [۷، ۸].
قطعه لیوویل^۱ بیان می‌کند حجم فضای فاز اشغال شده توسط ذرات باردار ثابت است. گسیلندگی باریکه الکترونی که در راستای z دارای تقارن استوانه‌ای می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\pi} A(x, x'), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{\pi} A(y, y'), \quad \varepsilon_r = \frac{1}{\pi} A(r, r'), \quad (9)$$

که ε_x ، ε_y و ε_r به ترتیب امیتانس در فضای فرعی $r-r'$ ، $x-x'$ و $y-y'$ ، مساحت اشغال شده توسط ذرات باردار در فضای فاز (دو بعد مکان و سرعت) می‌باشد. در روابط بالا x' ، y' و r' به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند.

$$x' = \frac{P_x}{p_z} \approx \frac{P_x}{p}, \quad y' = \frac{P_y}{P}, \quad r' = \frac{P_r}{P}, \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) P_x ، P_y ، P_z به ترتیب تکانه ذره باردار در راستای x ، y ، z و P تکانه کل ذره باردار است.

۳. فرآیند شبیه‌سازی

روش‌های گوناگونی برای تحلیل پارامترهای اپتیکی باریکه‌های ذرات باردار در شتاب‌دهنده‌ها وجود دارد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ۳D Simion و CST Studio به تحلیل پارامترهای اپتیکی ذرات باردار می‌پردازیم.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد برای همگرا کردن باریکه الکترونی انرژی بالا (MeV) به یک اختلاف پتانسیل بالا (MV) بین دو کترود نیاز داریم که ایجاد چنین اختلاف پتانسیل در عمل بسیار مشکل است و باعث جرقه الکتریکی بین کترودها خواهد شد (شکل ۲)، بنابراین به طراحی و شبیه‌سازی چهارقطبی مغناطیسی جهت همگرا و هدایت باریکه ذرات باردار با انرژی بالا می‌پردازیم. برای ایجاد باریکه‌ای با همگرایی مناسب در ابتدا باید میدان‌های مغناطیسی با حداقل تغییرات در

معادلات مدار ذره باردار در رابطه (۵) در دو بعد x و y بیان شده است.

$$d^2 \frac{x}{dz^2} = -\left(\frac{qE_0}{\gamma m_0 G v_z}\right) x$$

$$d^2 \frac{y}{dz^2} = \left(\frac{qB_0}{\gamma m_0 G v_z}\right) y \quad (5)$$

در رابطه‌های (۴) و (۵) B_0 : میدان مغناطیسی در سطح قطب‌ها، G : شعاع چهارقطبی (فاصله مرکز چهارقطبی تا سطح قطب‌ها)، m_0 : جرم سکون ذره باردار، v_z سرعت ذره در راستای z و γ به صورت $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ که c سرعت نور و

همچنین x و y محورهای مختصات و مرکز چهارقطبی با مبدا مختصات هم مرکز می‌باشد (شکل ۱). مولفه x میدان مغناطیسی برای چند قطبی‌ها در رابطه (۶) بیان شده است.

$$B = B_0 + B'_1 x + \frac{1}{2} B''_1 x^2 + \text{etc} \quad (6)$$

در رابطه (۶) B_0 : میدان مغناطیسی دو قطبی، $B'_1 x$ چهارقطبی و $\frac{1}{2} B''_1 x^2$ شش قطبی می‌باشد [۵].

برای محاسبه میدان مغناطیسی در آهن‌ربای چهار قطبی از رابطه (۷) استفاده می‌شود.

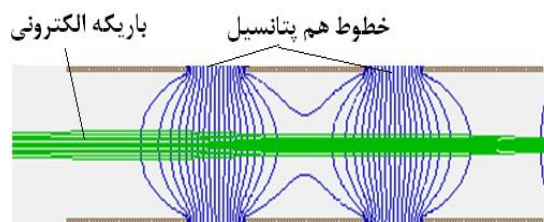
$$B = \frac{2\mu_0 \mu NI}{G^2} \quad (7)$$

در رابطه (۷) μ_0 : ضریب نفوذپذیری مطلق است که مقدار آن برابر $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/M، μ : ضریب نفوذپذیری نسبی، B : میدان مغناطیسی در مرکز چهار قطبی بر حسب تسلا، G : شعاع چهار قطبی، N : تعداد دور سیم پیچ، I : جریان عبوری از سیم پیچ است. فاصله کانونی در یک چهارقطبی از رابطه (۸) به دست می‌آید.

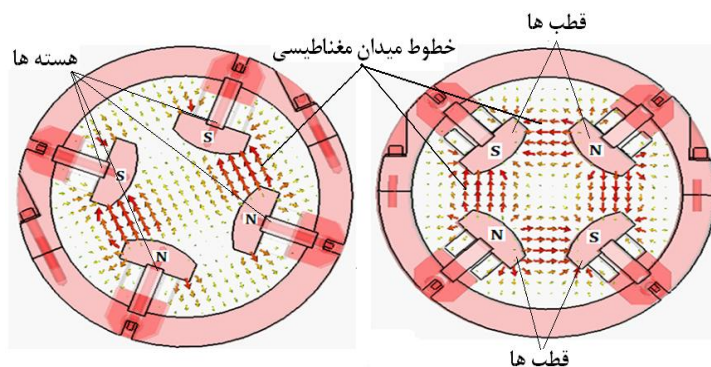
$$F = \frac{BW}{GR_B} \quad (8)$$

که در آن W طول چهار قطبی، F فاصله کانونی و R_B سختی مغناطیسی و با رابطه $R_B = \frac{MV}{q} = \frac{p}{q}$ تعریف می‌شود. در واقع R_B میزان سختی یا مقاومت ذره باردار (q) واقع در میدان را در مقابل انحراف مشخص می‌کند. همان‌طور که می‌بینیم هر چقدر M و V بزرگ باشد یا q کوچکتر باشد ذره کمتر منحرف می‌شود [۶].

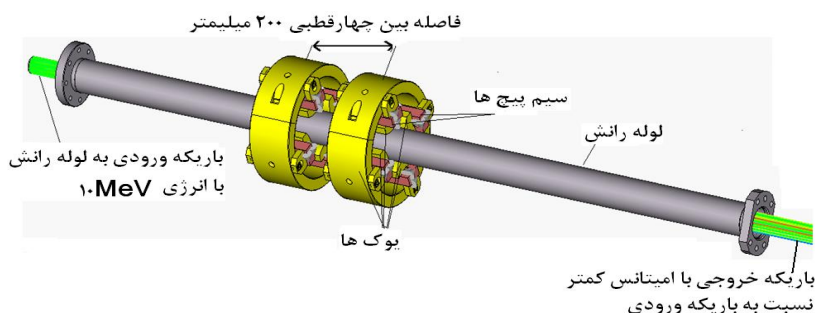
۱. Liouville's Theorem



شکل ۲. همگرایی باریکه الکترونی با انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت هنگام عبور از الکترودهایی با اختلاف ولتاژ بالا.



(الف)



(ب)

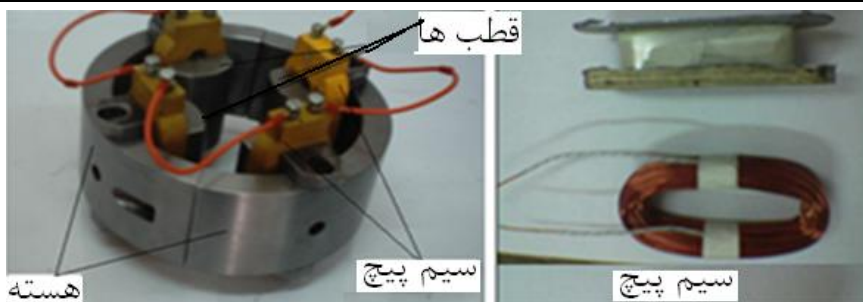
شکل ۳. چهارقطبی مغناطیسی شبیه‌سازی شده با نرم افزار Cst Studio. الف) خطوط میدان مغناطیسی برای حالتی که جهت جریان در سیم‌پیچ‌ها متفاوت باشد، ب) اجزای چهارقطبی به همراه خطوط باریکه الکترونی.

استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی و روابط (۱) تا (۱۰) نسبت به ساخت قطعات مختلف چهارقطبی اقدام شد. قطعات مختلف چهارقطبی ساخته و بعد از مونتاژ قطعات و اندازه‌گیری میدان مغناطیسی چهارقطبی، بر روی خط انتقال باریکه الکترونی با انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت مورد آزمون قرار گرفته و در شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترون برای همگرا و هدایت باریکه الکترونی به کارگرفته شده است. شکل ۴ قطب و سیم پیچ‌ها در چهارقطبی مغناطیسی ساخته شده را نمایش می‌دهد.

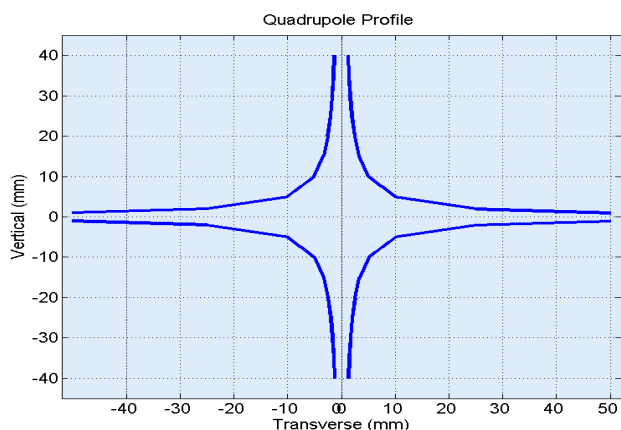
اندازه میدان در چهارقطبی مغناطیسی ایجاد کرد. از پارامترهای مهم در ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در چهارقطبی مغناطیسی، جنس و هندسه هسته‌ها، جریان و تعداد دورسیم-پیچ‌ها می‌باشد.

طرح کلی از آهن‌ربای چهارقطبی به همراه خطوط میدان مغناطیسی و همچنین خطوط باریکه الکترونی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

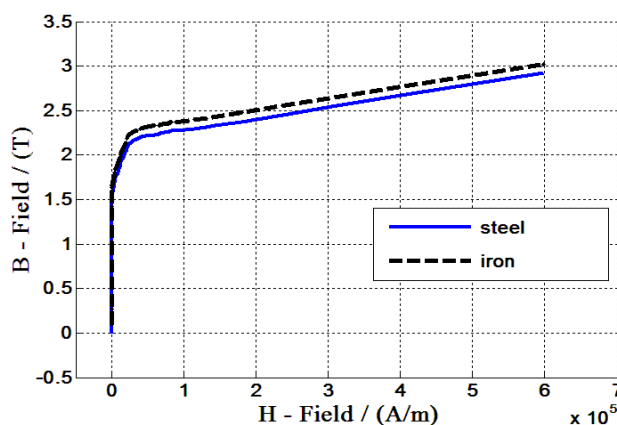
پس از طراحی چهارقطبی مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزارهای Solid works و CST Studio و همچنین با



شکل ۴. چهارقطبی مغناطیسی ساخته شده.



شکل ۶. نمودار مقطع خطوط میدان چهارقطبی.



شکل ۵. تغییرات میدان مغناطیسی (B) بر حسب (H) برای آهن و استیل.

جدول ۱. درصد عناصر مورد استفاده در فولاد به کار گرفته شده در چهارقطبی مغناطیسی.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
۰٫۱۳	۰٫۱۵	۰٫۸۱	۰٫۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۲۲	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲

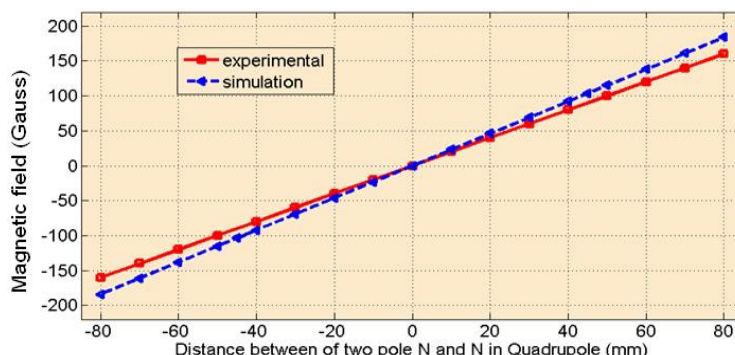
۴. نتایج

تغییرات میدان مغناطیسی (B) بر حسب شدت مغناطیسی (H) برای آهن (فولاد A516 گرید ۵۵) و استیل (استیل ضدزنگ ۳۰۴) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ استنتاج می‌شود، آهن نسبت به استیل برای ایجاد میدان مغناطیسی در چهارقطبی مغناطیسی مناسب‌تر می‌باشد، بنابراین فولاد به عنوان موادی که بتواند میدان مغناطیسی مناسب جهت همگرا کردن باریکه ایجاد کند در ساخت هسته‌های چهارقطبی مغناطیسی به کار گرفته شد. ترکیبات فولاد به کار گرفته شده در ساخت چهارقطبی مغناطیسی در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۶ پروفایل خطوط میدان مغناطیسی چهارقطبی را برای

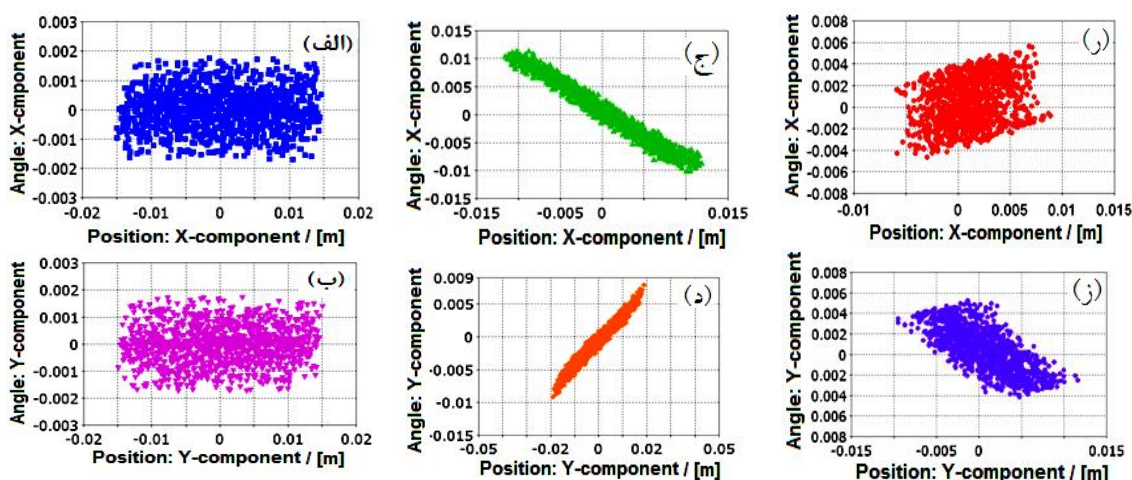
حالتی که مرکز چهارقطبی با مبداء مختصات منطبق باشد را نشان می‌دهد، در واقع این خطوط هندلولی شکل و دارای اندازه میدان مغناطیسی یکسان می‌باشند.

شکل ۷ تغییرات میدان مغناطیسی در چهارقطبی ساخته شده و همچنین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در رابطه (۶) بیان شد و از شکل ۷ استنتاج می‌شود تغییرات میدان مغناطیسی بر حسب فاصله از مرکز چهارقطبی برای قطب‌های روبه‌روی هم (قطب‌های N، N یا قطب‌های S، S) خطی می‌باشد.

در شکل ۸ گسیلندگی باریکه الکترونی در دو بعد x و y قبل از ورود باریکه به چهارقطبی (شکل ۸- الف و ب)، بین دو



شکل ۷. تغییرات میدان مغناطیسی در یک چهارقطبی بر حسب فاصله بین دو قطب روبه‌رو که همانا می‌باشند.



شکل ۸. نمایش گسیلندگی باریکه الکترونی قبل از ورود به چهار قطبی (الف، ب)، بین دو چهار قطبی (ج، د)، بعد از چهار قطبی (ر، ز). (الف، ج، ر گسیلندگی در راستای X و ب، د، ز گسیلندگی در راستای Y).

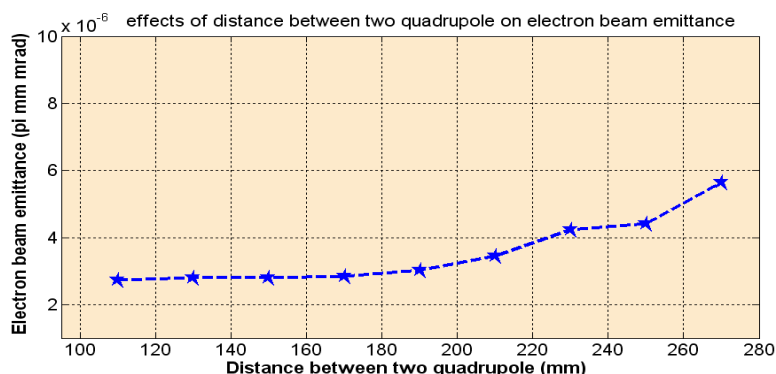
فاصله‌ای که میدان‌های مغناطیسی دو چهارقطبی تداخل پیدا می‌کنند) به یکدیگر نزدیک کرد. مشخصات کلی از چهار قطبی ساخته شده و مورد استفاده در شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترون در جدول ۲ آورده شده است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در شتاب‌دهنده الکترونی از چهار قطبی مغناطیسی برای همگراد کردن باریکه الکترونی استفاده می‌شود بنابراین ایجاد میدان مغناطیسی مناسب (good magnet field) می‌تواند در همگراد کردن باریکه الکترونی مهم باشد نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و چهارقطبی مغناطیسی ساخته و مورد استفاده در شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی الکترونی حاکی از آن است که از جمله پارامترهایی که می‌تواند بر خطوط و شدت میدان

چهارقطبی (شکل ۸-ج و د) و بعد از چهارقطبی (شکل ۸-ر و ز) برای حالتی که فاصله دو چهارقطبی ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد نمایش داده شده است، همان‌طور که از شکل‌های (۸-الف و ب) و (۸-ز و ر) استنتاج می‌شود می‌توان گفت که استفاده از دو چهارقطبی در کنار هم باعث همگراد شدن باریکه الکترونی در یک راستا می‌شود (هرچند در این شکل‌ها زاویه الکترون‌ها افزایش می‌یابد ولی مکان آنها کاهش می‌یابد).

شکل ۹ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و رابطه (۹) را برای گسیلندگی باریکه الکترونی بر حسب فاصله بین دو چهار قطبی نشان می‌دهد. نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد هرچه فاصله بین دو چهار قطبی کمتر باشد، گسیلندگی کمتری برای باریکه داریم، البته این فاصله را نمی‌توان به علت تداخل میدان‌های مغناطیسی دو چهار قطبی، بیش از یک فاصله مشخص



شکل ۹. تغییرات گسیلندگی باریکه الکترونی ناشی از تغییرات فاصله بین دو چهار قطبی.

جدول ۲. مشخصات چهارقطبی مورد استفاده در شتاب‌دهنده پر قدرت صنعتی الکترون.

انرژی باریکه	۱۰	MeV	ضخامت سیم‌های مورد استفاده در سیم‌پیچ‌ها	۱/۲	mm
تعداد سیم‌پیچ‌ها	۴	n	میدان مغناطیسی نزدیک قطب‌ها	۲۰۰	G
دور سیم‌پیچ‌ها	۱۰۰	n	گرادیان میدان مغناطیسی	۴	G/m
جریان سیم‌پیچ‌ها	۱/۵	A	طول موثر میدان مغناطیسی	۷۵	mm
جنس هسته‌ها	آهن	Iron	ولتاژ دو سر سیم‌پیچ‌ها	۱۰	V
شعاع	۳۵	mm	طول هسته	۹۵	mm

کانونی چهارقطبی، چهارقطبی‌ها باید با یک فاصله معین نسبت به هم، استفاده نمود. این فاصله به پارامترهای اپتیکی نظیر گسیلندگی و انرژی باریکه بستگی دارد. فاصله مناسب بین دو چهارقطبی مغناطیسی جهت همگرایی و گسیلندگی کم برای باریکه الکترونی در خط انتقال شتاب‌دهنده پر قدرت صنعتی الکترون ۲۰۰ میلی‌متر به دست آورده شد.

مغناطیسی چهار قطبی موثر باشد جنس هسته، تعداد دور و جریان سیم‌پیچ‌ها و همچنین هندسه هسته‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه یک چهار قطبی در صفحه XY باعث همگرایی باریکه در راستای X و واگرایی آن در راستای Y می‌گردد برای رسیدن به یک همگرایی مناسب در راستای X و Y می‌بایست از دو چهارقطبی که قطب‌های آنها نسبت به هم ۹۰ درجه زاویه دارند و همچنین با توجه به نقطه

مراجع

1. M M Abdelrahman and S G Zakhary, *Brazilian J. Physics*, **39** (2009) 275.
2. J Orlof, CRC, "Simulation Studies for ton Beam Extraction Systems", New York (2009).
3. J J Barroso and M O Terra, *Brazilian J. physics*, **34** (2004).
4. Thomas P wangler, "Principles of RF Linear Accelerator", John Wiley (1937).
5. Stanley Humphries, J "Charged Particle Beams", John Wiley and Sons, New York (2013).
6. Stanley Humphries, J "Principles of Charged Particle Acceleration", John Wiley & sons, New York (2012).
7. S G Anderson, J B Rosenzweig, "Emittance Measurements of the Space Charge Dominated Thomson Source Photoinjector", *Particle Accelerator Conference* (2001) 2260.
8. S G Anderson and J B Rosenzweig, *Particle Accelerator Conference* (2001).