

تأثیر نوع پیکربندی مگنت‌های مغناطیسی و الکترودهای الکتریکی بر عملکرد سامانه طیف‌سنج جرمی یون تامسون

سامانه فاضل پور^{۱*}، امیر چخماچی دوم^۱، عبدالرضا اسماعیلی^۱، زهره دهقانی^۱ و علی نصیری^۱

^۱پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

^۲ایران، تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، کدپستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵.

پست الکترونیکی: samanehfazelpour@ymail.com

چکیده

در این مقاله، به بررسی مقایسه‌ای از سامانه طیف‌سنج جرمی یون تامسون با دو نوع منحرف‌کننده متفاوت به صورت مدل‌سازی سه‌بعدی توسط نرم‌افزار کامسول پرداخته شده است. در این مطالعه، دو نوع منحرف‌کننده مجزا و مشترک که در آن‌ها مگنت‌های مغناطیسی و الکترودهای الکتریکی به ترتیب به صورت جدا از هم و یا در کنار هم با مشخصات هندسی کاملاً یکسان به کار گرفته شده است. در مدل‌سازی انجام شده از میدان مغناطیسی ۰/۲۴۸ تسلا و میدان الکتریکی ۳۰۰ کیلوولت بر متر به بررسی رفتار یون‌های هیدروژن، هلیوم، نیتروژن و کربن با بازده انرژی ۱ تا ۲۵ کیلوالکترون ولت خواهیم پرداخت. در ادامه با توجه به ردهای سهمی شکل در فاصله یکسانی از منحرف‌کننده برای هر دو حالت، به بررسی مزایا و معایب هر دو نوع سیستم پرداخته خواهد شد.

کلیدواژگان: منابع تولید یون، طیف‌سنج تامسون، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، آشکارساز.

۱. مقدمه

که یون‌ها یک مسیر سهمی را دنبال کنند و موقعیت خاص سهمی روی صفحه آشکارساز بسته به جرم و بار یون است. این امر امکان شناسایی و تجزیه و تحلیل گونه‌های مختلف یون را در یک پلاسما یا باریکه یونی دیگر فراهم می‌کند؛ بنابراین اجزای اصلی یک سامانه طیف‌سنج تامسون از روزنه‌های کولیماتور، مگنت‌های مغناطیسی، الکترودهای الکتریکی و سیستم آشکارساز تشکیل شده‌اند [۷-۵]. این در حالی است که پارامترهای مربوط به میدان الکتریکی و مغناطیسی به شدت می‌تواند بر عملکرد سامانه طیف‌سنج تأثیرگذار باشد و یکی از عوامل مهم آن‌ها مسئله مربوط به نحوه پیکربندی مگنت‌ها و

طیف‌سنج سهموی تامسون به عنوان یک ابزار تشخیصی که توانایی اندازه‌گیری هم‌زمان انرژی و نسبت بار به جرم ($\frac{q}{m}$) یون‌ها در یک باریکه مختلط دارد و اطلاعات مهمی در مورد گونه‌ها و انرژی‌های ذرات شتاب‌دار ارائه می‌دهد، شناخته شده است. این نوع ابزارهای تشخیصی به طور گسترده در فیزیک پلاسما و آزمایش‌های شتاب یون با هدایت لیزر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴-۱].

طیف‌سنج سهمی تامسون نوعی طیف‌سنج جرمی است که یون‌ها را بر اساس نسبت جرم به بار آن‌ها با اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی جدا می‌کند. این میدان‌ها باعث می‌شوند

الکترودها است که به طور معمول به صورت مشترک و یا مجزا از هم در این سامانه مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

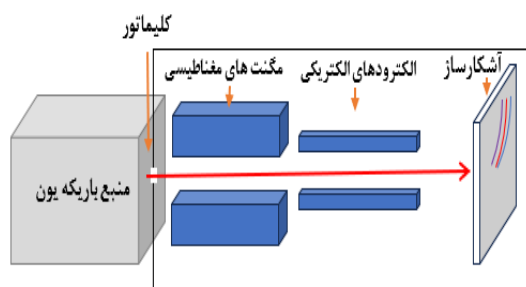
تنگ^۱ و همکارانش به ارائه یک طیف‌سنج جرمی سهموی تامسون با رزولوشن بالا با مگنت‌های دوقطبی هالباخ برای پروتون‌های با انرژی ۱۰۰ مگا الکترون‌ولت به بالا پرداخته‌اند [۸].

۲. مبانی فیزیکی و عملکرد طیف‌سنج سهموی

تامسون

بخش‌های اصلی یک طیف‌سنج سهموی تامسون بر اساس شکل ۱، شامل موارد زیر است:

- **منبع باریکه یونی:** این طیف‌سنج از منبعی از ذرات باردار، اغلب یون‌های تولید شده در پلاسما، استفاده می‌شود.
- **میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی:** یون‌ها از ناحیه‌ای با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی عمود بر مسیر یون، عبور می‌کنند که این میدان‌ها بر ذرات نیرو وارد خواهد شد و باعث انحراف آن‌ها می‌شوند.
- **مسیر سهموی:** انحراف یون‌ها متناسب با نسبت جرم به بار و انرژی آنهاست که منجر به یک مسیر سهموی می‌شود.
- **آشکارساز:** یک آشکارساز، مانند یک سوسوزن، یون‌های پراکنده را جذب می‌کند و امکان تجزیه و تحلیل انرژی و طیف جرمی آن‌ها را فراهم می‌کند.



شکل (۱): شماتیکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده طیف‌سنج جرمی تامسون.

بر اساس نتایج این نوع طیف‌سنج بسیار سبک‌تر و کوتاه‌تر از طیف‌سنج‌های مرسوم مورد استفاده در آزمایشگاه‌های شتاب‌دهنده یون لیزری خواهد بود و می‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده در تأسیساتی با محفظه هدف کوچک باشد. یک طیف‌سنج جرمی تامسون پیشرفته با مگنت‌های مغناطیسی و الکترودهای الکتریکی به صورت مشترک در آزمایشگاه‌های لیزر جهت تشخیص ذرات آلفای تولید شده از واکنش‌های گداخت توسط سالوادوری^۲ و همکارانش به کار گرفته شده است [۹].

لوپز^۳ و همکارانش به ارائه یک طیف‌سنج سهموی تامسون با تفکیک زاویه‌ای برای شتاب‌دهنده‌های یونی با هدایت لیزری با پیکربندی مشترک مگنت‌های مغناطیسی و الکترودهای الکتریکی و همچنین با کلیما تور چند حفره‌ای پرداخته‌اند [۱۰]. جانگ^۴ و همکارانش به طراحی و ساخت طیف‌سنج سهموی تامسون با وضوح و پراکندگی بالا با مگنت‌ها و الکترودهای مشترک پرداخته‌اند [۱۱]. طراحی طیف‌سنج تامسون بهینه‌سازی شده برای منابع یون چندگونه‌ای و انرژی بالا توسط جوونی^۵ و همکارانش توسط کد PTRACE بر اساس زبان برنامه‌نویسی ++C ارائه شده است [۱۲].

وجود الکترودهای میدان الکتریکی و مگنت‌های مغناطیسی به صورت مشترک و مجزا می‌تواند در عملکرد طیف‌سنج و محدودیت‌هایی که در شدت میدان‌های الکترومغناطیسی ایجاد کند، بسیار حائز اهمیت باشد. در این مقاله، به بررسی تأثیر مشترک بودن و مجزا بودن مگنت‌های مغناطیسی و الکترودهای

³ Lopez

⁴ Jung

⁵ Gwynne

¹ Teng

² Salvadori

به واسطه اثر میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی برابر است با:

$$\Delta x = B \cdot \left(\frac{q}{m}\right) \frac{L_B}{v} \left(D_B + \frac{1}{\gamma} L_B\right)$$

$$\Delta y = E \cdot \left(\frac{q}{m}\right) \frac{L_E}{v} \left(D_E + \frac{1}{\gamma} L_E\right) \quad (5)$$

حال اگر بخواهیم اثر هم‌زمان دو میدان الکتریکی و مغناطیسی را بر انتشار باریکه یونی را بررسی کنیم، می‌بایست دو انحراف در راستای X و Y را یکدیگر ترکیب کرد که عبارت است از:

$$\Delta y = \left(\frac{q}{m}\right)^{-1} \left(\frac{E}{B\gamma}\right) \left(\frac{L_E(D_E + \frac{1}{\gamma} L_E)}{L_B(D_B + \frac{1}{\gamma} L_B)}\right) (\Delta x)^2 \quad (6)$$

این رابطه نشان می‌دهد که انحراف ذرات باریکه در صفحه $(X - Y)$ قرار داشته و در این صفحه نمایان‌گر یک سهمی است. از سوی دیگر، رابطه این سهمی مستقل از سرعت و انرژی ذره بوده و به نسبت $\left(\frac{q}{m}\right)$ وابسته است. با توجه به این که کمیت‌های L_E, D_E, L_B, D_B, E و B برای یک دستگاه مشخص و ثابت هستند، این مطلب نشان می‌دهد که باریکه‌ای از هر نوع ذره با نسبت $\left(\frac{q}{m}\right)$ مشخص، رد یک سهمی مشخص بر روی صفحه تشخیصی از خود به‌جای می‌گذارد. حال اگر الکترودهای الکتریکی و مگنت‌های مغناطیسی به‌صورت مجزا یا مشترک از هم در نظر گرفته شود به دلیل متفاوت بودن میزان انحراف مرحله دوم در هر دو جهت، روابط سهمی برای هر دو نوع پیکربندی نیز متفاوت خواهند بود که عبارت هستند از:

$$y = \frac{mE}{qB^2} \frac{L_1 E L_2 E}{(L_1 B L_2 B)^2} x^2 \quad (7)$$

$$y = \frac{mE}{qB^2} \frac{1}{L(D+L/\gamma)} x^2 \quad (8)$$

در ادامه، در شکل ۲، نمایی از نحوه قرارگیری منحرف‌کننده‌های مغناطیسی و الکتریکی به‌صورت مجزا و مشترک نشان داده شده است. بر اساس روابط به‌دست‌آمده از نحوه قرارگیری الکترودها و مگنت‌ها می‌توان به این نتیجه دست یافت که با فرض ثابت بودن فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز، مشترک بودن الکترودهای میدان الکتریکی با مگنت‌ها منجر به

در محیط طیف‌سنجی ابتدا یک میدان مغناطیسی B در راستای عمود بر انتشار باریکه، بر باریکه اعمال می‌شود. سپس باریکه تحت تأثیر میدان الکتریکی E در راستای عمود بر انتشار باریکه قرار می‌گیرد. مطابق شکل بالا، باریکه ذرات پس عبور از میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی به صفحه حساس تشخیصی می‌رسند.

در طیف‌سنج تامسون اگر مسیر حرکت یون را در راستای Z و میدان الکتریکی و مغناطیسی ذره یون را در راستای Y در نظر گرفته شود. بر اساس تئوری، ذره یون بر اساس میدان الکتریکی در راستای Y و بر اساس میدان مغناطیسی در راستای X منحرف خواهند شد. میزان انحراف ذره در محدوده‌ای که میدان مغناطیسی و الکتریکی وجود دارد برابر است با:

$$\Delta y_1 = \frac{1}{\gamma} E \cdot \frac{q}{m} \left(\frac{L_E}{v}\right)^2 \quad (1)$$

$$\Delta x_1 = \frac{1}{\gamma} B \cdot \frac{q}{m} L_B^2 \frac{1}{v} \quad (2)$$

در این روابط نیز، v سرعت ذره یون، q بار ذره، m جرم ذره، E میدان الکتریکی، B میدان مغناطیسی، L_E طول الکترودهای میدان الکتریکی و L_B طول مگنت میدان مغناطیسی است. علت انحراف میدان الکتریکی در راستای Y نیروی الکتریکی $F = qE$ و علت انحراف میدان مغناطیسی در راستای X نیروی مغناطیسی $F = qv \times B$ است. در ادامه، سپس ذره از میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی خارج شده و به حرکت خود به سمت صفحه تشخیصی ادامه می‌دهد و فاصله طولی D_E و D_B را تا صفحه تشخیصی می‌پیماید. در این مرحله ذره دارای یک حرکت با سرعت ثابت در راستای Y و X خواهد بود و به طبع نسبت به محور Z در راستای Y و X به اندازه Δy_1 و Δx_1 منحرف می‌گردد. این انحراف از طریق زیر به‌دست خواهد آمد.

$$\Delta y_2 = E \cdot \frac{q}{m} \frac{L_E D_E}{v} \quad (3)$$

$$\Delta x_2 = B \cdot \frac{q}{m} \frac{L_B D_B}{v} \quad (4)$$

بنابراین میزان انحراف کل قابل مشاهده بر روی صفحه تشخیصی

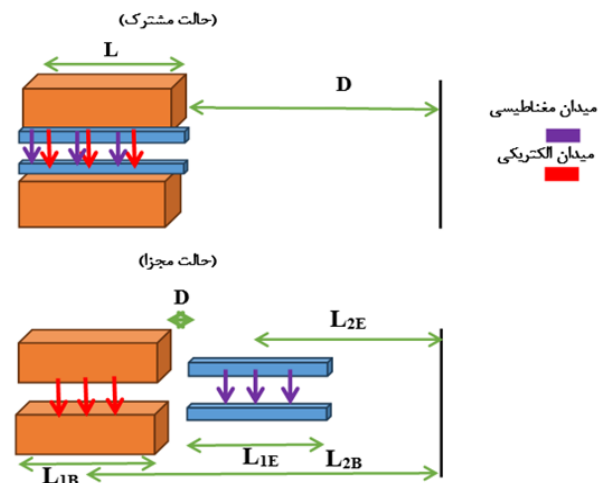
دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر MTPF۲.۴KJ در آزمایشگاه دستگاه‌های پلاسمای پالسی پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای است که توسط ابزارهای تشخیصی به دست آمده است. در شکل ۳، نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر MTPF۲.۴KJ نشان داده شده است.



شکل (۳): نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر MTPF۲.۴KJ.

هدف اصلی از مدل‌سازی این طیف‌سنج یونی، تجهیز کردن این دستگاه پلاسمای کانونی به ابزار تشخیصی است که بتواند گونه‌ها و محدوده انرژی یون‌های شتاب‌یافته از آن را اندازه‌گیری کرده و در اختیار محققین قرار دهد. این دستگاه پلاسمای کانونی از یک آند استوانه‌ای (طول ۱۴۵ میلی‌متر، طول مؤثر ۹۵ میلی‌متر و شعاع ۱۴/۵ میلی‌متر)، شش کاتد استوانه‌ای (طول ۱۴۵ میلی‌متر و شعاع ۵ میلی‌متر) از جنس مس، یک لوله پیرکس بعنوان عایق (طول ۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۳ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر)، بانک خازنی به ظرفیت ۱۲ میکروفاراد با شارژ تا ۲۰ کیلوولت و اندوکتانس کل دستگاه برابر با ۱۳۶ نانو هانری تشکیل شده است. با اندازه‌گیری انرژی یون‌های شتاب یافته توسط فنجان فارادی در محدوده فشاری ۰/۷ تا ۰/۹۵ تور با گاز تزریقی هیدروژن، یون‌هایی با حداکثر انرژی ۱ کیلو الکترون ولت تا ۲۴ کیلو الکترون ولت به دست خواهد آمد. در

انحراف بیشتر ذرات در راستای Y یا به عبارتی افزایش Δy_p خواهد بود؛ اما در راستای X تغییراتی نسبت به حالت مجزا بودن ایجاد نخواهد شد. این در حالی است که اگر فاصله الکترودها تا آشکارساز ثابت در نظر گرفته شود و فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز کاهش یابد، منجر به انحراف بیشتر ذرات در راستای X یا به عبارتی افزایش Δx_p خواهد بود؛ اما در راستای Y تغییراتی نسبت به حالت مجزا بودن ایجاد نخواهد شد.

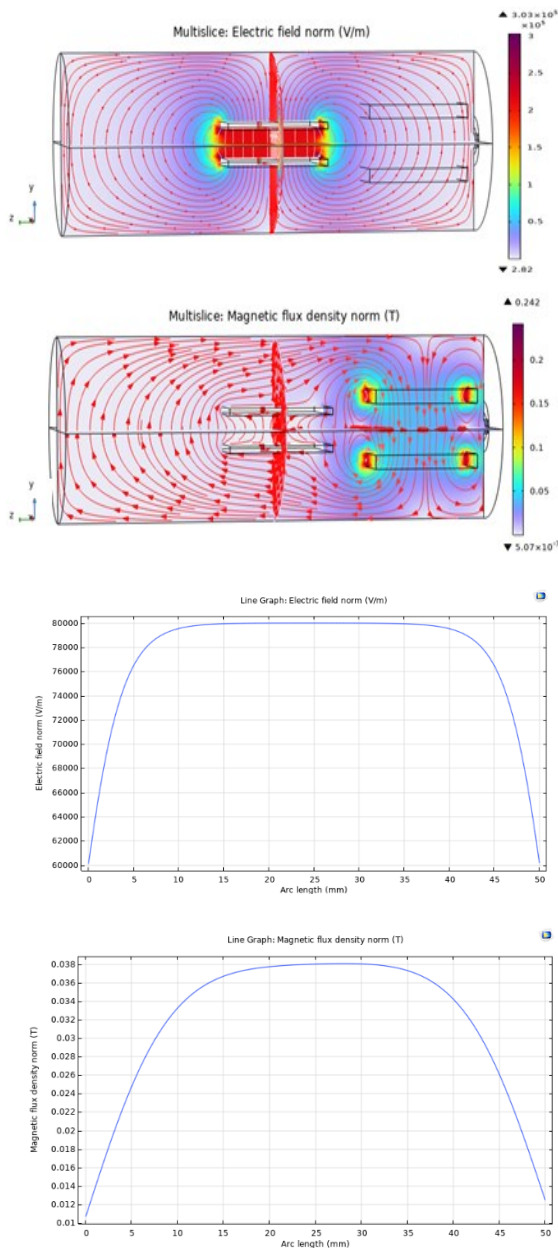


شکل (۲): نمایی از نحوه قرارگیری منحرف‌کننده‌های مغناطیسی و الکتریکی به صورت مجزا و مشترک.

۳. طراحی و شبیه‌سازی

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار کامسول به بررسی تأثیر نوع منحرف‌کننده‌های مغناطیسی و الکتریکی بر عملکرد سامانه طیف‌سنج جرمی یون تاسون به صورت سه‌بعدی پرداخته شده است. شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار کامسول بر پایه روش المان محدود صورت گرفته و از ماژول‌های Electrostatics برای شبیه‌سازی میدان الکتریکی، Magnetic Fields برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی و Particle Tracing برای بررسی رفتار باریکه ذرات یون در سامانه طیف‌سنج استفاده شده است. اطلاعات مرتبط با منبع یون در نظر گرفته شده در ماژول پارتیکل بر اساس مشخصات

بر اساس سهمی به‌دست‌آمده توسط شبیه‌سازی، رابطه سهمی برابر با $y = 0.001x^2$ است که بر اساس رابطه ۱، اگر نسبت هندسی و نسبت میدان الکتریکی بر توان دو میدان مغناطیسی برابر با ۱۲/۱۶ ده به توان چهار باشد، نسبت جرم بر بار برابر با یک خواهد بود که نشان‌دهنده یون هیدروژن است.

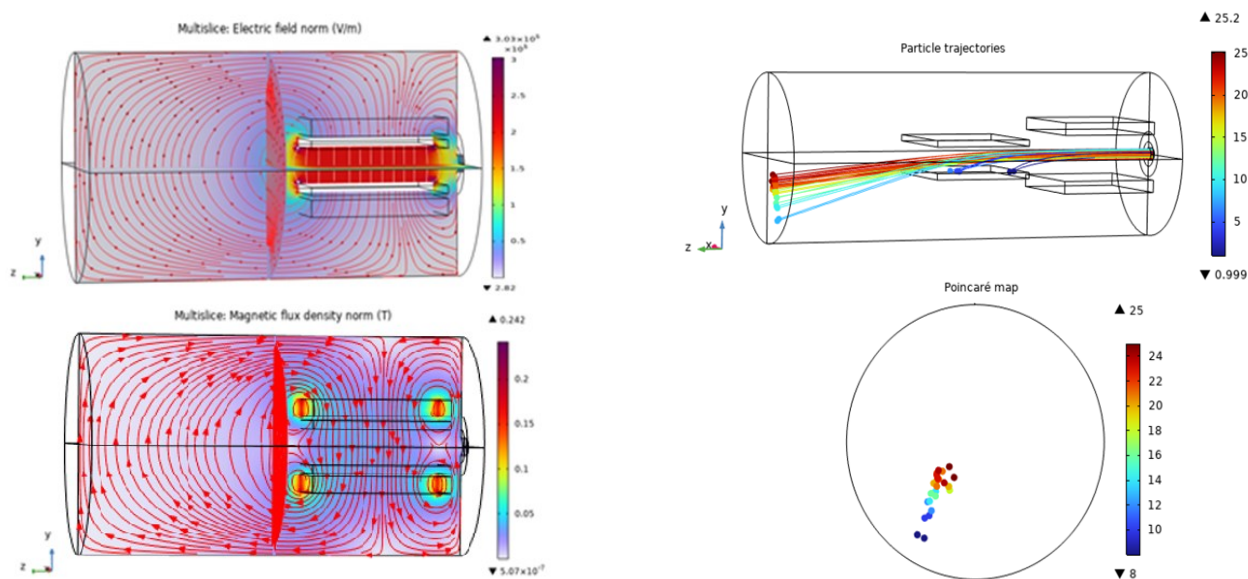


شکل (۳): تغییرات میدان الکتریکی تولید شده توسط الکترودها و میدان مغناطیسی تولید شده توسط مگنت‌های مغناطیسی و نمودار تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی برحسب محور انتشار در منحرف کننده نوع مجزا.

این شبیه‌سازی، ذرات از نوع یون، با جرم هیدروژن و محدوده انرژی ۱ کیلو الکترون ولت تا ۲۴ کیلو الکترون ولت، شرایط مرزی دیواره از نوع freeze، نیروی الکتریکی از میدان الکتریکی ماژول electrostatic، نیروی مغناطیسی از میدان مغناطیسی ماژول magnetic field و مش‌بندی از نوع Extra fine در نظر گرفته شده است. در ادامه، به شبیه‌سازی میدان الکتریکی و مغناطیسی به صورت مجزا و مشترک پرداخته خواهد شد.

• منحرف کننده مجزا

در این منحرف کننده، از دو بلوک جنس NdFeB با طول ۵۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶ میلی‌متر با فاصله ۲۲ میلی‌متر از همدیگر به عنوان الکترودهای تولیدکننده میدان مغناطیسی استفاده شده است. از سویی دیگر، از دو صفحه مسی با طول ۵۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳ میلی‌متر با فاصله ۱۲ میلی‌متر از همدیگر به عنوان الکترودهای تولید کننده میدان الکتریکی استفاده شده است. فاصله الکترودهای الکتریکی تا انتها برابر ۸۰ میلی‌متر، فاصله مگنت‌های مغناطیسی تا انتها برابر با ۱۵۰ میلی‌متر، فاصله مابین مگنت‌های مغناطیسی و الکترودهای میدان الکتریکی برابر با ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در ادامه، کار بر اساس شکل ۳، تغییرات میدان مغناطیسی و الکتریکی تولید شده توسط الکترودها و همچنین نمودار تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی برحسب محور انتشار ذرات در منحرف کننده نوع مجزا نشان داده شده است. بر اساس شکل ۳، حداکثر میدان مغناطیسی ۰/۲۴۸ تسلا و میدان الکتریکی ۳۰۰ کیلو ولت بر متر، در نظر گرفته شده است. در شکل ۴، ردیابی ذرات یون هیدروژن و همچنین رفتار بررسی ذرات در صفحه عمود (y - x) بر مسیر حرکت ذرات یون (z) در فاصله ۸۰ میلی‌متر از الکترودهای میدان الکتریکی و ۱۵۰ میلی‌متری از مگنت‌های میدان مغناطیسی نشان داده شده است.

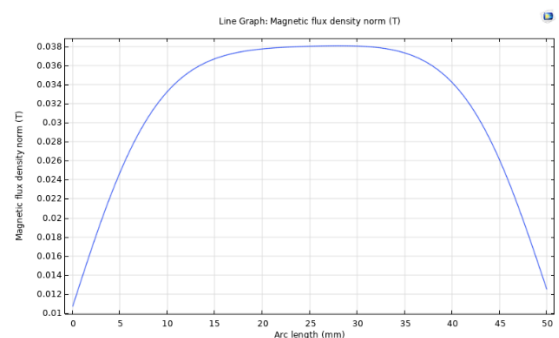
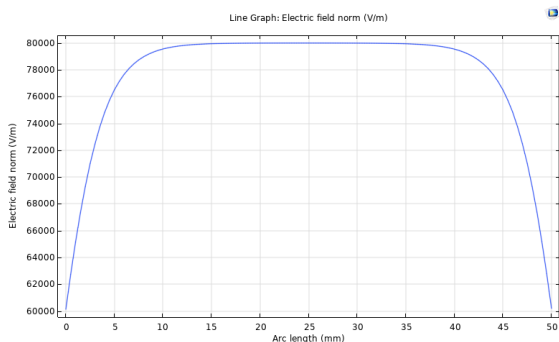


شکل (۴): ردیابی ذرات یون هیدروژن با حداکثر انرژی ۲۵ کیلو الکترون ولت و همچنین رفتار بررسی ذرات در صفحه عمود $(x - y)$ بر مسیر حرکت ذرات یون (z) در فاصله ۸۰ میلی متر از الکترودهای میدان الکتریکی و ۱۵۰ میلی متری از مگنت‌های میدان مغناطیسی.

• منحرف کننده مشترک

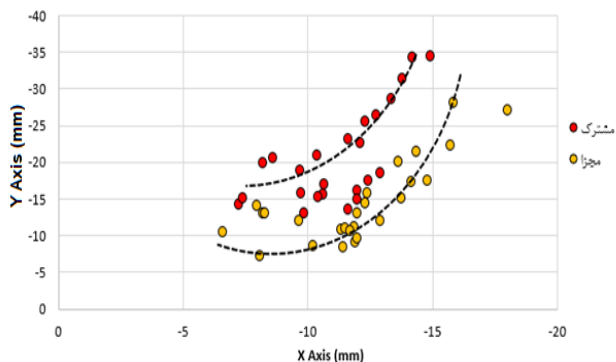
در این منحرف کننده، از دو بلوک جنس NdFeB با طول ۵۰ میلی متر، عرض ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۶ میلی متر با فاصله ۱۰ میلی متر از همدیگر به عنوان الکترودهای تولید کننده میدان مغناطیسی استفاده شده است. از سویی دیگر، از دو صفحه مسی با طول ۵۰ میلی متر، عرض ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳ میلی متر با فاصله ۱۸ میلی متر از همدیگر به عنوان الکترودهای تولید کننده میدان الکتریکی استفاده شده است. فاصله الکترودهای الکتریکی و مگنت‌های مغناطیسی تا انتها برابر با ۱۵۰ میلی متر، فاصله مابین مگنت‌های مغناطیسی و الکترودهای میدان الکتریکی برابر با ۱/۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. در ادامه، کار براساس شکل ۵، تغییرات میدان مغناطیسی و الکتریکی تولید شده توسط الکترودها و همچنین نمودار این تغییرات بر حسب محور انتشار ذرات در منحرف کننده نوع مشترک نشان داده شده است.

بر اساس شکل ۵، حداکثر میدان مغناطیسی ۰/۲۴۸ تسلا، میدان الکتریکی ۳۰۰ کیلو ولت بر متر، در نظر گرفته شده است.



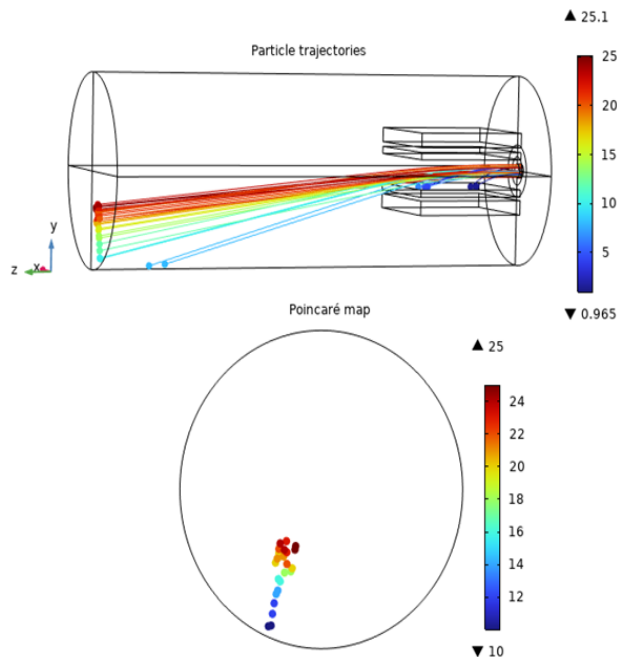
شکل (۵): تغییرات میدان مغناطیسی و الکتریکی تولید شده توسط الکترودها و همچنین نمودار این تغییرات بر حسب محور انتشار ذرات در منحرف کننده نوع مشترک.

در شکل ۶، ردیابی ذرات یون هیدروژن و همچنین رفتار بررسی ذرات در صفحه عمود $(x - y)$ بر مسیر حرکت ذرات یون (z) در فاصله ۱۵۰ میلی متر از الکترودهای منحرف کننده مشترک نشان داده شده است.



شکل (۷): نمودار سهمی شکل مرتبط با ردیابی یون هیدروژن با حداکثر انرژی ۲۵ کیلو الکترون ولت در هر دو سیستم منحرف کننده مجزا و مشترک با فرض یکسان بودن فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز و بیشتر شدن فاصله الکترودها تا آشکارساز.

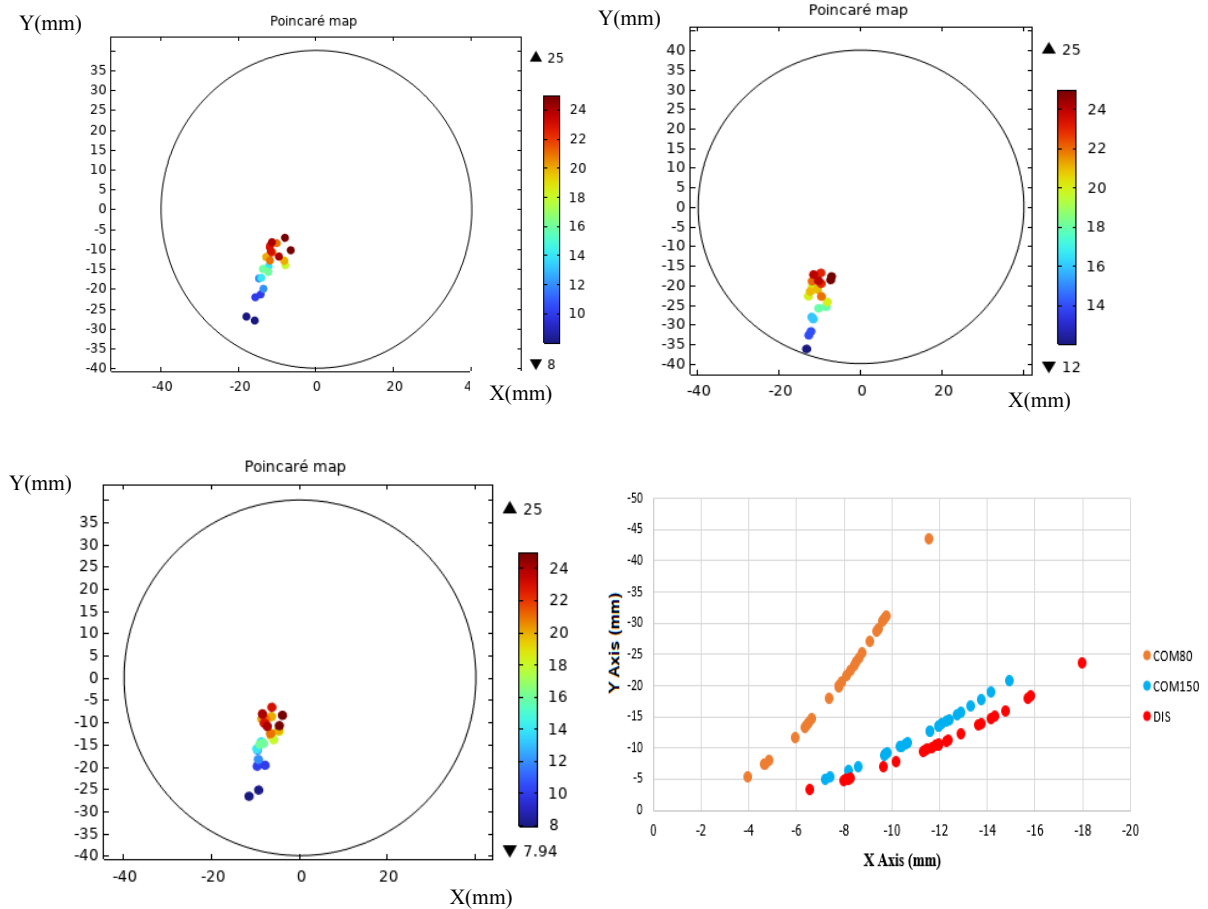
بر اساس شکل ۷، ضریب نمودار سهمی شکل برای منحرف کننده مشترک نسبت به حالت مجزا بیشتر خواهد بود. این در حالی است که میزان شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی در هر دو حالت و نسبت جرم بر بار در هر دو حالت یکسان باشد. تنها ضرایب هندسی $\frac{1}{L(D+L/2)}$ و $\frac{L_1 E L_2 E}{(L_1 B L_2 B)^2}$ می‌تواند تعیین کننده ضریب نمودار سهمی شکل باشد. در ادامه، به بررسی سیستم حالت مشترک با فرض یکسان بودن فاصله الکترودها و کم کردن فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز نسبت به حالت مجزا خواهیم پرداخت. در شکل ۸، نمایی از تغییرات رد سهمی شکل یون هیدروژن برای سه حالت منحرف کننده مجزا (در فاصله ۸۰ میلی‌متر از الکترودهای میدان الکتریکی و ۱۵۰ میلی‌متری از مگنت‌های میدان مغناطیسی)، منحرف کننده مشترک با مگنت‌ها و الکترودهایی در فاصله ۱۵۰ میلی‌متر از آشکارساز و منحرف کننده مشترک با مگنت‌ها و الکترودهایی در فاصله ۸۰ میلی‌متر از آشکارساز، نشان داده شده است.



شکل (۶): ردیابی ذرات یون هیدروژن با حداکثر انرژی ۲۵ کیلو الکترون ولت و همچنین رفتار بررسی ذرات در صفحه عمود $(x-y)$ بر مسیر حرکت ذرات یون (z) در فاصله ۱۵۰ میلی‌متر از الکترودهای منحرف کننده مشترک.

بر اساس سهمی به دست آمده توسط شبیه‌سازی، رابطه سهمی برابر با $y = 0.0022x^2$ است که بر اساس رابطه ۲، اگر نسبت هندسی و نسبت میدان الکتریکی بر توان دو میدان مغناطیسی برابر با $17/74$ ده به توان چهار باشد، نسبت جرم بر بار برابر با یک خواهد بود که نشاندهنده یون هیدروژن است.

بر اساس شکل ۶ و شکل ۴، سیستم تامسون با منحرف کننده‌های مشترک نسبت به حالت مجزا با فرض یکسان بودن فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز و بیشتر شدن فاصله الکترودها تا آشکارساز، توانایی جداسازی ذرات را در راستای Y بیشتر دارد. که این شرایط با تئوری کاملاً مطابقت خواهد داشت. از سویی دیگر، در شکل ۷، نمودار سهمی شکل مرتبط با ردیابی یون هیدروژن با حداکثر انرژی ۲۵ کیلو الکترون ولت در هر دو سیستم منحرف کننده مجزا و مشترک با فرض یکسان بودن فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز نسبت به مجزا و بیشتر شدن فاصله الکترودها تا آشکارساز نسبت به مجزا، نشان داده شده است.



شکل (۸): نمایی از تغییرات رد سهمی شکل یون هیدروژن برای سه حالت منحرف کننده مجزا (در فاصله ۸۰ میلی متر از الکترودهای میدان الکتریکی و ۱۵۰ میلی متری از مگنت‌های میدان مغناطیسی)، منحرف کننده مشترک با مگنت‌ها و الکترودهایی در فاصله ۱۵۰ میلی متر از آشکارساز و منحرف کننده مشترک با مگنت‌ها و الکترودهایی در فاصله ۸۰ میلی متر از آشکارساز.

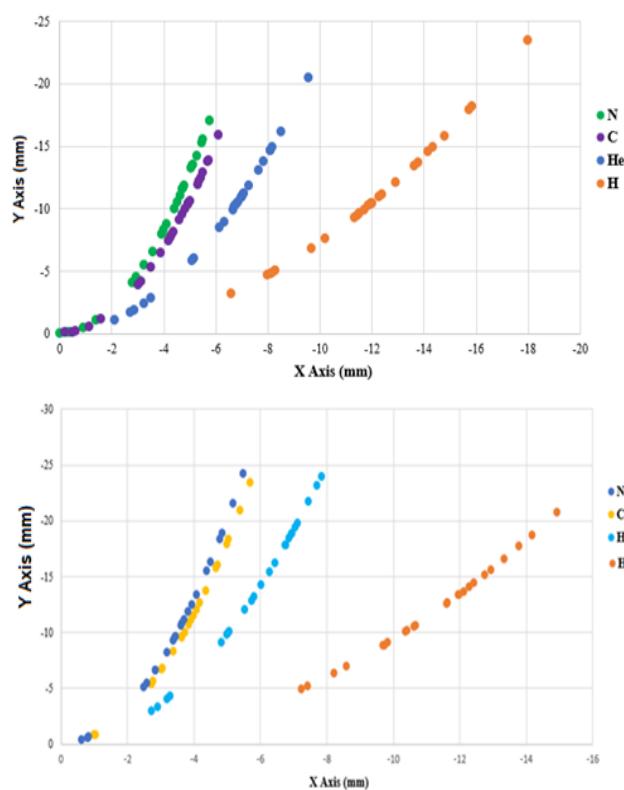
بودن فاصله الکترودها و افزایش فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز نسبت به حالت مجزا، ΔX کاهش خواهد یافت. که این شرایط در سه شکل رد سهمی کاملاً قابل مشاهده است.

بنابراین، بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی می‌توان برای حالت الکترودهای مشترک از میدان الکتریکی کمتر در ابزار تشخیصی تامسون نسبت به الکترودهای مجزا استفاده شود. از سویی دیگر لازم به ذکر است در سامانه تشخیصی تامسون با الکترودها و مگنت‌های مشترک، میزان جابه‌جایی الکترودهای الکتریکی به دلیل کمبود فضا محدود خواهد بود. همچنین با توجه به این‌که فشار محفظه برابر با 10^{-3} mbar است بر اساس رابطه پاشن احتمال شکست گاز در بین الکترودها وجود ندارد.

بر اساس شکل ۸، سیستم تامسون با منحرف‌کننده‌های مشترک در دو حالت با سیستم تامسون با منحرف‌کننده‌های مجزا مقایسه شده که یکی با فرض یکسان بودن فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز و دیگری با فرض یکسان بودن فاصله الکترودها تا آشکارساز می‌باشد. بر اساس تئوری انتظار می‌رود برای حالت مشترک با فرض یکسان بودن فاصله مگنت‌ها تا آشکارساز نسبت به دو حالت دیگر ضریب سهمی افزایش یابد که این نتیجه در نمودار قابل مشاهده است. از سویی دیگر نتایج نشان می‌دهد که حالت مشترک با فرض یکسان بودن فاصله مگنت‌ها و افزایش فاصله الکترودها تا آشکارساز نسبت به حالت مجزا، Δy افزایش خواهد یافت. اما در حالت مشترک با فرض یکسان

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در ادامه به مقایسه عملکرد دو سیستم منحرف‌کننده مجزا و مشترک در سامانه طیف‌سنج جرمی یون تامسون برای گونه‌های متفاوت پرداخته خواهد شد. در این قسمت، به بررسی باریکه یون هیدروژن، هلیوم، کربن و نیتروژن یک‌بار یونیزه با حداکثر انرژی ۲۵ کیلوالکترون ولت در هر دو سیستم منحرف‌کننده خواهیم پرداخت. به منظور بررسی رفتار عملکرد این سیستم، در شکل ۹، نمودار سهمی شکل مرتبط با ردیابی یون هیدروژن، هلیوم، کربن و نیتروژن یک بار یونیزه با حداکثر انرژی ۲۵ کیلوالکترون ولت در دو سیستم منحرف‌کننده مجزا و مشترک با فاصله یکسان مگنت‌ها تا آشکارساز نشان داده شده است.



شکل (۹): نمودار سهمی شکل مرتبط با ردیابی یون هیدروژن، هلیوم، کربن و نیتروژن یک بار یونیزه با حداکثر انرژی ۲۵ کیلوالکترون ولت در دو سیستم منحرف‌کننده مجزا و مشترک با فاصله یکسان مگنت‌ها تا آشکارساز نسبت به مجزا.

بر اساس شکل ۹، در هر دو سیستم منحرف‌کننده براساس روابط ۱ و ۲ یون‌هایی با جرم بیشتر به محور λ نزدیکتر هستند و سهمی بسته تری نسبت به هیدروژن خواهند داشت که نشان دهنده درستی عملکرد طیف‌سنج جرمی تامسون می‌باشد. از سویی دیگر با میدان الکتریکی و مغناطیسی یکسان، در مقایسه این دو سیستم نسبت به یکدیگر می‌توان نتیجه گرفت که گستردگی محور λ برای سیستم تامسون با منحرف‌کننده مشترک (با فاصله یکسان مگنت‌ها تا آشکارساز) نسبت به سیستم منحرف‌کننده مجزا بیشتر خواهد بود.

۵. جمع بندی

در این مقاله به بررسی مقایسه رفتار دو سامانه طیف‌سنج جرمی یون تامسون با منحرف‌کننده‌های مجزا و مشترک به صورت سه‌بعدی توسط نرم‌افزار کامسول پرداخته شده است. خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از بررسی‌های انجام شده در این مطالعه شبیه‌سازی عبارت هستند از:

- با در نظر گرفتن یون هیدروژن با محدوده انرژی ۱ تا ۲۵ کیلوالکترون ولت در هر دو سیستم منحرف‌کننده مجزا و مشترک با میدان الکتریکی و مغناطیسی یکسان نشان دادیم که ضریب نمودار سهمی بازای نسبت جرم به بار یکسان برای حالت منحرف‌کننده مشترک بیشتر از حالت مجزا است.
- بر اساس نتایج به دست آمده، سیستم منحرف‌کننده مشترک با میدان الکتریکی کمتری نسبت به حالت مجزا می‌تواند به همان نتایج دست‌یافت.
- سیستم تامسون با منحرف‌کننده مشترک دارای ابعاد کوچک‌تری نسبت به حالت مجزا است و در کاربردهایی که محدودیت فضایی وجود دارد، این نوع طیف‌سنج می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

گونه‌های متفاوت یون در هر دو نوع سیستم بهینه است اما سیستم تامسون با منحرف‌کننده مشترک می‌تواند در راستای \mathcal{Y} و \mathcal{X} براساس ابعاد طراحی شده نسبت به حالت مجزا دارای گستردگی دامنه ذرات باشد.

• در ادامه به بررسی باریکه یون هیدروژن، هلیوم، کربن و نیتروژن یکبار یونیزه با محدوده انرژی ۱ تا ۲۵ کیلو الکترون ولت در هر دو سیستم منحرف‌کننده خواهیم پرداخت. نتایج نشان می‌دهد که با فرض میدان الکتریکی و مغناطیسی یکسان، جداسازی نوع

۶. مراجع

1. H. R. Kaufman, S. R. Raymond. Ion source design for industrial applications. *AIAA J.* 20 (6) (1982) 745-760.
2. I. G. Brown. *The Physics and Technology of Ion Sources*. John Wiley & Sons, 2004.
3. N. V. Gavrilov, G. A. Mesyats, S. P. Nikulin, G. V. Radkovskii, A. Elkind, A. J. Perry, J. R. Treglio. New broad beam gas ion source for industrial application. *J. Vacuum Sci. Techno. A: Vacuum Surfaces Films* 14 (3) (1996) 1050-1055.
4. V. V. Zhurin. *Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology*. John Wiley & Sons, 2012.
5. A. E. Giannakopoulos, B. Thomas, A. W. Colburn, D. J. Reynolds, E. N. Raptakis, A. A. Makarov, P. J. Derrick. Tandem time-of-flight mass spectrometer (TOF-TOF) with a quadratic-field ion mirror. *Rev. Sci. Instrum.* 73 (5) (2002) 2115-2123.
6. A. Alejo, D. Gwynne, D. Doria, H. Ahmed, D.C. Carroll, R. J. Clarke, D. Neely, G. G. Scott, M. Borghesi, S. Kar. Recent developments in the Thomson Parabola Spectrometer diagnostic for laser-driven multi-species ion sources. *J. Instrument.* 11 (10) (2016) C10005.
7. J. A. Cobble, K. A. Flippo, D. T. Offermann, F. E. Lopez, J. A. Oertel, D. Mastrosimone, S. A. Letzring, N. Sinenian. High-resolution Thomson parabola for ion analysis. *Rev. Sci. Instrum.* 82 (11) (2011).
8. J. Teng, S. K. He, Z. G. Deng, B. Zhang, W. Hong, Z. M. Zhang, B. Zhu, Y. Q. Gu. A compact high resolution Thomson parabola spectrometer based on Halbach dipole magnets. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 935 (2019) 30-34.
9. M. Salvadori, M. Sciscio, G. Di Giorgio, M. Cipriani, P. L. Andreoli, G. Cristofari, R. De Angelis, D. Giulietti, F. Consoli, D. Margarone. Univocal discrimination of α particles produced by 11B (p, α) 2α fusions in laser-matter experiments by advanced Thomson spectrometry. *Laser Particle Beams* 2023 (2023) e6.
10. C. Salgado-López, J. I. Apiñaniz, J. L. Henares, J. A. Pérez-Hernández, D. de Luis, L. Volpe, G. Gatti. Angular-resolved Thomson parabola spectrometer for laser-driven ion accelerators. *Sensors* 22 (9) (2022) 3239.
11. D. Jung, R. Hörlein, D. Kiefer, S. Letzring, D. C. Gautier, U. Schramm, C. Hübsch, R. Öhm, B. J. Albright, J. C. Fernandez, D. Habs. Development of a high resolution and high dispersion Thomson parabola. *Rev. Sci. Instrum.* 82 (1) (2011).
12. D. Gwynne, S. Kar, D. Doria, H. Ahmed, M. Cerchez, J. Fernandez, R. J. Gray, J. S. Green, F. Hanton, D. A. MacLellan, P. McKenna. Modified Thomson spectrometer design for high energy, multi-species ion sources. *Rev. Sci. Instrum.* 85 (3) (2014).