

بررسی شتاب‌دهی ذرات باردار از طریق بازاتصال مغناطیسی در محیط‌های پلاسمایی

مهديه مهدی‌زاده، محبوب حسین پور و محمدعلی محمدی

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

پست الکترونیکی: Ma_mehdizade@sut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۹/۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۶/۱۷)

چکیده

بازاتصال مغناطیسی که در پلاسماهای با رسانندگی الکتریکی بالا رخ می‌دهد، باعث تغییر ساختار خطوط میدان مغناطیسی و تبدیل انرژی مغناطیسی به انرژی جنبشی، گرمایی و شتاب‌دهی ذرات باردار می‌شود. این فرایند نقش مهمی در تغییر دینامیک پلاسماهای آزمایشگاهی، مانند پلاسمای هم‌جوشی توکامک و پلاسماهای فضایی، مانند کرونای خورشید، بازی می‌کند. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تولید شده در بازاتصال مغناطیسی باعث شتاب گرفتن و سوق یافتن ذرات باردار می‌شوند. لذا ذرات بر حسب مکان و انرژی اولیه‌شان یا می‌توانند شتاب‌دار شده و از ناحیه بازاتصال با انرژی بالایی خارج شوند و یا در میدان‌های مغناطیسی محصور شوند. در این مطالعه، نحوه شتاب‌دار شدن و گیرافتادگی ذره باردار (پروتون) را با فرض انرژی‌های اولیه و مکان‌های اولیه متفاوت بررسی می‌کنیم. محاسبات عددی ما نشان می‌دهند که ساختار اسپاینی بازاتصال مغناطیسی سه بعدی، می‌تواند به عنوان یک شتاب‌دهنده بالقوه برای شتاب دادن ذرات باردار در نظر گرفته شود. در چنین شرایطی پروتون می‌تواند به انرژی نهایی در حدود چندین مگا الکترون ولت (نسبیتی) رسیده و در مدت زمان کوتاه (چندین میلی ثانیه) شتاب بگیرد. مسیر و انرژی نهایی ذرات به شدت تحت تأثیر مکان پرتاب (مکان اولیه) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بازاتصال مغناطیسی، مغناطویدرودینامیک، شتاب‌دهی ذرات باردار

۱. مقدمه

شوند. به همین دلیل این فرایند بازاتصال مغناطیسی^۱ نامیده می‌شود [۱-۳]. شتاب‌دهی ذرات باردار از طریق انرژی آزاد شده طی فرایند بازاتصال مغناطیسی یکی از مهم‌ترین مفاهیم در عرصه اختر فیزیک به خصوص در زمینه شراره‌های خورشیدی^۲

در پلازما با رسانندگی بالا که با مغناطویدرودینامیک آرمانی توصیف می‌شود، خطوط میدان مغناطیسی در پلازما منجمد هستند. فرایند متضاد زمانی اتفاق می‌افتد که اثرهای غیر آرمانی جای‌گزیده و پخشی مانند مقاومت یا تانسور فشار غیرهمسان‌گرد به خطوط میدان اجازه دهند تا هم‌دیگر را قطع و دوباره متصل

۱. Magnetic reconnection

۲. Solar flare

مغناطیسی در نزدیکی این نقطه‌های صفر از طریق دو ساختار هندسی متفاوت تعریف می‌شود:

(۱) صفحه فن^۳ (خطوط پیوسته‌ای از میدان که در صفحه $x-y$ در حال دور یا نزدیک شدن به نقطه صفر می‌باشند).

(۲) محور اسپاین^۴ (خطوط میدان مغناطیسی روی محور z که در حال نزدیک یا دور شدن از نقطه صفر می‌باشند) [۸].

در این مقاله تأثیر شرایط اولیه ذره باردار بر نحوه شتابگیری‌اش در محیط بازاتصال مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مدل و معادلات اساسی

در این مطالعه ساختار خطوط میدان مغناطیسی برگرفته از مدل اسپاینی، که توسط پرست-تیتو^۵ [۸] ارائه شده است، بوده لذا فرم کلی میدان مغناطیسی و الکتریکی در دستگاه استوانه‌ای به شکل زیر خواهد بود:

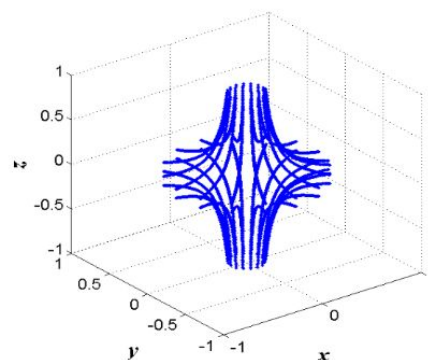
$$\mathbf{B} = B_0 \frac{R}{L} e_R - 2B_0 \frac{z}{L} e_z \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = E_0 L \frac{\sin}{R} e \quad (2)$$

در روابط فوق L اندازه ابعاد منطقه بازاتصال، B_0 اندازه میدان مغناطیسی در $R=L$ و $Z=0$ و E_0 اندازه میدان الکتریکی در $R=L$ و $90^\circ =$ است. شکل ۱ نمایشی از رفتار خطوط میدان مغناطیسی است.

این مدل از بازاتصال (اسپاینی) در سطوح جریانی که سراسر حجم اطراف نقطه صفر را پوشش می‌دهند اتفاق می‌افتد [۸]. جریان سطحی واقع در نقطه صفر، ناشی از تلاشی شدن ساختار خطوط میدان مغناطیسی و همچنین اختلال اسپاین (محور z) و سطح فن (صفحه $x-y$) می‌باشد.

صفحه‌ای که اسپاین و فن را به هم می‌رساند، شامل اختلال برشی است. جریان در ابتدا در راستای اسپاین عمود بر صفحه برشی حرکت کرده و سپس روی صفحه فن گسترش می‌یابد.



شکل ۱. ساختار سه بعدی خطوط میدان مغناطیسی اطراف مبدأ.

است. در واقع به واسطه رخ داد شراره‌های خورشیدی تعداد زیادی از ذرات باردار شتاب گرفته و به انرژی‌هایی بیشتر از انرژی‌های مربوط به سرعت‌های حرارتی می‌رسند. مشاهدات و نتایج بدست آمده از ماهواره RHESI^۱ منبع غنی از اطلاعات مربوط به فرایند شتاب‌دهی ذرات باردار می‌باشد. هرچند پروتون موجود در شراره‌های خورشیدی به صورت آنی، طی شتابگیری‌اش به انرژی‌هایی در حدود 10 MeV می‌رسد [۴]، اما بر اساس مشاهدات صورت گرفته بخش اعظمی از انرژی انتقال یافته به ذرات باردار ($50-10\%$) چیزی حدود $100-20 \text{ eV}$ است [۵]. با وجود این که سایر سازوکارها برای شتاب‌دهی ذرات باردار همچون امواج ضربه و آشوب‌ها محتمل می‌باشند، اما شتاب‌دهی ذرات باردار از طریق میدان‌های الکتریکی ثابت با زمان ناشی از فرایند بازاتصال مغناطیسی، هنوز هم از جمله عمده‌ترین روش‌ها برای انتقال انرژی به ذرات باردار در شراره‌های خورشیدی هستند. نواحی نزدیک به نقطه صفر^۲ (مکانی که تمام مؤلفه‌های میدان مغناطیسی اثرات یکدیگر را خنثی می‌کنند) در بازاتصال‌های مدل سه بعدی یکی از مهم‌ترین مناطق برای شتاب‌دهی ذرات باردار موجود در شراره‌های خورشیدی هستند که ذاتاً نسبت به مدل‌های ساده دو بعدی، ساختار مغناطیسی پیچیده‌تری دارند [۶-۸]. امروزه حضور تعداد زیادی نقطه صفر سه بعدی در شراره‌های خورشیدی به اثبات رسیده است [۹]. ساختار کلی خطوط میدان

۳. Fan

۴. Spine

۵. Priest-Titov

۱. Ramaty High Energy Spectroscopic Imager

۲. Null point

جدول ۱. کمیات بدون بعد شده طبق مقادیر ثابت.

کمیت‌ها و پارامترها	
$B^* = B_0$ (gauss)	میدان مغناطیسی: B
$E^* = \frac{V^* B^*}{c} \left(\frac{\text{statvolt}}{\text{cm}} \right)$	میدان الکتریکی: E
10° (cm)	فاصله از مبدأ: r
$V^* = \frac{E_0}{B_0 c} \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right)$	سرعت: V
$T^* = \frac{\gamma f m_0 c}{B_0 q }$ (s)	زمان: T
$M_0(g)$ جرم سکون ذره	جرم: m

جدول ۲. داده‌های مربوط به تغییرات فاصله پرتاب از نقطه صفر در صفحه $y-z$

شماره	x_0	y_0	z_0	r_0	بیشینه انرژی جنبشی (eV)
۱	۰	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	3×10^7
۲	۰	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	0.6×10^7
۳	۰	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	0.3×10^7
۴	۰	۱	۱	۱	0.15×10^7
۵	۰	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵	0.15×10^7
۶	۰	۲	۲	۲	0.12×10^7
۷	۰	۲٫۵	۲٫۵	۲٫۵	0.12×10^7

شده در جدول ۱ بدون بعد شده‌اند.

در واقع جریان هم در راستای اسپاین و هم روی صفحه فن شارش دارد.

۴. نتایج

نتایج حاصله بر روی پروتون و تأثیر شرایط اولیه بر روی آن در زیر ارائه شده است.

معادلات سرعت و حرکت ذرات باردار که تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی قرار می‌گیرند به ترتیب به صورت زیر تعریف شده است [۱۰].

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{\mathbf{P}}{m_0 \gamma} \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = q(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{P} \times \mathbf{B}}{cm_0 \gamma}) \quad (3)$$

۱.۴. تأثیر فاصله اولیه از نقطه صفر بر شتاب‌گیری پروتون
ذره از نقاط مختلف صفحه $y-z$ ($\theta = 90^\circ$) (صفحه‌ای که بنا بر رابطه (۲) میدان الکتریکی در آن بیشینه بوده و محل مناسبی برای شتاب‌گیری می‌باشد) شروع به حرکت می‌کند. تحت شرایطی که انرژی اولیه 300 eV بوده و سمت‌گیری اولیه یکسان ($\text{pitch} = 92^\circ$) محاسبات نسبی و ذره پروتون است، جدول ۲ نشان دهنده مختصات مکان اولیه پرتاب می‌باشد. (البته شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی اولیه ثابت، و به ترتیب برابر با 0.1 statvolt/cm و 100 gauss در دستگاه گاوسی می‌باشد).

که در آن، X, P, E, B, c, t, m_0 و به ترتیب نشان‌گر بردار مکان، بردار تکانه، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، زمان، سرعت نور، جرم سکون ذره و ضریب نسبی می‌باشند.

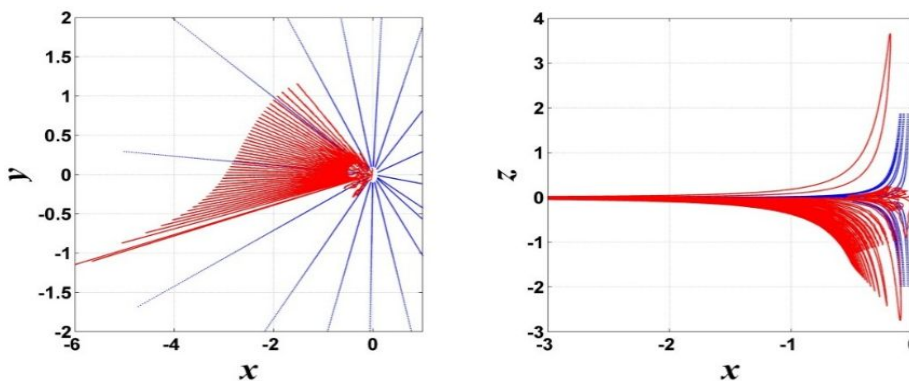
۳. تحلیل عددی و شبیه‌سازی

کد مورد استفاده در این مطالعه که به حل ریاضی معادلات دیفرانسیل اختصاص یافته در سال ۲۰۰۹ در محیط FORTRAN90 توسط جان بارکارد^۱ نوشته شده است. با مشخص کردن شرایط اولیه برای برنامه و البته ساختار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و همچنین معادلات مد نظر، خروجی‌هایی که شامل اطلاعاتی در مورد مسیر، انرژی و ... می‌باشند را برای ذره آزمون به دست آورده و بدین ترتیب حرکت ذره را با توجه به شرایط، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهیم. کمیات مورد استفاده در برنامه، با توجه به مقادیر ارائه

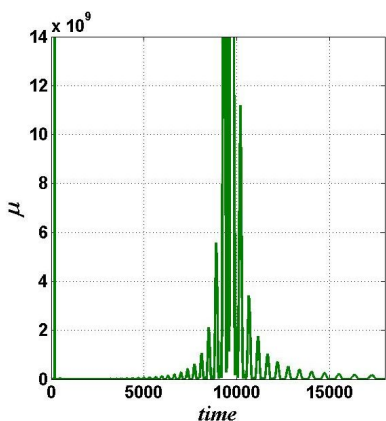
۱.۱.۴. شتاب گرفتن ذره آزمون در صفحه فن

شکل ۲ نشان دهنده مسیر ذره شماره ۱ جدول است (خطوط آبی زمینه، تصویر خطوط میدان مغناطیسی روی صفحه فن است). همان‌طور که از شکل پیداست، ذره بعد از تعداد زیادی حرکت نامنظم جهشی در اطراف نقطه صفر، روی صفحه فن و در امتداد خطوط میدان مغناطیسی (زاویه پیش‌ش 90°) شکل ۳ از محیط بازاتصال خارج می‌شود.

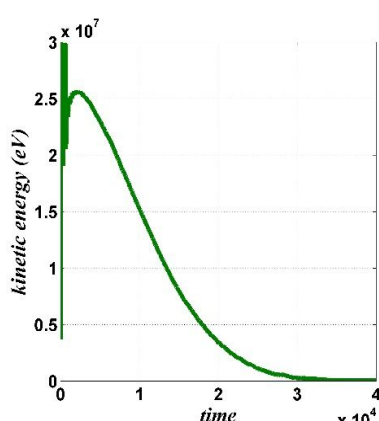
۱. John burkardt



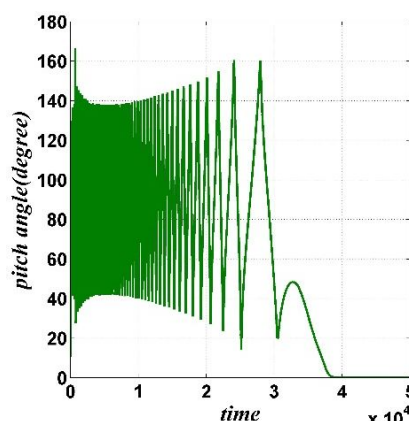
شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شکل سمت راست نشانگر مسیر ذره با مشخصات شماره یک جدول ۱، در صفحه $x-y$ و شکل سمت چپ در صفحه $x-z$ می باشد، خطوط آبی نیز نشانگر تصویر خطوط میدان مغناطیسی در این صفحه هستند.



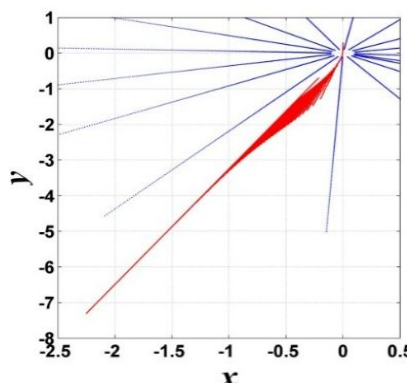
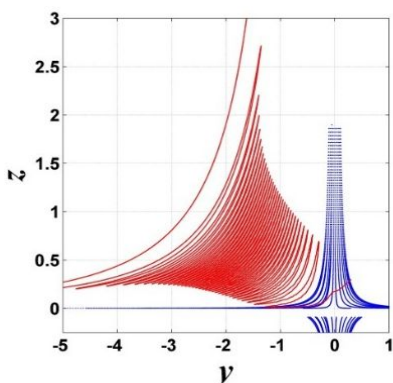
شکل ۵. تغییرات زمانی گشتاور مغناطیسی ذره با مشخصات شماره یک جدول ۲.



شکل ۴. تغییرات زمانی انرژی جنبشی ذره با مشخصات شماره یک جدول ۲.



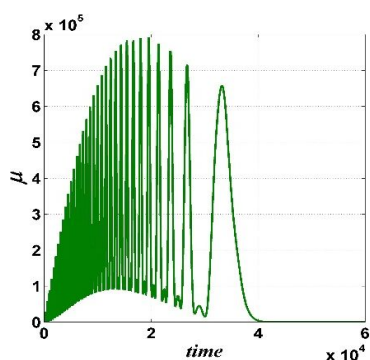
شکل ۳. تغییرات زمانی زاویه پیچش ذره با مشخصات شماره یک جدول ۲.



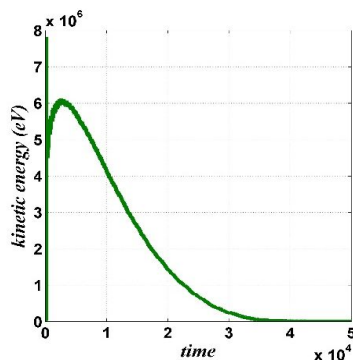
شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شکل سمت راست نشانگر مسیر ذره با مشخصات شماره دو جدول ۲، در صفحه $x-y$ و شکل سمت چپ در صفحه $y-z$ است.

از محور اسپانی شدت میدان الکتریکی طبق رابطه (۲)، کاهش یافته و متعاقباً سرعت سوق و انرژی جنبشی افت خواهد داشت. این افت در انرژی جنبشی تا مقادیر 10^4 eV ادامه داشته و بعد از آن تغییرات کمتر می شود. شکل ۵ نشان دهنده تغییرات گشتاور مغناطیسی ذره بر

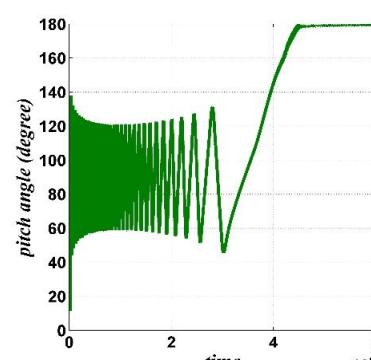
مشاهده می شود، که هرچند ذره در امتداد محور اسپاین جهش انجام داده، اما در این راستا حرکتش محدود است. شکل ۴ بیانگر کسب انرژی بالا (در حدود 10 MeV) توسط ذره در مدت زمان بسیار کم (چند میلی ثانیه) می باشد. در واقع مسیر حرکت ذره به گونه ای است که به دلیل دور شدن



شکل ۹. تغییرات زمانی گشتاور مغناطیسی ذره با مشخصات شماره ۲ و جدول ۲.



شکل ۸. تغییرات زمانی انرژی جنبشی ذره با مشخصات شماره ۲ و جدول ۲.



شکل ۷. تغییرات زمانی زاویه پیش ذره با مشخصات شماره ۲ و جدول ۲.

مغناطیسی، گشتاور مغناطیسی نیز نوسان می‌کند و زمانی که ذره روی محور اسپاین قرار می‌گیرد به دلیل افزایش شدت میدان مغناطیسی گشتاور مغناطیسی کاهش می‌یابد.

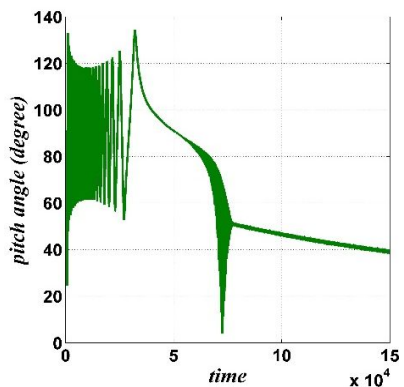
۳.۱.۴. گیرافتادن ذره آزمون

مسیر حرکت ذره شماره ۳ از جدول ۲، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که محدوده نوسان ذره روی محور x تقریباً کوچک بوده و این نشانگر نوسانات شدید و نیاز بیشتر ذره به زمان برای خروج از ناحیه بازاتصالی می‌باشد. از این رو این نوع حرکت ذره اصطلاحاً گیر افتادن ذره در محیط بازاتصالی نامیده می‌شود. براساس مشاهدات مربوط به شکل ۱۱ به دلیل نوسانات شدید ذره حتی در زمان‌های بالا نیز جهت‌گیری ذره نسبت به خطوط میدان هم‌چنان در حال تغییر می‌باشد. طبق شکل ۱۲ هرچند ذره در کسب انرژی تأخیر زمانی دارد (کمی بیشتر از ذره شماره ۲) اما به انرژی‌هایی در حدود ۳ MeV رسیده است. این انرژی مربوط به نوسانات شدید ذره و گیر افتادن آن در محیط بازاتصالی می‌باشد، زیرا ذره طی حرکت‌های رفت و برگشتی (جهشی) فرصت بیشتری را برای کسب انرژی از میدان دارد. علی‌رغم انرژی بالایی که ذره بدست می‌آورد به دلیل دور شدن از نقطه صفر طی نوساناتش به تدریج انرژی خود را از دست داده و به مقادیر حتی کمتر از انرژی اولیه خود می‌رسد. رفتار گشتاور مغناطیسی ذره مشابه حالت‌های قبلی بوده و با نوسان ذره دچار افت و خیز می‌شود. این افزایش در شدت میدان مغناطیسی و کاهش در شعاع لارموری به اندازه‌ای است که حتی کوچک‌ترین نوسان

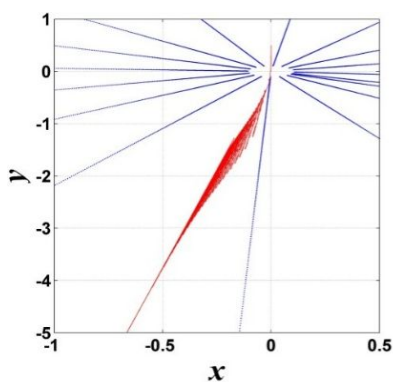
حسب زمان است. در زمان‌های پایین، زمانی که ذره در نزدیکی نقطه صفر قرار دارد و میدان مغناطیسی ضعیف است گشتاور مغناطیسی بالایی دارد ($\mu = \frac{mV^2}{2B}$) اما با گذشت زمان وقتی ذره از نقطه صفر در صفحه فن دور می‌شود، شدت میدان مغناطیسی نیز بیشتر شده و ذره مغناطیده می‌شود. از این رو گشتاور مغناطیسی کاهش می‌یابد. (اصولاً ذره مغناطیده با گشتاور پایین و ذره غیرمغناطیده با گشتاور بالا مشخص می‌شود).

۲.۱.۴. شتاب گرفتن ذره آزمون در راستای اسپاین

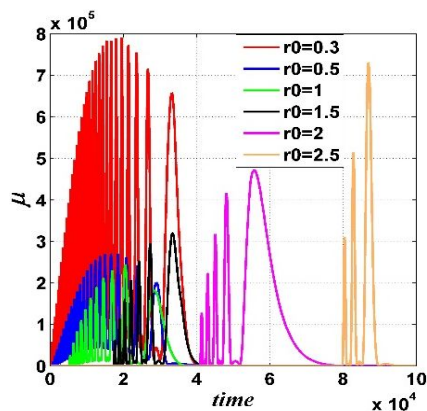
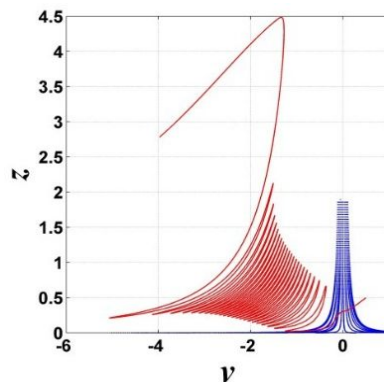
مسیر ذره آزمون شماره ۲ از جدول ۲، در شکل ۶ بیانگر حرکت‌های نوسانی ذره در صفحه $x-y$ می‌باشد. ذره بعد از تعدادی نوسان محدود در صفحه $x-y$ به حرکت تقریباً نامحدود خود در راستای محور اسپاین ادامه داده و همان‌طور که از شکل ۷ پیداست با زاویه پیش 180° (روی محور اسپاین) از منطقه بازاتصالی خارج می‌شود. طبق شکل ۸ اگر چه انرژی ذره به دست می‌آورد از مرتبه ۳ MeV است، اما نسبت به انرژی جنبشی ذره شماره ۱ تا حدودی کمتر بوده و علاوه بر این در کسب انرژی ناشی از بازاتصالی تأخیر زمانی دارد. در واقع ذره طی نوسان‌هایی که انجام می‌دهد (که منجر به دور شدن از نقطه صفر و کاهش شدت میدان الکتریکی می‌شود) انرژی جنبشی بدست آمده را تبدیل به انرژی پتانسیل الکتریکی می‌کند و هنگام خروج از ناحیه انرژی جنبشی نهایی 6×10^3 eV را خواهد داشت. طبق شکل ۹ مشاهده می‌شود، که به موازات نوسانی که ذره دارد و افزایش و کاهش شدت میدان



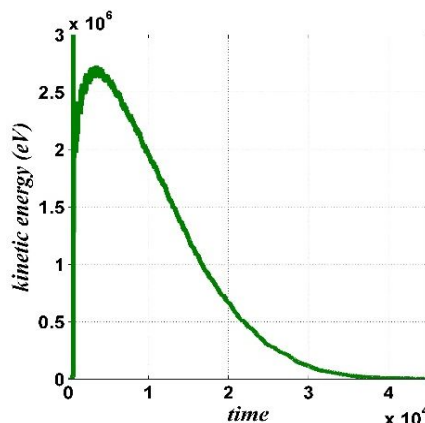
شکل ۱۱. تغییرات زمانی زاویهٔ پیش‌دانه ذره با مشخصات شماره ۲. سه از جدول ۲.



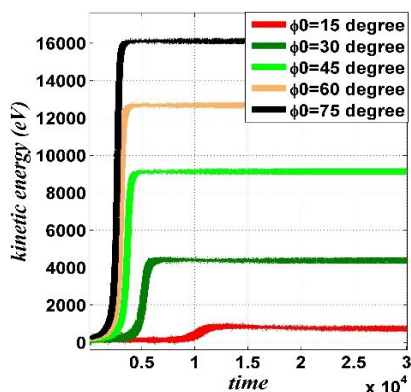
شکل ۱۰. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شکل سمت راست نشانگر مسیر ذره با مشخصات شماره ۲. در صفحهٔ x-y و شکل سمت چپ در صفحهٔ y-z می‌باشد.



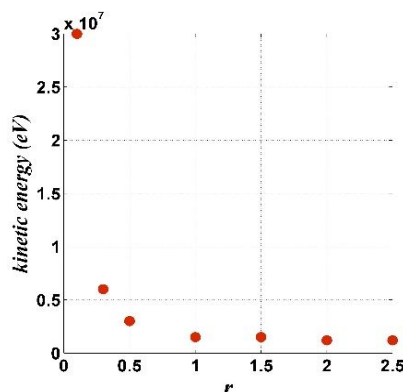
شکل ۱۳. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) تغییرات زمانی گشتاور مغناطیسی ذره با مشخصات شماره ۲ تا هفت از جدول ۲.



شکل ۱۲. تغییرات زمانی انرژی جنبشی ذره با مشخصات سه از جدول ۲.



شکل ۱۵. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) تغییرات زمانی انرژی جنبشی ذره با مشخصات شماره ۱ یک تا پنج از جدول ۳.



شکل ۱۴. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) تغییرات بیشینه انرژی جنبشی ذره نسبت به فاصلهٔ اولیه‌اش از نقطهٔ صفر.

کندتر می‌شود.

در مقایسهٔ صورت پذیرفته برای ذره در موارد ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از نقطهٔ صفر به دلیل افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار بیشینهٔ گشتاور مغناطیسی رو به کاهش است. اما برای موارد ۴ به بعد به دلیل دوری ذره

(در زمان‌های بالا) در گشتاور مغناطیسی دیده نشده و در مقادیر کمتر از یک (نزدیک صفر) ثابت می‌ماند. رفتار ذره چهارم و ششم مشابه ذره شماره یک و ذره شماره پنج و هفت مشابه ذره شماره دو می‌باشد. با این تفاوت که هر چه فاصلهٔ ذره از نقطهٔ صفر افزایش می‌یابد پاسخ به شرایط

جدول ۳. داده‌های مربوط به تغییرات زاویه سمتی صفحه ورودی ذره.

شماره	x_0	y_0	z_0	زاویه سمتی (درجه)	بیشینه انرژی جنبشی (eV)
۱	۰٫۹۶	۰٫۲۵	۰٫۵	۱۵	۱۰۰۰
۲	۰٫۸۶	۰٫۵	۰٫۵	۳۰	۴۵۰۰
۳	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۵	۴۵	۹۰۰۰
۴	۰٫۵	۰٫۸۶	۰٫۵	۶۰	۱۳۰۰۰
۵	۰٫۲۵	۰٫۹۶	۰٫۵	۷۵	۱۶۰۰۰

مؤثرتر بوده و انرژی بیشتری حاصل خواهد شد. همچنین به دلیل بالا بودن سرعت سوق، ذره با کمترین نوسان و طی مسیری نسبتاً ساده از محیط بازاتصالی در راستای محور اسپاین خارج می‌شود (شکل ۱۶). در واقع هرچه زاویه سمتی ذره افزایش می‌یابد، مسیری که در راستای محور z طی می‌کند نیز افزایش می‌یابد، که این نشانگر بالا بودن سرعت سوق به سبب قوی بودن میدان الکتریکی در این نواحی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که به دلیل زیاد بودن فاصله اولیه ذره از نقطه صفر ($r_0 = 1$) و آهنگ تغییر کند میدان الکتریکی در این ناحیه، ذره بعد از دور شدن از ناحیه بازاتصالی، انرژی جنبشی خود را سریع از دست نداده و تا مدت‌ها همچنان انرژی جنبشی بالایی خواهد داشت (شکل ۱۵).

۳.۴. بررسی تأثیر انرژی اولیه ذره بر شتاب‌گیری آن

همان‌طور که قبلاً اشاره شد به دلیل آزادسازی انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی طی فرایند بازاتصالی، ذره باردار که در این ناحیه قرار می‌گیرد به سطوح بالایی از انرژی دست می‌یابد که میزان این انرژی به شرایط اولیه اش بستگی دارد. یکی از این شرایط، انرژی اولیه ذره می‌باشد. در مطالعه صورت گرفته تا به حال انرژی اولیه ذره ۳۰۰ eV در نظر گرفته شده بود. اما در این بخش به منظور بررسی چگونگی تأثیر تغییرات انرژی اولیه بر مسیر و انرژی نهایی ذره آزمون، در هر سری از محاسبات صورت گرفته، طبق شرایط اولیه (جدول ۴)، انرژی اولیه ذره طبق جدول ۵ تغییر کرده است.

از نقطه صفر و زمان بر بودن رسیدن ذره به مبدأ، زمان رسیدن به بیشینه گشتاور مغناطیسی افزایش می‌یابد (شکل ۱۳).

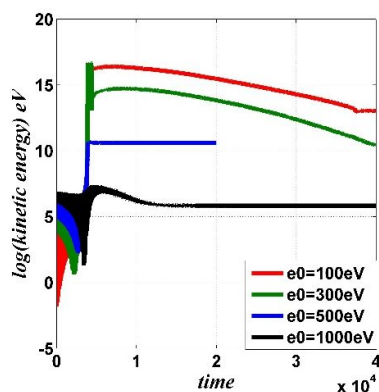
با در نظر گرفتن مسیر ذره در تمام موارد جدول ۱، مشاهده می‌شود که هرچه فاصله ذره از مبدأ (محل حضور جریان و میدان الکتریکی قوی ناشی از بازاتصالی) افزایش می‌یابد، بیشینه انرژی که بدست می‌آورد کمتر و تأخیر زمانی در کسب آن بیشتر شده است. این در حالی است که ذره نزدیک‌تر به مبدأ سریع‌تر شتاب گرفته و مقادیر قابل ملاحظه‌ای از انرژی جنبشی را بدست می‌آورد (شکل ۱۴).

بر اساس روابط تحلیلی $\frac{1}{r} mV^2 \propto V^2 \propto E^2 \propto \frac{1}{r^3}$ انتظار می‌رود که با افزایش r انرژی جنبشی کاهش یابد. که نتایج حاصل از جدول ۱ نیز این نکته را نشان می‌دهند.

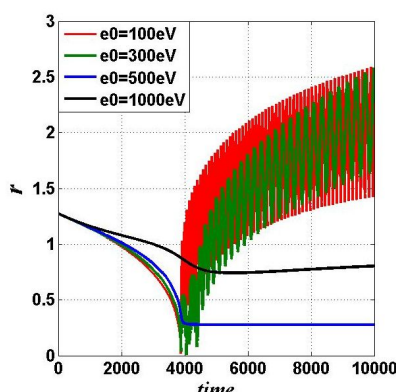
۲.۴. تأثیر تغییر زاویه سمتی بر روی شتاب‌گیری ذره

در این بخش با ثابت نگه داشتن فاصله شعاعی ذره از محور اسپاین، زاویه سمتی ذره را طبق مقادیر لیست شده در جدول ۳ تغییر می‌دهیم. سایر پارامترها همانند بخش قبلی بوده و تغییر نکرده‌اند.

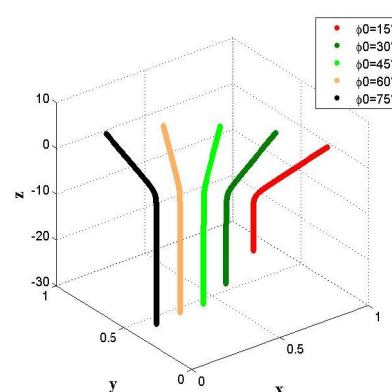
همان‌طور که داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهند ملاحظه می‌شود که با تغییر زاویه صفحه ورودی ذره (افزایش زاویه سمتی) ذره انرژی بیشتری را در مدت زمان کمتری بدست می‌آورد (شکل ۱۵). در واقع طبق رابطه (۲) هر چه منطقه پرتاب ذره به صفحه $z-y$ نزدیکتر می‌شود به دلیل افزایش شدت میدان الکتریکی و در نتیجه سرعت سوق، شتاب‌دهی ذره



شکل ۱۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات زمانی لگاریتم انرژی جنبشی ذره با مشخصات یک تا چهار از جدول ۵.



شکل ۱۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات زمانی فاصله ذره با مشخصات یک تا چهار از جدول ۵ از نقطه صفر.



شکل ۱۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مسیر سه بعدی ذره با مشخصات شماره یک تا پنج از جدول ۳.

جدول ۱. شرایط اولیه ذره.

x_0	y_0	z_0	B_0 (gauss)	E_0 (statvolt/cm)	θ_0 (درجه)	ϕ_0 (درجه)
۰٫۹	۰٫۹	۱	۳۳٫۳	۰٫۳۳۳	۰	۹۲

جدول ۲. داده‌های مربوط به تغییرات انرژی اولیه ذره.

شماره	انرژی اولیه (eV)	بیشینه انرژی (eV) $\times 10^7$
۱	۱۰۰	۱٫۳
۲	۳۰۰	۰٫۳
۳	۵۰۰	۰٫۰۰۴۳
۴	۱۰۰۰	۰٫۰۰۰۱۶

خارج می‌شود (شکل ۱۸).

۵. نتیجه‌گیری

یکی از شرایط تأثیر گذار، فاصله شعاعی ذره باردار از نقطه صفر در صفحه فن (x-y) می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که هرچه فاصله ذره از نقطه صفر افزایش می‌یابد بیشینه انرژی جنبشی کاهش یافته و مدت زمان شتاب‌گیری‌اش افزایش می‌یابد.

همچنین زاویه سمتی صفحه ورودی ذره در محدوده $90^\circ - 0^\circ$ تغییر داده شده است. با توجه به رابطه (۲) که بیانگر بیشینه بودن شدت میدان الکتریکی در صفحه z-y می‌باشد، نتایج نشان می‌دهند که هرچه ذره آزمون در لحظه پرتاب به صفحه z-y نزدیک‌تر باشد (زاویای نزدیک 90°)، سریع‌تر شتاب

۳۰۰ eV انرژی اولیه در مقایسه با انرژی نهایی ذره، که از مراتب MeV است، ناچیز بوده و بنابراین به منظور مطالعه بهتر تأثیر انرژی اولیه ذره بر رفتار آن، ذره آزمون تقریباً دور از نقطه صفر بوده و تحت تأثیر میدانی با شدت 0.99 kV/m که معادل $0.333 \text{ statvolt/cm}$ می‌باشد، قرار دارد.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که ذره در موارد ۱ و ۲ نسبت به حالت‌های ۳ و ۴ به دلیل پایین بودن انرژی اولیه و سرعتش، بیشتر تحت تأثیر تغییرات میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد و طی مسیرش بیشتر به نقطه صفر نزدیک شده و انرژی جنبشی بیشتری بدست می‌آورد. این در حالی است که ذره در موارد ۳ و ۴ به دلیل بالا بودن انرژی اولیه‌اش کمتر در محیط بازاتصالی درگیر نوسان شده و طی حرکتی ساده‌تر و بدون کسب بیشینه انرژی قابل مقایسه با موارد ۱ و ۲ سریع از محیط بازاتصالی

هرچه انرژی جنبشی اولیه افزایش می‌یابد ذره کمتر درگیر محیط بازاتصال، شرایط و خمش ناشی از آن شده و سریع و بدون کسب انرژی جنبشی قابل ملاحظه از محیط خارج می‌شود.

گرفته و به مقادیر زیادی در انرژی جنبشی خواهد رسید. با بررسی نتایج حاصل از تغییر انرژی جنبشی اولیه از $1000-100$ eV دریافتیم که انرژی اولیه ذره باردار نقش مهمی در میزان گیرافتادن آن در محیط بازاتصال دارد. به طوری که

مراجع

1. E Priest and T G Forbes, "Magnetic Reconnection MHD Theory and Applications", Cambridge University Press (2000).
2. M Yamada, R Kulsrud, and H Ji. *Rev. Mod. Phys.* **82** (2010) 603.
3. D Biskamp, "Magnetic Reconnection in Plasmas", Cambridge University Press (2000).
4. R P Lin *et al.*, *The Astrophysical Journal* **595** (2003) 69.
5. R P Lin and H S Hudson, *Solar phys.* **50** (1976) 153.
6. D I Pontin, *Rev. Adv. Space Res.* **47** (2011) 1508.
7. E R Priest and D I Pontin. *Phys. Plasmas* **16** (2009) 122101.
8. E R Priest and V S Titov, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **354** (1996) 2951.
9. D W Longcope and C E Parnell, *Solar Phys.* **254** (2009) 51.
10. S Dalla and P K Browning, *Astronomy & Astrophysics* **436** (2005) 1103.