

مقایسه لایه گذار آلفونی حاصل از کد ذره‌ای سه‌بعدی با داده‌های تجربی ماهواره کلاستر در حالت میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای جنوبی

امین اسماعیلی^۱ و محمدجواد کلایی^{۲*}

۱. پسادکتری، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۵/۴/۱۴، پذیرش نهایی: ۹۵/۷/۲۷)

چکیده

اخیراً با مطالعه آماری مشاهدات ماهواره کلاستر (CLUSTER satellite system) یک لایه گذار در داخل غلاف مغناطیسی گزارش شده است. این لایه با $MA=1$ (Alfven Mach) به جریان کلی ذرات (Bulk flow) اجازه می‌دهد که از فرآلفونی به فرآلفونی از طرف خارج کاسپ (Cusp) بیرونی به سمت داخل کاسپ تبدیل شود و در حالت باد خورشیدی با جهت میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای (Interplanetary Magnetic Field (IMF) شمالی مشاهده شود، اما نتایج شبیه‌سازی وجود آن را در شرایط باد خورشیدی با جهت میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای جنوبی در طول تمام مرز مغناطوسپهر نیز نشان می‌دهد. نقش این لایه به منظور درک تغییرات جریان کلی ذرات در نزدیکی مرز کاسپ بیرونی مهم است. به منظور تحلیل این لایه، از یک شبیه‌سازی سه‌بعدی ذره‌ای با اندازه بزرگ مقیاس برای برهم‌کنش باد خورشیدی با مغناطوسپهر زمین استفاده شده است. ما IMF را از جهت شمال به سمت جنوب چرخانده‌ایم تا دینامیک لایه گذار آلفونی (ATL) را با توجه به چرخش IMF بررسی کنیم. اگرچه در مطالعات آماری کلاستر (CLUSTER) تنها منطقه محدودی از مغناطوسپهر برای این لایه آلفونی مطالعه شده است، ما این لایه را برای کل مغناطوسپهر بررسی کرده و دینامیک آن را با توجه به چرخش IMF از شمال به سمت جنوب بررسی کرده‌ایم و در نهایت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی را با مشاهدات تجربی مقایسه کرده‌ایم. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای جریان‌های موازی ذرات و انتقال به ارتفاعات کمتر لایه گذار آلفونی با مشاهدات حاصل از ماهواره کلاستر برای حالت IMF جنوبی سازگار است.

واژه‌های کلیدی: کاسپ در ارتفاع بالا، لایه گذار آلفونی، ماهواره کلاستر، مغناطوسپهر.

۱. مقدمه

همکاران، ۲۰۰۳؛ کارگیل و همکاران، ۲۰۰۴). در بالای کاسپ در ارتفاع بالا و بر روی مرز مغناطوسپهر یک لایه گذار برای ماخ آلفونی وجود دارد. سرعت آلفونی (V_{Alfven}) سرعت امواجی است که در اثر جرم یون‌ها و نیروی بازگرداننده میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که مقدار آن نسبت اندازه میدان مغناطیسی به چگالی جرمی است: $V_{Alfven} = B / \sqrt{\rho \mu_0}$ که B ، اندازه میدان مغناطیسی، ρ ، چگالی جرمی ذرات و μ_0 ، تراوایی مغناطیسی خلأ است. عدد ماخ آلفونی نسبت سرعت مجموعه سیال به سرعت آلفون است: $M_a = |V_{ions}| / |V_{Alfven}|$ که این عدد در داخل مغناطوسپهر و در محدوده کاسپ بیرونی کوچک ($MA < 1$) یا فرآلفونی است و خارج از مغناطوسپهر بزرگ ($MA > 1$) یا فرآلفونی است. به منظور درک بهتر تغییرات جریان ذرات و درک مکانیزم بارش ذرات در

مغناطوسپهر یکی از نواحی مهم در فضای اطراف زمین و دیگر سیارات است و برهم‌کنش باد خورشیدی با آن یکی از مسائل اصلی اقلیم فضایی (Space Weather) است. اقلیم فضایی دانش شرایط فضایی است (عمدتاً ناحیه منظومه خورشیدی) که به‌طور عمده تحت تأثیر ذرات پرانرژی باد خورشیدی موجود در فضای بین سیاره‌ای قرار می‌گیرد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۳). این ذرات، بیشتر کاسپ مغناطیسی موجود در مغناطوسپهر را که مکان کمینه میدان مغناطیسی است، تحت تأثیر قرار می‌دهند. کاسپ در ارتفاعات میانه و پایین در طول مطالعات مغناطوسپهر به‌خوبی مطالعه شده است (نیول و همکاران، ۱۹۸۹؛ یاماوچی و همکاران، ۱۹۹۶؛ راسل، ۲۰۰۰) در حالی که کاسپ در ارتفاع بالا با وجود اهمیت آن، تنها اخیراً توسط سیستم ماهواره‌ای CLUSTER با جزئیات بررسی شده است (لاوود و همکاران، ۲۰۰۲؛ نایکوری و

توجه کند. در نهایت ما نتایج خود را در بخش نتیجه‌گیری خلاصه می‌کنیم.

۲. مدل شبیه‌سازی

ما از نسخهٔ به‌روزرسانی شدهٔ کد ذره‌ای سه‌بعدی (Tristan code) برای شبیه‌سازی خود استفاده کرده‌ایم (بونمان و همکاران، ۱۹۹۲؛ بونمان، ۱۹۹۳؛ سای و همکاران، ۲۰۱۵). مدل شبیه‌سازی ما، یک مدل گلوبال سه‌بعدی الکترومغناطیسی ذره‌ای است و معادلات استفاده‌شده در این شبیه‌سازی معادلات ماکسول است.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E} \quad (۱)$$

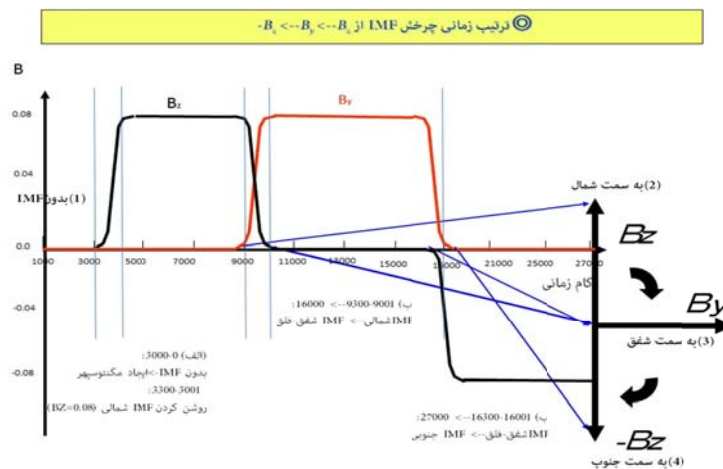
$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = c^2 \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{\epsilon_0} \mathbf{J} \quad (۲)$$

که در آن \mathbf{E} و \mathbf{B} بردارهای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، c سرعت نور و \mathbf{J} چگالی جریان الکتریکی و ϵ_0 ضریب گذردهی خلأ است و همچنین معادلهٔ لورنتز که مکان و سرعت ذرات را با توجه به نیروی الکترومغناطیسی واردشده بر آن‌ها تعیین می‌کند:

$$m_{i,e} \frac{d\mathbf{v}_{i,e}}{dt} = q_{i,e} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_{i,e} \times \mathbf{B}) \quad (۳)$$

که m و q به ترتیب جرم و بار ذره است. اندیس e برای الکترون‌ها و اندیس i برای یون‌ها استفاده شده است. ترتیب چرخش IMF در آن به صورت شکل ۱ است.

مرز بالایی کاسپ در ارتفاع بالا، ما روی کاسپ بیرونی راکد در طول IMF شمالی، تمرکز و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با داده‌های شهودی CLUSTER مقایسه کرده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی ذره‌ای برای کاسپ دیامغناطیسی، لایهٔ تهی‌شدهٔ پلاسمایی (Plasma Depletion layer, PDL) و ATL تطابق خوبی با داده‌های تجربی حاصل از کلاستر دارد (سای و همکاران، ۲۰۱۵). ما سعی کرده‌ایم تا داده‌های حاصل از مطالعات تجربی CLUSTER را در شبیه‌سازی بازسازی کنیم و بر روی ناحیهٔ کاسپ بیرونی در طول جهت‌های مختلف میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای IMF شمالی و جنوبی تمرکز کنیم. بخش‌های پیش‌رو به این ترتیب هستند: در ابتدا، مدل شبیه‌سازی و پارامترهای فیزیکی را توضیح داده‌ایم. سپس، نتایج را برای ضخامت لایهٔ آلفونی در شرایط مختلف IMF و در طول محدوده‌های مختلفی از مرزهای مغناطوسپهر که ناحیهٔ بالای کاسپ و نقطه‌ای را شامل می‌شود که نزدیک‌ترین فاصله با خورشید را در سطح درنگ‌گاه مغناطیسی دارد (Subsolar point)، گزارش کرده‌ایم. لاوارد و همکاران (۲۰۰۵) باریک‌شدن ATL را بر پایهٔ جریان‌های ذرات موازی با میدان مغناطیسی و عمود بر آن که از این لایه می‌گذرد، بررسی کرده‌اند و ما تحلیلی بر پایهٔ دامنهٔ میدان مغناطیسی موضعی را نیز اضافه کرده‌ایم که تحلیل میدان مغناطیسی می‌تواند دلیل تغییرات جریان‌های ذرات گذرنده از این ناحیه را نیز



شکل ۱. ترتیب زمانی چرخش IMF

به‌نجارشده نور است. مرکز حلقه جریان الکتریکی که میدان مغناطیسی دوقطبی زمین را ایجاد می‌کند در $(160\Delta, 137\Delta, 137\Delta)$ است. در محدوده زمانی $0 < \zeta < 3000\Delta t$ یک سرعت سوقی (v_{solar}) $v_{solar} = -0.5\tilde{c}$ ، نشانگر باد خورشیدی است که پیوسته در طول محور X در طول شبیه‌سازی در محدوده زمانی $0 < t < 27000$ اعمال می‌شود. چگالی باد خورشیدی تزیق شده نیز $\tilde{n} = 8$ الکترون-یون در هر سلول است، به طوری که در هر سلول، هر دو نوع ذره وجود دارد و نسبت جرمی $\frac{m_i}{m_e} = 16$ ، و سرعت‌های گرمایی یون و الکترون $v_{th,e,i} = (0.125, 0.625)$ است. تمام مقادیر واقعی فیزیکی می‌توانند از پارامترهای به‌نجارشده بر اساس سرعت باد خورشیدی نوعی و شرایط پلاسمای موجود در مغناطوسپهر به دست آیند. در این شبیه‌سازی کمیته فاصله از مرکز زمین تا درنگ‌گاه مغناطیسی (Magnetopause) روزانه (R_{mp}) در حدود ۵۰ برابر اندازه بعد شبکه‌ای (Δ) است. تمام مقادیر فیزیکی می‌توانند بر اساس سرعت باد خورشیدی و R_{mp} مقیاس‌بندی شوند و به دست آیند. برای مثال، اگر فرض کنیم که $R_{mp} = 64,000km$ (یعنی $10Re$) و سرعت باد خورشیدی $V_{SW} = 300 - 600 km/s$ (در اینجا $400 km/s$ یک مقدار نوعی سرعت باد خورشیدی است)، پس اندازه یک گرید شبکه یعنی Δ در حدود 1280 کیلومتر خواهد بود و 1000 گام زمانی در شبیه‌سازی نیز در حدود $7-14$ دقیقه خواهد بود. همچنین طول دبابی الکترونی در حدود 1792 کیلومتر خواهد بود. تمام پارامترهای به‌نجارشده در جدول ۱ ارائه شده است. در این مقاله، نتایج اولیه حاصل از شبیه‌سازی جهانی خود را که بر روی حالت IMF شمالی $(0, 0, +|Bz|)$ و حالت IMF جنوبی $(0, 0, -|Bz|)$ متمرکز شده است، در ارتفاعات بالای ناحیه مغناطوسپهر ارائه کرده‌ایم. در این پژوهش، ما از یک رژیم ماخ آلفونی پایین به اندازه $2/6$ در محل باد خورشیدی استفاده کرده‌ایم.

در این کد $\Delta = 0.2Re$ ($Re = 6400km$) شعاع زمین است) به عنوان اندازه هریعد خانه‌های شبکه $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ و به عنوان گام زمانی ($\omega_{pe}\Delta t = 0.125$) که ω_p بسامد پلاسمایی است) در نظر گرفته شده است. در ابتدا، ما در حدود 2.2×10^8 جفت یون- الکترون استفاده کرده‌ایم که این مطابق با یک چگالی ذره‌ای یکنواخت $n_e = n_i = 8$ جفت ذره بر واحد یک سلول از جعبه شبیه‌سازی است و ابعاد جعبه شبیه‌سازی در راستای x, y, z به ترتیب 275 و 275 و 365 است. مقادیر فیزیکی به‌نجارشده به صورت زیر است. در فرمول‌های زیر اندیس \sim به معنای مقدار به‌نجارشده است.

سرعت گرمایی (V_{th}):

$$\tilde{v}_{the,i} = \frac{v_{the,i}}{(\Delta / \Delta t)} \quad (4)$$

طول دبابی (λ_D):

$$\tilde{\lambda}_{De,i} = \tilde{v}_{the,i} / \tilde{\omega}_{pe,i} \quad (5)$$

طول لختی (λ_C):

$$\tilde{\lambda}_{ce,i} = \tilde{c} / \tilde{\omega}_{pe,i} \quad (6)$$

بسامد چرخشی یا سیکلوترونی (ω_C):

$$\tilde{\omega}_{ce,i} = \omega_{ce,i}\Delta t = \tilde{B}\Delta m_e / \Delta t m_{e,i} \quad (7)$$

که B اندازه میدان مغناطیسی است و شعاع لارمور (ρ_C):

$$\tilde{\rho}_{ce,i} = \tilde{v}_{the,i} / \tilde{\omega}_{ce,i} \quad (8)$$

و بتای پلاسمایی (β):

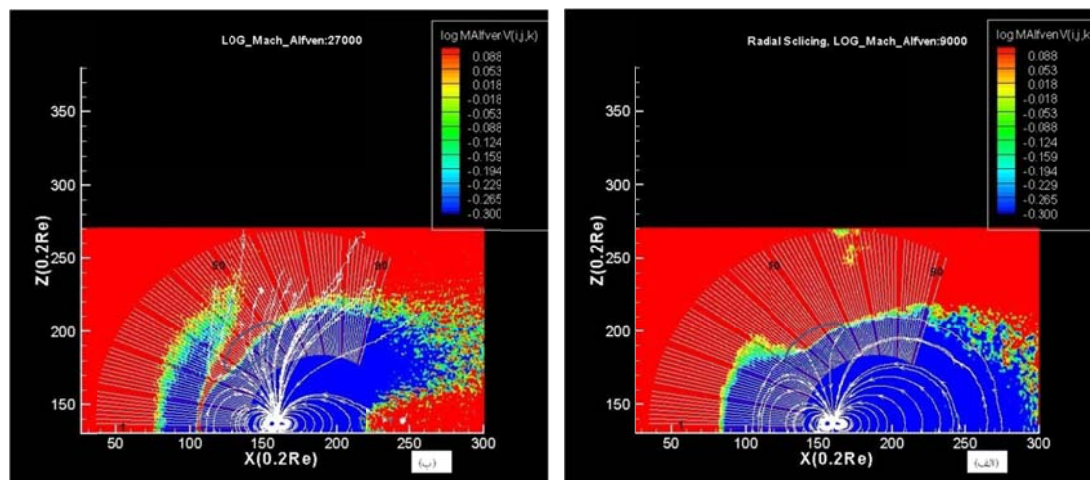
$$\tilde{\beta}_{ce,i} = \tilde{T}_{e,i}\tilde{\omega}_{pe,i} / \tilde{B} \quad (9)$$

(T) دمای ذرات است. مقادیر به‌نجارشده پارامترهای پلاسمای که در شبیه‌سازی ما استفاده شده است، عبارتند از: $\tilde{v}_{the,i} = (0.09, 0.045)$ ؛ $\tilde{\lambda}_{De,i} = (0.75, 1.5)$ ؛ $\tilde{\lambda}_{Ce,i} = (4.2, 16.1)$ ؛ $\tilde{\omega}_{ce,i} = (0.45, 3.5)$ ؛ $\tilde{\omega}_{pe,i} = (0.125, 0.031)$ ؛ $\tilde{\rho}_{ce,i} = (0.2, 0.8)$ ؛ $\tilde{T}_{e,i} = (0.008, 0.032)$ در اینجا $\tilde{c} = 0.5$ سرعت

در حالت IMF شمالی و جنوبی را در صفحه نصف‌النهاری X-Z نشان می‌دهد. در این نمودارها لایه زردرنگ، نشانگر لایه گذار آلفونی است و مقدار $\text{Log}(\text{MA})$ در آن‌ها تقریباً بین -0.2 تا 0.2 است که بر اساس مقاله لاوراد (لاوراد و همکاران، ۲۰۰۵) در نظر گرفته شده است. شکل ۳ همچنین خطوط شعاعی را نشان می‌دهد که گراف‌های خطی موجود در شکل ۴ در راستای این خطوط استخراج شده‌اند. همان‌طور که در نمودارهای ۳-الف و ۳-ب به وضوح دیده می‌شود، در حالت IMF جنوبی، لایه آلفونی در بالای درگاه قطبی ذرات بیرونی، به سمت ارتفاعات پایین‌تری منتقل می‌شود (لایه آلفونی در ناحیه درگاه قطبی ذرات، در نمودار ۳-ب که با بیضی نمایش داده شده است، در ارتفاعات کمتری در مقایسه با نمودار ۳-الف قرار دارد) که این با مطالعات آماری تجربی حاصل از CLUSTER، تطابق خوبی دارد.

۲-۳. مشاهده ATL برای حالت IMF جنوبی و مقایسه با نتایج تجربی

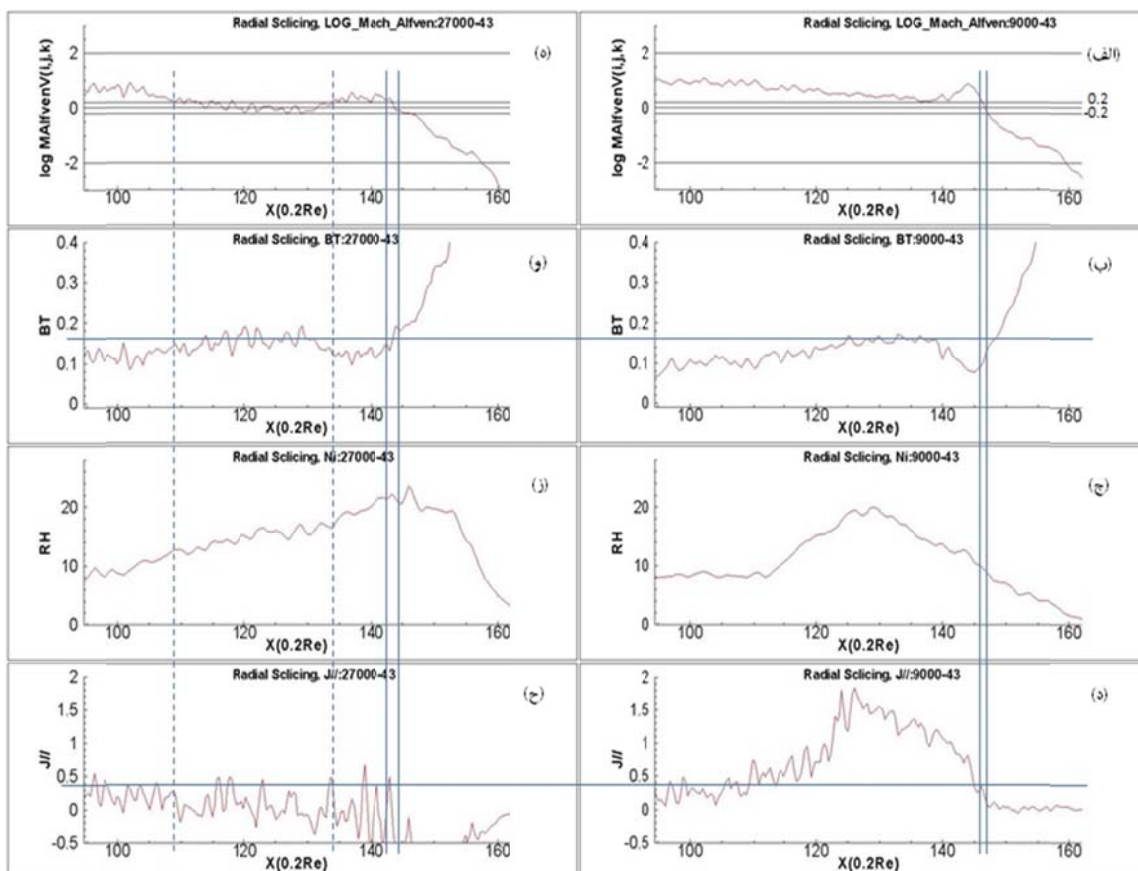
در این شبیه‌سازی، ما ابتدا از زمان ۰ تا ۳۰۰۰ فقط میدان دوقطبی زمین را داریم. از زمان $t=3000$ IMF که به سمت شمال است، در سمت چپ جعبه روشن می‌شود و باد خورشیدی در کل جعبه تا زمان $t=9000$ پخش می‌شود. از زمان $9000 < t < 9300$ به تدریج IMF از شمال به سمت شفق-فلق ((Dawn-Dusk(D-D)) چرخانده می‌شود و از زمان $t=9300$ هیچ تغییری در شرایط IMF ایجاد نمی‌شود. در نهایت از $21000 < t < 21300$ IMF به تدریج به سمت جنوب چرخانده می‌شود و این شرایط تا زمان $t=27000$ که پایان شبیه‌سازی است، تغییری نمی‌کند. ما تلاش کردیم تا ببینیم که آیا نتایج شبیه‌سازی ما در حالت جنوبی با داده‌های تجربی حاصل از کلاستر سازگار است یا نه (لاوراد و همکاران، ۲۰۰۵). شکل ۳، نمودار ATL



شکل ۳. الف) نمودار $\text{Log}(\text{MA})$ در حالت IMF شمالی در صفحه نصف‌النهاری زمین. خطوط میدان سفید، جهت بردار میدان مغناطیسی را در هر مکان نشان می‌دهد. خط‌های شعاعی رسم شده از ۱ تا ۹۱، خطوطی هستند که از صفحه نصف‌النهاری استخراج شده‌اند. در این نمودارها لایه زردرنگ، نشانگر لایه گذار آلفونی است که مقدار $\text{Log}(\text{MA})$ در آن‌ها تقریباً بین -0.2 تا 0.2 است. ب) مانند شکل الف با IMF در حالت جنوبی. بیضی، مقایسه مکان لایه گذار آلفونی در هر دو نمودار را نشان می‌دهد که در حالت IMF جنوبی به ارتفاعات کمتری منتقل شده است.

حالت IMF جنوبی را با توجه به جریان‌های ذرات موازی با میدان مغناطیسی و عمود بر آن در این ناحیه نشان دادند. نتایج شبیه‌سازی در حالت جنوبی نیز نشان می‌دهد که جریان‌های ذرات موازی با میدان در مقایسه با حالت IMF شمالی (نمودارهای ۴-د و ۴-ح) کاهش یافته‌اند که این نیز با مشاهدات تجربی حاصل از تحلیل لاوراد و همکاران (۲۰۰۵) سازگار است. همچنین میدان مغناطیسی محلی در ناحیه ATL برای حالت جنوبی (خط افقی در نمودارهای ۴-ب و ۴-و) افزایش یافته است که این افزایش میدان مغناطیسی در ناحیه ATL، می‌تواند یکی از دلایل کاهش جریان‌های ذرات در این محدوده باشد.

به منظور مقایسه نتایج با مشاهدات تجربی، بر روی یکی از خطوط از بین ۹۱ خط شعاعی مانند شکل ۴ (الف-د) تمرکز کرده‌ایم. خط ۴۳ به دلیل اینکه از کاسپ و همچنین لایه جداسازی ATL از مغناطوسپهر، در حالت IMF جنوبی عبور می‌کند، جهت بررسی بیشتر انتخاب شده است. لاوراد و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که محدوده خارج از مرز بیرونی مغناطوسپهر برای حالت IMF جنوبی دارای جریان‌های ذرات فرآلفونی است، حال آنکه جریان‌های ذرات درست در همین محدوده برای حالت IMF شمالی، نزدیک به حالت بحرانی یا $M_A=1$ یا کمتر هستند. آن‌ها همچنین انتقال لایه گذار آلفونی به ارتفاعات کمتر برای



شکل ۴. الف-د) مقدار $\text{Log}(MA)$ ، میدان مغناطیسی کل، چگالی یونی و جریان‌های ذرات موازی میدان برای IMF به جهت شمال. ه-ج) مقادیر مشابه الف-د برای حالت IMF جنوبی. خطوط فاصله‌دار، منطقه دوم ATL را که در طول IMF جنوبی تشکیل شده است، نشان می‌دهد.

محدوده را برای هر دو جهت‌های IMF شمالی و جنوبی، مقایسه و توافق خوبی را با مطالعات تجربی حاصل از سیستم ماهواره‌ای CLUSTER مشاهده کردیم. با مقایسه اندازه میدان‌های مغناطیسی در محل ATL برای هر دو حالت IMF شمالی و جنوبی دریافتیم که کاهش جریان‌های گذرنده از این ناحیه که در مقاله لاورد و همکاران (۲۰۰۵) بحث شده است، می‌تواند به علت افزایش میدان‌های مغناطیسی در این ناحیه باشد که این نشان می‌دهد کد ذره‌ای سه‌بعدی جهانی ما قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی‌های آینده سیستم زمین-خورشید دارد.

۴. خلاصه

در این مقاله ما سعی کردیم تا لایه گذار آلفونی ATL را به تفصیل برای جهت‌های مختلف IMF، مطالعه و پارامترهایی را که ممکن است بر این لایه اثرگذار باشند، بررسی کنیم. یکی از نقاط قوت شبیه‌سازی سه‌بعدی ما در مقایسه با مشاهدات تجربی این است که ما ATL را در طول تمام مرزهای مغناطوسپهر با جزئیات بیشتری در مقایسه با داده‌های تجربی حاصل از ماهواره کلاستر در دسترس داریم. ما کاهش جریان‌های ذرات در طول چرخش IMF از شمال به سمت جنوب را مشاهده کردیم. ما مکان ATL و جریان‌های ذرات گذرنده از این

مراجع

- Buneman, O., Neubert, T. and Nishikawa, K. I., 1992, Solar wind-magnetosphere interaction as simulated by a 3-D EM particle code, *Plasma Sci. IEEE Trans.*, 20(6), 810–816.
- Buneman, O., 1993, TRISTAN: The 3-D, EM particle code, in *Computer Space Plasma Physics, Simulation Techniques and Software*, edited by Matsumoto, H. and Omura, Y., pp. 67–84, Terra Scientific, Tokyo.
- Cai, D., Esmaili, A., Lembège, B. and Nishikawa, K.-I., 2015, Cusp dynamics under northward IMF using three-dimensional global particle-in-cell simulations, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2015JA021230.
- Cargill, P. J., Dunlop, M. W., Lavraud, B., Elphic, R. C., Holland, D. L., Nykyri, K., Balogh, A., Dandouras, I. and Rème, H., 2004, CLUSTER encounters with the high altitude cusp: Boundary structure and magnetic field depletions, *Ann. Geophys.*, 22(5), 1739–1754.
- Lavraud, B., Dunlop, M. W., Phan, T. D., Rème, H., Bosqued, J. M., Dandouras, I., Sauvaud, J. A., Lundin, R., Taylor, M. G. G. T., Cargill, P. J., Mazelle, C., Escoubet, C. P., Carlson, C. W., McFadden, J. P., Parks, G. K., Moebius, E., Kistler, L. M., Bavassano-Cattaneo, M. B., Korth, A., Klecker, B. and Balogh, A., 2002, Cluster observations of the exterior cusp and its surrounding boundaries under northward IMF, *Geophys. Res. Lett.*, 29(20), 1995, doi:10.1029/2002GL015464.
- Lavraud, B., Fedorov, A., Budnik, E., Thomsen, M. F., Grigoriev, A., Cargill, P. J., Dunlop, M. W., Rème, H., Dandouras, I., Balogh, A., 2005, High-altitude cusp flow dependence on IMF orientation: A 3-year Cluster statistical study, *J. Geophys. Res.*, VOL. 110, A02209, doi:10.1029/2004JA010804.
- Newell, P. T., Meng, C. I., Sibeck, D. G. and Lepping, P., 1989, Some low-altitude cusp dependencies on the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 94(A7), 8921–8927.
- Nykyri, K., Cargill, P. J., Lucek, E. A., Horbury, T. S., Balogh, A., Lavraud, B., Dandouras, I. and Rème, H., 2003, Ion cyclotron waves in the high altitude cusp: CLUSTER observations at varying spacecraft separations, *Geophys. Res. Lett.*, 30(24), 2263, doi:10.1029/2003GL018594.
- Russell, C. T., 2000, POLAR eyes the cusp, *Eur. Space Agency Spec. Publ.*, ESA SP-449, 47–55.
- Yamauchi, M., Nilsson, H., Eliasson, L., Norberg, O., Boehm, M., Clemmons, J. H., Lepping, R. P., Blomberg, L., Ohtani, S.-I., Yamamoto, T., Mukai, T., Terasawa, T. and Kokubun, S., 1996, Dynamic response of the cusp morphology to the solar wind: A case study during passage of the solar wind plasma cloud on February 21, 1994, *J. Geophys. Res.*, 101(A11), 24,675–24,687.
- Wang, C., Guo, X., Peng, Z., Tang, B., Sun, T., Li, W. Y. and Hu, Y., 2013, Magnetohydrodynamics (MHD) numerical simulations on the interaction of the solar wind with the magnetosphere: A review", *Science China*, Vol.56 No.7: 1141–1157, doi: 10.1007/s11430-013-4608-3.

A Comparative study of Alfvénic transition layer from 3D PIC simulation with Cluster experimental data, under southward IMF case

Esmaeili, A.¹ and Kalae, M. J.^{2*}

1. Post-Doc, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 4 July 2016, Accepted: 18 Oct 2016)

Summary

Space weather is the concept of changing environmental conditions in the space from the solar atmosphere to the geospace. Much of space weather is driven by energy carried by solar wind through the interplanetary space from regions near the surface of Sun and Sun's atmosphere. Space weather has two focal points: scientific research and applications. Space weather research touches upon the large-scale energy and matter eruptions from the solar activity region, the propagation and evolution of the interplanetary disturbances, the response of the geospace to the interplanetary disturbances, the significant changes of the geospace environment, and finally the impact on the human activities. The magnetosphere is the outermost layer of the geospace, and the interaction of solar wind with the magnetosphere is the key element of the space weather cause-and-effect chain process from Sun to Earth, which is one of the most challenging scientific problems in the geospace weather study. The nonlinearity, multiple component, and time-dependent nature of the geospace make it very difficult to describe in terms of the physical process in geospace using traditional analytic analysis approach. Numerical simulations, a new research tool developed in recent decades, have a deep impact on the theory and application of the geospace. The low- and middle-altitude cusp regions of Earth's magnetosphere have been widely studied in the past. However, the high-altitude cusp region was not explored extensively in the early days of space science, with the notable exception of the HEOS-2 spacecraft which undertook the first detailed investigations of this part of the magnetosphere. More recently, major advances on the role of this key region, which is in direct interaction with the solar wind, have been provided by the Polar and four-spacecraft Cluster missions. Much of this work has been focused on analysis of individual crossings, but a few statistical studies of the high-altitude cusp region have been undertaken using data from the HEOS-2, Hawkeye, Polar and Interball data set. The actual flow pattern of the exterior cusp region is poorly known. A transition layer inside the magnetosheath near the outer boundary of cusp has been clearly evident during statistical experimental observation of the cusp boundaries from CLUSTER mission. Because of its high-quality data and its suitable orbit the four-spacecraft Cluster mission is perfectly adapted for high-altitude cusp investigations and therefore for large scale statistical studies. This layer characterized by $MA=1$ (Alfvénic Mach) allows the bulk flow to transit from super-Alfvénic to sub-Alfvénic from the exterior to the interior side of the outer cusp and has been observed experimentally mainly during Northward IMF case, however our simulation results show its existence during southward IMF as well. The role of this layer is important in order to understand the flow variations near the outer cusp boundary. In order to analyze this layer, we have used a large 3D PIC simulation of solar wind-magnetosphere interaction. We turned the IMF from Northward to southward direction to investigate Alfvénic Transition Layer (ATL) dynamics according to the IMF rotations. Although, in CLUSTER statistical studies, only a limited area of magnetosphere studied for ATL, we reported this layer for the whole magnetosphere during all simulation and have investigated its dynamics with IMF rotation. Finally we compared our results with experimental observations. Our results had a good agreement with the observational data for the parallel currents and also ATL observed in lower altitudes for the southward IMF case.

Keywords: Magnetosphere, High Altitude cusp, Alfvénic Transition Layer, CLUSTER satellite.

*Corresponding author:

mjkalae@ut.ac.ir