

وابستگی شکل مغناطیس سپهر (مگتوسفر) به مقاومت ویژه محیط در

شبیه‌سازی‌های جهانی مگتوهیدرودینامیک

براتعلی فیض‌آبادی^{۱*}، محمود میرزایی^۲ و ناصر حسین‌زاده‌گویا^۳

^۱استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه تربیت معلم سبزوار، ایران

^۲استادیار، دانشکده علوم دانشگاه اراک، ایران

^۳دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

afeizabady@yahoo.com, m-mirzaei@araku.ac.ir, n_guya@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۵/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۹/۲۲)

چکیده

برهم‌کنش میدان مغناطیسی زمین با باد خورشیدی منجر به پدیده‌های مهمی شده است. محدوده وسیعی از فرایندهای فیزیکی درسامانه باد خورشیدی-مغناطیس‌سپهر وجود دارند و در نتیجه طیفی از روش‌ها شامل بررسی‌های جامع پدیده‌های انتخابی با فرض یک هندسه میدان مشخص و با شرایط مرزی معین تا شبیه‌سازی کامل سه‌بعدی با فرض مگتوهیدرودینامیک برای بررسی آنها به کار رفته است. در این تحقیق روش شبیه‌سازی جهانی برای توصیف اتصال مجدد به کاررفته و این شبیه‌سازی در دستگاه بیضوی خورشیدی مرکز زمینی صورت گرفته است که در آن معادلات مگتوهیدرودینامیک به شکل پایستار برای برهم‌کنش باد خورشیدی و مغناطیس‌سپهر حل شده است.

برای آنکه تاثیر مقاومت ویژه روی مکان و زمان پدیده اتصال مجدد بررسی شود، شبیه‌سازی با انتخاب مقاومت‌های ویژه متفاوت صورت گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مکان و زمان اتصال مجدد مغناطیسی بستگی زیادی به مقاومت‌های ویژه انتخاب شده، به ویژه 0.001 اهم‌متر دارد. شکل‌های رسم شده برای مقاومت ویژه کمتر از 0.0001 و بزرگ‌تر از 0.1 اهم‌متر نشان می‌دهند که گویی شکل مغناطیس‌سپهر هیچ‌گونه تاثیری از برهم‌کنش بین باد خورشیدی و مغناطیس‌سپهر نداشته است و لذا هیچ اتصال مجددی نیز به وقوع نمی‌پیوندد.

براساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق پیشنهاد می‌شود که هم‌رفتی جهانی مرتبط با اتصال مجدد می‌تواند با محاسبه انتقال انرژی، جرم یا میدان مغناطیسی روی مرزهای مناطق خطوط باز و بسته میدان براساس الگوهای مقاومتی متفاوت، صورت گیرد. در این تحقیق همچنین مقادیر متفاوت مقاومت ویژه برای عملی ساختن شبیه‌سازی آزمایش شده و الگوی بهینه تحت شرایط اولیه معین، مشخص شده است. نتیجه این تحقیق که تعیین دقیق چگونگی شکل‌گیری پدیده اتصال مجدد است، می‌تواند نقش مهمی در آسیب‌شناسی پدیده‌های هوافضایی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: اتصال مجدد مغناطیسی، مقاومت ویژه، شبیه‌سازی مگتوهیدرودینامیک، انتقال جرم و انرژی، مغناطیس‌سپهر

Relation of Magnetosphere's shape to medium resistivity in global magnetohydrodynamic's simulation

Baratali Feizabady^{1*}, Mahmoud Mirzaei² and Naser Hosienzadeh Guya³

¹Physics Department, Sabzevar Tarbiat Moallem University, Sabzevar, Iran

²Physics Department, Arak University, Arak, Iran

³Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 04 August 2008, accepted: 13 December 2009)

Summary

The interaction of the solar wind with the Earth's magnetic field gives rise to a number of important phenomena. These include reconnection between the solar wind magnetic field and geomagnetic field lines, reconnection in the magnetotail, plasma convection in the magnetosphere/ionosphere, generation of a field-aligned current system, and energetic particle injection. A wide range of physical process is involved in the solar wind-magnetosphere system, and consequently a wide array of methods has been used to study them, ranging from detailed studies of selected phenomena with the assumption of a specific field geometry or boundary condition, to fully three-dimensional simulation with a Magneto-hydrodynamics (MHD) assumption.

Almost fifty years ago, was proven that the magnetic field lines could be broken and then reconnected with other magnetic lines, a process that is called magnetic reconnection. After that time, the concept of magnetic reconnection found important applications in space studies to provide the safety conditions for satellites and spacecrafts for the first time in 1961 this concept was applied to the geomagnetosphere and used to express the basic model for magnetospheric convection that happens on magnetopause and magnetotail during magnetic reconnection. Also in 1964, the first quantitative model of magnetic reconnection regarding solar flares was developed and introduced in a model that could describe the fast rate of energy release in solar ejections. The conventional definition of magnetic reconnection indicates that the phenomena occurs on the electric field parallel with the X-Line, however, for many reasons there has been a problem in modeling Magnetohydrodynamic simulations: It is possible that determining the X-Line accurately in irregular magnetopause is very difficult or impossible due to the lack of an unknown real resistivity model, which prevents the establishment of a reliable non-convective electric field.

The simulation of MHD was performed in a Geocentric Solar Ecliptic coordinate system and with magneto- hydrodynamics equations in steady state form to quantify interaction between solar wind and magnetosphere. Simulation space included an area with dimensions of $90 \times 60 \times 60$ times of earth radius (R_e), for which the spatial and time steps for modeling were chosen as $0.5 R_e$ and 0.937 s, respectively. Cells which construct the model for simulation were 326000 in number. A magnetic dipole in the origin and electrostatic equations for ionosphere were considered.

To investigate the effect of resistivity on the place and time of magnetic reconnection, simulation was executed with consideration of different resistivity values. The results of the performed simulations showed that the place and time of magnetic reconnection depend largely on the variations of resistivity selected for the modeling, especially at the level of 0.0001 Ohm-m. Figures plotted from the simulation results formed with resistivities of less than 0.00001 and greater than 0.01 Ohm-m depicted the shape of the magnetosphere such that interaction between solar wind and the magnetosphere field appear not to have occurred or created any reconnection.

Generally speaking, this study applied the global MHD simulation to describe the magnetic reconnection. It has been proposed that the global convection related to magnetic reconnection can be determined by a calculation the energy, mass, or magnetic field transfer on open–closed field line boundaries based on different resistivities models.

This study also examined the different values of specific resistivity for running simulations and determined the optimum model under known initial conditions.

Key words: Magnetic reconnection, specific resistivity, magnetohydrodynamics simulation, mass and energy transfer, magnetosphere

۱ مقدمه

که آنها اغلب یادآوری فرض‌های نظری به‌جای شبیه‌سازی‌های عملی هستند. هدف ما در این مقاله گسترش روش‌هایی برای بررسی اتصال مجدد در شبیه‌سازی‌های MHD بزرگ‌مقیاس است. ما روی مغناطیس‌سپهر متمرکز می‌شویم ولی اعتقاد داریم بعضی ایده‌هایی که در اینجا عرضه می‌شوند می‌توانند در مباحثات دیگر در فیزیک پلاسما مفید واقع شوند. برای امتحان و تشریح روش‌های عرضه شده، برنامه مگنتوهیدرودینامیک ایدئال را به کار می‌بریم. این یک شبیه‌سازی سه‌بعدی جهانی از جفت‌شدگی سامانه بادخورشیدی-مغناطیس‌سپهر-یون‌سپهر است. قسمت مورد توجه برای ما در این تحقیق مغناطیس‌سپهر است که معادلات MHD ایده‌آل در شکل پایستار را برای آن حل می‌کنیم. در اینجا هیچ مقاومت الکتریکی واضحی وجود ندارد و پخش در شبیه‌سازی از راه حل عددی تولید می‌شود.

در برنامه رایانه‌ای مورد استفاده در این تحقیق، روش حجم محدود به کار می‌رود و از حل رو (Roe solver) به منظور حل مسئله ریمان برای محاسبه شارش کمیت‌های پایستار در مرز تداخلی سلول‌ها استفاده می‌شود (لیوکیو، ۱۹۹۲).

در موارد نادری که روش رو (Roe) حالت‌های بینابینی با فشار منفی تولید می‌کند، روش هارتن-لاکس-وان لیر به کار می‌رود (Harten, Lax, VAN Leer). برای ابقای $\nabla \cdot B = 0$ ، از پاک‌کننده بیضی

امروزه بسیاری از پدیده‌هایی که اتصال مجدد در آنها نقش دارد با استفاده از شبیه‌سازی مگنتوهیدرودینامیک (Magnetohydrodynamics MHD)، مدل‌سازی می‌شوند. برای مثال معلوم شده است که اتصال مجدد در شبیه‌سازی جهانی مغناطیس‌سپهر رخ می‌دهد (دانگی، ۱۹۶۱؛ پارکر، ۱۹۵۷؛ سویت، ۱۹۵۸؛ پتسچک، ۱۹۶۴؛ والکر و همکاران، ۱۹۹۳؛ فدر و همکاران، ۱۹۹۵؛ لایتینن و همکاران، ۲۰۰۵).

بعضی نویسندگان دیگر نیز در زمینه انتقال انرژی خورشیدی (پالمورت و همکاران، ۲۰۰۳) کار کرده و برخی نیز تاثیر باد خورشیدی بر مغناطیس‌سپهر را بررسی کرده‌اند (هاتونن و همکاران، ۲۰۰۰). با وجود این، تجزیه و تحلیل کمی فرایند اتصال مجدد در شبیه‌سازی‌های MHD و نیز بررسی مفاهیم شبیه‌سازی شده، به دلیل اینکه توصیف نظری اتصال مجدد اغلب غیر عملی و حتی بعضی اوقات غیرممکن است، بسیار مشکل است. بررسی‌های وسیعی روی اتصال مجدد از راه شبیه‌سازی‌های خاص صورت گرفته است. برای مثال مباحثات اتصال مجدد مغناطیسی مدل‌سازی محیطی زمین فضا (reconnection challenge magnetic GEM) آهنگ اتصال مجدد را در انواع گوناگون برنامه‌های شبیه‌سازی تحت شرایط مرزی استاندارد مقایسه کرده است (برن و همکاران، ۲۰۰۱). این شبیه‌سازی‌های نظری برای درک اتصال مجدد مفید هستند، اما به نظر می‌رسد

نیست: میدان $(y, x, 1) = (B_x, B_y, B_z)$ در هر نقطه دلخواه (x_0, y_0, z_0) که یک نقطه اتصال در یک صفحه با جهت‌گیری مناسب است مثال ساده آن است. در این حالت هر خط میدان، یک خط اتصال است. در این ساختار، پلاسما می‌تواند در عرض جداکننده‌های ظاهری شارش یابد؛ حتی اگر هیچ مؤلفه میدان الکتریکی در طول جداکننده وجود نداشته باشد و خطوط میدان نیز ابقا شوند این به دلیل نبود تمایز فضایی مناطق میدان و در نتیجه نبود جداکننده‌های واقعی در این نوع ساختار است. این مثال نشان می‌دهد که یک X-Line در اتصال مجدد در حالت کلی نمی‌تواند با در نظر گرفتن صرف هندسه میدان مغناطیسی محلی و شار پلاسما، تعیین شود. در بخش‌های بعدی شرح خواهیم داد که چگونه می‌توان این مسئله را در تحقیقات مغناطیس سپهری از راه تعریف جداکننده روی خواص جهانی خطوط میدان، بدون رجوع به هندسه محلی میدان و با شبیه‌سازی جهانی حل کرد. همچنین برای دیگر محیط‌های مشابه از جمله تاج (کرونای) خورشیدی نیز می‌توان تعریف مشابهی عرضه کرد.

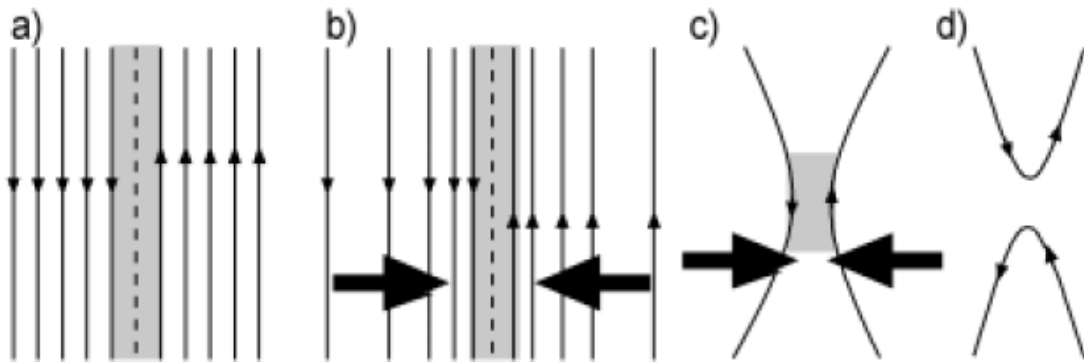
۳ E_{\parallel} و مسائل آن در MHD

نویسندگان متعددی (آکسفورد، ۱۹۸۴؛ شیندلر و همکاران، ۱۹۸۸) با تعریف ساده اتصال مجدد به صورت شکست محلی شرط انجماد خطوط میدان، از مسائل تعریف جداکننده‌ها در سه‌بعد، پرهیز کرده‌اند. شیندلر و همکاران (۱۹۸۸) روشن ساخته‌اند که هر "اتصال مجدد مغناطیسی عام" اگر و فقط اگر با یک میدان الکتریکی موازی همراه باشد، اثرات جهانی دارد. یا به عبارت قوی‌تر اگر و فقط اگر روی یک مجموعه قابل اندازه‌گیری از خطوط میدان در یک منطقه پخش محدود D_r داشته باشیم:
$$\int E_{\parallel} ds \neq 0$$
، آن‌گاه اثرات اتصال مجدد جهانی خواهد بود. انتگرال در طول یک خط میدان در ناحیه D_r گرفته می‌شود.

استفاده می‌شود. در بخش‌های بعدی، به‌طور خلاصه تشابه‌های اتصال مجدد دو و سه‌بعدی و طرح‌های شبیه‌سازی جهانی MHD، پخش عددی و میدان‌های الکتریکی موازی تشریح خواهد شد. سپس یک طبقه‌بندی از خطوط میدان مغناطیس سپهری براساس خواص فضایی آنها و به‌خصوص وابستگی شکل مغناطیس سپهر به تغییرات مقاومت ویژه عرضه خواهد شد.

۲ مسائل مربوط به مفهوم X-Line در سه‌بعد

در دو‌بعد، اتصال مجدد در اثر برهم‌کنش دو میدان مغناطیسی ناهمسو (در اینجا میدان مغناطیسی همراه باد خورشیدی و میدان مغناطیسی زمین) در یک نقطه (X-Point) رخ می‌دهد به طوری که صفحه اطراف این نقطه با چهار جداکننده به چهار بخش مجزا تقسیم می‌شود. خطوط میدان مغناطیسی از دو بخش مقابل هم به سوی این نقطه می‌آیند، در این نقطه، ساختارشان می‌شکند و سپس با ساختاری جدید باز اتصال می‌یابند. آن‌گاه در دو بخش دیگر از نقطه اتصال دور می‌شوند (شکل ۱). اتصال مجدد در مغناطیس سپهر نیز به همین روش رخ می‌دهد و همیشه شارش پلاسما در عرض جداکننده‌ها نیز با آن همراه است. در موارد ایستا، الگوی شار مغناطیسی، یک میدان الکتریکی عمود بر صفحه را ایجاد می‌کند. این میدان الکتریکی متناسب با آهنگ اتصال مجدد یا همان نرخ شارش مغناطیسی متصل شده در بازه زمانی است. بخش‌های خروج شار معمولاً باریک و شامل یک لایه جریان هستند. این توصیف می‌تواند با فرض انتقال بدون تغییر در بعد سوم، به سه‌بعد نیز گسترش یابد. آن‌گاه نقطه اتصال به یک خط اتصال تبدیل می‌شود و یک میدان الکتریکی موازی با آن نیز وجود خواهد داشت. در یک توصیف کامل سه‌بعدی، جایی که میدان‌های درگیر در اتصال مجدد لزوماً پادموازی و متقارن نیستند، برای وقوع اتصال مجدد یک هندسه میدانی خط اتصال تنها کافی



شکل ۱. مراحل وقوع اتصال مجدد مغناطیسی (پالمورت، ۲۰۰۳).

خط میدان است) عمود باشد. بنابراین MHD ایده ال میدان الکتریکی اتصال مجدد را تولید نمی‌کند. اتصال مجدد در مدل‌های MHD ایده ال به واسطهٔ پخش عددی ممکن می‌شود. این وابسته به برنامه و حل‌کننده عددی است و تعیین آن بسیار مشکل است. همچنین پخش عددی در هر نقطهٔ مشخص اطراف جداکننده که در آنجا v و B به‌طور محسوس روی اندازهٔ یک سلول تقسیم‌بندی تغییر می‌کنند، تفاوت‌های کوچک‌مقیاس محلی تولید می‌کند. برای مثال، در مکان اتصال مجدد مگنتوتیل، خط X مغناطیسی و خط برگشتی شارش پلاسما معمولاً به اندازهٔ چند سلول جدا می‌شوند. حال این سؤال را می‌توان مطرح کرد که چه ارتباطی وجود دارد که میدان الکتریکی محاسبه شده از رابطه (۱) با R برابر صفر در منطقهٔ کوچک بین خط X و خط برگشتی شارش پلاسما معکوس می‌شود. این نتیجه پیامد روش عددی انتخابی و از اندازهٔ سلول مستقل است. بنابراین محاسبهٔ میدان الکتریکی در نزدیکی یا در طول یک خط میدان به دلیل نبود صحت موضعی مدل، آشکارا غیراصولی است. در مغناطیس‌سپهر، چگالی پلاسما به حد کافی کوچک است طوری که مقاومت کلاسیک برخوردی عملاً صفر است. بنابراین هر اثر مقاومتی از عوامل دیگری مثل برهم‌کنش‌ها یا آشفستگی‌های موج‌ذره است. شکل مقاومت و وابستگی

چون E_{II} هیچ‌گاه مستقیماً با حل‌کنندهٔ واقعی MHD محاسبه نمی‌شود، لذا به صورت یک نماینده در شبیه‌سازی‌های MHD مطرح نمی‌شود. E_{II} همواره یک متغیر ثانویه است که در مرحلهٔ دوم از روی متغیرهای اولیه و با توجه به قانون اهم، رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$E = -v \times B + R, \quad (1)$$

در اینجا R جملهٔ عمومی غیرایده‌آلی است. یک شرط لازم و کافی برای وجود میدان الکتریکی موازی، غیرصفر بودن و عمود نبودن R بر B است. در واقع R می‌تواند متشکل از چندین قسمت، مثل برخورد‌ها، نوسان‌ها و لختی ذرات باشد. هنگام اعمال مفهوم اتصال مجدد، فرض می‌شود که R در حدود منطقهٔ پخش D_r غیرصفر و در بقیهٔ مناطق تقریباً صفر است، طوری که در خارج منطقهٔ پخش بقای خط میدان حفظ می‌شود. شبیه‌سازی‌های MHD معابر گوناگونی برای تعیین R دارند. ساده‌ترین آنها مگنتوهیدرودینامیک ایده‌آل است که در آن یک کد رایانه‌ای براساس شار مغناطیسی ورودی به هر سلول مکعب مستطیلی و جانشینی آن به‌منزلهٔ مقدار میانگین برای مرکز هر سلول انتخاب می‌شود: $R \equiv 0$. این انتخاب ایجاب می‌کند که در رابطه (۱) هیچ میدان الکتریکی موازی وجود ندارد. E همچنین روی جداکننده صفر می‌شود اگر B یا v صفر شود یا بر جداکننده (که یک

یون‌سپهر به صورت یک پوسته کروی در ارتفاع ۱۰۰ کیلومتری بالای سطح زمین لحاظ شده است و بین آن و یک پوسته کروی فرضی در ارتفاع $3.7R_E$ یک محیط گذردهنده که فقط اثرات الکتریکی را منتقل می‌کند، در نظر گرفته شده است. البته چون در مگنتوهیدرودینامیک هیچ ذره‌ای وجود ندارد، باوجودی که لبه به سمت استوای هلال به‌خوبی در شبیه‌سازی مشخص می‌شود، بعضی از مشخصه‌های دیگر که در اندازه‌گیری‌های فضاپیماها مشاهده می‌شود در اینجا به صورت مستقیم قابل دسترسی نیست. چون سیستم MHD ایدئال پایستگی جرم و اندازه حرکت و انرژی را حفظ می‌کند و با در نظر گرفتن پلازما درحکم یک گاز مغناطیسی تحت نیروهای الکترومغناطیسی اضافی، معادله نوعی در مکانیک سیالات را می‌توان به شکل پایستار نوشت، به طوری که یک کمیت پایستار در یک حجم بسته فقط وقتی تغییر می‌کند که یک شار خالص مربوط به آن کمیت از مرزهای محدودکننده حجم عبور کند یعنی:

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{F}_a) = 0 \quad (2)$$

که در آن، u_a کمیت پایستار (جرم، اندازه حرکت، انرژی یا هر کمیت پایستار فیزیکی دیگر) و $F_a(u)$ تابع شار متناظر با آن است. زیرنویس $a = 1 \dots 8$ با متغیرهای پایستار $(\rho, P = \rho V, U, B)$ متناظر است و معادلات متناظر به شکل پایستار عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}), \quad (3)$$

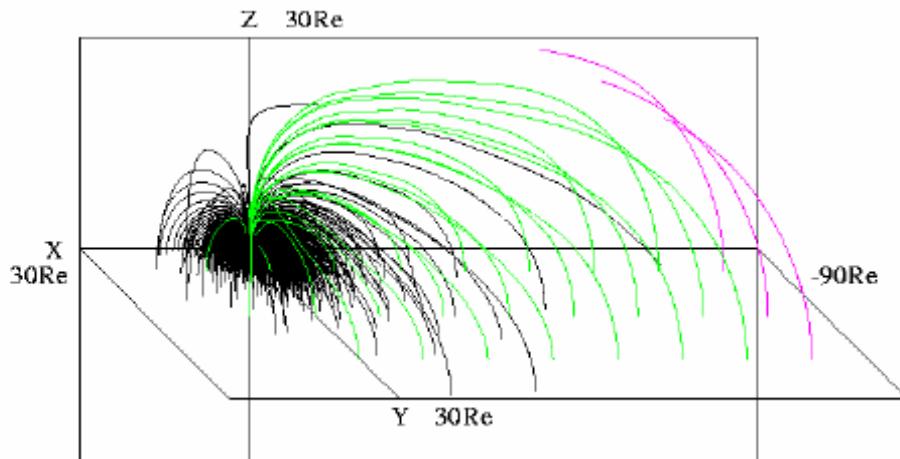
$$\frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (4)$$

$$= -\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\vec{P}\vec{P}}{\rho} + P + \frac{B^2}{2\mu_0} - \frac{1}{\mu_0} \vec{B}\vec{B} \right),$$

آن به پارامترهای محلی موضوعی گسترده و باز است. با وجود این در مگنتوهیدرودینامیک غیرایدئال، مقاومت الکتریکی با در نظر گرفتن $R = \eta J$ در قانون اهم به سادگی مدل می‌شود. η در اینجا مقاومت ویژه است که معمولاً ثابت یا وابسته به چگالی جریان با تغییراتی شبیه تابع پله در نظر گرفته می‌شود. در MHD غیرایدئال (مقاومتی) میدان الکتریکی فیزیکی می‌تواند حتی در ناحیه پخش فرایند اتصال مجدد تولید شود. آن‌گاه این E_{\parallel} می‌تواند نمایشگر اتصال مجدد باشد. ولی اثرات مربوط به فرایند حل عددی که در بالا برای MHD ایدئال ذکر شد، اینجا نیز می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین تعیین میدان الکتریکی فیزیکی، وقتی سهم عددی‌سازی بزرگ باشد، حتی در مکان اتصال مجدد نیز ممکن است مشکل شود. به علاوه η باید درحکم یک انتخاب پایه، در اجزای متفاوت برنامه تغییر داده و نتایج مقایسه شود. ما در این تحقیق مغناطیس سپهر را براساس تغییرات مقاومت ویژه شبیه‌سازی و نتایج را تفسیر کرده‌ایم.

۴ مشخصات و پارامترهای شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در دستگاه بیضوی خورشیدی مرکز زمینی (GSE) صورت گرفته است. مبدا در مرکز زمین، محور X همواره به سمت خورشید، محور Z عمود بر صفحه بیضوی و جهت‌گیری محور Y به‌نحوی است که دستگاه مختصات قائم‌الزاویه راست‌گرد را تکمیل می‌کند. در این شبیه‌سازی معادلات MHD به شکل پایستار برای برهم‌کنش باد خورشیدی و مغناطیس سپهر حل می‌شود. منطقه شبیه‌سازی متشکل از طول $90R_E$ در بعد X و $60R_E$ در بعد Y و Z است. گام‌های فضایی برابر $0.5R_E$ و گام زمانی برابر 0.397 ثانیه (زمان سیر امواج آلفن) انتخاب شده است. یک دوقطبی مغناطیسی در مبدا (مرکز زمین) فرض شده و برای یون‌سپهر معادلات الکتروستاتیک در نظر گرفته شده است. همچنین،



شکل ۲. توزیع خطوط میدان مغناطیسی در یک هندسه سه‌بُعدی برای زمان ۱۰ دقیقه پس از شروع شبیه‌سازی.

که در آن V_j حجم سلول زام است. در روش حجم محدود، شارهای عبوری از وجوه هر سلول جمع و از متوسط سلولی کم می‌شود، طوری که به‌طور خودکار، پایستگی کمیت‌های پایستار در هر سلول دلخواه حفظ می‌شود. یک شبیه‌سازی جهانی MHD به یک محدوده شبیه‌سازی با شرایط اولیه و مرزی معلوم نیاز دارد. در اینجا

شرایط مرزی اولیه میدان دوقطبی در فضای خالی و متغیرهای ورودی به محدوده شبیه‌سازی از مرز سمت خورشید است که از راه متوسط‌گیری سلولی (توصیف‌شده با رابطه اخیر) از راه تکرارهای متوالی در یک برنامه جمع رایانه‌ای به آن اعمال می‌شوند. به مرزهای دیگر محدوده نیز برای سلول‌های مجاور به کار رفته است. همچنین برای بررسی وابستگی شکل مغناطیس سپهر به تغییرات مقاومت ویژه، ضمن ثابت نگاه‌داشتن بقیه پارامترها، برای مقاومت ویژه به ترتیب مقادیر $0/001$ ، $0/01$ و $0/1$ اهم‌متر در نظر گرفته شده و برای هر مقدار نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. مدت زمان شبیه‌سازی ۴۰ دقیقه اختیار شده است و در اینجا خروجی‌ها در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای نشان داده شده‌اند.

که در آن، U چگالی انرژی کل است و با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \left[\left(U + P - \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \frac{\vec{P}}{\rho} + \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \times \frac{\vec{P}}{\rho} \times \vec{B}) \right], \quad (5)$$

$$U = \frac{P}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (6)$$

معادله عمومی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های جهانی MHD در اصل جواب‌های عددی اصلی معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی گسسته هستند. یک روش گسسته‌سازی مناسب و ویژه فضایی برای سامانه MHD ایدئال سه‌بُعدی، روش حجم محدود (FVM)، FiniteVolume Method است که در آن محدوده شبیه‌سازی به شبکه‌ای از سلول‌ها تقسیم می‌شود. FVM با متوسط‌گیری سلولی معلوم به شکل زیر سروکار دارد:

$$u_{a,j}(t) = \frac{1}{V_j} \int_{V_j} u_{a,j}(\vec{r}, t) dV_j, \quad (7)$$

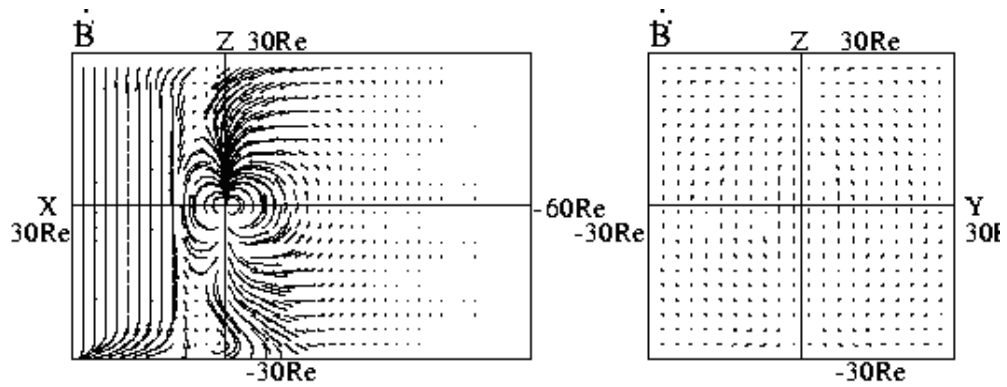
مقایسه بقیه شکل‌ها (که در اینجا آورده نشده‌اند) نیز تایید می‌کند که مقاومت ویژه 0.001 اهم متر بهترین گزینه برای بازسازی شکل مغناطیس سپهر در اثر برهم کنش آن با باد خورشیدی و وقوع پدیده اتصال مجدد است. همچنین بررسی شکل‌های حاصل از شبیه‌سازی برای مقاومت‌های کمتر از 0.0001 و نیز بیشتر از 0.1 اهم متر (که در اینجا آورده نشده‌اند) به خصوص نشان می‌دهد که شکل مغناطیس سپهر چنان است که گویی برهم کنشی بین دو میدان مغناطیسی رخ نمی‌دهد و لذا هیچ اتصال مجددی نیز به وقوع نمی‌پیوندد.

۵ توضیح شرایط و توصیف نتایج شبیه‌سازی

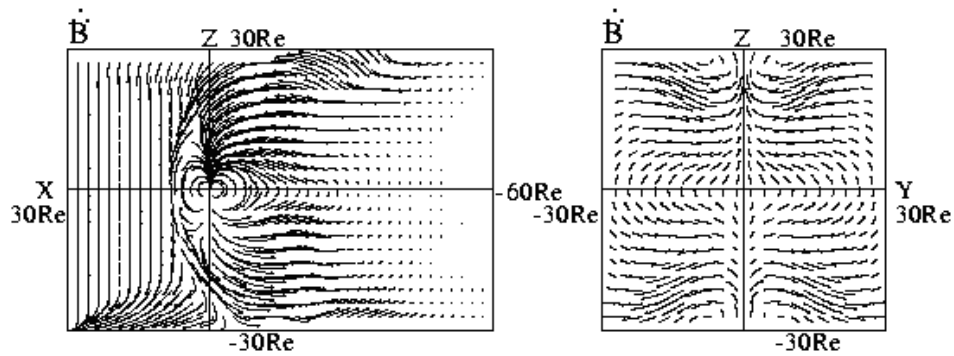
شبیه‌سازی در دستگاه مختصات (Geocentric, GSE) انجام گرفته و فضائی به ابعاد $\{90 \times 60 \times 60 (R_E)\}$ را با سلولهای مکعبی به اضلاع $0.5R_E$ پوشش می‌دهد. تعداد کل سلولها 326000 می‌باشد که فضایی به حجم 2.61×10^5 کیلومتر مکعب را در بر می‌گیرد. شرایط مرزی اولیه در سمت خورشید که از فاصله $30R_E$ از مرکز زمین شروع می‌شود، عبارتند از: سرعت باد خورشیدی $= 420$ کیلومتر بر ثانیه، جهت و دامنه میدان مغناطیسی بین سیاره ای = جنوبسو و 5 نانوتسلا و چگالی ذرات پلاسما $= 5$ عدد بر سانتی متر مکعب. به منظور حفظ پایستگی کمیت‌های پایستار، شار خالص ورودی به هر سلول به دست آورده شده و از متوسط مرکز هر سلول کم گردیده و باقی مانده به عنوان شرایط مرزی برای سلولهای مجاور به کار رفته است. همچنین برای بررسی وابستگی شکل مگنتوسفر به تغییرات مقاومت ویژه، ضمن ثابت نگاه داشتن بقیه پارامترها، برای مقاومت ویژه به ترتیب مقادیر 0.0001 ، 0.001 و 0.1 اهم متر در نظر گرفته شده و برای هر مقدار نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. مدت زمان انجام شبیه‌سازی

به منظور آشکارشدن هندسه حل معادلات، در شکل ۲ تصویر سه‌بعدی از خطوط میدان در منطقه شبیه‌سازی، البته فقط برای زمان ۱۰ دقیقه پس از شروع آورده شده است. شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نحوه تغییر شکل مغناطیس سپهر را در این فاصله‌های زمانی برای مقاومت ویژه 0.001 اهم متر نشان می‌دهند. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که با گذشت زمان، خطوط میدان هرچه بیشتر از وضعیت توزیع اولیه که مربوط به خطوط دو قطبی است، فاصله می‌گیرند، در قسمت نیمه‌شب به سمت دور از خورشید کشیده می‌شوند و دم طولی تشکیل می‌دهند. دقت در نحوه تغییر توزیع خطوط در اطراف $z = 0$ و مخصوصاً تا فاصله تقریبی $30R_E$ روی محور x نحوه شکل‌گیری اتصال مجدد برای خطوط میدان را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۷ و ۸ نتایج را به ترتیب برای مقاومت ویژه 0.0001 و 0.1 اهم متر نشان می‌دهند (فقط تصاویر مربوط به زمان ۳۰ دقیقه پس از شروع آورده شده است). بررسی این شکل‌ها و مقایسه آنها با شکل‌های مربوط به مقاومت ویژه 0.001 اهم متر نشان می‌دهد که در نظر گرفتن این مقادیر ویژه برای محیط، منجر به نتایج مورد انتظار نمی‌شود. شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز خطوط نیروی مغناطیسی بازسازی شده با نرم‌افزار (Virtual Reality Language Modeling, VRML) را نشان می‌دهند.

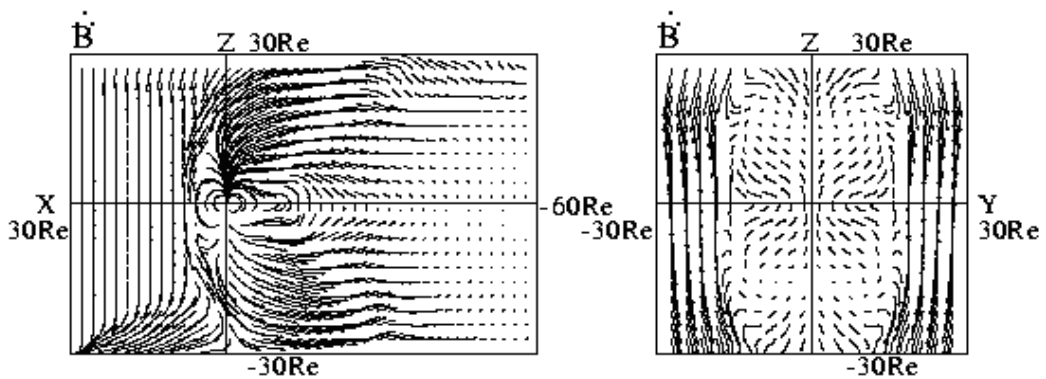
مقایسه شکل‌های ۵ و ۷ و ۸ که همگی مربوط به زمان ۳۰ دقیقه پس از شروع ولی برای مقاومت‌های متفاوت ذکر شده هستند، نشان می‌دهد که مکان و زمان وقوع اتصال مجدد، بستگی زیادی به مقاومت ویژه محیط و به خصوص به مقاومت ویژه 0.001 اهم متر دارد. نحوه شکل‌گیری اتصال مجدد از آهنگ خاصی برخوردار، و مطابق با انتظاری است که با توجه به مشاهدات ماهواره‌ای نیز قابل پیش‌بینی بوده است. مطابق آن، خطوط میدان باید در اثر فشار مغناطیسی همراه باد خورشیدی، در قسمت نیمه‌شب تشکیل دم طولی مغناطیسی دهند.



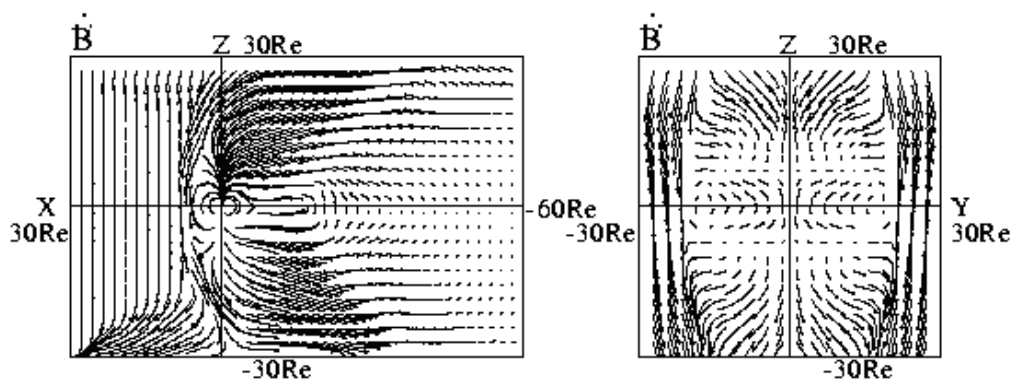
شکل ۳. توزیع خطوط میدان مغناطیسی مغناطیس‌سپهر در صفحه عمود بر صفحه نصف‌النهاری Y-Z (سمت راست) و در صفحه عمود بر آن X-Z (سمت چپ) در فاصله ۲۰ برابر شعاع زمین در قسمت نیمه‌شب، ۱۰ دقیقه پس از شروع با مقاومت ویژه ۰/۰۰۱ اهم‌متر.



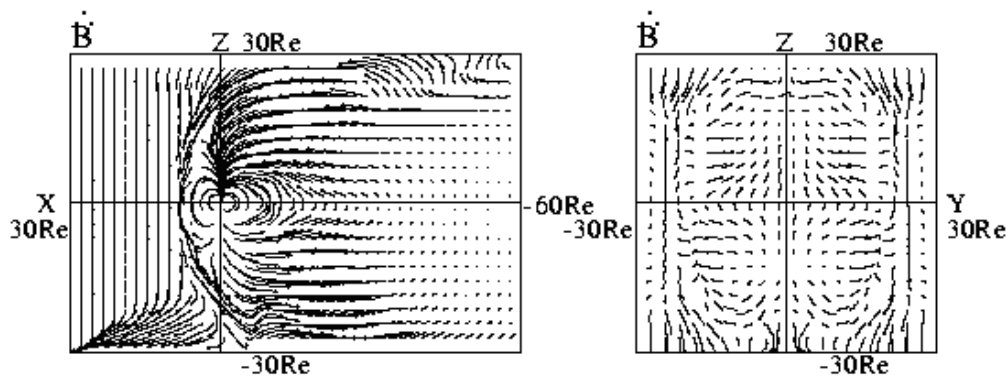
شکل ۴. توزیع خطوط میدان مغناطیسی مغناطیس‌سپهر در فاصله ۲۰ برابر شعاع زمین در قسمت نیمه‌شب، ۲۰ دقیقه پس از شروع با مقاومت ویژه ۰/۰۰۱ اهم‌متر. در صفحه Y-Z (سمت راست) در محل $x = -20R_E$ شکل‌گیری ساختار جدید خطوط میدان شروع شده است و در صفحه X-Z (سمت چپ) خطوط میدان به سمت دم گسترش می‌یابند.



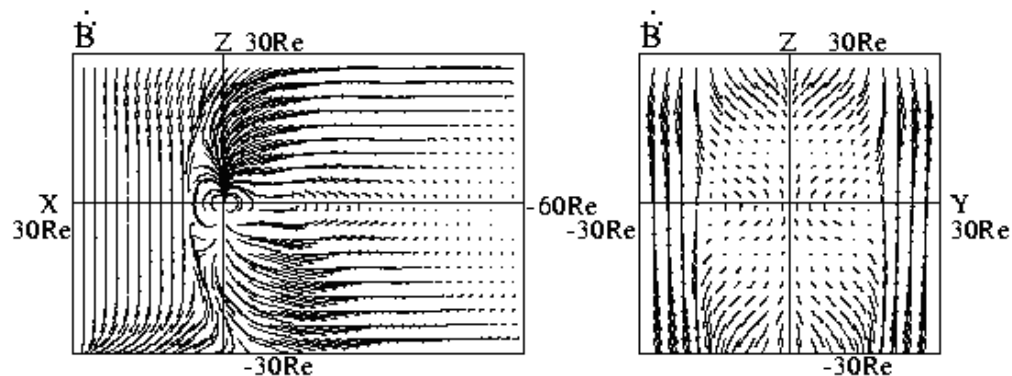
شکل ۵. خطوط میدان مغناطیسی مغناطیس‌سپهر در فاصله ۲۰ برابر شعاع زمین در قسمت نیمه‌شب، صفحه Y-Z (سمت راست) و صفحه X-Z (سمت چپ)، ۳۰ دقیقه پس از شروع با مقاومت ویژه ۰/۰۰۱ اهم‌متر. گسترش خطوط میدان و ایجاد اتصال مجدد و وضوح بیشتری یافته است، طوری‌که در اطراف $Z = 0$ شروع تشکیل حلقه‌های اتصال مجدد دیده می‌شود و در مقادیر Z بیشتر، کشیدگی خطوط میدان به سمت دم واضح‌تر شده است.



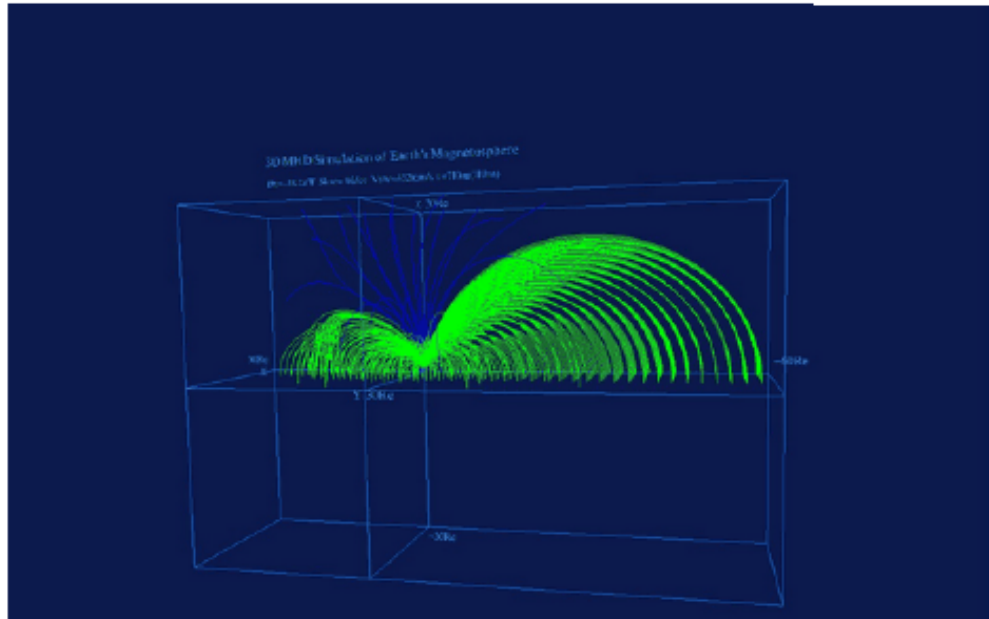
شکل ۶. توزیع خطوط میدان مغناطیسی مغناطیس سپهر در فاصله ۲۰ برابر شعاع زمین در قسمت نیمه‌شب، صفحه $Y-Z$ (سمت راست) و صفحه $X-Z$ (سمت چپ)، ۴۰ دقیقه پس از شروع با مقاومت ویژه 0.001 اهم‌متر.



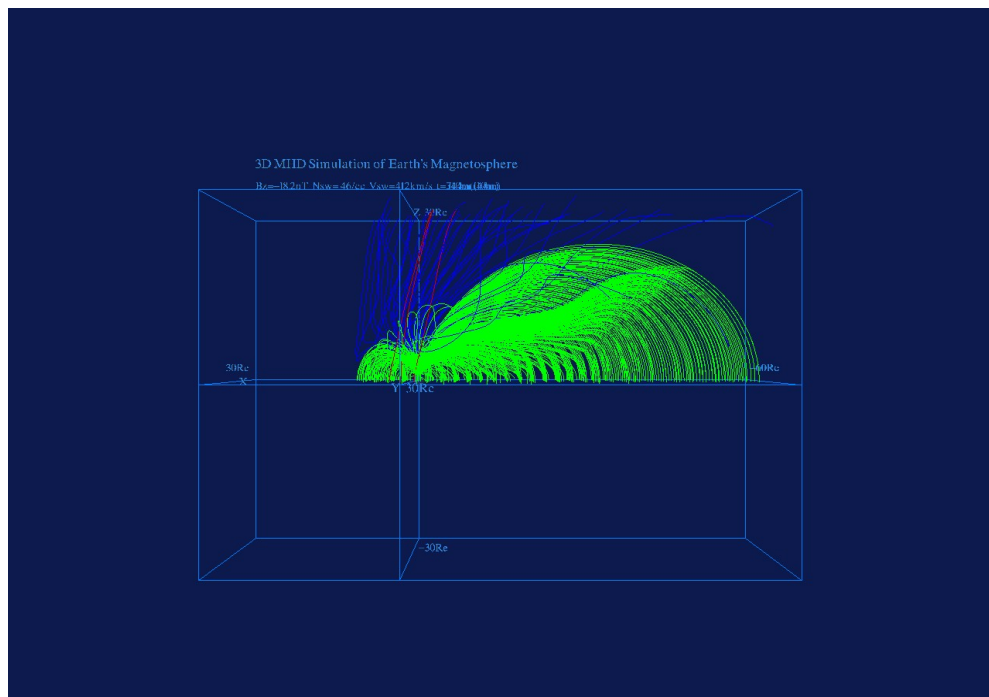
شکل ۷. شبیه‌سازی شکل مغناطیس سپهر ۳۰ دقیقه پس از شروع برای مقاومت ویژه 0.001 اهم‌متر، صفحه $Y-Z$ (سمت راست) و صفحه $X-Z$ (سمت چپ)، پدیده‌های گسترش و اتصال مجدد در مقایسه با حالت مقاومت ویژه 0.001 اهم‌متر (شکل ۵) وضوح خاصی ندارند.



شکل ۸. شبیه‌سازی شکل مغناطیس سپهر ۳۰ دقیقه پس از شروع برای مقاومت ویژه 0.01 اهم‌متر، صفحه $Y-Z$ (سمت راست) و صفحه $X-Z$ (سمت چپ)، که در اینجا نیز وقوع اتصال مجدد واضح نیست.



شکل ۹. خطوط نیروی مغناطیسی مغناطیس‌سپهر بازسازی شده با نرم‌افزار VRML برای ۰/۰۰۱ اهم‌متر.



شکل ۱۰. خطوط نیروی مغناطیسی مغناطیس‌سپهر بازسازی شده با نرم‌افزار VRML برای ۰/۰۰۱ اهم‌متر.

مغناطیسی همراه باد خورشیدی، در قسمت نیمه شب تشکیل دُم طویل مغناطیسی را می‌دهند.

مقایسهٔ بقیهٔ شکل‌ها (که در اینجا آورده نشده‌اند) نیز تایید می‌کند که مقاومت ویژه $0/001$ اهم متر بهترین گزینه برای بازسازی شکل مگنتوسفر در اثر اندرکنش آن با باد خورشیدی و وقوع پدیدهٔ اتصال مجدد می‌باشد.

همچنین بررسی شکل‌های حاصل از شبیه‌سازی برای مقاومت‌های کمتر از $0/001$ و نیز بیشتر از $0/01$ اهم متر (که در اینجا آورده نشده‌اند) به خصوص نشان می‌دهند که شکل مگنتوسفر چنان است که گویی اندرکنشی بین دو میدان مغناطیسی رخ نمی‌دهد و لذا هیچ اتصال مجددی نیز به وقوع نمی‌پیوندد.

۶ نتیجه‌گیری

با شبیه‌سازی‌های مگنتوهیدرودینامیک و با به‌کارگیری برنامه‌های رایانه‌ای MHD ایدئال در مقیاس جهانی می‌توان چگونگی وابستگی برهم‌کنش باد خورشیدی-مغناطیس‌سپهر-یون‌سپهر را به شرایط اولیهٔ مربوط به پارامترهای میدان مغناطیسی بین‌سیاره‌ای همراه باد خورشیدی و نیز شرایط محیطی مربوط به مکان برهم‌کنش، به‌خصوص مقاومت ویژه محیط، مورد بررسی قرار داد و با تغییر مجازی پارامترها، نحوه و شرایط شکل‌گیری و وقوع پدیدهٔ اتصال مجدد مغناطیسی را توصیف کرد. بررسی شکل‌های حاصل از شبیه‌سازی در ارتباط با تغییر مقاومت ویژه نشان می‌دهد که برای مقاومت ویژه محیطی $0/001$ اهم متر، خطوط میدان مغناطیسی در سوی خورشید تا حد تقریبی 10 برابر شعاع زمین متراکم می‌شوند و در قسمت نیمه‌شب تا فواصل طولانی (بیشتر از 60 برابر شعاع زمین) گسترش می‌یابند. به‌خصوص بررسی تغییر جهت سرعت تودهٔ پلاسما در بخش میانی همهٔ شکل‌ها نشان می‌دهد که اتصال مجدد

40 دقیقه اختیار شده و در اینجا خروجی‌ها در فواصل 10 دقیقه‌ای نشان داده شده‌اند.

به‌منظور آشکارشدن هندسهٔ حل معادلات، در شکل ۲ تصویر سه‌بعدی از خطوط میدان در منطقهٔ شبیه‌سازی، البته فقط برای زمان 10 دقیقه پس از شروع آورده شده است. شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نحوهٔ تغییر شکل مگنتوسفر را در این فاصله‌های زمانی برای مقاومت ویژه $0/001$ اهم متر نشان می‌دهند. مقایسهٔ شکل‌ها نشان می‌دهد که با گذشت زمان خطوط میدان هر چه بیشتر از وضعیت توزیع اولیه که مربوط به خطوط دوقطبی است، فاصله گرفته و در قسمت نیمه شب به سمت دور از خورشید کشیده می‌شوند و تشکیل دُم طویل را می‌دهند. دقت در نحوهٔ تغییر توزیع خطوط در اطراف $z = 0$ و مخصوصاً تا فاصلهٔ تقریبی $30R_E$ روی محور x نحوهٔ شکل‌گیری اتصال مجدد برای خطوط میدان را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۷ و ۸ نتایج را به ترتیب برای مقاومت ویژه $0/001$ و $0/01$ اهم متر نشان می‌دهند (فقط تصاویر مربوط به زمان 30 دقیقه پس از شروع آورده شده‌اند). بررسی این شکل‌ها و مقایسهٔ آن‌ها با شکل‌های مربوط به مقاومت ویژه $0/001$ اهم متر نشان می‌دهد که در نظر گرفتن این مقادیر ویژه برای محیط منجر به نتایج مورد انتظار نمی‌گردد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز خطوط نیروی مغناطیسی بازسازی شده توسط نرم افزار VRML را نشان می‌دهند.

مقایسهٔ شکل‌های ۵، ۷ و ۸ که تماماً مربوط به زمان 30 دقیقه پس از شروع ولی برای مقاومت‌های مختلف ذکر شده می‌باشند، نشان می‌دهد که مکان و زمان وقوع اتصال مجدد بستگی زیادی به مقاومت ویژه محیط دارد و به خصوص با مقاومت ویژه $0/001$ اهم متر نحوهٔ شکل‌گیری اتصال مجدد از آهنگ خاصی برخوردار بوده و مطابق با انتظاری که بر حسب مشاهدات ماهواره ای قابل پیش‌بینی است خطوط میدان همان‌طور که باید در اثر فشار

- D., and Singer, H. J., 2000, Magnrtic storm: solar wind driver and magnetospheric response: *J. Geophys., Res.*, **107**, 1440-1461.
- laitinen, T. V., Pulkkinen, T. I., Palmroth, M., Janhunnen, P., and Koskinen, H. E. J., 2005, The magnetotail reconnection region in a global MHD simulation: *Ann. Geophys.*, **23**, 3753-3764.
- Le Veque, R. J., 1992, Numerical methods for conservation laws, Birkhser verlag, Boston.
- Palmroth, M., Pulkkinen, T. L., Janhunnen, P., and Wu, C. C., 2003, Stormtime energy transfer in global MHD simulation: *J. Geophys., Res.*, **168**, 1048-1060
- Parker, E. N., 1957, Sweet's mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids: *J. Geophys., Res.*, **62**, 509-520.
- Petschek, H. E., 1964, Magnetic field annihilation: *NASA Special Publ., NASA-SP.*, **50**, 425-439.
- Schindler, K., Hesse, M., and Birn, J., 1988, General magnetic reconnection, parallel electric fields, and helicity: *J. Geophys., Res.*, **93**, 5547-5557.
- Sweet, P. A., 1958, The neutral point theory of solar flares: In Lehnert, B., editor, *Electromagnetic phenomena in cosmical physics*: Cambridge Uni., Press, New York.
- Walker, R. J., Ogino, T., Reader, J., and Ashour-Abdalla, M., 1993, A global magnetohydrodynamic simulation of the magnetosphere when the interplanetary magnetic field is southward: The onset of magnetotail reconnection: *J. Geophys., Res.*, **98**, 17235-17249.
- مغناطیسی در مکان تقریبی حدود ۲۰ برابر شعاع زمین و در قسمت نیمه‌شب ($20 R_E - \sim$) رخ می‌دهد و برای مقاومت‌های ویژه کمتر و بیشتر از این مقدار نحوه شکل‌گیری خطوط میدان و وقوع اتصال مجدد وضوح خاصی ندارد. برای کسب نتایج دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود که به جای استفاده از مقاومت ویژه ثابت، الگوهای مقاومتی وابسته به مکان یا زمان در شبیه‌سازی به کار روند و با مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی داده‌های ماهواره‌ای مقایسه شوند.

منابع

- Axford, W. I., 1984, Magnetic field reconnection: Geophysical Monograph, American Geophysical Union, **30**, 1-8.
- Birn, J., Drake, J. F., Shay, M. A., Rogers, B. N., Denton, R. E., Hesse, M., and et al., 2001, GEM magnetic reconnection challenge: *J. Geophys., Res.*, **106**, 3715-3719.
- Dungey, J. W., 1961, Interplanetary magnetic field and the auroral zones: *Phys., Rev., Lett.*, **6**, 47-48.
- Fedder, J. A., Slinker, S. P., Lyon, J. G., and Elphinstone, R. D., 1995, Global numerical simulation of the growth phase and the expansion onset of the substorm observed by Viking: *J. Geophys., Res.*, **100**, 19083-19093.
- Huttunen, K. E. J., Koskinen, H. E. J., Pulkkinen, T. I., Pulkkinen, A., Palmroth, M., Reeves, G.