

بررسی پاسخ مغناطیس سپهر به تغییر پارامترهای باد خورشیدی با شبیه‌سازی مگنتوهیدرودینامیک

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

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

^۲ استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه اراک، ایران

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

(دریافت: ۸۶/۱۲/۱۲، پذیرش نهایی: ۸۷/۱/۱۵)

چکیده

یک شبیه‌سازی عددی بزرگ‌مقیاس براساس نظریه مگنتوهیدرودینامیک طراحی شد تا سیر تکاملی تأثیر شرایط فیزیکی بر مغناطیس سپهر را براساس اندازه‌گیری پارامترهای باد خورشیدی تشریح کند. با توجه به وسعت زیاد مغناطیس سپهر و وابستگی زیاد فضایی فرآیند انتقال انرژی، مقدار انرژی انتقالی نمی‌تواند مستقیماً روی سطح مغناطیس سپهر، مگنتوپاؤز نامیده می‌شود، اندازه‌گیری شود. بنابراین انجام شبیه‌سازی می‌تواند امکان محاسبه کمی انتقال انرژی از باد خورشیدی به مغناطیس سپهر، همچنین مکانی را که اساساً فرآیند انتقال انرژی در آن اتفاق می‌افتد، را فراهم سازد. لازم به ذکر است که فقط مقدار کوچکی از انرژی انتقالی در یون سپهر قطبی و در دو حفره اصلی موجود در آن تحلیل می‌رود: قسمتی از انرژی به علت جریان‌های الکتریکی یون سپهری بین مغناطیس سپهر و یون سپهر به گرمای ژول تبدیل می‌شود و قسمتی دیگر به صورت ذرات بارداری که در مغناطیس سپهر شتاب‌دار شده‌اند به داخل یون سپهر بر می‌گردند (این ذرات، که در برخورد با ذرات جو، درخشندگی‌های شفق را ایجاد می‌کنند).

در این مقاله، انرژی مربوط به این فرآیندهای یون سپهری با شبیه‌سازی عددی ساختار مغناطیس سپهر و به کار بردن یک برنامه عددی بر اساس معادلات مگنتوهیدرودینامیک برآورد می‌شود. همچنین ارتباط مقدار و آهنگ تغییرات زمانی کل انرژی صرف‌شده توسط یون سپهر با پارامترهای باد خورشیدی به‌منظور به‌دست‌آوردن رابطه‌ای که کل انرژی مربوط به یک نقطه اندازه‌گیری را تعیین می‌کند، سنجیده می‌شود. تعمیم رابطه به‌دست‌آمده در موقعیت‌هایی که برآورد سریع کل انرژی یون سپهری مورد نیاز است، مانند پیش‌بینی شرایط هوا-فضا، کاربرد عملی خواهد داشت. شبیه‌سازی بزرگ‌مقیاس مگنتوهیدرودینامیک، در این مقاله، در دستگاه بیضوی-خورشیدی، انجام شده است که مبدأ آن در مرکز زمین، محور X به سوی خورشید است، محور Z بر صفحه بیضوی عمود و به سمت شمال و محور Y که جهت‌گیری به سمت غرب دارد دستگاه مختصات راست‌گرد را تکمیل می‌کند. مرز انتخابی به سمت خورشید، در فاصله $X = +30R_E$ از مرکز زمین قرار دارد و سلول‌های مکعبی به ابعاد $5R_E$ تا موقعیت $X = -60R_E$ در قسمت نیمه‌شب قرار گیرد، زمین را پوشش می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: یون سپهر، مغناطیس سپهر، هوا-فضا، باد خورشیدی، میدان مغناطیسی بین‌سیاره‌ای، شبیه‌سازی مگنتوهیدرودینامیک

Investigation of the magnetosphere's response to changes of solar wind parameters with MHD simulation

Feizabady, B.¹, Mirzaei, M.² and Hosseinzadeh Guya, N.³

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

² Assistant Professor, Physics Department, Arak University, Iran

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

(Received: 2 March 2008, Accepted: 24 Jan 2009)

Abstract

The global computer simulation based on the magnetohydrodynamic (MHD) theory describes the evolution of physical conditions in the simulation domain based on measurements for each point in the solar wind. Considering the size of magnetosphere and strong spatial variation of the energy transfer process, the amount of transferred energy cannot be directly measured on the surface of magnetosphere, called the magnetopause. Therefore, simulation can provide a unique opportunity to calculate quantitatively the amount of solar wind energy transfer to the magnetosphere and to determine where the energy transfer process mainly takes place. Only a small amount of the transferred energy is consumed in the earth's polar ionosphere and in its two sinks: part of the energy is converted to Joule heat, which is caused by the ionospheric closure of the electric currents flowing between the magnetosphere and the ionosphere and the remainder of the energy is left in the ionosphere as charged particles originating from the magnetosphere precipitate (these particles collide with atmospheric particles and produce auroral light).

In this paper, the energy related to the ionospheric processes was quantified by the magnetosphere's structure of using a computer code based on MHD equations. Also, the amount and time variation of the total energy consumed by the ionosphere was correlated with solar wind parameters to predict the total ionospheric energy from a point measurement in the solar wind. The developed relationship can have practical significance in situations where the total ionospheric energy needs to be estimated quickly, for example, for space weather prediction purposes.

In this paper, the global MHD simulation is done in the GSE coordinates system. The origin is on the earth's center and the direction of X-axis always pointing sunward. The Z-axis is normal to elliptic plane and its direction is northward, and the Y-axis completed the right-handed coordinate system and its direction is duskward. The location of the sunward simulation boundary is about $X = +30R_E$ from the earth's center and is covered until $X = -60R_E$ on the midnight sector of the earth by cubic cells. The dimensions of the cells are selected about $0.5R_E$.

Key words: Ionosphere, Magnetosphere, Weather-space, Solar wind, Interplanetary magnetic field, MHD simulation

۱ مقدمه

(mirror field method) تصویری که در آن یک صفحه رسانا و یک دوقطبی تصویری متقارن نسبت به صفحه، جانشین باد خورشیدی می‌شود، به بهترین وجهی صورت گیرد (شکل ۱). این روش به راحتی ساختار هندسه میدان در سمت راست صفحه را می‌دهد. به هر حال چون باد خورشیدی با سرعت نوعی 400 kms^{-1} حرکت می‌کند در اطراف میدان دوقطبی منحرف می‌شود و یک حفره پلاسما گلوله‌ای شکل مانند قسمت b شکل ۱، (مغناطیس سپهر) را ایجاد می‌کند.

وجود میدان مغناطیسی زمین به بهترین وجهی با یک عقربه قطب‌نما آشکار می‌شود. در نزدیکی سطح زمین هندسه خطوط میدان، مانند خطوط میدان مغناطیسی یک دوقطبی بزرگ مدفون در مرکز زمین است. در فواصل بسیار دور از سطح زمین، میدان دوقطبی با میدان مغناطیسی همراه پلاسمای با منشأ خورشیدی یعنی میدان مغناطیسی بین‌سیاره‌ای (IMF) برهم‌کنش می‌کند. همان‌گونه که اولین بار چاپمن و فرارو (a, b, ۱۹۳۱) بیان کردند، توصیف این برهم‌کنش می‌تواند با روش میدان آینه‌ای

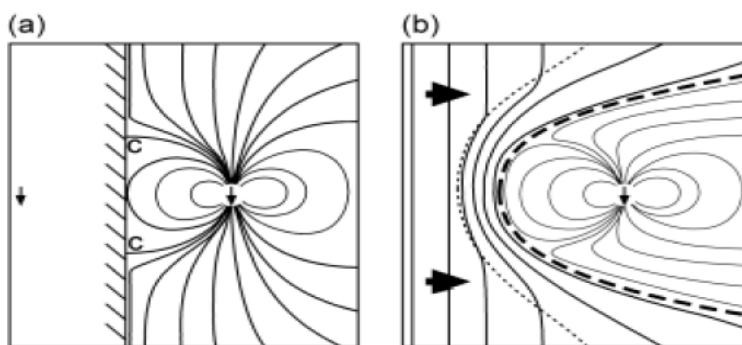
خورشیدی متراکم می‌کند، به نحوی که مگنتوپاوز قسمت روز در فاصله حدود ۱۰ برابر شعاع زمین از مرکز زمین واقع می‌شود. در قسمت شب، برهم‌کنش با باد خورشیدی، مغناطیس سپهر را طولانی می‌کند و دنباله طویل (Magnetotail) را ایجاد می‌کند که تا حدود ۱۰۰۰ برابر شعاع زمین ادامه دارد.

یک سامانه جریان به منظور حفظ میدان مغناطیسی مغناطیس سپهر در برابر باد خورشیدی، روی مگنتوپاوز گسترش می‌یابد. این جریان‌ها امروزه جریان‌های چاپمن - فرارو نامیده می‌شوند. به علاوه این وضعیت منجر به حضور دو خط مجزای میدان می‌شود که در شکل ۱- a با C نشان داده شده‌اند. چون پلاسما می‌تواند آزادانه در طول خطوط میدان مغناطیسی حرکت کند، این خطوط میدان روی مگنتوپاوز نگاشته می‌شوند و لذا موقعیت محلی را که در آنجا مواد مگنتوشیت می‌توانند به مغناطیس سپهر داخل شوند معین می‌کنند. این خطوط نشانه مناطق هلالی نوک تیز (cusp) هستند اگرچه در واقع هلالی‌های نوک تیز بیشتر شبیه شیپورهایی با پهنای محدود هستند تا خطوط میدان مجزا (اسمیت و لاکوود، ۱۹۹۶). مولفه B_z جنوب سوی بزرگ IMF بخش وسیع تری از مگنتوپاوز را به سبب اتصال مجدد، به سوی زمین می‌راند و هلال را به عرض‌های پایین تر حرکت می‌دهد. هلال‌ها در حین افزایش IMF شمال سو، موقعیت خود را حفظ می‌کنند یا

مرزی که مغناطیس سپهر را از باد خورشیدی جدا می‌کند مگنتوپاوز نامیده می‌شود (خطوط منقطع ضخیم در شکل ۱- b). علاوه بر این چون باد خورشیدی با سرعتی بسیار بیشتر از سرعت انتشار اطلاعات در داخل پلاسما حرکت می‌کند، مشابه جریان آب رودخانه که به یک تخته سنگ بر می‌خورد، پیش ضربه‌ای در اطراف مگنتوپاوز شکل می‌گیرد که قوس ضربه‌ای (bow shock) نامیده می‌شود (خطوط نقطه‌ای نازک در شکل ۱- b). قوس ضربه‌ای، باد خورشیدی غیرمغشوش را از باد خورشیدی ضربه‌ای جدا می‌کند. ناحیه بین مگنتوپاوز و قوس ضربه‌ای، مگنتوشیت (Magnetosheat) نامیده می‌شود.

در قرن هجدهم پیشنهاد شده بود که فعالیت خورشیدی بر تغییرات مغناطیسی روی سطح زمین تاثیر می‌گذارد طوری که نمایش‌های شفقی وسیع و تغییرات بزرگ در میدان مغناطیسی زمین هم‌آهنگ با افزایش تعداد لک‌های خورشیدی، روی می‌دهند. حتی وقتی بعداً ارتباط بین فعالیت خورشیدی و اغتشاش‌های زمینی شناخته شد، معلوم نبود که انرژی باد خورشیدی چگونه می‌تواند از بین میدان دو قطبی زمین (که با توجه به شرط انجماد آلفون همچون حفاظی زمین را در بر گرفته است) عبور کند.

باد خورشیدی مغناطیس سپهر را در قسمت سوی



شکل ۱. (a) هندسه میدان آینه‌ای از چاپمن و بارتلز (۱۹۴۰) و (b) تشکیل مغناطیس سپهر گلوله‌ای شکل در داخل باد خورشیدی در حال حرکت.

آورده و شرایط اولیه و نیز چگونگی تغییر پارامترها را تشریح کرده‌ایم. بخش ۳، به ذکر نتایج شبیه‌سازی در هر مورد و ارائه شکل‌های به‌دست‌آمده اختصاص دارد و در بخش ۴ به نتیجه‌گیری‌های نهایی پرداخته‌ایم.

۲ شرایط اولیه شبیه‌سازی

۱-۲ توصیف کلی و معادلات اساسی

پلازما یک گاز شبه خنثی شامل بارهای آزاد است. به‌علاوه پلازما درحکم یک توده بار، رسانندگی بسیار زیادی دارد و بنابراین حرکت و رفتار فیزیکی آن را میدان‌های الکترومغناطیسی تعیین می‌کنند. به‌خصوص در پلازماهای رقیق فضایی که برخورد بین ذرات در آنها قابل چشم‌پوشی است، این موضوع کاملاً قابل قبول است. پلازما به‌صورت توده‌ای، با میدان‌های الکترومغناطیسی برهم‌کنش می‌کند و بنابراین مانند یک محیط پیوسته عمل می‌کند. باوجودی که معادلات اوایلر و ناویر-استوکس حرکت و رفتار سیالات غیرمغناطیسی را (به‌ترتیب با چسبندگی صفر و غیر صفر) توصیف می‌کنند، بررسی حرکت و رفتار پلازما نیاز به منظور کردن اثرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دارد. مجموعه‌ای از معادلات که توصیف مکانیکی سیالات را به‌دست می‌دهد و در عین حال شامل اثرات الکترومغناطیسی نیز هست، مگنتوهیدرودینامیک (MHD) نامیده می‌شود که به‌خوبی از سوی آلفون معرفی شده است. در MHD پلازما به صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود که با دمایی منفرد، چگالی عددی و سرعت گروه توصیف می‌شود. چون دستگاه MHD ایدئال پایستگی جرم و اندازه حرکت و انرژی را حفظ می‌کند و با در نظر گرفتن پلازما در حکم یک گاز مغناطیسی تحت نیروهای الکترومغناطیسی اضافی معادله‌نوعی در مکانیک سیالات می‌تواند به شکل پایستار نوشته شود طوری که یک کمیت پایستار در یک حجم بسته فقط وقتی تغییر می‌کند که شار

آهسته به‌سوی قطب منتقل می‌شوند. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که هلال در نیم‌کره شمالی، برای مولفه B_y مثبت (به سوی طلوع) به سمت قبل از ظهر و برای مولفه B_y منفی (به‌سوی غروب) به سمت بعد از ظهر جابه‌جا می‌شود و در نیم‌کره جنوبی جابه‌جا در جهت‌های مخالف می‌باشد (نول و همکاران، ۱۹۸۹). این رفتار از این حقیقت ناشی می‌شود که یک مولفه B_y مثبت جایگاه اتصال مجدد را در نیم‌کره شمالی به سوی مثبت محور y (به‌سوی طلوع) و در نیم‌کره جنوبی به سوی منفی محور y (به‌سوی غروب) سوق می‌دهد (کالیو و کوسکینن، ۲۰۰۰). مفهوم اتصال مجدد مغناطیسی از ۱۹۴۰ که اولین بار به‌منزله سازوکاری برای شکستن شرط انجماد و نیز مسبب گرما و شتاب پلازما در زبانه‌های خورشیدی پیشنهاد شد، بررسی شده است. تغییر ساختار مغناطیس‌سپهر و انتقال انرژی به سوی دنباله طویل آن عامل اصلی در وقوع اتصال مجدد مغناطیسی در ناحیه دم‌مغناطیسی و بروز زیرتوفان‌های مغناطیس‌سپهری و شفق است (فیض‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۶).

اصولاً اتصال مجدد مغناطیسی به‌معنی تغییر کیفی ساختار دو میدان مغناطیسی متفاوت است که در آن اجزای پلازما که در ابتدا متصل به یکی از میدان‌ها هستند به میدان مغناطیسی دیگر متصل می‌شوند. برطبق رده‌بندی پریست و فوربز (۲۰۰۰) دو مسیر برای بررسی شکستن شرط انجماد وجود دارد: یکی تمرکز روی پیدا کردن سازوکاری که مقاومت به حد کافی زیاد را برای ایجاد اتلاف لازم (براساس اثرات جنبشی پلازما) فراهم آورد، و دیگری تمرکز روی پیدا کردن ساختاری هندسی که منجر به اتلاف سریعی که اتفاق می‌افتد بشود (مسیر MHD). در این مقاله ساختار مغناطیس‌سپهر و تغییرات آن را با شبیه‌سازی بزرگ‌مقیاس براساس مسیر MHD و برحسب تغییرات پارامترهای باد خورشیدی بازسازی می‌کنیم. در بخش ۲، شرح مختصری از اساس روش را

که در آن V_j حجم سلول زام است. در روش حجم محدود، شارهای عبوری از وجوه هر سلول جمع می‌شود و از متوسط سلولی کم می‌شود، طوری که به طور 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. شرایط مرزی اولیه میدان دوقطبی در فضای خالی و متغیرهای ورودی به محدوده شبیه‌سازی از مرز سمت خورشید هستند. به دیگر مرزهای محدوده نیز شرایط خروجی اعمال می‌شود. شناسایی شرایط و متغیرهای ورودی منجر به مسئله ریمان می‌شود که در آن یک ناپیوستگی در یک متغیر پایستار بین دو سلول ثابت شبکه وجود دارد و یک جواب بعد از زمان Δt مورد نظر است. یک جواب برای مسئله ریمان در MHD شامل هفت موج است که در جهت دورشدن از ناپیوستگی انتشار می‌یابند. دو تا از این امواج متناظر با موج مغناطوسوتی سریع، دو تا موج آلفن و دو تا نیز متناظر با مغناطوسوتی کند هستند. هفتمین موج، متناظر با سرعت گروه پلاسما است و اغلب یک موج آنتروپی نامیده می‌شود. نتیجه اینکه، معادلات MHD نوشته شده به شکل معادله عمومی یک دستگاه ویژه با هشت ویژه مقدار را معرفی می‌کند که متناظر با هفت موج معرفی شده و یک موج بلا اثر (null wave) است که دامنه آن در وضعیت با $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ، صفر است. چون متوسط‌های سلولی معلوم هستند، دقت روش عددی با استفاده از روش حجم محدود بستگی به روشی دارد که شار عبوری از وجوه سلول از راه آن به دست می‌آیند. حل دقیق مسئله ریمان در MHD مشکل است و موجب محاسبات بسیار سنگینی است. خوشبختانه راه‌های متعددی برای به دست آوردن حلی تقریبی از مسئله ریمان وجود دارد. یکی از اینها حل کننده رُو (Roe solver) است (لوکیو، ۱۹۹۲). در این حل کننده، مسئله ریمان غیرخطی

خالص مربوط به آن کمیت از مرزهای محدودکننده حجم عبور کند یعنی:

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{F}_a) = 0 \quad (1)$$

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 صورت پایستار عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{P}}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\vec{P}\vec{P}}{\rho} + P + \frac{B^2}{2\mu_0} - \frac{1}{\mu_0} \vec{B}\vec{B} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \left[\left(U + P - \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \frac{\vec{P}}{\rho} + \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \times \frac{\vec{P}}{\rho} \times \vec{B}) \right], \quad (4)$$

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

$$U = \frac{P}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho \vec{v}^2 + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (5)$$

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

$$u_{a,j}(t) = \frac{1}{V_j} \int_{V_j} u_{a,j}(\vec{r}, t) dV_j, \quad (6)$$

شبهه‌سازی معادلات MHD به صورت پایستار در باد خورشیدی و مغناطیس‌سپهر حل می‌شوند. منطقه شبهه‌سازی متشکل از طول $90 R_E$ در بعد X و $60 R_E$ در بعد Y و Z است. گام‌های فضایی برابر $5 R_E$ و 0 و گام زمانی برابر 937 ر ثانیه (زمان سیر امواج آلفن) انتخاب شده است. یک دوقطبی مغناطیسی در مرکز فرض می‌شود و برای یون‌سپهر معادلات الکتروستاتیک در نظر گرفته شده است.

همچنین یون‌سپهر به صورت یک پوسته کروی در ارتفاع 100 کیلومتری بالای سطح زمین لحاظ شده و بین آن و پوسته کروی فرضی در ارتفاع $37 R_E$ یک محیط گذردهنده که فقط اثرات الکتریکی را منتقل می‌کند، در نظر گرفته شده است. البته چون در مگنتوهیدرودینامیک هیچ ذره‌ای وجود ندارد، با وجودی که لبه به سمت استوای هلال به خوبی در شبهه‌سازی مشخص می‌شود، بعضی از مشخصه‌های دیگر که در اندازه‌گیری‌های فضاپیماها مشاهده می‌شود در این جا به صورت مستقیم قابل دسترسی نیست.

۳ طرح و بررسی نتایج شبهه‌سازی

به منظور بررسی رفتار و ساختار مغناطیس‌سپهر تحت تاثیر تغییر پارامترهای باد خورشیدی و IMF همراه آن، شبهه‌سازی برای مقادیر $V_{sw} = 300 \text{ km s}^{-1}$ و $V_{sw} = 600 \text{ km s}^{-1}$ (متناظر با حدود تقریبی سرعت باد خورشیدی) و نیز برای $IMF_z = -5 \text{ nT}$ (میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای جنوب‌سو) و $IMF_z = +5 \text{ nT}$ (میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای شمال‌سو) و همچنین برای فشار باد خورشیدی متناظر با 3.56×10^{-8} و 5.56×10^{-8} نیوتن بر متر مربع (متناظر با دمای 2×10^5 و 3.96×10^5 کلوین) و برای مقاومت اهمی پلاسمایی برابر 0.01 اهم به طور جداگانه صورت گرفته است. همچنین به منظور

از معادله عمومی با فرض اینکه $u = u^{(0)} + u^{(1)}$ ، در نزدیکی هر وجه سلول خطی می‌شود. در اینجا $u^{(1)}$ یک اغتشاش کوچک است و $F(u)$ بر حسب سری تیلور بسط داده می‌شود. با در نظر گرفتن فقط دو جمله اول بسط تیلور، معادله عمومی تبدیل به یک مسئله مقدار ویژه می‌شود که هفت ویژه مقدار آن متناظر با سرعت‌های امواج MHD هستند. بنابراین حل کننده رُوه در اصل یک برآورد از سرعت‌های متفاوت امواج در مجاورت هر وجه سلول برقرار می‌سازد و این برآورد برای به دست آوردن شارهای متناظر عبوری از وجوه هر سلول به کار می‌رود. آن‌گاه از شارهای وجوه هر سلول برای به روز کردن متوسط‌های سلولی در سلول‌های مجاور استفاده می‌شود. روشی را که در آن شار وجه مشترک سلول‌ها برای به روز کردن متوسط سلولی سلول‌های مجاور به کار می‌رود معمولاً "الگوی گادوناو" می‌نامند. مشکل حل کننده رُوه این است که فقط در یک بُعد (بیشتر در بعد x) کار می‌کند و جواب‌های دو بُعد دیگر با چرخش به دست می‌آیند. بنابراین هر بعد به طور مستقل حل می‌شود و لذا این خطر به وجود می‌آید که $\nabla \cdot B$ مساوی صفر باقی نماند. برای رفع این مشکل می‌توان از تمیز کننده محذوف که در ۱۹۸۰ براکیبل و بارنز معرفی کردند، استفاده کرد. این تمیز کننده مناسب‌ترین راه برای حذف واگرایی میدان مغناطیسی است.

۲-۲ دستگاه مختصات، شرایط مرزی اولیه و پارامترهای مربوطه

شبهه‌سازی 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 جهت گیری محور Y به نحوی است که دستگاه مختصات قائم‌الزاویه راستگرد را تکمیل می‌کند. در این

حالت قبل است و مخصوصاً به دلیل حضور مولفه Y میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای، تقارن حالت قبل وجود ندارد. همچنین نتایج مشخص می‌سازد که وقوع فرایندها، نسبت به حالت قبل، با تاخیر زمانی معنی‌داری همراه است و در طی فاصله زمانی ۶۰ دقیقه‌ای عملی شدن شبیه‌سازی، رخدادها کامل نمی‌شوند.

شکل‌های ۶ و ۷ نحوه تغییرات خطوط میدان مغناطیسی در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای پس از شروع شبیه‌سازی و با دو مجموعه شرایط اولیه پیش‌گفته در بالا و در بازه فضایی $(X=30, Y=0, Z=0)$ تا $(X=-60, Y=30, Z=30)$ بر حسب شعاع زمین را نشان می‌دهند. بررسی شکل‌ها مجدداً تمایل خطوط میدان به متراکم‌تر شدن در قسمت روز و گسترده‌تر شدن در ناحیه نیمه‌شب و تشکیل دُم مغناطیسی طویل را آشکار می‌سازد. همچنین بررسی شکل‌های مربوط به تغییر چگالی پلاسما باد خورشیدی (در اینجا نشان داده نشده‌اند) روشن می‌سازد که افزایش چگالی پلاسما فقط منجر به تغییرات شدیدتر می‌شود و بر سرعت فرایندها تأثیر معنی‌داری ندارد.

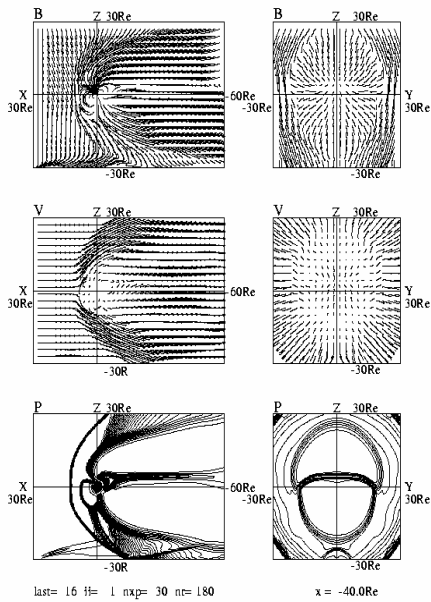
افزایش تعداد سلول‌های فضایی نیز نتیجه قابل توجهی در بر ندارد و با در نظر گرفتن مدت زمان طولانی ایجاد آن حتی با رایانه‌های نسبتاً سریع و مقیاس‌های فضایی بزرگ مقیاس در شبیه‌سازی، ابعاد سلولی در حد ۵ تا ۱ برابر شعاع زمین بهترین انتخاب است. البته ثبت داده‌های خروجی شبیه‌سازی در طی فواصل زمانی کوتاه‌تر نیز نیاز به حافظه‌های در حد ده‌ها گیگابایت برای اجرای هر مرحله دارد و محدودیت دیگری برای استفاده از داده‌ها به منظور بازسازی رفتار پیوسته مغناطیس سپهر تحت شرایط اولیه متنوع وجود ندارد. این عمل را می‌توان در یک مرکز انفورماتیک که مجهز به رایانه مرکزی فوق سریع است و حافظه جانبی کافی دارد، عملی ساخت.

بررسی اثر مولفه Y میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای بر ساختار مغناطیس سپهر با در نظر گرفتن زاویه شیب ۱۳۵ درجه برای IMF در صفحه (Y, Z) نیز، نتایج شبیه‌سازی استخراج شده است. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب رفتار شبیه‌سازی شده مغناطیس سپهر را از نظر توزیع خطوط میدان، سرعت، فشار، چگالی و انرژی در زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه پس از شروع شبیه‌سازی برای شرایط اولیه $V_{sw}=600\text{kms}^{-1}$ ، $IMF_z=-5\text{nT}$ و $P_{sw} = 5.56 \times 10^{-8} \text{Nm}^{-2}$ نشان می‌دهند. خطوط میدان مغناطیسی مربوط به دو قطبی مغناطیسی مرکزی اولیه در سمت خورشید به تدریج متراکم‌تر می‌شود و البته در سمت نیمه‌شب گسترش طولی بیشتری می‌یابد و دُم مغناطیسی طویل را ایجاد می‌کند (شکل‌های مربوط به زمان‌های کمتر که خطوط متقارن اولیه را نشان می‌دهند در اینجا آورده نشده است).

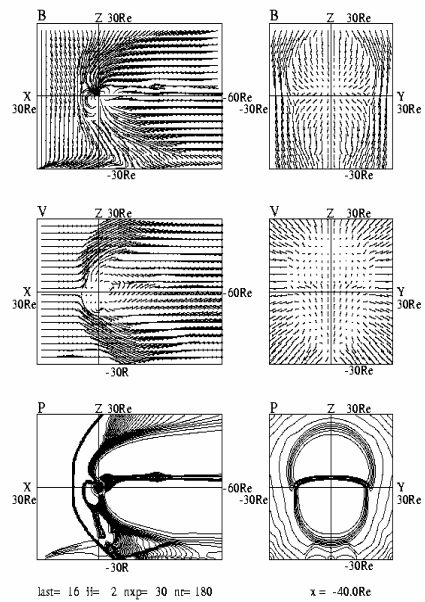
توجه به تصاویر، به خصوص شکل‌های مربوط به توزیع فشار، موقعیت مگنتوپاوز و نزدیک‌تر شدن نقطه زیرخورشیدی به زمین و موقعیت هلال‌ها را (نقاط صفر مغناطیسی و محل ورود ذرات باد خورشیدی به داخل مغناطیس سپهر) که ناحیه ورود انرژی باد خورشیدی به داخل مغناطیس سپهر است، به خوبی نشان می‌دهد. همچنین نحوه توزیع فشار و انرژی و تغییرات آنها در پشت زمین در قسمت نزدیک نیمه‌شب (در صفحه نصف‌النهاری ظهر-نیمه‌شب)، اطراف عرض تقریباً ۷۰ درجه می‌تواند نمایانگر موقعیت تقریبی شفق‌های قطبی باشد.

شکل‌های ۴ و ۵ نتایج شبیه‌سازی برای کمیت‌های پیش‌گفته را برای شرایط اولیه $V_{sw} = 300\text{kms}^{-1}$ ، $IMF_z = +5\text{nT}$ و شیب ۴۵ درجه و $P_{sw} = 3.56 \times 10^{-8} \text{Nm}^{-2}$ در زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه پس از شروع نشان می‌دهند. بررسی شکل‌ها روشن می‌سازد که در این حالت، انتقال انرژی به داخل مغناطیس سپهر بسیار کمتر از

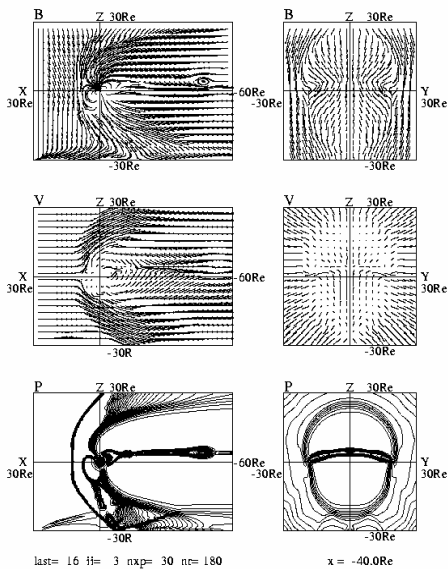
3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=15 min



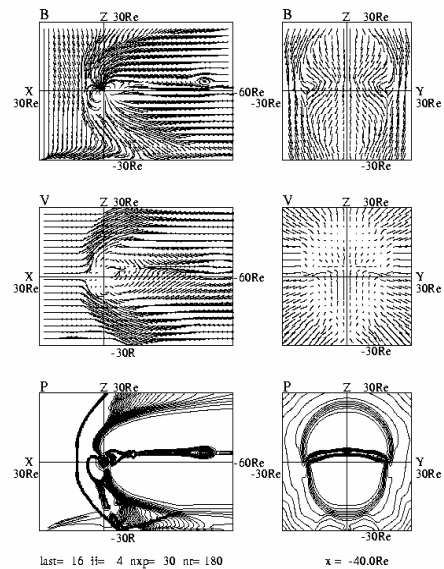
3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=30 min



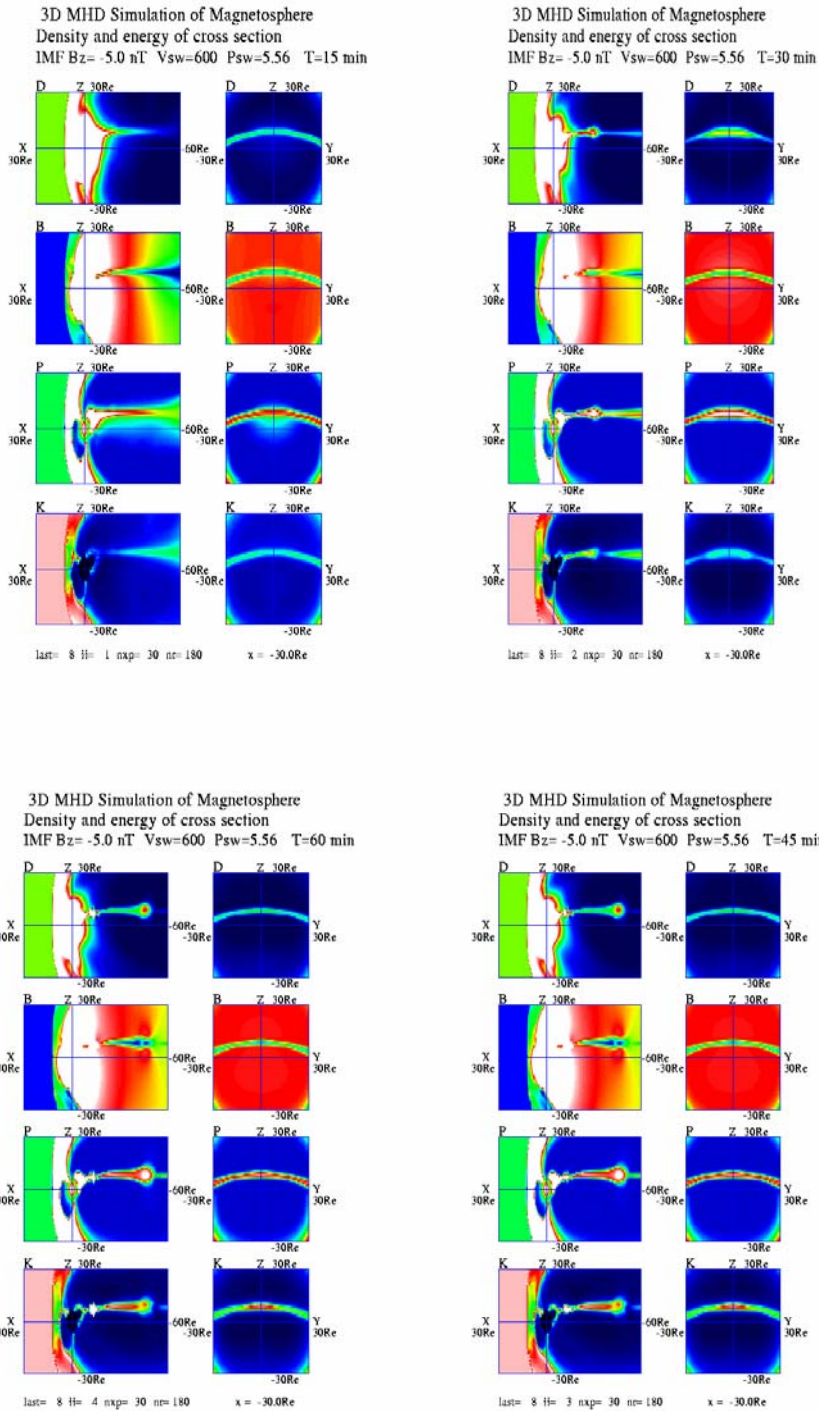
3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=45 min



3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=60 min

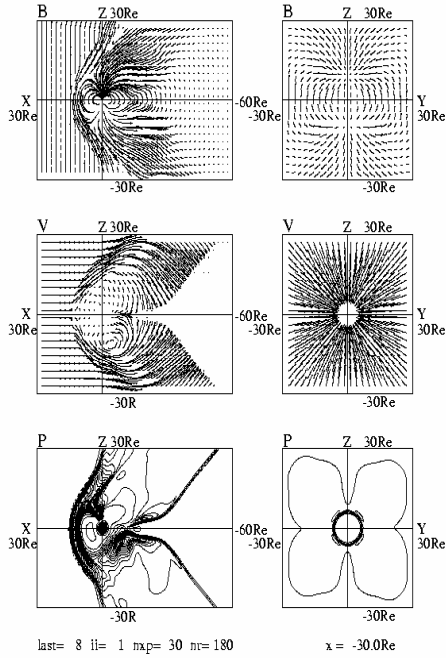


شکل ۲. ساختار مغناطیس سپهر در چهار مرحله، بعد از گذشت زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه پس از شروع شبیه‌سازی، در هر مرحله تصاویر سمت چپ به ترتیب توزیع خطوط میدان مغناطیسی، سرعت پلاسما و فشار آن را در صفحه (X, Z) و تصاویر سمت راست همان کمیت‌ها را در صفحه (Y, Z) نشان می‌دهند.

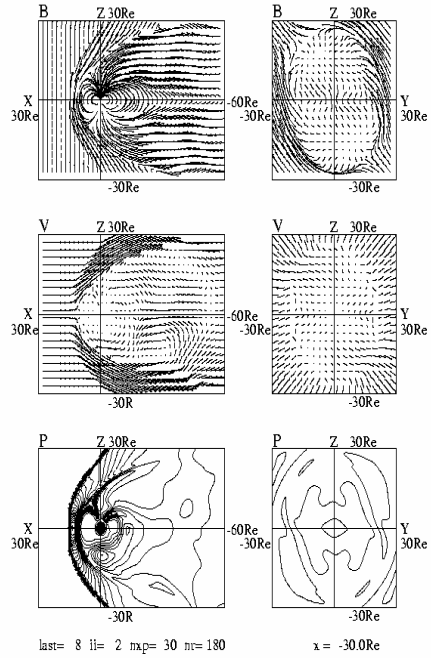


شکل ۳. سطح مقطع توزیع چگالی و انرژی پلاسما در چهار زمان ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه پس از شروع شبیه‌سازی در هر مرحله تصاویر سمت چپ به ترتیب از بالا به پایین چگالی، میدان، فشار و انرژی را در صفحه‌های (Y, Z) ، نیمه‌شب (X, Z) و تصاویر سمت راست همان کمیت‌ها را در صفحه‌های (Y, Z) و (X, Z) در $Y = -30 R_E$ نشان می‌دهند.

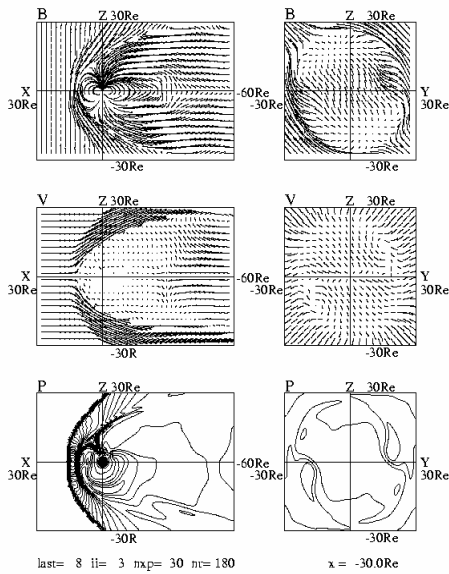
3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=15 min



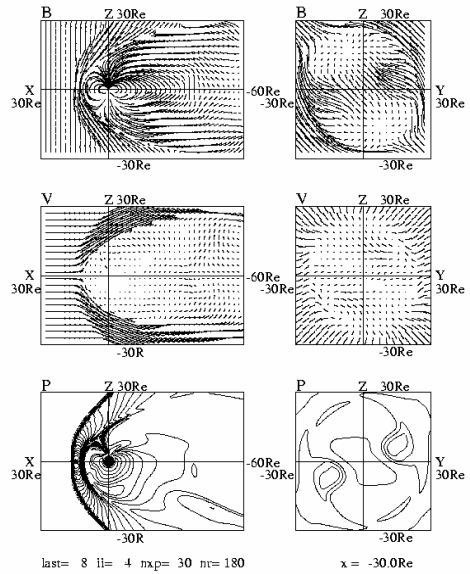
3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=30 min



3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=45 min

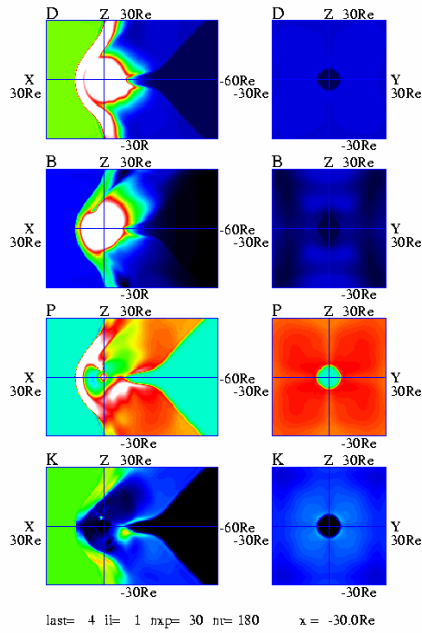


3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=60 min

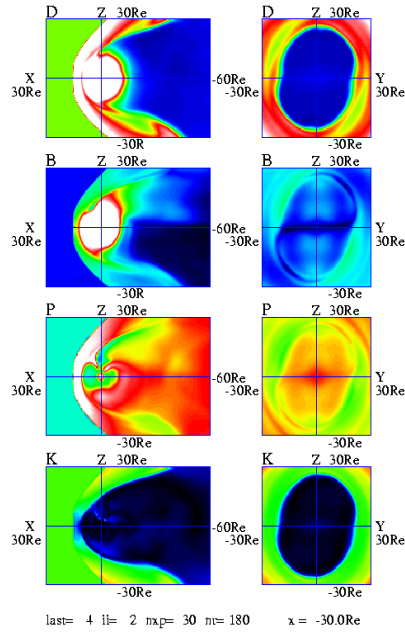


شکل ۴. همانند شکل ۲ ولی با شرایط اولیه متفاوت.

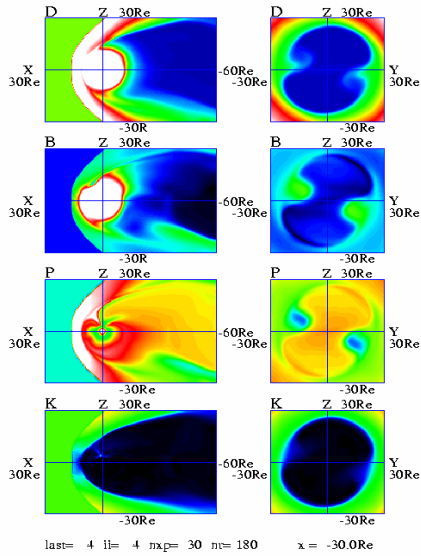
3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
Density and energy of cross section
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=15 min



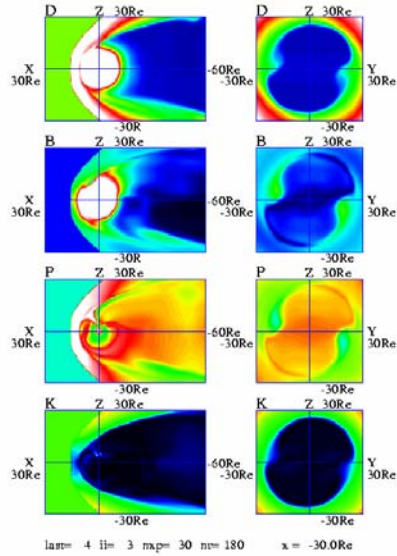
3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
Density and energy of cross section
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=30 min



3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
Density and energy of cross section
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=60 min

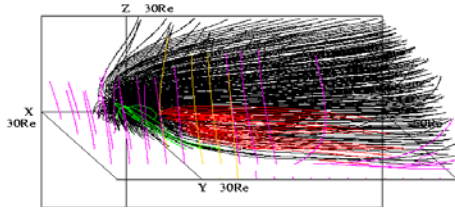


3D MHD Simulation of Earth's Magnetosphere
Density and energy of cross section
IMF Bz= 5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=45 min

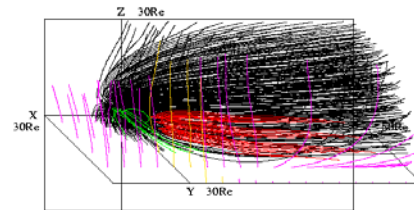


شکل ۵. همانند شکل ۳ ولی با شرایط اولیه متفاوت.

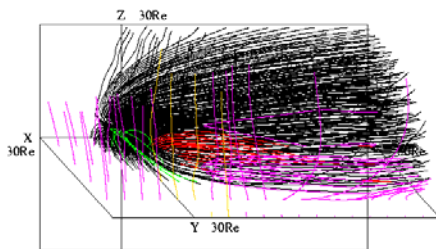
3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=15 min



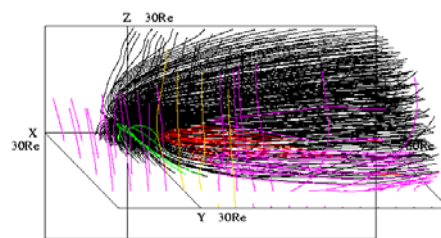
3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=30 min



3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=45 min

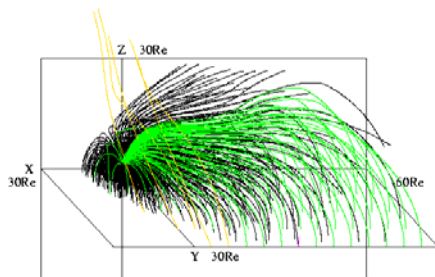


3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= -5.0 nT Vsw=600 Psw=5.56 T=60 min

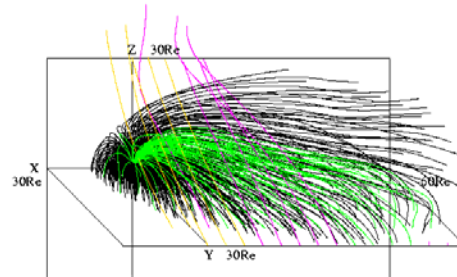


شکل ۶. الگوی خطوط میدان مغناطیسی برای سرعت ۶۰۰ کیلومتر بر ثانیه و IMF جنوب سو.

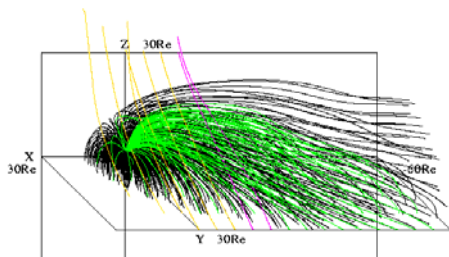
3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= +5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=15 min



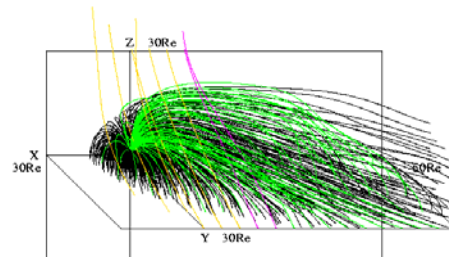
3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= +5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=30 min



3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= +5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=45 min



3D MHD Simulation of Magnetosphere
IMF Bz= +5.0 nT Vsw=300 Psw=3.56 T=60 min



شکل ۷. همانند شکل ۶ ولی برای سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ثانیه و IMF شمال سو.

۴ نتیجه گیری

با انجام شبیه‌سازی رایانه‌ای براساس معادلات MHD و تغییر پارامترهای باد خورشیدی و IMF همراه آن به منزله شرایط اولیه موثر در برهم‌کنش باد خورشیدی و مغناطیس سپهر، به خوبی می‌توان چگونگی و کجایی انتقال انرژی از باد خورشیدی به مغناطیس سپهر زمین را تعیین کرد.

نتایج شبیه‌سازی سهم هریک از پارامترها در اندازه انرژی انتقالی و ناحیه انتقال در مگنتوپاوز را مشخص می‌کند.

بررسی خروجی‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تغییر فشار باد خورشیدی و سوی شمالی یا جنوبی IMF_z در تغییر اندازه انرژی انتقالی و بودن یا نبودن مولفه IMF_y و جهت‌گیری مثبت یا منفی آن در تغییر موقعیت ناحیه انتقال انرژی بسیار موثر هستند. تغییر سرعت و چگالی باد خورشیدی نیز از عوامل تعیین‌کننده زمان تاخیر و مدت زمان وقوع کامل هر مجموعه‌ای از رخدادها هستند.

حضور مولفه جنوب‌سوی IMF_z عامل اصلی در وقوع پدیده اتصال مجدد مغناطیسی در مگنتوپاوز و انتقال و گسترش موثر انرژی از باد خورشیدی به داخل مغناطیس سپهر است. این انتقال انرژی از نواحی هلالی نوک‌تیز شیپورمانندی موسوم به cusp که در آنجا میدان مغناطیسی بین‌سیاره‌ای منجمد شده در پلاسمای باد خورشیدی و میدان مغناطیسی اولیه دوقطبی زمینی همدیگر را خنثی می‌کنند، صورت می‌گیرد. تداوم یک مولفه جنوب‌سوی قوی، موقعیت هلال را به سوی عرض‌های پایین‌تر می‌راند در حالی که در حین یک مولفه شمال‌سوی IMF_z ، موقعیت هلال حفظ می‌شود یا به سمت قطب رانده می‌شود. همچنین موقعیت این نواحی با میدان صفر شدیداً وابسته به سرعت باد خورشیدی و جهت‌گیری مولفه IMF_y است. مولفه IMF_y مثبت باعث رانده شدن هلال به سوی قبل از ظهر در نیم‌کره شمالی و

به سوی بعد از ظهر در نیم‌کره جنوبی می‌شود و البته مولفه منفی آن موقعیت هلال را در نیم‌کره شمالی به سوی بعد از ظهر و در نیم‌کره جنوبی به سمت قبل از ظهر می‌راند. افزایش سرعت باد خورشیدی باعث کم‌شدن زمان تاخیر رخدادها و نیز عملی‌شدن کامل فرایند در فاصله زمانی کوتاه‌تر می‌شود. البته بیان دقیق وابستگی انرژی انتقالی به هر یک از پارامترها مستلزم مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های ماهواره‌ای است.

کوچک ساختن حجم سلول‌های شبیه‌سازی و افزایش تعداد آنها تا حد معینی باعث افزایش دقت نتایج می‌شود ولی به دلیل اینکه این عمل موجب افزایش تصاعدی زمان شبیه‌سازی نیز نیاز به حافظه‌های بسیار زیاد می‌شود. ابعاد سلولی در حد $0.5 R_E$ ، بهترین انتخاب است.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

الف- اندازه انرژی انتقالی از باد خورشیدی به مغناطیس سپهر به جهت‌گیری IMF_z و فشار پلاسمای باد وابسته است.

ب- مکان انتقال انرژی به جهت‌گیری هر دو مولفه Y و Z میدان مغناطیسی بین‌سیاره‌ای وابسته است.

ج- سرعت باد خورشیدی در مدت زمان سیر تکاملی رخداد انتقال انرژی و تاخیر زمانی برای هر نقطه موثر است.

د- انتخاب حجم و تعداد سلول‌های شبیه‌سازی می‌تواند با در نظر گرفتن سرعت و حافظه رایانه صورت گیرد.

ه- بیان دقیق وابستگی‌ها مستلزم مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های ماهواره‌ای است.

منابع

فیض آبادی، ب.، میرزایی، م. و حسین‌زاده‌گویا، ن.، ۱۳۸۶، ارتباط بین تغییرات دُم مغناطیسی و فعالیت‌های

شفقی در زمان زیرتوفان‌ها، ارائه شده به مجله فیزیک زمین و فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

- Brackbill, J. U., 1980, The effect of nonzero $\nabla \cdot \mathbf{B}$ on the numerical solutions of the magnetohydrodynamic equations, *J. Comput. Phys.*, **35**, 426-430.
- Chapman, S. and Bartels, J., 1940, *Geomagnetism*, Oxford University Press. UK.
- Chapman, S. and Ferraro, V. C. A., 1931a A new theory of magnetic storms, 1, The initial phase, *J. Geophys. Res.*, **36**, 171-176.
- Chapman, S. and Ferraro, V. C. A., 1931b, A new theory of magnetic storms, 1, The initial phase (continued), *J. Geophys. Res.*, **36**, 177-186.
- Kallio, E. J., and Koskinen, H. E. J., 2000, A semiempirical magnetosheath model to analyze the solar wind – magnetosphere interaction, *J. Geophys. Res.*, **105**, 27496-27479.
- Le Veque, R. J., 1992, *Numerical methods for conservation laws*, Birkh ä user verlag, Boston.
- Newell, P. T., Meng, C.-I., and Sibeck, D. G., 1989, Some low-altitude cusp dependencies on the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **94**, 8921-8927.
- Palmroth, M., 2003, *Solar Wind – Magnetosphere interaction as determined by observation and a global MHD simulation*, Finnish meteorological institute contribution, No. 41.
- Priest, E., and Forbes, T., 2000, *Magnetic reconnection: MHD theory and applications*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Smith, M. F., and Lockwood, M., 1996, Earth's magnetospheric cusps, *Geophysics*, **34**, 233-260.