

بازسازی میدان مغناطیسی تاج خورشیدی با استفاده از داده‌های ماهواره اِس‌دی‌او

به دو روش خطی و غیرخطی

مرجان یوسف زاده شبستری¹، سعداله نصیری²، حسین صفری¹

¹ دانشکده فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

² دانشکده فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

با توجه به اهمیت میدان مغناطیسی تاج خورشیدی و عدم امکان اندازه‌گیری مستقیم آن در این ناحیه، این کمیت همواره با دستگاهی به نام مغناطونگار اندازه‌گیری شده و با در نظر گرفتن فرضیاتی مرتبط با پلاسمای تاجی برون‌یابی می‌شود. در این پژوهش، نخست از روش نیمه‌تحلیلی سی‌هافر برای بازسازی خطوط میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی بر روی داده‌های مغناطوگرام استفاده کرده‌ایم. این داده‌ها توسط تلسکوپ فضایی اِس‌دی‌او/اچ‌ام‌آی برای شراره خورشیدی رده C ثبت شده در طول موج 171 آنگستروم در گرفته شده‌اند. بازسازی به این روش برای زمان‌های قبل و بعد از وقوع شراره انجام داده‌ایم. نتایج تحلیل خطی تا حدودی رضایت‌بخش بود. سپس به بررسی روش بهینه‌سازی برای برون‌یابی میدان مغناطیسی بدون نیروی غیرخطی تاج خورشید پرداخته‌ایم و میدان بدون نیروی غیرخطی را بر روی یک داده مغناطوگرام دلخواه با روش بهینه‌سازی ویتلند بازسازی کردیم. همچنین این کار را با الگوی ل و لو تکرار و نتایج را با روش ویتلند، مقایسه نموده‌ایم. نتایج بدست آمده از این دو روش با یکدیگر سازگارند که این نشان‌دهنده موفقیت روش ویتلند است.

Reconstruction of solar coronal magnetic field using linear and nonlinear methods

M. Yousefzadeh Shabestari¹, S. Nasiri², H. Safari

¹ Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan

² Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract

Based on the importance of solar coronal magnetic field and impossibility of measuring coronal magnetic field directly, this quantity is measured utilizing vector magnetographs and extrapolated in solar corona considering assumptions concerning the coronal plasma. In this research, first we have a discussion about a mathematically simpler approach that the magnetic field and currents are proportional with one constant alpha, the so-called linear force-free field approximation. In this part, we utilize semi-analytic Seehafer method in order to reconstruct LFFF with constant alpha on magnetogram data. These data are collected from SDO/HMI space telescope for C-Class solar flare in 171 Å on 27 Apr 2013 between 05:44:22 UT and 05:50:34 UT. The results of the reconstruction have been plotted on AIA data. The reconstructed open and close magnetic field lines are roughly compatible to the magnetic field lines and loops of AIA image. We have done it for the times of before and after this flare. Then the reconstruction of the NLFFF is done by the Wiegmann code using the Weathland Optimization method on an arbitrary magnetogram data. The same problem is done using the Low and Lou method and the results are compared with the Weathland method. The obtained results are in good agreement which indicates the capabilities of the Weathland method.

Keywords: The magnetic field, Corona.

1. مقدمه

از آنجایی که ساختار و دینامیک تاج خورشید به میدان مغناطیسی وابسته است، این کمیت نقش به‌سزایی در فعالیت‌های تاجی ایفا می‌نماید. اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تاجی به‌طور مستقیم غیرممکن است، این درحالی است که میدان مغناطیسی شیدسپهری به‌طور منظم توسط مغناطوگرام برداری اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری‌های شیدسپهری با استفاده از یک شرایط مرزی مناسب در تاج خورشیدی برون‌یابی می‌شوند. میدان مغناطیسی تاجی برون‌یابی شده به فرضیاتی مرتبط با شرایط پلاسمای تاجی (برای مثال: بدون نیرو بودن) متکی است. بدون نیرو بودن به این معناست که از تمام نیروهای غیرمغناطیسی نظیر

گرادیان فشار و گرانش در شرایط $\beta \ll 1$ صرفنظر شود [1]. پارامتر β نسبت فشار گرمایی p_{th} به فشار مغناطیسی p_{mag} است. در بسیاری از بخش‌های تاج خورشید، مقدار β کمتر از یک است. تمامی پلازما از رنگین سپهر تا تاج در امتداد خطوط میدان شارش می‌کنند که تعیین‌کننده هندسه‌ی حلقه‌ها هستند. هندسه تاج با ساختارهای میدان مغناطیسی تعیین می‌شود. میدان‌های مغناطیسی تاج خورشید به دو دسته تقسیم می‌شوند. میدان‌های مغناطیسی باز: این دسته از میدان‌های مغناطیسی از سطح خورشید شروع شده و تا فضای میان سیاره‌ای ادامه دارند. میدان‌های مغناطیسی بسته: شروع و پایان این گروه از میدان‌ها در سطح خورشید است. در این مقاله به بازسازی میدان مغناطیسی تاج خورشیدی و مقایسه دو روش خطی و غیرخطی می‌پردازیم.

2. بازسازی میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی به روش سی‌هافر - میدان مغناطیسی بدون نیرو

n ذره متحرک با بار الکتریکی q و سرعت $\vec{v}$ در یک میدان مغناطیسی، دارای نیروی لورنتس هستند. در شرایط $\beta \ll 1$ این نیرو صفر و نیروهای مغناطیسی بدون نیرو بر تاج خورشید حاکم هستند. با در نظر گرفتن این شرایط و انجام یکسری محاسبات ریاضی معادله هلمهولتز بدست می‌آید:

$$\nabla^2 \vec{B} + \alpha^2 \vec{B} = 0$$

در این معادله، چنانچه α صفر باشد، میدان پتانسیل و اگر ثابت باشد، میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی و در غیر اینصورت، میدان مغناطیسی بدون نیروی غیرخطی خواهیم داشت [2 و 3]. در این راستا، برای محاسبه میدان مغناطیسی در تاج خورشید با الگوی بدون نیروی خطی، داشتن مقادیر میدان مغناطیسی شیدسپهر در راستای دید، کافی است. یک روش متداول برآورد میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی در تاج، برون‌یابی آن از مقادیر شیدسپهری است. سی‌هافر در سال 1978 مولفه‌های میدان مغناطیسی را در غالب جملات فوریه ارائه کرد. مزیت برون‌یابی میدان بدون نیروی خطی، سادگی در ریاضیات آن است و اینکه به عنوان ورودی، تنها نیازمند مقادیر میدان مغناطیسی شیدسپهری در راستای دید می‌باشد. پارامتر آزاد α را می‌توان با مقایسه خطوط میدان برون‌یابی شده با حلقه‌های تاجی مشاهده شده مشخص نمود [4].

3. روش بهینه سازی جهت برون‌یابی میدان‌های مغناطیسی بدون نیروی غیرخطی

روش بهینه‌سازی اولین بار توسط ویتلند و همکارانش [5] پیشنهاد شد. در این روش نیازی به محاسبه صریح آلفا نیست و کیفیت میدان مغناطیسی بازسازی شده در روند تکرار کنترل می‌شود. تقریب میدان مغناطیسی بدون نیرو در ناحیه‌ی پائینی تاج، یعنی جایی که β کوچک است معتبر است. در این روش مستقیماً از داده‌های مغناطونگار استفاده می‌شود. با توجه به معادلات میدان‌های بدون نیرو: $\vec{j} \times \vec{B} = 0$, $(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) = 0$

$$\vec{j} = \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{B}$$

کمیت زیر را تعریف می‌کنیم:

$$L = \int_V [B^{-2} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{B})^2] d^3V$$

که حل آن با کمینه‌سازی این انتگرال میسر می‌گردد. برای این روش بردار میدان $\vec{B}$ در طول محاسبه ضرورتاً سلونوئیدی نیست، اما اگر حالت بهینه با $L=0$ بدست آید، دارای واگرایی صفر خواهد بود. تنها مشکل این روش آن است که نمی‌تواند تضمین کند که این حالت بهینه برای شرایط مرزی بدست می‌آید یا خیر. اگر اینطور نبود، آنگاه $\vec{B}$ بدست آمده یا بدون نیرو یا سلونوئیدی و یا هر دو خواهد بود [3 و 6].

4. پردازش داده‌ها

داده‌های ثبت شده با کدنس 12 ثانیه توسط تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او/اچ‌ام‌آی+ای‌آی‌ای با فرمت فیتس مربوط به زمان‌های قبل و بعد از وقوع یک شراره نوع C با طول موج ۱۷۱ آنگستروم که زمان وقوع آن روز ۲۷ آوریل ۲۰۱۳ بین ساعات UT 05:44:22 تا UT 05:50:34 می‌باشد را از سایت JSOC انتخاب نمودیم. سپس عملیات پیش‌پردازش (اعمال کد JSOC.pro در SSW) را بر روی داده‌های مورد نظر اجرا کردیم. در ادامه، با استفاده از ابزار کد ویگلمن که به دو زبان IDL و C نوشته شده است، به پردازش بر روی داده‌های مورد نظر پرداختیم، [7]، [8]، [9]، [10] و [11]

5. بازسازی خطوط میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی و ردیابی خطوط میدان مغناطیسی در تصاویر ای‌آی‌ای

در این بخش، در شکل 1 تصویر مغناطوگرام قبل و بعد از وقوع شراره به همراه بازسازی سه بعدی خطوط میدان مغناطیسی با استفاده از الگوی میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی با مقدار ضریب ($\alpha=0.880000$) نشان داده شده است. در تصویر مغناطوگرام که در صفحه پایین جعبه بازسازی قرار دارد قطب‌های به رنگ آبی (قطب S) و رنگ قرمز (قطب N) مشخص شده است. در ادامه، برای سنجش میزان تطابق خطوط میدان بازسازی شده (حلقه‌ها) از رابطه زیر استفاده شده است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\vec{r}_{Obs} - \vec{r}_{Rec})^2}$$

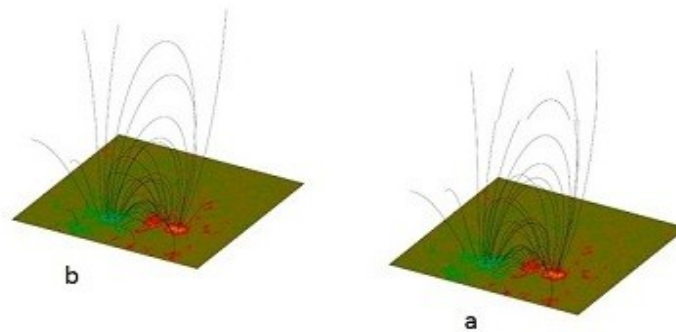
در این رابطه بردار $\vec{r}_{Obs}$ نشان‌دهنده محل نقاط روی حلقه استخراج شده از تصاویر ای‌آی‌ای و $\vec{r}_{Rec}$ نشان‌دهنده محل نقاط خطوط میدان بازسازی شده نظیر حلقه مربوطه هستند. با رسم مقادیر σ به دست آمده بر حسب α های مختلف، انحراف خطوط بازسازی و استخراج شده به‌طور واضح مشاهده می‌شود. در نتایج به دست آمده، کمینه انحراف معیار در مقدار تقریبی ($\alpha=-0.880000$) برای زمان قبل از وقوع شراره و ($\alpha=0.440000$) برای بعد از وقوع شراره و مقدار مشاهده می‌شود [1].

6. بازسازی میدان مغناطیسی بدون نیروی غیرخطی

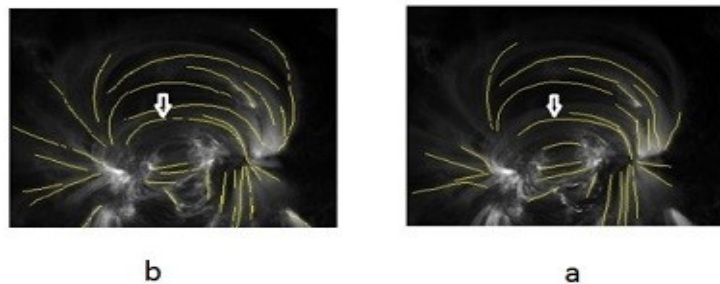
پس از انجام عملیات پیش‌پردازش و پردازش روی تصاویر مغناطوگرام ثبت شده توسط ابزار اچ‌ام‌آی و با استفاده از ابزارهای کد [11]، خطوط قوای میدان مغناطیسی بازسازی و نمایش داده می‌شوند. همچنین این کار را به روش ل و لو تکرار و نتایج را با هم طی فرایند تکرار برای یک جعبه L مقایسه می‌کنیم. در شکل 3، نمودار تحول تابع محاسباتی و تصویر مغناطوگرام بهینه‌سازی شده به همراه بازسازی سه بعدی خطوط میدان مغناطیسی بدون نیروی غیرخطی با ضریب آلفاهای متفاوت و بازسازی سه بعدی مغناطوگرام مصنوعی به دست آمده از روش ل و لو [12] نمایش داده شده است.

7. نتیجه گیری

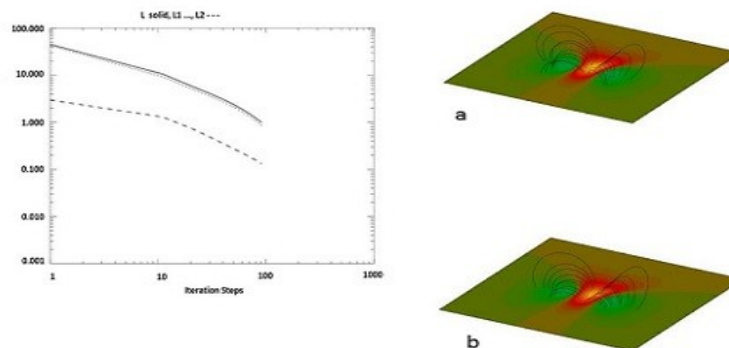
با توجه به حجم عظیم داده‌های تصویری در دسترس از خورشید توسط تلسکوپ‌های فضایی و اهمیت اثرات میدان مغناطیسی خورشید بر روی زمین، گسترش روش‌های بازسازی میدان مغناطیسی بدون نیروی تاج خورشید در مطالعه ساختار میدان‌های مغناطیسی حاکم بر تاج، بسیار حائز اهمیت است. با استفاده از روش نیمه تحلیلی سی‌هافر برای بازسازی میدان‌های مغناطیسی بدون نیروی خطی تاج خورشید بر روی داده‌های ثبت که در 17 آوریل 1112 C شده در زمان‌های قبل و بعد از یک شراره خورشیدی نوع بین ساعات UT 15:11:11 تا UT 15:51:21 به وقوع پیوسته است، نتیجه می‌گیریم که این روش تا حدی موفقیت‌آمیز است. همچنین با بازسازی میدان‌های مغناطیسی بدون نیروی غیرخطی تاج خورشید به روش بهینه‌سازی ویتلند [13] با استفاده از شرایط مرزی یک داده دلخواه و مقایسه نتایج بدست آمده با الگوی ل و لو بازسازی شده به این نتیجه می‌رسیم که بازسازی میدان مغناطیسی با استفاده از این روش بسیار کارآمدتر از روش خطی است، که این نشان‌دهنده موفقیت روش ویتلند است.



شکل 1: خطوط و حلقه‌های میدان بازسازی شده بدون نیروی خطی با آلفا ثابت را نشان می‌دهد که مغناطوگرام اِچ‌ام‌آی آن مربوط به روز 27 آوریل 2013، زمان UT 05:55:48 قبل (a) و بعد (b) از وقوع شراره است.



شکل 2: تصویری از دسته حلقه‌ها و خطوط میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی بازسازی شده در زمان بعد از وقوع شراره بر روی تصویر ای‌آی تاج خورشید که برای مقایسه با خطوط میدان مغناطیسی بدون نیروی خطی بازسازی شده بر روی مغناطوگرام اِچ‌ام‌آی انتخاب شده است.



شکل 3: سمت راست: نمودار فرآیند کمینه‌سازی L با پارامتر تکرار 100. سمت چپ: بازسازی سه بعدی میدان مغناطیسی بدون نیروی غیرخطی را بر روی مغناطوگرام بهینه‌سازی شده (a) و حلقه‌های بازسازی شده در سه بعد را به روش L و lo (b).

سپاسگزاری

از همکاری صمیمانه پروفسور توماس ویگلمن از موسسه تحقیقاتی بین‌المللی ماکس پلانک به خاطر نظرات ارزنده و کمک‌های ایشان سپاسگزاری می‌نمایم.

مرجع‌ها

- [1] M. Yousefzadeh, S. Nasiri, and H. Safari, "Reconstruction of Solar coronal Linear Force-Free Magnetic Field", *Iranian Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2015.
- [2] M. J. Aschwanden, "Physics of the solar corona", Springer (2004) 175-195
- [3] T. Wiegmann and T. Sakurai, "Solar force-free magnetic fields", *astro-ph.SR*, 2012.

- [4] N. Seehafer, "Determination of constant alpha force-free solar magnetic field from magnetograph data", *Sol. Phys.* 58 (1978) 215-223
- [5] M. S. Wheatland, P. A. Sturrock, and G. Roumeliotis, "An optimization approach to reconstructing force-free field", *Astrophys.J.* 540 (2000) 1150-1155
- [6] [بازسازی میدان مغناطیسی تاج خورشید به «؛ یوسف زاده، مرجان؛ نصیری، سعداله؛ صفری، حسین، هشتمین همایش ملی نجوم و اخترفیزیک ایران، دانشگاه امیرکبیر، 1.3؛ «؛ روش غیرخطی
- [7] <http://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-classification-of-solar-flares>
- [8] www.Lmsal.com
- [9] M. J. Aschwanden, "Image Processing Techniques and Feature Recognition in Solar Physics", *Solar Phys.* 262, 399, 2010.
- [10] T. Wiegmann, "LINFF: An IDL-Widget program for force-free coronal magnetic fields", Max-Planck-Institute, December 20, 2011.
- [11] T. Wiegmann, "Optimization code with weighting function for the reconstruction of coronal magnetic fields", *Sol. Phys.* 219 (2004) 87-108
- [12] B. C. Low and Y. Q. Lou, "Modeling solar force-free magnetic field", *Astrophys.J.* 352 (1999) 343-352
- [13] [بازسازی میدان مغناطیسی تاج خورشید به «؛ یوسف زاده، مرجان؛ نصیری، سعداله؛ صفری، حسین، هفتمین همایش ملی نجوم و اخترفیزیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، 1.30؛ «؛ روش بهینه سازی.