

وابستگی میدان مغناطیسی سایه یک لکه خورشیدی به شدت روشنایی و دما

هاشم حامدی وفا

ایران، قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کدپستی ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸؛
vafa@sci.ikiu.ac.ir: ایمیل

چکیده. ممانعت جزئی میدان مغناطیسی از فرایند همرفت انرژی در لکه‌های خورشیدی، با کاهش دمای پلاسما مغناطیده لکه، سبب برقراری تعادل مگنتوهیدروستاتیکی آن می‌شود. لذا انتظار داریم که دما یا شدت روشنایی یک لکه خورشیدی به اندازه میدان مغناطیسی آن ارتباط تنگاتنگی داشته باشد. در این مقاله این ارتباط برای سایه لکه خورشیدی NOAA 10930 با استفاده از داده‌های طیف‌قطبش‌سنجی ثبت شده به وسیله تلسکوپ خورشیدی ماهواره هینوده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اندازه میدان مغناطیسی در سایه این لکه خورشیدی به دو روش، یکی با استفاده از نمایه استوکس V خط طیفی آهن خنثی در طول موج $6300/25$ نانومتر و دیگری با بهره‌گیری از کد وارونی SIR که حل معکوس معادله انتقال تابش را برای نمایه‌های کامل استوکس دو خط طیفی آهن خنثی در طول موج‌های $6300/15$ و $6300/25$ نانومتر انجام می‌دهد بدست می‌آوریم. رفتار کلی، کاهش میدان مغناطیسی با افزایش شدت/دما است. برای شدت‌های کمتر از حدود 0.2 (یکه شده به میانگین شدت شیدسپهر اطراف لکه، معادل دمای روشنایی 4280 کلونین)، کاهش میدان با افزایش شدت، شیب تندتری دارد و یک تابع توانی رفتار غیر خطی تغییر اندازه میدان با شدت/دما را به خوبی بیان می‌کند. برای شدت‌های بزرگ‌تر از 0.2 ، برای هر شدت مفروض پراکندگی اندازه میدان مغناطیسی، بزرگ و در حدود 0.5 کیلوگاوس است. با مکان‌یابی این نقاط در سطح سایه، مشخص شد که این نقاط بخش نیم‌سایه داخلی لکه خورشیدی را شکل می‌دهند که رشته‌های نیم‌سایه‌ای در دو گوشه ناحیه مورد مطالعه به زمینه تاریک سایه نفوذ کرده‌اند به طوری که این دو منطقه میدان مغناطیسی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت در مرحله تحولی متفاوت رشته‌های نیم‌سایه‌ای در هنگام رصد باشد. برای شدت‌های کمتر از 0.2 نیز بخشی از پراکندگی نقاط در اطراف رفتار توانی به سبب وجود خال‌های سایه‌ای است. به دلیل روشن‌تر/داغ‌تر بودن خال‌های سایه‌ای نسبت به سایه و نیز جابجایی لایه‌های با عمق اپتیکی ثابت به ارتفاع‌های بالاتر، ممکن است میدان مغناطیسی کوچکتری را اندازه بگیریم و این سبب جابجایی نقاط به سمت شدت‌های بزرگ‌تر و میدان‌های کوچکتر در نمودار پراکندگی می‌شود. از آنجایی که افزایش روشنایی و کاهش اندازه میدان مغناطیسی در سطح خال‌های سایه‌ای مختلف، متفاوت است به این ترتیب، پراکندگی این نقاط اطراف منحنی (رفتار) توانی توضیح داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خورشید؛ لکه‌های خورشیدی، میدان مغناطیسی

The dependence of the magnetic field strength of a sunspot umbra on its intensity and brightness temperature

Hashem Hamedivafa

Physics Department, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Islamic Rep. of Iran, Postal Code: 34149-16818;
email: vafa@sci.ikiu.ac.ir

Abstract. A partial decrease of the convective energy by the magnetic field of a sunspot causes the temperature of the magnetized plasma to decrease and this leads to a magneto-hydrostatic equilibrium. Thus, we expect a strong relation between magnetic field strength of a sunspot and

its temperature/brightness. Here, we investigate this relation in the umbra of the large sunspot in NOAA10930 using spectro-polarimetric data recorded by Solar Optical Telescope on board Hinode. The magnetic field strength is measured by two methods: 1) using the Stokes V profile of the neutral iron 630.25 nm line, and 2) running SIR inversion code on the full Stokes profiles of the two neutral iron 630.15 and 630.25 nm lines. The general behavior is the decreasing of magnetic field strength with temperature/intensity. For intensities less than about $0.2I_{ph}$ (brightness temperature 4280 K; I_{ph} is the mean photospheric intensity around the sunspot), decreasing magnetic field strength with increasing intensity has a steeper gradient, a power law function clearly explains the non-linear variations of magnetic field strength versus temperature/intensity. For intensities larger than $0.2I_{ph}$, at a given intensity, the range of the deviation of magnetic field strength is as large as 0.5 kG. By looking for the location of these points on the studied umbral region, we find that these points are belong to the inner penumbra where penumbral filaments intrude into the dark umbra at two corners of the studied umbral region which shows different magnetic field strengths. This difference can be due to the difference between the evolutionary stages of the penumbral filaments at the two corners during the observation period. For intensities less than $0.2I_{ph}$, the observed deviation around the power law behavior is partially due to the presence of umbral dots. Since umbral dots are brighter than the umbra, and the layers of optical depth unity are moved to higher heights, a smaller magnetic field strength may be measured in umbral dots. This causes the data points shift to larger intensities and smaller magnetic field strengths on the corresponding scatter plot. Since the increase in intensity and the decrease in magnetic field strength on different umbral dots are different, the scattering around the power law is explained.

Keywords: The sun: sunspots, magnetic field

۱ مقدمه

لکه‌های خورشیدی ساختارهای مغناطیسی تیره‌اند که دربردارنده پلاسمایی سردتر - نسبت به شیدسپهر اطراف خود - هستند. هر لکه خورشیدی از یک بخش مرکزی تاریک به نام سایه^۱ و یک نوار حلقه‌ای روشن‌تر - اما تیره‌تر از شیدسپهر اطراف - با ساختاری رشته‌ای به نام نیم‌سایه^۲ تشکیل یافته است. در صورت وجود یا عدم وجود نیم‌سایه دو نوع لکه را می‌توان نام‌گذاری کرد: وجود نیم‌سایه "لکه‌های خورشیدی^۳" را از "لکه‌های^۴" کوچک‌تر که نیم‌سایه ندارند متمایز می‌کند. یکی از فرض‌های مهم که مبنای مدل‌سازی‌های ساختار مغناطیسی کلی لکه‌های خورشیدی است، این فرض است که میدان مغناطیسی لکه‌های خورشیدی در زیر سطح قابل رؤیت، یک "لوله شار یکپارچه" را شکل می‌دهد [۳۳]. با این حال، پارکر [۳۱] نشان داده است که میدان مغناطیسی لکه‌های خورشیدی در زیر سطح می‌تواند به تعداد زیادی لوله شار کوچک‌تر تقسیم شود.

یکی از مهمترین توضیحاتی که برای سردی لکه‌های خورشیدی ارائه شده است ممانعت جزئی میدان مغناطیسی از انتقال انرژی به روش همرفت است [۶، ۸، ۵۶]. البته پلاسمای مغناطیده یک لکه خورشیدی می‌بایست در هر عمقی در تعادل فشاری با پلاسمای غیر مغناطیسی داغ اطراف خود باشد [۵]. از آنجایی که فشار میدان مغناطیسی به علاوه‌ی فشار پلاسمای (گاز) درون لکه باید با فشار پلاسمای غیر مغناطیسی بیرون از لوله شار مغناطیسی لکه در هر عمقی برابری کند، فشار گاز درون لکه از فشار گاز بیرون کوچک‌تر است و این منجر به کاهش چگالی و/یا دمای گاز لکه خواهد شد. لذا این ممانعت جزئی میدان مغناطیسی از فرایند همرفت انرژی، با کاهش دمای پلاسمای در لوله شار مغناطیسی لکه، سبب برقراری تعادل مگنتوهیدروستاتیکی آن می‌شود. لذا انتظار داریم که دما یا شدت روشنایی یک لکه خورشیدی به اندازه میدان مغناطیسی آن ارتباطی قوی داشته باشد.

سازوکار دیگری که می‌تواند سبب کاهش دمای لکه‌های خورشیدی نسبت به شیدسپهر اطرافشان شود تبدیل انرژی گرمایی به انرژی مکانیکی به صورت امواج مغناطیسی و امواج آلفین است که سبب خروج انرژی از لایه‌های شیدسپهری و عمیق‌تر به لایه‌های بالاتر می‌شود [۶، ۳۰].

Umbra^۱
Penumbra^۲
Sunspots^۳
Pores^۴

با توجه به سردی لکه‌ها نسبت به شیدسپهر اطرافشان، ارتباط دمای یک لکه خورشیدی به اندازه میدان مغناطیسی آن را در معادله تعادل مگنتوهیدروستاتیک می‌توان دید. برای یک لکه خورشیدی با تقارن استوانه‌ای، حالت تعادل مگنتوهیدروستاتیک در هر نقطه از لوله شیار مغناطیسی لکه در مکان شعاعی r و در ارتفاع z در جو مغناطیده آن به صورت معادله (۱)، در دستگاه یکاهای cgs، داده می‌شود [۲۳]:

$$P_{qs}(z) = P_g(r, z) + \frac{B_z^2(r, z)}{8\pi} + \frac{F_c(r, z)}{8\pi} \quad (1)$$

که در آن P_{qs} فشار گاز (پلاسما) در خورشید آرام اطراف لکه و P_g فشار گاز درون لکه است. مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی (B_z) به صورت فشار مغناطیسی و نیز جمله فشار مربوط به انحنای مغناطیسی (F_c) که با معادله (۲) داده می‌شود [۲۱]، در تعادل نیروهای افقی نقش دارد.

$$F_c(r, z) = 2 \int_r^a B_z(r', z) \frac{\partial B_r(r', z)}{\partial z} dr' \quad (2)$$

که در آن، a شعاع لکه در ارتفاع z و B_r مؤلفه شعاعی میدان مغناطیسی لکه است. همان‌طور که در معادله (۲) دیده می‌شود فشار انحنای مغناطیسی به شیب مؤلفه شعاعی میدان نیز بستگی دارد.

در معادله (۱) می‌توان فشار گاز را با استفاده از معادله حالت گاز کامل بر حسب دما جایگزین کرد تا رابطه‌ای بین دما و اندازه میدان مغناطیسی درون لکه بدست آورد [۲۳، ۲۴]، البته باید ساختار و پیکربندی مغناطیسی لکه تعریف شده باشد [۹، ۲۱، ۲۶]. در این پژوهش به مطالعه رابطه اندازه میدان مغناطیسی و دما یا شدت روشنایی در سایه یک لکه خورشیدی می‌پردازیم.

در بعضی از مطالعات، اندازه میدان مغناطیسی با اندازه‌گیری‌های مستقیم از نمایه‌های استوکس I و V [۲۰، ۳۲، ۳۶، ۴۸] یا با استفاده از گداهای وارونی‌مگ حل معکوس معادله انتقال تابش را انجام می‌دهند [۱۴، ۲۴، ۵۰] بدست آمده است. در این مراجع ذکر شده از خط طیفی فروسرخ آهن خنثی در طول موج $1564/85$ نانومتر بهره گرفته شده است. محققان دیگری [۱، ۱۸، ۵۱] نیز خطوط طیفی در ناحیه مرئی طیف را مورد استفاده و مطالعه قرار داده‌اند. بعضی از اندازه‌گیری‌های رصدی یک رابطه خطی بین مربع اندازه میدان مغناطیسی و دما در سایه را نشان می‌دهند [۵۰]. اما به طور کلی نمودار پراکنندگی اندازه میدان مغناطیسی بر حسب دما، یا شدت روشنایی در پیوستار خطوط طیفی مورد مطالعه، یک رابطه غیرخطی را نشان می‌دهند [۱، ۱۶، ۲۴، ۴۸، ۵۱]: در سایه لکه‌های خورشیدی، اندازه میدان مغناطیسی در نواحی‌ای با دمای پایین در یک بازه دمایی کوچک، با کاهش دما افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. در ناحیه گذار از سایه به نیم‌سایه اندازه میدان در یک بازه بزرگی از تغییرات دمایی (شدت)، نسبتاً کم و آرام تغییر می‌کند. در نیم‌سایه اندازه میدان مغناطیسی - نسبت به سایه - به شدت کاهش می‌یابد و به دلیل ساختار رشته‌ای آن، اندازه میدان با دما رفتاری پیچیده [۴۸] را نشان می‌دهد.

در پژوهشی [۱۴] که با مطالعه تعداد قابل توجهی لک و لکه خورشیدی انجام شده است نشان داده شد که تغییر میدان بر حسب دما در لکه‌های خورشیدی بزرگ غیرخطی است اما لکه‌های کوچکتر رفتاری خطی نشان می‌دهند. این محققان نشان دادند که شکل‌گیری مولکول هیدروژن در سایه لکه‌های بزرگ که سردتر هستند محتمل‌تر بوده و این رخداد بر مشخصه‌های ترمودینامیکی جو لکه‌ها و نیز تحول آنها اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. ایشان رابطه غیرخطی میدان و دما را به شکل‌گیری مولکول هیدروژن مرتبط می‌دانند که منجر به کاهش چگالی و فشار گاز و لذا افزایش اندازه میدان مغناطیسی برای برقراری تعادل مگنتوهیدروستاتیک، مطابق با معادله (۱)، در بخش سردتر سایه لکه‌های خورشیدی می‌شود. در پژوهشی جدید [۴۸] رابطه اندازه میدان مغناطیسی و دما به طور جداگانه در سایه، پل نوری^۶، و نیم‌سایه یک لکه خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است که رفتار غیرخطی در این مطالعه از نتایج بارز آن است. در این پژوهش مقایسه‌ای نیز با نتایج حاصل از مطالعه یک لکه خورشیدی شبیه‌سازی شده [۳۴] انجام شده است و به طور کلی شبیه‌سازی، میدان بزرگتر و دمای کوچکتری را برای لکه می‌دهد.

در پژوهش حاضر اندازه میدان مغناطیسی در سایه یک لکه خورشیدی بزرگ با استفاده از الف) نمایه استوکس V خط طیفی آهن خنثی در طول موج $630/25$ نانومتر و نیز ب) با بهره‌گیری از یک کد وارونی که حل معکوس معادله انتقال تابش

را برای نمایه‌های کامل استوکس دو خط طیفی آهن خنثی در طول‌موج‌های ۶۳۰/۱۵ و ۶۳۰/۲۵ نانومتر انجام می‌دهد بدست آورده رابطه اندازه میدان مغناطیسی با شدت پیوستار و دما را مطالعه می‌کنیم.

۲ مجموعه داده‌های رصدی

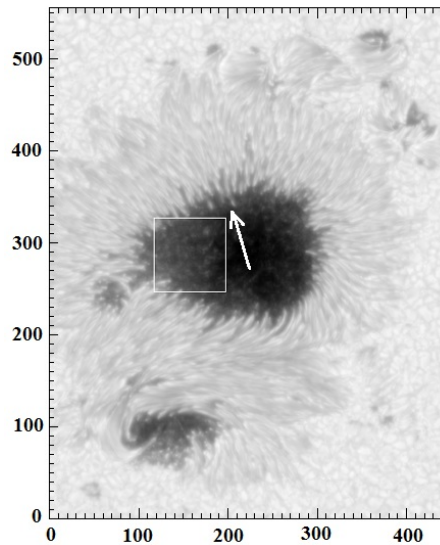
داده‌های رصدی مورد مطالعه در این پژوهش به وسیله طیف‌قطبش‌سنج^۷ تلسکوپ اپتیکی خورشیدی نصب شده بر ماهواره هینوده^۸ [۵۴، ۵۲] ثبت شده‌اند. این طیف‌قطبش‌سنج [۱۹]، چهار نمایه استوکس I, Q, U و V دو خط طیفی آهن خنثی در دو طول‌موج (مرکز خط) ۶۳۰/۱۵ و ۶۳۰/۲۵ نانومتر با ضریب لانده مؤثر (g_{eff}) ، به ترتیب، $1/67$ و $2/5$ را از هر ناحیه‌ی برنامه‌ریزی شده از سطح آرام و فعال شیدسپهر خورشید، با توان تفکیک طیفی بالایی ($2/5$ پیکومتر) ثبت می‌کند. این دو خط طیفی در لایه شیدسپهری بین $log(\tau) = 0$ تا $log(\tau) = -3$ شکل می‌گیرند که در آن عمق اپتیکی در طول‌موج ۵۰۰ نانومتر است.

این ابزار می‌تواند یک ناحیه انتخابی از سطح خورشید را با حرکت شکاف^۹ عمودی طیف‌قطبش‌سنج در راستای افق (شرق به غرب) در صفحه قرص خورشید پوشش دهد. هر شکاف شامل 1024 خانه^{۱۰} است که معادل 164 ثانیه قوس (هر ثانیه قوس معادل 730 کیلومتر) روی سطح خورشید است. عرض و طول معادل هر خانه در شکاف، $0/158$ ثانیه قوس و گام‌های پیمایش شکاف^{۱۱} $0/148$ ثانیه قوس در مد نرمال است. توان تفکیک تلسکوپ برای ثبت داده‌های طیف‌قطبش‌سنج، $0/32$ ثانیه قوس در طول‌موج ۶۳۰ نانومتر است. زمان کل ثبت داده‌ها در هر موقعیت شکاف در مد نرمال $4/8$ ثانیه و فاصله زمانی ثبت داده‌های هر شکاف تا شکاف دیگر $5/1$ ثانیه است. رصدها یک گستره طیفی از $630/089$ تا $630/326$ نانومتر، شامل دو خط طیفی مذکور در همسایگی $630/2$ نانومتر را با نمونه‌گیری طیفی^{۱۲} $2/14$ پیکومتر دربرمی‌گیرند [۱۳]. محصول این طیف‌قطبش‌سنج، نمایه‌های کامل استوکس I, Q, U و V در گستره طیفی مذکور است.

داده‌های طیف‌قطبش‌سنجی مورد مطالعه در این پژوهش از سایه یک لکه خورشیدی در ناحیه فعال NOAA10930 در تاریخ ۱۱ دسامبر ۲۰۰۶ در بازه زمانی $13:10$ تا $16:05$ زمان نجومی، هنگامی که لکه بسیار نزدیک به مرکز قرص خورشید بود (زاویه خورشیدمرکزی حدود 5 درجه، $\mu = \cos(\theta) = 0/99$) در مد نرمال ثبت شده‌اند. نمایه‌های کامل استوکس 448 شکاف (از $14:17$ تا $14:55$ زمان نجومی) از کل^{۱۳} 2045 شکاف ثبت شده انتخاب شد. تصویر شدت، تهیه شده از پیوستار نمایه استوکس I از این لکه (شامل 448 شکاف) در شکل (۱) نشان داده شده است. منطقه خاص مورد مطالعه در این پژوهش ناحیه‌ای مربعی به ابعاد 13×13 ثانیه قوس مربع (81×81 خانه) از سایه است که در شکل (۱) با مربع سفید مشخص شده است. طبق تصاویر مغناطیس‌نگار، بردار میدان مغناطیسی در سایه این لکه درون سو است. تصحیحات لازم با استفاده از بسته نرم‌افزاری sp-prep.pro انجام شده است. این بسته نرم‌افزاری در محیط نرم‌افزار خورشیدی^{۱۳} در سامانه تحلیل داده‌های خورشیدی^{۱۴} نصب شده بر رایانه‌های مرکز داده‌های نجومی^{۱۵} وابسته به رصدخانه ملی ژاپن^{۱۶} اجرا شده است.

به منظور آماده‌سازی داده‌ها، طول‌موج‌ها در بازه طیفی رصدی باید با تعیین یک طول‌موج مرجع در این بازه درجه‌بندی شوند. از این رو، مکان طول موجی (مرکزخط) میانگین خط طیفی آهن در طول‌موج ۶۳۰/۱۵ نانومتر (به خاطر ضریب لانده کوچکتر آن) در طیف رصدی را با میانگین‌گیری از مکان کمینه‌های نمایه‌های رصدی استوکس I آن خط، در ناحیه‌ای نزدیک مرکز قرص خورشید و دور از لکه (به جهت دور بودن از تأثیر میدان مغناطیسی لکه و نیز حرکت افقی پلاسمای همسایگی لکه) پیدا می‌کنیم. سپس با در نظر گرفتن انتقال به آبی همرفتی رصدی لایه شکل‌گیری خط $630/15012$ نانومتر در خورشید آرام (215 متربرثانیه، [۱۳] را ببینید) و با توجه به اینکه یک اختلاف دقیق (آزمایشگاهی) $912/4$ میلی‌انگستروم بین مراکز دو خط آهن مورد بحث وجود دارد [۲۷]، محور طول‌موجی نمایه‌های استوکس را مدرج می‌کنیم.

Spectro-Polarimeter (SP)^۷
Hinode Solar Optical Telescope (Hinode/SOT)^۸
Slit^۹
Pixel^{۱۰}
Slit-scan sampling^{۱۱}
Spectral sampling^{۱۲}
Solar SoftWare (SSW)^{۱۳}
Solar Data Analysis System (SDAS)^{۱۴}
Astronomy Data Center (ADC)^{۱۵}
National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ)^{۱۶}



شکل ۱: تصویر پیوستار نمایه استوکس I لکه NOAA ۱۰۹۳۰ (شامل ۴۴۸ شکاف) در مقیاس لگاریتمی برای تباین بهتر در نمایش ساختار ریز سایه. منطقه مورد مطالعه، ناحیه‌ای مربعی به ابعاد ۱۳×۱۳ ثانیه‌قوس مربع (۸۱×۸۱ خانه) از سایه است که با مربع سفید مشخص شده است. پیکان سفید، سمت مرکز قرص خورشید را نشان می‌دهد. محورهای افقی و عمودی بر حسب شماره خانه مدرج شده‌اند. هر خانه معادل $۰/۱۶$ ثانیه‌قوس (۱۱۵ کیلومتر) است.

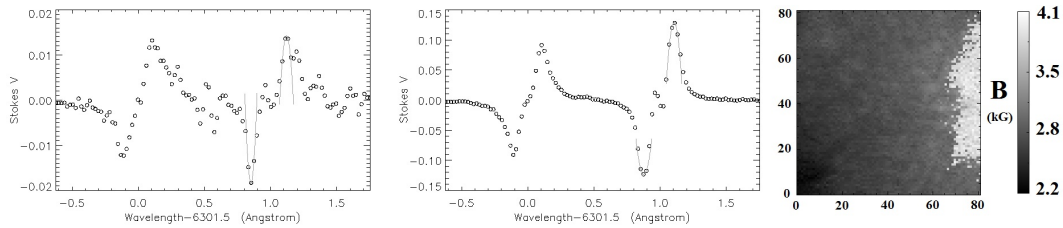
دقت این درجه‌بندی حدود ۱۵۰ متربرثانیه است [۱۲، ۱۰]. همچنین نمایه‌های کامل استوکس رصدی به میانگین شدت پیوستار نمایه‌های استوکس I ناحیه‌ای در مرکز قرص خورشید - که در میدان دید رصد بوده است - یکه شدند. یادآوری می‌کنیم که شدت هر خانه از ناحیه همان شدت پیوستار استوکس I رصدی آن خانه است که به متوسط شدت پیوستار در مرکز قرص خورشید یکه شده است.

۳ اندازه‌گیری میدان مغناطیسی با استفاده از نمایه‌های استوکس V

از آنجایی که خط طیفی آهن خنثی در طول موج $۶۳۰/۲۵$ نانومتر، سه‌تایه‌ی زیمن است، برای اندازه‌گیری و محاسبه اندازه میدان مغناطیسی از نمایه‌های استوکس V این خط استفاده می‌کنیم. شکل (۲) نمایه استوکس V دو خط طیفی را برای دو خانه از ناحیه مورد مطالعه، یکی از نقاط مرکزی و دیگری از نقاط نزدیک به نیم‌سایه با شدت بزرگتر، نشان می‌دهد. فاصله طول موجی بیشینه و کمینه نمایه استوکس V دو برابر شکافتگی زیمن خط طیفی است که مطابق با معادله (۳) با اندازه میدان مغناطیسی متناسب است [۱۷]. لذا می‌توان با اندازه‌گیری این فاصله طول موجی، میانگین اندازه میدان مغناطیسی در لایه شکل‌گیری خط، مربوط به آن نقطه از سطح لکه را بدست آورد.

$$\lambda - \lambda_o = \frac{\lambda_o^2 e B}{4 \pi m_e c^2} g_{eff} (M_l - M_u) \quad (3)$$

معادله (۳) در دستگاه یکاهای cgs نوشته شده است و در آن λ و λ_o ، به ترتیب، طول موج مرکز خط و طول موج خط جابجا شده (شکافت) است. B اندازه میدان مغناطیسی و g_{eff} ضریب مؤثر لانه است. M_l و M_u ، به ترتیب، اعداد کوانتومی مغناطیسی زیرتراز بالا و پایین هستند. e ، c ، m_e نیز به ترتیب، سرعت نور، بار و جرم الکترون است. با محاسبه ضرایب عددی، معادله (۳) به معادله (۴) جهت محاسبه اندازه میدان مغناطیسی، ساده می‌شود که در آن $\Delta\lambda = 2(\lambda - \lambda_o)$ فاصله طول موجی بیشینه و کمینه نمایه استوکس V است.



شکل ۲: نمایه استوکس V دو خط طیفی آهن خنثی برای دو نقطه (خانه) از ناحیه مورد مطالعه، یکی از نقاط مرکزی (قاب چپ) به مختصات $(0, 75)$ و دیگری از نقاط نزدیک به نیم سایه با شدت بزرگتر (قاب وسط) به مختصات $(0, 12)$. سهمی‌های برازش یافته بر بیشینه و کمینه نمایه‌های خط طیفی $6301.5/25$ نانومتر نیز نشان داده شده‌اند. قاب راست: اندازه میدان مغناطیسی بدست آمده با استفاده از نمایه استوکس V (میدان مغناطیسی رصدی). درجه بندی محور افقی و عمودی بر حسب شماره خانه (معادل 0.16 ثانیه قوس) است. بازه میدان بر حسب کیلوگوس، در میله رنگ کنار نقشه داده شده است.

$$B = 1.07 \times 10^{12} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2 g_{eff}} \quad (4)$$

$\Delta\lambda$ و λ_0 بر حسب آنگستروم و B بر حسب گوس است.

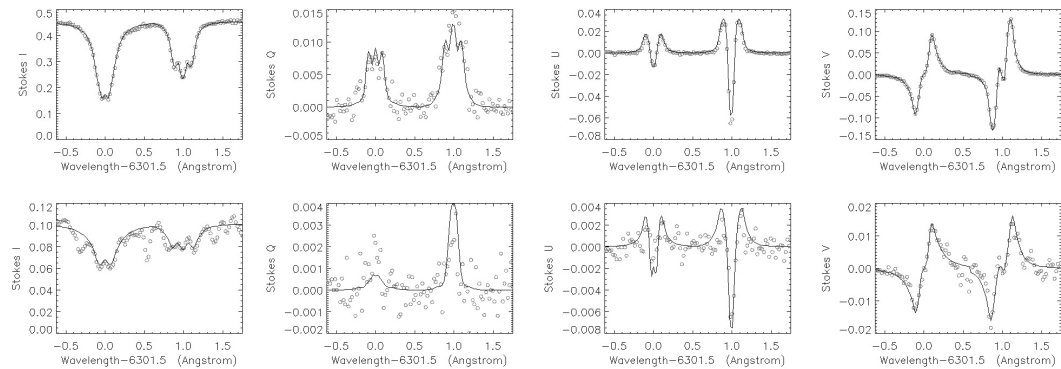
برای اندازه‌گیری فاصله طول موجی بیشینه و کمینه نمایه استوکس V ، با استفاده از سه نقطه اطراف هر بیشینه و کمینه، دو سهمی بر بیشینه و کمینه برازش می‌دهیم. فاصله بیشینه و کمینه این دو سهمی مقدار مناسبی برای $\Delta\lambda$ بدست می‌دهد. شکل (۲) سهمی‌های برازش یافته بر بیشینه و کمینه نمایه استوکس V را برای دو خانه انتخابی نیز نشان می‌دهد. به این ترتیب اندازه میدان مغناطیسی برای تمام نقاط ناحیه مورد مطالعه بدست خواهد آمد. میدان مغناطیسی بدست آمده به این روش (استفاده از نمایه استوکس V) را میدان مغناطیسی رصدی می‌نامیم. نقشه توزیع اندازه میدان مغناطیسی رصدی برای ناحیه مورد مطالعه در شکل (۲)، قاب راست نشان داده شده است.

در بخش تاریک‌تر سایه یک لکه خورشیدی شکل‌گیری مولکولها محتمل‌تر است. لذا خطوط طیفی مولکولی مزاحم بسیاری در بازه‌های طیفی مختلف از مرئی تا فروسرخ حتی در نزدیکی خطوط طیفی مهم و شناخته شده که برای مطالعه ساختار حرارتی و مغناطیسی لکه‌ها مورد توجه هستند شکل می‌گیرند [۳، ۴]. متأسفانه خطوط طیفی مورد مطالعه در این پژوهش، هم در استوکس I و هم در استوکس‌های قطبشی، توسط تعدادی خطوط طیفی ناشناخته مختل شده‌اند. اگر برای برازش سهمی به جای سه نقطه، پنج نقطه یا بیشتر اطراف هر بیشینه و کمینه نمایه استوکس V انتخاب می‌کردیم در خانه‌هایی که شدت و نیز اندازه استوکس V تضعیف است تأثیر خطوط طیفی ناشناخته نزدیک قطاع قرمز استوکس V خط طیفی آهن مورد مطالعه (شکل (۲)، قاب چپ)، قله سهمی را به سمت طول موج‌های بلندتر سوق می‌داد. از طرف دیگر، حتی برای خانه‌هایی با شدت بزرگتر که خطوط طیفی ناشناخته مشهود نیست به دلیل عدم تقارن هر قطاع در اطراف بیشینه/کمینه خود (وجود دنباله مجانبی)، سهمی کردن نقاط بیشتر در برازش یک تابع متقارن مانند سهمی سبب می‌شود تا بیشینه/کمینه سهمی در قطاع قرمز و آبی استوکس V ، به ترتیب، به سمت طول موج‌های بلندتر و کوتاه‌تر جابجا شود. به این ترتیب $\Delta\lambda$ به طور کاذب بزرگتر محاسبه خواهد شد که مطلوب نیست. میدان مغناطیسی در سایه لکه خورشیدی در مرجع [۵۹] به روش برازش سهمی بر بیشینه و کمینه استوکس V با انتخاب سه و پنج نقطه، اندازه‌گیری و مورد مقایسه و مطالعه قرار گرفته است.

۴ مدل شیدسپهری

در ادامه، اندازه میدان مغناطیسی را با استفاده از کد وارونی SIR^v [۴۲] که حل معکوس معادله انتقال تابش را انجام می‌دهد بدست می‌آوریم. این میدان مغناطیسی حاصل از کد وارونی را میدان مغناطیسی مدل می‌نامیم. این کد با فرض

Stokes Inversion based on Response functions (SIR)^v



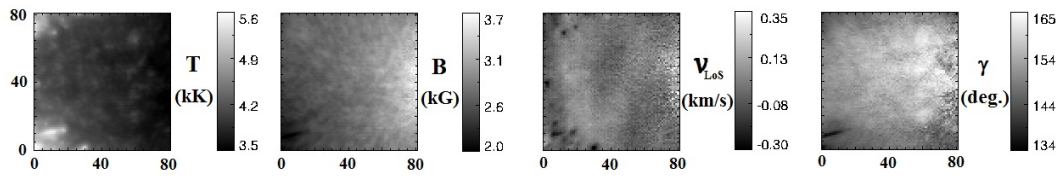
شکل ۳: برازش نمایه‌های کامل استوکس سنتزی بر نمایه‌های استوکس رصدی دو خانه انتخابی از لکه که نمایه استوکس V آنها در شکل (۲) آمده است.

تعادل ترمودینامیکی و هیدروستاتیکی کار می‌کند. پس از گرفتن یک مدل شیدسپهری اولیه و نمایه‌های کامل استوکس رصدی به عنوان ورودی، نمایه‌های استوکس مشابهی را در چند چرخه می‌سازد. در هر چرخه بهترین پارامترهای مدل شیدسپهری، محاسبه و مدل اولیه‌ی ورودی تصحیح می‌شود به طوری که تفاوت بین نمایه‌های استوکس رصدی و محاسبه شده از مدل، با استفاده از روش برازش کمترین-مربعات، کمینه شود [۴۲]. نمایه‌های استوکسی را که کد SIR به عنوان بهترین برازش می‌دهد، نمایه‌های استوکس سنتزی می‌نامیم. نمونه‌ای از برازش نمایه‌های کامل استوکس سنتزی بر نمایه‌های استوکس رصدی دو خانه انتخابی از لکه که نمایه استوکس V آنها در شکل (۲) آمده است، در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که در مرجع [۳۸] نشان داده شده است (مرجع [۴۷] را نیز ببینید) نور پراکنده ابزاری در داده‌های رصدی طیف-قطبش‌سنجی هیئوده ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است. لذا نیازی به تصحیح نور پراکنده نیست. با این حال و ن‌نورت [۵۵] روش‌های مختلفی را برای تصحیح نور پراکنده در داده‌های هیئوده مورد بحث قرار داده است.

مدل شیدسپهری خروجی SIR، شامل تمام مشخصه‌های یک مدل شیدسپهری است. از مهمترین این مشخصه‌ها، لایه‌بندی دما (T)، اندازه میدان مغناطیسی (B)، سرعت پلازما در راستای خط‌دید (v_{LoS})، زاویه انحراف میدان از راستای خط‌دید (γ) و زاویه سمتی میدان (ϕ) بر حسب عمق اپتیکی است. مدل اولیه شیدسپهری و ورودی‌های دیگر کد طوری انتخاب شدند که در مدل خروجی، مشخصه‌های میدان مغناطیسی (B)، γ و ϕ و سرعت (v_{LoS}) به عمق بستگی نداشته باشند که در این صورت متوسط بردار میدان مغناطیسی و سرعت پلازما در لایه شکل‌گیری دو خط طیفی توسط کد محاسبه می‌شود. اما دما با انتخاب پنج درجه آزادی به صورت یک چند جمله‌ای درجه چهار با عمق اپتیکی تغییر می‌کند. برای انتخاب مدل اولیه شیدسپهری ابتدا لایه‌بندی دما را مطابق با مدل سایه داغ معرفی شده در مرجع [۷]، بردار میدان مغناطیسی را ثابت و سرعت در راستای خط‌دید را صفر در نظر گرفتیم. با این مدل اولیه، مدل بهینه خروجی اجرای کد SIR برای تاریکترین خانه در ناحیه مورد مطالعه را بدست آوردیم. این مدل اصلاح شده خروجی کد که شیدسپهری در تعادل هیدروستاتیکی را نشان می‌دهد به عنوان مدل اولیه برای یافتن مدل شیدسپهری برای تمام خانه‌های ناحیه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

نقشه دو بُعدی چهار مشخصه مدل (خروجی کد) یعنی γ ، B ، T و v_{LoS} برای ناحیه مورد مطالعه، در شکل (۴) آمده است. چون دما تابعی از عمق است لذا فقط دما در لایه‌ای به عمق اپتیکی $0.7 \log(\tau) = -0.15$ تصویر شده است. البته توجه داریم که با توجه به اینکه لکه انتخاب شده بسیار نزدیک به مرکز قرص خورشید است، راستای خط‌دید همان راستای عمود بر سطح لکه است و از آنجایی که میدان مغناطیسی در سطح لکه درون سو است لذا زاویه انحراف بردار میدان مغناطیسی نسبت به خط عمود بزرگ‌تر از 90° درجه بدست آمده است. همان‌طور که پیشتر گفتیم میدان مغناطیسی بدست آمده از کد را میدان مغناطیسی مدل می‌نامیم.

همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است در دو گوشه چپ ناحیه انتخابی رشته‌های روشن نیم‌سایه‌ای به درون سایه نفوذ کرده‌اند. این رشته‌ها در تصویر دمایی مدل (شکل (۴))، قاب چپ) با دمایی بیشتر نسبت به سایه زمینه اطراف خود دیده می‌شوند. رشته‌های نیم‌سایه‌ای^{۱۸} میدان‌های مغناطیسی ضعیف‌تر و افقی‌تر نسبت به سایه زمینه اطراف خود دارند که این دو نکته در تصویر اندازه میدان مغناطیسی (شکل (۴))، قاب دوم از چپ) و نیز در تصویر زاویه انحراف بردار میدان



شکل ۴: نقشه دو بُعدی چهار مشخصه مدل خروجی کد SIR برای ناحیه مورد مطالعه: دما (قاب چپ)، اندازه میدان مغناطیسی (قاب دوم از چپ)، سرعت پلاسما (قاب سوم از چپ) و زاویه انحراف بردار میدان مغناطیسی نسبت به خط عمود (قاب راست). بازه دما، اندازه میدان مغناطیسی، سرعت و زاویه انحراف، به ترتیب، بر حسب کیلوکلین، کیلوگوس، کیلومتر بر ثانیه و درجه در میله رنگ کنار هر نقشه داده شده است. دما در لایه‌ای به عمق اپتیکی ۰/۷ تصویر شده است. سرعت‌های منفی جریان پلاسمایی برون‌سو را نشان می‌دهند.

مغناطیسی نسبت به خط عمود (شکل (۴)، قاب راست) دیده می‌شود [۲]. تصویر سرعت پلاسمایی (شکل (۴)، قاب سوم از چپ) نشان می‌دهد که سر درخشان رشته‌های نیم‌سایه‌ای که به دانه‌های نیم‌سایه‌ای^{۱۹} معروف‌اند، دارای فوران‌های پلاسمایی (گاز) با سرعت‌های رو به بالای بزرگ حدود ۰/۳ کیلومتر بر ثانیه است که با نتایج گزارش شده توسط محققان دیگر [۵۷، ۴۷، ۱۰] سازگار است.

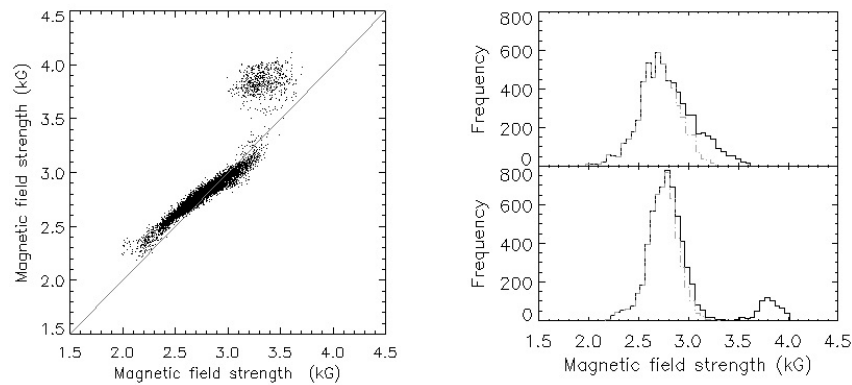
سمت راست ناحیه انتخابی به مرکز سایه لکه خورشیدی که تاریکترین بخش سایه با اندازه میدان مغناطیسی بزرگ نیز است، نزدیک است. لذا طیف استوکس این بخش ضعیف بوده و همان‌طور که در شکل (۳) ردیف پایین، به وضوح دیده می‌شود خطوط طیفی ناشناخته‌ای طیف خطوط آهن مورد مطالعه را خراب می‌کند [۱۲]. بنابراین، مشخصه‌های شیدسپهری حاصل از مطالعه طیف این نقاط قابل اعتماد نخواهند بود. البته یادآور می‌شویم که در طیف رصدی این نقاط، بخشهایی از طیف را که خطوط طیفی ناشناخته خودنمایی می‌کنند - تا حد امکان - حذف شده بعد به عنوان ورودی کد SIR معرفی کردیم تا کمترین خطا در بازیابی مشخصه‌های ترمودینامیکی شیدسپهری حاصل شود.

۵ مقایسه میدان مغناطیسی رصدی و مدل

شکل (۵)، قاب چپ، نمودار پراکندگی اندازه میدان مغناطیسی رصدی را بر حسب اندازه میدان مغناطیسی مدل نشان می‌دهد. در این شکل خط راست نیم‌ساز ناحیه اول مثلثاتی نیز جهت مقایسه بهتر رسم شده است. در شکل (۵)، قاب راست، نمودار توزیع فراوانی اندازه میدان مغناطیسی رصدی و مدل (خطوط ممتد سیاه) نیز به طور جداگانه نشان داده شده است.

میدان مغناطیسی مدل و رصدی یک تفاوت جزئی با هم دارند. میدان رصدی از نمایه استوکس V خط طیفی ۶۳۰/۲۵ نانومتر که سه‌تایه زمین است محاسبه شده است در حالی که میدان مدل با برازش‌های مناسب بر نمایه‌های کامل استوکس هر دو خط طیفی مورد مطالعه بدست آمده است: اگر چه لایه شکل‌گیری دو خط طیفی مورد مطالعه گسترده و پهن است اما در شیدسپهر عمق شکل‌گیری خط طیفی ۶۳۰/۲۵ نانومتر، به طور متوسط، پایین‌تر از عمق شکل‌گیری خط طیفی ۶۳۰/۱۵ نانومتر است [۱۱، ۱۵، ۲۲] و فاصله عمق متوسط شکل‌گیری این دو خط با افزایش اندازه میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد [۲۲]. از آنجایی که کد وارونی در برازش بهترین مدل، متوسط میدان را در لایه شکل‌گیری هر دو خط می‌یابد بدیهی است که میدان مدل با میدان رصدی برابر نباشد. از طرفی اختلاف جزئی میدان رصدی و مدل نشان‌دهنده شیب کم اندازه میدان مغناطیسی در سایه است. این استدلال می‌تواند تفاوت پهنای توزیع اندازه میدان مغناطیسی رصدی و مدل را در قاب سمت راست شکل (۵) نیز توضیح دهد.

در مقادیر اندازه میدان مغناطیسی رصدی نقاطی با اندازه میدان بزرگ‌تر از ۳/۵ کیلوگوس از بقیه نقاط جدا شده‌اند. این نقاط در شکل (۲)، قاب راست که تصویر دو بُعدی اندازه میدان مغناطیسی رصدی را نشان می‌دهد با رنگ بسیار روشن در سمت راست تصویر از بقیه نقاط جدا شده‌اند. همان‌طور که پیشتر گفته شده در نواحی‌ای با شدت کم، خطوط طیفی ناشناخته‌ای طیف خطوط آهن مورد مطالعه را دست‌خوش تغییر و انحراف می‌کنند و لذا مشخصه‌های شیدسپهری حاصل از مطالعه طیف این نقاط قابل اعتماد نخواهند بود. این خطوط طیفی ناشناخته، سهمی‌های برازش یافته بر بیشینه



شکل ۵: قاب چپ: نمودار پراکنندگی اندازه میدان مغناطیسی رصدی (محور عمودی) بر حسب اندازه میدان مغناطیسی مدل (محور افقی). خط راست خاکستری نیم‌ساز ناحیه اول مثلثاتی است که جهت مقایسه بهتر رسم شده است. قاب راست: توزیع فراوانی اندازه میدان مغناطیسی مدل (بالا) و اندازه میدان مغناطیسی رصدی (پایین) با خطوط ممتد سیاه نشان داده شده است. خطوط خط‌نقطه نیز در هر قاب توزیع فراوانی اندازه میدان مغناطیسی نقاطی با شدت بزرگ‌تر از ۰/۱ و اندازه میدان مغناطیسی کوچکتر از ۳/۳ کیلوگوس را برای هر دو نوع میدان رصدی و مدل نشان می‌دهند (به متن رجوع شود).

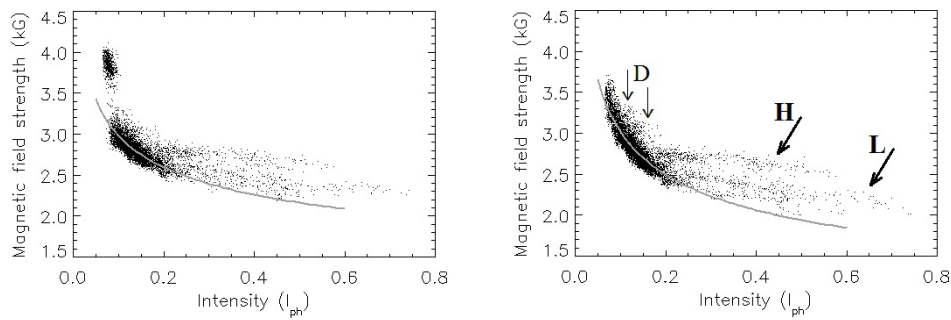
نمایه‌های استوکس خط طیفی ۶۳۰/۲۵ نانومتر مربوط به این نقاط از ناحیه را به طور محسوسی به سمت طول‌موج‌های بلندتر (شکل (۲)، قاب چپ، را ببینید) جابجا می‌کند و معادله (۴) میدان بزرگتری را بدست خواهد داد.

۶ توزیع اندازه میدان مغناطیسی در سطح سایه، وابستگی میدان به شدت

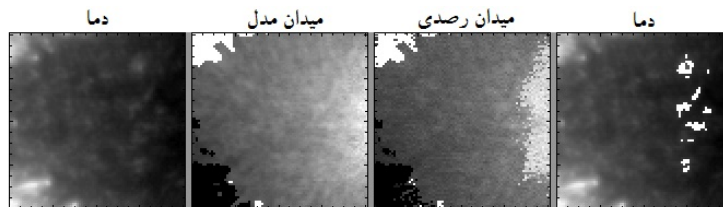
همان‌طور که پیشتر گفته شد، شدت هر خانه از ناحیه همان شدت پیوستار استوکس I رصدی آن خانه است که به متوسط شدت پیوستار در مرکز قرص خورشید یکه شده است. نمودار پراکنندگی اندازه میدان مغناطیسی رصدی و مدل بر حسب شدت برای تمام خانه‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. روند کلی در این نمودارها، کاهش اندازه میدان مغناطیسی با افزایش شدت است. نمودار قاب سمت چپ مربوط به پراکنندگی میدان رصدی بر حسب شدت است که یک توزیع دوجمعیتی را بر حسب اندازه میدان در مرز ۳/۵ کیلوگوس نشان می‌دهد (مرجع [۵۹] را ببینید). این دوجمعیتی بودن در شکل (۵) نیز دیده می‌شود که در مورد بزرگی کاذب میدان‌های مغناطیسی این جمعیت بحث شد. نمودار قاب سمت راست در شکل (۶) مربوط به پراکنندگی میدان مدل بر حسب شدت است که اگرچه مشابه با قاب سمت چپ توزیعی دوجمعیتی نشان نمی‌دهد اما همان‌طور که پیشتر بحث شد نقاطی از ناحیه انتخابی که دارای شدت‌های کم هستند برای اندازه‌گیری مشخصه‌های شیدسپهری قابل اعتماد نیستند. لذا در ادامه مطالعه خود، نقاطی از ناحیه انتخابی را که دارای شدتی کمتر از ۰/۱ و میدانی بزرگتر از ۳/۳ کیلوگوس هستند حذف می‌کنیم. نمودار توزیع فراوانی اندازه میدان مغناطیسی برای نقاط انتخابی با دو قید گفته شده، در دو قاب سمت راست در شکل (۵) با نمودار خط-نقطه نشان داده شده است.

نمودارهای شکل (۶) نشان می‌دهند که برای شدت‌های کمتر از حدود ۰/۲، کاهش میدان با افزایش شدت، شیب تندتری نسبت به نقاطی با شدت‌های بزرگتر از ۰/۲ دارد. در واقع، در نمودارها دو رفتار متفاوت دیده می‌شود. از طرف دیگر، برای شدت‌های بزرگتر از ۰/۲، برای هر شدت مفروض پراکنندگی اندازه میدان مغناطیسی، بزرگ و در حدود ۰/۵ کیلوگوس است. به نظر می‌رسد چگونگی تغییر اندازه میدان با شدت حداقل برای دو خوشه متفاوت است. این دو خوشه در شکل (۶) با پیکان‌های نشان‌دار H و L مشخص شده‌اند.

ابتدا بر نقاطی از نمودارهای شکل (۶) که دارای شدت‌های کمتر از ۰/۱۷ (به جای ۰/۲، برای دقت بهتر در برازش منحنی) هستند (و البته دارای شدتی بزرگتر از ۰/۱ و میدانی کوچکتر از ۳/۳ کیلوگوس) یک تابع توانی به صورت معادله (۵) - برای بیان تغییرات اندازه میدان، B ، بر حسب شدت، I - برازش می‌دهیم.



شکل ۶: نمودار پراکندگی اندازه میدان مغناطیسی رصدی (چپ) و مدل (راست) بر حسب شدت هر خانه. منحنی خاکستری برازش یک تابع توانی برای نقاطی با شدتی بین ۰/۱ تا ۰/۱۷ و میدانی کوچکتر از ۳/۳ کیلوگوس را در هر دو نمودار نشان می‌دهد. برای شدت‌های بزرگتر از ۰/۲، دو خوشه با پیکان‌های نشان‌دار H (میدان بزرگ) و L (میدان کوچک) مشخص شده‌اند. برای معرفی نقاط مشخص شده با حرف D به متن رجوع شود.



شکل ۷: نقشه دما (چپ و راست)، اندازه میدان مغناطیسی مدل (قاب دوم از چپ) و اندازه میدان مغناطیسی رصدی (قاب سوم از چپ). در دو نقشه میانی، نقاطی که با رنگ سفید و سیاه مشخص شده‌اند، به ترتیب، نقاط تفکیک شده با میدان بزرگتر و کوچکتر در دو خوشه‌ی H و L هستند. این دو خوشه در شکل (۶) مشخص شده‌اند. نقشه دما در قاب چپ و راست همان تصویر دما در شکل (۴) است. موقعیت مکانی نقاط تفکیک شده مربوط به خوشه‌های کوچک مشخص شده با حرف D در شکل (۶)، در قاب راست به رنگ سفید نشان داده شده است.

$$B(I) = B_c I^{-\beta} \quad (5)$$

برای میدان رصدی $B_c = 1/88 \text{ kG}$, $\beta = 0/200$ و برای میدان مدل $B_c = 1/60 \text{ kG}$, $\beta = 0/293$ بدست می‌آید. منحنی‌های خاکستری در نمودارهای شکل (۶)، توابع توانی برازش یافته را نشان می‌دهند. به روشنی مشخص است که برای شدت‌های کمتر از حدود ۰/۲، تابع توانی رفتار غیر خطی تغییر اندازه میدان با شدت را به خوبی بیان می‌کند.

حال رفتار تغییر اندازه میدان با شدت را برای دو خوشه مشخص شده در نمودارهای شکل (۶) در شدت‌های بزرگتر از ۰/۲۲ (برای دقت بهتر)، بررسی می‌کنیم. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است یکی از خوشه‌ها (خوشه H) میدان مغناطیسی بزرگتری نسبت به خوشه دیگر (خوشه L) برای شدت‌های یکسان نشان می‌دهد. ابتدا نقاط دو خوشه را از هم تفکیک کرده مکان آنها را در ناحیه مورد مطالعه می‌یابیم. در شکل (۷)، تصویر چپ و راست، نقشه دما - همان قاب چپ در شکل (۴) - و دو تصویر دوم و سوم از چپ، به ترتیب، نقشه اندازه میدان مغناطیسی مدل و رصدی نشان داده شده است. در این دو نقشه‌ی میدان مغناطیسی، نقاطی که با رنگ سفید و سیاه مشخص شده‌اند، به ترتیب، نقاط خوشه با میدان بزرگتر و کوچکتر هستند.

با مقایسه تصویر نقشه دما که در شکل (۷) آمده است می‌توان دید که این دو منطقه سفید و سیاه مکان رشته‌های نیم‌سایه‌ای هستند که به درون سایه لکه خورشیدی نفوذ کرده‌اند، به شکل (۱) نیز رجوع شود. لذا نقاطی با شدت‌های بزرگتر از حدود ۰/۲ نقاط سایه‌ای نیستند بلکه این نقاط بخش نیم‌سایه داخلی لکه خورشیدی را شکل می‌دهند که رشته‌های نیم‌سایه‌ای نفوذی، بر زمینه‌ی تاریک خودنمایی می‌کنند. اما این دو منطقه میدان مغناطیسی متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

تصاویر متوالی از تحول نیم‌سایه نشان می‌دهند که بسیاری از رشته‌های نیم‌سایه‌ای در نیم‌سایه داخلی به درون سایه "می‌خزند". مدل تحولی ارائه شده در [۴۴] نشان می‌دهد که در واقع این رشته‌ها به درون سایه "رانده" می‌شوند. تصاویر متوالی از تحول نیم‌سایه، همچنین نشان می‌دهند که سر درخشان بعضی از رشته‌های روشن نیم‌سایه‌ای (دانه‌های نیم‌سایه‌ای) از رشته جدا شده و کمی پیشروی می‌کند [۴۰، ۵۸]. رشته و دانه تحول می‌یابند و روشنایی آنها تغییر می‌کند. به دلیل تفاوت مشخصه‌های ترمودینامیکی رشته‌های نیم‌سایه‌ای در زمانهای تحول مختلف، جذب اپتیکی در این ساختارهای رشته‌ای متفاوت است و لایه‌های با عمق اپتیکی ثابت در زمانهای تحول مختلف، در ارتفاع‌های هندسی متفاوتی قرار می‌گیرند [۴۱]. لذا اندازه میدان مغناطیسی و نیز دیگر مشخصه‌های فیزیکی همچون سرعت پلاسما و زاویه انحراف میدان (شکل (۴) را ببینید)، در ساختارهای رشته‌ای نفوذی در مناطق مختلف نیم‌سایه داخلی می‌توانند متفاوت باشند [۴۷]. اگر ناحیه مورد مطالعه به مرکز قرص خورشید نزدیک نبود تأثیر تفاوت زاویه دید با راستای رشته‌های نیم‌سایه‌ای نفوذی در دو گوشه بالا و پایین نیز می‌توانست در اندازه میدان اندازه‌گیری شده قابل بحث باشد [۵۷].

در شکل (۶) در شدت‌های کمتر از ۰/۲ نیز نقاطی دیده می‌شود که به صورت خوشه‌هایی فشرده از دسته نقاطی که رفتار توانی نشان می‌دهند خود را جدا کرده‌اند. این خوشه‌های کوچک در قاب سمت راست در شکل (۶) مربوط به میدان مدل، بهتر دیده می‌شوند که با دو پیکان عمودی و حرف D مشخص شده‌اند. در شکل (۷)، قاب سمت راست، موقعیت مکانی نقاط این خوشه‌های فشرده را در ناحیه مربعی مورد مطالعه نشان داده‌ایم. با مقایسه مکان این نقاط و تصویر دما مشخص می‌شود که این نقاط منطبق بر تعدادی از خال‌های سایه‌ای^{۲۰} مرکزی (یکی از ساختارهای زیر سایه لکه‌های خورشیدی [۴۶]) هستند که نسبت به زمینه سایه لکه خورشیدی روشن‌ترند. در واقع خال‌های سایه‌ای سلول‌های همرفتی هستند که بخشی از گرمایش سایه را بر عهده دارند [۲۹، ۳۵، ۳۹، ۴۵، ۵۳]. لذا بخشی از پراکندگی نقاط در شکل (۶) در اطراف منحنی توانی برازش یافته به سبب وجود خال‌های سایه‌ای است. خال‌های سایه‌ای به دلیل روشنایی بیشترشان نسبت به سایه زمینه اطرافشان سبب جابجایی افقی نقاط در نمودار پراکندگی شکل (۶) به سمت شدت‌های بزرگ‌تر می‌شوند. از طرف دیگر به دلیل وجود پلاسما داغ همرفتی در خال‌های سایه‌ای و نیز جابجایی لایه‌های با عمق اپتیکی ثابت به ارتفاع‌های بالاتر در شیدسپهر [۴۵]، ممکن است میدان مغناطیسی کوچکتری را اندازه بگیریم [۳۸، ۴۹] و این سبب جابجایی عمودی نقاط در نمودار پراکندگی شکل (۶) به سمت پایین می‌شود. از آنجایی که افزایش روشنایی و کاهش اندازه میدان مغناطیسی در سطح خال‌های سایه‌ای مختلف، متفاوت است و در مواردی نیز کاهش میدان در سطح خال‌ها دیده نمی‌شود [۴۷]، به این ترتیب، پراکندگی نقاط در نمودار شکل (۶) در اطراف منحنی توانی توضیح داده می‌شود.

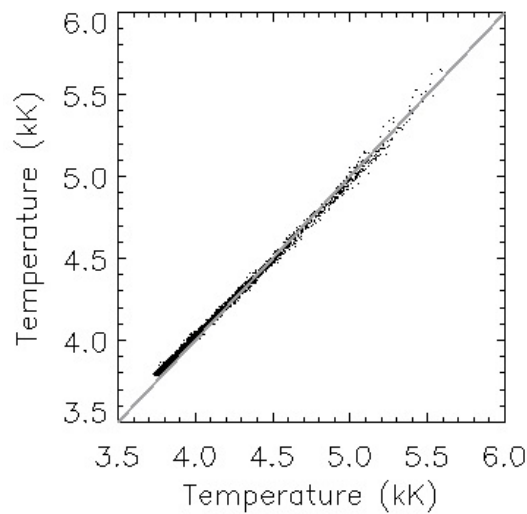
۷ دمای روشنایی

با فرض اینکه هر نقطه از سطح خورشید از جمله سطح ساختارهای شیدسپهری آن، مانند جسم سیاه تابش کنند می‌توان دمایی که معروف است به دمای روشنایی^{۲۱}، برای هر نقطه از سطح مورد مطالعه بدست آورد. برای یک جسم سیاه دمای روشنایی در طول موج‌های مختلف، یکسان و برابر با دمای ترمودینامیکی جسم سیاه بدست می‌آید. اما با توجه به انحراف ستارگان از جسم سیاه - به عنوان مثال، به دلیل یکسان نبودن دما در تمام نقاط جو^{۲۰} ستاره - دمای روشنایی در هر طول موج که با اندازه‌گیری شدت در یک بازه کوچک طول موجی و بکارگیری تابع تابش جسم سیاه محاسبه می‌شود با هم برابر بدست نمی‌آید. با این حال، اگر توزیع طول موجی تابش ستاره را بتوان اندازه‌گیری کرد با برازش تابع تابش جسم سیاه می‌توان دمای ترمودینامیکی جسم سیاه معادلی را برای ستاره بدست آورد که به آن دمای مؤثر ستاره می‌گویند. تابش جسم سیاه با تابع پلانک، $B_\lambda(T)$ ، به صورت معادله (۶) داده می‌شود.

$$B_\lambda(T) = \frac{1.118 \times 10^{20}}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{1.438 \times 10^8}{\lambda T}} - 1} \quad (6)$$

ضرایب عددی در معادله (۶) به گونه‌ای محاسبه شده است که در آن دما، T ، بر حسب کلوین و طول موج، λ ، بر حسب آنگستروم است و $B_\lambda(T)$ بر حسب $\text{str}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1} \text{W}$ محاسبه/اندازه‌گیری می‌شود.

^{۲۰}Umbral dots
^{۲۱}Brightness temperature



شکل ۸: نمودار پراکندگی دمای روشنایی بر حسب دمای حاصل از مدل در عمق اپتیکی ۰/۷. در اینجا نقاطی که دارای شدتی کمتر از ۰/۱ و میدانی بزرگتر از ۳/۳ کیلوگاوس بوده‌اند حذف شدند. خط راست خاکستری نیم‌ساز ناحیه اول مثلثاتی است نیز جهت مقایسه بهتر رسم شده است.

I مقدار شدت اندازه‌گیری شده از هر نقطه از سطح ناحیه مورد مطالعه را که به میانگین شدت در مرکز قرص خورشید یکه شده است، می‌توان به واحد مناسب چگالی شار تابشی یعنی $\text{W cm}^{-2} \text{\AA}^{-1} \text{str}^{-1}$ تبدیل کرد. از آنجایی که اندازه‌گیری‌های مورد مطالعه در طول موج متوسط ۶۳۰/۲ نانومتر انجام شده است ضریب تبدیل را از جدول X_{H} از مرجع [۲۸] برابر با ۰/۲۹۲۶ به واحد $\text{W cm}^{-2} \text{\AA}^{-1} \text{str}^{-1}$ می‌یابیم. با توجه به اینکه ناحیه مورد مطالعه بسیار نزدیک مرکز قرص خورشید قرار دارد می‌توان از اثر تاریکی لبه^{۲۲} صرف‌نظر کرد. لذا دمای روشنایی هر نقطه از ناحیه مورد مطالعه را می‌توان از معادله (۷) بدست آورد.

$$B_{630.2}(T) = 0.2926 I \quad (7)$$

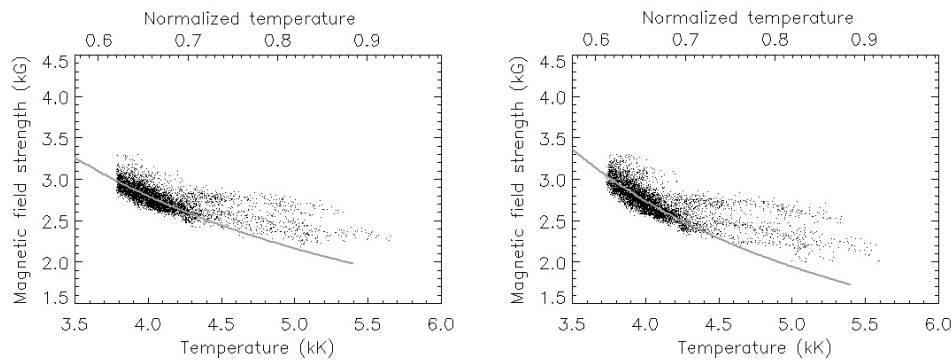
به این ترتیب، با وارون کردن معادله (۶) برای محاسبه دمای روشنایی و استفاده از ضریب معرفی شده در معادله (۷) برای تمام نقاط ناحیه مورد مطالعه، دمای روشنایی محاسبه می‌شود. شدت‌های ۰/۱ و ۰/۲ به ترتیب، معادل با دمای روشنایی ۳۷۹۰ و ۴۲۸۰ کلوین هستند. شکل (۸) نمودار پراکندگی دمای روشنایی بر حسب دمای حاصل از مدل (خروجی کد SIR) در عمق اپتیکی ۰/۷ را نشان می‌دهد.

با سعی و خطا به دنبال عمق اپتیکی‌ای گشتیم که دمای حاصل از مدل با دمای روشنایی تطابق خوبی داشته باشد که به عمق اپتیکی ۰/۷ رسیدیم. لایه‌های پایین‌تر از لایه‌ای به عمق اپتیکی ۰/۷ دمای بزرگ‌تر و لایه‌های بالاتر دمای کوچک‌تری دارند. به این ترتیب، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در انتخاب دمای روشنایی یا دمای حاصل از مدل برای نمایش تصویر دمایی ناحیه یا بررسی وابستگی اندازه میدان مغناطیسی به دما وجود نخواهد داشت، اگر از دمای مدل در عمق اپتیکی ۰/۷ استفاده کنیم.

۸ توزیع اندازه میدان مغناطیسی در سطح سایه، وابستگی میدان به دما

در بسیاری از پژوهش‌ها که وابستگی اندازه میدان مغناطیسی به دما مورد مطالعه قرار گرفته است از دمای روشنایی استفاده شده است. برای مقایسه، در شکل (۹) نمودار پراکندگی اندازه میدان مغناطیسی رصدی بر حسب دمای روشنایی (قاب

^{۲۲} Limb darkening effect



شکل ۹: چپ: نمودار پراکندگی اندازه میدان مغناطیسی رصدی بر حسب دمای روشنایی. راست: نمودار پراکندگی اندازه میدان مغناطیسی مدل بر حسب دما در عمق اپتیکی ۰/۷. بر خلاف نمودارهای شکل (۶)، در این نمودارها نقاطی که دارای شدتی کمتر از ۰/۱ و میدانی بزرگتر از ۳/۳ کیلوگاوس بوده‌اند حذف شدند. منحنی خاکستری برازش یک تابع توانی برای نقاطی با شدتی کمتر از ۰/۱۷ را در هر دو نمودار نشان می‌دهد. محور افقی بالایی در هر قاب دمای یگانه شده به ۶۱۰۰ کلوین را نشان می‌دهد.

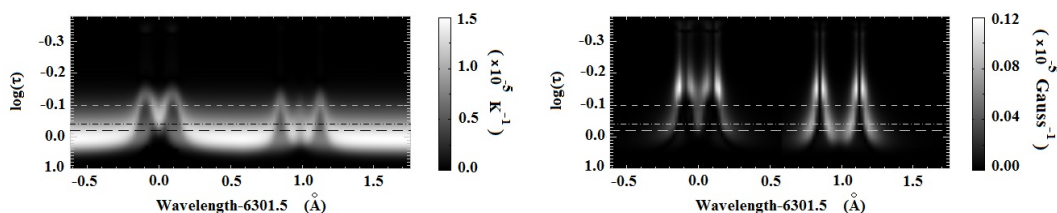
چپ) و نیز میدان مدل بر حسب دما در عمق اپتیکی ۰/۷ (قاب راست) نشان داده شده است. یک تابع توانی مشابه با معادله (۵) برای نمایش تغییرات غیر خطی میدان بر حسب دما بر نقطه داده‌های نمودارهای شکل (۹) برای شدت‌های کوچکتر از ۰/۱۷ برازش داده شد. اگر دما را به ۶۱۰۰ کلوین، دمای روشنایی معادل ۱/۰، یگانه کنیم ثابت‌های تابع توانی (β و B_c ، به ترتیب) بعد از برازش برای میدان رصدی به صورت ۱/۱۵، ۱/۷۲ kG، و برای میدان مدل به صورت ۱/۵۴، ۱/۴۳ kG بدست خواهد آمد. منحنی برازش یافته با رنگ خاکستری در شکل (۹) در هر قاب رسم شده است.

۹ بحث و نتیجه

ما در این پژوهش رابطه بین اندازه میدان مغناطیسی و دما را در سایه یک لکه خورشیدی که نزدیک مرکز قرص خورشید قرار داشت، بررسی کردیم. اندازه میدان مغناطیسی را هم از فاصله جدایی بیشینه و کمینه نمایه استوکس V در طول موج ۶۳۰/۲۵ نانومتر مربوط به آهن خنثی (میدان رصدی) و هم با بکارگیری کد وارونی SIR بر نمایه‌های کامل استوکس دو خط ۶۳۰/۱۵ و ۶۳۰/۲۵ نانومتر (میدان مدل) بدست آوردیم. داده‌های رصدی مورد استفاده به وسیله تلسکوپ خورشیدی نصب شده بر ماهواره هینوده ثبت شده است. دما نیز، هم از پیوستار نزدیک دو خط طیفی مذکور (دمای روشنایی) و هم از لایه‌بندی دما، خروجی کد وارونی، در عمق اپتیکی ۰/۷ بدست آوردیم. برای دقت بیشتر در بدست آوردن اندازه میدان مغناطیسی، نقاط با شدت کمتر از ۰/۱ (نسبت به شدت مرکز قرص خورشید) را در نظر نگرفتیم.

نتایج بدست آمده به طور کیفی با نتایج مطالعات قبلی سازگار است [۱۶، ۲۳، ۴۸، ۵۱]. تفاوت کمی با نتایج دیگران ناشی از تفاوت در خطوط طیفی مورد مطالعه که در لایه‌های شیدسپهری متفاوتی شکل می‌گیرند و نیز ناشی از تفاوت در شکل و ساختار لکه و مرحله تحولی آن در هنگام رصد است. این موارد هنوز به طور دقیق مورد مطالعه و مقایسه قرار نگرفته‌اند [۴۸].

توجه به دو نکته اهمیت دارد. (۱) لایه شکل‌گیری پیوستار نزدیک به خط طیفی که شدت و دما در آن لایه اندازه‌گیری (نمونه‌گیری) می‌شود کمی عمیق‌تر از لایه‌ای است که خط شکل می‌گیرد [۱۱] و میدان مغناطیسی در آن لایه اندازه‌گیری می‌شود: در شکل (۱۰) تابع پاسخ نمایه استوکس I به دما (قاب چپ) و میدان مغناطیسی (قاب راست) برای یک مدل شیدسپهری میانگین در ناحیه مورد مطالعه، نشان داده شده است. عمق متوسط تأثیر میدان مغناطیسی بر شکل‌گیری خط طیفی ۶۳۰/۱۵ نانومتر بر مبنای تابع پاسخ بدست آمده، لایه‌ای به عمق اپتیکی ۰/۱ است که در هر دو قاب شکل (۱۰) با خط چین سفید نشان داده شده است. عمق متوسط تأثیر دما بر شکل‌گیری خط طیفی ۶۳۰/۲۵ نانومتر نیز کمی عمیق‌تر، لایه‌ای به عمق اپتیکی ۰/۴ است که در قاب چپ و راست به ترتیب با خط نقطه سیاه و سفید مشخص شده است. خط چین بلند سیاه و سفید، به ترتیب، در قاب چپ و راست نیز عمق اپتیکی متوسط شکل‌گیری پیوستار شدت را در مقدار ۰/۶



شکل ۱۰: تابع پاسخ نمایه استوکس I به دما (قاب چپ) و میدان مغناطیسی (قاب راست) بر حسب طول موج و عمق اپتیکی. خط چین سفید، خط نقطه و خط چین بلند در هر دو قاب، به ترتیب، عمق اپتیکی 0.1 ، 0.4 و 0.6 را نشان می‌دهند.

نشان می‌دهد. (۲) معادله تعادل هیدروستاتیکی، معادله (۱)، اندازه میدان مغناطیسی و فشار گاز (معادل آن دما) را در عمق هندسی یکسان به هم مرتبط می‌کند و این ارتباط بسیار پیچیده بوده و به پیکربندی مغناطیسی لکه و نیز نسبت جرم متوسط مولکولی به چگالی در هر عمقی بستگی دارد [۲۳، ۲۴].

با این حال، توزیع میدان بر حسب شدت در سایه برای بازه شدت بین 0.1 تا 0.2 ، کاهش شدید میدان با افزایش شدت رفتاری توانی به صورت $B(I) = B_c I^{-\beta}$ را نشان می‌دهد که در آن β بسته به روش محاسبه میدان 0.2 و 0.3 ، به ترتیب، برای میدان رصدی و میدان مدل بدست می‌آید. توزیع میدان بر حسب دما در همان بازه شدت (بین دمای روشنایی 3290 و 4280 کلوین در طول موج 630.2 نانومتر) نیز رفتاری توانی نشان می‌دهد به طوری که نمای β حدود $1/2$ برای میدان رصدی و $1/5$ برای میدان مدل (۵ تا ۶ برابر بزرگتر نسبت به وابستگی میدان مغناطیسی به شدت) بدست می‌آید.

به نظر می‌رسد که پراکندگی داده‌ها در اطراف نمودار توانی برازش یافته، مربوط به تحول ریزساختارهای سایه از جمله خال‌های سایه‌ای باشد. در واقع نشان داده شد که نقطه داده‌ها در نمودار میدان بر حسب شدت/دما که از رفتار توانی خارج شده‌اند متعلق به خال‌های سایه‌ای مرکزی هستند.

در دو گوشه ناحیه مورد مطالعه، رشته‌های نیم‌سایه‌ای به درون سایه نفوذ کرده‌اند و نقاط این دو گوشه، در شدت‌های بزرگ‌تر از 0.2 در نمودار پراکندگی میدان بر حسب شدت/دما تغییرات آرام‌تری را برای وابستگی میدان به شدت/دما نشان می‌دهند. نقاط این دو گوشه که بخش‌هایی از نیم‌سایه داخلی لکه خورشیدی مورد مطالعه هستند میدان مغناطیسی متفاوتی را نسبت به هم، نشان می‌دهند که سبب پراکندگی بزرگتری در اندازه میدان مغناطیسی (حدود 500 گاوس) در نمودار میدان بر حسب شدت/دما شده‌اند. این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت در مرحله تحولی متفاوت رشته‌های نیم‌سایه‌ای در هنگام رصد باشد.

از آنجایی که طول موج‌های مختلف، لایه‌های متفاوتی را در شیدسپهر سایه نمونه‌برداری می‌کنند و خطوط طیفی مختلف در لایه‌های متفاوتی از شیدسپهر سایه شکل می‌گیرند به نظر می‌رسد که نمای β به طول موج وابسته باشد. از طرف دیگر، سایه لکه‌های بزرگتر تاریکتر هستند و اندازه میدان مغناطیسی بزرگتری را نشان می‌دهند [۱۶، ۲۰، ۲۵] و همچنین، سن لکه‌های خورشیدی و اینکه در چه مرحله‌ای از چرخه فعالیت خورشیدی شکل گرفته‌اند نیز می‌تواند سه امکان دیگر برای متفاوت بودن توزیع درخشندگی و نیز توزیع اندازه میدان مغناطیسی در سطح سایه یک لکه خورشیدی [۲۵، ۳۷] و لذا متفاوت بودن نمای β باشند.

رضایی و همکاران [۳۷] با انتخاب 374 لکه در بازه زمانی سالهای 1999 تا 2014 که در چند طول موج فروسرخ مورد رصد قرار گرفته بودند به مطالعه وابستگی زمانی اندازه میدان مغناطیسی، مساحت و شدت لکه‌ها پرداختند. نتیجه‌ای که در اینجا می‌توان از آن نام برد رابطه خطی بین بیشینه میدان مغناطیسی و کمینه شدت سایه لکه‌های خورشیدی در نمونه مورد مطالعه آنهاست. با این حال، شاد و پین [۴۳] با مطالعه سایه 12967 لکه خورشیدی که در بازه زمانی سالهای 1993 تا 2004 در طول موج 868.8 نانومتر مربوط به خط طیفی آهن خنثی ($g_{eff} = 1/66$) رصد شده بودند یک رابطه خطی بین لگاریتم بیشینه اندازه میدان مغناطیسی و لگاریتم کمینه شدت سایه لکه‌های مورد مطالعه بدست آوردند که نشان دهنده یک رفتار توانی مانند معادله (۵) است. آنها مقدار عددی نما را برای مراحل مختلف چرخه فعالیت خورشیدی در بازه زمانی مورد مطالعه خود (صعود، نزول، بیشینه و کمینه فعالیت خورشیدی) جداگانه محاسبه کردند و مقدار متوسط حدود $0.71 -$ را بدست آوردند. البته لکه‌های بسیار تاریک که میدان قوی‌تری دارند در این برازش حذف شده بودند.

این لکه‌های بسیار تاریک، در شکل (۳) مقاله ایشان [۴۳]، مقدار عددی بزرگتری را برای قدرمطلق نمای تابع توانی نشان می‌دهند. آنها نتایج کار خود را با نتایج حاصل از داده‌های رصدی تسکوپ McMath Pierce که در طول موج ۱۵۶۴/۹ نانومتر خط آهن خنثی ($g_{eff} = 3/0$) ثبت شده بود [۲۰] نیز مقایسه کردند. این داده‌های رصدی نیز یک رفتار توانی برای وابستگی اندازه میدان مغناطیسی به شدت در سایه را با نمای $0.52 -$ می‌داد که نوعی وابستگی مقدار عددی نما به طول موج را نشان می‌دهد. البته همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد این رفتار توانی برای وابستگی اندازه میدان مغناطیسی و شدت روشنایی در تاریکترین بخش سایه تعداد زیادی لکه خورشیدی بدست آمده است. با این حال در پژوهش حاضر نیز نشان داده شد که در یک سایه منفرد نیز این رفتار توانی دیده می‌شود.

توجه به این نکته نیز لازم است که در پژوهش‌هایی که در بالا به آنها ارجاع داده شد [۳۷، ۴۳] تغییرات زمانی گزارش شده برای شدت (از مرتبه هزارم شدت شیدسپهر آرام در سال) و برای اندازه میدان مغناطیسی در سایه لکه‌های خورشیدی (از مرتبه ۱۰ تا ۱۰۰ گاوس بر سال) [۳۷] از پراکندگی داده‌ها در اطراف تابع توانی برآزش یافته در بخش سایه مورد مطالعه در پژوهش حاضر (شکل (۶) را ببینید) که ناشی از تحول ساختارهای ریز سایه است کوچکتر است.

با این حال، برای یک لکه منفرد، وجود رفتار توانی و وابستگی نما به اندازه سایه، سن لکه و مرحله‌ای از چرخه فعالیت خورشیدی که لکه شکل می‌گیرد و نیز وابستگی به طول موجی که اندازه‌گیری انجام می‌شود، می‌تواند موضوع پژوهش‌های بعدی باشد.

تقدیر و تشکر

نویسنده از داور محترم مقاله به خاطر نقطه‌نظرهای اصلاحی ایشان که باعث پر بارتر شدن مقاله شد تشکر و قدردانی می‌کند. Hinode is a Japanese mission developed and launched by ISAS/JAXA, with NAOJ as domestic partner and NASA and STFC (UK) as international partners. It is operated by these agencies in cooperation with ESA and NSC (Norway).

مراجع

- [1] Balthasar H., Schmidt W., 1993, A&A 279, 243
- [2] Beck C., 2008, A&A 480, 825
- [3] Boyer R., Sotirovski P., Harvey J. W., 1975, A&AS 19, 359
- [4] Buurman J., 1974, A&AS 15, 35
- [5] Chitre S. M., Shaviv G., 1967, Solar Phys. 2, 150
- [6] Chou D. Y., 1987, ApJ 312, 955
- [7] Collados M., et al., 1994, A&A 291, 622
- [8] Cowling T. G., 1976, MNRAS 177, 409
- [9] Dicke R. H., 1970, ApJ 159, 25
- [10] Franz M., Schlichenmaier R., 2009 A&A 508, 145
- [11] Grec C., Uitenbroek H., Faurobert M., Aime C., 2010, A&A 514, 91
- [12] Hamedivafa H., 2013, Solar Phys. 286, 327
- [13] Ishikawa R., Tsuneta S., Jurčák J., 2010, ApJ 713, 1310
- [14] Jaeggli S. A., Lin H., Uitenbroek H., 2012, ApJ 745, 133

- [15] Khomenko E., Collados M., 2007, ApJ 659, 1726
- [16] Kopp G., Rabin D., 1992, Solar Phys. 141, 253
- [17] Landi Degl'Innocenti E., 1992, in Solar Observations: Techniques and Interpretation, F. Sanchez, M. Collados, M. Vázquez (eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 71
- [18] Leonard T., Choudhary D. P., 2008, Solar Phys. 252, 33
- [19] Lites B. W., Ichimoto K., 2013, Solar Phys. 283, 601
- [20] Livingston W., 2002, Solar Phys. 207, 41
- [21] Maltby P., 1977, Solar Phys. 55, 335
- [22] Martínez González M. J., Collados M., Ruiz Cobo B., 2006, A&A 456, 1159
- [23] Martínez Pillet V., Vázquez, M., 1993, A&A 270, 494
- [24] Mathew S. K., et al., 2004, A&A 422, 693
- [25] Mathew S. K., et al., 2007, A&A 465, 291
- [26] Moon Y. -J., Yun H. S., Park J. -S., 1998, ApJ 494, 851
- [27] Nave G., et al., 1994, ApJ Suppl. 94, 221
- [28] Neckel H., Labs D., 1984, Solar Phys. 90, 205
- [29] Ortiz A., Bellot Rubio L. R., Rouppe van der Voort L., 2010, ApJ 713, 1282
- [30] Parker E. N., 1975, Solar Phys. 40, 275
- [31] Parker E. N., 1979, ApJ 230, 905
- [32] Penn M. J., et al., 2003, Solar Phys. 213, 55
- [33] Proctor M. R. E., 1992, in Sunspots: Theory and Observations, J. H. Thomas, N. O. Weiss (eds.), Kluwer, Dordrecht, p. 221
- [34] Rempel M., 2012, ApJ 750, 62
- [35] Rempel M., Schüssler M., Knölker M., 2009, ApJ 691, 640
- [36] Rezaei R., Beck C., Schmidt W., 2012, A&A 541, 60
- [37] Rezaei R., et al., 2015, A&A 578, 43
- [38] Riethmüller T. L., Solanki S. K., Lagg A., 2008, ApJ Lett. 678, L157
- [39] Riethmüller T. L., Solanki S. K., van Noort M., Tiwari S. K., 2013, A&A 554, 53
- [40] Rimmele T., 2008, ApJ 672, 684
- [41] Ruiz Cobo B., Bellot Rubio L. R., 2008, A&A 488, 749
- [42] Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C., 1992, ApJ 398, 375
- [43] Schad T. A., Penn M. J., 2010, Solar Phys., 262, 19

- [44] Schlichenmaier R., Jahn K., Schmidt H. U., 1998, A&A 493, L12
- [45] Schüssler M., Vögler A., 2006, ApJ 641, L73
- [46] Sobotka M., Bonet J. A., Vázquez M., 1993, ApJ 415, 832
- [47] Sobotka M., Jurčák J., 2009, ApJ 694, 1080
- [48] Sobotka M., Rezaei R., 2018, Solar Phys. 292, 188
- [49] Socas Navarro H., Martínez Pilet V., Sobotka M., Vázquez M., 2004, ApJ 614, 448
- [50] Solanki S. K., Walther U., Livingston W., 1993, A&A 277, 639
- [51] Stanchfield D. C. H. II, Thomas J. H., Lites B. W., 1997, ApJ 477, 485
- [52] Suematsu Y., et al., 2008, Solar Phys. 249, 197
- [53] Tian C., Petrovay K., 2013, A&A 551, 92
- [54] Tsuneta S., et al., 2008, Solar Phys. 249, 167
- [55] van Noort M., 2012, A&A 548, 5
- [56] Weiss N. O., Brownjohn, D. P., Matthews P. C., Proctor M. R. E, 1996, MNRAS 283, 1153
- [57] Wiehr E., 1995, A&A 298, L17
- [58] Zhang Y., Ichimoto K., 2013, A&A 560, 77

[۵۹] رضوانی گیل‌کلایی، راضیه، ۱۳۹۲، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)