فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحهٔ ۶۵۷- ۶۷۱ (مقاله پژوهشی)
DOI: 10.22059/jesphys.2022.329183.1007350

آنالیز آماری زوایای میل اسپیکول و تغییرات ضخامت کروموسفر

اعظم ملاطایفه[۱] و احسان توابی[۲*]

۱. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۶/۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۷/۱۲)

چکیده

اسپیکول‌ها (Spicules) به‌طور متناوب بالای فوران‌های سطح خورشید در حال افزایش هستند. جت‌های فرابنفش تند (Extreme Ultra Violet) نیز بالای لایه‌ها گزارش‌شده‌اند. تغییرات جهت‌گیری اسپیکول در عرض‌جغرافیایی خورشیدی که احتمالاً انعکاس‌دهنده فوران‌های فریزشده در خطوط میدان مغناطیسی کرونایی مجاورند، یک پارامتر مهم برای درک خصوصیات دینامیکی آنهاست. تعداد زیادی از تصاویر با وضوح بالا از اسپیکول‌های لبه در خطوط نشری کلسیم دوبار یونیده در خط H از مأموریت تلسکوپ نوری خورشیدی (Solar Optical Telescope) سوار بر فضاپیمای هینوده (Hinode) در دسترس قرارگرفته است. به‌علاوه، تبدیل هاف برای انجام تحلیل آماری جهت‌گیری اسپیکول در مناطق مختلف اطراف لبه خورشیدی، از قطب تا استوا، به تصاویر اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد در طی کمینه فعالیت مغناطیسی خورشیدی (سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ مصادف با سال‌های ابتدایی ماموریت فضایی تلسکوپ هینوده) هرچه از استوا به سمت قطب‌ها پیش می‌رویم، زاویه میل اسپیکول‌ها کوچک‌تر می‌شود و طول آنها بلندتر به‌نظر می‌رسد. درنتیجه می‌توان گفت که کروموسفر در این حالت نسبت به بیشینه فعالیت خورشیدی ضخیم‌تر است. درصورتی‌که اسپیکول‌ها در چاله‌های کرونایی قطبی به‌طور قابل‌توجهی مایل می‌شوند (زاویه میل بزرگ‌تر) و ضخامت ناحیه کروموسفر و حتی ناحیه انتقال نازک‌تر خواهد شد. در حالی‌که فعالیت‌های بزرگ‌مقیاس با طول عمر کوتاه نقش چندانی در ضخامت کروموسفر نداشته و برای اندازه‌گیری‌های بلندمدت با میانگین‌گیری حذف می‌شوند. بیشترین جمعیت آماری اسپیکول‌ها در کمینه فعالیت خورشیدی در نواحی قطبی و در عرض‌های پایین‌تر، مربوط به اسپیکول‌ها با زوایای میل بزرگ‌تر است. درحالی‌که در دوره بیشینه چرخه خورشیدی نتیجه معکوس انتظار می‌رود که دلیلی توپولوژیکی برای پهن‌شدگی کروموسفر در حداقل فعالیت خورشیدی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کروموسفر، کرونای خورشیدی، چاله کرونایی، چرخه خورشیدی، پهن‌شدگی کروموسفر، تبدیل هاف.

۱. مقدمه

به‌نظر می‌رسد منشأ گرمایش جو بالای خورشید و اتلاف جرم از طریق باد از چاله‌های کرونایی، CHs (Coronal holes) مستقیماً به رفتار دینامیکی اسپیکول‌های خورشیدی ارتباط دارد؛ یا به‌عبارت بهتر، مناطقی که دارای ساختار کشیده‌شده با اسپیکول‌های غول یا ماکرواسپیکول‌ها و اسپیکول‌های جت‌مانند (کوچمی و لوسیف، ۱۹۹۱؛ کوچمی و همکاران، ۱۹۹۸) هستند؛ همان‌طور که این تئوری اخیراً نیز توسط بسیاری از محققان، به‌عنوان مثال، استرلینگ و همکاران (۲۰۱۵)، با توجه به همدم‌های جت اشعه ایکس نرم، SXR (Soft X-Ray) از این پدیده‌های دینامیکی مهم ارائه شده است. فیلیپوف و کوچمی (۲۰۰۰)، لوریان و کوچمی (۱۹۹۸) و بسیاری دیگر از پژوهشگران به‌طور مستقیم جهت‌گیری اسپیکول را به میدان مغناطیسی کرونایی فریزشده مرتبط می‌دانند. اوچر و همکاران (۱۹۹۸) و فیلیپوف و همکاران (۲۰۰۷) ادعا کردند که این مسئله می‌تواند مربوط به اثر پهن‌شدگی کروموسفری باشد که به‌خوبی در خطوط سرد برخوردی کروموسفری مانند خطوط Hα و H CaII مشاهده شده است (جوهانسون و زیرین، ۱۹۹۶) اما در خطوط برانگیخته تابشی HeI مشاهده نشد (فیلیپوف و کوچمی، ۲۰۰۰). به دنبال پیشنهادی از سوئاماتسو و تاکوچی (۱۹۹۱)، دپونشیو و همکاران (۲۰۰۴) ادعا کردند که بین انحراف لوله‌های شار مغناطیسی و تونل‌زنی P مدهای فوتوسفری با فرکانس پایین رابطه‌ای وجود دارد که فراتر

*نگارنده رابط: e_tavabi@pnu.ac.ir

از حد کافی در حمل شار انرژی به کرونا و ناحیه انتقال است. این مکانیزم برای خطوط میدان خم‌شده نسبت به آنچه در CH با خطوط میدان باز به‌سمت کرونا دیده می‌شود، بهتر عمل می‌کند. به‌طور کلاسیک، پذیرفته شده است که کمتر از یک درصد جرم اسپیکول درواقع به‌سمت کرونا منتقل می‌شود و این برای جبران اتلاف جرم سریع باد خورشیدی واقع در چاله‌های کرونایی کافی است (آتایی، ۱۹۸۶ و ویلهلم و همکاران،۲۰۱۱)، جایی که اسپیکول‌ها تقریباً عمودی و بلندتر از اسپیکول‌های آرام‌تر خارج از CH هستند.

اعتقاد بر این است که اسپیکول‌های غول‌پیکر و ماکرواسپیکول‌ها گاهی‌اوقات یک جت EUV و حتی یک جت SXR برای CH قطبی می‌دهند (کوچمی و همکاران، ۱۹۹۸) که در صورت آزادسازی انرژی کافی حاصل از انرژی آزاد میدان مغناطیسی کرونایی قابل توضیح است. مقالات فیلیپوف و همکاران، ۲۰۱۳ و مور و همکاران، ۲۰۱۵ را برای پردازش اتفاقات در نزدیکی نقطه صفر مغناطیسی، ازجمله رویدادهای اتصال مجدد می‌توان مشاهده کرد.

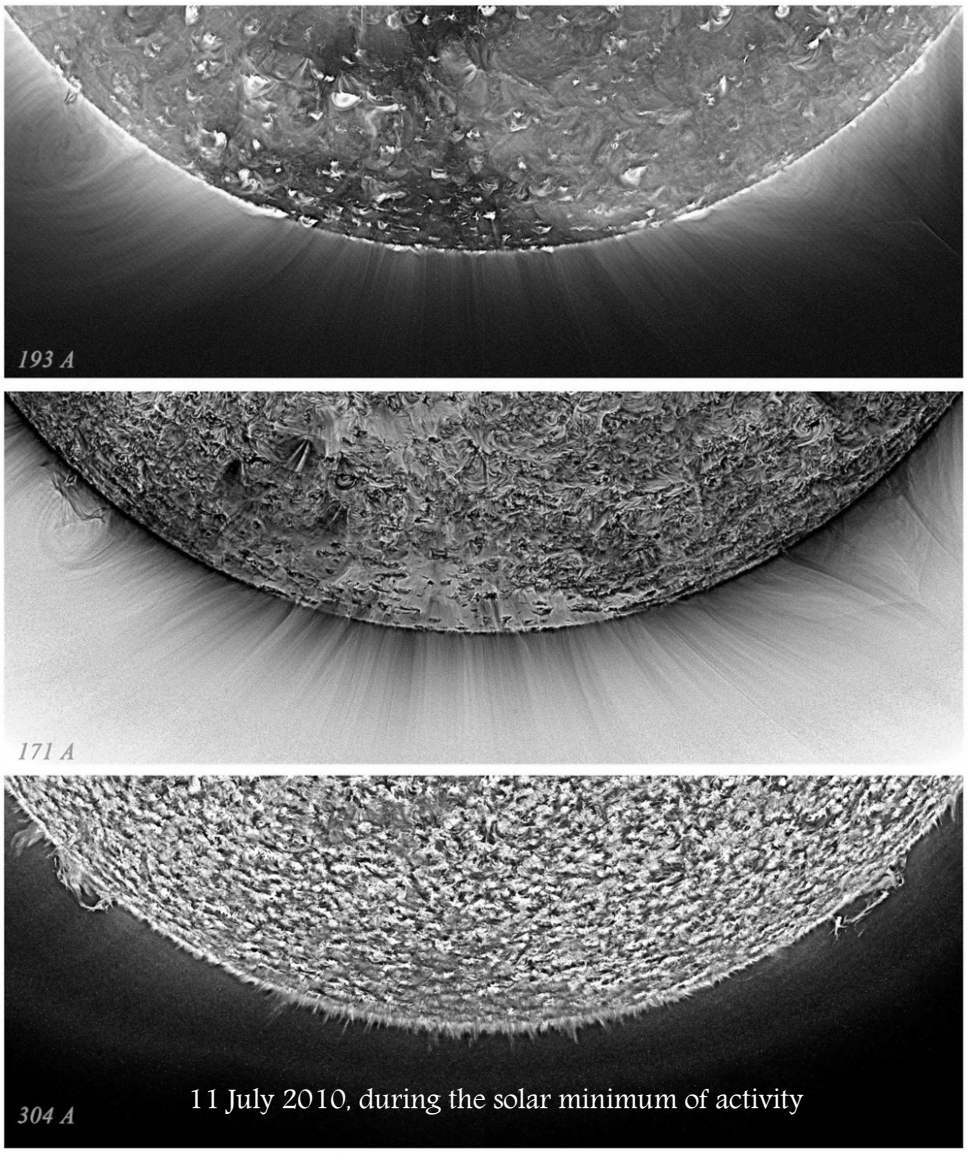
شکل‌های ۱ تا ۳ درهم‌آمیختگی پوسته‌های کروموسفر و ناحیه انتقال را در ناحیه قطب جنوب با اجزای مختلف به‌طور هم‌زمان نشان می‌دهد که با استفاده از بهترین تصاویر موجود EUV توسط تلسکوپ AIA (Atmospheric Imaging Assembly) از مأموریت رصدخانه دینامیکی خورشیدی SDO (Solar Dynamics Observatory) به‌ترتیب در سال‌های: ۲۰۱۰ در دوران کمینه فعالیت خورشیدی، ۲۰۱۴ در دوران بیشینه فعالیت خورشیدی و ۲۰۱۷ نیز در کمینه فعالیت خورشیدی گرفته شده‌اند. در این تصاویر تفاوت اسپیکول‌ها در خطوط طیفی گرم در طول‌موج‌های: Å ۱۷۱ مربوط به آهن ۱۱ بار یونیده و Å ۱۹۳ مربوط به آهن ۱۴ بار یونیده و خط سرد Å ۳۰۴ مربوط به هلیوم ۲ بار یونیده قابل مشاهده است. مقیاس برای همه تصاویر یکسان در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در تصاویر نیز مشهود است، ضخامت کروموسفر در دوران کمینه فعالیت خورشیدی بیشتر و در دوران بیشینه فعالیت خورشیدی شاهد ضخامت کمتری هستیم. برجستگی‌های دیسک می‌تواند با نشان دادن مشکلات هم‌زمان در نظرگرفتن ساختارهای دمایی مختلف درهم‌آمیخته در ارتباط باشد، مشکلی که در این تحقیق حل نخواهد شد.

شکل ۱ انبوهی از ماکرواسپیکول‌های هلیوم دوبار یونیده در طول‌موج ۳۰۴ آنگستروم را به‌صورت یک لایه ضخیم گسترش‌یافته به‌سمت پوسته کرونا نشان می‌دهد. همچنین اسپیکول با حاشیه نازک در جذب لبه را در طول‌موج‌های ۱۹۳ آنگستروم و ۱۷۱ آنگستروم با بسیاری برجستگی‌های جدید در نشر عبوری از لبه، ازجمله جت‌های کوتاه و بلند و برآمدگی‌های جزئی نشان می‌دهد.

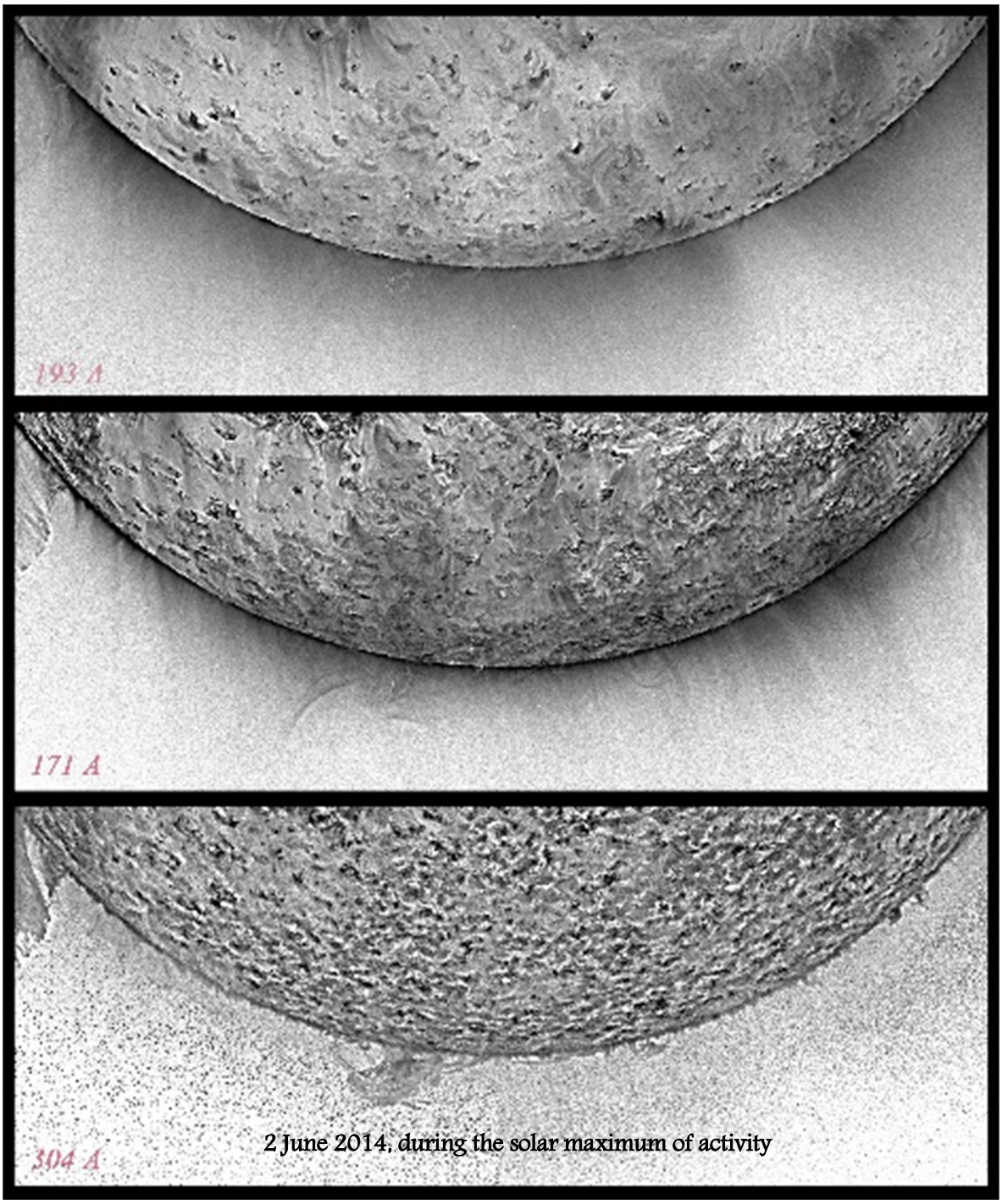
تعدادی از محققین (مرادیان، ۱۹۶۵؛ بکرز، ۱۹۶۸؛ استرلینگ، ۲۰۰۰؛ پاساخوف و همکاران، ۲۰۰۹؛ توّابی و همکاران، ۲۰۱۱الف و دیگران) پارامترهای فیزیکی خطوط نشری کم‌تحریک اسپیکول‌ها را بر اساس اندازه‌گیری‌های خارج از دیسک از ساختارهای خطی در یک زاویه ظاهری شناخته‌شده مربوط‌به موضع عمودی خورشیدی ذکر کرده‌اند (مشر و پاپ، ۱۹۷۷؛ کوچمی و لوسیف، ۱۹۹۱). آنها دریافتند که فراوان‌ترین زاویه میل در محدوده ۲۰ تا ۴۵ درجه است و میانگین زاویه میل مناسب برای اندازه‌گیری‌های عرض‌های کوچک‌تر از ۷۰ درجه، حدود ۳۶ درجه است. اینها تا حدی بزرگ‌تر از توزیع‌های یافت‌شده توسط بکرز (۱۹۶۸) است که تغییرات عمودی ۲۰ درجه را در یک عرض ۶۰ درجه می‌دهد. وان دی هولست (۱۹۵۳) از مشاهدات کسوف، نتوانست زاویه میل میانگین را مشخص کند. هریستچی و مرادیان (۱۹۹۲)، دریافتند که میانگین زاویه میل حول محور تقارن ۲۹ درجه است و به‌طور میانگین اسپیکول تمایل به خم‌شدن به‌سمت استوا دارد. اخیراً پاساخوف و همکاران (۲۰۰۹) اندازه‌گیری‌هایی نزدیک به دوره کمینه فعالیت خورشیدی را ثبت کرده و شیب ۲۷ درجه را با پراکندگی ۵ درجه یافته‌اند، درحالی‌که اندازه‌گیری‌های

هریستچی و مرادیان در سال ۱۹۷۰ و در دوره بیشینه فعالیت خورشیدی انجام‌گرفته شده است.

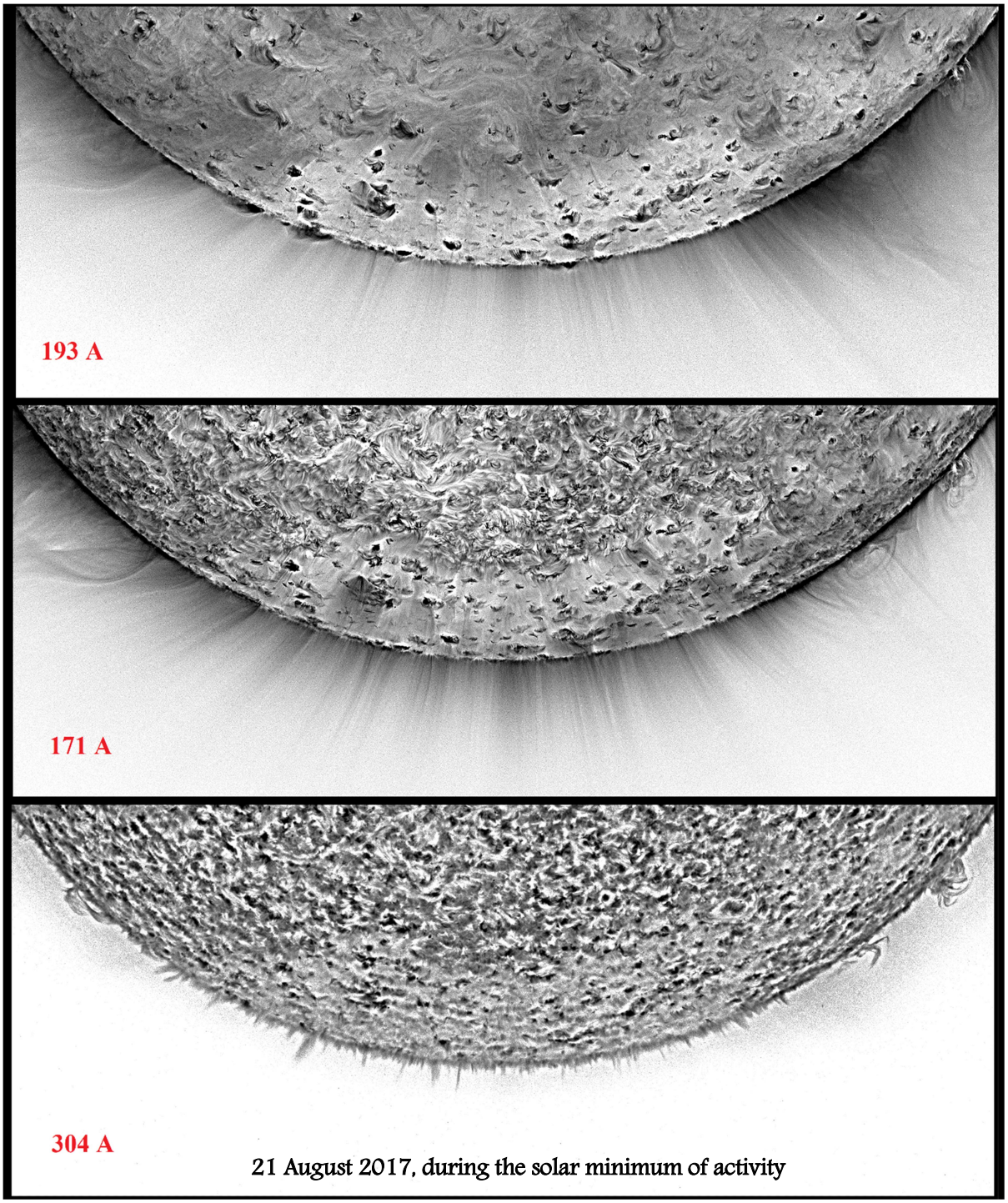
جهت‌گیری اسپیکول‌ها یک پارامتر مهم در غیاب اندازه‌گیری‌های مستقیم میدان مغناطیسی با وضوح مکانی کافی در ناحیه کروموسفر است زیرا احتمالاً به‌وسیله شاره فریزشده پلاسما تعیین می‌شود که باید در امتداد خطوط میدان مغناطیسی به‌ویژه جایی که فشار میدان مغناطیسی خورشیدی بر فشار گاز غلبه دارد، رخ دهد. البته، همه این اندازه‌گیری‌ها از اثر همپوشانی اسپیکول‌ها که در امتداد هر خط دید مشاهده می‌شوند، تأثیر می‌پذیرند و این تأثیر وقتی به نزدیکی لبه خورشید نگاه می‌کنیم، مشهودتر خواهد بود؛ بررسی مدل این تأثیر در مقاله توّابی و همکاران (۲۰۱۱ب) در دسترس است. در شرایطی که ماکرواسپیکول‌ها به‌خوبی توسط AIA با استفاده از فیلتر ۳۰۴ ثبت تابش‌های خط تشدید هلیوم دوبار یونیده تصویربرداری شده است، یک اثر اضافی به‌دلیل ضخامت نوری خط، به‌ویژه روی دیسک و همچنین بالای لبه در پوسته داخلی کروموسفر به وجود می‌آید (شکل ۱).



شکل ۱. تصویر ماکرواسپیکول‌های ناحیه قطب جنوب در زمان خورشیدگرفتگی کامل در ۱۱ ژوئیه ۲۰۱۰ توسط تلسکوپ AIA از مأموریت SDO از جت‌های نشری در طول‌موج‌های: Å ۱۷۱ مربوط به FeXI، Å ۱۹۳ مربوط به FeXIV و Å ۳۰٤ مربوط به HeII. برای بهبود نسبت سیگنال به نویز، شصت فریم متوالی در حدود ساعت UT ۱۸:٤٥ جمع شده‌اند و برای بهبود کنتراست برجستگی‌های لبه، از یک نمایشگر ورود به سیستم با پردازش تصویر ثانویه استفاده شد.

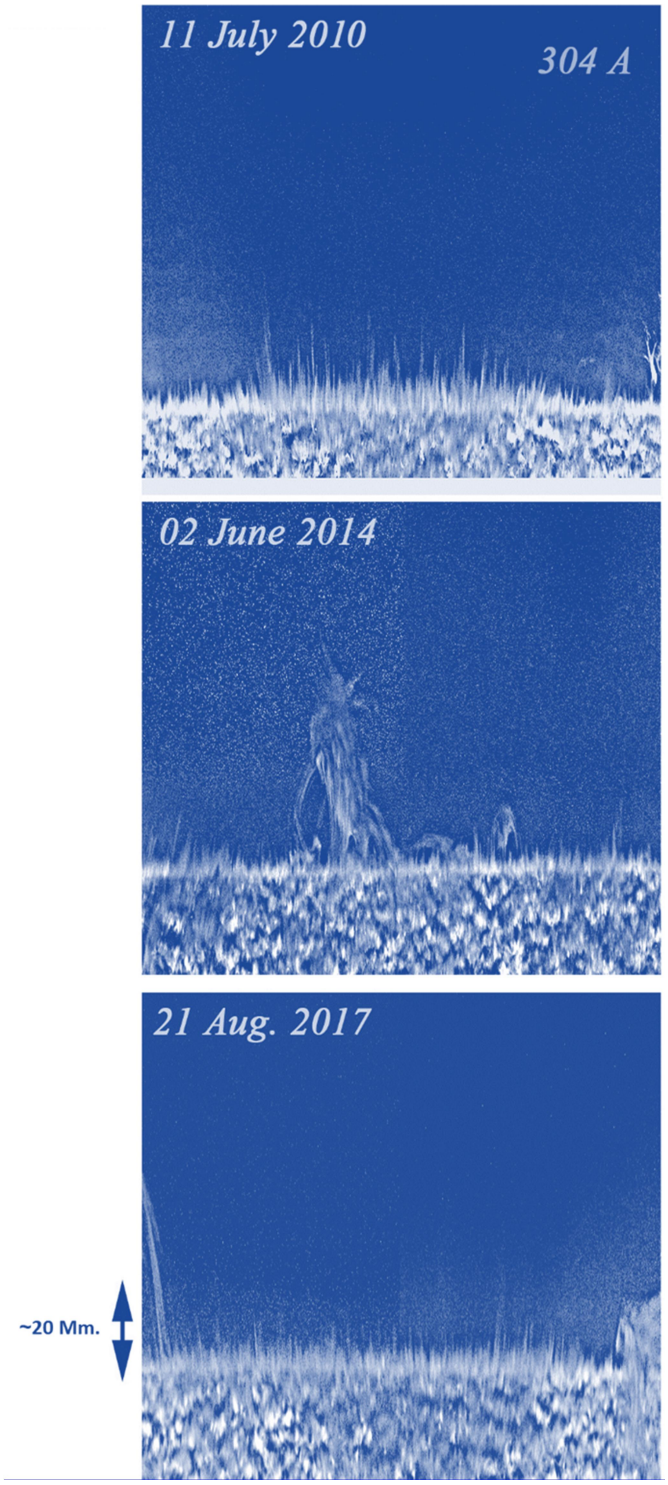


شکل۲. تصویر گرفته‌شده در ۲ ژوئن ۲۰۱٤ در دوران بیشینه فعالیت خورشیدی با استفاده از تلسکوپ AIA به‌ترتیب از خطوط طیفی ۱۹۳Å، ۱۷۱Å، ۳۰٤Å.



شکل ۳. تصویر گرفته‌شده در ۲۱ آگوست ۲۰۱۷ در کمینه فعالیت خورشیدی، با استفاده از تلسکوپ AIA، از خطوط طیفی ۱۹۳Å، ۱۷۱Å، ۳۰٤Å.

شکل ۴ تفاوت پهنای میانگین کروموسفر در چاله‌های کرونایی ناحیه قطب شمال را در سه زمان مختلف نشان می‌دهد. پهنای کروموسفر با توجه به مقیاس طول مشخص‌شده در تصویر در سال ۲۰۱۰ در زمان کمینه فعالیت خورشیدی حدود ۱۰ مگا متر، در سال ۲۰۱۴ در حالت بیشینه فعالیت خورشیدی حدود ۵ مگا متر و در سال ۲۰۱۷ در کمینه فعالیت خورشیدی حدود ۷ مگا متر است.



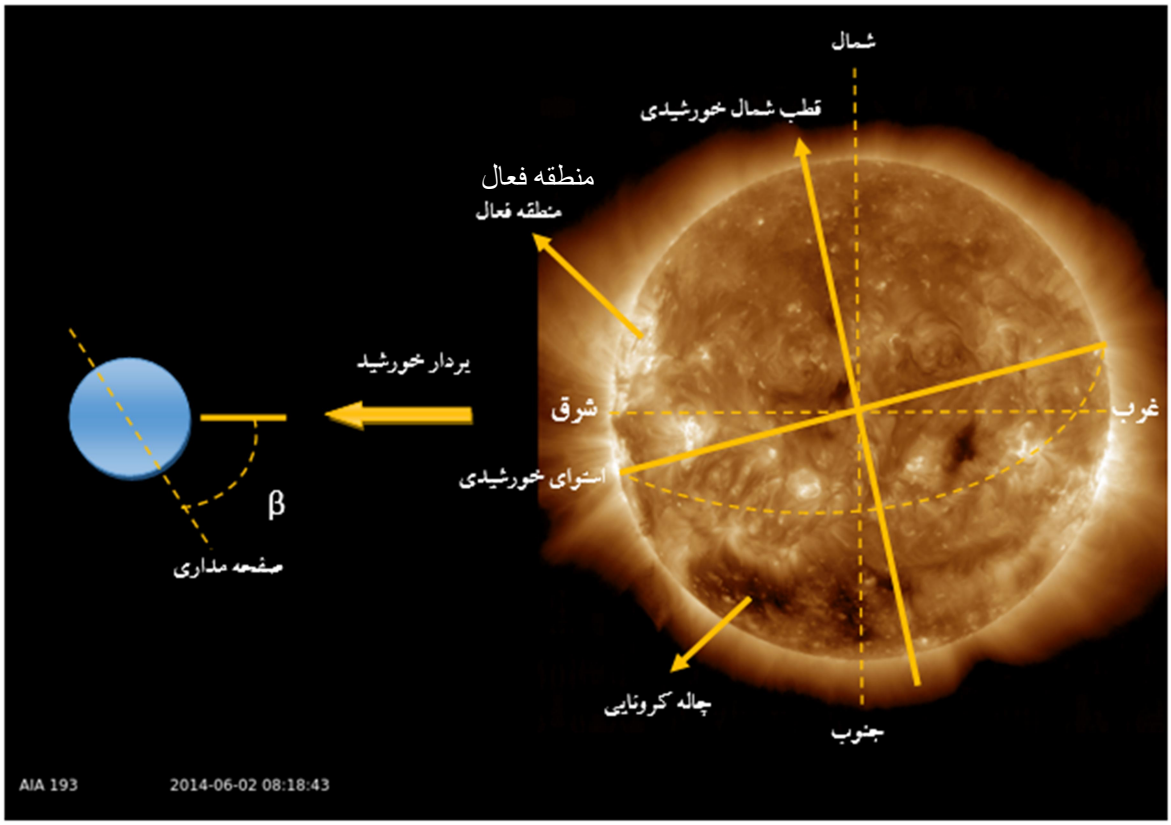
شکل ٤. تفاوت پهنای کروموسفر در چاله‌های کرونایی ناحیه قطب شمال. تصویر در ۱۱ ژولای ۲۰۱۰، ۰۲ ژوئن ۲۰۱٤، ۲۱ آگوست ۲۰۱۷ در طول‌موج ۳۰٤Å، با مقیاس طولی ۲۰ مگا متر (مشخص‌شده در تصویر)، گرفته شده است. برای بهبود نسبت سیگنال به نویز، شصت فریم متوالی با فاصله زمانی ۱۲ ثانیه جمع شده‌اند. برای حذف انحنای لبه خورشید مختصات دکارتی به مختصات قطبی کروی منتقل شده است.

در شکل ۵ راستاهای خورشیدی، استوای خورشید، مناطق فعال (نواحی روشن بر روی سطح خورشید)، چاله کرونایی و بردار خورشید به‌صورت فرضی بر روی تصویر گرفته شده در حالت بیشینه فعالیت خورشیدی در سال ۲۰۱۴ توسط رصدخانه SDO با استفاده از ابزار AIA در خط طیفی ۱۹۳ آنگستروم نشان داده‌شده است.

۲. روش پژوهش

هدف اصلی این مقاله تعیین خودبه‌خود و عینی زاویه شیب ظاهری اسپیکول‌ها، با استفاده از بهترین مشاهدات موجود بسیار پردازش‌شده، با تصویربرداری از لبه خورشید توسط تلسکوپ نوری خورشیدی با استفاده از فیلتر خط H CaII است (تی‌سونتا و همکاران، ۲۰۰۸، سوئاماتسو و همکاران، ۲۰۰۸، کوسوگی و همکاران، ۲۰۰۷). یک تکنیک برای تشخیص خودکار اسپیکول‌های خارج از لبه اجرا شد و اندازه‌گیری‌های آماری برای تعیین زاویه شیب برای اسپیکول‌ها در زوایای مختلف خورشیدمرکزی انجام شد.

ما پنج توالی از مشاهدات لبه خورشیدی را که در موقعیت‌های مختلف لبه با استفاده از فیلتر پهن باند ابزار (BFI) از SOT از مأموریت هینوده (جدول ۱) انجام شد، انتخاب کردیم. همچنین از مجموعه‌ای از توالی‌های تصویر به‌دست‌آمده در خط نشری سرد هیدروژن CaII کروموسفری (یون‌ها با انرژی برانگیختگی پایین) استفاده کردیم. پس-باند در طول‌موج ۳۹۸/۸۶ نانومتر، متمرکز شده است. پهنا در نصف بیشینه(FWHM) ۰/۳ نانومتر و فاصله زمانی ۲۰ ثانیه با زمان نوردهی ۰/۵ ثانیه استفاده شده است؛ از وضوح مکانی کامل داده شده‌SOT-هینوده با پراش در ۰/۱۶ ثانیه کمانی یا ۱۲۰ کیلومتری خورشید (کوسوگی و همکاران، ۲۰۰۷، گودرزی و همکاران ۲۰۱۵) و مقیاس پیکسل سایز ۰/۰۵۴۱ ثانیه کمانی استفاده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۵. الف) راستای قطب شمال خورشیدی به‌صورت فرضی بر روی تصویر خورشید، گرفته شده در ۰۲ ژوئن ۲۰۱٤ در حالت بیشینه فعالیت خورشیدی توسط رصدخانه SDO با استفاده از ابزار AIA در خط طیفی ۱۹۳ آنگستروم. در این تصویر نقاط روشن بر روی سطح خورشید مناطق فعال و نقاط تاریک‌تر چاله‌های کرونایی هستند. ب) بردار خورشید و زاویه β (زاویه بین بردار خورشید و صفحه مداری).

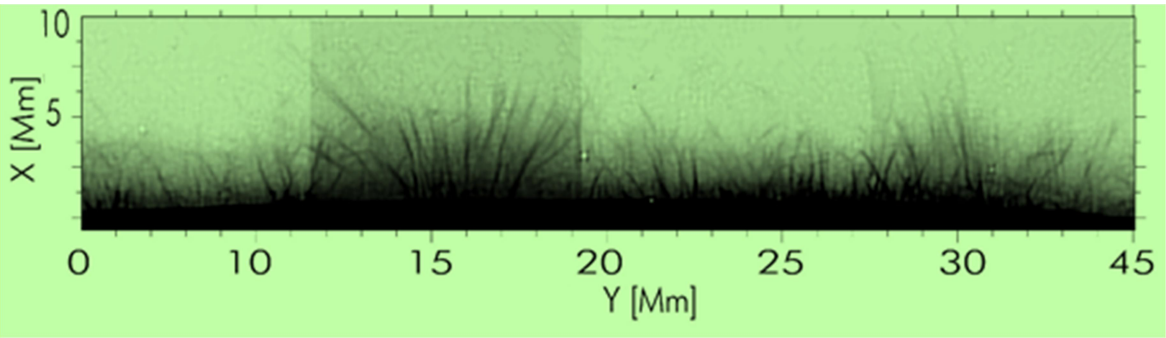
در اینجا اندازه هر تصویر استفاده شده 1024×512 pixels^2 است (هینوده فقط پیکسل‌های مرکزی آشکارساز بزرگ‌تر را بازخوانی می‌کند تا فاصله زمانی زیاد درون محدودیت‌های تله‌متری را حفظ کند)، بنابراین میدان دید (Field of view) ۵۶ ثانیه کمانی×۱۱۱ ثانیه کمانی (هر ثانیه کمانی به‌طور میانگین معادل ۷۳۱ کیلومتر روی خورشید) را پوشش می‌دهد.

ما از برنامه معمول SOT "fg_prep" برای کاهش خیزک‌های تصویر و تأثیر لرزش و هم‌ترازی سری‌های زمانی استفاده کردیم (شیمیزو و همکاران، ۲۰۰۸). این سری‌های زمانی یک حرکت آهسته با سرعت متوسط کمتر از ۰/۰۱۵ ثانیه کمانی بر دقیقه به‌سمت شمال را نشان می‌دهد، همان‌طور که با حرکت لبه خورشید آرام نشان داده شده است.

یک پردازش تصویر سه‌بعدی برای برجستگی‌های نخ مانند با استفاده از الگوریتم اصطلاحاً mad-max به دست می‌آید (کوچمی و کوچمی، ۱۹۸۹، توّابی و همکاران، ۲۰۱۳)، برای مثال به شکل ۱ و پانل‌های بالای شکل ۷ و ۸ نگاه کنید.

جدول ۱ (ستون‌های اول و دوم) اطلاعات مربوط به تمام موقعیت‌ها و تاریخ‌هایی را نشان می‌دهد که در این مقاله استفاده شده است. در این جدول ستون موقعیت، مختصات x و y به‌ترتیب موقعیت افقی و عمودی هر پیکسل را روی لبه خورشید نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال موقعیت (الف) مربوط به تصویری است که در نیمکره شمالی خورشید و دارای مختصات x= ۰ و y= ۹۴۵ و موقعیت (ب) مربوط به نیمکره جنوبی خورشید و دارای مختصات x= ۶۷۱ و y= −۷۱۶ می‌باشد و به‌همین ترتیب... (به‌صورت قراردادی راستای شمال و غرب را با اعداد مثبت و راستای جنوب و شرق را با اعداد منفی نشان می‌دهیم).

شکل ۶ نمونه‌ای از این پردازش را نشان می‌دهد که برای جلوگیری از اثرات غیرواقعی ناشی از فشرده‌سازی یا کالیبراسیون انجام شده است. برای تشخیص و ردیابی اسپیکول‌ها در دو بعد، ما یک روش را با مراحل زیر اعمال کرده و توسعه می‌دهیم: (۱) برای افزایش میدان دید اسپیکول‌ها، مقیاس لگاریتمی شعاعی اعمال شده است. (۲) برای افزایش ویژگی‌های خطی، از عملگر Mad-max استفاده شده است (کوچمی و کوچمی، ۱۹۸۹، توّابی و همکاران، ۲۰۱۳). اپراتور Mad-max قصد دارد برجستگی‌های درخشان مو مانند در مشاهدات نهایی خورشیدی همراه با نویز به دلایل مختلف را ردیابی کرده و وضوح را با فیلتر کردن غیرخطی داده‌ها بهبود بخشد. این اپراتور فضایی عمومی از مشتق دوم در راستای بهینه انتخاب‌شده، استفاده می‌کند که مقدار مطلق آن حداکثر مقدار را دارد (شکل ۶).



شکل ٦. یک تصویر نگاتیو پردازش‌شده، گرفته‌شده در ۰۹ سپتامبر ۲۰۰۸؛ منطقه پررنگ در شکل ۸ نشان داده خواهد شد.

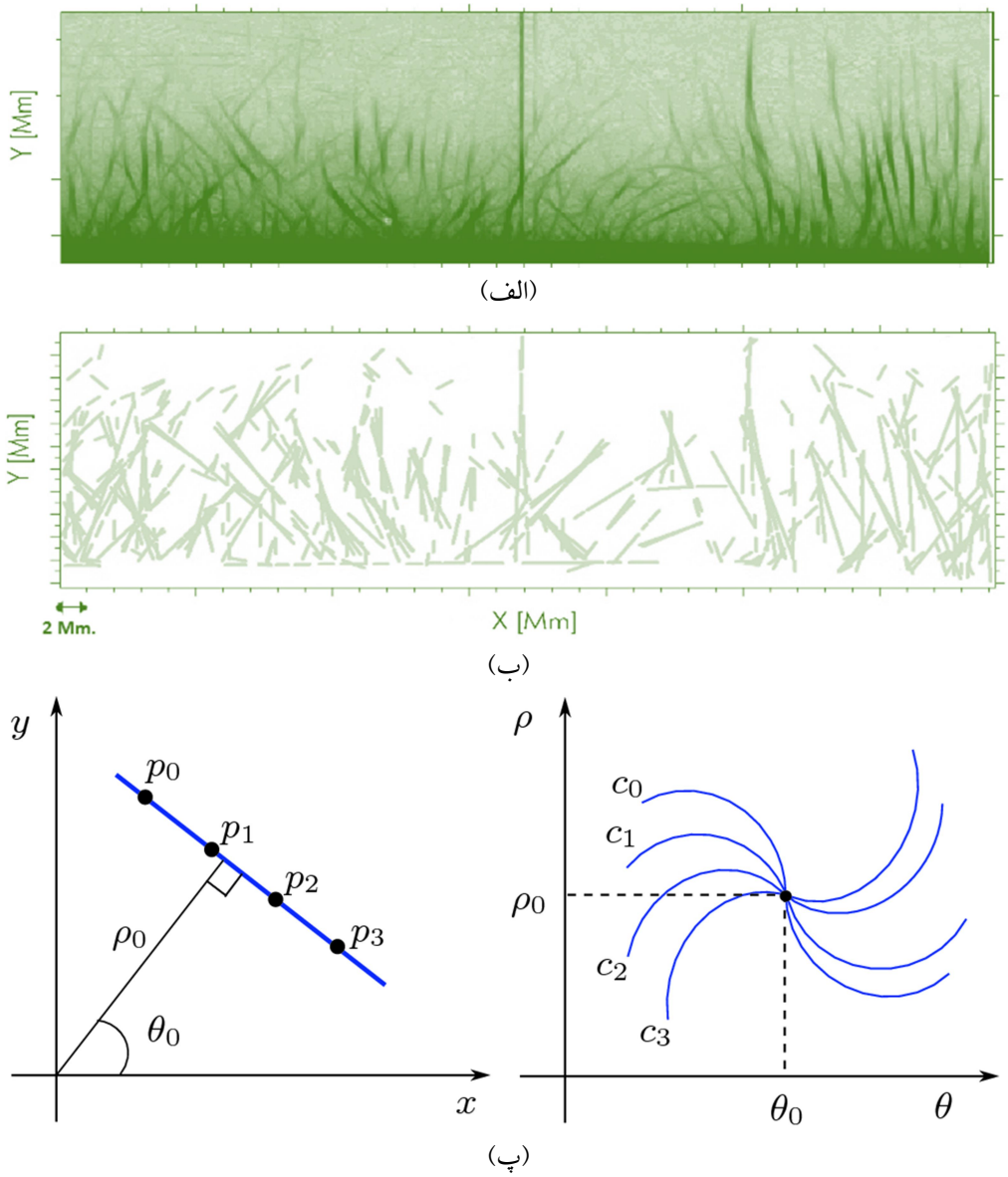
جدول ۱. پارامترهای مبتنی‌بر مشاهده.

توضیحات	زاویه شیب	تعداد اسپیکول‌های شمرده‌شده	تاریخ	موقعیت
خورشید آرام کمینه فعالیت	$\epsilon[-۲۰^{\circ},+۲۰^{\circ}]$	۳۵	۲۰۰۷/۱۰/۲۱	شمال (الف) (۰،۹۴۵)
خورشید آرام کمینه فعالیت	$\epsilon[-۵۰^{\circ},+۵۰^{\circ}]$	۶۰	۲۰۰۸/۰۹/۰۹	جنوب غربی(ب) (۶۷۱،-۷۱۶)
نزدیک ناحیه فعال کمینه فعالیت	$\epsilon[-۳۰^{\circ},+۶۰^{\circ}]$	۵۰	۲۰۰۷/۱۰/۲۵	شمال غربی(پ) (۳۴۹،۸۳۹)
خورشید آرام کمینه فعالیت	$<\pm ۴۰^{\circ}$	۲۵	۲۰۰۷/۱۰/۲۲	شرق(ت) (-۹۴۴ ،۰)
چاله کرونایی بیشینه فعالیت	$<\pm ۱۰^{\circ}$ شعاعی	۳۰	۲۰۱۱/۰۶/۱۷	جنوب(ث) (۰،-۱۰۰۲)

ما از داده‌های خام استفاده می‌کنیم، اما هنوز هم برخی از پدیده‌های غیرواقعی مربوط به‌اندازه پیکسل‌ها و روش‌های تبدیل مشاهده می‌شوند. همچنین باید به نقص بازخوانی سی‌سی‌دی در نزدیکی مرکز فریم‌ها در شکل ۷ توجه داشت. بعد از این، زاویه میل ظاهری اسپیکول را با استفاده از تبدیل هاف در نظر می‌گیریم (هاف، ۱۹۶۲).

۳. نتایج

این بخش توصیف می‌کند که چطور از توابع تبدیل هاف برای تشخیص خطوط موجود در تصویر استفاده می‌شود. این روش تبدیل یک تکنیک استخراج مشخصه است که اجسام ناقص را در یک کلاس خاص از اشکال پیدا می‌کند. ساده‌ترین حالت تبدیل هاف، تبدیل خطی برای تشخیص خطوط راست است. تبدیل هاف، یک ماتریس انباشت‌گر ایجاد می‌کند. جفت (r, θ) محل سلول را در ماتریس انباشت‌گر نشان می‌دهد. هر پیکسل معتبر (منطقی) از تصویر دوتایی ورودی (x_i,y_j) نشان داده شده توسط (R,C) یک مقدار r برای همه مقادیر θ تولید می‌کند. این بلوک مقادیر r را به نزدیک‌ترین عدد در بردار r نسبت می‌دهد. بردار r به اندازه تصویر ورودی و قدرت تفکیک r مشخص شده توسط کاربر بستگی دارد. این عملگر شمارنده، تعداد را افزایش می‌دهد (ابتدا روی صفر تنظیم می‌شود) که در آن سلول‌های آرایه ماتریس انباشت‌گر نشان داده‌شده با دوتایی (r, θ) برای هر پیکسل یافت می‌شود، خط راست را می‌توان به‌صورت $y_i = \mathrm{R}\, x_i + \mathrm{c}$ توصیف کرد. این فرایند به نقطه (R,C) با تعریف (r, θ) اعتبار می‌بخشد. بلوک، این فرایند را برای هر پیکسل واقعی منطقی در تصویر تکرار می‌کند. هاف ماتریس انباشت‌گر برایند را تولید می‌کند. اگر منحنی‌های مربوط به دو نقطه روی هم قرار بگیرند، موقعیت (در فضای هاف) جایی که محل عبور در فضای هاف مربوط به یک خط (در فضای اصلی تصویر) است، از هر دو نقطه عبور می‌کند. به‌طورکلی، مجموعه‌ای از نقاط که یک خط راست را تشکیل می‌دهند، سینوس‌هایی تولید می‌کنند که از پارامترهای آن خط عبور می‌کنند (شاپیرو و همکاران، ۲۰۰۱). تبدیل کلاسیک هاف به شناسایی خطوط در تصاویر مربوط بود؛ اما امروزه، استفاده از تبدیل هاف به شناسایی موقعیت‌های اشکال دلخواه، معمولاً حلقه‌ها و بیضی‌ها گسترش یافته است. بنابراین، این یک روش دقیق و قابل قبول برای یافتن تمام ساختارهای خطی است. برای واجد شرایط بودن آنها به‌عنوان یک اسپیکول، فرض می‌کنیم که باید بزرگ‌تر از ۲ باشند (۲۰ پیکسل برای تصاویر SOT).



شکل۷. الف) تصویر نگاتیو و پردازش‌شده، گرفته‌شده در تاریخ ۱۷ ژوئن ۲۰۱۱؛ **ب)** نتیجه ردیابی خط با استفاده از تبدیل هاف. خط تیره عمودی در وسط حاصل سیستم بازخوانی سی‌سی‌دی است و **پ)** مختصات تصویر در تبدیل هاف. تبدیل هاف تکنیکی برای استخراج ویژگی است که به وسیله آن شکل‌های ساده مانند خط و دایره در یک تصویر تشخیص داده می‌شوند. معادله یک خط در مختصات قطبی به‌صورت $\rho_0 = x\cos\theta_0 + y\sin\theta_0$ تعریف می‌شود که در این رابطه، ρ_0 برابر با فاصله عمودی خط از مبدأ بر حسب پیکسل و θ_0زاویه خط با مبدأ است که بر حسب رادیان اندازه‌گیری می‌شود. هر نقطه از خط در فضای تصویر با یک منحنی در فضای هاف مطابقت دارد. محل تلاقی منحنی‌ها در فضای هاف همان خط در فضای تصویر است.

شکل ۷ و ۸ نتیجه تقسیم خط را با استفاده از تبدیل هاف نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۸ زاویه‌ای که اسپیکول‌های ردیابی‌شده با استفاده از این تبدیل با بردار نرمال بر سطح، یعنی بردار عمود بر لبه خورشید (در راستای شعاعی) می‌سازند با θ_0 نشان داده شده است.

با استفاده از تبدیل هاف، می‌توانیم بیش از ۷۰ درصد از اسپیکول‌ها را ردیابی کنیم که هنگام ارزیابی با استفاده از تصویر mad-maxed و داده‌های تبدیل هاف، دیده می‌شوند. در تبدیل هاف، این نرخ با تغییر سایز تقسیم‌بندی، برای توصیف برجستگی‌ها به‌عنوان اسپیکول قابل افزایش است. اسپیکول‌ها به‌عنوان برجستگی‌های روشن و مستقیم با طول بیش از دو ثانیه کمانی (حدود ۲۰

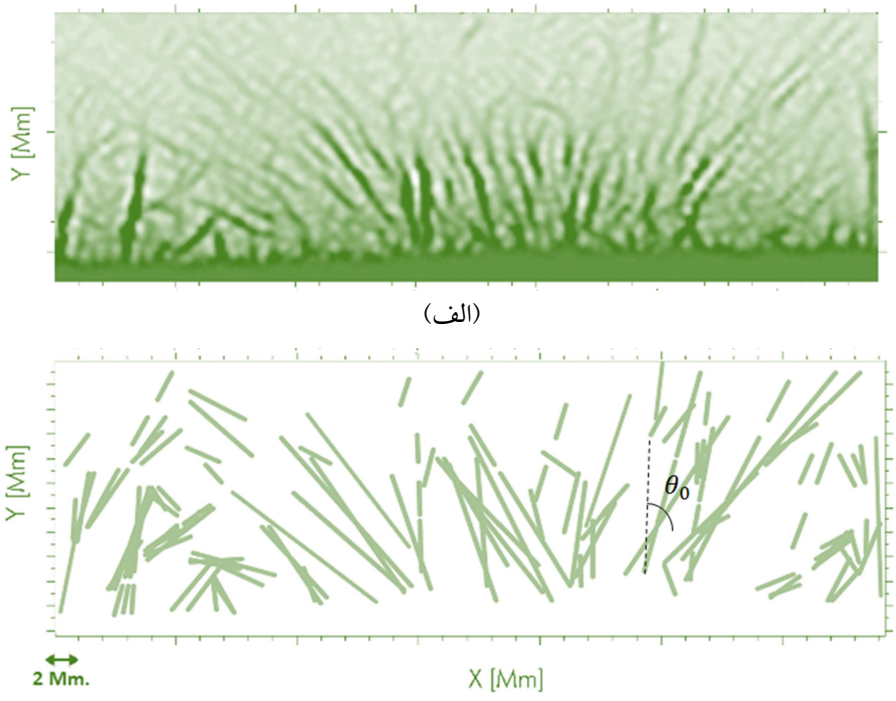
پیکسل) و عرض حداقل ۴ پیکسل تعریف شده‌اند.

با استفاده از این مقادیر، ما به یک سطح معمول دقت حدود ۷۰ درصد دست یافتیم؛ اگرچه در مواردی، در نقاط عبور، چنین دقتی حاصل نمی‌شود. مقدار متوسط طول اسپیکول حدود ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر است و عرض آنها بسیار گسترده است (در توافق نزدیک با توّابی و همکاران، ۲۰۱۱آ).

توزیع زاویه شیب اسپیکول‌های نوعی خط H کلسیم دوبار یونیده در هر دو جهت چپ و راست از راستای نرمال (شعاعی)، با مقدار مطلق حدود ۵۰ درجه یکسان است. این رفتار توسط ردیابی اسپیکول با استفاده از تبدیل هاف در شکل ۸ نشان داده شده است و ماتریس تبدیل هاف نشان‌دهنده زاویه شیب مساوی از نظر آماری است (رنگ قرمز در صفحه ب از شکل ۹).

۴. بحث

نتایج به‌دست‌آمده درواقع در توافق کلی با توصیف ارائه‌شده در پاساخوف و همکاران (۲۰۰۹) و هریستچی و مرادیان (۱۹۹۲) از نوع تحلیل یک روش پدیده‌شناسی آماری است. اسپیکول‌های خورشید آرام در عرض‌جغرافیایی پایین‌تر در راستایی به سمت استوای خورشیدی متمایل شده‌اند. این رفتار توسط هریستچی و مرادیان (۱۹۹۲) گزارش شده است و برای اسپیکول‌های غول‌پیکر، این گرایش خیلی پیش‌تر در مقاله اولیه رابرتز (۱۹۴۵) و بعدها توسط کوچمی و لوسیف (۱۹۹۱)گزارش شده است. با این حال، پاساخوف و همکاران (۲۰۰۹) نتوانستند چنین همبستگی را پیدا کنند. در این مطالعه، متوجه شدیم که این تأثیر به سطح فعالیت ناحیه نزدیک به‌عنوان مثال در شمال شرقی در شکل ۱۲ بستگی دارد. یک تفاوت معنی‌دار بین دو راستای مخالف به‌دلیل وجود مناطق فعال مشاهده شد. برای تأیید این تأثیر، به یک میدان دید بزرگ‌تر نیاز داریم. همچنین ماتریس تبدیل هاف تخمینی تقریبی از تعداد اسپیکول‌های آشکارسازی‌شده (یا خطوط راست) بالای تصویر را به ما می‌دهد (جدول ۱، ستون ۳ و نوار رنگی مربوط به هر طرح).



شکل۸. الف) تصویر نگاتیو و پردازش‌شده، گرفته‌شده در تاریخ ۰۹ سپتامبر ۲۰۰۸ (فریم فرعی و بخش پررنگ در شکل۶)؛ ب) نتیجه ردیابی خط با استفاده از تبدیل هاف و θ_0 زاویه میل اسپیکول. بوته‌ای از اسپیکول‌ها در تصویر نمایش داده شده است.

کروموسفر خورشیدی بالای ۱/۵ مگا متر یا حتی کمتر، یک اتمسفر لایه‌ای نیست، همان‌طور که در مدل‌های اتمسفری هیدرواستاتیک کلاسیک جوی فرض شده است؛ به‌عنوان مثال می‌توان به بازین و کوچمی (۲۰۱۳) مراجعه کرد. لبه بالایی کروموسفر که با وضوح متوسط در خطوط نشری کروموسفری قوی دیده می‌شود نسبتاً تار است زیرا از مخلوط تعداد زیادی از اسپیکول‌های دینامیکی جت‌مانند و پلاسمای کرونایی بین آنها تشکیل شده است. تا آنجاکه ما می‌دانیم، لایه کروموسفر عمدتاً با اسپیکول‌ها یا جت‌ها پر شده است و ضخامت کروموسفر دامنه گسترده‌ای از تغییرات از قطب تا استوا و از خورشید آرام تا فعال در طول چرخه خورشیدی را نشان می‌دهد که توسط تعدادی از محققان گزارش شده است (اوچر و همکاران، ۱۹۹۸؛ ژانگ و همکاران، ۱۹۹۸؛ فیلیپوف و کوچمی، ۲۰۰۰). آنها پیشنهاد کردند که برآمدگی لبه در کروموسفر ممکن است به‌دلیل وجود اسپیکول‌های نشان داده شده در خطوط نشری کم‌تحریک باشد، بدین‌ترتیب مسئله جت‌های EUV بسیار گرم‌تر و ماکرواسپیکول‌ها باز گذاشته شد (شکل ۹). بسیاری از مشاهدات گذشته نشان داد که در دوران کمینه فعالیت خورشیدی، گسترش کروموسفر نزدیک قطب‌ها به‌طور سیستماتیک بالاتر از استوا است (سکچی، ۱۸۷۷؛ رابرتز، ۱۹۴۵؛ اوچر و همکاران، ۱۹۹۸؛ جوهانسون و زیرین، ۱۹۹۶؛ فیلیپوف و کوچمی، ۲۰۰۰).

میزان کشیده‌شدگی یا پخیدگی به رفتار اسپیکول‌ها و احتمالاً ماده بین اسپیکول‌ها بستگی دارد؛ به فیلیپوف و کوچمی (۲۰۰۰) و فلیپوف و همکاران (۲۰۰۷) مراجعه کنید. اختلاف در ارتفاع کروموسفرهای قطبی و استوایی به‌دلیل تفاوت در ساختار میدان‌های مغناطیسی قطبی و نواحی جغرافیایی در عرض پایین به وجود می‌آید. مشهور است که میدان مغناطیسی بزرگ‌مقیاس در مناطق قطبی در حداقل لک خورشیدی عمدتاً باز است، درحالی‌که در منطقه استوایی، اساساً با توجه به غلبه دوقطبی کروی و هارمونیک‌های کروی هشت‌ضلعی بسته است (فیلیپوف، ۲۰۰۸). ساختار کوچک‌مقیاس میدان مغناطیسی در دو ناحیه شبیه به هم نیست. ساختار ریز واقعی میدان مغناطیسی قطبی هنوز دست‌نیافتنی است. تردیدهای زیادی وجود دارد که شباهت زیادی به ساختار ریز میدان مغناطیسی درون چاله‌های کرونایی دارد که گاهی در عرض‌های جغرافیایی کم مشاهده می‌شود. در اینجا ما نتیجه تجزیه‌وتحلیل پارامتر دیگری را که به جهت میدان مرتبط است، اضافه می‌کنیم که نشان می‌دهد هم کشیده‌شدگی و هم‌جهت‌ها با هم مرتبط هستند (هر چقدر راستای اسپیکول به راستای شعاعی خورشید نزدیک‌تر باشد، اسپیکول بلندتر به‌نظر می‌رسد).

مشاهدات فضایی اخیر این پیشنهادات اولیه را تأیید و اثبات می‌کند (دی‌پونتیو و همکاران، ۲۰۰۷). مور و همکاران (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن جت‌های بالا، با شروع از ماکرواسپیکول‌هایی که در خط نشری ۳۰۴ آنگستروم He II مشاهده می‌شود، به شکل ۸ نگاه کنید. حتی رویدادهای فوران لبه EUV توابی و همکاران (۲۰۱۵) می‌تواند در این تحلیل گنجانده شود.

شکل ۱ نشان داد که این یک سؤال پیچیده است زیرا روابط بین اجزای درهم‌آمیخته در دماهای مختلف روشن نیست. این مسئله نیاز به تجزیه‌وتحلیل بیشتری دارد که در مقاله آینده بررسی خواهد شد.

در آخر، باید توجه داشت که به‌نظر می‌رسد کشش قطبی با کاهش گرمای ورودی به کروموسفر در چاله‌های کرونایی قطبی، کاهش می‌یابد. اتمسفر خورشید آرام در استوا در مقایسه با خورشید فعال، بدون در نظر گرفتن مقدار پرانرژی‌ترین رویدادهای نوع انفجاری که در مناطق قطبی نیز ثبت شده است، قابل قیاس است (شکل ۵- وسط).

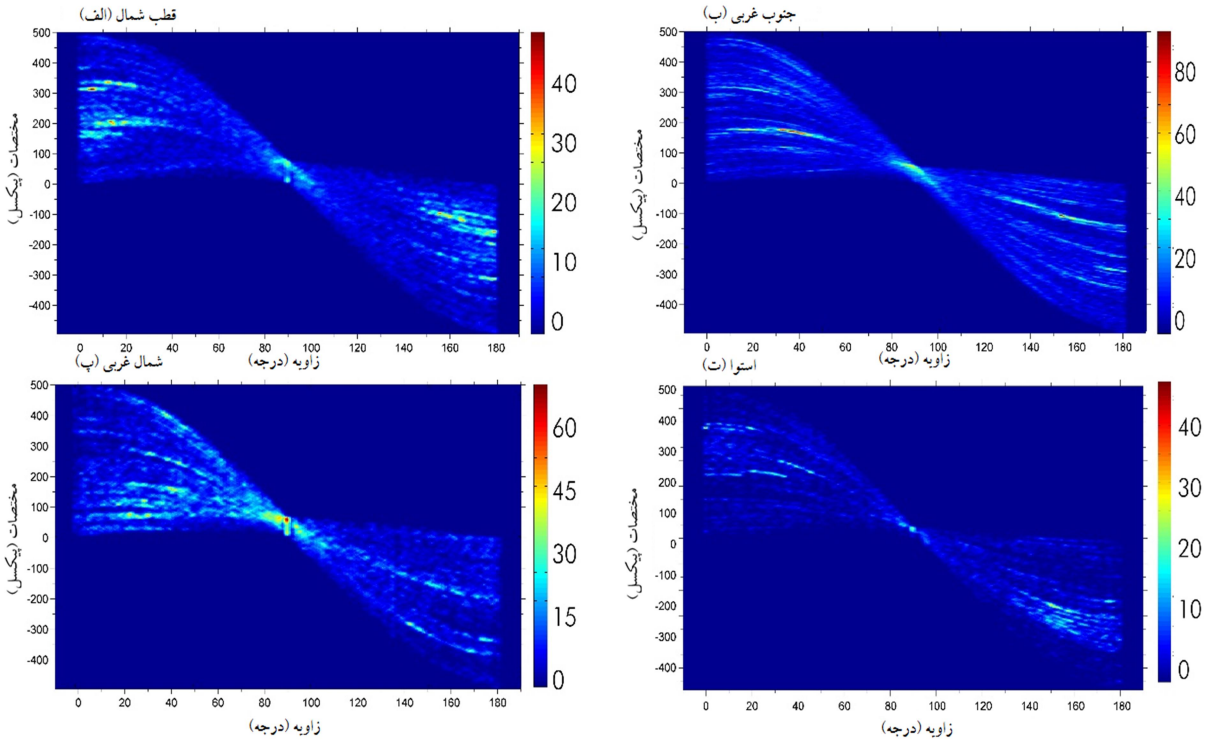
۵. نتیجه‌گیری

ما جزئیات بیشتر زاویه میل ظاهری اسپیکول‌ها را بررسی کردیم و مقادیر میانگین آماری را برای موقعیت‌های

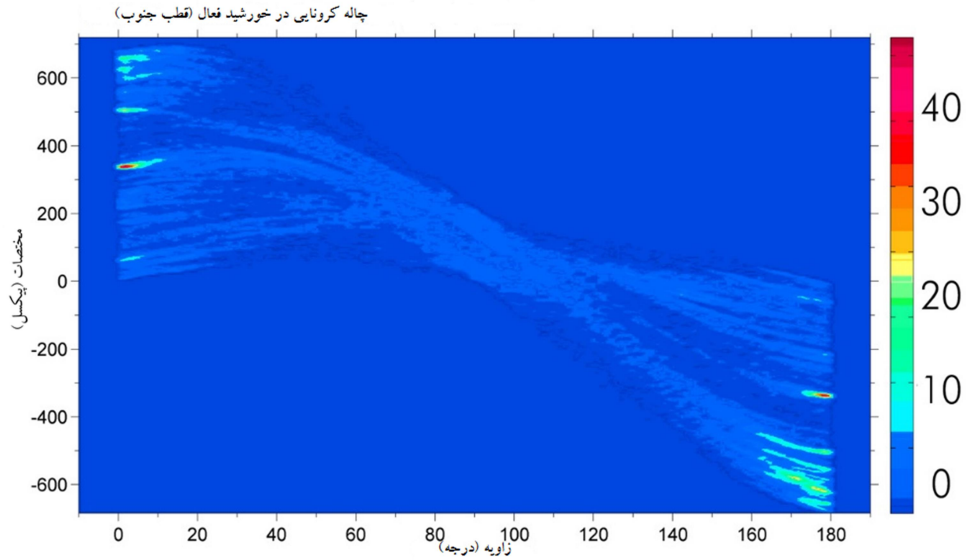
مختلف، اطراف لبه خورشیدی برای زاویه شیب بررسی کردیم. نتایج در جدول ۱، شامل چهار موقعیت مختلف در کمینه فعالیت خورشیدی، خلاصه شده است. عناصر ماتریس هاف در شکل ۹ رسم شده‌اند.

نتایج، اختلاف زیادی میان زاویه‌های شیب ظاهری اسپیکول در (۱) نواحی قطب خورشیدی، (۲) نواحی استوایی، (۳) نواحی فعال و (۴) نواحی چاله کرونایی نشان می‌دهد. اسپیکول‌ها در راستای شعاعی در مناطق قطبی با زوایای شیب کوچک‌تر از ۲۰ درجه قابل مشاهده هستند. در داخل چاله کرونایی با خطوط میدان مغناطیسی باز، زاویه شیب حتی تا ۱۲ درجه کاهش می‌یابد. در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر، زوایای شیب به مقادیر بیش از ۵۰ درجه نیز می‌رسد. معمولاً در اطراف یک ناحیه فعال خورشیدی، طیف وسیعی از تغییرات زاویه ظاهری را از ۶۰- تا ۶۰+ درجه شاهد هستیم که شباهت زیادی به نواحی بین گرانولی دارد که از لکه‌های تیره و فیبریلزها در برجستگی‌های روی دیسک خورشیدی ساخته شده‌اند.

علاوه‌بر این، تفاوت قابل‌توجهی بین ناحیه قطبی خورشید آرام (سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹) در شکل ۹ و ناحیه چاله کرونایی خورشید فعال ۲۰۱۱ مشاهده می‌شود (شکل ۱۰). زمانی که زاویه β خورشیدی (زاویه بین بردار خورشید و صفحه مداری) مقدار بزرگی دارد، لایه‌های چاله کرونایی قابل مشاهده‌ای ایجاد می‌کند (شکل ۷). در این شکل، اسپیکول‌ها بلندتر و اغلب شعاعی هستند. به‌علاوه، تعدادی حلقه‌های کوچک نیز در پایین آشکارسازی شد.



شکل ۹. ماتریس تبدیلات هاف برای موقعیت‌های مختلف خورشیدمرکزی در جدول ۱ برای دوره کمینه فعالیت خورشیدی (سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) خلاصه شده است. محور X زاویه میل را نشان می‌دهد. محور قائم فاصله اسپیکول‌ها از گوشه سمت چپ تصویر را نشان می‌دهد (شکل ۷- پ) که نقطه مرجع تصویر (۰ و ۰) در مختصات دکارتی است. نوارهای رنگی سمت راست تعداد متناظر با اسپیکول‌های آشکارسازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. ماتریس تبدیل هاف برای چاله کرونایی قطب جنوب، ۱۷ ژوئن ۲۰۱۱ (طی بیشینه فعالیت خورشیدی) مربوط به آخرین ردیف داده (ث) که در جدول ۱ نشان داده شده است.

تشکر و قدردانی

ما از گروه هینوده به‌خاطر مشاهدات فوق‌العاده‌شان سپاسگزاریم. هینوده یک مأموریت ژاپنی است که توسط ISAS/JAXA توسعه‌یافته و راه‌اندازی شده است، NAOJ به‌عنوان یک شریک داخلی و NASA، ESA و STFC (انگلیس) به‌عنوان شرکای بین‌المللی هستند. از پروفسور علی عجب‌شیری‌زاده نیز برای مباحث معنی‌دار تشکر می‌کنیم.

مراجع

Athay, G., 1986, Physics of the Sun, ed. Sturrock, P. A., Vol. II: The solar atmosphere.

Auchere, F., Boulade, S., Koutchmy, S., Smartt, R. N., Delaboudiniere, J. P., Georgakilas, A., Gurman, J. B. and Artzner, G. E., 1998, The prolate solar chromosphere. A & A, 336L, 57.

Bazin, C. and Koutchmy, S., 2013, Helium shells and faint emission lines from slitless flash spectra. Journal of Advanced Research, 4(3), 307–313.

Beckers, J.M., 1968, Solar spicules. Solar Phys., 3, 367-433.

De Pontieu, B., Erdelyi, R. and James, S.P. (2004). Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows, Nature, 430, 536-539.

De Pontieu, B ., Mcintosh, S.W., Carlsson, M., Hansteen, V. H., Tatrbell, T. D., Schrijver, C. J., Title, A. M., Shine, R. A., Tsuneta, S., Katsukawa, Y., Ichimoto, K,. Suematsu, Y., Shimizu, T. and Nagata, S., 2007, Chromospheric Alfvénic Waves Strong Enough to Power the Solar Wind, Science, 318, 1574-1577

Filippov, B., 2008, private communication.

Filippov, B. and Koutchmy, S., 2000, On the Origin of the Prolate Solar Chromosphere, Solar Phys., 196, 311- 320.

Filippov, B., Koutchmy, S. and Vilinga, J., 2007, On the dynamic nature of the prolate solar chromosphere: jet formation, A&A, 464, 1119- 1125.

Filippov, B., Koutchmy, S. and Tavabi, E., 2013, Formation of a White-Light Jet Within a Quadrupolar Magnetic Configuration, Solar Phys., 286, 143-156.

Goodarzi, H., Koutchmy, S. and Ajabshirzadeh, A., 2015, Improved SOT (Hinode mission) high resolution solar imaging observations, Astrophysics and Space Science, 358, 13.

Heristchi, D. and Mouradian, Z., 1992, On the Inclination and the Axial Velocity of Spicules. Solar Phys., 142, 21-34.

Johannesson, A. and Zirin, H., 1996, The Pole-Equator Variation of Solar Chromospheric Height, The Astrophysical Journal, 471, 510-520.

Koutchmy, O. and Koutchmy, S., 1989, High Spatial Resolution Solar Observations, Proc. of the 10th Sacramento Peak Summer Workshop, 217.

Koutchmy, S. and Loucif, M. L., 1991,

Mechanisms of Chromospheric and Coronal Heating, ed. P. Ulmschneider, E. R. Priest, & R. Rosner (Berlin:Springer-Verlag), 152-158.

Koutchmy, S., Hara, H., Shibata, K., Suematsu, Y. and Reardon, K., 1998, Observational Plasma Astrophysics: Five Years of Yohkoh and Beyond, 87- 94.

Kosugi, T., Matsuzaki, K., Sakao, T., Shimizu, T., Sone, Y., Tachikawa, S., Hashimoto, T., Minesugi, K., Ohnishi, A., Yamada, T., Tsuneta, S., Hara, H., Ichimoto, K., Suematsu, Y., Shimojo, M., Watanabe, T., Shimada, S., Davis, J. M., Hill, L. D., Owens, J. K., Title, A. M., Culhane, J. L., Harra, L. K., Doschek, G. A. and Golub, L., 2007, The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview, Solar Phys., 273, 3-17.

Lorrain, P. and Koutchmy, S., 1998, Chromospheric heating by electric currents induced by fluctuating magnetic elements. Solar Phys., 178, 39-42.

Moore, R. L., Sterling, A.C. and Falconer, D.A., 2015, Magnetic untwisting in solar jets that go into the outer corona in polar coronal holes. The Astrophysical Journal.

Mosher, J. M. and Pope, T. P., 1977, A statistical study of spicule inclinations. Solar Phys., 53, 375-384.

Mouradian, Z., 1965, Contribution a l'etude du Bord Solaire et de la Structure chromospherique. Annales d'Astrophysique, 28, 805.

Pasachoff, J.M., William, A.J. and Sterling, A.C., 2009, Limb Spicules from the Ground and from Space. Solar Phys., 260, 59-82.

Roberts, W. O., 1945, A Preliminary Report on Chromospheric Spicules of Extremely Short Lifetime. ApJ, 101, 136.

Secchi, S. J., 1877, Le Soleil. Gauthier-Villars, 38.

Shimizu, T., Nagata, S., Tsuneta, S., Tarbell, T., Edwards, C., Shine, R., Hoffmann, C., Thomas, E., Sour, S., Rehse, R., Ito, O., Kashiwagi, Y., Tabata, M., Kodeki, K., Nagase, M., Matsuzaki, K., Kobayashi, K., Ichimoto, K. and Suematsu, Y., 2008, Image Stabilization System for Hinode (Solar-B) Solar Optical Telescope. Solar Phys., 249, 221-232.

Shapiro, L. and Stockman, G., 2001, Computer Vision, Prentice-Hall, Inc.

Sterling, A.C., 2000, Solar Spicules: A Review of Recent Models and Targets for Future Observations – (Invited Review), Solar Phys., 196, 79-111.

Suematsu, Y. and Takeuchi, A., 1991, Flare Physics in Solar Activity Maximum 22, Proceedings of the International SOLAR-A Science Meeting Held at Tokyo, Japan, 23-26 October 1990, Lecture Notes in Physics, 387, 259.

Suematsu, Y., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., Shimizu, T., Okamoto, T., Tsuneta, S., Tarbell, T. and Shine, R. A., 2008, High Resolution Observations of Spicules with Hinode/SOT. Astronomical Society of the Pacific, 397, 27.

Sterling, A. C., Moore, R.L., Falconer, D.A. and Adams, M., 2015, Small-scale filament eruptions as the driver of X-ray jets in solar coronal holes. Nature, 523, 437-440.

Tavabi, E., Koutchmy, S. and Ajabshirzadeh, A., 2011a, A Statistical Analysis of the SOT-Hinode Observations of Solar Spicules and Their Wave-Like Behavior. New Astronomy, 16, 296-305.

Tavabi, E., Koutchmy, S. and Ajabshirzadeh, A., 2011b, Contribution to the Modeling of Solar Spicules. Advances in Space Research, 47, 2019-2029.

Tavabi, E., Koutchmy, S. and Ajabshirizadeh, A., 2013, Increasing the Fine Structure Visibility of the Hinode SOT Ca II H Filtergrams. Solar Phys., 283, 187-194.

Tavabi, E., Koutchmy, S. and Golub, L. (2015). Limb Event Brightenings and Fast Ejection Using IRIS Mission Observations. Solar Phys., 290, 2871-2877.

Tsuneta, S., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., Nagata, S., Otsubo, M., Shimizu, T., Suematsu, Y., Nakagiri, M., Noguchi, M., Tarbell, T., Title, A., Shine, R., Rosenberg, W., Hoffmann, C., Jurcevich, B., Kushner, G., Levay, M., Lites, B., Elmore, D., Matsushita, T., Kawaguchi, N., Saito, H., Mikami, I., Hill, L. D., Owens, J. K. (2008). The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview. Solar Phys., 249, 167-196.

Van de Hulst, H. C. (1953). The Sun Edited by Gerard P. Kuiper. Chicago: The University of Chicago Press, 207.

Wilhelm, K., Abbo, L., Auchère, F., Barbey, N., Feng, L., Gabriel, A. H., Giordano, S., Imada, S., Llebaria, A., Matthaeus, W. H., Poletto, G., Raouafi, N. E., Suess, S. T., Teriaca, L., Wang, Y.M. (2011). Morphology, Dynamics and Plasma Parameters of Plumes and Inter-Plume Regions in Solar Coronal Holes. The Astronomy and Astrophysics Review, 19(1), 35.

Zhang, J.,White, S. M. & Kundu, M. R. (1998). The Height Structure of the Solar Atmosphere from the Extreme-Ultraviolet Perspective. The Astrophysical Journal, 504, L127- L130.

Statistical Analysis of Spicule Inclinations and chromosphere thickness variations

Mollatayefeh, A.[1] and Tavabi, E.[2*]

1. Ph.D. Student, Department of Physics, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Physics, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

(Received: 26 Aug 2021, Accepted: 4 Oct 2022)

Summary

Spicules are intermittently rising above the surface of the Sun eruptions; EUV jets are now also reported immediately above surface layers. The orientation of spicules is a valuable parameter in the absence of direct magnetic field measurements with a sufficient spatial resolution in the chromospheric region because it is presumably determined by the confined flow of plasma, which should occur along the magnetic field lines, especially where the solar magnetic field pressure dominates the gas pressure. Of course, all these measurements suffer from the overlapping effect of spicules seen along each line of sight, the effect of which will be more critical when we look near the solar limb. In the case of macrospicules as well imaged by AIA of the SDO mission using the 304 filter recording the emissions of the HeII, resonance line, an additional effect arises due to the optical thickness of the line, especially on disk and also above the limb in the inner chromospheric shell.

The primary purpose of this paper is to determine automatically and objectively the apparent tilt angle of spicules, using the best available highly processed observations, from the Solar Optical Telescope (SOT) limb imaging experiment by using an H CaII line, onboard Hinode mission. Furthermore, the Hough transform is applied to the resulting images for making a statistical analysis of spicule orientations in different regions around the solar limb, from the pole to the equator. A technique for the automatic detection off-limb spicules was implemented, and statistical measurements were conducted to determine the tilt angle for spicules at different heliocentric angles.

We apply and develop a method with the following steps: (1) To increase the visibility of spicules, a radial logarithmic scale is applied; (2) To enhance linear features, while the Madmax operator is used. We investigated in more detail the apparent inclination of spicules and found the statistically average values for different locations around the solar limb for tilt angle. The results show a large difference of spicule apparent tilt angles in (i) the solar pole regions, (ii) the equatorial regions, (iii) the active regions, and (iv) the coronal hole regions. Analytically, during the minimum solar magnetically activity, from the equator to the poles, the inclination angles of the spicules are getting smaller and their lengths increase. As a result, the chromosphere thickness in this case is thicker than that of the solar maximum activities. When the spicules in the polar coronal holes are significantly inclined, the chromosphere and even transition regions thickness is thinner. Numerically, spicules are visible in a radial direction in the polar regions with a tilt angle <200. The tilt angle is even reduced to 10 degrees inside the coronal hole with open magnetic field lines and at the lower latitude, the tilt angle reaches values over 50 degrees. Usually, around an active region, they show a wide range of apparent angle variations from -60 to +60 degrees, which is in close resemblance to the rosettes that are made of dark mottles and fibrils in projection on the solar disk. However, large-scale activities with short life-time do not play a significant role in the thickness of the chromosphere, and they are removed for long term measurements by averaging. Therefore, this study considers the most statistical population of spicules in the minimum (and maximum) solar activity in the polar regions, and in lower latitude, to be considered as their inclination angles. While at the maximum laps of solar cycle, the opposite result will be expected, and fully confirmed, and give us a topological reason for the chromospheric prolateness at minimum activities.

Keywords: chromosphere, solar corona, coronal hole, solar cycle, chromosphere prolateness, Hough Transform.

* Corresponding author: e_tavabi@pnu.ac.ir