

دسته‌بندی تاریکی‌های کوچک‌مقیاس از فوران‌های تابش‌های فرابنفش دور خورشید با استفاده از نظریه گراف

سمیه بازرگان، حسین صفری و هادی کاشی‌ساز

دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۳/۳۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱/۲۴)

چکیده

تاریکی‌های تاجی در مقیاس بزرگ و کوچک با استفاده از تصاویر فرابنفش دور تلسکوپ ماهواره اس‌دی‌او قابل مشاهده هستند. این تاریکی‌ها در برخی موارد با روشنایی‌هایی شبیه به موج همراه هستند که به پرتاب‌های جرم تاجی معروف‌اند. در این مقاله داده‌های قرص کامل خورشید ۳ مارس ۲۰۱۲ در طول موج ۱۷۱ آنگستروم و با آهنگ زمانی ۲٫۵ دقیقه و اندازه سلول ۰٫۶ ثانیه قوسی تحلیل شده است. تاریکی‌های کوچک‌مقیاس با استفاده از گشتاور زرنیک و ماشین بردار پشتیبان شناسایی شده‌اند. تعداد ۵۳۸ رویداد برای ناحیه فعال، تعداد ۶۸۰ رویداد برای چاله تاجی و ۷۲۳ رویداد مربوط به ناحیه آرام توسط الگوریتم شناخته شده است. موقعیت، بازه زمانی و گسترش فضایی رویدادها معین شده‌اند. پدیده‌های انفجاری در زمان‌های پس از انفجار دارای آهنگ گسترش فضایی بیشتر نسبت به پدیده‌های گرمایی هستند. این ویژگی در طول مشخصه گراف آنها قالب تشخیص است. در ادامه با استفاده از نظریه گراف، تاریکی‌های کوچک‌مقیاس انفجاری و گرمایی با خطای حدود ۱۳ درصد از تعداد ۲۰۰ تاریکی، تعداد ۶۸ مربوط به پدیده‌های گرمایی و ۱۳۲ مربوط به پدیده‌های انفجاری دسته‌بندی شده است. بدین منظور از تحول طول مشخصه گراف برای دسته‌بندی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: خورشید، تاریکی‌های کوچک‌مقیاس، پرتاب‌های جرم تاجی، گشتاور زرنیک، ماشین بردار پشتیبان

۱. مقدمه

تصاویر فرابنفش دور خورشید تنها با روش‌های داده‌کاوی امکان‌پذیر است، هر چند پلادچیکوا و همکاران (۲۰۰۵) تعدادی از تاریکی‌ها با ابعاد بزرگتر را از تصاویر تفاضلی آشکار سازی نموده‌اند [۱]، علیپور و همکاران با ارایه یک روش امیدوار کننده و استفاده از تصاویر متوسط‌گیری فضا زمان، بر پایه طبقه‌بندی کننده خودکار تعداد قابل ملاحظه‌ای از تاریکی‌های

تاریکی‌های کوچک‌مقیاس^۱ از جمله سیماهای تاریکی مهم برای مطالعه دینامیک و تغییرات سریع تاج خورشید هستند. مشاهده ریز تاریکی‌ها به دلیل ابعاد کوچک آنها (در حدود ۵۰-۴۰ ثانیه قوسی روی خورشید) و طول عمر کم (حدود ۵۰ دقیقه) از

۱. Mini dimmings

بنا به دلایلی که گفته شد، در این مقاله از گراف و ویژگی‌های آن جهت دسته‌بندی تاریکی‌های کوچک‌مقیاس در خورشید استفاده می‌شود. در اینجا به بررسی گراف‌هایی پرداخته می‌شود که وزن دار و فاقد حلقه باشند و با ویژگی‌هایی همانند طول مشخصه^۳ دسته‌بندی می‌شوند.

۲. تحلیل داده

برای مشاهده تاریکی‌های کوچک‌مقیاس از تصاویر فرابنفش دور ماهواره اس‌دی‌او^۴ در طول موج ۱۷۱ آنگستروم در تاریخ ۳ مارس ۲۰۱۲ استفاده می‌کنیم. تصاویر مورد استفاده در اینجا دارای آهنگ زمانی ۱۵۰ ثانیه و دقت فضایی ۰٫۶ ثانیه قوسی است. تصاویر در هر روز نسبت به اولین تصویر تطبیق مختصات داده شده‌اند. دو مرحله پیش پردازش جهت تصحیحات انجام می‌گیرد:

۱. پیش پردازش جهت تصحیحات جریان تاریک^۵ و میدان تخت^۶ و دیگر خطاهای ابزاری از تصویر کسر می‌شود. در این صورت تصاویر اولیه سطح صفر به سطح یک تبدیل می‌شوند.
۲. به دلیل چرخش دیفرانسیلی خورشید، تصاویر نیاز به تطبیق مختصات دارند. برای این کار از دستور SSWDB با استفاده از بسته نرم افزاری تحت نرم افزار آی‌دی‌ال^۷ استفاده می‌شود.

۳. تاریکی‌های کوچک‌مقیاس

در این مقاله با تکیه بر روش علیپور و همکاران برای تشخیص تاریکی‌های کوچک‌مقیاس مراحل زیر انجام شده است: برای تعداد ۵۷۶ تصویر تصحیحات خطای ابزاری و تطبیق مختصات انجام می‌گیرد. به منظور افزایش دقت، اندازه تصاویر را از ۴۰۹۶ به ۲۰۴۸ تغییر می‌دهیم، در این صورت اندازه

کوچک‌مقیاس را استخراج کرده‌اند. در روش آنها تاریکی‌های مختلف، با منشأ انفجاری و دمایی، شناسایی می‌شوند و امکان دسته‌بندی بیشتر وجود ندارد [۲]. مطالعه تاریکی‌های کوچک‌مقیاس با منشأ انفجاری و دمایی می‌تواند نقش مهمی در فهم گرمایش تاج ایفا کند. در این مقاله روشی نو بر پایه نظریه گراف برای دسته‌بندی خودکار تاریکی‌های کوچک‌مقیاس ارائه می‌شود و تاریکی‌های انفجاری و دمایی پس از شناسایی با روش علیپور، صفری و اینس دسته‌بندی می‌شوند.

تاریکی‌های تاجی همانند حفره‌های تاج ناپایدار هستند و به صورت کاهش شدت در تصاویر فرابنفش دور و ایکس مشاهده می‌شوند. آنها به طور ناگهانی به وجود می‌آیند و تا چند ساعت بعد از فوران گسترش می‌یابند. تاریکی‌ها به طور کلی تحت تأثیر دو عامل به وجود می‌آیند:

۱. تاریکی ممکن است به دلیل کاهش چگالی و انفجار پلاسما ایجاد شود. فوران میدان مغناطیسی موضعی که منجر به گسترش حلقه‌های مغناطیسی تا فضای میان سیاره‌ای می‌شود که به پرتاب جرم تاجی^۱ معروف‌اند.
۲. کاهش شدت در پلاسما تاج ممکن است به علت تغییرات دمایی و کاهش دما ایجاد شود [۳]. مطالعه پدیده‌های بزرگ مقیاس که دارای تاریکی، مرکز رویداد و پیشران موجی هستند، توسط علیپور و صفری (۲۰۱۲) آورده شده است [۴].

پیشرفت‌های اخیر در ریاضیات، به ویژه در کاربردهای آن موجب گسترش چشمگیر نظریه گراف شده است، به گونه‌ای که هم اکنون نظریه گراف ابزار بسیار مناسبی برای تحقیق در زمینه‌های گوناگون مانند نظریه کدگذاری، آمار، علوم رایانه، شیمی، زیست‌شناسی، علوم اجتماعی و سایر زمینه‌ها شده است. با گراف می‌توان به راحتی یک نقشه بسیار بزرگ یا شبکه‌ای عظیم را در درون یک ماتریس به نام ماتریس مجاورت ذخیره کرد و با الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم دایجسترا^۲ یا الگوریتم کروسکال و غیره را بر روی آن اعمال نمود.

۳. Characteristic length

۴. Solar Dynamic Observatory (SDO)

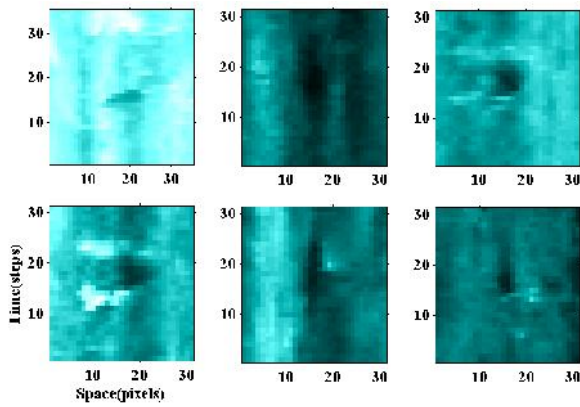
۵. Dark current

۶. Flat field

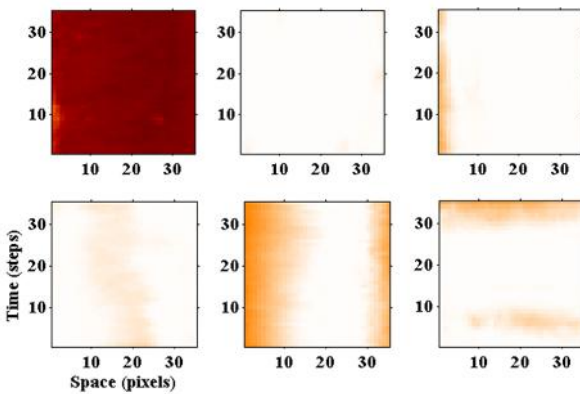
۷. IDL

۱. Coronal mass ejection

۲. Dijkstra algorithm



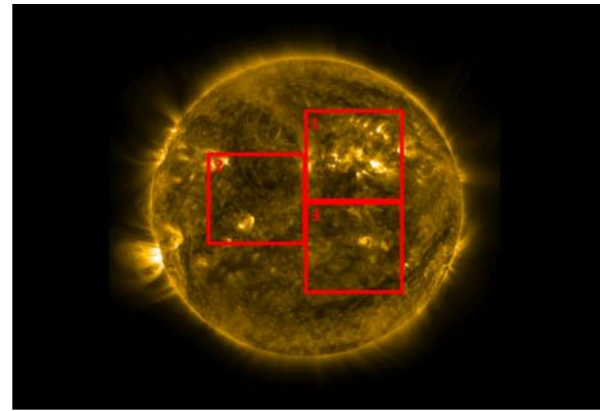
شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمونه‌ای از رویدادهای مشاهده شده در تصاویر فضا-زمان. هر پیکسل در تصاویر ثبت شده، ۱۷۱ آنگستروم خورشید در حدود ۰/۶ ثانیه قوسی (هر ثانیه قوسی در حدود ۷۲۵ کیلومتر) از سطح خورشید است.



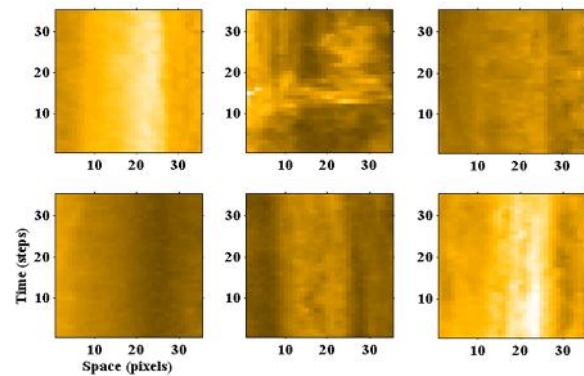
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمونه‌ای از غیر رویدادهای کلاس ۳. توضیحات بیشتر در زیرنویس شکل ۲ آورده شده است.

گشتاور زرنیک^۱ ناحیه بزرگتری به مرکز کمترین مقدار شدت $\Delta x = 35$ و $\Delta t = 35$ را محاسبه می‌کنیم.

گشتاور زرنیک تصاویر فضا-زمان به عنوان ورودی به ماشین بردار پشتیبان^۲ آموزش داده شده و برچسب‌هایی به هر داده خروجی داده شده که مشخص کننده نوع داده در سه کلاس رویداد (شکل ۲) و غیر رویداد (شکل ۳) است. رویدادهایی که در فاصله کمتر از $U_x = 17$ و $U_y = 17$ و زمان کمتر از $\Delta t = 10$ از هم قرار دارند، به عنوان رویداد شناخته می‌شوند. در این پژوهش تعداد ۳۴۳ رویداد، ۱۰۰۰ غیر رویداد



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر قرص کامل خورشید از تلسکوپ اس‌دی‌او در طول موج ۱۷۱ آنگستروم. نواحی ۱، ۲ و ۳ برای تشخیص تاریکی‌های جرم تاجی انتخاب شده است.



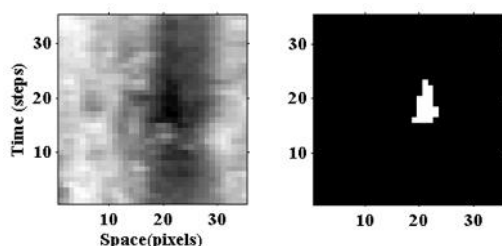
شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمونه‌ای از غیر رویدادهای کلاس ۲. توضیحات بیشتر در زیرنویس شکل ۲ آورده شده است.

پیکسل‌ها دو برابر می‌شوند. سپس نواحی ۱ و ۲ و ۳ به اندازه 501×501 سلول برای مطالعه مطابق شکل ۱ انتخاب می‌شوند که در آن ناحیه ۱ ناحیه فعال، ناحیه ۲ مربوط به تعدادی پدیده و ناحیه ۳ مربوط به ناحیه آرام می‌باشند. سپس تصاویر فضا-زمان از طریق میانگین‌گیری سه سلول در راستای y ایجاد می‌شود [۲].

اینس و همکاران نشان دادند که تاریکی‌های کوچک‌مقیاس دارای گسترش فضایی ۴۰ ثانیه قوس و گسترش زمانی ۵۰ دقیقه هستند [۵]. بنابراین با شروع از $x=1$ برای هر تصویر فضا-زمان به اندازه $\Delta x = 13$ و $\Delta t = 13$ را جدا کرده و کمترین مقدار شدت را در آن ناحیه معلوم می‌کنیم. سپس

۱. Zernike moments

۲. Support vector machine



شکل ۶. رشد ناحیه‌ی مربوط به شکل ۵ سمت چپ. با توجه به شکل، گسترش فضایی در زمان‌های متوالی از یک پدیده که به آرامی گسترش می‌یابد، نشان داده شده است.

که به وضوح انفجاری یا دمایی بودن آنها به صورت بصری قابل تشخیص هستند، در نظر گرفته می‌شوند.

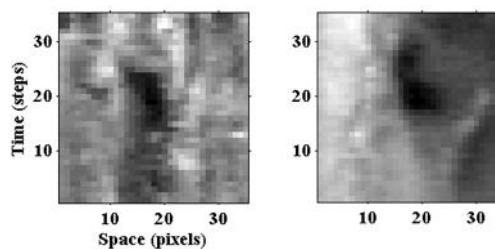
۲. با استفاده از الگوریتم رشد ناحیه، با انتخاب آستانه‌ی شدت^۱ مناسب ناحیه‌ی تاریکی‌های کوچک‌مقیاس از بقیه‌ی تصاویر فضا زمان استخراج می‌شوند (شکل ۶). سپس مستطیلی در ابعاد بیشترین تعداد پیکسل‌های افقی و عمودی ناحیه‌ی تاریکی را در نظر می‌گیریم. طول این ناحیه‌ی مستطیلی برابر با بیشینه‌ی گستردگی ناحیه‌ی تاریکی در امتداد محور افقی در تصاویر فضا- زمان و عرض این ناحیه برابر با بیشینه‌ی گستردگی ناحیه‌ی تاریکی در امتداد محور عمودی این تصاویر است.

۳. گراف مربوط به ناحیه‌ی مستطیلی به شکل زیر ساخته می‌شود: پیکسل‌های هر ردیف به عنوان رئوس یک گراف مجزا در نظر گرفته می‌شوند. از این رو به تعداد n_y گراف مجزا که تعداد رأس‌های همه‌ی آنها یکسان و برابر n_x است، خواهیم داشت. n_x و n_y به ترتیب تعداد پیکسل‌های طولی و عرضی تصاویر فضا- زمان است.

گراف‌ها را از نظر هندسی کامل در نظر می‌گیریم و وزن یال‌ها به صورت تفاضل شدت هر پیکسل از پیکسل‌های بعدی در یک ردیف، با استفاده از رابطه

$$\text{وزن} = 1 - \frac{|I(j) - I(i)|}{\text{Max}(I)} \quad (1)$$

۱. Threshold



شکل ۵. نمونه‌ای از تاریکی که منشأ دمایی دارد، این گروه تاریکی گستردگی فضایی مشخصی ندارند (سمت چپ) و نمونه‌ای از تاریکی که منشأ انفجاری دارد، این گروه تاریکی در ابتدا به دلیل انفجار، گسترش فضایی بالایی دارند و سپس به آرامی از بین می‌روند (سمت راست، از پایین به بالا).

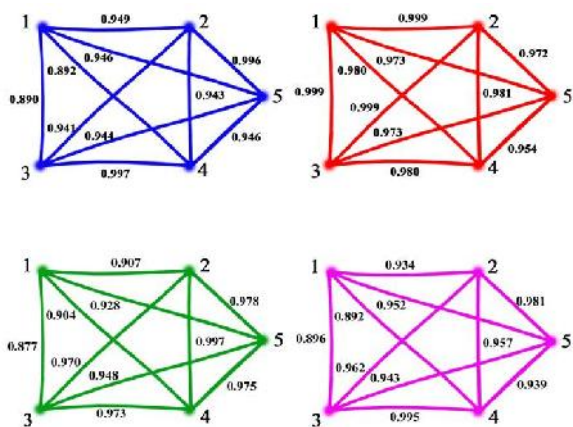
کلاس دو و ۵۴ غیر رویداد کلاس سه، به ماشین بردار پشتیبان آموزش داده می‌شود [۲]. نتایج به دست آمده به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

ماشین بردار پشتیبان تعداد ۵۳۸ رویداد برای ناحیه‌ی ۱ که مربوط به ناحیه‌ی فعال روی خورشید است، تخمین زده است. ناحیه‌ی ۲ مربوط به چاله‌ی تاجی و ناحیه‌ی ۳ مربوط به ناحیه‌ی آرام هستند، که به ترتیب تعداد ۶۸۰ و ۷۲۳ رویداد توسط الگوریتم شناخته شده است. به دلیل وجود روشنایی در ناحیه‌ی فعال انتظار می‌رود که تعداد تاریکی‌های کوچک‌مقیاس در نواحی آرام بیش از نواحی فعال باشد که با نتایج به دست آمده مطابقت دارد.

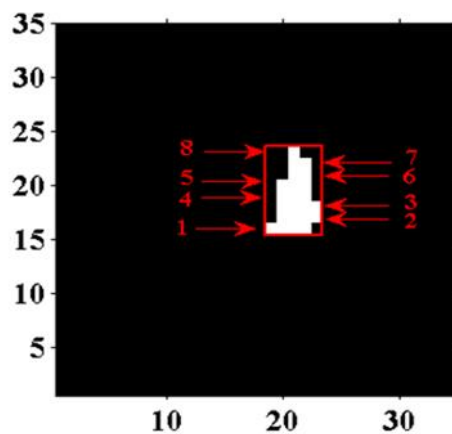
۴. دسته‌بندی تاریکی‌های کوچک‌مقیاس

تاریکی‌های کوچک‌مقیاس تحت تأثیر دو عامل انفجاری و دمایی شکل می‌گیرند [۶]. نحوه‌ی تمیز این دو گروه تاریکی از یکدیگر، به صورت بصری امکان‌پذیر است. تاریکی‌های کوچک‌مقیاس انفجاری در ابتدا به دلیل انفجار، گسترش فضایی بالایی دارند و با گذشت زمان به آرامی از بین می‌روند (در شکل ۵ سمت راست، از پایین به بالا). تاریکی‌های کوچک‌مقیاس دمایی برخلاف دسته‌ی اول گستردگی فضایی مشخصی ندارند. در شکل ۵، نمونه‌ای از هر دو گروه تاریکی آورده شده است. جهت تمیز این دو گروه تاریکی مراحل زیر انجام می‌شود:

۱. از خروجی کد شناسایی خودکار (علیپور، صفری، اینس ۲۰۱۲) تعداد قابل ملاحظه از تاریکی‌های کوچک‌مقیاس



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) گراف مربوط به ردیف اول تا چهارم به همراه وزن یال‌ها از ناحیه انتخاب شده شکل ۷.

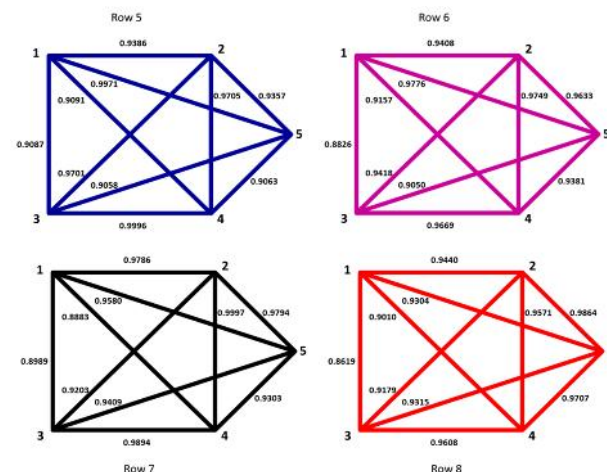


شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ردیف‌های مربوط به ساخت گراف در ناحیه مستطیلی قرمز رنگ. محور افقی مختصه فضایی بر حسب پیکسل و محور عمودی زمان بر حسب ثانیه است. توضیحات بیشتر در زیرنویس شکل ۲ آورده شده است.

$$L = \frac{1}{N_n(N_n - 1)} \sum_{\substack{i, j \in V \\ i \neq j}} d_{ij} \quad (2)$$

که در آن N_n تعداد رئوس گراف و d_{ij} کوتاهترین مسیر بین تمام راس‌های i و j است [۷]. در این مقاله به عنوان یک روش ابتکاری و جدید برای دسته‌بندی تاریکی‌های کوچک‌مقیاس از این ویژگی استفاده شده است. برای محاسبه طول مشخصه، ابتدا باید کوتاهترین مسیر بین تمام رئوس با یکدیگر محاسبه شود. در این مقاله جهت محاسبه کوتاه‌ترین مسیر بین رئوس از الگوریتم دایجسترا بهره برده‌ایم، زیرا از نظر محاسباتی توانمندتر است [۸].

بنابراین طول مشخصه مربوط به هر ردیف از مینی تاریکی محاسبه شده و الگوی تغییر آنها نشان داده می‌شوند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تحول زمانی طول مشخصه مربوط به هر تاریکی نشان داده شده است. می‌دانیم که رویدادهای انفجاری با توجه به ماهیت آنها که ناشی از اتصالات مغناطیسی است، دارای آهنگ گسترش فضایی بیشتر نسبت به رویدادهای آرام با منشأ دمایی هستند. گسترش سریع رویدادهای انفجاری مشخصه مهمی از آنهاست، که در طول مشخصه گراف‌های ایجاد شده از آنها خود را نشان می‌دهد. بدین منظور چون در زمان‌های اولیه هر پدیده انفجاری گسترش فضایی آن زیاد است. انتظار می‌رود

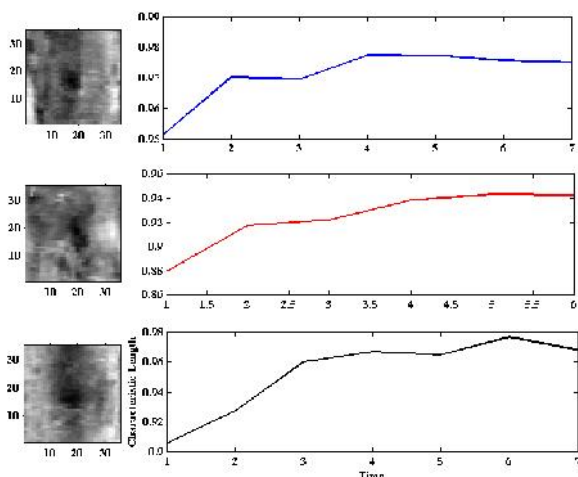


شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) گراف مربوط به ردیف چهارم تا هشتم به همراه وزن یال‌ها از ناحیه انتخاب شده در شکل ۷.

محاسبه می‌شود که در آن $I(i)$ و $I(j)$ به ترتیب رأس مورد نظر و رأس همسایه و $\text{Max}(I)$ بیشترین شدت در ناحیه تاریکی است. در شکل‌های ۸ و ۹ نمونه‌ای از گراف مطابق مرحله بالا آورده شده است.

۵. مشخصات ساختاری گراف تاریکی‌های کوچک‌مقیاس

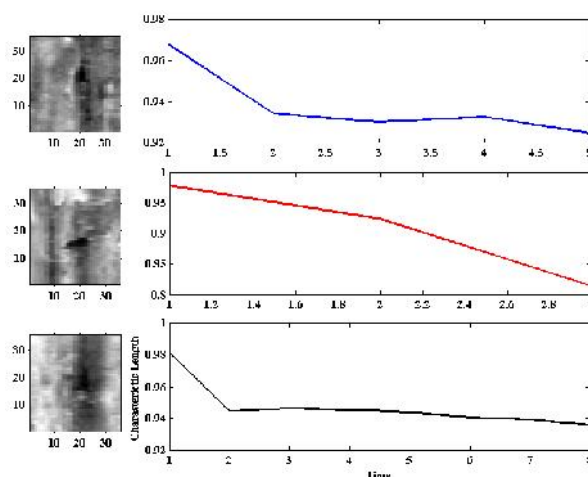
یکی از مهمترین مشخصات گراف‌ها، طول مشخصه است که با رابطه زیر بیان می‌شود:



شکل ۱۱. نمونه‌هایی از تحول زمانی طول مشخصه گراف‌های هر ردیف تاریکی دمایی.

استفاده از این روش، تعداد رویدادها در سه ناحیه از قرص خورشید در طول یک روز برآورد شده است. تعداد ۵۳۸ رویداد برای ناحیه فعال، تعداد ۶۸۰ رویداد برای ناحیه‌ای که مربوط به تعدادی پدیده است و تعداد ۷۲۳ رویداد مربوط به ناحیه آرام شناخته شده است. در روش علیپور و همکاران (۲۰۱۲) در حدود ۵ درصد خطا (به صورت خطای مثبت) ذکر شده است. به دلیل وجود روشنایی در ناحیه فعال انتظار می‌رود که تعداد تاریکی‌های کوچک‌مقیاس در نواحی آرام بیش از نواحی فعال باشند که با نتایج به دست آمده مطابقت دارد. در ادامه برای تعداد ۲۰۰ رویداد کوچک‌مقیاس برای تشخیص انفجاری و دمایی بودن مطالعه شدند. با استفاده از روش رشد ناحیه، ناحیه مربوط به قسمت تاریکی مربوطه، شناسایی (شکل ۶) و با استفاده از نظریه گراف، گراف مربوط به هر ردیف از ناحیه تاریکی ساخته شده‌اند.

سپس از ویژگی طول مشخصه گراف جهت دسته‌بندی این رویدادها استفاده شده است، (شکل ۱۰) و (شکل ۱۱). الگوی تغییر هر ردیف تاریکی کوچک‌مقیاس و تحول زمانی طول مشخصه آنها محاسبه شده است. با استفاده از این روش از مجموع ۲۰۰ رویداد، تعداد ۶۵ رویداد در دسته تاریکی‌های انفجاری و ۱۳۵ رویداد دمایی تشخیص داده شدند. با بررسی



شکل ۱۰. نمونه‌هایی از تحول زمانی طول مشخصه گراف‌های هر ردیف تاریکی انفجاری. زمان بر حسب ثانیه و طول عمر آمده است. واحد تصاویر فضا زمان در شکل ۲ و زیرنویس آن توضیح داده شده است.

که پس از انفجار، آهنگ گسترش فضایی کاهش یابد که متعاقب آن طول مشخصه گراف دارای شیب نزولی باشد. سپس با استفاده از برازش نمودارها مشاهده می‌کنیم که در رویدادهای انفجاری تحول زمانی طول مشخصه دارای شیب منفی است و برای رویدادهای گرمایی تحول زمانی طول مشخصه شیب مثبت دارد. این مشخصه، تفاوت بارز میان این دو گروه تاریکی را نشان می‌دهد. در این روش از این معیار جهت دسته‌بندی دو نوع رویداد انفجاری و دمایی استفاده شده است.

محاسبه طول مشخصه و نمودار تحول زمانی برای ۶۵ رویداد از تاریکی‌های کوچک‌مقیاس انفجاری و ۱۳۵ رویداد از تاریکی‌های دمایی انجام شده و حدود ۱۳ درصد خطای نسبی برای این دسته‌بندی شناسایی شد. رویدادهای خیلی کوچک و یا رویدادهای خیلی بزرگ و همچنین تعیین آستانه شدت برای رشد ناحیه بیشترین تأثیر را در میزان خطاها داشته‌اند.

۶. نتایج و خلاصه

در این مقاله ابتدا با استفاده از روش علیپور و همکاران، تاریکی‌های کوچک‌مقیاس تصاویر فرابنفش دور خورشید در طول موج ۱۷۱ آنگستروم از داده‌های تلسکوپ اس‌دی‌او در تاریخ ۳ مارس ۲۰۱۲ مشاهده و شناسایی شده‌اند (شکل ۲). با

نشده‌اند، عدم وضوح در تصاویر مربوطه از دلایل ایجاد خطای روش حاضر عنوان می‌شود. به طوری که با افزایش وضوح تصاویر فضا- زمان، روش ذکر شده می‌تواند با خطای کمتری رویدادها را به دو دسته دمایی و انفجاری تفکیک کند.

مجدد این رویدادها به صورت چشمی مشخص شد که در مجموع تعداد ۲۶ رویداد، شامل ۱۰ رویداد انفجاری و ۱۶ رویداد دمایی به درستی تشخیص داده نشده‌اند. با بررسی شکل ظاهری و سری زمانی رویدادهایی که درست تشخیص داده

مراجع

1. O Podladchikova and D Berghmans, "Solar Physics", Springer (2005) 228.
2. N Alipour, H Safari, and D E Innes, *Astro Phys. J.* **746** (2012) 12.
3. G D R Attril and M J Wills-Davey, "Solar Physics", Springer (2009) 262.
4. N Alipour and H Safari, *Iranian Journal of Physics Research* **12**, 1 (2012) 29.
5. D E Innes *et al.*, *Astron. Astrophys.* **495** (2009) 319.
6. B J Thompson *et al.*, *Geophysical Research Letters* **25** (1998) 2461.
7. A Barrat, M Barthelemy, and A Nespignani, "Dynamical Processes on Complex Networks," Cambridge University Press (2008).
8. T H Cormen, C E Leiserson, R L Rivest, and C Stein, "Introduction to Algorithm", Massachusetts Institute of Technology Press (2009).
9. ن علیپور راد و ح صفری، «پرتاب‌های بزرگ و کوچک مقیاس جرم از تاج خورشید»، مجله پژوهش فیزیک ایران **۱۲**، ۱ (۱۳۹۱) ۲۹.