

Research Paper

Extraction of the Intensity and Temperature of a Solar Coronal Loop with the Help of Images of the SDO Space Telescope¹

Narges Fathalian²

Received:2020.10.09

Revised:2020.12.13

Accepted:2021.02.09

Abstract

In this paper, we extract the intensity and temperature of a solar coronal loop, using images taken by AIA instrument of the SDO space telescope. The selected data are for the active region 11092, at 4th of August, 2010, at 171, 193, 94, and 211 Å wavelengths. The selected images were taken in the time interval between 13:30 and 18:00. The images size is 1000 by 833 pixels and after pre-processing and subtracting the background, these images were cropped due to the area of the selected loop. The loop was then extracted by the method of OC-CULT (Ashunden, 2010) and its intensity variations were investigated. In the method used here, with the help of intensity ratios and temperature response ratios of different filters, the peak of the loop temperature was estimated to be 7 million Kelvin. Also, using the CHIANTI code, the maximum temperature of the loop was found to be equal to 7.2 million degrees, which is close to the estimated result.

Keywords: *Corona, Solar Active Region, SDO, Corona Image Processing, Loops Extraction, Temperature Analysis.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.33446.1177

² Assistant Professor, Department of Physics, PayameNoor University (PNU), P.O.Box 19395-3697, Tehran, Iran. Email: narges.fathalian@gmail.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال دهم، پیاپی ۲۲، پاییز ۱۳۹۹

مقاله پژوهشی

استخراج شدت و دمای حلقه تاجی خورشید با کمک تصاویر تلسکوپ فضایی اس دی او^۱

نرگس فتحعلیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

چکیده

ما در این مقاله، شدت و دمای حلقه تاجی خورشیدی را با استفاده از تصاویر ابزار AIA از تلسکوپ فضایی SDO استخراج می‌کنیم. داده‌های انتخابی مربوط به ناحیه فعال ۱۱۰۹۲ در تاریخ ۴ اوت ۲۰۱۰ و در طول موج‌های ۱۷۱، ۲۱۱، ۱۹۳ و ۹۴ آنگستروم هستند. تصاویر انتخابی در بازه زمانی ۱۳:۳۰:۰۰ تا ۱۸ گرفته شده‌اند. اندازه تصاویر ۱۰۰۰ در ۸۳۳ پیکسل است و این تصاویر پس از انجام عملیات پیش‌پردازش و کم کردن زمینه، با توجه به ناحیه حلقه انتخابی برش داده شدند. سپس استخراج حلقه به روش ردیابی سمتی حلقه‌های تاج (OCCULT) (اشوندن، ۲۰۱۰) صورت گرفت و بررسی تغییرات شدت آن انجام شد. در روش به کاررفته در اینجا، با کمک نسبت‌های شدت و نسبت‌های پاسخ‌های دمایی فیلترهای مختلف، قله دمایی حلقه مذکور معادل ۷ میلیون

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2021.33446.1177

^۲ استادیار فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران.

Email: narges.fathalian@gmail.com

کلوین تخمین زده شد. همچنین با استفاده از کد CHIANTI نیز بیشینه دمای حلقه مذکور معادل ۲/۷ میلیون کلوین به دست آمد که به نتیجه تخمین زده نزدیک است.

واژگان کلیدی: تاج خورشید، نواحی فعال خورشیدی، تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او، پردازش تصاویر تاج، استخراج حلقه‌ها، تحلیل دما.

۱. مقدمه

تصاویر خورشید در نواحی فرابنفش دور (EUV)، اشعه ایکس نرم (SXR) و دیگر نواحی طول موجی توسط تلسکوپ‌های مداری، سوهور، تریس، استرو، هینوده، اس‌دی‌او، آیریس، پارکر و دیگر مأموریت‌های فضایی ضبط می‌شود. تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او (ODS)^۱ در ۱۱ فوریه ۲۰۱۰ در مدار خود قرار گرفت و در اینجا از داده‌های آن استفاده می‌کنیم. این تلسکوپ حجم بسیاری داده، معادل ۱٫۶ ترابایت اطلاعات در روز برای ما ارسال می‌کند. تصاویر ارسالی فرابنفش دور (فرین) خورشید اطلاعات زیادی درباره ساختار رنگین سپهر، ناحیه گذار و تاج و میدان مغناطیسی خورشید در اختیار ما می‌گذارد. تحلیل معنادار و دقیق داده‌ها تنها در صورتی انجام می‌پذیرد که انتخاب و تعریف وقایع و پدیده‌های تاج، مشخص و خودسازگار باشد. همچنین تحلیل حلقه‌های نواحی فعال تاج خورشید به ما در بررسی همبستگی میان مکان حلقه‌ها در این نواحی و تغییرات دمایی آن‌ها کمک می‌کند. بدین منظور، حجم وسیع اطلاعات و تصاویر دریافتی باید تحلیل و پردازش شوند. زمان بر بودن و خطای زیاد روش‌های دستی در کنار افزایش حجم و پیچیدگی داده‌ها ضرورت گسترش ابزارهای تحلیل خودکار داده‌ها را ایجاد می‌کند. به ویژه، بررسی حلقه‌های تاج خورشید نیازمند استخراج دقیق آن‌ها از تصاویر ارسالی از تلسکوپ‌های فضایی است.

مسئله گرمایش تاج یکی از جالب‌ترین مسائل در اخترفیزیک ستاره‌ای است. استفاده از آزمایش‌های عددی پیشرفته، از جمله تحلیل تابش تاجی، به ما امکان می‌دهد که مراحل گرمایش تاجی را مطالعه کنیم. افزایش دانش ما از مشخصات حلقه‌ها می‌تواند به فهم ما از چگونگی نوسانات حلقه‌ها و تأثیر آن در گرمایش تاج خورشید کمک کند. از این‌رو بررسی سازوکار و ویژگی نوسانات حلقه‌های تاجی حائز اهمیت است. پیش از این کارهای مختلفی در زمینه نوسانات حلقه‌های تاجی صورت گرفته است. برای مثال نخستین بار اشوندن و همکاران در ۱۹۹۹

^۱ Solar Dynamic Observatory

مشاهده نوسانات حلقه‌های تاجی را با کمک داده‌های ماهواره TRACE در طول موج ۱۷۱ آنگستروم گزارش کردند (اشوندن و همکاران ۱۹۹۹). ناکاریاکوف و همکاران در ۱۹۹۹ مشاهدات ماهواره TRACE را از نوسانات میرای حلقه‌های تاج گزارش کردند و آن را پیامد گرمایش تاج دانستند (ناکاریاکوف و همکاران، ۱۹۹۹). در این زمینه ناکاریاکوف و آفمن (۲۰۰۱)، از نوسانات حلقه تاجی برای مشخص کردن میدان مغناطیسی در تاج استفاده کردند (ناکاریاکوف و آفمن، ۲۰۰۱). کرمی و اسوار (۲۰۰۷) و صفری و همکاران (۲۰۰۷) نوسانات حلقه‌های تاج با لایه‌بندی طولی چگالی را بررسی کردند (کرمی و اسوار، ۲۰۰۷؛ صفری و همکاران، ۲۰۰۷). رودرمن و اردلی (۲۰۰۹) نوسانات عرضی حلقه‌های تاج خورشید را با تأکید بر نوسانات عرضی مشاهده شده توسط ماهواره تریس^۱ مطالعه کردند و درباره اثر لایه‌بندی، انبساط حلقه، انحنای حلقه، سطح مقطع غیر دایره‌ای، شکل حلقه و پیچش مغناطیسی بحث کردند (رودرمن و اردلی، ۲۰۰۹). لونا و همکاران (۲۰۱۰) مدهای نرمال شبه کینگ جمعی را برای سیستمی از حلقه‌های تاجی مطالعه کردند (لونا و همکاران ۲۰۱۰). با بررسی دقیق تصاویر حلقه‌ها پاسخ این سؤال که آیا حلقه‌ها به طور سیستمی (دسته جمعی) (برای بحث نوسانات دسته جمعی حلقه‌ها برای مثال ن. ک. لونا و همکاران (۲۰۱۰) و فتحعلیان و صفری (۲۰۱۰)) یا به شکل منفرد، نوسان می‌کنند می‌تواند به شکل مشاهداتی روشن تر شود. تاران و صفری از ممان‌های تصویر برای شناسایی حلقه‌های تاج خورشید کمک گرفتند (تاران و صفری، ۱۳۹۱)، صفری و همکاران برای شناسایی حلقه‌ها و آشکارسازی نوسانات آن‌ها از شبکه‌های عصبی استفاده کردند (صفری و همکاران، ۱۳۹۳). عابدینی سرعت فاز و میرایی فرکانسی نوسانات شدت طولی را در ساختارهای حلقه‌های تاج بررسی کرده است (عابدینی، ۲۰۱۶).

اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۶) ویژگی‌های توابع موج نوسانات مگنتوهیدرودینامیک را برای لوله‌های مغناطیسی منفرد و همچنین سیستمی از آن‌ها را بررسی کردند (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۶). پاسکو و همکاران (۲۰۲۰) شبیه‌سازی‌های عددی را برای مطالعه نوسانات و تکامل حلقه‌های تاجی در محیط دینامیک به کار بردند (پاسکو و همکاران (۲۰۲۰)).

کارهای مختلفی در زمینه محاسبه دما و بررسی ساختار دمایی حلقه‌های تاج انجام گرفته است. برای مثال، اشملز و همکاران (۲۰۱۰) یک حلقه تاجی را با کمک ابزار AIA با منحنی‌های تابش دیفرانسیلی (DEM)^۲ تحلیل کردند و مدعی شدند که توزیع DEM در سطح مقطع حلقه

^۱ TRACE

^۲ Differential Emission Measure

تک‌دما نیست بلکه چنددمایی است (اشملز و همکاران، ۲۰۱۰). اما اشوندن و بوئرتر (۲۰۱۰) این کار اشملز و همکاران را نقد کردند و مشکل را منوط به روش آن‌ها در کاهش زمینه دانستند (اشوندن و بوئرتر، ۲۰۱۰). این بحث در زمینه چنددمایی یا تک‌دمایی بودن سطح مقطع حلقه‌ها توسط اشملز و همکاران (۲۰۱۳) ادامه یافت (اشملز و همکاران، ۲۰۱۳). آن‌ها در این کار خود در یافتند که حلقه‌های گرم‌تر DEM‌های گسترده‌تری نیاز دارند. سپس اشملز و همکاران (۲۰۱۴) بحث کردند که حلقه‌های سردتر DEM‌های باریک‌تری دارند (اشملز و همکاران، ۲۰۱۴). ون-دورسلا و همکاران (۲۰۱۱) نیز از خطوط طیفی استفاده کردند تا دمای مد نظر را (به وسیله بسته نرم‌افزاری CHIANTI) به دست آورند و بر طبق آن شاخص بی‌درروی تاج را تخمین بزنند^۱ (ون‌دورسلا و همکاران، ۲۰۱۱). اشوندن و همکاران (۲۰۱۵) نیز (در ادامه کار قبلی‌شان در ۲۰۱۳) در این زمینه روشی را برای محاسبه دمای حلقه گسترش دادند که بر اساس برآزش گوسی برای DEM عمل می‌کرد (اشوندن و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵). فتحعلیان (۲۰۱۸) نیز سرمایش حلقه را در ناحیه مورد بررسی مشاهده کرد و با کمک نسبت‌های شدت دمای حلقه را تخمین زد (فتحعلیان، ۲۰۱۸).

ما در این مقاله به بررسی روش‌های پردازش تصاویر و تشخیص و استخراج حلقه‌های تاج خورشید در نواحی فعال می‌پردازیم (بخش ۲). در قسمت‌های مختلف از بخش ۲ این مقاله، مقدمات مربوط به تشخیص الگو^۲ در تصاویر دیجیتال خورشید را بیان می‌کنیم و بررسی‌های اخیر درباره روش‌های پردازش تصاویر و تشخیص الگو در فیزیک خورشید را معرفی می‌کنیم. سپس در بخش ۳ روش کارمان در استخراج حلقه‌های تاج خورشید و تکنیک‌های لازم برای این امر (گزینش داده‌ها، پیش‌پردازش داده‌ها، کم کردن زمینه و بررسی دمایی) را توضیح می‌دهیم. در بخش آخر (بخش ۴) به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی می‌پردازیم.

۲. روش‌های استخراج حلقه‌های تاج

شناخت دقیق ساختارهای قوسی حلقه‌های تاج در درک صحیح میدان مغناطیسی خورشید و حل مسئله نوسانات حلقه‌های تاج نقش دارد. یک روش استاندارد برای بسیاری کاربردها نیازمند استخراج حلقه‌های روشن است. فیزیک خورشید روش‌های تشخیص لبه را با بسیاری زمینه‌های دیگر در فیزیک و غیر آن سهم می‌شود. پردازش خودکار و بخش‌بندی تصاویر تاج کار دشواری

^۱ اکنون نسخه روزآمد بسته نرم‌افزاری مذکور (۲۰۱۹) در نرم‌افزار (SSW) SoftWare Solar در دسترس است.

^۲ Pattern Recognition

است و به چند دلیل، حتی در وضوح مطلوب با مشکل مواجه می‌شود. نخست آنکه ساختارهای حلقه‌های تاج مرزهای بسیار تار و مبهمی دارند. همچنین ساختارها ممکن است بسیار نزدیک به یکدیگر یا متقاطع باشند. در برخی موارد شکل ساختارهای حلقه ممکن است پیچیده باشد. بسیاری از حلقه‌ها نیز زیربخش‌هایی با تباین^۱ اندک دارند. شدت در این زیربخش‌ها از بقیه کمتر است. همچنین در تصاویر، ساختارهای غیرحلقه‌ای مانند خزّه خورشید (لکه‌های سفید گسترده ابری در تصاویر خورشید) نیز وجود دارد. از دیگر معضلات آن است که حلقه‌ها در تصاویر متقاطعند و شکل‌های پیچیده‌ای دارند که تشخیص جهت را دشوار می‌سازد. متقاطع بودن حلقه‌ها، بسیاری روش‌های تشخیص منحنی مانند تبدیل هاف (۱۹۶۲) و مدل‌های کانتور فعال (مارها) (کاس و همکاران، ۱۹۸۷) و غیره را با مشکل مواجه می‌سازد. در حال حاضر از میان روش‌های مختلفی که برای تشخیص و تقسیم‌بندی خودکار تصاویر تاج موجود است، روش‌هایی مفیدند که در استخراج الگوهای خط‌منحنی در تصاویر تاج خورشید کاربرد داشته باشد (برای مقایسه‌ای میان پنج روش استخراج حلقه‌های تاج نگاه کنید به اشوندن و همکاران، ۲۰۰۸a). مهم‌ترین روش‌ها و الگوریتم‌ها به شرح زیرند.

۱-۲ روش اتصال سمتی لی، نیومن، گری

لی و نیومن و گری (لی و همکاران، ۲۰۰۶a) برای بخش‌بندی تصاویر حلقه‌ها از روش اتصال سمتی (OCM)^۲ استفاده کردند که پیش از آن در طرح‌های تشخیص صورت‌های ساختارمند دیگر مانند تشخیص اثر انگشت به کار رفته بود. در روش اتصال سمتی از الگوریتم استروس استفاده شده است. استروس (۲۰۰۲) روشی را برای تشخیص پیکسل‌های همسایگی حلقه پیشنهاد کرد که بر چسب دوتایی (پیکسل‌های حلقه یا غیرحلقه) برای پیکسل‌ها تولید می‌کرد. این الگوریتم که برای تصاویر حلقه‌های تاج طراحی شده بود، بر اساس در نظر گرفتن شدت‌های پیکسل در همسایگی هر پیکسل بود. اگر شدت هر پیکسل حداقل از دو پیکسل همسایگی‌اش بیشتر باشد، آن پیکسل را به عنوان عضوی از ساختار حلقه برچسب می‌زند. شکل ۱ پیکسل مرکزی P و پیکسل‌های همسایگی آن را نشان می‌دهد. در این شکل پیکسل‌های با شدت بیشتر از P به رنگ روشن و پیکسل‌های با شدت کمتر به رنگ تیره نشان داده شده‌اند. بنا بر این قاعده، در اینجا پیکسل P، به عنوان پیکسل حلقه شناخته می‌شود. این الگوریتم بیشتر پیکسل‌های حلقه را

^۱ Contrast

^۲ Oriented Connectivity-base Method

تشخیص می‌دهد اما نمی‌تواند به تنهایی حلقه را مشخص کند، چون هیچ مرحله‌ای برای اتصال پیکسل‌ها به شکل ساختار حلقه ندارد. به‌علاوه این الگوریتم بسیاری از پیکسل‌های زمینه خزه-شکل^۱ و بسیاری از پیکسل‌های روشنی را که روی حلقه‌های تاج نیستند نیز اشتباهی به عنوان پیکسل حلقه برچسب می‌زند. لی و نیومن و گری با گسترش الگوریتم استروس، از میدان مغناطیسی محلی خورشید برای تخمین و بهبود جهت اتصال لبه‌ها استفاده کردند. آن‌ها نتایج صافی آستانه شدت را به شکل ماسکی بر نتایج الگوریتم استروس اعمال کردند. روش آن‌ها بر اساس اتصال سمتی است که می‌تواند ساختارهای قوسی شکل را به طور خودکار بخش‌بندی کند. این روش یک رویکرد ساختاری است که با راهنمایی مدل مغناطیسی، ساختارهای معتبر حلقه را استخراج می‌کند. از آن‌جا که حلقه‌های تاج نشانه‌های میدان مغناطیسی خورشیدی هستند، پردازش مذکور از تخمین‌های خارجی جهت‌گیری محلی میدان - که از یک مدل مغناطیسی فیزیکی به-دست آمده - استفاده می‌کند. خطاهای این روش، یکی اشتباه ناشی از الگوریتم استروس است که به پیکسل‌های حلقه اشتباه برچسب می‌زند و به کار بردن صافی‌های شدت آستانه نیز قادر نیست همه پیکسل‌های اشتباه را حذف کند. همچنین این صافی‌ها ممکن است برخی پیکسل‌های حلقه را اشتباهی حذف کنند. خطای دیگر ناشی از سادگی مدل فیزیکی به کار رفته است که می‌تواند موجب تشخیص نادرست جهت حلقه‌ها شود. در نقاطی از تاج نیز که اطلاعات مغناطیس‌نگار وجود ندارد، جهت میدان مغناطیسی مشخص نیست و با مشکل مواجه می‌شود.

1	2	3
4	P	5
6	7	8

شکل ۱ پیکسل‌ها در همسایگی 3×3 حول پیکسل P (لی و همکاران، ۲۰۰۶a)

۲-۲ روش روزنه متحرک لی و نیومن و گری

به دلیل مشکلاتی که در روش قبل وجود داشت نیاز به روش‌های دیگری بود و از این رو لی و نیومن و گری (لی و همکاران، ۲۰۰۶b)؛ روش روزنه متحرک (DAM^۲) را برای پردازش خودکار تصاویر تاج مطرح کردند. این روش به شکل سازنده‌ای ساختارهای حلقه‌ای معتبر را با

^۱ Moss background (Aschwanden, 2010)

^۲ Dynamic Aperture-based Method

استخراج شکل شبه گوسی پروفایل‌های شدت سطح مقطع حلقه، بخش‌بندی می‌کند. مزیت این روش نسبت به قبلی آن است که مستقل از داده‌هایی که وابستگی زمانی داشته باشند، عمل می‌کند. در این روش برای حذف تداخل زمینه و ساختارهایی که حلقه نیستند و برای تشخیص حلقه‌هایی که مرز کدروی دارند و افزایش تباین بین حلقه‌ها و زمینه، در مراحل پیش پردازش، از صافی‌های خاصی چون آستانه شدت و صافی میانی استفاده شده‌است.

۳-۲ روش سمتی-جهتی اشوندن

روش سمتی-جهتی (ODM)^۱ از اطلاعات جهتی برای هدایت ردیابی حلقه‌های تاج استفاده می‌کند (اشوندن، ۲۰۰۵). از این لحاظ مشابه روش اتصال سمتی (OCM) است با این تفاوت که فقط از جهت‌یابی محلی استفاده می‌کند در حالی که OCM اتصال کلی بین نقاط انتهایی حلقه‌ها را توسط اطلاعات اولیه‌ای که از مدل میدان مغناطیسی گرفته می‌شود، تخمین می‌زند. این الگوریتم شامل چهار قسمت است: الف) پیش‌پردازش تصاویر به شکلی که بیشترین تباین را برای حلقه‌های کم‌نور ارائه کند، ب) یافتن نقاط شروع حلقه‌ها، ج) ردیابی دو جهتی بخش‌های حلقه به دو انتهای مختلف، د) کاهش نوفه داده‌ها با صاف کردن منحنی‌های حلقه. در مرحله پیش‌پردازش، چندین صافی بالاگذر بر محدوده عرضی مد نظر حلقه اعمال می‌شود. در گام دوم، با جستجوی بیشینه شار (شدت) محلی در ماکروپیکسل‌ها (در اندازه چند ده پیکسل) تصویر صافی شده، نقطه شروع حلقه مد نظر مشخص می‌شود. در گام بعد، یک حلقه با حرکت جعبه جستجو (مثلاً در اندازه 10×10 پیکسل) در طول جهت محلی مورد انتظار در گام‌های کوچک (مثلاً ۵ پیکسل) ردیابی می‌شود. جهت محلی با برازش کردن رگرسیون خطی به مکان‌های بیشینه شار در جعبه جستجو مشخص می‌شود که در آن از بیشینه محلی با شار ضعیف (زیر یک مقدار آستانه) و مکان‌های بیرون از جهت مد نظر چشم‌پوشی می‌شود. جهت حلقه ردیابی شده در مکان بعدی به روز می‌شود و برای بیرون‌یابی مکان حلقه بعد به کار می‌رود. هنگامی که هیچ مکان مناسبی یافت نمی‌شود یا شار، زیر مقدار آستانه است، بخش‌بندی حلقه خاتمه می‌یابد. ردیابی حلقه از نقطه‌ی آغاز در هر دو جهت هدایت می‌یابد تا یک بخش‌بندی کامل از حلقه به دست آید. در گام آخر شدت انحنا هر بخش از حلقه با یک صافی میانی صاف می‌شود تا نوفه ذاتی داده‌ها کاهش یابد. این روش برای تصاویر تلسکوپ فضایی تریس به کار برده شد.

^۱ Oriented-Direction Method

۴-۲ تشخیص خودمقیاس لبه اینهستر، فنگ، ویگلن

روش تشخیص خودمقیاس لبه (RAS)^۱ اینهستر و فنگ و ویگلن (اینهستر و همکاران، ۲۰۰۸) تعمیم روش لی و نیومن و گاری است، که در آن روش چند مقیاسی بهبود یافته لیندبرگ^۲ (۱۹۹۸) به جای الگوریتم استروس نشسته است. ترجیح می‌دهند که از خطوط میدان مغناطیسی در اتصال نقاط لبه استفاده نشود تا مقایسه بین حلقه‌های استخراج شده و خطوط میدان محاسبه شده ممکن باشد که این مقایسه می‌تواند آزمونی معتبر برای برون‌یابی میدان باشد. از این‌رو، روش اینهستر و فنگ و ویگلن (۲۰۰۸) برخلاف روش لی و نیومن و گاری، فقط بر پایه اصول هندسی بنا شده که جهت حلقه را در نقطه لبه با خمش یکسان (روش پیشنهاد شده توسط پرنس و زوکر (Parent & Zucker, 1989)) تعیین می‌کند. این الگوریتم شامل سه مرحله است: گام اول یافتن نقاطی است که احتمالاً روی حلقه قرار دارند. همچنین جهت حلقه در آن نقطه تعیین می‌شود. هر نقطه با این اطلاعات یک لبک^۳ نامیده می‌شود. مرحله دوم یافتن رابطه محتمل بین لبک‌های همسایه است که زنجیره‌ای از لبک‌ها را تشکیل می‌دهد. مرحله آخر برون‌یابی و اتصال زنجیره‌های مرتبط است که حلقه مد نظر را تقریب می‌زند.

۵-۲ تبدیل موجک مورلت دو بعدی، بیسکری و همکاران

بیسکری و همکاران (Biskri et al., 2010) روش استخراج خودکاری را برای حلقه‌های مغناطیسی خورشید به کار بردند که بر اساس تبدیل موجک پیوسته (CWT)^۴ است. در این روش که تبدیل موجک مورلت دو بعدی^۵ نامیده شده است از تحلیل موجک، موجک مورلت دو بعدی را - به دلیل بازده خوب در تشخیص خصوصیات جهتی - به کار می‌گیرد که دنبال کردن انحنای حلقه‌ها را از نزدیک ممکن می‌سازد. این روش شامل سه مرحله است: ابتدا تبدیل موج دو بعدی را به کار می‌برد. در گام بعدی تصویری را که به دست آمده قطعه‌بندی می‌کند، بدین منظور که ردهای نازک تر حلقه را تولید کرده و آن‌ها را از یکدیگر و از زمینه جدا سازد. سرانجام صافی آستانه شدت اعمال می‌شود که مثبت‌های نادرست (پیکسل‌هایی که اشتباه به عنوان حلقه برچسب خوردند) را حذف می‌کند. از آنجا که این پیکسل‌ها اختلال داده‌ها هستند، اعمال صافی آستانه،

¹ Ridge detection by Automated Scaling

² Lindeberg

³ Ridgel

⁴ Continuous wavelet transform

⁵ 2-D Morlet Wavelet Transform

اختلال را کاهش داده و باعث می شود حلقه ها واضح تر دیده شوند. بنابراین تنها حلقه های واضح تاج باقی می ماند.

۲-۶ ردیابی سمتی حلقه های تاج، اشوندن

اشوندن (۲۰۱۰) روش دیگری را برای استخراج خودکار ویژگی های حلقه ها گسترش داد که برای ردیابی حلقه های تاج تطابق یافته بود. او این روش را ردیابی سمتی حلقه های تاج (OCCULT)^۱ نامید (اشوندن، ۲۰۱۰). این روش بر اساس ردیابی سمتی-جهتی ویژگی های خط-منحنی است اما در قیاس با الگوریتم های معمول استخراج ویژگی، این روش برای تصاویر فرابنفش و اشعه ایکس نرم تطبیق یافته و از این ویژگی خاص که حلقه های تاج خمش بزرگی در مقایسه با عرضشان دارند، سود جسته است. اشوندن بیان می کند که این روش به نتایج ادراک بصری بسیار نزدیک بوده و بهتر از دیگر روش های عددی موجود از پس انجام انتظارات بر می آید و همچنین برای بازساخت سه بعدی هندسه، حرکت و نوسانات حلقه های تاج و مدل سازی هیدرودینامیک و میدان مغناطیسی حلقه ها مفید است. این کد گسترشی از روش سمتی-جهتی (ODM) اشوندن (۲۰۰۵) است. کد این برنامه در نرم افزار IDL نوشته شده و در دسترس است. در این روش ورودی یک تصویر دیجیتال دو بعدی، $I(x_i, y_j), i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y$ ، از شدت شار مشاهده شده (I) است. ابعاد تصاویر آزمایش شده (که اغلب متعلق به رد بودند) $N_x = N_y = 1024$ و واحد شار فرابنفش مشاهده شده تعداد داده بر ثانیه (DNS^{-1}) است (البته پارامترهای این روش بعد از آن برای تلسکوپ فضایی اس دی او نیز تطبیق یافتند).

الگوریتم اصلی شامل تشخیص تکرارپذیر ساختارهای حلقه است که از روشن ترین حلقه شروع شده و به کم نورترین حلقه - که اندکی بالاتر از آستانه شدت است - ختم می شود. این کد، یک ساختار را از روشن ترین محل (قله) اش (x_p, y_p) در نظر گرفته و تصمیم می گیرد که آیا این قله قسمتی از خط الرأس یک منحنی است یا خیر، سپس جهت α سمت الرأس را از قله شار پیدا کرده و آن را در یک جهت دنبال می کند و پیش می رود که این جهت بر طبق یک محدوده سمتی $|\Delta\alpha| \leq \alpha_{max}$ تعیین می شود. آن گاه نقطه انتهایی (x_0, y_0) را پیدا می کند و در جایی که تغییر زاویه ای از بیشینه مقدار مجاز (α_{max}) بیشتر شود، به سمت قله بر می گردد و یک ردیابی دو جهته را در جهت معکوس ادامه می دهد تا نقطه انتهایی دوم (x_n, y_n) را بیابد. سپس

¹ Oriented Coronal Curved Loop Tracing

مختصات حلقه به طور متوالی از ابتدا به انتها مرتب می‌شود. آن‌گاه ناحیه‌ای از تصویر که در آن حلقه مربوطه به طول L_{box} و عرض $2w$ ردیابی شده از تصویری که از صافی بالاگذر عبور داده شده است، حذف می‌شود تا حلقه مشخص شده در ردیابی حلقه‌های بعدی تداخلی ایجاد نکند. هنگامی که بیشینه شار تصویر باقی‌مانده از آستانه شدت تعریف شده به عنوان نوفه، پایین‌تر قرار بگیرد، تکرار این مرحله متوقف می‌شود و مجموعه حلقه‌های ردیابی شده به شکل آرایه‌های یک‌بعدی ذخیره می‌شود. این روش در تشخیص حلقه‌هایی که به مرکز قرص خورشید نزدیک-ترند بهتر عمل می‌کند اما در تشخیص حلقه‌های لبه خورشید، به علت دشوار بودن تمایز جهت و خمش طرح‌های خزه‌شکل زمینه با حلقه در این نواحی، با مشکلاتی روبرو است. جزئیات بیشتر این روش را در اشوندن (۲۰۱۰) ببینید.

۳. روش کار

در اینجا از روش ردیابی سمتی حلقه‌های تاج (اشوندن، ۲۰۱۰) استفاده می‌کنیم و آن را برای استخراج حلقه‌های ناحی \pm فعال مشاهده‌شده در تصاویر فرابنفش دور به کار می‌بریم. این ابزار را می‌توان در مشخص کردن پارامترهای هندسی حلقه، مانند خمش و هلالی‌شکلی^۱، یا تحلیل تغییرات شدت در طول حلقه به کار برد. بررسی همبستگی مکان حلقه‌ها در نواحی فعال و تغییرات دمایی از سؤالات مهم مربوط به تاج خورشید می‌باشد. سؤال دیگر همبستگی بین پیش‌فوران‌های نواحی فعال با تغییرات زمانی هموار یا ناهموار پارامترهای حلقه‌ها (شعاع انحناء، درخشندگی و غیره) است. در قسمت‌های بعد کارهای انجام‌شده در مسیر این پروژه ذکر می‌شود.

۳-۱ گزینش داده‌ها و پیش‌پردازش تصاویر

تصاویر تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او با ابزارهای مختلف و در صافی‌های متفاوتی ذخیره و طبقه‌بندی می‌شوند. اس‌دی‌او دارای ابزارهای HMI^۲، AIA^۳، EVE^۴ است، که در این بررسی با توجه به موضوع مد نظر از داده‌های AIA استفاده می‌کنیم. برای مطالعه بیشتر درباره اطلاعات تصاویر هر ابزار نگاه کنید به براون و همکاران، ۲۰۱۰ و لمون و همکاران ۲۰۱۲. با بررسی نواحی فعال مختلف، در نهایت ناحیه فعال ۱۱۰۹۲ را انتخاب کردیم که در شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد

¹ S-shapedness

² Helioseismic and magnetic imager

³ Atmospheric imaging assembly

⁴ Extreme ultraviolet variability experiment

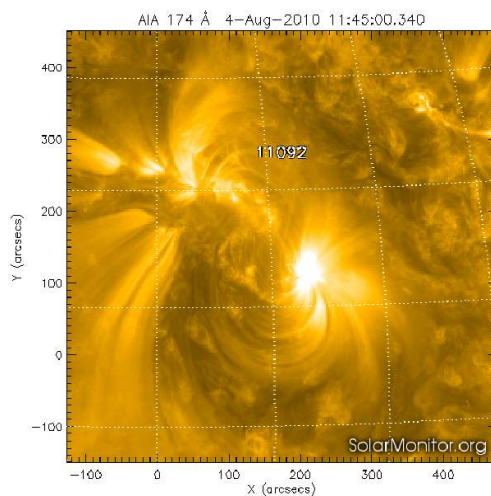
(شکل ۲). این شکل تصویری از ناحیه فعال انتخاب شده، ۱۱۰۹۲ را در تاریخ ۴ اوت ۲۰۱۰ و در طول موج 171\AA نشان می دهد که از سایت سولارمانیتور گرفته شده است. این ناحیه فعال با توجه به شکل حلقه ها و وضوح شراره ها پس از مقایسه نواحی فعال مختلف برگزیده شد. البته لازم است ذکر کنیم که در داده های طبقه بندی شده خطا و افتادگی نیز وجود دارد و برخی تصاویر مخدوشند، لذا باید پیش از انتخاب و شروع به پردازش ناحیه مد نظر، از وجود و سلامت داده ها در بازه زمانی مد نظر مطمئن شد. از دیگر معیارهای انتخاب ناحیه: بازه زمانی مناسب، موجود بودن داده ها در طبقه بندی ها و موقعیت ناحیه فعال است که بهتر است در حوالی مرکز دیسک باشد. مجموعه داده های اولیه ای که بارگیری می شود، سطح ۱ به شمار می رود و وضوح آن ها ۰٫۶ ثانیه گاوسی است. داده های این سطح با کمک زیرروال های استاندارد `ia_prep.pro` و `aia_derot.pro` که در بسته SDO در کتابخانه (نرم افزاری) `SSW`^۱ پیش پردازش می شود تا مقیاس صفحه بین چهار بازوی AIA تنظیم شود و چرخش زاویه ای حذف شود. طی این مراحل پیش پردازش، داده ها را از سطح ۱ به ۱٫۵ ارتقا می دهد.

با مشاهده تصاویر به شکل سری زمانی و پس از حذف تصاویر خراب، داده های نهایی شامل ۵۵۰ تصویر از این ناحیه در هر طول موج در نظر گرفته شد. این تصاویر در بازه زمانی ۱۳:۳۰:۰۰ تا ۱۸ روز ۲۰۱۰:۰۸:۰۱ انتخاب شدند که با فواصل زمانی متوالی ۳۶ و ۲۴ ثانیه گرفته شده اند. اندازه تصاویر اولیه ۱۰۰۰ در ۸۳۳ پیکسل است و در طول موج های ۱۷۱ (یون Fe IX، تاج آرام و ناحیه گذار بالایی)، ۲۱۱ (یون Fe XIV، ناحیه فعال خورشید)، ۱۹۳ (یون Fe XXIV و Fe XII، پلاسمای تاج و زبانه داغ) و ۹۴ (Fe XVIII، نواحی زبان های) آنگستروم می باشند. تصاویر دریافتی با فرمت `fits` هستند و برای خواندن آن نیاز به بسته های نرم افزاری ویژه است و در آن ها اثر چرخش دیفرانسیلی خورشید را نیز در نظر می گیریم. در قسمت پیش خوان فایل های `fits`، گزینه ی `CRPIX1`، فاصله ی افقی پیکسل مرکز تصویر را از پیکسل مرجع نشان می دهد و با رسم آن می توان معیاری از حرکت خورشید در بازه زمانی داده ها به دست آورد. شکل ۳، نمودار شاخص `CRPIX1` را برای کل تصاویر انتخاب شده، در طول موج ۱۷۱ آنگستروم نشان می دهد. محور عمودی، فاصله بر حسب پیکسل و محور افقی شماره تصویر (از ۱ تا ۵۵۰، با گذر زمان) است.

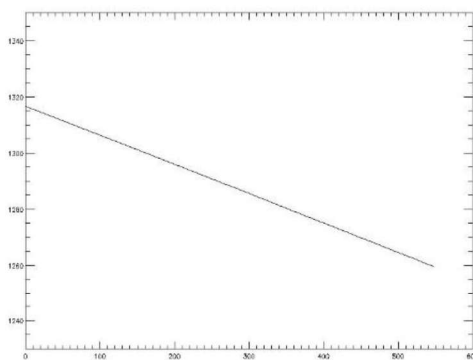
¹ Sub-routines

² Solar software

۷۲ / استخراج شدت و دمای حلقه تاجی خورشید با کمک تصاویر تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او



شکل ۲ تصویری از ناحیه فعال انتخاب شده، ۱۱۰۹۲، در تاریخ ۴ اوت ۲۰۱۰ و در طول موج 174\AA ، از سایت سولارمانیتور (<http://www.solarmonitor.org>).

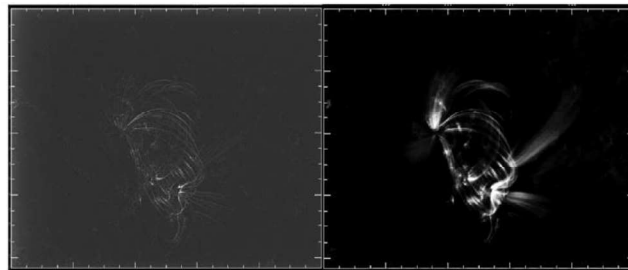


شکل ۳ نمودار شاخصه CRPIX1 برای کل داده‌ها در طول موج ۱۷۱ آنگستروم؛ محور عمودی فاصله بر حسب پیکسل و محور افقی شماره تصویر (از ۱ تا ۵۵۰، با گذر زمان) است.

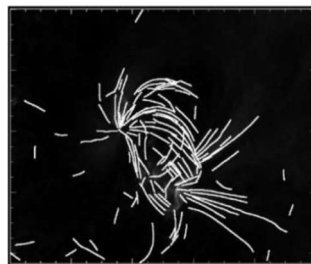
یکی از راه‌های مطالعه اولیه تصاویر حلقه‌ها، مشاهده تصاویر به شکل سری زمانی (فیلم) است (برای مثال با کمک کد `xstepper` در نرم‌افزار `IDL`). همچنین برای دنبال کردن یک رویداد در طول موج‌های مختلف مناسب است که تصاویر طول موج‌های مختلف را با نسبت دادن رنگ‌های گوناگون روی هم انداخته و پدیده مد نظر را به طور همزمان در طول موج‌های مختلف مشاهده کنیم. سپس مناسب است برای تمرکز بر رویدادهای فیزیکی جالب، اختلاف شدت تصاویر را به صورت زمانی بررسی کنیم که این کار با کم کردن هر تصویر از تصویر قبلی به دست می‌آید. پس از بررسی ناحیه فعال انتخاب شده به ترتیب فوق، جریانی که مشاهده می‌شود به این شکل

نیست که در طول یک حلقه نوسان کند. بلکه در ناحیه برگزیده جریان‌های مختلف و پیچیده‌ای مشاهده می‌شود که در طول و عرض دسته‌ای از حلقه‌ها در حرکتند و با تغییر دما و لذا تغییر یونش‌ها، شدت‌ها در قسمت‌های مختلف حلقه‌ها دائماً تغییر می‌کنند.

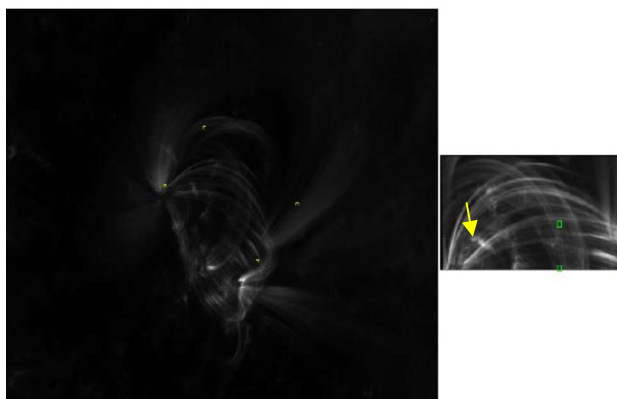
سپس از صافی مدمکس یا بیشینه هشت جهتی تحذب‌ها (کوچمی و همکاران، ۱۹۸۹) برای کاهش نوفه و بهبود تصاویر خام استفاده کردیم. شکل ۴، سمت راست تصویر اصلی مربوط به حلقه‌های مشاهده شده در ناحیه فعال ۱۱۰۹۲ در تاریخ ۹ اوت ۲۰۱۰، ۱۳:۳۰:۲۴، گرفته شده توسط ابزار AIA از تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او در طول موج ۱۷۱ آنگستروم را نشان می‌دهد. سمت چپ این شکل، همان تصویر را پس از اعمال صافی مدمکس نشان می‌دهد که حلقه‌های تاج در آن وضوح بهتری دارند (شکل ۴). برای تشخیص حلقه‌ها از الگوریتم بی‌اسپیلاین و همچنین کد ایمپروفایل (با روش میان‌یابی دوخطی) استفاده کردیم. برای استخراج حلقه‌ها نیز چنانکه پیش از این اشاره شد از روش ردیابی سمتی حلقه‌های تاج (OCCULT) (اشوندن، ۲۰۱۰) استفاده کردیم. شکل ۵، تصویر قبل را نشان می‌دهد که در آن حلقه‌ها به روش اشوندن (۲۰۱۰)، ردیابی سمتی حلقه‌های تاج (OCCULT) استخراج شده‌اند.



شکل ۴ سمت راست: تصویر اصلی مربوط به حلقه‌های مشاهده شده در ناحیه فعال ۱۱۰۹۲ در تاریخ ۹ اوت ۲۰۱۰، ۱۳:۳۰:۲۴، گرفته شده توسط ابزار AIA از تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او در طول موج ۱۷۱ آنگستروم. سمت چپ: همان تصویر پس از اعمال صافی مدمکس.



شکل ۵ تصویر قبل که در آن حلقه‌ها به روش اشوندن (۲۰۱۰)، ردیابی سمتی حلقه‌های تاج (OCCULT) استخراج شده‌اند.



شکل ۶ برش یک تصویر نمونه. نقاط زرد در تصویر سمت چپ، چهارگوشی از تصویر را نشان می‌دهد که انتخاب و بریده شده است. این قسمت را پس از چرخش در تصویر سمت راست می‌بینید. نقاط سبز در تصویر سمت راست، ناحیه انتخابی و برش چهارگوش نهایی را نشان می‌دهد. حلقه انتخابی با فلش زرد نشان داده شده است.

پس از مطالعه و بررسی تصاویر، ناحیه‌ای از تصویر که پدیده‌ی شبه‌نوسانی در آن دیده می‌شد انتخاب شد. سپس کدهایی نوشتیم تا تصاویر را در قسمت‌های دلخواه برش داده و بچرخانند و ذخیره کنند. این رویداد شبه‌نوسانی در تصاویر ۷۰ تا ۱۰۰ رؤیت شد که برای بررسی و تمرکز بیشتر، این ناحیه را از کل تصاویر برش دادیم. در شکل ۶ نمونه‌ای از این برش نمایش داده شده است (شکل ۶). در این شکل، نقاط زرد در تصویر سمت چپ، چهارگوشی از تصویر را نشان می‌دهد که انتخاب و بریده شده است. این قسمت را پس از چرخش در تصویر سمت راست می‌بینید. نقاط سبز در تصویر سمت راست، ناحیه انتخابی و برش چهارگوش نهایی را نشان می‌دهد. حلقه انتخابی با فلش زرد رنگ نشان داده شده است. حلقه‌های این ناحیه با روش مذکور و به کمک الگوریتم‌ها و کدهای مربوط استخراج شدند و شدت‌ها در طول حلقه‌ها بررسی شدند. استخراج حلقه‌ها پیش از شراره و در زمان وقوع آن نشان می‌دهد که حلقه‌ها هنگام وقوع شراره از هم باز می‌شوند و فاصله متوسط بیشتری دارند که این نکته می‌تواند به ما در تقریب‌زدن و پیش‌بینی زمان وقوع شراره کمک کند. با دنبال کردن آن‌ها می‌توان رویداد شدت را مشاهده کرد. این کار را برای نواحی و طول موج‌های مختلف انجام دادیم. با مقایسه در می‌یابیم که پدیده ناحیه‌ای یکسان در طول موج‌های متفاوت تفاوت‌های بارزی دارد.

۲-۳ کم کردن زمینه از تصاویر

برای بعضی پردازش‌های خاص که کمیت شدت‌ها مهمند، مانند محاسبه نسبت دمایی تصاویر یا محاسبه نسبت شار حلقه‌ها لازم است زمینه تصاویر از تصاویر اصلی کسر شود. کم کردن تابش

زمینه مانند اعمال نوعی صافی است و باید با توجه به ویژگی‌های تصویر و نمایه‌های شدت، مناسب‌ترین روش را برای آن یافت. زمینه در تصاویر فرابنفش شامل هر شدت یکنواخت (اعم از پشت یا جلوی طرح مد نظر) است که به پدیده مد نظر ما برای پردازش ربطی ندارد و شدتش مزاحم شدت پدیده مورد مطالعه است (برای دیدن جزئیات بیشتر درباره روش‌های مختلف کاهش زمینه نگاه کنید به اشوندن و همکاران، ۲۰۰۸b). به هر حال عدم قطعیت موجود در کاهش زمینه، در محاسبات و تحلیل‌های مربوط اثرگذار است. ما برای کاهش زمینه کدی نوشتیم که در آن از الگوریتم استرل^۱ در MATLAB استفاده کردیم. این الگوریتم که برگرفته از کار آدامز (آدامز، ۱۹۹۳) است، با توجه به خصوصیات قسمت انتخاب شده در تصویر، مفید واقع شد و با کمک آن زمینه تصاویر حذف شد.

۳-۳ بررسی دمایی

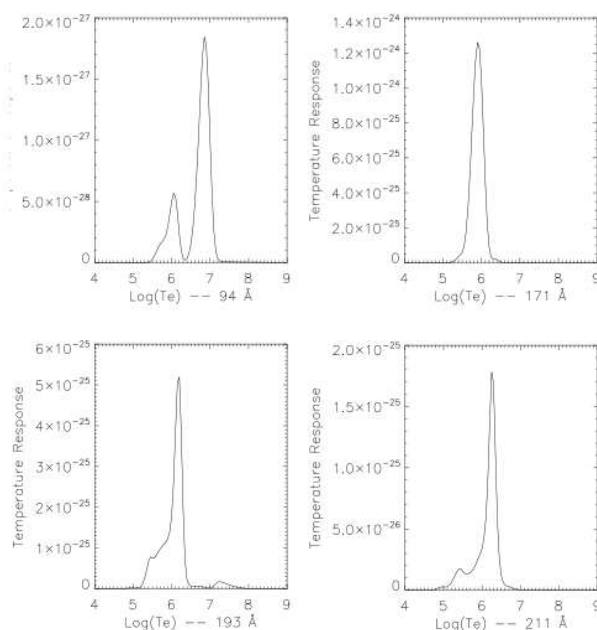
چنانکه در بالا اشاره کردیم، از مقایسه تصاویر در طول موج‌های مختلف پی می‌بریم که پدیده ناحیه‌ای یکسان در طول موج‌های مختلف تفاوت‌های بارزی دارد. ما این مقایسه را در طول موج‌های مختلف $94A^0$ ، $171A^0$ ، $193A^0$ و $211A^0$ انجام دادیم، که مربوط به حالت‌های مختلف آهن یونیزه است. با دنبال کردن نمایه‌های شدت در طول حلقه مشخص شده برای تصاویر انتخاب شده، می‌توان رویداد شدت را مشاهده کرد.

نتیجه مشاهدات انجام شده نشان می‌دهد که خطوط حلقه در طول موج‌های سردتر واضح‌تر است. برای مثال در طول موج $171A^0$ ، خطوط حلقه مرکزی تر و تیزتر است. در حالی که در خط داغ‌تر، طول موج $193A^0$ ، حلقه‌ها پخش‌تر و پراکنده‌تر است. خطوط حلقه‌های انتخابی به ترتیب در $211A^0$ نسبت به $193A^0$ ، و در $193A^0$ نسبت به $171A^0$ ، مشخص‌تر و منسجم‌تر است. به این شکل می‌توان تصاویر حلقه‌ها در طول موج‌های مختلف را به مانند نقشه‌های گرمایی حلقه دانست. طول موج سردتر در واقع اطلاعات داخلی تر و مرکزی تر حلقه را نشان می‌دهد، در حالی که طول موج داغ‌تر که پراکنده‌تر است بیانگر اطلاعات سطح حلقه است که دمایی بیشتری دارد.

یک خط طیفی دمایی ویژه‌ای برای شکل‌گیری دارد. با وجود این، صافی‌های نوار گسترده مسئول تابع پاسخ دمایی‌ای هستند که از طول موج مشاهده شده نتیجه می‌شود. توابع پاسخ مختلف برای طول موج‌های گوناگون ابزارهای تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او در نرم‌افزار IDL تحت SSW موجودند. اغلب نمایه‌های دمایی بیانگر آن است که یک تصویر گرفته شده با ابزار AIA از تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او مطابق با یک دمایی یکتا نیست بلکه اغلب منطبق بر دو قله دمایی و بازه

¹ strel

دمایی گسترده‌ای است. برای تفسیر تصاویر، مهم است که دمای پلاسمای مشاهده‌شده را بدانیم. برای مثال پلاسمای مشاهده‌شده در صافی 94\AA^0 دمای یک میلیون یا نزدیک ده میلیون کلوین دارد. شکل ۷ (براون و همکاران، ۲۰۱۰) پاسخ دمایی را برای صافی‌های مختلف بر حسب لگاریتم دما نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ دمایی فیلترهای مختلف ابزار AIA در بازه دمایی یکسان، متفاوت است که باید در اندازه‌گیری‌های دمایی در نظر گرفته شود.



شکل ۷ پاسخ دمایی برای صافی‌های 94\AA^0 ، 171\AA^0 ، 193\AA^0 و 211\AA^0 بر حسب لگاریتم دما (نگاه کنید به براون و همکاران ۲۰۱۰).

برای آنکه بتوانیم توابع پاسخ دمایی صافی‌های گوناگون و شدت حلقه‌ها را در طول موج‌های مختلف مقایسه کنیم، نیاز به توابع بی‌بعد داریم. لذا از نسبت‌های پاسخ‌های دمایی و نسبت‌های شدت‌ها استفاده می‌کنیم که بی‌بعد هستند.

ما در این بررسی، در طول موج 171\AA^0 ناحیه‌ای با شدت زیاد را می‌بینیم که در فیلم این ناحیه نیز به وضوح مشخص است. از آنجا که این ناحیه پر شدت در طول موج 193\AA^0 دیده نمی‌شود، لذا به نظر می‌رسد در اینجا سرمایش^۱ حلقه مذکور اتفاق می‌افتد. حلقه انتخابی ما در

^۱ Cooling

اینجا حلقه‌ای است که با پیکان زرد در شکل برش خورده ۶ نشان داده‌ایم. برای این حلقه بیشترین نسبت شدت $171A^0$ به $193A^0$ ، حدود ۲٫۵ است و این عدد مطابق با دمای ۱٫۲۵ میلیون درجه است. در این محاسبه مقدار بالایی دما روی نمایه نسبت‌های پاسخ دمایی در نظر گرفته شد؛ چرا که دمای مورد انتظار برای حلقه‌ها از این مرتبه است. این مقدار دما حدود قله دمای داخل حلقه مذکور در ناحیه منتخب خواهد بود. اما تعیین مقادیر دقیق دما کار دشواری است. یکی از دلایل این عدم دقت آن است که تغییرات نسبت شدت در بازه‌ای اندک، تغییرات بسیاری را در دما موجب می‌شود. علت دیگر آن، عدم قطعیت در کم کردن زمینه تصویر است و با وجود آن که میزان تابش زمینه در مقدار دمای به دست آمده بسیار مهم است، از این عدم قطعیت گریزی نیست. برای حلقه مشخص شده در برش سبز شکل ۶ بالاترین نسبت شدت $211A^0$ به $193A^0$ (میانی) و $211A^0$ به $171A^0$ (پایینی) به ترتیب حدود ۱٫۴ و ۱٫۸ است و این اعداد مطابق با دماهای حدود ۳٫۱ و ۷ میلیون کلوین است. این دما قله دمایی حلقه مورد بررسی است؛ از این رو مربوط به نقاط سطحی‌تر حلقه است که داغ‌تر است.

همچنین، با استفاده از کد CHIANTI نیز دمای حلقه مذکور را به دست آوردیم که مقدار بیشینه دما برای آن معادل ۲٫۷ میلیون درجه به دست آمد که به مقدار قله دمایی تخمینی نزدیک است^۱.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله روش‌های مختلف پردازش نیمه خودکار تصاویر تاج خورشید و استخراج حلقه‌های تاج را معرفی کردیم. روش سمتی لی، نیومن، گری که نخستین روش خودکار برای این منظور است، برای بخش‌بندی حلقه‌های تاج مفید است. این روش خطاهایی دارد، که ممکن است پیکسل‌های حلقه را اشتباه برچسب زده یا حذف کند یا در نتیجه تشخیص نادرست جهت حلقه‌ها، بخش‌بندی را با مشکل مواجه کند. به دلیل مشکلات روش فوق، روش روزنه متحرک لی، نیومن، گری ابداع شد که در آن به حذف تداخل زمینه و ساختارهایی که حلقه نیستند و تشخیص حلقه‌هایی که مرز کدری دارند، توجه شد. پس از آن روش سمتی-جهتی توسط اشوندن از اطلاعات جهتی برای ردیابی حلقه‌های تاج استفاده کرد که از این لحاظ مشابه روش اتصال سمتی است با این تفاوت که فقط از جهت‌یابی محلی استفاده می‌کند. پس از آن، اینسهتر و فنگ و ویگلن روش لی و نیومن و گری را گسترش دادند و با اتصال زنجیره‌ای از لبک‌ها و انطباق منحنی با آن به مسیر حلقه دست

^۱ البته برای محاسبه دما از طریق این کد به داده‌های حلقه در ۶ طول موج مختلف ابزار AIA نیاز بود، لذا برای این کار داده‌های طول موج‌های ۳۳۵ و ۱۳۱ آنگستروم نیز با طی مراحل پردازش لازم به مجموعه داده‌ها اضافه شد.

یافتند. همچنین بیسکری و همکاران روش استخراج خودکار خود را بر اساس تبدیل موجک پیوسته قرار دادند و از آن برای استخراج حلقه‌های مغناطیسی تاج کمک گرفتند. اشوندن نیز در روش عددی خود با ردیابی سمتی حلقه‌های تاج به استخراج خودکار ویژگی‌های حلقه‌ها دست یافت. این روش در تشخیص و استخراج حلقه‌هایی که به مرکز خورشید نزدیک‌ترند بهتر عمل می‌کند اما در تشخیص حلقه‌های لبه خورشید با مشکلاتی روبرو است.

در قسمت بعدی این مقاله توضیح دادیم که چگونه به منظور بررسی دمایی نواحی فعال خورشیدی، ناحیه فعال ۱۱۰۹۲ را انتخاب کردیم. داده‌ها شامل تصاویر گرفته‌شده توسط ابزار AIA از تلسکوپ فضایی اس‌دی‌او در طول موج‌های مختلف بود. شرح دادیم که پس از مشاهده سری زمانی تصاویر، اعمال مراحل پیش‌پردازش تصاویر، انتخاب پدیده دمایی مد نظر، اصلاح پرش تصاویر و اثر چرخش خورشید، برش ناحیه دلخواه، کم کردن شدت زمینه، استخراج حلقه‌ها، ترسیم نمایه‌های شدت و با کمک اطلاعاتی که صافی‌های مختلف ابزار AIA درباره تصاویر در اختیارمان گذاشتند، نسبت‌های پاسخ‌های دمایی و نسبت‌های شدت‌ها را برای حلقه مد نظر در ناحیه فعال منتخب، در طول موج‌های مختلف به دست آورده و با کمک آن‌ها به بررسی دمایی حلقه مد نظر پرداختیم. در تصاویر برش داده برای حلقه انتخابی در طول موج 171\AA^0 ناحیه‌ای با شدت زیاد را می‌بینیم که در طول موج 193\AA^0 دیده نمی‌شود. در این ناحیه که سرمایش حلقه مذکور اتفاق می‌افتد، بیشترین نسبت شدت 171\AA^0 به 193\AA^0 حدود ۲٫۵ به دست آمد و این عدد مطابق با دمای ۱٫۲۵ میلیون کلوین است که حدود بیشینه دمای سطح حلقه مد نظر است. همچنین بالاترین نسبت شدت 211\AA^0 به 193\AA^0 (میانی) و 211\AA^0 به 171\AA^0 (پایینی) به ترتیب حدود ۱٫۴ و ۱٫۸ است که به ترتیب مطابق با دماهای حدود ۳٫۱ و ۷ میلیون کلوین است، که مربوط به دماهای نقاط سطحی تر و داغ تر این حلقه است. همچنین با استفاده از کد CHIANTI نیز دمای حلقه مذکور را به دست آوردیم که مقدار بیشینه دما برای آن معادل ۲٫۷ میلیون کلوین به دست آمد که به مقدار قله دمایی تخمینی نزدیک است. فتحعلیان (۲۰۱۸) نیز برای حلقه دیگری از این ناحیه در روز ۱ اوت ۲۰۱۰ دمایی بین ۴٫۱ تا ۱۰ میلیون کلوین به دست آورده است.

این ابزارها و کدها برای تحقیق و تحلیل پدیده‌های فیزیکی موجود در تاج، مانند حلقه‌ها، شراره‌ها و هلالی شکل‌ها و همچنین پردازش آماری زمان وقوع شراره‌ها و تغییر شکل حلقه‌ها در هنگام وقوع شراره مفید است. با ترکیب کدهای به دست آمده با روش‌های بخش‌بندی پیشین می‌توانیم ویژگی‌های هندسی حلقه مانند طول و انحنا و خمش حلقه را مشخص کنیم و سپس تغییرات شدت را در طول حلقه تحلیل کنیم. این تحلیل ممکن است شامل رابطه آماری این

پارامترها با محل حلقه در ناحیه فعال و همچنین تغییرات دمایی پارامترها باشد. به علاوه می توان این نکته را بررسی کرد که آیا تغییرات آرام یا ناگهانی برخی پارامترهای حلقه می تواند پیش بینی کننده فوران های پرانرژی تر در ناحیه فعال مربوطه باشد.

۵. تقدیر و تشکر

این کار با کمک و همکاری موسسه ی ماکس پلانک انجام گرفت. از اساتید برنند اینهستر، داوینسا آیینس، سمی سولانکی و حسین صفری صمیمانه سپاسگزارم.

منابع

- [1] Abedini, A., Phase speed and frequency-dependent damping of longitudinal intensity oscillations in coronal loop structures observed with AIA/SDO, *Astrophysics and Space Science*, 361, 133, doi 10.1007/s10509-016-2717-0, 2016.
- [2] Adams, R., Radial Decomposition of Disks and Spheres, *Graphical Models and Image Processing*, 55, No.5, 325-332, 1993.
- [3] Aschwanden, M.J., Fletcher, L., Schrijver, C.J., and Alexander, D. Coronal loop oscillations observed with the transition region and coronal explorer. *Astrophysical Journal*, 520 pp. 880-894, 1999.
- [4] Aschwanden, M.J., 2D Feature Recognition And 3d Reconstruction in Solar Euv Images, *Solar Phys.*, 228, 339, 2005.
- [5] Aschwanden, M.J., Lee, J.K., Gary, G.A., Smith, M., Inhester, B., Comparison of Five Numerical Codes for Automated Tracing of Coronal Loops, *SolarPhysics*, 248, 359, 2008a.
- [6] Aschwanden, M.J., Nitta, N.V., Wuelser, J.P., & Lemen, J.R., First 3D Reconstructions of Coronal Loops with the STEREO A+B Spacecraft. II. Electron Density and Temperature Measurements, *ApJ*, 680, 1477, 2008b.
- [7] Aschwanden, M.J., A Code for Automated Tracing of Coronal Loops Approaching Visual Perception, *Solar Phys.*, 262, 399, 2010.
- [8] Aschwanden, M. J., Boerner, P., Schrijver, C. J., & Malanushenko, A., Automated Temperature and Emission Measure Analysis of Coronal Loops and Active Regions Observed with the Atmospheric Imaging Assembly on the Solar Dynamics Observatory (SDO/AIA), *Sol. Phys.*, 283, 5, 2013.
- [9] Aschwanden, M. J., Boerner, P., Ryan, D., Caspi, A., McTiernan, J. M., & Warren, H. P., Global Energetics of Solar Flares: II. Thermal Energies, *ApJ*, 802, 53, 2015.
- [10] Biskri, S., Antoine, J.-P., Inhester, B. & Mekideche, F., Extraction of Solar Coronal Magnetic Loops with the Directional 2D Morlet Wavelet Transform, *Solar Phys.*, 262, 373, 2010.
- [11] Brown, D., Regnier, S., Marsh, M., & Bewsher, D., Working with Data from the Solar Dynamics Observatory, STFC Advanced Summer School, University of Central Lancashire, 2010.
- [12] Esmaeili, S., Nasiri, M., Dadashi, N., Safari, H., Wave function properties of a single and a system of magnetic flux tube(s) oscillations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 9340-9355, doi:10.1002/2016JA022848, 2016.
- [13] Fathalian, N., Extracting the Temperature of a Coronal Loop in the Solar Active Region 11092, *IJAA*, 5,1, 9-20, 2018.
- [14] Fathalian, N., & Safari, H., Transverse Oscillations of Longitudinally Stratified Coronal Loops System, *ApJ*, 724, 411, 2010.

- [15] Hough, P.V.C., Method and means for recognizing complex patterns, US Patent, 3,069,654, 1962.
- [16] Inhester, B., Feng, L., & Wiegelmann, T., Segmentation of Loops from Coronal EUV Images, *Solar Phys.*, 248, 379, 2008.
- [17] Karami, K., & Asvar, A., The effects of density stratification on standing fast body oscillations in coronal loops and dissipation, *MNRAS*, 381, 97, 2007.
- [18] Kass, M., Witkin, A., & Terzopoulos, D., Snakes: Active contour models, *Proceedings of the First International Conferences on Computer Vision, London*, pp. 259-269, 1987.
- [19] Koutchmy, O., & Koutchmy, S. 1989, "Optimum Filter and Frame Integration-Application to Granulation Pictures", *Proceeding of the 10th NSO/SPO workshop on "High Spatial Resolution Solar Obs."*, 217, O. von der Luhe Ed.
- [20] Lee, J. K., Newman, T. S., & Gary, G. A., Oriented Connectivity-based Method for Segmenting Solar Loops, *Pattern Recognition*, 39, 246, 2006a.
- [21] Lee, J. K., Newman, T. S., & Gary, G. A., Dynamic Aperture-based Solar Loop Segmentation, *7th IEEE Southwest Symp. on Image Analysis and Interpretation, Denver, Mar., CO*, p.91, 2006b.
- [22] Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., & et al., The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO), *Sol. Phys.*, 275, 17, 2012.
- [23] Lindeberg, T., Edge Detection and Ridge Detection with Automatic Scale Selection, *International Journal of Computer Vision* 30(2), 117, 1998.
- [24] Luna, M., Terradas, J., Oliver, R., & Ballester, J. L., Transverse Oscillations of Systems of Coronal Loops, *ApJ*, 692, 1582, 2009.
- [25] Luna, M., Terradas, J., Oliver, R., & Ballester, J. L. Transverse Oscillations of Multi-Stranded Loops, *ApJ*, 716, 1371, 2010.
- [26] Nakariakov, V. M., Ofman, L., Deluca, E. E., Roberts, B., Davila, J. M., TRACE Observation of Damped Coronal Loop Oscillations: Implications for Coronal Heating, *Science*, 1999.
- [27] Nakariakov, V. M., Ofman, L., Determination of the coronal magnetic field by coronal loop Oscillations, *A&A*, 2001.
- [28] Parent, P., Zucker, S., *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE*, 11, 823, 1989.
- [29] Pascoe, D. J., Goddard, C. R., Van Doorselaere, T., Oscillation and Evolution of Coronal Loops in a Dynamical Solar Corona, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 7, 61, 2020.
- [30] Ruderman, M. S., Erdélyi, R., Transverse Oscillations of Coronal Loops, *Space Sci Rev.*, 149, 199-228, 2009.
- [31] Safari, H., Nasiri, S., & Sobouti, Y., Fast kink modes of longitudinally stratified coronal loops, *A&A*, 470, 1111, 2007.
- [32] Schmelz, J. T., Kimble, J. A., Jenkins, B. S., Worley, B. T., Anderson, D. J., Pathak, S., & Saar, S. H., Atmospheric Imaging Assembly Multithermal Loop Analysis: First Results, *ApJ*, 725, L34, 2010.
- [33] Schmelz, J. T., Pathak, S., Jenkins, B. S., & Worley, B. T., Deeper by the Dozen: Understanding the Cross-field Temperature Distributions of Coronal Loops, *ApJ*, 764, 53, 2013.
- [34] Schmelz, J. T., Pathak, S., Brooks, D. H., Christian, G. M., & Dhaliwal, R. S., Hot Topic, Warm Loops, Cooling Plasma? Multithermal Analysis of Active Region Loops, *ApJ*, 795, 171, 2014.
- [35] Taran, S., Safari, H., Identification of Solar Coronal Loops Based on Moments of Image, *Iranian Journal of Physics Research*, 12, 3, 1391, (In Persian).
- [36] Taran, S., Safari, H., Farhang, N., Automated Tracking of Solar Coronal Loops and Detection of Their Oscillations, *Iranian Journal of Physics Research*, 14, 1, 1393, (In Persian).