

پایش خودکار حلقه‌های تاج خورشید و آشکارسازی نوسانات آنها

حسین صفری، سمیه تاران و نسترن فرهنگ

دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۹/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۲/۱۷)

چکیده

شناسایی و پایش حلقه‌های تاج خورشید کلید درک میدان مغناطیسی خورشید است. در این مقاله، نوسان‌های آرام و سریع مغناطوهیدرودینامیکی حلقه‌های پایش شده از تصاویر متوالی فرابنفش دور مطالعه می‌شود. بدین منظور تصاویر ۱۷۱ آنگستروم ۱۴ آگوست ۲۰۱۰ در بازه زمانی ۰۰:۰۰:۰۰ تا ۰۰:۱۵:۰۰ و ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲ در بازه زمانی ۰۷:۱۰:۰۱ تا ۰۷:۲۴:۳۷ تلسکوپ اس‌دی‌او مورد بررسی قرار گرفته است. با اعمال تبدیل موجکی پیوسته دو بعدی با موجک مورلت، حلقه‌های تاج خورشید از تصاویر زمینه جدا شده و نوفه‌ها حذف شده‌اند، سپس به کمک روش ردیابی حلقه‌های جهت‌مند، حلقه‌ها برچسب خورده و پهنای آنها معلوم می‌گردد. ممان‌های زرنیک هر یک از حلقه‌ها به عنوان خواص ناوردایی (انتقال، مقیاس، دوران) محاسبه شده و از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شناسایی حلقه‌ها در تصاویر متوالی استفاده شده و با میانگین گرفتن از پیکسل‌ها در امتداد موازی با محور حلقه، نوسانات سریع و میانگین گرفتن در امتداد عمود بر حلقه، نوسانات آرام آشکارسازی می‌شوند. سرعت فاز، دوره تناوب و زمان میرایی وجوه نوسانی محاسبه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: خورشید، تبدیل موجکی، مغناطوهیدرودینامیک، زرنیک، شبکه عصبی

۱. مقدمه

حلقه‌های تاج به عنوان یک ساختار مغناطیسی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در صورت بروز اختلالی موضعی در پلاسما، تمام ذرات یا بخشی از آنها دستخوش جا به جایی می‌شوند. در برابر این اختلال نیرویی بازگرداننده (اعم از اختلاف فشار، میدان الکتریکی یا مغناطیسی، گرانش و سایر) این ذرات را به موقعیت اولیه می‌راند. در نتیجه ذرات حول نقطه تعادل به صورت گروهی نوسان می‌کنند [۱ و ۲]. آشکارسازی این امواج از طریق پردازش تصاویر متوالی با توان تفکیک فضایی و زمانی صورت می‌گیرد. در این مقاله ابتدا

در ستارگانی همانند خورشید، میدان‌های مغناطیسی در لایه‌های همرفتی تولید شده و به سمت لایه‌های بالاتر جو گسترش می‌یابند. تاج خورشید شبکه در هم پیچیده‌ای از خطوط میدان مغناطیسی است. وقتی خطوط میدان مغناطیسی با گاز گرم و چگال پر می‌شوند، می‌توان یک حلقه مغناطیسی را مشاهده کرد. این گاز و پلاسمای به اندازه کافی چگال است که می‌تواند سبب تابش فرابنفش دور شود. آگاهی از پیکربندی میدان مغناطیسی خورشید در جایگاه مهم‌ترین عامل شناخت

امواج آشکار شده را نیز محاسبه کرد [۱۴ و ۱۵]. بدین منظور تصاویر روز ۱۴ آگوست ۲۰۱۰ در بازه زمانی ۰۰:۰۰:۰۰ تا ۰۰:۱۵:۰۰ و ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲ در بازه زمانی ۰۷:۱۰:۰۱ تا ۰۷:۲۴:۳۷ به ترتیب برای استخراج وجوه نوسانی سریع و آرام استفاده شده است.

۲. تحلیل داده‌ها و روش پردازش تصاویر

۲.۱. شناسایی و پایش حلقه‌ها

ماهواره خورشیدی اس.دی.او^۳ به منظور مطالعه خورشید و رفتارهای دینامیکی آن در ۱۱ فوریه ۲۰۱۰ راه اندازی شده و شامل سه بسته ابزاری (ای‌آی‌ای، اچ‌ام‌آی، ای‌وی‌ای) است. در این مقاله از داده‌های بسته ابزاری ای. آی. ای استفاده شده است. این بسته ابزاری قادر است داده‌هایی به صورت قرص کامل خورشید، در طول موج‌های مختلف نزدیک به هم، با قدرت تفکیک فضایی ۶/۰ ثانیه قوسی و به طور میانگین با فاصله زمانی ۱۲ ثانیه در اختیار قرار دهد [۱۵]. در این مقاله از تصاویر فرابنفش دور^۴ این بسته ابزاری در طول موج ۱۷۱ آنگستروم که در ۱۴ آگوست ۲۰۱۰ در بازه زمانی ۰۰:۰۰:۰۰ تا ۰۷:۲۴:۳۷ ثبت شده‌اند استفاده شده است. یک ناحیه در ابعاد ۱۰۲۴×۱۰۲۴ پیکسل از تصاویر قرص کامل (در ابعاد ۴۰۹۶×۴۰۹۶ پیکسل) برای بررسی انتخاب شده است.

در ابتدا برای تصحیح اثر دیفرانسیلی خورشید، تمامی تصاویر نسبت به اولین تصویر زمان مربوطه تطبیق مختصات داده می‌شوند [۱۶]. در ادامه با اعمال تبدیل موجکی دو بعدی پیوسته به عنوان یک صافی که با تکیه بر ابزار ریاضی مناسب می‌تواند اطلاعات مفیدی از ماهیت سیگنال‌های مختلف را آشکار کند، ساختارهای باریک حلقه در تصاویر از نوفه‌های اطراف و تصاویر زمینه جدا می‌شوند. در اجرای عملی تحلیل موجکی، از موجک مورلت دو بعدی استفاده می‌شود که به جهت لبه‌ها در تصویر حساس بوده و توانایی خوبی در

روشی برای استخراج ساختار حلقه‌ها و نیز ردیابی حلقه‌ها در تصاویر متوالی فرابنفش دور ارائه شده است. در ابتدا از تبدیل موجکی پیوسته دو بعدی، به عنوان یکی از ابزارهای بنیادین برای آشکارسازی ناپیوستگی‌ها در یک سیگنال استفاده می‌شود [۳]. در یک تصویر به عنوان یک سیگنال دو بعدی از این خصوصیت تبدیل موجکی پیوسته، می‌توان برای نمایش مرزهای دقیق بین دو منطقه با روشنایی متفاوت استفاده کرد. در این صورت ساختارهای خمیده در تصاویر، مثل حلقه‌های مغناطیسی تاج آشکار خواهند شد. به کمک روش ردیابی حلقه‌های جهت‌مند تاج خورشید^۱ [۵] و تخمین پهنای حلقه‌ها در هر تصویر، ممان‌های زرنیک به عنوان خواص ناوردایی تصاویر برای تک تک حلقه‌ها استخراج شده و سپس از شبکه‌های عصبی احتمالی^۲ برای شناسایی حلقه‌ها در تصاویر متوالی استفاده شده است.

استخراج امواج ایستاده و منتشر شونده از تصاویر متوالی حلقه‌های تاج به عنوان ابزارهای مهم بررسی پارامترهای فیزیکی، دینامیک و میدان مغناطیسی تاج، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در دهه‌های اخیر به منظور تفسیر نوسان‌های سریع و آرام حلقه‌های شار میدان مغناطیسی تاج خورشید، نظریه مغناطوهیدرو دینامیک توسعه یافته است. نظریه امواج سریع از سال ۱۹۸۳ [۶] و میرایی این نوسان‌ها [۷ و ۸] و تأثیر لایه‌بندی چگالی در نوسان‌ها [۹]، تأثیر پیچش میدان مغناطیسی در نوسانات [۱۰]، نظریه نوسان‌های آرام در حضور ناهمبندی میدان مغناطیسی [۱۱] و ساز و کارهای میرایی آن [۱۳] در سال‌های بعد ارائه شده‌اند. روش غالب مطالعه این امواج، استفاده از تصاویر فضا - زمان می‌باشد. پس از آشکارسازی طرح‌های نوسانی شبه دوره‌ای، از طریق اعمال صافی گاوسی، نمایه دامنه نوسان شدت، نمایه دامنه نوسان فضایی و پهنای حلقه محاسبه می‌گردد. سپس با برازش تابع سینوسی دیگری بر نمایه دامنه نوسان فضایی، دامنه سینوسی و دوره نوسان استخراج می‌شوند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان سرعت فاز

۳. Solar Dynamic Observatory

۴. EUVI

۱. Oriented Coronal Curved Loop Tracing (OCCULT)

۲. Probabilistic Neural Network (PNN)

نقطه از منحنی به دست آورد. با داشتن بردارهای عمود و مختصات نقاط منحنی می‌توان معادلات خطوط عمود در هر نقطه را نوشته و با تکیه بر بیشینه موضعی شدت نقاط موجود روی خط عمود و انتخاب نقاطی با شدتی در حدود ۹۵ درصد شدت بیشینه، پهنای حلقه تخمین زده می‌شود. با این روش هر کدام از حلقه‌های شناسایی شده با پیکسل‌های مربوط به خود در تصویر مربعی جداگانه‌ای قرار می‌گیرد.

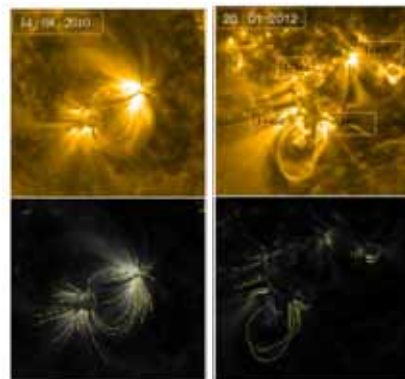
حال برای محاسبه خواص ناوردای (تحت انتقال، مقیاس و دوران) تصاویر از ممان‌های زرنیک استفاده می‌شود. ممان‌های زرنیک برای نمایش یک تصویر با کمترین میزان اطلاعات از دست رفته، استفاده می‌شوند [۱۸ - ۲۰]. این ممان‌ها به طور ذاتی تحت چرخش ناوردا می‌باشند و با بهنجارش چند جمله‌ای‌های اصلی، تحت انتقال و مقیاس نیز ناوردا هستند. بدین منظور کد مربوطه تحت مطلب آماده شده است.

ممان‌های زرنیک مربوط به هر حلقه با $q = 31$ محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۲، ممان زرنیک مربوط به هر حلقه در تصویر ۱۴ آگوست ۲۰۱۲ که به عنوان نمونه آمده است، منحصر به فرد می‌باشد.

با استفاده از ممان‌های زرنیک حلقه‌ها در تصاویر متوالی و شبکه عصبی احتمالی حلقه‌ها شناسایی و پایش می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شناسایی پارامترهای تابش‌های نانوشراره‌ای خورشید توسعه داده شده‌اند. این شبکه برای مسائل طبقه‌بندی شده طراحی شده است [۲۱-۲۲]. در استفاده عملی از شبکه عصبی مصنوعی اندازه ممان‌های زرنیک حلقه‌های یک تصویر برای آموزش به شبکه داده شده، سپس اندازه ممان‌های زرنیک حلقه‌های تصاویر بعدی برای آزمون وارد شبکه می‌شوند. حلقه‌هایی که از این روش به صورت خودکار شناسایی و پایش می‌شوند برای بررسی وجوه نوسانی سریع استفاده خواهد شد.

۲.۲. استخراج وجوه نوسانی سریع

وجوه نوسانی سریع به صورت عرضی منتشر می‌شوند. با در نظر گرفتن یکی از حلقه‌های پایش شده در تصاویر متوالی ۱۴

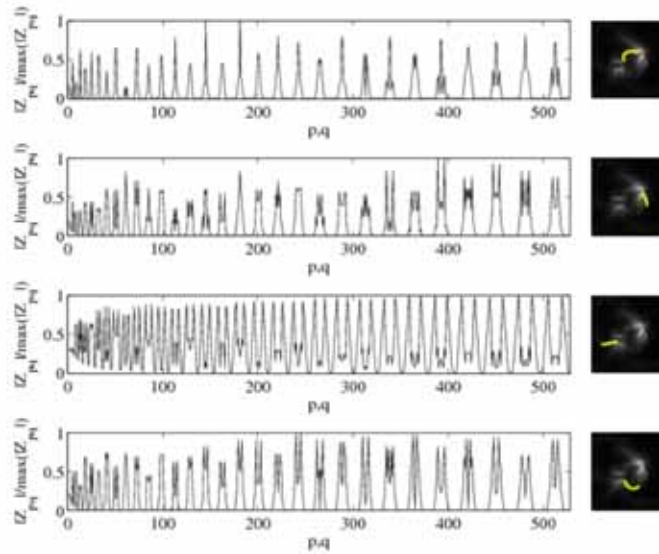


شکل ۱. تصاویری از مناطق فعال مربوط به داده‌های روز ۱۴ آگوست ۲۰۱۰، ساعت ۰۰:۰۰:۰۰ (چپ بالا) و روز ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲، ساعت 07:10:01 (راست بالا) در طول موج ۱۷۱ آنگستروم و نتیجه اعمال تبدیل موجکی پیوسته دو بعدی و روش ردیابی حلقه‌های جهت‌مند تاج خورشید بر تصاویر متناظر (پایین).

آشکارسازی طرح‌های جهت‌مند دارد. تبدیل موجکی مورلت برای مقادیر مختلف مقیاس $[a]$ و زاویه $[\theta]$ که از صفر تا ۱۷۰ درجه با گام‌های ۱۰ درجه تغییر می‌کند، محاسبه می‌شود. به ازای مقیاس $[a] = 6$ و با بیشترین مدول‌ها، به ازای تمام زوایا می‌توان به تصویر مورد نظر دست یافت [۳]. برای ردیابی حلقه‌ها در تصاویر از روش ردیابی حلقه‌های خمیده جهت‌مند تاج خورشید استفاده شده است [۵]. این الگوریتم با تکیه بر بیشینه موضعی حلقه‌ها، طی فرآیندی تکراری در ابتدا از روشن‌ترین حلقه آغاز به کار کرده و با توجه به آستانه تعریف شده برای روشنایی، در کم‌نورترین حلقه متوقف می‌شود. طی این فرآیند مختصات حلقه‌های موجود در تصاویر حاصل از تبدیل موجکی در اختیار قرار گرفته و متناسب با هر حلقه یک منحنی قابل نمایش خواهد بود. نتیجه اعمال این الگوریتم بر تصاویر حاصل از تبدیل موجکی بر تصویر ۱۴ آگوست ۲۰۱۰ و ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲ در شکل ۱ آمده است.

در محاسبات برداری با استفاده از تابع فرنٹ - سرت^۱ خواص جنبشی یک ذره که در طول یک منحنی در حال حرکت است، توضیح داده می‌شود [۱۹]. با استفاده از فرمول‌های فرنٹ - سرت می‌توان بردارهای نرمال، نرمال دوم و مماس را در هر

۱. Frenet-Serret



شکل ۲. نمودارهای اندازه‌های ممان‌های زرنیک حلقه‌های مشخص شده در تصاویر سمت راست.

ایجاد می‌شود. این صافی برای f دلخواه، بالاترین نسبت سیگنال به نوفه را دارا بوده و نسبت به صافی‌های دیگر نتیجه بهتری در اختیار قرار می‌دهد [۲۴]. با برازش صافی گاوسی، به صورت زیر

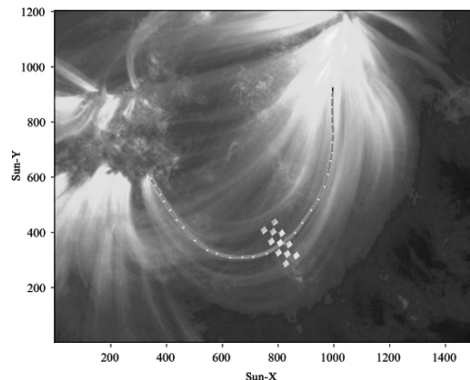
$$F_{\text{fit}}(s, t) = b(t) + f(t) \exp\left(-\frac{(s-a(t))^2}{2\sigma(t)^2}\right) \quad (2)$$

برای هر ستون داده، پهنای حلقه و دامنه نوسان‌ها محاسبه می‌شود. در این رابطه s طول مستطیل در واحد پیکسل، $f(t)$ نمایه دامنه نوسان شدت، \times نمایه دامنه نوسان فضایی، $\sigma(t)$ پهنای تابع گاوسی و $b(t)$ متوسط شار پس زمینه است. در این صورت پهنای حلقه از $\omega = 2\sigma_s \sqrt{2 \ln 2}$ به دست می‌آید که σ_s متوسط مقادیر پهنای تابع گاوسی به دست آمده برای تمامی ستون‌ها است.

برای محاسبه دوره نوسان سریع، تابع سینوسی زیر برازش می‌شود.

$$a_{\text{fit}} = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{P}\right) e^{(t-t_0)/\tau} + a_2 \frac{(t-t_0)}{P} \quad (3)$$

در این رابطه a_0 موقعیت میانی حلقه، a_1 دامنه سینوسی نوسان حلقه، P دوره نوسان حلقه، τ زمان میرایی، a_2/P سرعت سوق و t_0 زمان شروع نوسان است.



شکل ۳. تصویری از یکی از حلقه‌های پایش شده در تصاویر ۱۴ آگوست ۲۰۱۰ که برای استخراج وجوه نوسانی سریع انتخاب شده است.

آگوست ۲۰۱۰ و در دست داشتن بردار نرمال و مماس در راس حلقه، متوازی‌الاضلاعی به طول ۳۰ و عرض ۱۰ خانه تشکیل شده است (شکل ۳).

از آنجایی که وجوه مغناطویدرودینامیکی آرام به صورت طولی منتشر می‌شوند برای حذف وجوه نوسانی آرام، در امتداد حلقه میانگین شدت خانه‌ها محاسبه شده است. تصویر فضا - زمان حاصل از اعمال صافی کمینه اختلاف تصاویر متوالی، مطابق با رابطه

$$\Delta F(t_i) = F(t_i) - \min[F(t_{i-j}), \dots, F(t_{i+j})] \quad (1)$$

می‌شوند. بدین ترتیب طرح‌های نوسانی در اطراف یک بسامد خاص برجسته‌تر خواهند شد. در آخرین مرحله با اعمال عکس تبدیل فوریه، تصویر فضا- زمان جدید با وضوح مطلوب به دست خواهند آمد.

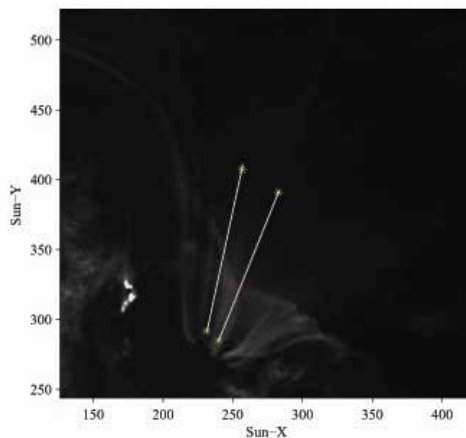
۳. نتایج و خلاصه

روش خودکار شناسایی و پایش حلقه‌های تاج بر تصاویر ۱۴ آگوست ۲۰۱۰ در بازه زمانی ۰۰:۰۰:۰۰ تا ۰۰:۱۵:۰۰ (مجموعه ۱) و داده‌های ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲ در بازه زمانی ۰۷:۱۰:۰۱ تا ۰۷:۲۴:۳۷ (مجموعه ۲) اعمال شد. با استفاده از تبدیل موجکی تابع مورلت حلقه‌ها در تصاویر از زمینه واضح می‌شوند. خانه‌های حلقه‌های واضح شده در هر تصویر با اعمال الگوریتم ردیابی جهت‌مند معین می‌شوند.

حلقه‌های ردیابی شده در مواردی به صورت دو تا چند قطعه دسته‌بندی معین می‌شوند که این بخشی از خطای این الگوریتم است. در مرحله پایش حلقه‌ها در تصاویر متوالی، ممان‌های زرنیک حلقه‌ها (دارای خاصیت ناوردایی انتقال، مقیاس و دوران) به شبکه عصبی PNN داده می‌شوند. برای اولین تصویر از مجموعه ۱، ممان‌های زرنیک ۶۰ حلقه به شبکه آموزش وارد شد. سپس ممان‌های زرنیک حلقه‌های تصاویر بعدی برای پایش توسط شبکه آزموده می‌شوند. در شکل ۵ سمت چپ، حلقه‌های پایش شده تصویر اول در تصاویر متوالی بعدی با مدت زمان پایش هر حلقه نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، (الف) مدت زمان شناسایی یا تعداد تصاویر، حلقه‌ها متفاوت است که به دلیل طول عمر حلقه‌ها و یا عدم شناسایی درست حلقه‌ها است. (ب) محاسبات ما نشان می‌دهند که حلقه‌های بزرگ در مدت زمان بیشتری شناسایی شده و همچنین طول عمر بیشتری دارند.

در شکل ۵ سمت راست، حلقه‌های مربوط به تصاویر ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲ پس از آموزش و آزمون به شبکه بر حسب زمان نشان داده شده‌اند. به دلیل وجود حلقه‌های واضح و بزرگ مدت زمان شناسایی بیشتر ولی تعداد حلقه‌ها کم می‌باشد.



شکل ۴. تصویری از دسته حلقه‌های پایش شده در تصاویر ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲ که برای استخراج وجوه نوسانی آرام انتخاب شده است.

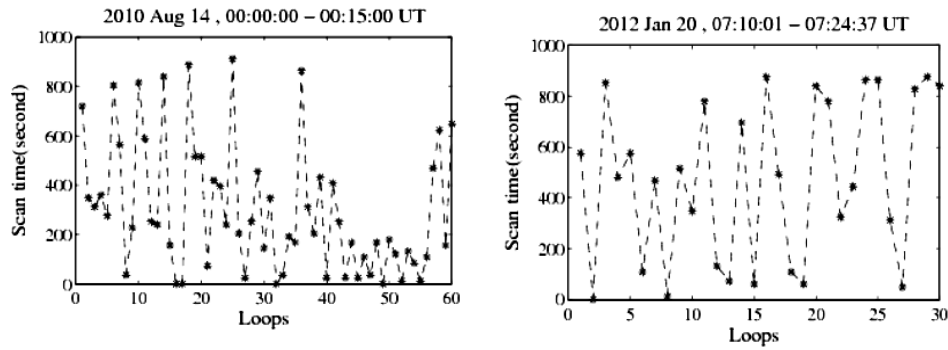
۳.۲. وجه نوسانی آرام

مشابه با استخراج وجوه نوسانی سریع، با انتخاب دو خط موازی با حلقه‌ها و محاسبه میانگین شدت کمان‌های عمود بر حلقه‌ها در محدوده دو خط، تصویر فضا- زمان را برای حلقه‌های روز ۲۰ ژانویه ۲۰۱۲ تشکیل می‌دهیم (شکل ۴). بدین ترتیب وجوه نوسانی سریع حذف شده و طرح‌های مربوط به وجوه آرام به دست می‌آید. طرح‌های تیره و روشن در تصویر فضا- زمان نشان دهنده انتشار موج طولی حاصل از اختلال فشار هستند. با اعمال تبدیل فوریه یک بعدی بر اولین سری زمانی- اولین سطر از تصویر فضا- زمان - بسامد غالب نوسان به دست می‌آید. سپس جهت افزایش وضوح طرح‌های نوسانی وجه آرام، روش صافی پیچشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور پس از محاسبه بسامد غالب نوسان ν_0 با ضریب توانی ps_0 و یافتن بسامد ν_1 با ضریب توانی

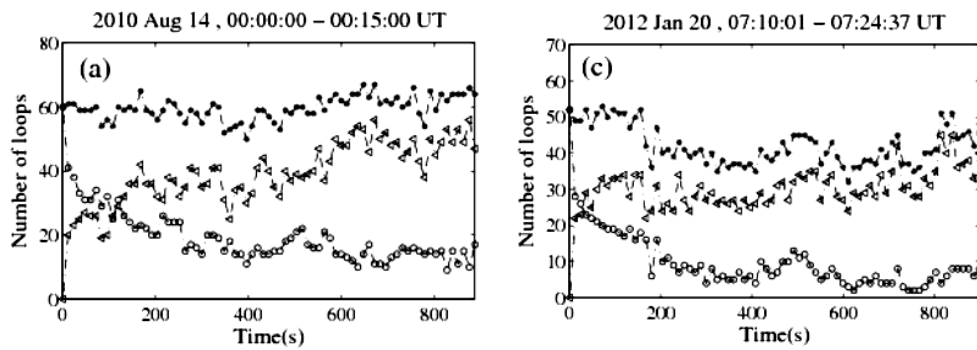
$$ps_1 \left(ps_1 = ps(\nu_1) = ps_0/2 \right) \text{ صافی گاوسی به صورت}$$

$$G_{\text{filter}}(\nu, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\left(\frac{ps - ps_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right) \quad (4)$$

ساخته می‌شود که σ پهنای صافی گاوسی بوده و برابر است با $ps - ps_1$. با ضرب این صافی گاوسی در تبدیل فوریه تمام سری‌های زمانی (سری‌های زمانی مربوط به همه موقعیت‌های فضایی از تصویر فضا- زمان) کلیه ضرایب توانی در فضای فوریه با بیشینه ضریب توانی تابع گاوسی، قیاس و باز توزیع



شکل ۵. شماره حلقه‌های تصویر اول در محور افقی و مدت زمان ردیابی هر حلقه در تصاویر بعدی روی محور عمودی نشان داده شده است.



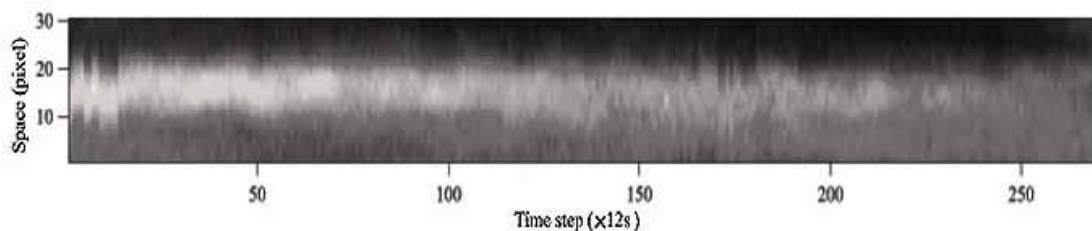
شکل ۶. نمودار تعداد حلقه‌های شناسایی شده از مرحله ردیابی جهت‌مند (*) و تعداد حلقه‌هایی که در شبکه عصبی به درستی (□) و حلقه‌هایی که نادرست شناسایی شده‌اند (◇).

برای استخراج وجه نوسانی سریع، یکی از حلقه‌های پایش شده در تصاویر ۱۴ آگوست ۲۰۱۰ در بازه زمانی ۰۰:۰۰:۰۰ تا ۰۰:۱۵:۰۰ انتخاب شد. زیاد بودن تعداد حلقه‌ها در ناحیه مورد مطالعه و نوسان گروهی آنها، سبب کاهش وضوح طرح‌های نوسانی در تصاویر فضا- زمان می‌شود.

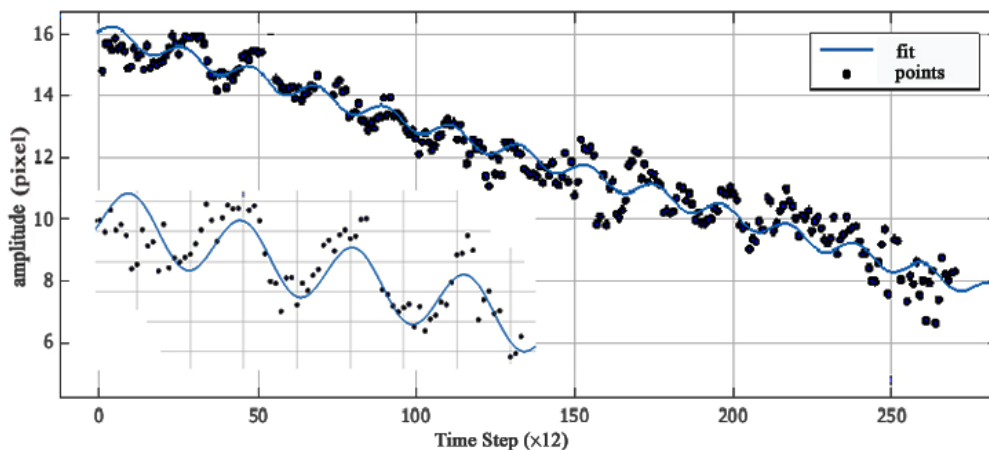
این در حالی است که با اعمال برازش‌های گاوسی و سینوسی، وجه نوسانی سریع به خوبی استخراج می‌گردد. تصویر فضا - زمان به دست آمده در شکل ۷ نمایش داده شده است.

طول حلقه مورد بررسی 1100 Mm و پهنای آن $12/19 \pm 0/8 \text{ Mm}$ محاسبه گردید. مطابق با انتظار پهنای حلقه در حدود ۱۰ درصد از طول حلقه به دست آمد. با توجه به شکل ۸ دامنه و دوره تناوب نوسان از بهترین برازش سینوسی به ترتیب عبارتند از 435 km و $4/2$ دقیقه. همچنین دوره تناوب نوسان

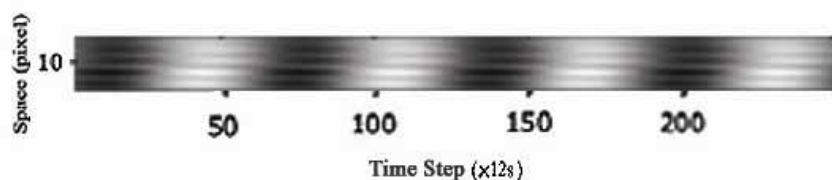
برای بررسی دقت خروجی شبکه عصبی از یک کد بر مبنای دامنه نوسانات حلقه (تجربی) استفاده شده است. با در نظر گرفتن یک مقدار آستانه، تعداد نقاط مشترک حلقه‌هایی که مشابه تشخیص داده شده‌اند را بررسی کرده و خطای ناشی از شبکه عصبی را رفع خواهد کرد. نمودار شکل ۶ نمایانگر تعداد حلقه‌های شناسایی شده از مرحله ردیابی جهت‌مند، تعداد حلقه‌هایی که به صورت درست و اشتباه شناسایی شده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تعداد حلقه‌های شناسایی شده به صورت صحیح با زمان کاهش می‌یابد. به طور قابل انتظار، با افزایش زمان حلقه‌ها از نظر شکل ظاهری و شدت خانه‌ها تغییر پیدا کرده و شناسایی خودکار آنها با مشکل روبه‌رو خواهد شد. همچنین تعداد حلقه‌هایی که به غلط شناسایی شده‌اند با زمان افزایش خواهد یافت. حلقه‌های درست شناسایی شده برای بررسی نوسانات آنها در مرحله بعد استفاده خواهند شد.



شکل ۷. تصویر فضا- زمان به دست آمده برای 27° تصویر فرابنفش دور متوالی تهیه شده توسط تلسکوپ ماهواره‌ای اس‌دی‌او در طول موج 171 آنگستروم، مربوط به روز ۱۴ اگوست ۲۰۱۰، در بازه زمانی $00:02:00$ تا $00:58:00$ با توان تفکیک زمانی ۱۲ ثانیه.



شکل ۸. برازش تابع سینوسی $a_{\text{fit}} = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{P}\right) e^{(t-t_0)/\tau} + a_2 \frac{(t-t_0)}{P}$ بر دامنه‌های نوسان فضایی.



شکل ۹. تصویر فضا - زمان به دست آمده برای 73° تصویر فرابنفش دور متوالی تهیه شده توسط تلسکوپ ماهواره‌ای اس‌دی‌او، در طول موج 171 آنگستروم، مربوط به ۱۰ ژانویه ۲۰۱۲ در بازه زمانی $07:10:01$ تا $07:24:37$ با توان تفکیک ۱۲ ثانیه.

مغناطوهیدرودینامیک، مشابه با وجه سریع نوسان، تصویر فضا - زمان را برای حلقه‌های روز ۱۲ ژانویه ۲۰۱۲ در بازه زمانی $07:10:01$ تا $07:24:37$ به دست می‌آوریم. چنانچه در شکل ۴ نشان داده شده است، برای یک دسته حلقه که از دو سمت، توسط کمان‌هایی محصور شده‌اند، با متوسط‌گیری از پیکسل‌های این ناحیه در راستای عمود بر حلقه در تصاویر متوالی، مطابق با شکل ۹ تصویر فضا - زمان تشکیل می‌شود. بسامد غالب نوسان $0/0011$ هرتز به دست آمد.

با استفاده از دوره‌سنج لامب-اسکارگل [۱۵] برابر $4/27$ دقیقه و سرعت فاز برابر $8/7 \times 10^3 \text{ kms}^{-1}$ به دست آمد. با در نظر گرفتن اثرات ناشی از حضور و نوسان سایر حلقه‌ها، محاسبه دقیق زمان میرایی به استناد طرح نوسانی در تصویر فضا - زمان مربوطه و رفتار تناوبی دامنه نوسان فضایی به طور تقریبی ۴۸ دقیقه گزارش می‌شود. مقادیر به دست آمده برای طول حلقه، دامنه نوسان و دوره تناوب با نتایج پیشین در سازگاری خوبی هستند [۲۵].
به منظور بررسی ماهیت نوسانی وجه آرام

حلقه‌های درست شناسایی شده برای مطالعه نوسان‌ها استفاده می‌شوند. در مطالعه نوسان‌های عرضی حلقه‌ها با متوسط‌گیری در امتداد طول حلقه‌ها از خانه‌ها، تصویر فضا-زمان ایجاد می‌شود. از طرح نوسانی ایجاد شده با صافی گاوسی، دامنه نوسان‌ها استخراج می‌شود. با توجه به غیر یکنواخت بودن بازه‌های زمانی بین دامنه‌های استخراج شده بر حسب زمان در زمان‌های متوالی، برای به دست آوردن دوره تناوب نوسان از آنالیز لامب-اسکارگل استفاده می‌شود. آنالیز فوریه در چنین مواردی قابل استفاده نخواهد بود. بسامد نوسان‌ها در حدود قابل قبول ۴ دقیقه به دست آمد.

در این مقاله بسته ابزاری کارآمدی ارائه شده است که ترکیبی از الگوریتم‌های مختلف شناسایی، پایش و در نهایت استخراج نوسان‌ها است. برای افزایش وضوح و تمیز حلقه‌ها از زمینه تصاویر آنالیز موجکی استفاده شده است. با این ابزار بسیاری از نوفه‌ها نیز حذف می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم ردیابی جهت‌مند، خانه‌های حلقه‌ها شناسایی و برچسب زده می‌شوند. ممان‌های زرنیک حلقه‌ها شناسایی و با استفاده از طبقه‌بندی و شناسایی کننده خودکار، حلقه‌ها در زمان یا تصاویر متوالی، شناسایی می‌شوند. با افزایش زمان به دلیل دینامیک قابل ملاحظه حلقه‌ها، تعداد حلقه‌های درست شناسایی شده کاهش می‌یابند.

مراجع

1. M Stix, "The Sun: An introduction", Springer, New York (2002).
2. M J Aschwanden, "Physics of the Solar Corona", Springer, Germany (2004).
3. S Biskri, J P Antoine, B Inhester, and F Mekideche, *Solar Phys.* **262** (2010) 373.
4. S Taran and H Safari, *Iranian Journal of Physics Research* **12**, 3 (2012) 72.
5. M J Aschwanden, *Solar Phys.* **262** (2010) 399.
6. P M Edwin and B Roberts, *Solar Phys.* **88** (1983) 179.
7. H Safari, S Nasiri, K Karami, and Y Sobouti, *Astronomy and Astrophysics* **448** (2006) 375.
8. H Ebadi, M Hosseinpour, and Z Fazel, arXiv:1303.0833.
9. H Safari, S Nasiri, and Y Sobouti, *Astronomy and Astrophysics* **470** (2007) 1111.
10. K Karami and M Barin, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **394** (2009) 521.
11. A Abedini and H Safari, *New Astronomy* **16** (2011) 317.
12. N Alipour Rad and H Safari, *Iranian Journal of Physics Research*, **12**, 1 (2012) 29.
13. A Abedini, H Safari, and S Nasiri, *Solar Phys.* **280** (2012) 137.
14. M J Aschwande, Schrijver, and J Carolus, *Astrophysical Journal* **736** (2012) 13.
15. M S Marsh, R W Walsh, and S Plunkett, *Astrophysical Journal* **697** (1998) 1674.
16. I D Moortel, J Ireland, R W Walsh and A W Hood, *Sol. Phys.* **209** (2002) 61.
17. "SDO Our Eye on the Sun", NASA (2010).
18. N Alipour, H Safari, and D E Innes, *Astrophysical Journal* **746** (2012) 12.
19. H C Crenshaw and L Edelstein-Keshet, *Bulletin of Mathematical Biology* **55** (1993) 213.
20. K M Hosny, *Information Sciences* **180** (2010) 2299.
21. M Bazarghan, H Safari, D E Innes, E Karami, and S K Solanki, *Astronomy and Astrophysics* **492** (2008) 13.
22. E Tajfirouze and H Safari, *Astrophysical Journal* **744** (2012) 113.
23. س قنبرزاده، «مطالعه نوسانات ستاره‌ای از تحلیل داده‌های فتومتری»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان (۱۳۹۱).
24. ن فرهنگ، «آشنکارسازی امواج سریع و آرام مغناطوهیدرودینامیکی از تصاویر فرابنفش دور تاج خورشید»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان (۱۳۹۲).
25. D J Pascoe, V M Nakariakov, T D Arber, and K Murawski, *Astron. Astrophys.* **494** (2009) 1119.