

جابجایی‌های عرضی کینک در حلقه‌های خورشید با استفاده از مدل استوانه‌ای نازک

حسین رضالو^۱ و سیما ضیغمی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده

دمای بالای تاج خورشید نسبت به لایه‌های زیرین آن مانند شیدسپهر و رنگین سپهر و شتاب بادهای خورشیدی هنوز دو موضوع حل نشده در فیزیک خورشید هستند. به علت بیشتر بودن فشار مغناطیسی نسبت به فشار گرمایی تاج، حلقه‌های خورشیدی ساختارهای مغناطیسی دارند که می‌توانند برای انتقال انرژی گرمایی در جو فوقانی خورشید نقش داشته باشند. در این تحقیق، با استفاده از تصاویر مشاهده شده با تلسکوپ پرتو ایکس هیبنوده (Hinode/xrt) که در تاریخ ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۷ گرفته شده، پارامترهای فیزیکی مثل طول حلقه، زمان تناوب، سرعت فاز، سرعت آلفون و میدان مغناطیسی وابسته به آنها تعیین می‌گردد. پس از دریافت تصاویر آماده کردن برش‌های زمانی از آنها، به روش موجک این نوسانات عرضی تحلیل می‌گردند. طول سه حلقه با تقریب نیم‌حلقه، به اندازه‌های 11 ± 1 ، 8 ± 0.8 و 6 ± 0.6 مگامتر تعیین شد. با در نظر گرفتن مقادیر تقریبی چگالی پلاسما در حلقه‌ها و میانگین وزن مولکولی در تاج و نیز میانگین چگالی عددی در تاج، میانگین زمان تناوب نوسانات به ترتیب در محدوده $3.0 - 1.6$ ، $3.0 - 4.0$ و $3.0 - 8.0$ دقیقه به دست آمد. حداکثر سرعت فاز این نوسانات به ترتیب به اندازه 628 ± 1256 ، 890 ± 445 و 350 ± 700 کیلومتر بر ثانیه برای سه حلقه محاسبه شد. همچنین حداکثر سرعت آلفون در هر حلقه به ترتیب به اندازه 904 ± 452 ، 320 ± 640 و 252 ± 504 کیلومتر بر ثانیه تعیین شد. حداکثر میدان مغناطیسی مربوط به این نوسانات با روش لرزه‌شناسی با تقریب مدل استوانه‌ای نازک برای سه حلقه به ترتیب برابر با 8.0 ± 1.6 ، 5.0 ± 1.1 و 4.1 ± 2.8 گاوس محاسبه شد. نتایج همبستگی موجک نشان داد که به ازای بسامدهای خاصی مد کینک پایه و اولین حالت برانگیخته کینک در لوله در حال نوسان ظاهر می‌شود. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان این نوسانات را به عنوان نوسانات عرضی کینک تفسیر نمود.

کلمه‌های کلیدی: پردازش تصویر، میدان مغناطیسی، حلقه‌های خورشیدی، لرزه‌شناسی، تلسکوپ پرتو ایکس هیبنوده

۱ مقدمه

دمای بالای تاج خورشیدی نسبت به لایه‌های شیدسپهر و رنگین سپهر و شتاب بادهای خورشیدی هنوز دو موضوع حل نشده در فیزیک خورشیدی به‌شمار می‌روند (کلیمچوک ۲۰۰۶). یکی از ساختارهای مهم در تاج خورشید، حلقه‌هایی هستند که می‌توانند برای انتقال انرژی گرمایی در جو فوقانی خورشیدی پیشنهاد شوند (اشمایدرو همکاران ۲۰۰۴، انتولین و ورویخت ۲۰۱۱، انتولین و فرامنت ۲۰۲۲). حلقه‌های تاج ساختارهای گرم و مغناطیسی هستند که اغلب دارای نوسانات عرضی بوده و معمولاً به امواج مغناطوایدرو دینامیکی (MHD) در تاج خورشیدی نسبت داده می‌شوند (ناکاریاکوف و همکاران ۱۹۹۹، آنتولین و همکاران ۲۰۱۱، تیان و همکاران ۲۰۱۱، ناکاریاکوف و کولوتکوف ۲۰۲۰). ناکاریاکوف و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده از تلسکوپ فضایی تریس، نوسانات میرای عرضی یک حلقه تاجی روشن به طول تقریبی ۱۳۰ مگامتر را در خط انتشار ۱۷۱ آنگستروم مشاهده کردند که توسط یک شراره خورشیدی در منطقه فعال مجاور برانگیخته شده بود. زمان فروپاشی نوسانات برای یک نوسان با فرکانس تقریبی ۳/۹ میلی‌هرتز برابر با ۱۴/۵ دقیقه بود. یکی از مهمترین امواج MHD در خورشید، نوسان کینک یا مارپیچی است که همیشه بر حلقه نوسانی عمود است (اشواندن ۲۰۰۰، افمن و ونگ ۲۰۰۸، اوکوموتو ۲۰۰۴، ناکاریاکوف و همکاران ۲۰۲۱؛ لی و همکاران ۲۰۲۳). حلقه‌های تاجی در محدوده ۱ الی ۲ مگا کلونین مشاهده می‌شوند (انتیاخوس و همکاران ۲۰۱۴، دی مورتل ۲۰۰۹). حلقه‌های تاجی اغلب در پرتوهای فرابنفش دور (EUV) و پرتو ایکس مشاهده می‌شوند. (دی مورتل ۲۰۰۹، ریل ۲۰۱۴). انتشار امواج نیز یکی از روش‌های انتقال انرژی در فواصل زیاد از سطح خورشید و گرم شدن پلاسمای تاج است. با توجه به دستاوردهای جدید در پرتاب تلسکوپ‌های فضایی، امکان رصد امواج و تعیین

پارامترهای فیزیکی آنها فراهم شده است. شریواستا و همکاران (۲۰۲۳) ویژگی‌های نوسانات نامیرا را در حلقه‌های کوچک واقع در حفره‌های تاج و تاج آرام مطالعه نمودند. آنها میانگین دامنه جابجایی ۱۳۶ کیلومتر، زمان تناوب نوسانات را در محدوده‌ای از ۲۷ تا ۲۷۶ ثانیه و دامنه‌های سرعت را از ۲/۲ تا ۱۹/۳ کیلومتر بر ثانیه بدست آوردند.

میدان‌های مغناطیسی خورشید باعث ایجاد پدیده‌های مختلفی می‌شود که همه آنها به‌عنوان فعالیت‌های خورشیدی شناخته می‌شوند. برخی از این فعالیت‌ها شامل ایجاد لکه‌های خورشیدی بر روی سطح خورشید، شعله‌های عظیم خورشیدی و بادهای خورشیدی است. در ساختارهای دینامیکی خورشید، انتشار امواج و ناپایداری‌ها امکان‌پذیر می‌شود، به‌طوری که مطالعه این ساختارها مورد توجه قرار گرفته است (توابی و همکاران ۲۰۱۵). نوسانات حلقه‌های خورشیدی را می‌توان با روش‌های تصویری و طیفی تشخیص داد. در اولی، جابه‌جایی‌ها و اختلالات در تصاویر اندازه‌گیری می‌شوند (ناکاریاکوف و افمن ۲۰۰۱، ناکاریاکوف و ورویخت ۲۰۰۵). اما در دومی، الگوهای تناوبی که تحت جابجایی‌های دوپلری توسط طیف سنج‌ها ثبت می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرند. (توابی و همکاران ۲۰۱۹، ناکاریاکوف و ورویخت ۲۰۰۵). در روش طیف‌سنجی، شیفت دوپلری و رفتار تناوبی آنها وجود نوسانات یا امواج درون این ساختار را نشان می‌دهد. پردازش تصویر، نوسانات در شدت حلقه‌ها و حرکات ظاهری آنها را نشان می‌دهد. مشاهدات تصویری پس از پرتاب فضایی Hinode بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در چند دهه اخیر، تلاش فیزیکدانان خورشیدی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی جو خورشید افزایش یافته است. برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی از روش‌های زیر استفاده می‌شود:

(۱) روش رادیویی بر اساس تابش ژیرورزونانس (کی و

شیدسپهر به‌عنوان کاندیدای مناسبی برای منبع این امواج معرفی شده‌اند. با استفاده از ابزار Hinode/EI، هارا و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که حلقه‌های ناحیه فعال حرکات رو به بالا با افزایش سرعت‌های غیر حرارتی را نشان می‌دهند. کولوتکو و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله مروری خود جنبه‌های مشاهده‌ای و نظری امواج مغناطویدرودینامیکی و ارتباط آن را با لرزه‌شناسی خورشید را بررسی نمودند، که شامل نوسانات در حلقه‌های تاجی و رشته‌ها، تا ساختارهای شبه‌تناوبی در شراره‌ها، دینامیک موج MHD در شرایط تاج غیر آدیاباتیک، امواج در فضای پایین‌تر، و تکنیک‌ها و رویکردهای جدید برای مدل‌سازی نظری و تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌باشد.

ما در این تحقیق، برای اولین بار نوسانات کینک حلقه‌های مجزا را در فیلتر Hinode/xrt برای هر حلقه آشکار نمودیم. پس از پردازش تصاویر، پروفایل‌های شدت در نواحی مختلف حلقه‌های خورشیدی را به‌دست آورده و با روش لرزه‌شناسی که شامل اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های عرضی، زمان پرپود، طول حلقه و در نهایت میدان مغناطیسی می‌شود، تجزیه و تحلیل می‌کنیم.

۲ مشاهدات

ابتدا، تصاویر سری زمانی گرفته شده در ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۷ در بازه زمانی ۰۶:۲۰:۱۶ تا ۱۷:۵۶:۲۵ زمان جهانی توسط تلسکوپ پرتو ایکس هینوده (Hinode/Xrt) استخراج می‌کنیم. وضوح مکانی در هر پیکسل تصویر ۸۰۰ کیلومتر برای هر سری داده است. فاصله زمانی بین دو تصویر متوالی، زمان نوردهی، موقعیت مراکز X و Y به ترتیب ۹۰ ثانیه، ۰/۵۱۳۴۴ ثانیه، ۸۹۳/۲۷۷ ثانیه کمانی، ۲۴۲/۸۷۵- ثانیه کمانی است. خلاصه مشخصات تصاویر در جدول ۱ آورده شده است.

همکاران ۲۰۰۳، یو و همکاران (۲۰۱۶).

(۲) روش‌های نوری و فرابنفش دور که بر اساس تغییر طیفی انتشار در ناحیه شیدسپهر ناشی از اثرات زیمن است (بار ۱۹۸۱ و لیمن و همکاران ۲۰۲۱).

(۳) مشاهدات چرخش فارادی منابع رادیویی مناسب برای قسمت بالایی تاج (وود و همکاران ۲۰۲۳).

(۴) روش‌های برون‌یابی غیرمستقیم که میدان مغناطیسی شیدسپهر را تجزیه و تحلیل می‌کند (استانکوویچ ۲۰۲۳).

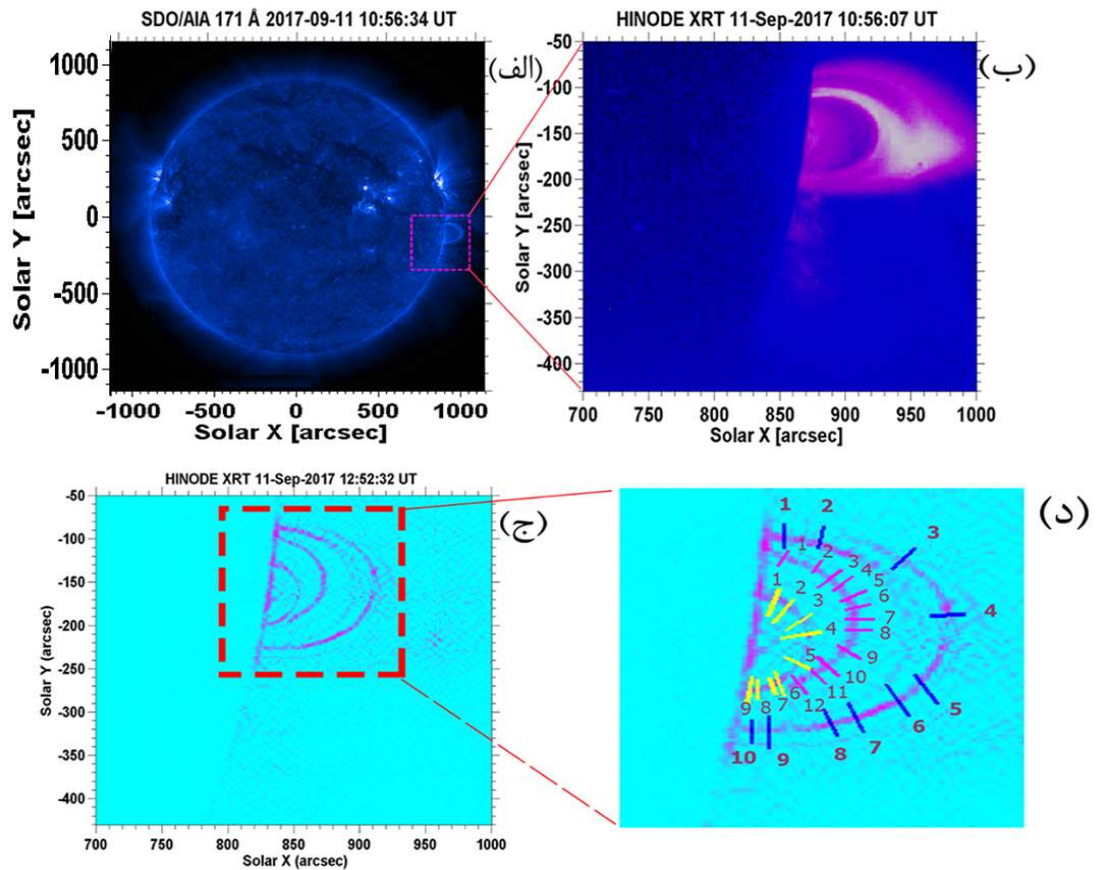
(۵) روش بازسازی خطوط میدان مغناطیسی در تاج، به کمک روش‌های پتانسیلی و بدون نیرو (وا یگلمن و همکاران، ۲۰۲۳).

اما تاکنون موارد محدودی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ساختارهای تاج خورشید با دقت بالا وجود داشته است (کوماری و همکاران ۲۰۱۹، وود و همکاران ۲۰۲۳).

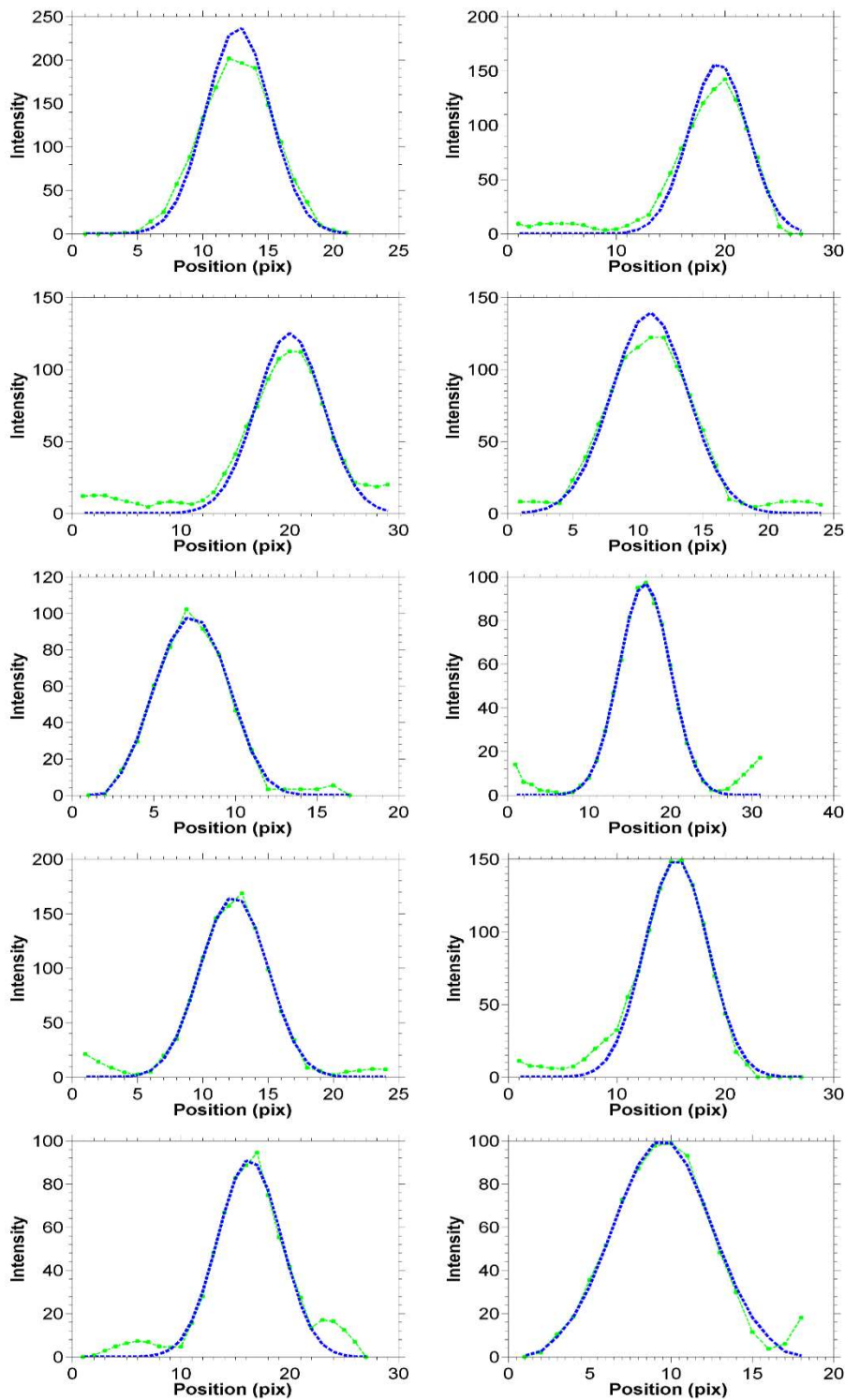
روش لرزه‌شناسی مبتنی بر امواج MHD اخیراً برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تاج ابداع شده است که بر اساس نشانه‌های موج مشاهده شده در جو خورشید پایه ریزی شده است. با توجه به وجود امواج MHD، امواج تاجی را می‌توان در مجاورت بازاتصال مغناطیسی، یا اختلالاتی که می‌تواند از طریق میدان مغناطیسی جفت شده با شیدسپهر به تاج خورشیدی برسند، آشکار نمود. اساس این روش مشابه زلزله‌شناسی خورشید است. به این ترتیب می‌توان با مشاهدات و سپس با در نظر گرفتن مدل مناسب برای ساختار تاج، ویژگی‌های موج و پارامترهای فیزیکی محیط مانند دامنه، طیف زمانی و مکانی، دما و ساختارهای چگالی را به‌دست آورده و خواص مشاهده شده را با پارامترهای فیزیکی مقایسه کرد. بر اساس تئوری موج مغناطویدرودینامیکی، میدان مغناطیسی و ضرایب انتقال این امواج به هم مرتبط هستند. اما منبع این امواج به طور قطعی مشخص نشده است، اگر چه حالت‌های p در

جدول ۱. ویژگی‌های رصدی سری زمانی.

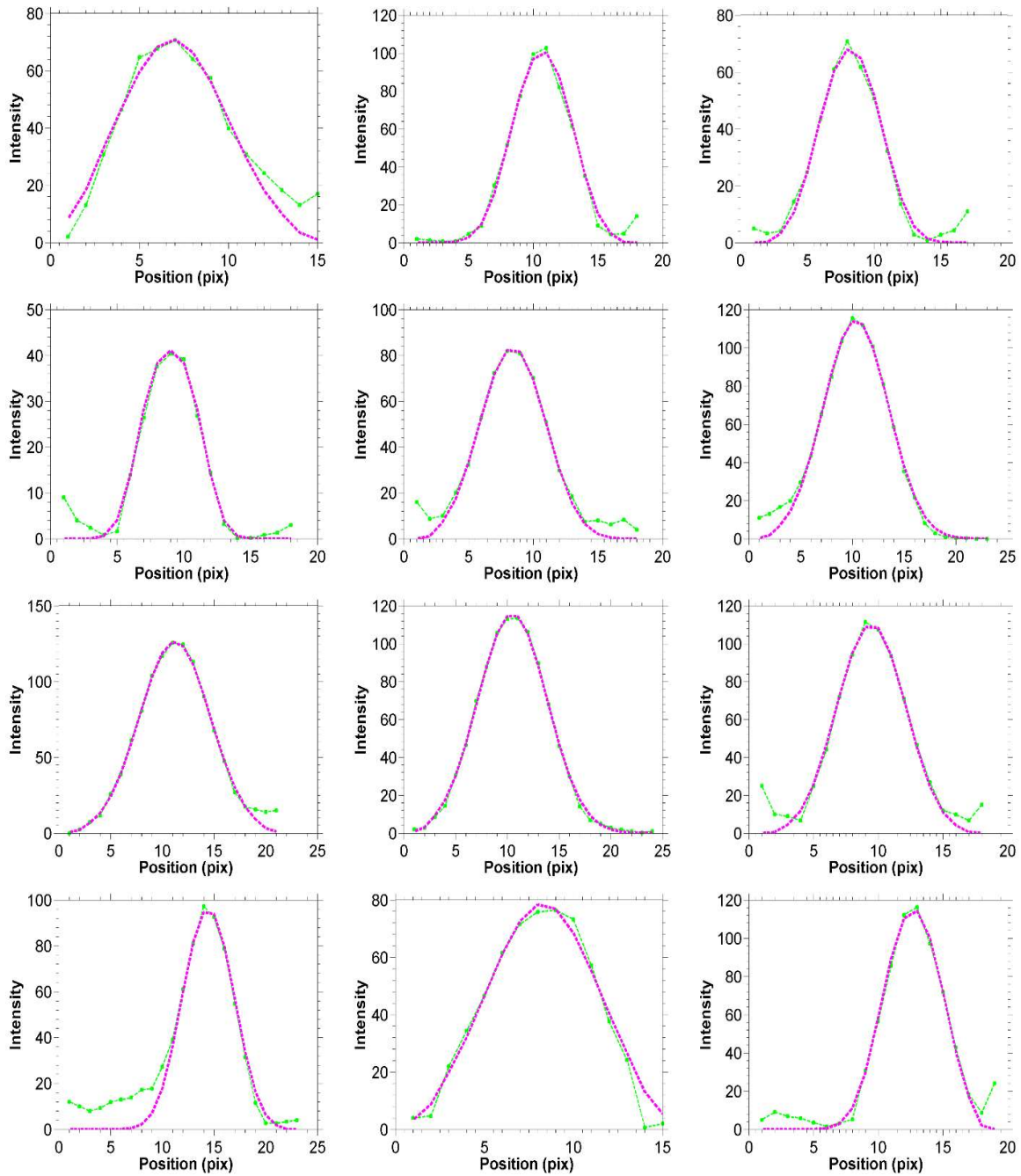
تاریخ	شروع (U.T.) پایان (U.T.)	اندازه تصویر (ثانیه کمانی)	مقیاس افقی مقیاس قائم (ثانیه کمانی)	مرکز تصویر (ثانیه کمانی)	زمان نوردهی (ثانیه)	میدان دید افقی میدان دید قائم (ثانیه کمانی)	اندازه پیکسل (km)	فاصله زمانی تصاویر (s)
۱۱ سپتامبر ۲۰۱۷	۰۶:۲۰:۱۹ ۱۷:۵۶:۲۵	۳۸۴×۳۸۴	۱/۰۲۸۶۰ ۱/۰۲۸۶۰	۸۹۳/۲۷۷ -۲۴۲/۸۷۵	۰/۵۱۳۴۴۰	۳۹۴/۹۸۲ ۳۹۴/۹۸۲	۸۰۰	۹۰



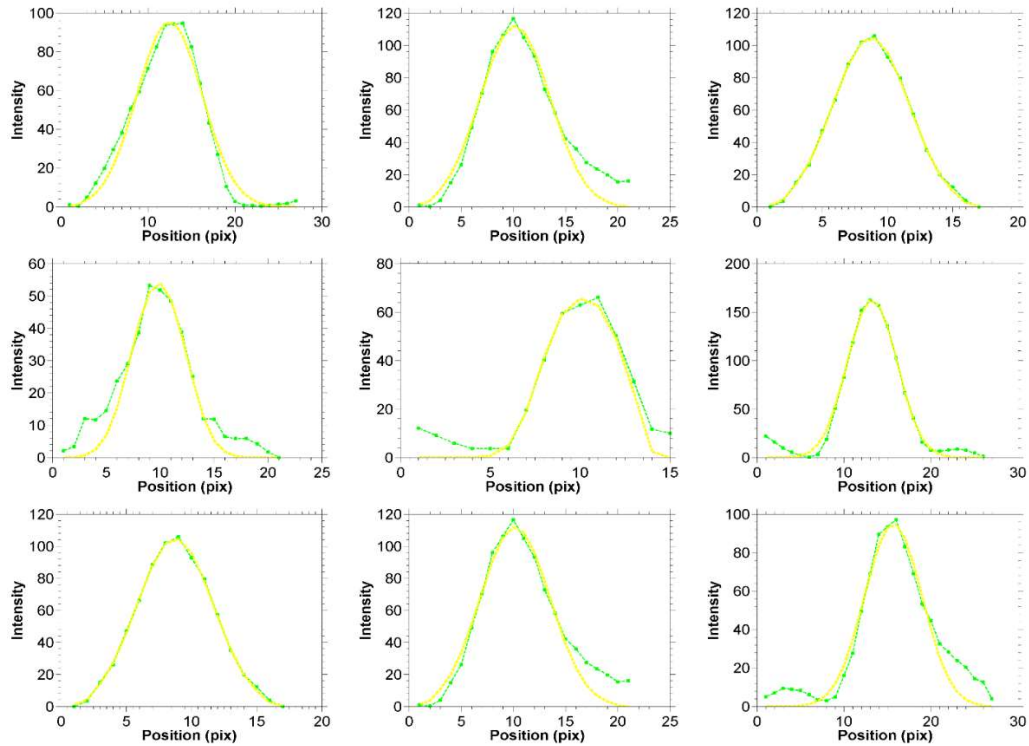
شکل ۱. (الف) تصویر خورشید را نشان می‌دهد که توسط رصدخانه دینامیکی خورشید در طول موج ۱۷۱ آنگستروم در ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۷ گرفته شده است، مستطیل نقطه چین میدان دید تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. (ب) تصویر حلقه‌های تاج گرفته شده از تلسکوپ هینوده است. (ج) تصویر پردازش شده و مستطیل قرمز رنگ ناحیه مورد بررسی را نشان می‌دهد. (د) تصویر بزرگنمایی شده از شکل (ج) و نواحی مورد بررسی است.



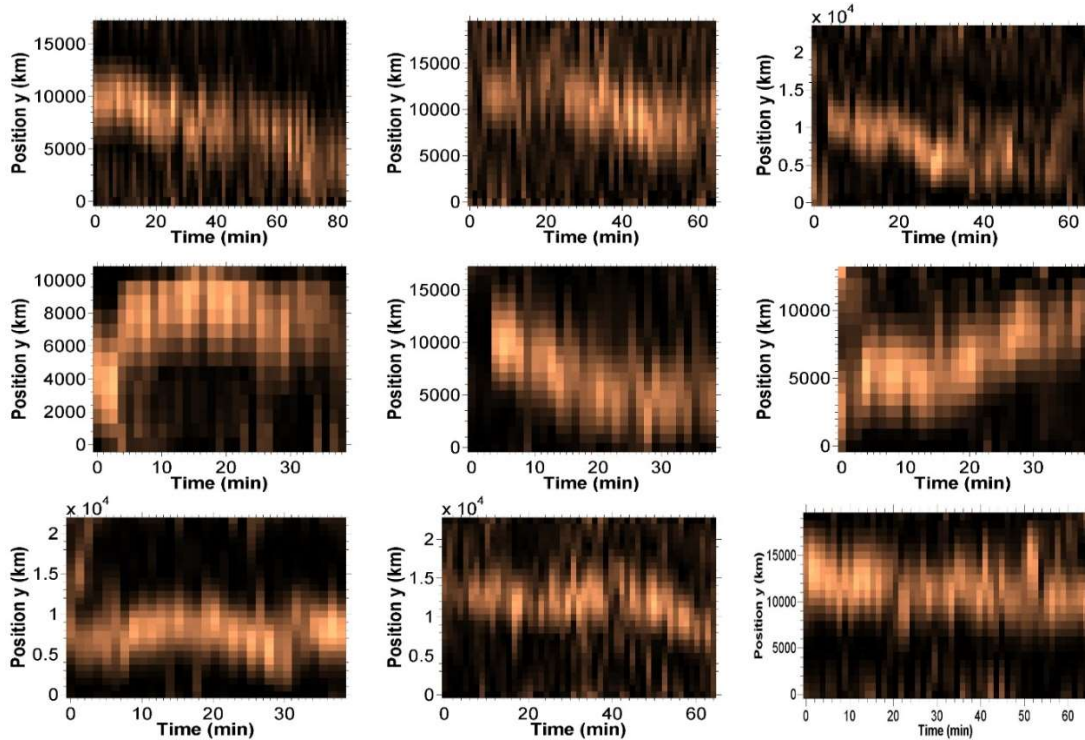
شکل ۲. از چپ به راست و از بالا به پایین، پروفایل‌های شدت عرضی در امتداد ۱۰ شکاف آبی رنگ شکل ۱ (د). منحنی‌های سبزرنگ پروفایل‌های شدت و منحنی‌های آبی رنگ برازش گاوسین آنها را نشان می‌دهد. محور افقی برحسب پیکسل (هر پیکسل تقریباً معادل با ۸۰۰ کیلومتر) و محور قائم بر حسب DN می‌باشد. موقعیت بیشینه شدت پروفایل‌های برازش شده در نمودارها را مشخص و ذخیره می‌کنیم. عرض پروفایل‌ها در محدوده ۵ الی ۸ پیکسل (۴ الی ۶/۴ مگامتر) قرار گرفته است که می‌تواند نمادی از پهنای حلقه باشد.



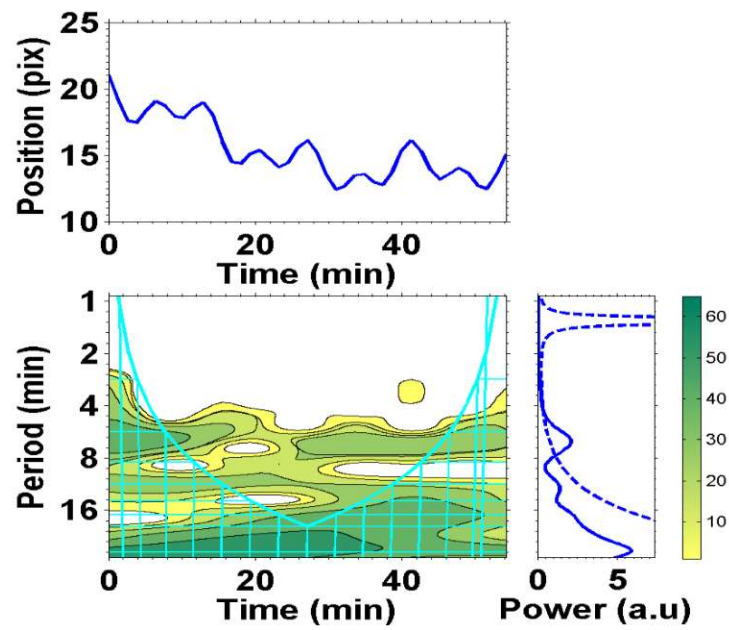
شکل ۳. از چپ به راست و از بالا به پایین، پروفایلهای شدت عرضی در امتداد ۱۲ شکاف صورتی رنگ شکل ۱ (د). منحنیهای سبزرنگ پروفایلهای شدت و منحنیهای صورتی رنگ برازش گاوسین آنها را نشان می دهد. محور افقی برحسب پیکسل (هر پیکسل تقریباً معادل با ۸۰۰ کیلومتر) و محور قائم بر حسب DN می باشد. عرض پروفایلها در محدوده ۵ الی ۸/۵ پیکسل (۴ الی ۶/۸ مگامتر) قرار گرفته است که می تواند نمادی از پهنای حلقه باشد.



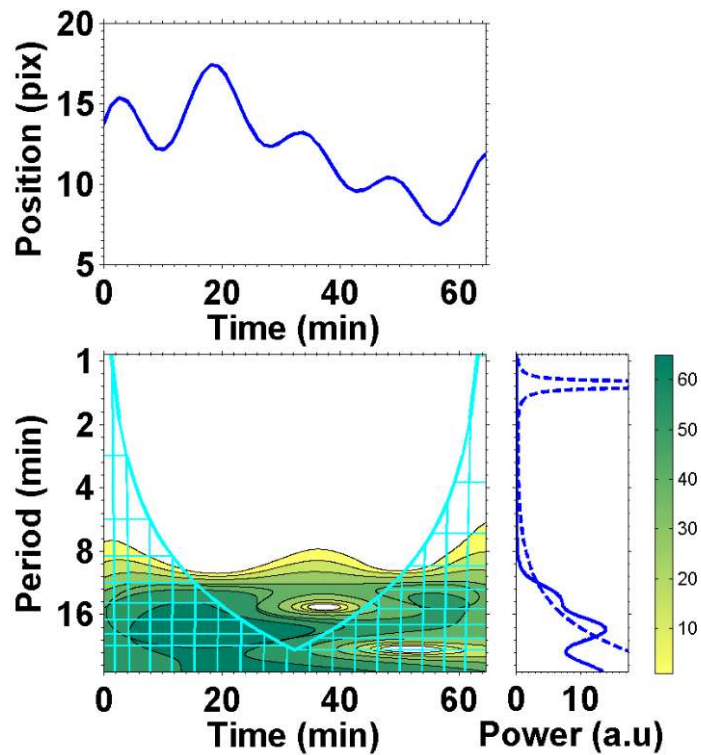
شکل ۴. از چپ به راست و از بالا به پایین، پروفایلهای شدت عرضی در امتداد ۹ شکاف زرد رنگ شکل ۱ (د). منحنی های سبز رنگ پروفایلهای شدت و منحنی های زرد رنگ برازش گاوسین آنها را نشان می دهد. محور افقی برحسب پیکسل (هر پیکسل تقریباً معادل با ۸۰۰ کیلومتر) و محور قائم بر حسب DN می باشد. عرض پروفایل ها در محدوده ۵ الی ۹ پیکسل (۴ الی ۷/۲ مگامتر) قرار گرفته است که میتواند نمادی از پهنای حلقه باشد.



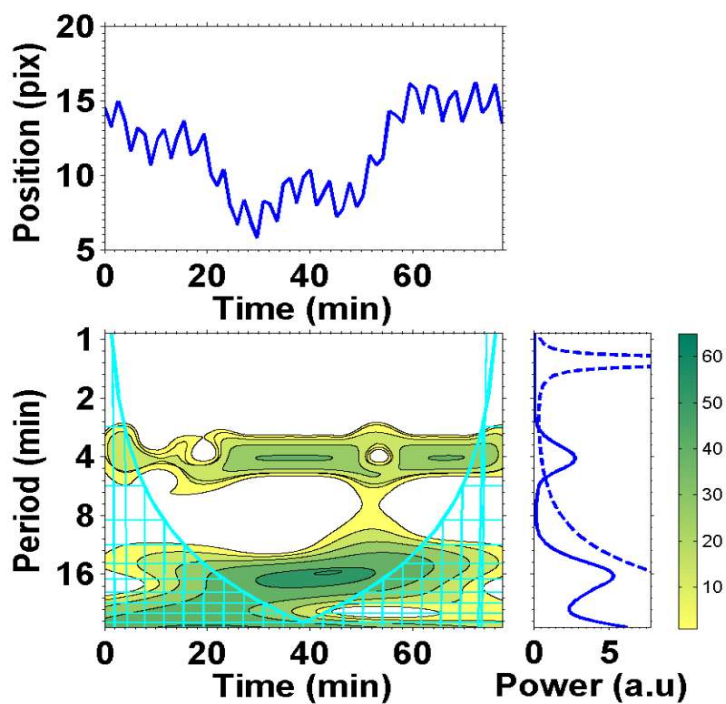
شکل ۵. سه تصویر بالا، میانی و پایینی، به ترتیب تحول زمانی مربوط به شکاف های آبی رنگ با شماره های ۳-۴-۵ از حلقه اول شکل ۱، شکاف های ۱-۷-۱۱ صورتی رنگ از حلقه دوم و شکاف های زرد رنگ ۱-۴-۶ از حلقه سوم شکل ۱ را نشان می دهد. جابجایی های عرضی به وضوح دیده می شود.



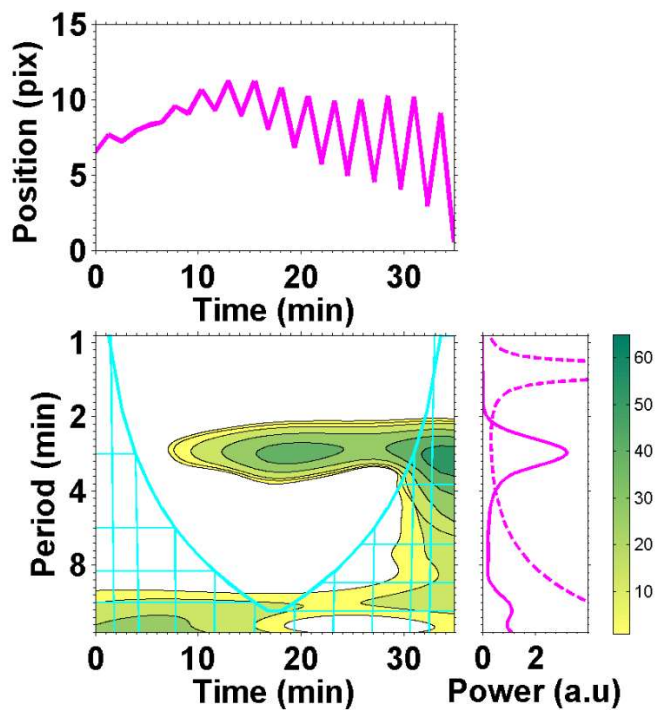
شکل ۶. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مورلت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف آبی رنگ شماره ۳ شکل ۱، استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



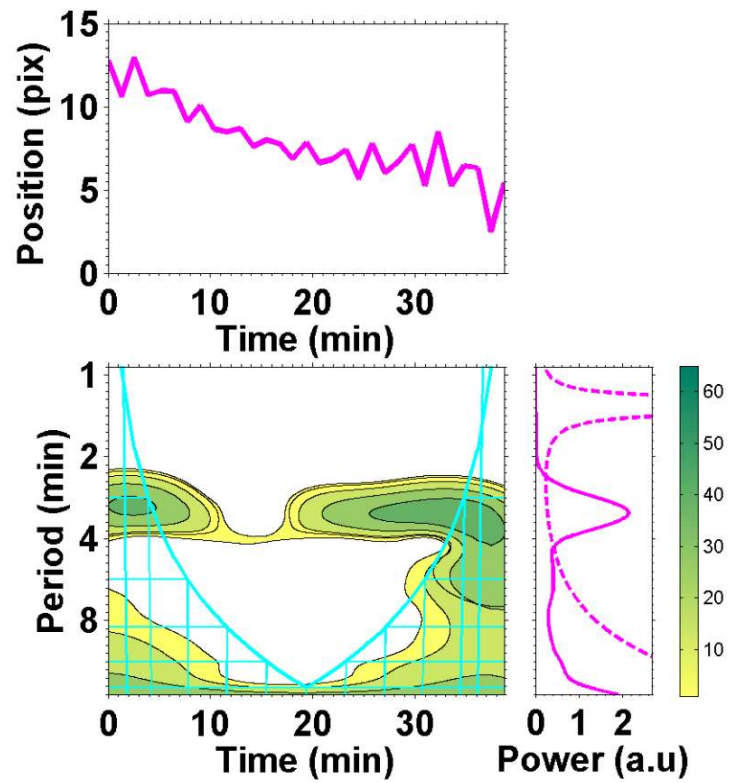
شکل ۷. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مورلت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف آبی رنگ شماره ۴ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



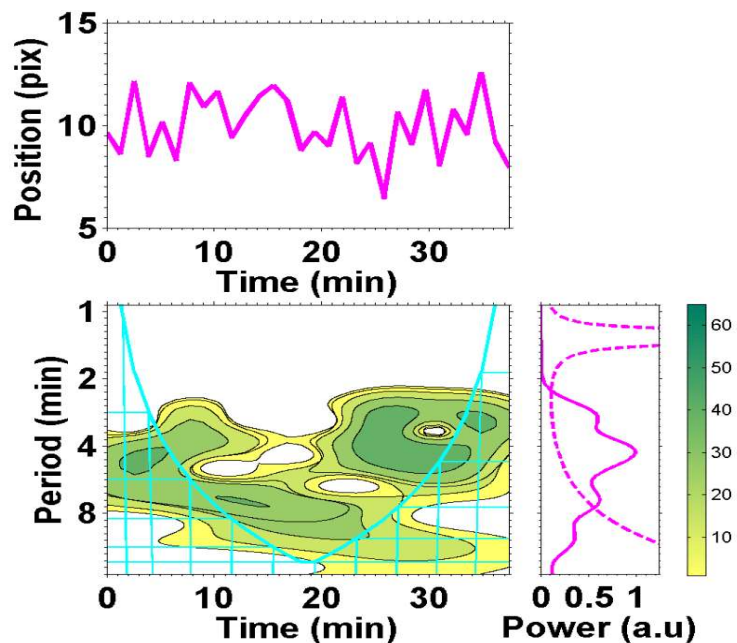
شکل ۸. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مورلت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف آبی رنگ شماره ۵ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



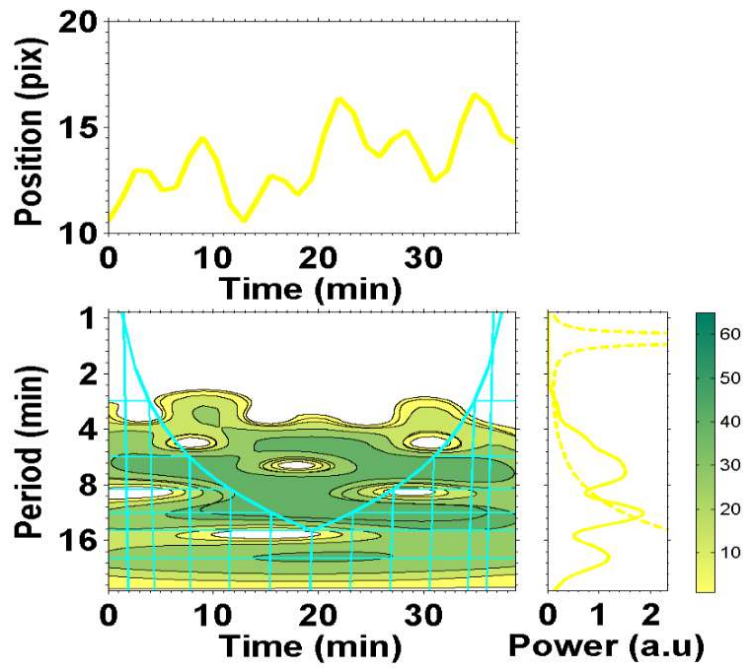
شکل ۹. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مورلت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف صورتی رنگ شماره ۱ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



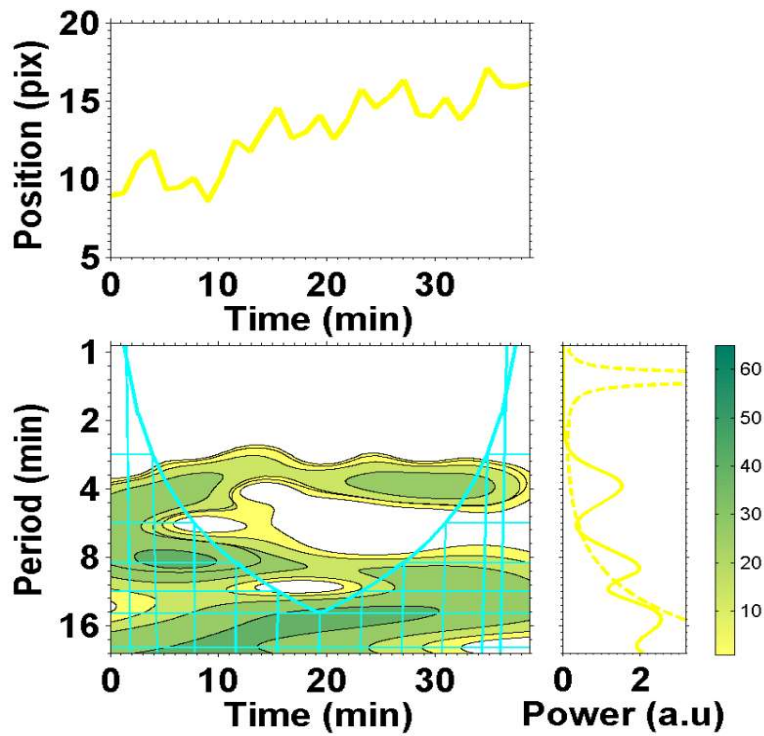
شکل ۱۰. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مورلت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف صورتی رنگ شماره ۷ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



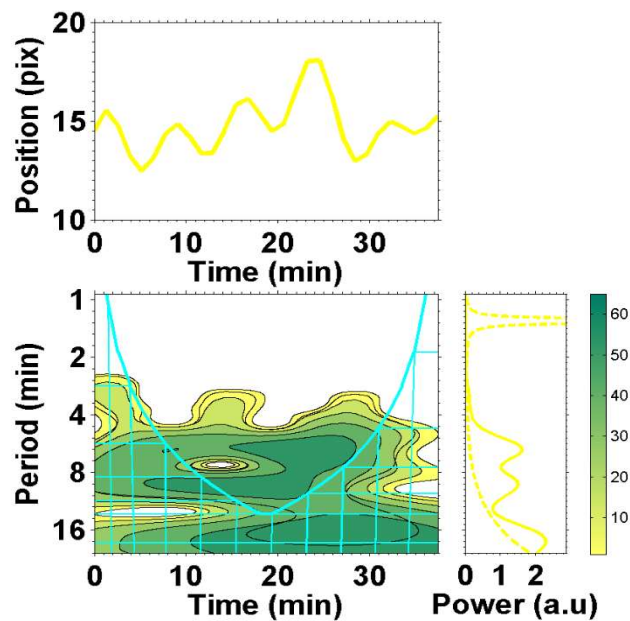
شکل ۱۱. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مورلت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف صورتی رنگ شماره ۱۱ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مولت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف زرد رنگ شماره ۱ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مولت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف زرد رنگ شماره ۴ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. نتایج تحلیل موجک، تغییرات زمانی جابجایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک مورلت و طیف‌های توان موجک کلی، در امتداد شکاف آبی رنگ شماره ۶ شکل ۱ استخراج شده از برش‌های زمانی نشان داده شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.

۳ تحلیل داده‌ها

پس از استخراج مجموعه داده‌ها، ابتدا تصاویر را پردازش می‌کنیم. یک تصویر در برنامه متلب یک ماتریس را تشکیل می‌دهد. این تصویر رامی توان با تابع دو بعدی $f(x,y)$ نشان داد، که در آن X و Y مختصات فضایی هستند و مقدار f در هر نقطه روشنایی تصویر در آن نقطه نامیده می‌شود. اصطلاح سطح خاکستری به روشنایی تصاویر تک رنگ اشاره دارد. تصاویر رنگی نیز از تعدادی تصویر دو بعدی تشکیل شده است. زمانی که مقادیر X و Y و مقدار $f(x,y)$ با مقادیر گسسته و محدود بیان شوند، تصویر را تصویر دیجیتال می‌نامند. رقمی کردن مقادیر X و Y نمونه برداری و دیجیتالی مقدار $f(x,y)$ را کوانتیزه می‌گویند. برای نمایش یک تصویر $M \times N$ ، از یک آرایه دو بعدی (ماتریس) دارای M ردیف و N ستون استفاده می‌کنیم. هر عنصر آرایه می‌تواند مقداری بین صفر تا یک داشته باشد. ما برنامه‌های مختلف پردازش تصویر را بر روی تصاویر انجام می‌دهیم. برای کاهش اثرات بی‌نظمی، تنظیم تصاویر سری زمانی و افزایش وضوح تصاویر حلقه‌ها، از عملگر

مد مکس بهره می‌گیریم (توابی و همکاران ۲۰۱۴). این عملگر به‌عنوان یک فیلتر فضایی در نظر گرفته می‌شود که اولین بار توسط کوچمی و کوچمی (۱۹۹۸) برای بررسی لوله‌های شار مغناطیسی بسیار کوچک در ناحیه کرونا ارائه شده است. اساس کار این عملگر حرکت در جهت حداکثر مشتق دوم است. شکل ۱ (الف) تصویری از خورشید را نشان می‌دهد که توسط رصدخانه دینامیکی خورشید در طول موج ۱۷۱ آنگستروم در ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۷ به دست آمده است. مربع زرد رنگ نقطه چین ناحیه مشاهده شده در تلسکوپ فضایی هینوده را نشان می‌دهد. شکل ۱ (ب)، (ج) نشان دهنده حلقه‌های تحلیل شده در این تحقیق هستند که توسط تلسکوپ هینوده قبل و بعد از پردازش تصویر گرفته شده است. مربع بنفش رنگ نقطه چین در (ج) به سه حلقه اشاره دارد. شکل (د) تصویر بزرگ‌نمایی شده حلقه‌ها را نشان می‌دهد که در آن ۱۰ شکاف آبی، ۱۲ شکاف بنفش و ۹ شکاف زرد رنگ در نواحی مختلف حلقه‌ها از بالا به پایین، نواحی هستند که پروفایل شدت در این امتدادها اندازه‌گیری شده است. برای یافتن جابجایی‌های

می‌شود. اما در آنالیز فوریه فقط توابع سینوسی برای تابع مادر بکار می‌رود.

تبدیل موجک نوسانات بیشینه شدت برای حلقه‌های اول تا سوم به ترتیب در شکل‌های ۷-۱۰، ۱۱-۱۳ و ۱۴-۱۶ دیده می‌شود. در این شکل‌ها تغییرات زمانی جابه‌جایی‌های عرضی، طیف‌های توان موجک و طیف‌های توان موجک کلی را در امتداد شکاف‌های عرضی شکل رسم شده است. کانتور ضخیم مشکی رنگ سطح اطمینان ۹۵٪ را نشان می‌دهد. با تعیین زمان تناوب نوسانات، با استفاده از مدل استوانه‌ای نازک می‌توان سرعت فاز را از معادله زیر محاسبه نمود:

$$V_p = \frac{2L}{P}$$

که در آن، L طول حلقه، P زمان تناوب نوسانات است. سپس با در نظر گرفتن نسبت چگالی در بیرون و داخل حلقه‌ها که تقریباً 0.3 می‌باشد (شریواستاوهمکاران ۲۰۲۴، لی و لانگ ۲۰۲۳، پتروا و همکاران ۲۰۲۳)، به کمک معادله زیر سرعت آلفون بدست می‌آید:

$$V_A = V_p \sqrt{(1 + \rho_e / \rho_i) / 2}$$

اکنون با استفاده از معادله زیر می‌توان میدان مغناطیسی حلقه‌ها را محاسبه نمود:

$$B = V_A \sqrt{4\pi\mu_c m_p n_e}$$

که در آن، L طول حلقه، P زمان تناوب نوسانات، μ_c میانگین وزن مولکولی در تاج برابر با $1/37$ ، m_p جرم پروتون و n_e چگالی عددی الکترون‌ها مساوی با 10^6 ذره بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته می‌شود (ناکاریاکوف و افمن ۲۰۰۱، وایت و ورویچ ۲۰۱۲، نیستیکو و همکاران ۲۰۱۳). نتایج در جدول ۲ دیده می‌شود. برای بررسی همبستگی بین طول حلقه‌ها با میدان مغناطیسی و سرعت کینک منحنی تغییرات آنها را رسم کردیم. شکل ۱۵ بررسی اجمالی از ارتباط بین میدان مغناطیسی با کمیت‌های طول حلقه و سرعت کینک ارائه می‌کند. سمت راست رابطه بین میدان مغناطیسی با طول حلقه با ضریب همبستگی

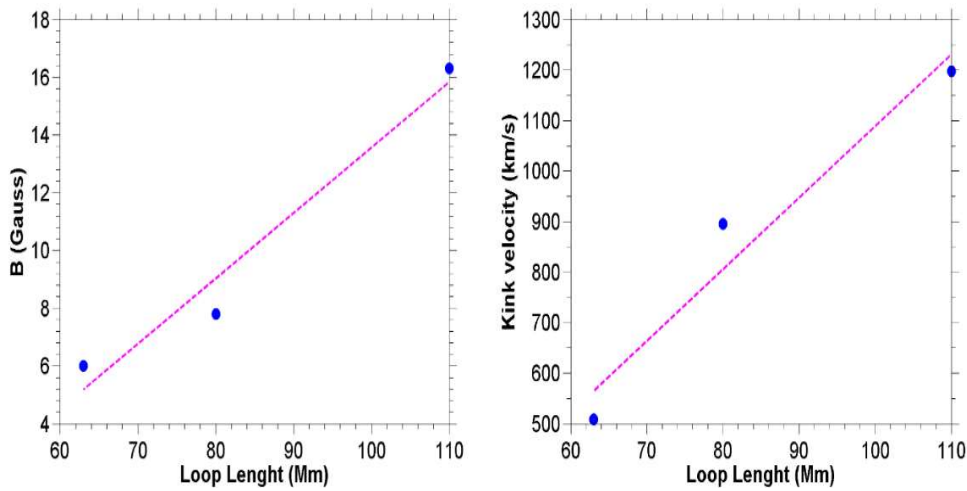
عرضی و تجزیه و تحلیل نوسانات حلقه‌ها، پروفایل‌های شدت در امتداد شکاف‌ها در سراسر حلقه بدست می‌آید. برای کاهش نویزها و عدم قطعیت، پروفایل‌های شدت در هر ناحیه در امتداد شکاف با عرض ۳ پیکسل محاسبه شده و سپس میانگین‌گیری می‌شوند. شکل‌های ۲ الی ۴ به ترتیب پروفایل‌های شدت عرضی در امتداد شکاف‌های آبی، صورتی و زرد رنگ شکل ۱ را نشان می‌دهند. سپس با استفاده از روش لرزه‌شناسی مغناطیسی هیدرودینامیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. موقعیت شدت بیشینه در هر پروفایل ذخیره می‌شود. برای نمایش دقیق نوسانات عرضی برشهای زمانی در امتداد شکاف‌ها آماده می‌شود. در شکل ۵، سه تصویر بالا، میانی و پایینی، به ترتیب تحول زمانی مربوط به شکاف‌های آبی رنگ ۳-۴-۵ از حلقه اول شکل ۱، شکاف‌های ۱-۷-۱۱ صورتی رنگ از حلقه دوم و شکاف‌های زرد رنگ ۱-۴-۱۱ از حلقه سوم شکل ۱ را نشان می‌دهد. دو روش اساسی برای آنالیز نوسانات وجود دارد که عبارتند از روش فوریه و روش موجک. آنالیز نوسانات توسط روش فوریه، یکی از قدیمیترین روشها بشمار می‌رود. در این روش بازه‌های زمانی را به بازه‌های فرکانس و برعکس تبدیل کند (بلومفیلد و همکاران ۲۰۰۴). پایه و اساس آنالیز فوریه امواج سینوسی است که از مثبت بی‌نهایت تا منفی بی‌نهایت امتداد دارد. این مسئله برای تجزیه انواع مختلف داده‌ها با شکلهای متفاوت محدودیت ایجاد می‌کند. بنابراین برای تجزیه و تحلیل سیگنالهای گسسته در پلاسمای خورشید مناسب نیست. آنالیز موجک سیگنالها را در دو بازه زمانی و فرکانسی (یا دوره تناوب) تبدیل می‌کند به طوری که می‌توان زمان ظهور هر فرکانس را در نوسانات آشکار نمود (عجیشیرزاده و همکاران ۲۰۰۸). یکی از خواص مهم آنالیز موجک شکل دلخواه آن است بطوری که برای هر نوع ساختاری یک تابع موجک مناسب (تابع مادر) انتخاب

۴ و ۵ در فرکانسهای کمتر از ۴ دقیقه و بیش از ۸ دقیقه‌ای دارای همبستگی مثبت می‌باشند (شکل ۱۸). جهت بررسی وجود نوسانات با مد سوسیسی که دارای عدد موج $m=0$ با تقارن محوری است (جس و همکاران ۲۰۲۳)، پهنای پروفایل‌های برازش شده گاوسی شکل‌های ۲ الی ۴ را تعیین نمودیم که برای سه حلقه اول، دوم و سوم به ترتیب در جدولهای ۳، ۴ و ۵ درج شده است. همانطور که از نتایج دیده می‌شود، در حلقه اول نوسانات سوسیسی در پروفایل‌های دور از پایه حلقه مشهودتر است چون در این نواحی تغییرات پهنای پروفایلها بیش از یک پیکسل است. در حلقه دوم این نوسانات در پایه‌های حلقه واضحتر مشاهده می‌شود. در حلقه سوم هم دور از پایه واضحتر می‌باشد.

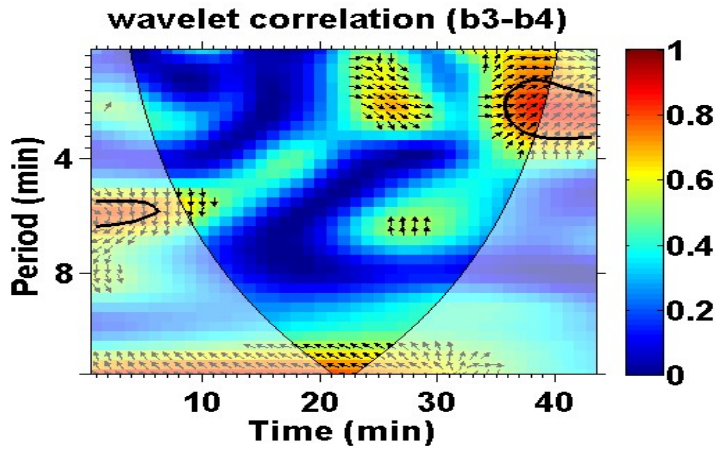
۰/۹۵ و سمت چپ رابطه سرعت کینک با طول حلقه با ضریب همبستگی ۰/۹۶ را نشان می‌دهد. البته لازم به ذکر است که برای اطمینان بیشتر از همبستگی این پارامترها نیاز به داده‌های بیشتری باشد (ریدل و همکاران ۲۰۱۹). ما همچنین همبستگی نوسانات را برای شکافهای ۳ و ۴ و ۵ برای حلقه اول بدست آوردیم و متوجه شدیم نوسانات شکافهای ۳ و ۵ به ازای زمان تناوب ۳ الی ۶ دقیقه‌ای همبستگی مثبت دارند، که نشان دهنده مد کینک پایه می‌باشد. در حالیکه به ازای فرکانس بیش از ۸ دقیقه دارای همبستگی منفی یعنی اولین حالت برانگیخته کینک در لوله در حال نوسان دارد (شکل ۱۷). همچنین بررسی همبستگی نوسانات بین شکافهای ۳ و ۴ نشان داد که فرکانسهای کمتر از ۴ دقیقه دارای همبستگی مثبت، و بیش از ۸ دقیقه‌ای دارای همبستگی منفی است (شکل ۱۶). نوسانات شکافهای

جدول ۲. نتایج مربوط به طول سه حلقه، زمان تناوب، سرعت فاز، سرعت آلفون و شدت میدان مغناطیسی

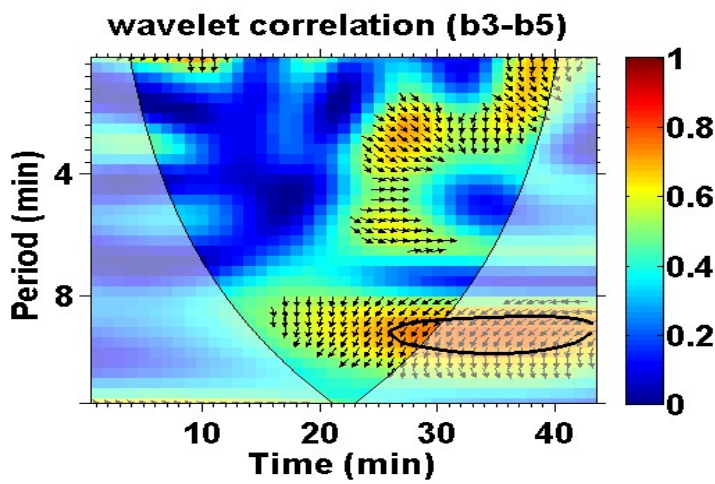
طول حلقه (Mm)	شماره شکاف	P (min)	V_{ph} ($km s^{-1}$)	V_A ($km s^{-1}$)	B (Gauss)
۱۱۳/۰ ± ۱/۱	۳	۵/۰	۷۵۲ ± ۳۷۶	۵۴۲ ± ۲۷۱	۹/۰ ± ۴/۵
	۴	۱۶/۰	۲۳۴ ± ۱۱۷	۱۷۰ ± ۸۵	۲/۸ ± ۱/۴
	۵	۳/۰	۱۲۵۶ ± ۶۲۸	۹۰۴ ± ۴۵۲	۱۶/۰ ± ۸/۰
۸۰/۰ ± ۰/۸	۱	۳/۰	۸۹۰ ± ۴۴۵	۶۴۰ ± ۳۲۰	۱۱/۰ ± ۵/۵
	۷	۳/۰	۸۹۰ ± ۴۴۵	۶۴۰ ± ۳۲۰	۱۱/۰ ± ۵/۵
	۱۱	۳/۰ ۴/۰	۸۹۰ ± ۴۴۵ ۶۶۶ ± ۳۳۳	۶۴۰ ± ۳۲۰ ۴۸۰ ± ۲۴۰	۱۱/۰ ± ۵/۵ ۸/۰ ± ۴/۰
۶۳/۰ ± ۰/۶	۱	۵/۰	۵۲۰ ± ۲۶۰	۳۰۲ ± ۱۵۱	۵/۰ ± ۲/۵
	۴	۳/۰ ۸/۰	۷۰۰ ± ۳۵۰ ۲۶۲ ± ۱۳۱	۵۰۴ ± ۲۵۲ ۱۹۰ ± ۹۵	۸/۲ ± ۴/۱ ۳/۰ ± ۱/۵
	۶	۵/۰ ۸/۰	۵۲۰ ± ۲۶۰ ۲۶۲ ± ۱۳۱	۳۰۲ ± ۱۵۱ ۱۹۰ ± ۹۵	۵/۰ ± ۲/۵ ۳/۰ ± ۱/۵



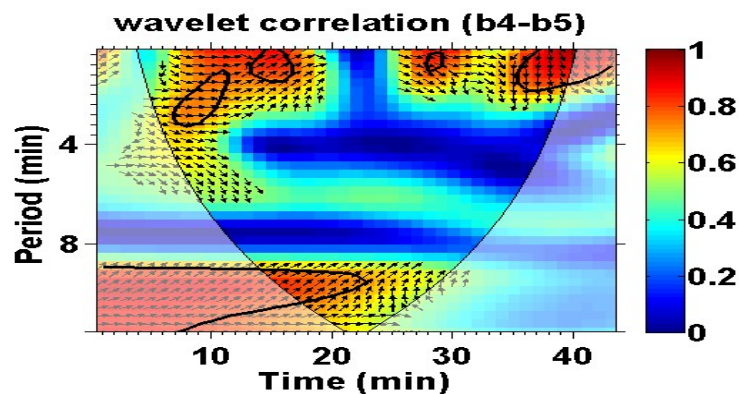
شکل ۱۵ بررسی اجمالی در رابطه بین میدان مغناطیسی با طول حلقه و سرعت کینک. منحنی سمت راست: رابطه بین میدان مغناطیسی با طول حلقه با ضریب همبستگی ۰/۹۵، سمت چپ: رابطه سرعت کینک با طول حلقه با ضریب همبستگی ۰/۹۶ لازم به ذکر است که برای اطمینان از همبستگی این پارامترها نیاز به داده‌های بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۶. همبستگی موجک بین نوسانات شکاف ۳ و ۴ از بزرگترین حلقه. بررسی همبستگی نوسانات بین شکافهای ۳ و ۴ نشان داد که فرکانسهای کمتر از ۴ دقیقه دارای همبستگی مثبت، و بیش از ۸ دقیقه ای دارای همبستگی منفی است.



شکل ۱۷. همبستگی موجک بین نوسانات شکاف ۳ و ۵ از بزرگترین حلقه. شکافهای ۳ و ۵ به ازای زمان تناوب ۳ الی ۶ دقیقه ای همبستگی مثبت دارند، که نشان دهنده مد کینک پایه می‌باشد و به ازای فرکانسهای بیش از ۸ دقیقه در فاصله زمانی ۲۰ الی ۳۰ دقیقه دارای همبستگی منفی می‌باشند.



شکل ۱۸. همبستگی موجک بین نوسانات شکاف ۴ و ۵ از بزرگترین حلقه. نوسانات شکافهای ۴ و ۵ در فرکانسهای کمتر از ۴ دقیقه و بیش از ۸ دقیقه ای دارای همبستگی مثبت می‌باشند.

جدول ۳. مقادیر تابع برازش گاوسی و پهنای پروفایل برای ۱۰ پروفایل رسم شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد.

شماره شکاف	برازش تابع گاوسین	پهنای پروفایل (پیکسل)
1	$F(x) = 238 * \exp(-((x-12.71)/3.465).^2);$	6.0
2	$F(x) = 157 * \exp(-((x-19.4)/3.81).^2);$	7.0
3	$F(x) = 125.1 * \exp(-((x-20)/4.354).^2);$	8.0
4	$F(x) = 139.5 * \exp(-((x-10.91)/4.11).^2);$	7.0
5	$F(x) = 141.6 * \exp(-((x-7.346)/2.168).^2);$	5.0
6	$F(x) = 110.1 * \exp(-((x-16.85)/3.876).^2);$	8.0
7	$F(x) = 206.1 * \exp(-((x-12.4)/2.901).^2);$	6.0
8	$F(x) = 174.5 * \exp(-((x-15.5)/3.52).^2);$	7.0
9	$F(x) = 106.5 * \exp(-((x-16.31)/3.495).^2);$	7.0
10	$F(x) = 115.5 * \exp(-((x-9.487)/3.67).^2);$	7.5

جدول ۴. مقادیر تابع برازش گاوسی و پهنای پروفایل برای ۱۲ پروفایل رسم شده در شکل ۳ را نشان می‌دهد.

شماره شکاف	برازش تابع گاوسین	پهنای پروفایل (پیکسل)
1	$F(x) = 80.4 * \exp(-((x-6.857)/3.882).^2);$	7.5
2	$F(x) = 139.9 * \exp(-((x-10.71)/2.317).^2);$	5.5
3	$F(x) = 95.69 * \exp(-((x-8.223)/2.269).^2);$	6.0
4	$F(x) = 71.64 * \exp(-((x-8.995)/1.666).^2);$	5.0
5	$F(x) = 105 * \exp(-((x-8.431)/2.82).^2);$	6.0

6	$F(x) = 129.9 * \exp(-((x-10.35)/3.899).^2);$	7.5
7	$F(x) = 140 * \exp(-((x-11.22)/4.367).^2);$	8.5
8	$F(x) = 128.7 * \exp(-((x-10.5)/4.266).^2);$	8.0
9	$F(x) = 135.1 * \exp(-((x-9.467)/3.031).^2);$	6.5
10	$F(x) = 123.2 * \exp(-((x-14.45)/2.701).^2);$	7.0
11	$F(x) = 88.67 * \exp(-((x-8.294)/4.009).^2);$	7.5
12	$F(x) = 159.7 * \exp(-((x-12.71)/2.308).^2);$	5.5

جدول ۵. مقادیر تابع برازش گاوسی و پهنای پروفایل برای ۹ پروفایل رسم شده در شکل ۴ را نشان می‌دهد.

شماره شکاف	برازش تابع گاوسین	پهنای پروفایل (پیکسل)
1	$F(x) = 103.8 * \exp(-((x-12.49)/4.85).^2);$	9.0
2	$F(x) = 124.7 * \exp(-((x-10.17)/4.215).^2);$	8.0
3	$F(x) = 122.3 * \exp(-((x-8.749)/3.504).^2);$	6.5
4	$F(x) = 69.47 * \exp(-((x-9.855)/2.676).^2);$	6.5
5	$F(x) = 114.2 * \exp(-((x-10.18)/1.669).^2);$	5.0
6	$F(x) = 191.7 * \exp(-((x-13.24)/3.381).^2);$	7.0
7	$F(x) = 122.3 * \exp(-((x-8.749)/3.504).^2);$	7.5
8	$F(x) = 124.7 * \exp(-((x-10.17)/4.215).^2);$	8.0
9	$F(x) = 106 * \exp(-((x-15.67)/4.145).^2);$	8.0

۴ نتایج و بحث

ما حلقه‌های تاج خورشیدی را با استفاده از تصاویر مشاهده شده با تلسکوپ Hinode/xrt در ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۷، براساس پردازش تصویر و زلزله‌شناسی خورشیدی مطالعه کردیم. نتایج اندازه‌گیری زمان تناوب برای سه حلقه با طول‌های $11/1 \pm 1/0$ ، $113/0 \pm 8/0$ و $80/0 \pm 6/0$ مگا متر، به ترتیب $3/0 - 16/0$ ، $3/0 - 4/0$ و $3/0 - 8/0$ دقیقه را نشان داد. حداکثر سرعت فاز این نوسانات به ترتیب 1256 ± 628 ، 890 ± 445 و 700 ± 350 کیلومتر بر ثانیه بدست آمد.

حداکثر سرعت آلفون در هر حلقه به ترتیب به اندازه 452 ± 904 ، 320 ± 640 و 252 ± 504 کیلومتر بر ثانیه تعیین شد. میدان‌های مغناطیسی مربوط به این جابجایی‌های عرضی با روش لرزه‌شناسی با تقریب مدل استوانه‌ای نازک برای سه حلقه به ترتیب $8/0 \pm 1/0$ ، $16/0 \pm 5/5$ و $11/0 \pm 4/1$ گاوس برآورد شد.

لازم به ذکر است در این تحقیق تنها حرکات عرضی موازی با صفحه آسمان قابل تشخیص است. حرکات عرضی در امتداد خط دید قابل تشخیص نیست. لانگ و

حلقه و نوع دوم مربوط به قسمت بالایی حلقه بود. آنها پیشنهاد کردند که نوع اول از نوسانات نشانه‌هایی از جریان‌های صعودی شبه نوسانی و نوع دوم بیشتر شبیه امواج پیچ خورده یا آلفون است. آنتولین و همکاران (۲۰۱۱) با محاسبه سرعت فاز تا ۹۴۲ کیلومتر بر ثانیه توانستند میدان مغناطیسی حلقه‌ها را در محدوده ۹ تا ۷/۲۶ گاوس به دست آورند. آشواندن (۲۰۰۱) شدت میدان مغناطیسی تاج را در یک حلقه ۱۰-۴۰ گاوس با تشخیص دوره حالت پیچ خوردگی در امواج آلفون به دست آورد. ژونگ و همکاران (۲۰۲۳) نوسانات کینک نا میرایی را در حلقه‌های تاجی با طول ۷۳۶ مگا متر، با دامنه ۰/۳-۰/۵ مگا متر، با زمان تناوب ۲۸-۳۳ دقیقه و طول عمر حدود ۲ روز را شناسایی کردند. لی و همکاران (۲۰۲۳) حلقه‌های تاجی را که از پالس کینک در حال حرکت به مد کینک ایستا تغییر می‌یافت تجزیه و تحلیل کردند. آنها سرعت آلفون و شدت میدان مغناطیسی درون حلقه نوسانی را به ترتیب حدود ۹۵۰ کیلومتر بر ثانیه و ۲۰ گاوس تخمین زدند، که با نتایج ما سازگار است.

خلاصه

در این تحقیق سه حلقه خورشیدی به طول‌های ۶۳-۱۱۰ مگامتر مشاهده شده با فیلتر Hinode/xrt در ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار گرفت. پس از پردازش تصویر و تهیه برش‌های زمانی، با روش لرزه‌شناسی زمان تناوب نوسانات عرضی با تحلیل موجک تعیین گردید. با تقریب مدل استوانه‌ای نازک حداکثر شدت میدان مغناطیسی حلقه‌ها در محدوده $۸/۲ \pm ۴/۱$ الی $۱۶/۰ \pm ۸/۰$ گاوس تعیین شد. این میدان مغناطیسی با افزایش ارتفاع حلقه‌ها افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است در این تحقیق تنها حرکات عرضی موازی صفحه آسمان قابل تشخیص بوده و نوسانات در امتداد خط دید می‌بایست از روش‌های طیفی آشکار گردد. نتایج ما نشان داد که همبستگی بین طول حلقه‌ها با

همکاران (۲۰۱۷) امواج منتشر شده در تاج پایینی را که در تاریخ ۶ ژوئیه ۲۰۱۲ همراه با پرتاب جرم صورت گرفته بود در سیستم حلقه استوایی توسط رصدخانه دینامیک خورشیدی (SDO/AIA) بررسی کردند. آنها نشان دادند که این نوسانات دارای میدان مغناطیسی تقریباً ۵/۵ گاوس هستند که با تقریب میدان مغناطیسی برون یابی مطابقت دارد. افمن و ونگ (۲۰۰۸) اولین شواهد امواج عرضی را در حلقه‌های چندشاخه‌ای تاج پلاسمایی که از ناحیه کروموسفر جاری می‌شد انتخاب کردند. آنها مشاهدات خود را بر اساس مشاهدات تلسکوپ نوری خورشیدی نصب شده بر روی تلسکوپ هینوده در خط فیلتر Ca II H تجزیه و تحلیل کردند و نوساناتی را با سه زمان تناوب آشکار نموده و میدان مغناطیسی وابسته به حلقه‌ها را به طور متوسط به اندازه ۲۰ گاوس به دست آوردند. ناکاریاکوف و ورویخت (۲۰۰۵) امواج مگنوهیدرودینامیکی را با روش لرزه‌شناسی مورد مطالعه قرار دادند و امواج کینک در ساختارهای فعال خورشید را به‌عنوان نظریه میدان مغناطیسی فرمول‌بندی نمودند. ناکاریاکوف و آفمن (۲۰۰۱) با استفاده از تصاویر ماهواره ای TRACE که در ۴ جولای ۱۹۹۹ در طول موج‌های ۱۷۱ و ۱۹۵ نانگستروم برای یک حلقه گرفته شده بود، شدت میدان مغناطیسی را در حدود ۱۳ گاوس بدست آوردند. مقایسه نتایج تحقیق ما با نتایج نویسندگان مذکور سازگاری خوبی را نشان می‌دهد. هارا و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از ابزار Hinode/EIS، نشان دادند که حلقه‌های ناحیه فعال حرکات رو به بالا با افزایش سرعت‌های غیر حرارتی همراه هستند. اوکاموتو و همکاران (۲۰۰۴) نوسانات عرضی را که از طریق شاخه‌های برجسته توسط Hinode/SOT در خط Ca II H در لبه خورشید حرکت می‌کنند، تجزیه و تحلیل کردند. آنتولین و همکاران (۲۰۱۱) نقش حلقه‌ها را در گرمایش کرونا بررسی کردند. تیان و همکاران (۲۰۱۱) اساساً دو نوع نوسان در داده‌های تلسکوپ هینوده پیدا کردند. نوع اول ناحیه پایه

- Jess D. B. , Jafarzadeh S., Keys P. H., Stangalini M., Verth G., Grant S. D. T., (2023), *Living Rev. Sol. Phys.* , 20, 1
- Klimchuk, J. A. (2006). On Solving the Coronal Heating Problem . *SoPh*, 234, 41
- Koutchmy, O., Koutchmy, S. (1989). in *High spatial resolution solar observations*, edited by O. von der Luehe, 217
- Kolotkov, D. Y., Li, B., Leibacher, J. (2023). Magnetohydrodynamic (MHD) Waves and Oscillations in the Sun's Corona and MHD Coronal Seismology: Editorial. *Solar Physics*, 298, Issue 3, article id.40, 10.1007/s11207-023-02132-7
- Kumari, A ., Ramesh, R., Kathiravan, C., Wang, T. J., and Gopalswamy, N, (2019). DIRECT ESTIMATES OF THE SOLAR CORONAL MAGNETIC FIELD USING CONTEMPORANEOUS EXTREME-ULTRAVIOLET, RADIO, AND WHITELIGHT OBSERVATIONS, *The Astrophysical Journal*, 881, 1, article id. 24, 8.
- Lehmann, L. T., Hussain, G. A. J., Vidotto, A. A., Jardine, M. M., Mackay, D. H. (2021). Identifying solar-like magnetic cycles with Zeeman-Doppler-Imaging. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 500, 1, 1243-1260
- Li, B., Guo, M., Yu, H., Chen, S., Shi, M. (2023). Three-dimensional propagation of kink wave trains in solar coronal slabs. *MNRAS*, 518, L57
- Li, D., Bai, X, Tian, H., Su, J3, 4, Hou, Z., 5, Deng, Y3, 4, Ji, K7, and Ning, Z. (2023). *Astronomy & Astrophysics*, 675, id.A169.
- Li, D., & Long, D. M. 2023, *ApJ*, 944, 8
- Long, D. M. Valori, G., (2017). Pérez-Suárez, D.R. Morton, J., and Vásquez, A. M. , Measuring the magnetic field of a trans-equatorial loop system using coronal seismology?, 603, A101
- Nakariakov, V. M., Anfinogentov, S. A., Antolin, P., et al. (2021). Kink Oscillations of Coronal Loops . *Space Sci. Rev.*, 217, 73.
- Nakariakov, V. M., Ofman, L., Deluca, E. E., Roberts, B., Davila, J. M. TRACE observation of damped coronal loop oscillations: Implications for coronal heating, (1999). *Science*, 285, 5429, 862-864, 10.1126/science.285.5429.862
- Nakariakov, V. M. & Kolotkov, D. Y. (2020). Magnetohydrodynamic Waves in the Solar Corona. *ARA&A*, 58, 441.
- Nakariakov, V. M & Verwichte, E. (2005). Coronal Waves and Oscillations., *Liv. Rev. Sol. Phys. Living Reviews in Solar Physics*, 2, 1, article id. 3, 65

میدان مغناطیسی و سرعت کینک وجود دارد. همچنین نتایج همبستگی نوسانات در بزرگترین حلقه با روش موجک، مد کینک پایه و اولین حالت برانگیخته کینک در لوله در حال نوسان را نشان داد.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم مقاله به خاطر دقت نظر و ارائه نظرات ارزشمند شان برای بهبود مقاله بسیار سپاسگزاریم.

منابع

- Ajabshirizade, A., Tavabi, E., Koutchmy, S. (2008). Wavelet analysis of solar macrospicule recurrences, *New Astronomy*, 13, 93.
- Antolin, P. and Verwichte, E., (2011). TRANSVERSE OSCILLATIONS OF LOOPS WITH CORONAL RAIN OBSERVED BY HINODE/SOT, *ApJ*, 736, 121A
- Antolin, P. & Froment, C. (2022). Multi-Scale Variability of Coronal Loops Set by Thermal Non-Equilibrium and Instability as a Probe for Coronal Heating, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, 820116.
- Aschwanden, M. J., Nightingale, R. W., & Alexander, D. (2000). Evidence for Nonuniform Heating of Coronal Loops Inferred from Multithread Modeling of TRACE Data, *ApJ*, 541, 1059
- Antiochos, S. K., Karpen, J. T., DeLuca, E. E., Golub, L., Hamilton, P. (2003). Constraints on Active Region Coronal Heating , *ApJ*, 590, 547
- loomfield, D. S., McAteer, R. T. J., Lites, B.W., Judge, P. G., Mathioudakis, M., Keenan, F. P. (2004). Wavelet Phase Coherence Analysis: Application to a Quiet-Sun Magnetic Element., *Astrophys. J.* 617, p. 623..
- De Moortel, I. (2009), *Longitudinal Waves in Coronal Loops. SSRv*, 149, 65, DOI: 10.1007/s11214-009-9526-5
- Baur, T. G. (1981). Optical polarimeter for solar research. *Optical Engineering*, 20, 2, 10.1117/12.7972654
- Harra, L.K, Sakao, T., Mandrini, C. H., Hara, H., Imada, S., Young, P. R., van Driel-Gesztelyi, L., Baker, D. (2008). Outflows at the Edges of Active Regions: Contribution to Solar Wind Formation? , *Astrophys. J. Lett.* 676, L147 – L150.

- Nakariakov, V. M., & Ofman, L. (2001). Determination of the coronal magnetic field by coronal loop oscillations. *A&A*, 372, L53
- Nistico, G., Nakariakov, V.M., and Verwichte, E. (2013). Decaying and decayless transverse oscillations of a coronal loop., *A&A* 552, A57
- Ofman, L., Wang, T. j., Hinode observations of transverse waves with flows in coronal loops. (2008). *Astron. Astrophys.*, 482, 2. L9-L12
- Okamoto, T. J., Nakai, H., Keiyama, A., et al. (2004). Filament Oscillations and Moreton Waves Associated with EIT Waves. *The Astrophysical Journal*, 608, 1124
- Petrova, E., Magyar, N., Van Doorselaere, T., & Berghmans, D. (2023). *ApJ*, 946, 36
- Reale, F. (2014). Filament Oscillations and Moreton Waves Associated with EIT Waves. *Living Reviews in Solar Physics*, 11, 4
- Riedl, J. M., Van Doorselaere, T., Santamaria, I. C. (2019). Wave modes excited by photospheric p-modes and mode conversion in a multi-loop system. *Astronomy & Astrophysics*, 625, id.A144, 14.
- Schmieder, B., Rust, D. M., Georgoulis, M. K., et al. (2004). Emerging Flux and the Heating of Coronal Loops. *ApJ*, 601, 530
- Sakao, T, et al., (2007). Continuous Plasma Outflows from the Edge of a Solar Active Region as a Possible Source of Solar Wind Science, 318, 1585
- Shrivastav, A.K., Pant, V., Berghmans, D., Zhukov, A.N., Doorselaere, T.V., Petrova, E., Banerjee, D., Lim, D., and Verbeeck, C. (2024). Statistical Investigation of Decayless Oscillations in Small-scale Coronal Loops Observed by Solar Orbiter/EUI, *Astronomy & Astrophysics*, 685, id.A36, 11. <https://arxiv.org/pdf/2304.13554>
- Stankovic, N., Morgan, H. (2023). 54th Meeting of the Solar Physics Division, id. 110.21. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 55, No. 7 e-id 2023n7i110p21, October 2023
- Tavabi, E. (2014). *Astrophysics and Space Science*, 350, 489
- Tavabi, E., Koutchmy, S., Golub, S. (2015). Limb Event Brightenings and Fast Ejection Using IRIS Mission Observations. *Sol. Phys.*, 290, 2871
- Tavabi, E., Koutchmy, S. (2019). CHROMOSPHERIC PECULIAR OFF-LIMB DYNAMICAL EVENTS FROM IRIS OBSERVATIONS, *Astrophys. J.* 883, 41.
- Torrence, C., Compo, G. P. (1998). *Bull. Am. Met. Soc.*, 79, 61
- Tian, H., McIntosh, S.W., Wang, T., Ofman, L. De Pontieu, B., Innes, D.E. et al. (2011). *Astrophys. J.*, 759, 144. 10
- Ugarte-Urra, I., Warren, H. P., & Brooks. (2009). Active Region Transition Region Loop Populations and Their Relationship to the Corona, *D. H. ApJ*, 695, 642
- White, R. S., & Verwichte, E. (2012). Transverse coronal loop oscillations seen in unprecedented detail by AIA/SDO, *A&A*, 537, A49
- Wiegelmann, T., Sakurai, T., Solar Force Free Magnetic Fields, by:, *Living Rev. Solar Phys.*, 9, (2012), 5 <https://link.springer.com/article/10.12942/lrsp-2012-5>
- Wood, B. E. , Kooi, J. E. , Palmerio, E, Gibson, S. E. (2024). Decadal Survey for Solar and Space Physics (Heliophysics) 2024-2033 white paper e-id. 436; *Bulletin of the American Astronomical Society.*, 55, 3, 436
- Xie, R. X., Wang, M., Shi, S. B., Xu, C., Li, W. H., Yan, Y. H. Sych, R. A., Altyntsev, A. T. (2016). The observational evidence of solar coronal decimetric radio pulsations with very short periods, *Acta Astronomica Sinica.*, 44, 1, 8, 2003
- Yu, S., Nakariakov, V. M. ,Yan, Y. (2016). Effect of a Sausage Oscillation on Radio Zebra-pattern Structures in a Solar Flare, *The Astrophysical Journal*, 826, 1, 78, 6
- Zhong, S., Nakariakov, V.M., Miao, Y, Fu, L., and Yuan, D. (2023). 30-min decayless kink oscillations in a very long bundle of solar coronal plasma loops, *Scientific Reports*, 13, article id. 12963.

Kink transverse displacements in solar loops by a thin cylindrical model

Hossein Rezalou¹ and Sima Zeighami^{2*}

¹ M.Sc., Department of Physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

² Assistant Professor, Department of Physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

(Received: 11 February 2024, Accepted: 22 July 2024)

Summary

The temperature increase of the solar corona compared to the lower layers solar atmosphere, such as the photosphere and chromosphere, and the solar wind, are still two unsolved issues in solar physics. Due to the higher magnetic pressure of the corona compared to the thermal pressure of the corona, solar loops have magnetic structures that can play a role in the transfer of thermal energy in the upper solar atmosphere. Therefore, measuring the magnetic field in these structures is special importance. A seismological method based on MHD waves has recently been developed to measure the coronal magnetic field based on wave signatures observed in the solar atmosphere. Due to the presence of MHD waves, coronal waves can be generated in the vicinity of magnetic reconnections, or disturbances that can reach the solar corona through the photosphere-coupled magnetic field. The basis of this method is similar to the seismology of the sun. In this way, by observing and then considering the appropriate model for the corona structure, wave characteristics and physical parameters of the environment such as amplitude, temporal and spatial spectrum, temperature and density structures can be obtained and the observed properties with physical parameters compared. But the source of these waves has not been determined definitively, although p-states in the photosphere have been introduced as a clear candidate for the source of these waves. In this research, using the images observed with the *Hinode* X-ray telescope (*Hinode/xrt*) taken on 11 September, 2017 in the global time interval 06:20:16 to 17:56:25, the physical parameters such as loop length, period, phase speed, Alfven speed and the magnetic field related to them are determined by image processing and seismology. After receiving the images and preparing time slices from them, these transverse fluctuations are analyzed using the wavelet method. The length of three loops was determined by approximating half a loop as 113.0 ± 1.1 , 80.0 ± 0.8 , and 63.0 ± 0.6 Mm. Considering the approximate values of the plasma density in the rings and the average molecular weight in the corona as well as the average number density in the corona, the average time of oscillations was obtained in the range of 3.0-16.0, 3.0-4.0 and 3.0-8.0 minutes, respectively. The maximum phase speed of these oscillations was calculated in the range of 1250 ± 628 , 890 ± 445 and 700 ± 350 km s⁻¹ for three loops. Also, maximum Alfven speed in each loop was determined as 904 ± 452 , 640 ± 320 , and 504 ± 252 km s⁻¹ respectively. The maximum magnetic field related to these oscillations was calculated by the seismological method with the approximation of the thin cylindrical model for three loops in the range of 16.0 ± 8.0 , 11.0 ± 5.5 , and 8.2 ± 4.1 Gauss respectively. Also, the correlation of oscillations in the largest loop was analyzed by the wavelet method and the results showed that for certain frequencies, the basic kink mode and the first excited mode of the kink appear in the oscillating tube. According to the results of this research, these fluctuations can be interpreted as transverse kink oscillations.

Keywords: Image processing, magnetic field, solar loops, seismology, *Hinode/Xrt*