

نوسانات دوپلری در اسپیکول‌های خورشید بر اساس داده‌های آیریس

سیما ضیغمی^{۱*} و احسان توایی^۲

۱. استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت: ۰۹۹/۸/۱۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

در این تحقیق با اندازه‌گیری‌های طیفی ثبت شده توسط تلسکوپ فضایی آیریس (Interface Region Imaging Spectrograph) مربوط به تاریخ هفدهم آگوست ۲۰۱۴ خواص نوسانی سیخک‌های (اسپیکول‌های) خورشید را بررسی می‌کنیم. هدف اصلی آیریس مشاهده حرکت مواد، نوسانات، جذب انرژی و تولید گرما در منطقه کمتر شناخته شده جو خورشید است که بر روی رفتار جو زمین، عملکرد ماهواره‌ها، شبکه‌های انتقال برق و ارتباطات رادیویی نیز تأثیر می‌گذارد. انتقال انرژی از طریق امواج و نوسانات می‌تواند نقش مهمی در درک دینامیک خورشید و علت افزایش ناگهانی دمای جو خورشید تا چندین میلیون کلون از ناحیه انتقال به سمت تاج خورشید داشته باشد. با برازش گوسی نمایه‌های شدت در طول موج Si IV توانستیم جابه‌جایی‌های سرعت دوپلری را تا ارتفاع ۴۲۰۰ کیلومتری از لبه خورشید در امتداد سیخک‌ها محاسبه کنیم. میانگین دامنه سرعت دوپلری از لبه خورشید تا ارتفاع ۴۲۰۰ کیلومتری از ۱۲ الی ۱۵ کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی آبی) تا ۱۰ الی ۱۵ کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی قرمز) به دست آمد. نتایج تحلیل نوسانات به روش موجک، نوسانات شبه پریودیکی با پریودهای غالب ۳، ۵، ۸ و دقیقه‌ای را آشکار کرد. با توجه به نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌شود که سهم اصلی نوسانات شیفیت دوپلری در سیخک‌های خورشید که به‌طور عرضی عمود بر محور سیخک‌های خورشیدی مشاهده شده است ناشی از امواج کینک و آلفون باشد. این امواج می‌توانند در گرم کردن تاج خورشید تا دو میلیون کلون نقش مهم داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: اتمسفر خورشید، جت‌های رنگین‌سپهری، گرمایش تاجی، نوسانات، موجک.

۱. مقدمه

کیلومتر منتقل می‌شوند. یک سیخک معمولی حدود ۱۰۰۰ کیلومتر عرض و تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر ارتفاع دارد. جت‌ها فوران‌های باریکی از گاز با قطر حدود ۱۵۰ تا ۵۰۰ کیلومتر هستند که از بالای لایه تقریباً همگنی که حدوداً ۳۰۰۰ کیلومتر امتداد دارد به سمت بالا پرتاب می‌شوند. سیخک‌های سوزنی شکل در نواحی شبکه ابر دانه‌های جو خورشید تجمع پیدا می‌کنند. سیخک‌ها در واقع انفجارات پلاسمایی هستند که تقریباً هر ۵ دقیقه یکبار رخ داده و مواد درون آنها با سرعتی در حدود ۸۱ هزار کیلومتر در ساعت به بالا حرکت می‌کنند (تسیروپولا و همکاران، ۲۰۱۲). سیخک‌ها حتی در زمانی که فعالیت خورشید کم باشد نیز وجود دارند. تعداد تقریبی آنها ۱۰۰۰۰۰ عدد در کل سطح خورشید بوده و در همه‌جا حاضر هستند، جت‌های پر سرعتی که در خطوط طیفی لبه تاریک

منبع انرژی لازم برای گرمایش پلاسمای تاج خورشید تا دمای بیش از یک میلیون کلون در فوتوسفر دینامیکی خورشید موضوع بحث برانگیز در فیزیک خورشید است. یکی از سازوکارهای انتقال انرژی ناشی از انتشار امواج مگنتوهیدرو دینامیکی است (رابرتز، ۲۰۰۴). این امواج در لوله‌های مغناطیسی فوتوسفری می‌تواند با حرکت‌های ضربه‌ای گرانونلی تولید شده و سپس در امتداد میدان مغناطیسی رنگین‌سپهر منتشر شده و با نفوذ به تاج انرژی را به صورت گرما منتقل کند. بنابراین مشاهدات حرکت‌های نوسانی در رنگین‌سپهر آزمون کلیدی برای نظریه گرمایش تاج به‌شمار می‌رود. لایه رنگین‌سپهر خورشید از ساختارهایی به نام سیخک تشکیل شده است. سیخک‌ها نام مناطقی هستند که مواد پلاسمایی در آن از لایه رنگین‌سپهر خورشید به سوی تاج تا ارتفاع ۱۰۰۰۰

رنگین سپهر مشاهده می‌شوند. با ترکیب تصاویر طیف‌نگاری که اخیراً از پرتابه‌ها به دست آمده و مشاهدات خورشیدی، مطالعه سیخک‌هایی که در حال حرکت بوده و سپس محو می‌شوند امکان‌پذیر شده است (توابی و همکاران، ۲۰۱۵a؛ ۲۰۱۵b). مطالعات اخیر نشان داده که سیخک‌ها در چندین خطوط طیفی انتقالی و رنگین سپهر ظاهر می‌شوند و حدس زده می‌شوند که سیخک‌ها بعد از محو شدن، به صورت جت‌های ناحیه انتقال در مناطق داغ ظاهر شوند. هدف از بررسی سیخک‌ها و مطالعه خواص آنها در مناطق مختلف خورشید دریافت اطلاعاتی از رنگین سپهر است که ناحیه‌ای پویا بوده و در فیزیک خورشیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. دلیل ظاهر شدن سیخک‌ها در تاج به صورت سیخ‌های متحرک این است که چگالی مواد رنگین سپهر با چگالی مواد تاج خورشید مطابقت ندارد. از طرفی سیخک‌ها نقش مهمی در تعادل جرمی تاج خورشیدی دارند. درخشندگی سیخک‌ها با تغییرات دما و ارتفاع شان تغییر می‌کند. مطالعات طیف‌سنجی اطلاعات بسیار ارزشمندی در مورد سیخک‌ها از طریق تغییرات در نمایه خطوط طیفی ارائه می‌دهد و تغییرات انتقال دوپلری در این خطوط، سرعت در راستای دید و تغییرات آن را با زمان و ارتفاع از سطح خورشید مشخص می‌کند (توابی و همکاران، ۲۰۱۵a). از طریق پهن‌شدگی خطوط طیفی و جابه‌جایی آنها، امکان اندازه‌گیری سرعت‌های چرخشی غیرحرارتی که منجر به مشاهده غیرمستقیم امواج آلفون پیچشی می‌شود وجود دارد. تعداد زیادی از آنها قطری بین ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلومتر دارند. سیخک‌ها می‌توانند هم با خارج کردن پلاسمای داغ و هم با انتقال انرژی توسط امواج مگنتو هیدرودینامیک تاج را گرم کنید (ضیغمی و همکاران، ۲۰۱۶). تاکنون دو نوع سیخک شناسایی شده است. نوع اول سیخک‌هایی با طول عمر معمولی ۴۰۰-۱۵۰ ثانیه با حرکت‌های روبه بالا و روبه پایین بر روی مسیرهای سهمی با حداکثر سرعت رو به بالا ۱۵-۴۰ کیلومتر بر ثانیه بوده و نوع دوم فقط حرکات رو به بالا با طول عمر ۵۰ تا ۱۵۰

ثانیه، و سرعت ۳۰-۱۱۰ کیلومتر بر ثانیه دارند. سیخک‌های نوع دوم عمدتاً در هر دو ناحیه خورشید آرام و حفره‌های تاج وجود دارند؛ اما در مناطق فعال سیخک‌های نوع اول غالب هستند. مطالعه اخیر مشاهداتی از ماهواره هینوده و آیریس نشان داد که اسپیکول‌های نوع ۲ تا دمای ناحیه انتقال گرم می‌شوند (پیرا و همکاران، ۲۰۱۴). همتای دیسک اسپیکول‌های نوع ۲ از طریق عدم تقارن خطوط طیفی رنگین سپهر با عمر کوتاه شناسایی شده‌اند و به صورت چرخش جابه‌جایی‌های آبی یا قرمز استنتاج می‌شوند (لانگانگن و همکاران، ۲۰۰۸؛ روپواندرورت و همکاران، ۲۰۰۹؛ آنتولین و همکاران، ۲۰۱۸). پلاسمای مغناطیسی خورشید محیطی کشان و تراکم‌پذیر است و انتشار انواع مختلفی از امواج را پشتیبانی می‌کند که با استفاده از مگنتو هیدرودینامیک (MHD) توصیف می‌شود. این امواج پارامترهایی مثل چگالی، دما، سرعت و میدان مغناطیسی را می‌تواند مختل کند. اساساً سه نوع موج MHD وجود دارد: اولی موج آلفون غیرقابل تراکم و دو نوع دیگر امواج مگنتو آکوستیک سریع و آرام هستند که هر دو لزوماً تراکم‌پذیر می‌باشند. خواص امواج MHD قویاً وابسته به زاویه بین بردار موج و میدان مغناطیسی بوده و در نتیجه این امواج ساختاربندی پلاسمای را تحت تأثیر قرار داده و منجر به جفت‌شدگی و ایجاد ساختارهای پویایی از موج MHD می‌شود، مثل ترکیب فازی، جذب تشدید و انتشار موج‌بر که نهایتاً باعث ظهور امواج در مشاهدات رصدی می‌شود. همچنین امواج را می‌توان به دو صورت مدهای سوسیسی و کینک طبقه‌بندی کرد. امواج سوسیسی با مد محوری $m=0$ مدهایی هستند که در آن طرفین باریکه مغناطیسی در فازهای مخالف نوسان می‌کنند و محور باریکه ثابت می‌ماند. امواج کینک با مد محوری $m=1$ مدهایی هستند که در آن طرفین باریکه مغناطیسی به صورت هم‌فاز نوسان می‌کنند و محور باریکه حرکت تناوبی دارد (ناکاریاکوف و ورویچ، ۲۰۰۵). در یک مدل استوانه‌ای، امواج آلفونی امواج چرخشی هستند

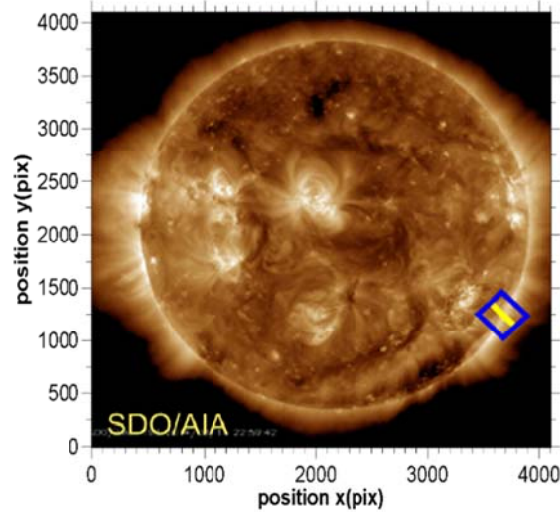
۲. مشاهدات رصدی

داده‌های رصدی ما از سایت <http://iris.lmsal.com/search> قابل دریافت می‌باشد. فضاپیمای آیریس ترکیبی از تلسکوپ و طیف‌نگار با خود به همراه دارد (دی‌پونته و همکاران ۲۰۱۴). مجموعه داده‌های تحقیق ما مربوط به تاریخ هفدهم آگوست ۲۰۱۴ از ساعت UT ۱۰:۰۶:۱۳ تا ۱۳:۵۹:۴۸ UT شامل تصاویر همراه با طیف‌نگار است. تعداد تصاویر طیفی ۸۰۰ و فاصله زمانی بین دو تصویر طیفی متوالی ۱۵/۹ ثانیه می‌باشد. میدان دید این مجموعه داده ۱۷۵' در ۱۶۷' ثانیه کمانی است. این شبکه داده‌ها از نوع شکاف ثابت بوده و مرکز شکاف در مختصات خورشیدی در نقطه ی $X=۸۲۷$ و $Y=-۴۶۵$ واقع شده است. شکل ۱ تصویر دیسک خورشید در رصدخانه دینامیکی خورشیدی (Solar Dynamic Observatory/Atmospheric Imaging Assembly) است، مربع آبی‌رنگ ناحیه مورد مطالعه و خط زرد موقعیت شکاف را نشان می‌دهد و شکل ۲-الف تصویر بزرگ‌نمایی شده از مربع آبی است که توسط آیریس با فیلتر Si IV در تاریخ هفدهم آگوست ۲۰۱۴ در زمان UT ۱۰:۰۶:۱۳ ثبت شده است، خط زرد محل شکاف تلسکوپ را نشان داده و تصویر پایینی گوشه سمت راست، تصویر پردازش شده از ناحیه‌ای است که به سیخک‌های مورد مطالعه اشاره می‌کند. شکل ۲-ب نمونه‌ای از طیف حاصل از آیریس در امتداد شکاف زردرنگ در طول موج مرکزی ۱۳۹۳/۷۵ آنگستروم می‌باشد که در تاریخ هفدهم آگوست ۲۰۱۴ در ساعت UT ۱۰:۰۶:۱۳ ثبت شده است، سه خط عرضی بنفش‌رنگ ارتفاعات مورد مطالعه را از لبه خورشید با فاصله‌های ۲۱۰۰ کیلومتر نشان می‌دهد.

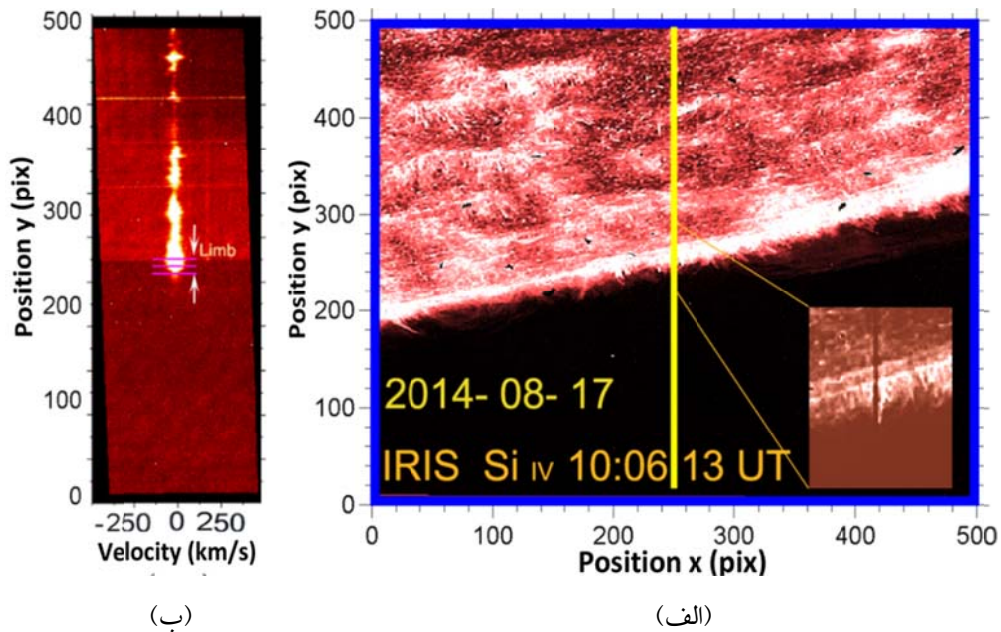
که تیوب مغناطیسی را می‌چرخانند. اگر فرض کنیم سیخک‌ها موج‌برهای پایداری متشکل از خطوط متمرکز از میدان‌های مغناطیسی باشند که به صورت تیوب‌های شار مغناطیسی شناخته می‌شوند، در محیطی که دارای چنین ساختار مغناطیسی‌ای است، حالت تعادلی زمینه را به صورت یک لوله باریک و بلند می‌توان در نظر گرفت. در استوانه مستقیم و راست این مدها غیرقابل تراکم بوده، اما در استوانه‌ای که به طور جزئی به چرخش در آمده می‌تواند به وسیله اختلالات چگالی پلاسمایی همراه شوند. امواج چرخشی میدان مغناطیسی را مختل کرده و به دنبال آن باعث اختلالات سرعت پلازما در جهت عمود بر میدان مغناطیسی می‌شود. این امواج مسافت زیادی را طی کرده و انرژی و تکانه را منتقل می‌کنند.

اساساً دو روش پردازش تصویر و روش طیفی برای تحلیل حرکت ساختارهایی همچون سیخک‌ها و جت‌های خورشیدی استفاده می‌شود. در روش پردازش تصویر جابه‌جایی‌ها و تغییرات شدت در تصاویر اندازه‌گیری می‌شود (توایی و همکاران، ۲۰۱۵b؛ ۲۰۱۵c) در دومین روش طرح‌های پریمیوم در شیفتهای دوپلری به وسیله اسپکترومترها مورد بررسی قرار می‌گیرد (توایی و همکاران، ۲۰۱۵a؛ توایی، ۲۰۱۸؛ توایی و کوچمی، ۲۰۱۹؛ ضیغمی و همکاران، ۲۰۲۰).

در این تحقیق از داده‌های طیفی تلسکوپ فضایی آیریس استفاده می‌کنیم. آیریس ابزاری را برای تجزیه و تحلیل ساختار حرارتی جو خورشید را در طول موج اشعه ماوراءبنفش با توان تفکیک فضایی و زمانی بالا فراهم می‌کند (دی‌پونته و همکاران؛ ۲۰۱۴). روش آنالیز ما بر اساس تحلیل طیفی، برازش نوسانات جابه‌جایی دوپلری وردیابی بیشینه شدت طیف و تحلیل موجک (wavelet) می‌باشد.



شکل ۱. تصویر دیسک خورشید (در طول موج آهن ۱۷۱ آنگسترم) گرفته شده از رصدخانه دینامیکی خورشیدی (SDO/AIA Solar Dynamic Observatory/Atmospheric Imaging Assembly) است که در تاریخ هفدهم آگوست ۲۰۱۴ در ساعت ۱۰:۰۶:۱۳ UT ثبت شده است. مربع آبی رنگ ناحیه مورد مطالعه و خط زرد موقعیت شکاف تلسکوپ را نشان می‌دهد.



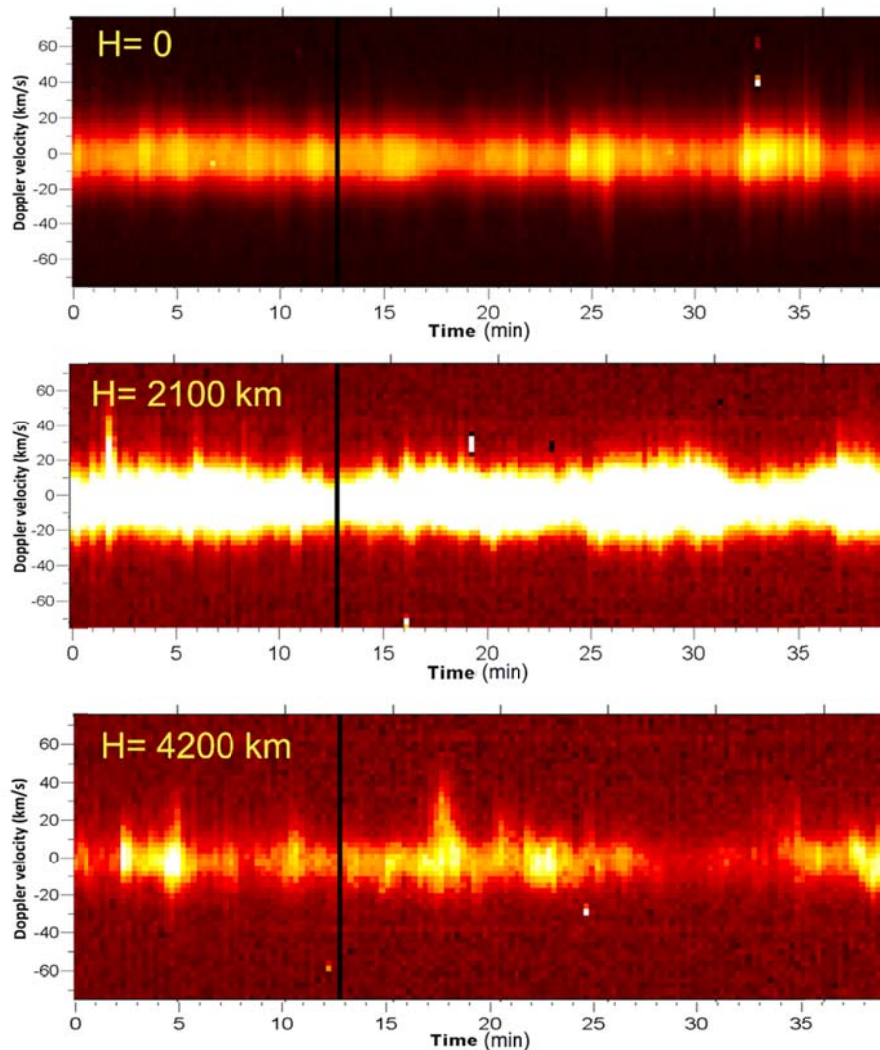
شکل ۲. الف) تصویر بزرگ‌نمایی شده از مربع آبی رنگ شکل ۱ است که توسط آیریس در تاریخ هفدهم آگوست ۲۰۱۴ در ساعت ۱۰:۰۶:۱۳ UT ثبت شده است. خط زرد محل شکاف تلسکوپ را نشان داده و تصویر پایینی گوشه سمت راست تصویر پردازش شده از ناحیه‌ای است که به سیخک‌های مورد مطالعه اشاره می‌کند. ب) نمونه‌ای از طیف حاصل از آیریس در امتداد شکاف زرد رنگ در طول موج ۱۴۰۰ آنگستروم می‌باشد که در تاریخ هفدهم آگوست ۲۰۱۴ در ساعت ۱۰:۰۶:۱۳ UT ثبت شده است. سه خط عرضی بنفش رنگ ارتفاعات مورد مطالعه را نشان می‌دهد، فاصله ارتفاعات متوالی به اندازه ۲۱۰۰ کیلومتر است. در این تصاویر هر پیکسل معادل با ۰/۳۳ ثانیه کمانی (تقریباً ۲۶۰ کیلومتر) است.

۳. تحلیل داده‌ها
 پس از آماده کردن تصاویر طیفی بازه زمانی مناسبی را انتخاب می‌کنیم که در آن شاهد جابه‌جایی‌های دوپلری با نوسانات قابل ملاحظه نسبت به طول موج مرکزی (جابه‌جایی به سمت قرمز و آبی) باشیم. جابه‌جایی قرمز و آبی به ترتیب به معنی دور شدن و نزدیک شدن ساختار سیخک‌ها به ناظر می‌باشد. این بازه از شماره ۲۰۰ امین تصویر تا ۳۵۰ امین تصویر طیفی، معادل با

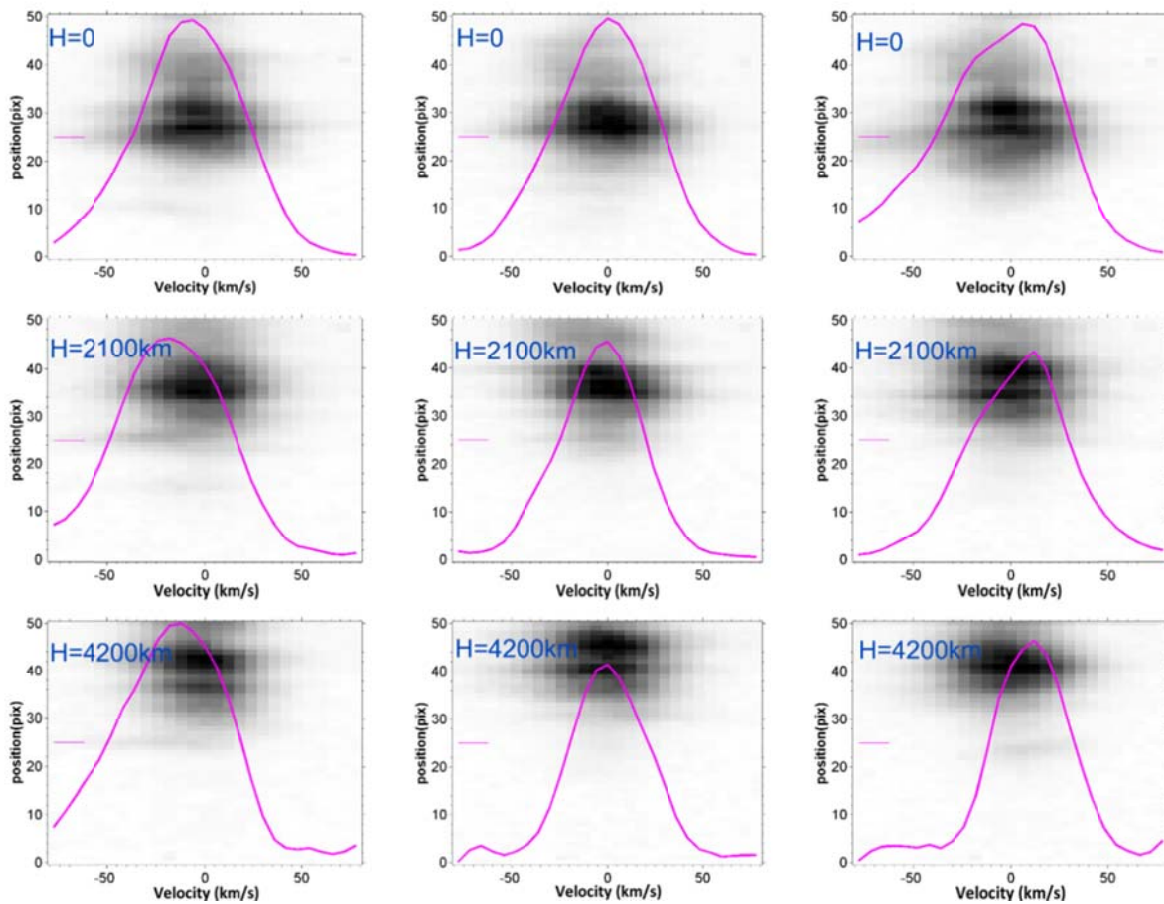
۳. تحلیل داده‌ها
 پس از آماده کردن تصاویر طیفی بازه زمانی مناسبی را انتخاب می‌کنیم که در آن شاهد جابه‌جایی‌های دوپلری با نوسانات قابل ملاحظه نسبت به طول موج مرکزی

اکنون برای تعیین دقیق جابه‌جایی‌های سرعت دوپلری منحنی‌های نمایه را در بازه زمانی ۴۰ دقیقه رسم کرده و موقعیت بیشینه آنها نسبت به طول‌موج مرکزی را به‌دست می‌آوریم. شکل ۴ از بالا به پایین نمونه‌هایی از ۱۵۰ نمایه شدت طیف به‌دست آمده در سه ارتفاع مشخص شده در شکل ۲-ب را نشان می‌دهد. اولین ارتفاع مطابق با لبه خورشید بوده و دو ارتفاع بعدی به فواصل تقریباً ۲۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. تصاویر از راست به چپ جابه‌جایی‌های قرمز به سمت آبی را نشان می‌دهد. خط بنفش کوتاه در سمت چپ تصاویر به ارتفاعی اشاره می‌کند که نمایه‌ها در آن ارتفاع به‌دست آمده‌اند.

مدت‌زمان تقریباً ۴۰ دقیقه است. برای تعیین جابه‌جایی‌های دوپلری در امتداد سیخک‌ها و بررسی این جابه‌جایی‌ها نسبت به ارتفاع، با برنامه‌نویسی متلب نمایه‌های شدت طیفی ۱۵۰ تصویر طیفی را در سه ارتفاع از لبه خورشید تا ارتفاع ۴۲۰۰ کیلومتر به‌دست آورده و آنها را کنار هم قرار می‌دهیم. به این ترتیب می‌توان برش‌های زمانی از نمایه‌ها را مطابق شکل ۳ به‌دست آورد. در این برش‌های زمانی محور افقی زمان و محور قائم سرعت دوپلری می‌باشد. شکل ۳ از بالا به پایین نمایه‌های به‌دست آمده در سه ارتفاع مشخص شده را نشان می‌دهد. اولین ارتفاع مطابق با لبه خورشید بوده و دو ارتفاع بعدی به فواصل تقریباً ۲۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. از بالا به پایین برش‌های زمانی تصاویر طیفی را در امتداد سه خط بنفش‌رنگ شکل ۲-ب در مدت‌زمان ۴۰ دقیقه نشان می‌دهند. خط عمودی سیاه در زمان تقریبی دقیقه ۱۳ نشان دهنده تاریک بودن تصویر طیفی در آن بازه زمانی است.



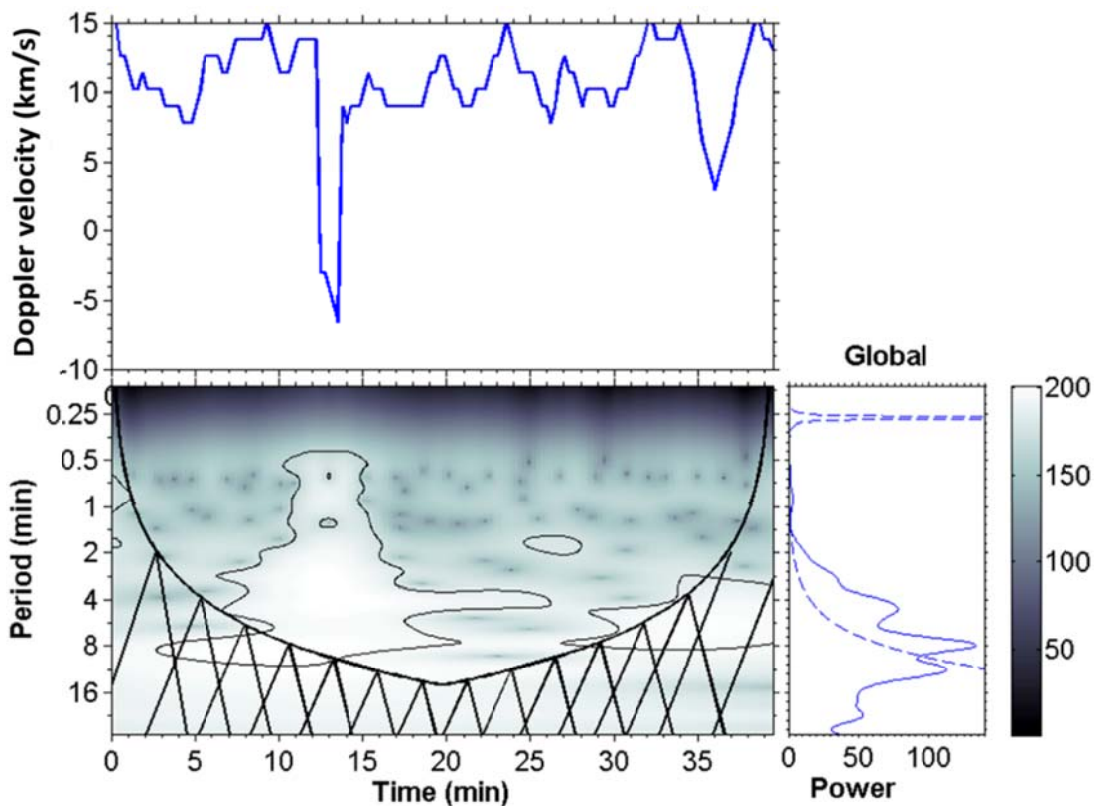
شکل ۴. از بالا به پایین نمونه‌هایی از منحنی‌های نمایه به دست آمده در سه ارتفاع مشخص شده در شکل ۲-ب را نشان می‌دهد. اولین ارتفاع مطابق با لبه خورشید بوده و دو ارتفاع بعدی به فواصل تقریباً ۲۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. تصاویر از راست به چپ جابه‌جایی‌های قرمز به سمت آبی را نشان می‌دهد. خط بنفش کوتاه در سمت چپ تصاویر به ارتفاعی اشاره می‌کند که نمایه‌ها در آن ارتفاع به دست آمده‌اند. تعیین دقیق موقعیت بیشینه منحنی‌های نمایه از طریق برنامه‌نویسی متلب انجام شده است. با گردآوری این اطلاعات برای ۱۵۰ منحنی برای بازه ۴۰ دقیقه‌ای مجموعه‌ای از سیگنال‌های زمانی به دست می‌آید.

اکنون برای بررسی دوره تناوب نوسانات جابه‌جایی دوپلری از روش تحلیل موجک با موج پایه مورلت استفاده می‌کنیم که ابزار مهمی برای پردازش نوسانات می‌باشد (تورنس و شامپو، ۱۹۹۸). پردازش سیگنال یکی از قدرتمندترین قسمت‌های علوم و مهندسی است که زمینه‌های متعددی از قبیل ارتباطات، مهندسی پزشکی، رادار، سونار، زلزله، اکتشافات، کامپیوتر، تصویربرداری، اقتصاد، فیزیک،... را در بر می‌گیرد. تاکنون ابزارهای مختلفی برای پردازش سیگنال معرفی شده‌اند که آنالیز فوریه ابزار سنتی و پرسابقه آن است. ولی تقریباً از اوایل دهه ۸۰ میلادی ابزار پردرستی به نام آنالیز موجک پا به عرصه ظهور گذاشته است. شاید در آینده پردازش

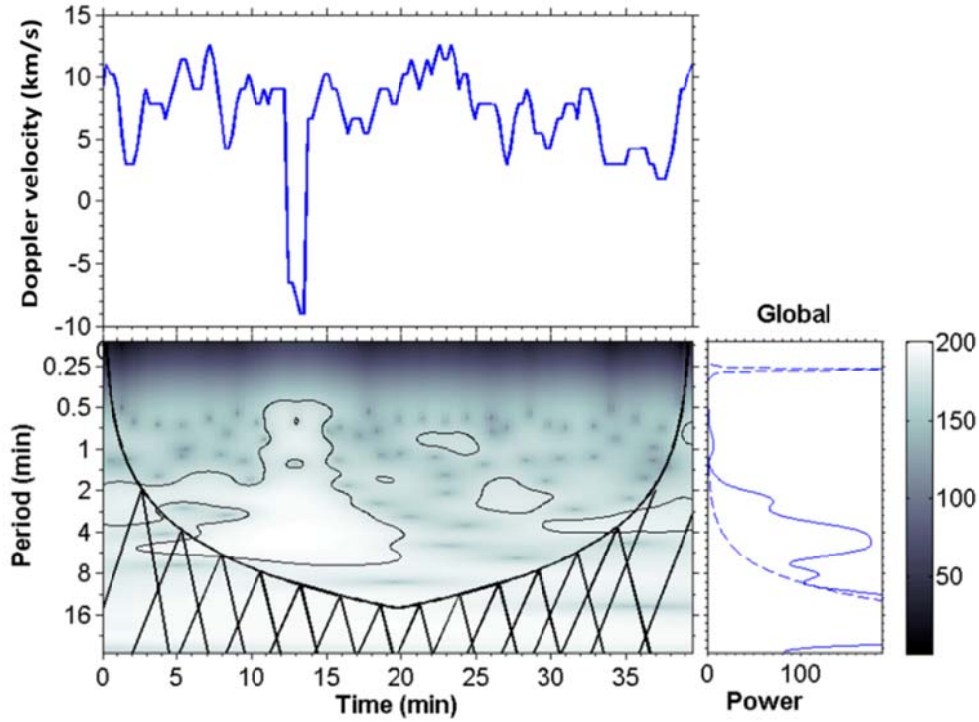
همان‌طور که شکل ۴ نمونه‌هایی از جابه‌جایی‌های آبی و قرمز دوپلری را نشان می‌دهد موقعیت شدت بیشینه هر نمایه، با برازش گوسی شکل به وضوح دیده می‌شود. تعیین دقیق موقعیت بیشینه منحنی‌های نمایه از طریق برنامه‌نویسی متلب انجام شده است. با گردآوری این اطلاعات برای بازه ۴۰ دقیقه‌ای مجموعه‌ای از سیگنال‌های زمانی به دست می‌آید. می‌توان گفت که سیگنال‌ها مجموعه‌ای از کمیت‌های فیزیکی هستند که بر حسب یک پارامتر و یا متغیر مستقل تغییر کند اگر متغیر زمان باشد سیگنال زمانی و اگر مکان باشد سیگنال مکانی نامیده می‌شود. این سیگنال‌ها حاوی اطلاعاتی در باره منابع خود بوده و با پردازش روی سیگنال‌ها می‌توان رفتار منابع را تحلیل کرد.

زمانی و مکانی تبدیل می‌کند که به دلیل خاصیت ذاتی ساختارهای ریز مقیاس همچون سیخک‌های خورشید بسیار مناسب به نظر می‌رسد. یکی از خواص مهم آنالیز موجک شکل دلخواه آن است به طوری که برای هر نوع ساختاری یک تابع موجک مناسب (تابع پایه) انتخاب می‌شود. اما در آنالیز فوریه فقط توابع سینوسی برای تابع مادر به کار می‌رود. تبدیل موجک نوسانات در سه ارتفاع در شکل‌های ۵ الی ۷ دیده می‌شود. این نتایج را با استفاده از کد شبیه‌سازی wavelet محاسبه کرده ایم. تصاویر بالای شکل‌های ۵ الی ۷ نوسانات سرعت دوپلری نسبت به زمان و شکل پایین آنالیز موجک این نوسانات را در بازه زمانی ۴۰ دقیقه نشان می‌دهد. نتایج آنالیز به روش موجک در سه ارتفاع نوسانات جابه‌جایی دوپلری را به وضوح با پریودهای غالب ۳، ۵ و ۸ دقیقه‌ای نشان می‌دهد. تصاویر پایینی شکل‌های ۵ الی ۷ را ببینید.

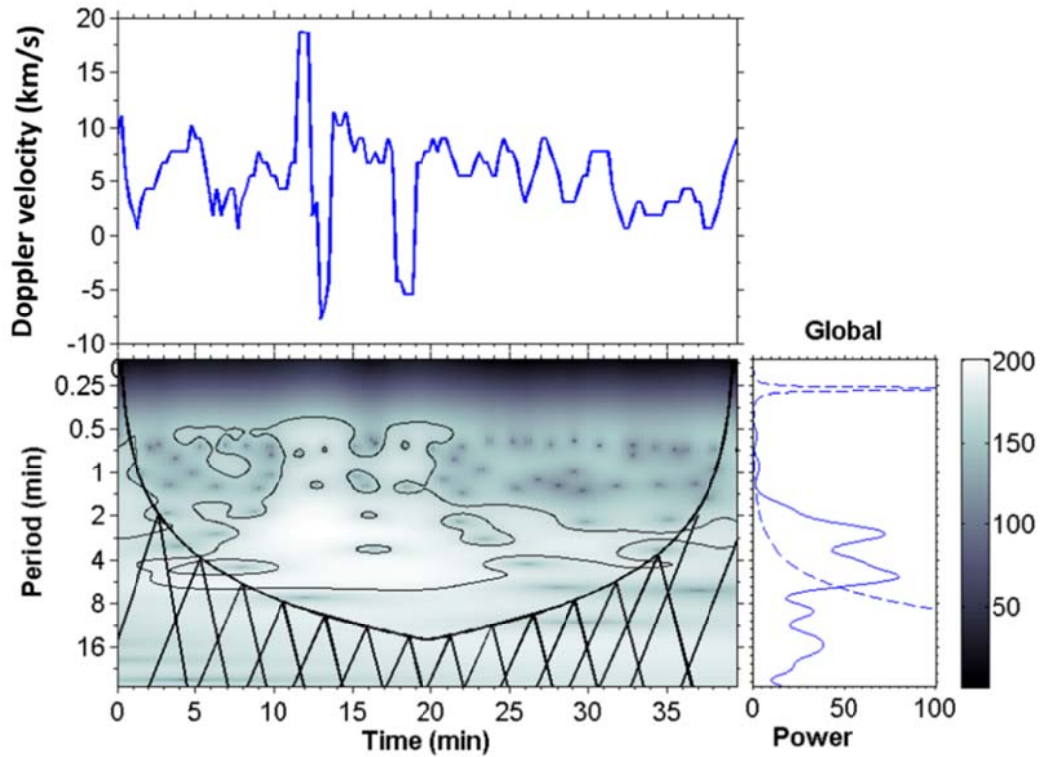
سیگنال همان نقشی را در علوم و تکنولوژی بازی کند که الکترونیک در گذشته بازی کرده است. پردازش سیگنال برای به دست آوردن اطلاعات مربوط به یک کمیت نوسانی است. عمل پردازش یک عمل ریاضی است که یک تابع یا دنباله را به تابع یا دنباله دیگر می‌نگارد. علت تبدیل این است که اطلاعات مربوط به یک سیگنال در یک حوزه (اغلب حوزه زمان) چندان آشکار نیست ولی در حوزه دیگر یعنی تبدیل شده آن (مثلاً حوزه فرکانس) واضح تر است. به بیان دیگر تبدیل یک سیگنال در واقع نمایش آن در فضای دیگر است. 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 خاصیت این امواج برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های گسسته در پلاسماهای خورشید مناسب نیست. آنالیز موجک سیگنال‌ها را در دو بازه



شکل ۵. نتایج آنالیز موجک نوسانات طیف برای اولین ارتفاع که نزدیک لبه خورشید است. شکل بالا نوسانات سرعت دوپلری نسبت به زمان و شکل پایین آنالیز موجک این نوسانات در بازه زمانی ۴۰ دقیقه است. نوسانات ۵ و ۸ دقیقه‌ای و حتی کمی ۳ دقیقه‌ای نوسانات غالب هستند. ناحیه هاشورزده بر روی شکل منطبقه‌ای است که در آن طیف توان موجک به دلیل اثر نقاط انتهایی سیگنال‌های طولی محدود مختل می‌شود.



شکل ۶. نتایج آنالیز موجک نوسانات طیف برای دومین ارتفاع که به فاصله ۲۱۰۰ کیلومتر از لبه خورشید است. شکل بالا نوسانات سرعت دوپلری نسبت به زمان و شکل پایین آنالیز موجک این نوسانات در بازه زمانی ۴۰ دقیقه است. نوسانات غالب ۵ دقیقه‌ای به‌طور وضوح دیده می‌شود. ناحیه هاشورزده بر روی شکل منطقه‌ای است که در آن طیف توان موجک به‌دلیل اثرات نقاط انتهایی سیگنال‌های طولی محدود مختل می‌شود.



شکل ۷. نتایج آنالیز موجک نوسانات طیف برای سومین ارتفاع که به فاصله ۴۲۰۰ کیلومتر از لبه خورشید است. شکل بالا نوسانات سرعت دوپلری نسبت به زمان و شکل پایین آنالیز موجک این نوسانات در بازه زمانی ۴۰ دقیقه است. ناحیه هاشورزده بر روی شکل منطقه‌ای است که در آن طیف توان موجک به‌دلیل اثر نقاط انتهایی سیگنال‌های طولی محدود مختل می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری و بحث

(تورنس و شامپو، ۱۹۹۸). چند دلیل وجود دارد که از این روش برای اندازه‌گیری‌ها بهره بیشتری ببریم. این دلایل عبارت‌اند از گسسته بودن و غیریکنواخت بودن داده‌ها. با توجه به این دو ویژگی داده‌ها آنالیز موجک برای آنالیز محلی سیگنال‌ها بسیار مناسب به نظر می‌رسد.

جدول ۱. نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های میانگین سرعت جابه‌جایی دوپلری مشاهده شده در بازه زمانی ۴۰ دقیقه و دوره تناوب نوسانات.

دوره تناوب نوسانات (دقیقه)	میانگین سرعت جابه‌جایی دوپلری (کیلومتر بر ثانیه)	ارتفاع از لبه خورشید (کیلومتر)
۵ و ۸	۱۰ الی ۱۲-	صفرا ۱۰۰
۵	۱۰ الی ۱۵-	۲۱۰۰
۳ و ۵	۱۳ الی ۱۴-	۴۲۰۰

پریود قطع در لایه رنگین سپهر ۳ دقیقه است. یعنی فقط امواجی با پریود کمتر از ۳ دقیقه می‌توانند به لایه‌های بالاتر نفوذ کنند. دی پونته و همکاران (۲۰۰۴) ادعا کرد که گرما و چگالی زیاد مواد در داخل سیخک‌ها و از همه مهم‌تر کج بودن آنها باعث بالا رفتن پریود قطع انتشار امواج در داخل آنها می‌شود، به طوری که حتی امواج با پریودهای ۵ دقیقه‌ای نیز می‌توانند منتشر شوند. لوله‌های مغناطیسی سه نوع موج را هدایت می‌کنند: امواج کینک، امواج سوسیسی و امواج آلفون چرخشی. بعضی از این امواج می‌توانند باعث مشاهدات جابه‌جایی دوپلری شوند. امواج آلفون چرخشی در لوله‌های نازک باعث پهن‌شدگی غیرحرارتی پریودیکی خطوط طیفی می‌شود اما باعث نوسانات جابه‌جایی دوپلری نمی‌شوند (زاگارا شویلی، ۲۰۰۳). امواج سوسیسی باعث نوسانات در شدت خطوط ناشی از تغییرات چگالی می‌شود، و اگر محور لوله نسبت به خط قائم‌زاویه داشته باشد میدان سرعت طولی امواج سوسیسی می‌تواند باعث تغییرات جابه‌جایی دوپلری شود. اما سهم اصلی در نوسانات جابه‌جایی دوپلری ناشی از امواج کینک است که به‌طور عرضی عمود بر محور لوله

در این تحقیق با استفاده از تصاویر طیفی به‌دست آمده از تلسکوپ آپریس به روش تحلیل طیفی توانستیم نوسانات جابه‌جایی دوپلری را آشکار کنیم. با تحلیل نمایه‌های طیفی از لبه خورشید تا ارتفاع ۴۲۰۰ کیلومتری در امتداد سیخک‌ها، دامنه سرعت دوپلری و فرکانس‌های غالب نوسانات دوپلری را تعیین کردیم. میانگین دامنه سرعت دوپلری در مدت ۴۰ دقیقه، در نزدیکی لبه خورشید ۱۰ کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی قرمز) و ۱۲- کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی آبی)، در ارتفاع ۲۱۰۰ کیلومتری ۱۰ کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی قرمز) و ۱۵- کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی آبی)، و در ارتفاع ۴۲۰۰ کیلومتری ۱۳ کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی قرمز) و ۱۴- کیلومتر بر ثانیه (جابه‌جایی آبی) به‌دست آمد. جابه‌جایی قرمز و آبی به‌ترتیب به معنی دور شدن و نزدیک شدن ساختار سیخک‌ها به ناظر می‌باشد. چون سیخک‌ها تقریباً در جهت قائم می‌باشند؛ بنابراین سرعت‌های به‌دست آمده که ناشی از نوسانات در امتداد خط دید است می‌تواند سرعت عرضی سیخک‌ها قلمداد شود. حرکت‌های همرفتی فوتوسفری اغلب منبع تحریکات امواج در لوله‌های مغناطیسی است (زاگارا شویلی، ۲۰۰۳؛ زاگارا شویلی و موراوسکی، ۲۰۰۷). بنابراین انتشار امواج در رنگین سپهر از طریق دینامیک سیخک‌ها قابل‌ردیابی است. تحلیل نوسانات جابه‌جایی دوپلری به روش موجک به‌طور واضح پریودهای غالب ۳، ۵ و ۸ دقیقه‌ای را نشان داد. جدول ۱ به‌طور خلاصه نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های میانگین سرعت جابه‌جایی دوپلری و دوره تناوب نوسانات سرعت جابه‌جایی دوپلری را نشان می‌دهد. آنالیز موجک سیگنال‌ها را در دو بازه زمانی و مکانی تبدیل می‌کند که به‌دلیل خاصیت ذاتی ساختارهای ریزمقیاس همچون سیخک‌های خورشید بسیار مناسب به‌نظر می‌رسد. یکی از خواص مهم‌تر تحلیل موجک شکل دلخواه آن است به طوری که برای هر نوع ساختاری یک تابع موجک مناسب (تابع پایه) انتخاب می‌شود

۵۰۰ ثانیه قابل نفوذ به رنگین سپهر می‌باشند. تی و همکاران (۲۰۲۰) با آنالیز طیف Mg II سرعت اسپیکول‌ها را در امتداد دیداز ۲۵- الی ۲۵ کیلومتر بر ثانیه به دست آوردند؛ به طوری که میانگین سرعت بدون علامت اسپیکول‌ها از ۲ الی ۱۰ کیلومتر بر ثانیه به دست آمد.

با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان چنین پیشنهاد کرد که سهم اصلی نوسانات جابه‌جایی دوپلری در سیخک‌های خورشید که به طور عرضی عمود بر محور سیخک‌ها مشاهده شده است ناشی از امواج کینک و آلفون باشد. انرژی حاصل از این امواج می‌تواند در گرم کردن تاج خورشید تا میلیون‌ها درجه کلون نقش داشته باشد.

مراجع

- Antolin, P., Schmit, D., Pereira, T. M. D., De Pontieu, B. and De Moortel, I., 2018, Transverse Wave Induced Kelvin-Helmholtz Rolls in Spicules, *ApJ*, 856, 44A, Doi:10.3847/1538-4357/aab34f.
- De Pontieu, B., McIntosh, S. W., Carlsson, M., Hansteen, V. H., Tarbell, T. D., Schrijver, C. J., Title, A. M., Shine, R. A., Tsuneta, S. and Katsukawa, Y. P., 2007a, Chromospheric Alfvénic Waves Strong Enough to Power the Solar Wind, *science*, 318, 1574, Doi: 10.1126/science.1151747.
- De Pontieu, B., Erdelyi, R. and James, S. P., 2004, Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows, *Nature*, 430, 536, Doi:10.1038/nature02749.
- De Pontieu, B., Carlsson, M., Rouppe van der Voort, L. H. M., Rutten, R. J., Hansteen, V. H. and Watanabe, H., 2012, Ubiquitous Torsional Motions in Type II Spicules, *ApJ*, 752, L12, DOI:10.1088/2041-8205/752/1/L12.
- De Pontieu, B., Title, A.M., Lemen, J.R., Kushner, G.D., Akin, D.J., Allard, B., Berger, T., Boerner, P., Cheung, M., Chou, C., Drake, J.F., Duncan, D.W., Freeland, S., Heyman, G.F., Hoffman, C., Hurlburt, N.E., Lindgren, R.W., Mathur, D., Rehse, R., Sabolish, D., Seguin, R., Schrijver, C.J., Tarbell, T.D., Wulser, J.-P., Wolfson, C.J., Yanari, C., Mudge, J., Nguyen-Phuc, N., Timmons, R., van Bezooijen, R., Weingrod, L., rookner, R., Butcher, G., Dougherty, B., Eder, J., Knagenhjelm, V., Larsen, S., Mansir, D., Phan, L., Boyle, P., Cheimets, P.N., DeLuca, E.E., Golub, L., Gates, R.,

نوسان می‌کند (زاگارا شویلی و همکاران، ۲۰۰۷). پاساچوف و همکاران (۲۰۰۹) مقدار سرعت بی علامت در امتداد دید (unsigned line of sight velocities) اسپیکول‌ها را اندکی کمتر از ۱۰ کیلومتر بر ثانیه تعیین کردند. دی پونته و همکاران (۲۰۰۷) و پریرا و همکاران (۲۰۱۲) سرعت‌های عمود بر محور اصلی اسپیکول‌ها را بین ۵ الی ۳۰ کیلومتر بر ثانیه به دست آوردند. به عنوان مثال دی پونته و همکاران (۲۰۱۲) دو نوع حرکت عرضی را در اسپیکول‌ها تشخیص دادند: (۱) حرکت‌های تاب خورده (Swaying) به اندازه ۱۵ الی ۲۰ کیلومتر بر ثانیه و (۲) حرکت‌های چرخشی (Torsional) در محدوده ۲۴ الی ۳۰ کیلومتر بر ثانیه. آنها گزارش کردند که امواج آلفون با دامنه‌های ۱۰ الی ۲۵ کیلومتر بر ثانیه با پریودهای ۱۰۰ الی

- Hertz, E., McKillop, S., Park, S., Perry, T., Podgorski, W.A., Reeves, K., Saar, S., Testa, P., Tian, H., Weber, M., Dunn, C., Eccles, S., Jaeggli, S.A., Kankelborg, C.C., Mashburn, K., Pust, N., Springer L., Carvalho R., Kleint, L., Marmie, J., Mazmanian E., Pereira, T.M.D., Sawyer, S., Strong, J., Worden, S.P., Carlsson, M., Hansteen, V.H., Leenaarts, J., Wiesmann, M., Aloise, J., Chu, K.-C., Bush, R.I., Scherrer, P.H., Brekke, P., Martinez-Sykora, J., Lites, B.W., McIntosh, S.W., Uitenbroek, H., Okamoto, T.J., Gummin, M.A., Auker, G. Jerram, P., Pool, P., Waltham, N., 2014, The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS). *Sol. Phys.*, 289, 2733.
- Langangen, Ø., De Pontieu, B., Carlsson, M., Hansteen, V. H., Cauzzi, G. and Reardon, K., 2008, Search for High Velocities in the Disk Counterpart of Type II Spicules, *ApJ.*, 679, L167, Doi:10.1086/589442.
- Pasachoff, J. M., Jacobson, W. A. and Sterling, A. C., 2009, Limb Spicules from the Ground and from Space, *Sol. Phys.*, 260, 59, Doi:10.1007/s11207-009-9430-x.
- Nakariakov, V. M. and Verwichte, E., 2005, Coronal Waves and Oscillations, *Living Rev. Solar Phys.*, 2, 3.
- Pereira, T. M. D., De Pontieu, B. and Carlsson, M., 2012, Quantifying Spicules, *ApJ*, 759, 18, Doi:10.1088/0004-637X/759/1/18.
- Pereira, T. M. D., De Pontieu, B., Carlsson, M., Hansteen, V., Tarbell, T. D., Lemen, J., Title, A., Boerner, P., Hurlburt, N., Wulser, J. P., Martínez-Sykora, J., Kleint, L., Golub, L., McKillop, S., Reeves, K. K., Saar, S., Testa, P., Tian, H., Jaeggli, S. and Kankelborg, C.,

- 2014, An Interface Region Imaging Spectrograph First View on Solar Spicules, *ApJ*, 792, L15, Doi:10.1088/2041-8205/792/1/L15.
- Roberts, B., 2004, MHD Waves in the Solar Atmosphere. ESA SP., 547.
- Roupe van der Voort, L., Leenaarts, J., de Pontieu, B., Carlsson, M. and Vissers, G., 2009, On-disk Counterparts of Type II Spicules in the Ca II 854.2 nm and H α Lines *ApJ*, 705, 272, Doi:10.1088/0004-637X/705/1/272.
- Tavabi, E., Koutchmy, S. and Golub, L., 2015a, Limb Event Brightenings and Fast Ejection Using IRIS Mission Observations, *Solar Physics*, 290, 2871-2887, Doi: 10.1007/s11207-015-0771-3.
- Tavabi, E., Koutchmy, S., Ajabshirizadeh, A., Ahangarzadeh Maralani, A. R. and Zeighami, S., 2015b, Alfvénic wave in polar limb spicules, *Astronomy and Astrophysics*. 573, 7, Doi: 10.1051/0004-6361/201423385.
- Tavabi E., Ajabshirizadeh A., Ahangarzadeh Maralani A. R. and Zeighami S. 2015c, *J. Astrophys. Astron*, 2020JApA, 41, 18Z, Doi: 10.1007/s12036-020-09633-y.
- Tavabi, E., 2018, Synchronized observations of bright points from the solar photosphere to the corona. *MNRAS*, 476 868-874. Doi: 10.1093/mnras/sty020.
- Tavabi, E. and Koutchmy, S., 2019, Chromospheric peculiar off-limb dynamical events from IRIS observations, *ApJ*, 883, 41T, Doi:10.3847/1538-4357/ab3730.
- Tei, A., Gun, S., Heinzel, P., Okamoto, T., Stepan, J., Jejcic, S. and Shibata, K., 2020, IRIS Mg II Observations and non-LTE modeling of off-limb spicules in solar coronal hole, *2020ApJ*, 888, 2T, Doi:10.3847/1538-4357/ab5db1.
- Torrence C. and Compo G. P., 1998, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61, Doi: 10.1175/1520-0477.
- Tsiropoula, G., Tziotziou, K., Kontogiannis, I., Madjarska, M. S. Doyle, J. G. and Suematsu, Y., 2012, Solar Fine-Scale Structures. I. Spicules and Other Small-Scale, Jet-Like Events at the Chromospheric Level: Observations and Physical Parameters, *Space Sci. Rev.*, 169, 181-244, Doi: 10.1007/s11214-012-9920-2.
- Zaqarashvili, T. V., 2003, Observation of coronal loop torsional oscillation, *A&A*, 399L, Doi: 10.1051/0004-6361:20030084.
- Zaqarashvili, T. V. and Murawski, K., 2007, Torsional oscillations of longitudinally inhomogeneous coronal loops, *A&A*, 470, 353.
- Zaqarashvili, T. V., Khutsishvili, E., V. Kukhianidze, V. and Ramishvili, G., 2007, Doppler shift oscillations in solar spicules, *A&A*, 474, 627-632, Doi:10.1051/0004-6361:20077661.
- Zeighami, S., Ahangarzadeh Maralani, A. R., Tavabi, E. and Ajabshirizadeh, A., 2016, Evidence of Energy Supply by Active-Region Spicules to the Solar Atmosphere, *Solar Physics*, 291, 847-858, Doi: 10.1007/s11207-016-0866-5.
- Zeighami, S., Tavabi, E. and Amir Khanlou, E., 2020, Waves propagation in network and inter-network bright points channels between the chromosphere and transition regions with IRIS observations, *2020JApA*, 41, 18Z, Doi:10.1007/s12036-020-09633-y.

Doppler Oscillations in the Solar Spicules based on IRIS data

Zeighami, S.^{1*} and Tavabi, E.²

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

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

(Received: 8 Nov 2020, Accepted: 25 May 2021)

Summary

In this research, we study the oscillating properties of the solar spicules in the line of sight with spectral measurements recorded by Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) on August 17, 2014. The primary purpose of IRIS is the observation of the movement of materials, fluctuations, and energy absorption and heat production in the lesser-known region of the solar atmosphere which affect the behavior of the Earth's atmosphere, the performance of satellites, power transmission networks and radio communications. The transmission of energy through waves and oscillations can play an important role in understanding of the solar dynamics, and responding to the problems about the sudden rise of the solar atmosphere temperature to several million Kelvin from the transition layer to the solar corona. The source of energy required to heat the solar corona plasma to a temperature of one million Kelvin in the Sun's dynamic photosphere is a matter of debate in solar physics. One of the mechanisms of energy transfer is the propagation of magneto-hydrodynamic waves. These waves in photospheric magnetic tubes can be generated by granular shock motions and then propagate along the chromospheric magnetic field and penetrate the corona to transfer energy in the form of heat. Therefore, observations of oscillating motions in the chromosphere are a crucial test for the theory of corona heating. Quasi-periodic fluctuations in spicules appear mainly as displacement of these structures in image observations or periodic shifts in spectral lines. We use Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) to measure the spectrum around a narrow slit. By fitting a Gaussian profile of the Si IV profiles, we can calculate Doppler velocity shifts up to an altitude of 4200 km along the spicules. The Doppler velocity range from the edge of the sun to an altitude of 4200 km was obtained from 12 to 15 kms^{-1} (blue- shift), and from 10 to 15 kms^{-1} (red- shift). For determining the dominant periods of Doppler shift oscillations, it is needed that the maximum intensity positions of 150 spectral profiles are collected, and a set of temporal signals is generated as a temporal signal. Any physical quantity that changes according to an independent parameter or variable is called a signal. If the parameter is a time variable, it is called a temporal signal, and if it is a position, the signal is called a spatial signal. These signals contain information about their sources, for example, period. So by processing signals, the behavior of resources can be studied and predicted. After processing temporal signals, we apply the wavelet analysis. Wavelet analysis is a useful method for simultaneous diagnosis of the power in time and frequency domains for temporal signals. The results of wavelet analysis revealed Doppler shift fluctuations with dominant periods of 3, 5 and 8 minutes. According to the results of this study, it is suggested that the main contribution of Doppler shift fluctuations in the solar spicules, observed transversely perpendicular to the axis of the solar spicules, is due to kink and alfvén waves. These waves can play an essential role in heating the solar corona to millions of Kelvin.

Keywords: Solar atmosphere, Chromospheric jets, Coronal heating, Oscillations, Wavelet.

* Corresponding author:

zeighami@iaut.ac.ir