



## عوامل برانگیختگی احتمالی نوسانات کینکی حلقه‌های تاج خورشیدی

عباس عابدینی و اسما دهقان‌اناری

گروه فیزیک دانشگاه قم، قم

پست الکترونیکی: a.abedini@qom.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۰۳)

### چکیده

نوسانات در ساختارهای مختلف جو خورشیدی، مثل نوسانات عرضی تابشی (کینکی) حلقه‌های تاج خورشیدی در لرزه‌شناسی خورشیدی استفاده می‌شوند. نوسانات تابشی حلقه‌های تاج خورشیدی عمدتاً با شراره همراه می‌شوند. علی‌رغم مطالعات گسترده نوسانات تابشی حلقه‌های تاج در سال‌های اخیر، برانگیختگی نوسانات تابشی حلقه‌ها توسط شراره‌ها یا پدیده‌های دیگر تا به حال به درستی معلوم نشده است. در این مقاله، هدف ما بررسی عوامل برانگیختگی نوسانات عرضی تابشی حلقه‌های تاج خورشیدی است. بدین منظور، ابتدا ۴۵۸ نوسان حلقه‌های تاج طی ۱۰ سال که در محدوده سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ با استفاده از ابزار ای-آی-ای ماهواره‌ی اس دی او، ابزارهای بصری همچون هیلوویور، جی هیلوویور و اچ ای کی شناسایی و ثبت شده بودند، فهرست شدند. سپس، همراهی این نوسانات با عوامل برانگیختگی احتمالی همچون شراره‌ها، پرتاب جرمی (پایین و بالای) تاجی بررسی شدند. در نهایت، با استفاده از ابزار بصری از بین ۴۵۸ حلقه نوسان کننده، ۱۳۸ مورد که نوسانات تابشی عرضی با دامنه نوسان بزرگ و دوره تناوب طولانی داشتند و قابل مشاهده با چشم بودند، برگزیده شدند. بررسی آماری ۱۳۸ حلقه نوسان کننده تابشی انتخابی نشان داد، ۱۲۰ مورد (حدود ۷۴ درصد) با فوران‌ها یا پس‌زنی‌های پایین تاجی، ۳۸ مورد (حدود ۲۷/۵ درصد) با پرتاب‌های جرمی بالای تاجی و ۶۵ مورد (حدود ۴۷ درصد) با شراره‌های خورشیدی همراه بودند. سرعت لازم برای رسیدن عوامل احتمالی تحریک کننده از پدیده‌ها به حلقه‌های نوسانی محاسبه شدند. مقادیر سرعت محاسبه شده برای امواج آلفن بیشتر از ۸۷ درصد مواقع کمتر از  $100 \pm 500$  کیلومتر بر ثانیه و برای پرتاب‌های جرمی پایین جرمی در ۹۴ درصد مواقع کمتر از  $125 \pm 500$  کیلومتر بر ثانیه به دست آمدند. اندازه این سرعت‌ها برای پرتاب‌های جرمی تاجی قابل قبول است. اما اندازه این سرعت‌ها خیلی کمتر از سرعت امواج آلفن ناشی از شراره‌ها است که بیشتر مواقع عامل اصلی برانگیختگی نوسانات عرضی تابشی حلقه‌های تاج فرض می‌شوند. همچنین، بررسی آماری اختلاف زمانی شروع عوامل تحریک کننده احتمالی نوسانات تابشی حلقه‌ها نشان داد، همبستگی مشخصی بین آنها وجود ندارد. به طور خلاصه، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد شراره‌ها نمی‌توانند علت اصلی برانگیختگی نوسانات عرضی تابشی حلقه‌ها باشند. احتمال برانگیختگی توسط عوامل دیگری همچون پرتاب جرمی بالا و پایین تاجی ناشی از شراره‌ها، دفع و جذب پلاسمای تاجی توسط حلقه‌ها بیشتر از امواج شوکی ناشی از شراره‌ها هستند.

**واژه‌های کلیدی:** تاج خورشید، نوسانات عرضی تابشی، عوامل برانگیختگی نوسانات عرضی تابشی حلقه‌های تاج

### ۱. مقدمه

مختلف تاج خورشید به خصوص حلقه‌های تاجی اطلاعات خوبی

از ساختار درون و جو خورشید ارائه می‌دهند. حلقه‌های تاجی به

مطالعه امواج مغناطوسهیدرودینامیکی و نوسانات در ساختارهای

برندند دوره تناوب حلقه‌ها به طول و اندازه دامنه نوسانات به اندازه جابه‌جایی اولیه حلقه وابسته هستند. همچنین آنها محدوده سرعت امواج کینکی در این حلقه‌ها را ۸۰۰ الی ۳۳۰۰ کیلومتر بر ثانیه تخمین زدند.

سرکر و همکاران در ۲۰۱۷ [۲۱] حلقه‌های تاج نواحی فعال برانگیخته شده توسط انرژی حاصل از عوامل تحریک‌کننده احتمالی نوسانات تابی همچون شراره‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با دنبال کردن خطوط میدان مغناطیسی دسته‌ای از حلقه‌ها برحسب زمان، خصوصیات مختلفی از نوسانات کینکی از جمله ویژگی‌های نوسانات هماهنگ پایه و بالاتر را تشریح کردند. مشخصات فیزیکی نوسانات تابی حلقه‌های تاج خورشیدی مثل دوره تناوب، زمان میرایی، دامنه نوسانات به عوامل مختلفی همچون طول حلقه، چگالی طولی، چگالی شعاعی، انحنای حلقه، لایه‌بندی گرانشی، میدان مغناطیسی، تغییرات سطح مقطع حلقه با زمان، آهنگ سرمایه‌ش و غیره وابسته هستند (برای مثال مراجعه شود به، پیفروخین ۲۰۱۴ [۲۲]، یوان و دورسیلاری ۲۰۱۶ [۲۳]، رودرمن و همکاران ۲۰۱۷ [۲۴]). دوره تناوب نوسانات تابی حلقه‌های تاج خورشیدی بسته به طول حلقه‌ها از چند ثانیه تا چند ده دقیقه و دامنه جابه‌جایی آنها از چند کیلومتر تا چند مگامتر است. (برای مثال مراجعه شود به دی مورتل و ناکاریاکوف ۲۰۱۲ [۲۵]، آنفینوگیتوف و همکاران ۲۰۱۳ [۸]، لو و آفمن ۲۰۱۴ [۲۶]، عابدینی ۲۰۱۸ [۹] و عابدینی ۱۳۹۶ [۲۷] و [۲۸]). مشاهدات نشان می‌دهند اکثر مواقع نوسانات تابی حلقه‌ها میرایی سریع (نسبت زمان میرایی به دوره نوسان کمتر از ۲) دارند. در مدل‌های نظری برای توجیه میرایی سریع نوسانات تابی عوامل متعددی همچون لایه‌بندی گرانشی، همگرا و واگرایی میدان مغناطیسی، انحنای حلقه‌های تاجی، تداخل فازی و جذب تشدید فرض شده و تأثیر این عوامل فرضی در میرایی نوسانات تابی به طور گسترده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند [۲۹-۳۲]. از میان ساز و کارهای اتلافی پیشنهادی، جذب تشدید و تداخل فازی مقبولیت بیشتری

خاطر شکل هندسی‌شان می‌توانند چهار نوع موج (نوسان) به نام‌های سوسیسی، تابی، طولی و آلفن پیچشی را منتشر کنند. با تجزیه و تحلیل این نوسانات می‌توان کمیت فیزیکی همچون چگالی، فشار، میدان مغناطیسی و ارتفاع مقیاس را تخمین و اطلاعات ارزشمندی از جو و درون خورشید به دست آورد (برای مثال مراجعه شود به ناکاریاکوف و آفمن ۲۰۰۱ [۱]، اندرس و همکاران ۲۰۰۵ [۲]، ویرچ و اردلی ۲۰۰۸ [۳]، ایستفانو و همکاران ۲۰۱۲ [۴]، گوسنس و همکاران ۲۰۱۳ [۵]، پاسکو و همکاران ۲۰۱۷ [۶]).

نوسانات عرضی تابی (کینکی<sup>۱</sup>) یکی از نوسانات معروفی است که از حرکت تناوبی محور تقارن حلقه‌های تاج خورشید حاصل می‌شوند. با پرتاب تلسکوپ‌های فضایی، نوسانات عرضی تابی (ایستاده و انتشاری) در ساختارهای مختلف تاج خورشیدی به‌خصوص در حلقه‌های تاج خورشیدی به کرات در طول موج‌های فرابنفش و حد بالای فرابنفش و همچنین اخیراً در ناحیه رادیویی مشاهده شده است [۷-۱۲].

عمده نوسانات تابی مشاهده شده حلقه‌ها مربوط به نوسان هماهنگ پایه است که بیشترین جابه‌جایی در رأس حلقه را دارند. اگرچه هماهنگ‌های بالاتر نوسانات تابی حلقه‌ها هم دیده شده‌اند ولی تعداد آنها در مقایسه با هماهنگ اول قابل چشم‌پوشی است (برای مثال مراجعه شود به ناکاریاکوف و همکاران در ۲۰۰۹ [۱۳]، خدوچینکو و همکاران ۲۰۱۱ [۱۴]). برای مثال، ناکاریاکوف و همکاران در ۱۹۹۹ [۱۵]، اشواندن و همکاران در ۱۹۹۹ [۱۶] و ویروخت و همکاران در ۲۰۰۴ [۱۷] با استفاده از تلسکوپ فضایی تریس<sup>۲</sup> امواج ایستاده کینکی را در حلقه‌های تاجی نواحی فعال شناسایی کردند. تومچیک و همکاران در ۲۰۰۷ [۱۸] تومچیک و مک انتوش در ۲۰۰۹ [۱۹] با استفاده از ابزار کی او ام پی<sup>۳</sup> برای نخستین بار امواج کینکی انتشاری را در حلقه‌های تاج مشاهده کردند. گودارد و همکاران در ۲۰۱۶ [۲۰] پارامترهای فیزیکی ۱۲۰ نوسان تابی حلقه‌های تاجی انفرادی را با استفاده از ابزار ای-آی-ای<sup>۴</sup> ماهواره اس دی او<sup>۵</sup>، اندازه‌گیری کردند. آنها پی

۱. Kink

۲. TRACE (Transition Region And Coronal Explorer)

۳. CoMP (Coronal Multi-channel Polari meter)

۴. AIA (Atmospheric Imaging Assembly)

۵. SDO (Solar Dynamics Observatory)

و همکاران ۲۰۱۰ [۴۵].

افرادی همچون خداچنکو و همکاران ۲۰۱۱ [۱۴] بر این باورند که نیروی حاصل از جریان الکتریکی در امتداد حلقه‌ها باعث اندرکنش و موجب نوسان تابیی آنها می‌شود. عده‌ای دیگری مثل ترایدس و همکاران در ۲۰۰۵ [۴۶] معتقدند امواج جایگزیده گسیل شده به سمت حلقه عامل تحریک نوسانات تابیی و پدیده ویک<sup>۱</sup> ناشی از آنها باعث میرایی قوی نوسانات کینکی می‌شوند.

امروزه، علی‌رغم مطالعات نسبتاً زیاد درباره‌ی عوامل تحریک‌کننده نوسانات تابیی، شواهدی نشان می‌دهند تا به امروز عوامل برانگیختگی نوسانات عرضی به طور دقیق مشخص نشده‌اند و نظرات متفاوتی در این زمینه وجود دارند [۴۷-۵۰]. اخیراً، زیموورتس و ناکاریاکف در ۲۰۱۵ [۵۰] تأثیر احتمال برانگیختگی نوسانات تاجی توسط شراره‌ها، پرتاب‌های جرمی پایین تاجی<sup>۲</sup> (ارتفاع پرتابه جرمی کمتر از ۰/۶ شعاع خورشید)، پرتابه‌های جرمی بالای تاجی<sup>۳</sup> (پرتابه‌های جرمی که سطح خورشید را ترک می‌کنند) و امواج رادیویی نوع دو را به طور آماری بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند احتمال برانگیختگی نوسانات تابیی ناشی از انحراف حلقه‌ها از وضعیت تعادلی به سبب دریافت یا پس‌زنی پلاسمای ناشی از پرتابه‌های جرمی پایین تاجی به مراتب بیشتر از امواج شوکی ناشی از شراره‌هاست.

هدف این مقاله، مطالعه‌ی دقیق از ارتباط بین نوسانات تابیی و فرایندهای دینامیکی مشاهده شده در تاج است که احتمالاً موجب برانگیختگی نوسانات عرضی تابیی حلقه‌های تاج خورشیدی می‌شوند. بدین منظور، ۴۵۸ نوسان حلقه‌های تاج طی ۱۰ سال در محدوده‌ی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ با استفاده از ابزار ای-ای-ای-ماهوره‌اس دی او، ابزارهای بصری همچون هیلوویور<sup>۴</sup>، جی هیلوویور<sup>۵</sup> و اچ ای کی<sup>۶</sup> شناسایی و ثبت شدند. از بین این تعداد حلقه نوسانی حدود ۱۳۸ حلقه نوسانی تابیی عرضی با دامنه بلند،

داشته و به خوبی میرایی این نوسانات تابیی را توجیه کرده‌اند (برای مثال مراجعه شود به اشواندن و همکاران ۲۰۰۳ [۳۳]، صفری و همکاران در ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ [۳۰ و ۳۴]، ویرچ و هکارانش در ۲۰۱۰ [۳۵]، ابراهیمی و کرمی در ۲۰۱۶ [۳۱] و پاسکو و همکاران ۲۰۱۹ [۳۶]). درباره‌ی عامل یا عوامل برانگیختگی نوسانات تابیی عرضی حلقه‌ها که موضوع اصلی این مقاله است، نظرات متفاوتی داده شده که در ادامه به بعضی از آنها اشاره می‌شود.

نوسانات تابیی حلقه‌های تاجی در اغلب موارد در کنار شراره‌های خورشیدی مشاهده شده‌اند (برای مثال مراجعه شود به اشواندن و همکاران ۱۹۹۹ و ۲۰۱۱ [۱۶ و ۳۶]، ناکاریاکوف و همکاران ۱۹۹۹ [۱۵]، خدوچینکو و همکاران ۲۰۱۱ [۱۴]، عابدینی ۲۰۱۸ [۹]، اشواندن و شرویر ۲۰۱۱ [۳۷]، ویرویچ و همکاران ۲۰۱۳ [۳۸]، آفینوگیتوف و همکاران ۲۰۱۵ [۳۹] و پاسکو و همکاران ۲۰۱۶ [۴۰]).

به خاطر همراهی نوسانات تابیی با شراره‌ها، افرادی عامل برانگیختگی این نوسانات را انرژی امواج شوکی جاگزیده حاصل از شراره‌ها می‌دانند که با رسیدن به حلقه‌ها باعث برانگیختگی و نوسان تابیی آنها می‌شوند (برای مثال مراجعه شود به اشواندن و همکاران ۱۹۹۹ [۱۵]، ناکاریاکوف و همکاران ۱۹۹۹ [۱۵]، شریجر و همکاران ۲۰۰۲ [۴۱]، هدسن و ورموچ ۲۰۰۴ [۴۲] و توتووا و همکاران ۲۰۱۱ [۴۳]).

به دلیل لرزش پایه حلقه‌ها در فتوسفر خورشید، عده‌ای از محققین بر این باورند لرزش در فتوسفر به عبارتی در پایه‌های حلقه‌ها در نهایت موجب برانگیختگی و نوسان تابیی حلقه‌ها می‌شوند (برای مثال مراجعه شود به شریجر و بورن ۲۰۰۰ [۴۴]، شریجر و همکاران ۲۰۰۲ [۴۱] و وایت و همکاران ۲۰۱۳ [۳۸]).

افرادی نوسانات تابیی را ناشی از نیروی تناوبی حاصل از جدایی گردابه‌ها می‌دانند که در اثر قرار گرفتن پایه‌های حلقه در مسیر جریان پلاسمای ایجاد می‌شوند. اگر بسامد جدایی گردابه‌ها با بسامدهای طبیعی حلقه‌ها برابر باشد موجب تشدید و در نهایت باعث برانگیختگی نوسانات تابیی می‌شوند (برای مثال مراجعه شود به ناکاریاکف و همکاران ۲۰۰۹ [۱۳] و گراسزکی

۱. Wake

۲. LCE (Lower Coronal Eruptions/Ejections)

۳. CME (Coronal Mass Ejection)

۴. Helioviewer

۵. JHelioviewer

۶. HEK (Heliophysics Events Knowledgebase)

فضایی این تلسکوپ باشند. نوسانات عرضی با دامنه کمتر از این مقدار قابل شناسایی با این تلسکوپ نبوده و در این مجموعه آماری حضور ندارند. ابتدا در این محدوده زمانی ۴۵۸ نوسان تابی شناسایی و یادداشت شدند. سپس عوامل راه انداز احتمالی نوسانات تابی در این بازه زمانی مورد جستجو قرار گرفته و ثبت شدند. در مرحله بعدی نوسانات تابی ثبت شدند که حداقل یکی از این عوامل احتمالی راه انداز این نوسانات حضور داشته باشد. در مرحله نهایی با استفاده از ابزار بصری ذکر شده و همچنین بررسی چشمی از بین ۴۵۸ نوسان تابی ۱۳۸ نوسان تابی عرضی با دامنه بزرگ، دوره تناوب بلند، قابل تشخیص با چشم، دارای موقعیت مکانی و زمان شروع مناسب نسبت به عوامل راه‌انداز احتمالی گزینش شدند. بررسی‌های این نوسانات تابی عرضی نشان دادند، از بین ۱۳۸ نوسان ۱۰۲ نوسان حداقل یک فوران پایین تاجی اطراف خود دارند. همچنین از بین ۱۳۸ نوسان تعداد ۶۵ نوسان در اطراف خود حداقل یک شراره خورشیدی داشتند. در نتیجه داده‌های ما فقط به ۱۳۸ نوسان تابی که در اطراف خود شراره یا فوران پایین تاجی یا هر دوی آنها را داشتند محدود شدند. در بخش بعدی چگونگی روش تجزیه و تحلیل این داده‌های انتخابی توضیح داده شده است.

### ۳. محاسبه سرعت انتقال عوامل راه‌انداز احتمالی

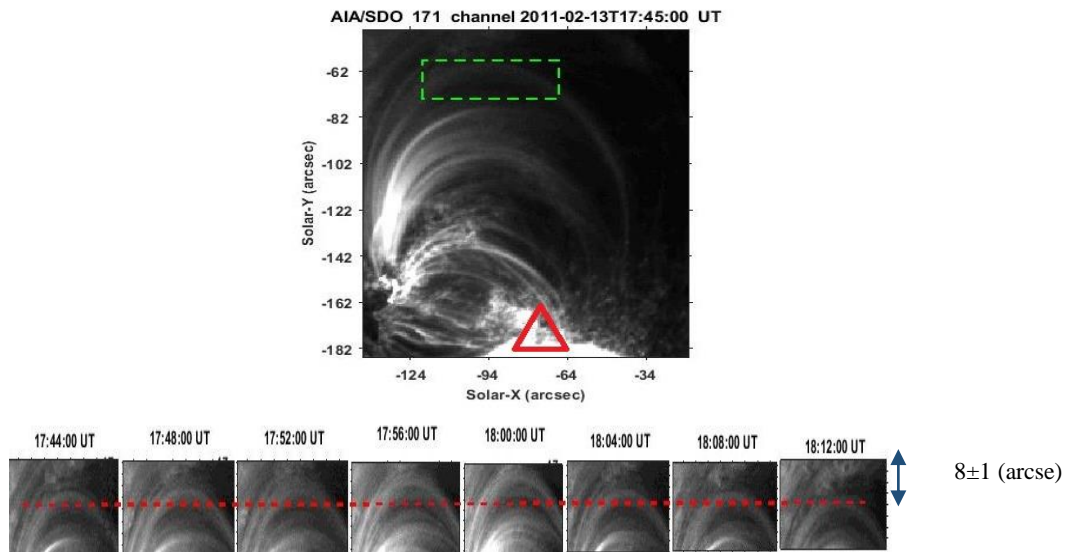
#### نوسانات تابی حلقه‌های تاج خورشیدی

همان‌طوری که در بخش قبلی ذکر شد ۱۳۸ نوسان تابی حلقه‌های تاجی با دامنه بزرگ، دوره تناوب طولانی، قابل شناسایی با چشم و حداقل همراه با یک عامل راه انداز احتمالی همچون شراره، پرتاب‌های جرمی پایین و بالا تاجی انتخاب شدند. برای مثال، شکل ۱ یک حلقه نوسانی را در کنار یک شراره (مثلاً قرمز رنگ) نشان می‌دهد که توسط ابزار ای آی تلسکوپ فضایی اس دی او در طول موج ۱۷۱ آنگستروم در تاریخ ۱۳-۲-۲۰۱۱ ساعت ۱۷ و ۴۵ دقیقه به وقت جهانی گرفته شده است. در قسمت بالا، بخشی از حلقه شامل رأس (مستطیل سبز رنگ) که حرکت تابی دارد، مشخص شده است. در ردیف پایین تصاویر متوالی از بخش انتخاب شده به وضوح نشان می‌دهد حلقه نوسان عرضی

دوره تناوب طولانی، قابل مشاهده با چشم، مناسب از نظر موقعیت مکانی و زمانی نسبت به عوامل احتمالی تحریک کننده نوسانات تابی همچون شراره‌ها، پرتاب جرمی (پایین و بالای) تاجی انتخاب و به طور آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد سرعت محاسبه شده برای تحریک‌کننده‌های احتمالی نوسانات عرضی در بیشتر از ۸۷ درصد مواقع کمتر از  $100 \pm 50$  کیلومتر بر ثانیه هستند. با توجه به شرایط فیزیکی تاج، سرعت امواج آلفن در تاج باید عمدتاً حدود چند هزار کیلومتر بر ثانیه یا بیشتر باشند. این سرعت‌های پایین نمی‌توانند سرعت امواج شوکی ناشی از شراره‌ها باشند که بیشتر مواقع عامل برانگیختگی نوسانات تابی حلقه‌های تاج فرض می‌شوند. در نتیجه، در این مقاله، احتمال برانگیختگی نوسانات تابی حلقه‌ها توسط عوامل احتمالی دیگر همچون پرتاب‌های جرمی پایین و بالای تاجی، تزریق و پس زنی جرم پلاسما حلقه‌های تاجی و برخورد ناشی از حلقه‌های مجاور مطالعه می‌شوند. این مقاله به صورت زیر مرتب شده است. در بخش ۲ نحوه انتخاب داده‌های مشاهداتی ارائه شده است. در بخش ۳ روش انتخاب حلقه‌های مناسب و نحوه تخمین سرعت انتشار عوامل برانگیختگی احتمالی شرح داده شده است. در بخش ۴ نتایج حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

### ۲. نحوه انتخاب داده‌های مشاهداتی

همان‌طوری که در مقدمه اشاره شد هدف اصلی این مطالعه، بررسی عوامل احتمالی راه انداز نوسانات عرضی تابی حلقه‌های تاج خورشیدی است. بدین منظور، با استفاده از تصاویر حاصل از ابزار ای آی ای نصب شده روی تلسکوپ فضایی اس دی او طی ۱۰ سال در محدوده سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ و با کمک گرفتن از ابزارهای بصری همچون هیلوویور، جی هیلوویور و اچ ای کی نوسانات ثبت شده تابی حلقه‌های خورشیدی یادداشت شدند. از آنجایی که تفکیک زمانی و فضایی ابزار ای آی ای ماهواره اس دی او به ترتیب ۱۲ ثانیه و حدود ۰/۶ ثانیه قوسی معادل ۴۳۵ کیلومتر در سطح خورشید است، در نتیجه، دوره تناوب و دامنه نوسان حلقه‌های مشاهده شده باید چند برابر بزرگ‌تر از تفکیک زمانی و



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قسمت بالا، تصویر یک حلقه نوسانی در کنار یک شراره (مثلث قرمز رنگ) را نشان می‌دهد که توسط ابزار ای آی آی تلسکوپ فضایی اس دی او در طول موج ۱۷۱ آنگستروم در تاریخ ۱۳-۲-۲۰۱۱ ساعت ۱۷ و ۴۵ دقیقه به وقت جهانی گرفته شده است. بخشی از این حلقه شامل رأس (مستطیل سبز رنگ) مشخص شده است. در قسمت پایین، تصاویر متوالی با فاصله زمانی حدود ۴ دقیقه از بخش انتخاب شده کنار هم قرار داده شده‌اند. این تصاویر متوالی به وضوح نشان می‌دهند حلقه نوسان عرضی دارد که دامنه نوسان تصویر شده آن در سطح خورشید حدود  $5 \pm 0.5$  ثانیه قوسی ( $5/8 \pm 0.72$  مگامتر) و دوره تناوب آن حدود  $28 \pm 4$  دقیقه است.

در رابطه (۱)  $(x^{ose}, y^{ose})$ ،  $(x^{flare}, y^{flare})$ ،  $\Delta t^{flare}$  و  $V^{flare}$  به ترتیب مختصات مکانی رأس حلقه نوسانی، مختصات مکانی مرکز شراره، اختلاف زمان شروع نوسان حلقه با زمان شروع شراره و سرعت انتشار موج فرضی حاصل از شراره است که باعث برانگیختگی نوسان حلقه شده است. سرعت‌های محاسبه شده (با حداکثر خطای نسبی ۲۰ درصد) برای شراره‌ها در ستون ۸ جدول نشان داده شده‌اند.

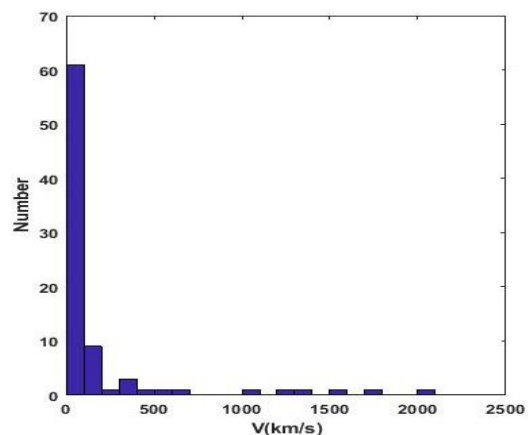
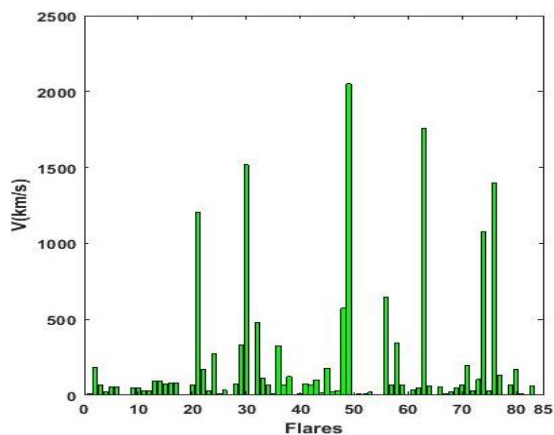
در شکل ۲ (سمت چپ) سرعت انتشاری مورد نیاز برای رسیدن عامل برانگیختگی فرضی نوسانات تابی حلقه‌ها (امواج آلفن حاصل از شراره‌ها) نشان داده شده‌اند. در سمت راست نمودار تعداد (فراوانی) سرعت‌های حاصل از شراره‌های خورشیدی رسم شده‌اند. از نمودار سمت راست معلوم می‌شود از اندازه سرعت‌های حاصل از ۸۵ شراره در ۷۴ مورد (۸۷ درصد) کمتر از  $100 \pm 50$  کیلومتر بر ثانیه هستند. همان‌طوری که ذکر شد با توجه به شرایط فیزیکی تاج، سرعت انتشاری امواج آلفن حاصل باید در حدود چند هزار کیلومتر بر ثانیه باشد. این نتایج نشان می‌دهد فرض کردن امواج آلفن ناشی از شراره‌ها به عنوان عامل

داشته که دامنه نوسان تصویر شده آن حدود  $8 \pm 1$  ثانیه قوسی ( $5/8 \pm 0.72$  مگامتر) است و دوره تناوب حدود  $28 \pm 4$  دقیقه دارد. با استفاده از ابزار بصری جی هیلویور و سایت اچ ای کی که اطلاعات زمانی و مکانی پدیده‌های خورشیدی در آنها ثبت شده است. مختصات مکانی، مختصات زمانی، زمان شروع و پایان حلقه‌های نوسانی، پدیده تحریک‌کننده ثبت و شماره گذاری و در جداولی ثبت شدند. برای نمونه در جدول ۱ ستون‌های ۱ و ۲ به ترتیب شماره و تاریخ و ستون شماره ۳ زمان شروع هر نوسان را نمایش می‌دهند. ستون ۴ مختصات مکانی رأس حلقه‌های نوسان‌کننده را نشان می‌دهد. ستون‌های ۵ و ۶ زمان شروع مختصات مرکز شراره و ستون ۷ از جدول اختلاف زمانی شروع نوسانات عرضی حلقه و شروع شراره‌های خورشیدی را نشان می‌دهند. با فرض این که نوسانات تابی حلقه‌ها ناشی از امواج شوکی حاصل از شراره‌های خورشیدی باشند، سرعت‌های لازم برای رسیدن این امواج از شراره‌ها را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$V^{flare} = \frac{\sqrt{(x^{ose} - x^{flare})^2 + (y^{ose} - y^{flare})^2}}{\Delta t^{flare}}, \quad (1)$$

جدول ۱. نمونه جدول که مشخصات حلقه‌های تاجی و عوامل تحریک کننده فرضی نوسانات تابی حلقه‌های تاجی در آن ثبت شده‌اند.

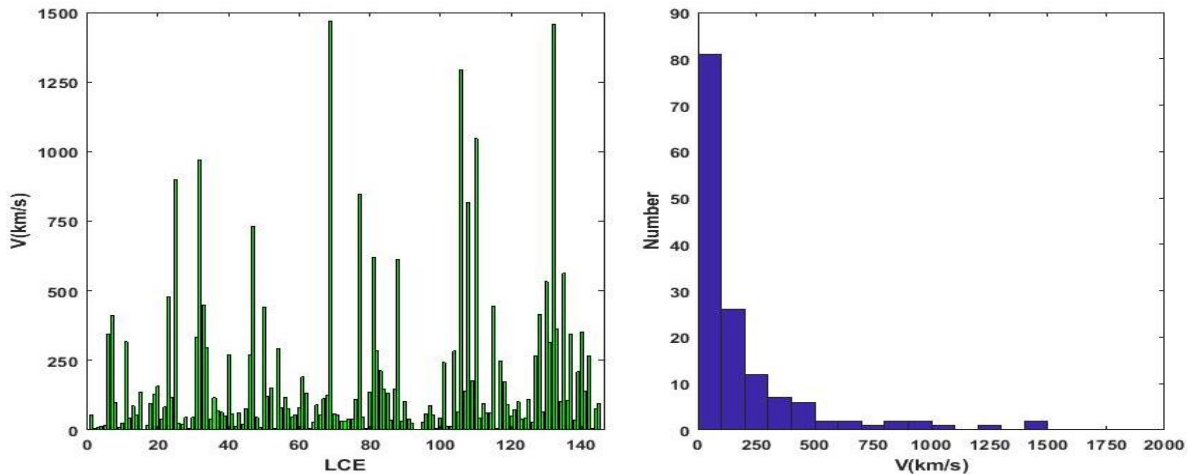
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
N	Date Y:M:D	$t_0^{osc}$	$(x^{osc}, y^{osc})$ arcsec	$t_0^{flare}$	$(x^f, y^f)$ Arcsec	$\Delta t_{flare}^{(s)}$	$v_{flare}$ km/s	$t_0^{LCE}$	$(x^{LCE}, y^{LCE})$ arcsec	$\Delta t_{LCE}^{(s)}$	$v_{LCE}$ km/s	$t_0^{CME}$
۱	۲۰۱۱/۰۷/۱۳	۱۷:۲۸:۰۱	(-۶۳: -۳۲۹)	۱۷:۰۵:۰۱	(-۳۸,۴: -۱۹۲)	۱۲±۱۳۸۰	۱۶±۸۰	۱۷:۳۳:۱۶	(-۶۱,۲: -۳۳۷,۲)	۱۲±۳۱۵	۱۸±۴,۵	-----
۲	۲۰۱۱/۰۲/۱۳	۱۹:۰۲:۵۹	(-۲۰۵,۱: -۳۰)	۱۷:۳۰:۵۶	(-۱۱۵,۲: -۱۹۲)	۱۲±۵۴۰,۳	۲۸±۵,۴	۱۷:۳۴:۰۱	(-۸۶,۸: ۵۴,۱)	۵۳۷۵	۱۹±۴,۹۵	۱۸:۳۶:۰۵
۳	۲۰۱۵/۰۷/۰۵	۲۰:۳۲:۰۱	(-۵۳۷,۹: ۲۹۷,۳)	۲۰:۳۰:۴۸	(-۵۷۶,۱۹۲)	۱۲±۷۳	۲۲۲±۱۱۰	۲۰:۲۵:۳۰	(-۶۱۸: ۱۷۱)	۱۲±۳۹۱	۵۴±۲,۷۰	-----



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) در سمت چپ سرعت انتشاری لازم (با حداکثر خطای نسبی ۲۰ درصد) برای رسیدن عامل برانگیختگی فرضی (امواج آلفن) نوسانات تابی حلقه‌ها ناشی از شراره‌ها نشان داده شده‌اند. در سمت راست نمودار، تعداد (فراوانی) سرعت‌های محاسبه شده از شراره‌ها رسم شده‌اند. از نمودار سمت راست معلوم می‌شود اندازه سرعت‌های محاسبه شده از حدود ۸۵ شراره در ۷۴ مورد (۸۷ درصد) کمتر از  $500 \pm 100$  کیلومتر بر ثانیه هستند.

فوران‌های پایین تاج به ترتیب در ستون‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ جدول ثبت شده‌اند. برای ۱۲۰ نوسان تابی همراه با پرتابه‌های جرمی پایین تاجی (پرتابه‌های جرمی که مجدداً به سطح خورشید بر

اصلی محرک نوسانات تابی حلقه ممکن است درست نباشند. مشابه شراره‌ها، برای فوران‌های پایین تاجی زمان شروع، مختصات مکانی، اختلاف زمانی شروع نوسانات عرضی تابی و



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) در سمت چپ سرعت انتشاری لازم برای عامل برانگیختگی فرضی نوسانات تابی حلقه‌ها ناشی از پرتابه‌های جرمی پایین (با حداکثر خطای نسبی ۲۵ درصد) تاجی نشان داده شده‌اند. در سمت راست نمودار تعداد (فراوانی) سرعت پرتابه‌های جرمی پایین تاجی برحسب سرعت‌های محاسبه شده رسم شده‌اند. از نمودار سمت راست معلوم می‌شود از حدود ۱۴۸ مورد فوران پایین جرمی سرعت انتشار حاصل از ۱۴۰ پرتابه (۹۴ درصد) کمتر از  $500 \pm 125$  کیلومتر بر ثانیه هستند.

نوسانات تابی مورد نظر، انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفتند. در شکل ۳ در سمت چپ سرعت انتشاری لازم حاصل از پرتابه‌های جرمی پایین احتمالی که باعث برانگیختگی نوسانات تابی حلقه‌ها می‌شوند نشان داده شده‌اند. در سمت راست نمودار تعداد (فراوانی) پرتابه‌های پایین جرمی احتمالی برحسب سرعت‌های محاسبه شده رسم شده‌اند. نمودار سمت راست نشان می‌دهد از حدود ۱۴۸ مورد فوران پایین جرمی در اطراف ۱۳۸ مورد نوسان تابی حلقه‌های تاج خورشید، سرعت انتشار حاصل از ۱۴۰ پرتابه جرمی (۹۴ درصد) کمتر از  $500 \pm 125$  کیلومتر بر ثانیه هستند. این محدوده سرعت برای پرتابه‌های جرمی پایین تاجی با توجه جرم و شرایط مختلفی که در آن قرار می‌گیرند قابل پذیرش است. پس احتمال برانگیختگی نوسانات تاب حلقه‌ها با این پرتاب‌ها به مراتب بیشتر از امواج شوکی حاصل از شراره‌هاست. در شکل ۴ در سمت چپ سرعت انتشاری حاصل از پرتابه‌های جرمی بالای تاجی که ممکن است باعث برانگیختگی نوسانات تابی حلقه‌ها شوند نشان داده شده‌اند. در سمت راست نمودار تعداد (فراوانی) پرتابه‌های جرمی بالای تاجی برحسب سرعت‌های ثبت شده رسم شده‌اند. همان‌طوری که از شکل دیده می‌شود در بیشتر از ۹۰ درصد مواقع سرعت‌ها زیر ۷۰۰ کیلومتر بر ثانیه هستند.

می‌گردند) و پرتابه‌های جرمی بالای تاجی (پرتابه‌های جرمی که سطح خورشید را ترک می‌کنند) سرعت‌های انتشار لازم برای رسیدن جرم پرتابی به حلقه از رابطه زیر محاسبه شدند:

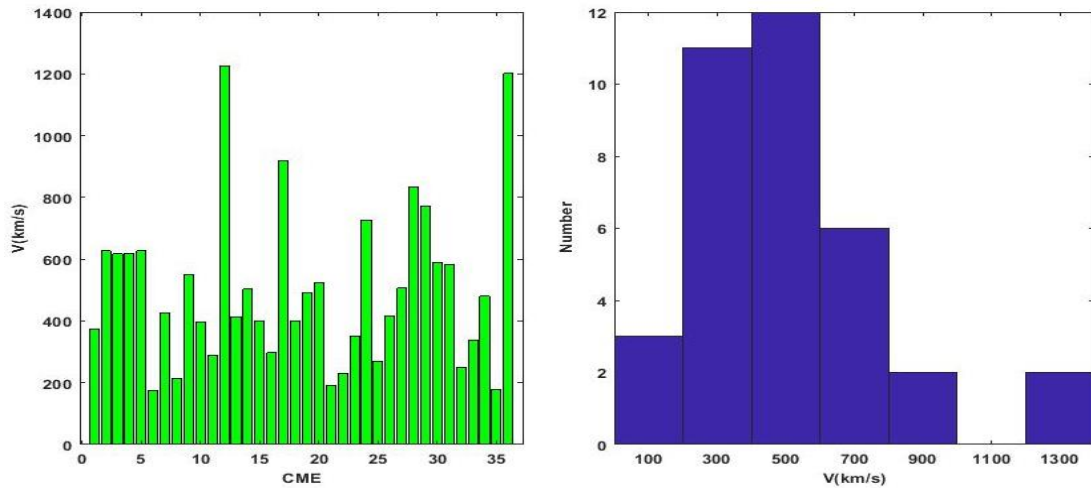
$$V^{LCE,CME} = \frac{\sqrt{(x^{ose} - x^{LCE,CME})^2 + (y^{ose} - y^{LCE,CME})^2}}{\Delta t^{LCE,CME}}, \quad (2)$$

در رابطه بالا  $(x^{ose}, y^{ose})$ ،  $(x^{LCE,CME}, y^{LCE,CME})$  و  $\Delta t^{LCE,CME}$  به ترتیب مختصات مکانی رأس حلقه نوسانی، مختصات مکانی مرکز فوران جرمی پایین تاجی، اختلاف زمان شروع نوسان حلقه با زمان شروع و سرعت انتشار عامل برانگیختگی فرضی اند که باعث نوسان حلقه شده است. سرعت‌های محاسبه شده برای پرتابه‌های جرمی پایین تاجی (با حداکثر خطای نسبی ۲۵ درصد) در ستون ۱۲ جدول نشان داده شده‌اند. با توجه به گسترده بودن پرتابه‌های جرمی بالای تاجی و ثبت نشدن موقعیت مکانی آنها، محاسبه سرعت مواد پرتابی از این پرتابه‌های جرمی مقدور نشد.

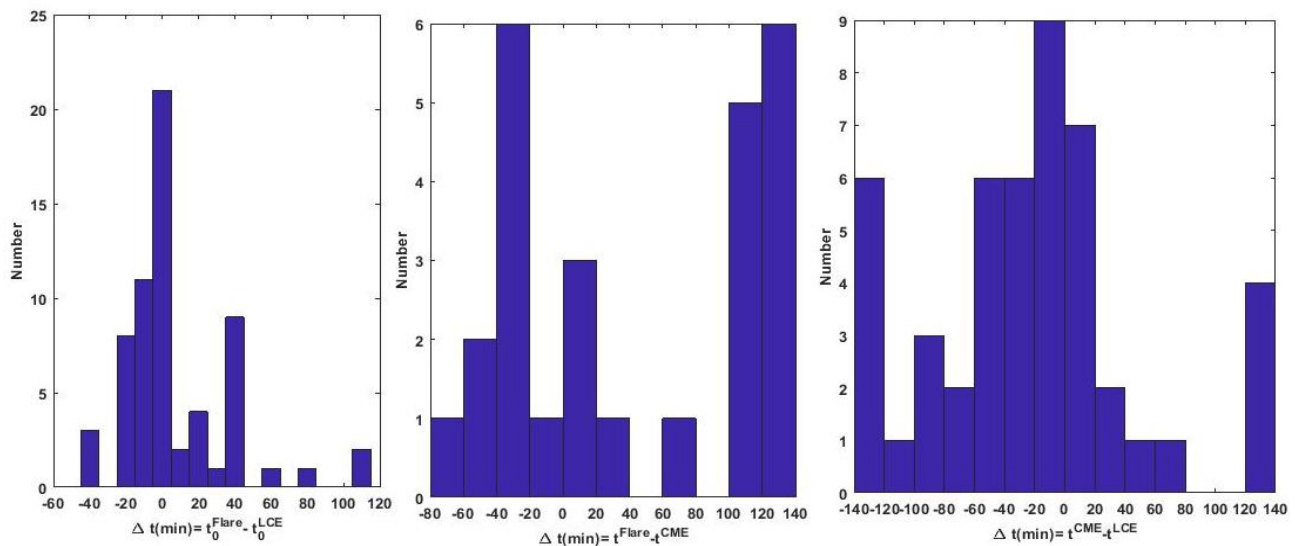
با استفاده از کاتالوگ سرعت پرتابه‌های جرمی بالای تاجی که توسط ابزار لاسکو<sup>۱</sup> روی تلسکوپ فضایی سوهور<sup>۲</sup> مشاهده شده، سرعت پرتابه‌های جرمی بالای تاجی مناسب و همراه با

۱. LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph)

۲. SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) در سمت چپ سرعت انتشاری حاصل از پرتابه‌های جرمی بالای تاجی که باعث برانگیختگی نوسانات تابی حلقه‌ها می‌شوند نشان داده شده‌است. در سمت راست نمودار تعداد (فراوانی) پرتابه‌های جرمی بالای تاجی برحسب سرعت‌های ثبت شده رسم شده‌است. همان‌طوری که از شکل دیده می‌شود در بیشتر از ۹۰ درصد مواقع سرعت‌ها کمتر از ۷۰۰ کیلومتر بر ثانیه هستند.



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار تعداد (فراوانی) برحسب اختلاف زمانی (برحسب دقیقه) بین زمان شروع شراره‌ها و فوران‌های جرمی پایین (سمت چپ)، زمان شروع شراره‌ها و فوران‌های جرمی بالای تاجی (وسط) و فوران‌های جرمی بالای و فوران‌های جرمی پایین تاجی (سمت راست) به ترتیب نشان داده شده‌اند.

جرمی پایین تاجی (سمت راست) رسم شده‌اند. نمودارهای سمت چپ نشان می‌دهد حدود ۶۰ درصد موارد شراره‌ها جلوتر از فوران‌های پایین تاجی و نمودار وسط شکل نشان می‌دهد حدود ۴۰ درصد مواقع شراره‌ها جلوتر از پرتابه‌های جرمی شراره‌ای بالای تاجی رخ داده‌اند. نمودارهای بخش سمت راست نشان می‌دهد در

برای پی بردن به همبستگی عوامل احتمالی تحریک‌کننده نوسانات عرضی، در شکل ۵ تعداد (فراوانی) برحسب اختلاف زمانی (برحسب دقیقه) بین زمان شروع شراره‌ها و فوران‌های جرمی پایین تاجی (سمت چپ)، زمان شروع شراره‌ها و فوران‌های جرمی بالای تاجی (وسط) و زمان شروع فوران‌های جرمی بالای و فوران‌های



- از ۱۰۲ مورد از ۱۳۸ نوسان عرضی تابیی (۷۳/۹۱ درصد) مورد مطالعه همراه حداقل با یک فوران جرمی پایین تاجی بودند. سرعت انتشار حاصل از ۱۴۰ فوران جرمی پایین تاجی (۹۴ درصد) سرعتی کمتر از  $500 \pm 125$  کیلومتر بر ثانیه داشتند (شکل ۳).
- تعداد ۳۸ نوسان عرضی تابیی از مجموع ۱۳۸ نوسان تابیی ثبت شده حلقه‌های تاجی (۲۷/۵۳ درصد) همراه با فوران جرمی بالای تاج بودند. در بیشتر از ۹۰ درصد مواقع سرعت‌های انتشاری ناشی از این فوران‌ها کمتر از ۷۰۰ کیلومتر بر ثانیه بودند (شکل ۴).
- نمودارهای فراوانی اختلاف زمان شروع عوامل راه‌انداز احتمالی نوسانات عرضی تابیی حلقه‌های تاج خورشیدی (شراره‌ها، فوران‌های جرمی پایین تاجی و فوران‌های جرمی پایین و بالای تاجی) نشان می‌دهند همبستگی مشخصی بین این عوامل فرضی وجود ندارد. به عبارتی با توجه به تقدم و تأخر زمان شروع عوامل تحریک‌کننده فرضی نوسانات تابیی در حالت کلی نمی‌توان نتیجه گرفت که این عوامل تحریک احتمالی نوسانات تابیی تحت تأثیر هم ایجاد می‌شوند (شکل ۵).
- نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج کارهای قبلی همچون مطالعات آماری عوامل تحریک‌کننده فرضی نوسانات تابیی در یک دوره ۴ ساله (۲۰۱۴-۲۰۱۰) زیموورتس و ناکاریاکف تطابق خوبی دارند [۵۰].
- به طور کلی، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری سرعت‌های مورد نیاز محاسبه شده، برای رسیدن عوامل تحریک‌کننده فرضی نوسانات تابیی از مبدأ به حلقه‌های تاج نشان می‌دهند، محتمل‌ترین عامل برانگیختگی نوسانات تابیی عرضی حلقه‌های تاج، امواج شوکی ناشی از شراره‌های خورشیدی نیستند. احتمال برانگیختگی این نوسانات توسط فوران‌های جرمی پایین و بالای تاجی یا اثرات جانبی آنها بیشتر از امواج حاصل از شراره‌های خورشیدی هستند. البته دیگر عوامل راه‌انداز احتمالی باید به دقت مطالعه شوند.

۵۸ درصد مواقع پرتاب‌های جرمی شراره‌ای بزرگ بالای تاجی زودتر از فوران یا حرکت پایین جرمی رخ می‌دهند. از مثبت و منفی شدن اختلاف زمانی شروع بین این عوامل احتمالی راه‌انداز نوسانات عرضی تابیی حلقه‌ها معلوم می‌شود همبستگی مشخصی بین این عوامل وجود ندارد. به عبارتی نمی‌توان نتیجه گرفت که این راه‌انداز احتمالی تحت تأثیر هم ایجاد شده‌اند.

#### ۴. خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مطالعه آماری برای درک ارتباط بین نوسانات عرضی تابیی و فریند های دینامیکی در تاج که موجب برانگیختگی احتمالی نوسانات عرضی تابیی حلقه‌های تاج خورشیدی می‌شوند انجام شد. بدین منظور، ۴۵۸ نوسان عرضی تابیی حلقه‌های تاج طی ۱۰ سال در محدوده سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ با استفاده از ابزار ای-آی-ای ماهواره‌ی اس دی او، ابزارهای بصری همچون هیلوویور، جی هیلوویور و اچ ای کی شناسایی و ثبت شدند. از بین ۴۵۸ نوسان حدود ۱۳۸ حلقه نوسانی دارای دامنه نوسان بالا، دوره تناوب طولانی، قابل مشاهده با چشم، مناسب از نظر موقعیت مکانی و زمانی نسبت به عوامل تحریک‌کننده احتمالی، همچنین همراه با عوامل احتمالی تحریک‌کننده نوسانات تابیی همچون شراره‌ها، فوران‌های جرمی (پایین و بالای) تاجی انتخاب و به طور آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد:

- از بین ۱۳۸ حلقه نوسانی تابیی عرضی قابل مشاهده مطالعه شده، تعداد ۶۵ نوسان تابیی (۴۷/۱۰ درصد) همراه با شراره‌های خورشیدی بودند (شکل ۲). سرعت عامل تحریک‌کننده فرضی حاصل از شراره‌ها در ۸۷ درصد موارد کمتر از  $500 \pm 100$  کیلومتر بر ثانیه به دست آمد. اندازه این سرعت‌ها خیلی کمتر از سرعت امواج آلفن ناشی از شراره‌هاست. اغلب عامل اصلی برانگیختگی نوسانات تابیی حلقه‌های تاج فرض می‌شوند.

#### مراجع

1. V M Nakariakov and L Ofman, *Astron. Astrophys* **372** (2001) L53.
2. J Andries, I Arregui and M Goossens, *Astrophysical*
3. G Verth and R Erdélyi, *Astron. Astrophys* **486** (2008) 1015.
- Journal **624** (2005) L57.

29. M J Aschwanden, R W Nightingale, J Andries, M Goossens and T Van Doorselaere, *Astrophysical Journal* **598** (2003) 1375.
30. H Safari, S Nasiri, and Y Sobouti, *Astron. Astrophys* **470** (2007) 1111.
31. Z Ebrahimi and K Karami, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **462** (2016) 1002E.
32. N Dadashi, H Safari, and S Nasiri, *Iranian Journal of Physics Research* **9**,3 (2009) 227.
33. M J Aschwanden, R Nightingale, J Andries, M Goossens and T Van Doorselaere, *Astrophysical Journal* **598** (2003) 1375.
34. H Safari, S Nasiri, and Y Sobouti, *Astron. Astrophys* **375** (2006) 387.
35. G Verth, J Terradas and M Goossens, *Astrophysical Journal* **718** (2010) L102.
36. D J Pascoe, A W Hood and T V Doorselaere, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **6** (2019) 14.
37. M J Aschwanden, and J Schrijver, *Astrophysical Journal* **736** (2011) 102.
38. R S White, E Verwichte and C Foullon, *Astrophysical Journal* **774** (2013) 104.
39. S A Anfinogentov, V M Nakariakov and G Nisticò, *Astron. Astrophys* **583** (2015) A136.
40. D J Pascoe, C R Goddard, G Nisticò, S Anfinogentov and V M Nakariakov, *Astron. Astrophys* **558** (2016) L6.
41. C J Schrijver, M J Aschwanden and A M Title, *Solar Physics* **206** (2002) 69.
42. H S Hudson and A Warmuth, *Astrophysical Journal* **614** (2004) L85.
43. D Tothova, D E Innes and G Stenborg, *Astron. Astrophys* **528** (2011) L12.
44. C J Schrijver and D S Brown, *Astrophysical Journal* **537** (2000) L69.
45. M Gruszecki, V M Nakariakov, T van Doorselaere and T D Arber, *Phys. Rev. Lett* **105** (2010) 055004.
46. J Terradas, R Oliver and J L Ballester, *Astrophysical Journal*, **618** (2005) L149.
47. J A McLaughlin and L Ofman, *Astrophysical Journal* **682** (2008)1338.
48. M Selwa, K Murawski, S K Solanki and L Ofman, *Astron. Astrophys*, **512** (2010) A76.
49. A J B Russell, P J A Simes and L Fletcher, *Astron. Astrophys* **581** (2015) A8.
50. I V Zimovets and V M Nakariakov, *Astron. Astrophys* **577** (2015) A4.
4. A V Stepanov, V V Zaitsev, and V M Nakariakov, *Physics Uspekhi* **55** (2012) A4.
5. M Goossens, T Van Doorselaere, R Soler, and G Verth, *Astrophysical Journal* **768** (2013) 191.
6. D J Pascoe, A J B Russell, S A Anfinogentov, P J A Simões, C R Goddard, V M Nakariakov, and L Fletcher, *Astron. Astrophys* **607** (2017) A8.
7. H Ebadi, T V Zaqarashvili, and I Zhelyazkov, *Astrophysics and Space Science* **337** (2012) 33.
8. S Anfinogentov, G Nisticò and V M Nakariakov, *Astron. Astrophys* **560** (2013) A107.
9. A Abedini, *Solar Physics* **293** (2018) 22.
10. H Ebadi and M Ghiassi, *Astrophysics and Space Science* **353** (2014) 31.
11. J Ganjali, N Farhang, Sh Esmaeili, M Javaherian and H Safari, *Astron. Astrophys* **328** (2018) 1047.
12. S Taran, H Safari, and N Farhang, *Iranian Journal of Physics Research* **14**,1 (2014) 65
13. V M Nakariakov, M J Aschwanden and T van Doorselaere, *Astron. Astrophys*, **502** (2009) 661.
14. M L Khodachenko, K G Kislyakova, T V Zaqarashvili and et al, *Astron. Astrophys* **525** (2011) A105.
15. V M Nakariakov, L Ofman, E E Deluca, B Roberts and J M Davila, *Science* **285** (1999) 862.
16. M J Aschwanden, L Fletcher, C J Schrijver and D Alexander, *Astrophysical Journal* **520** (1999) 880.
17. E Verwichte, V M Nakariakov, L Ofman and E E De Luca, *Solar Physics* **223** (2004) 77.
18. S Tomczyk, S W McIntosh, S. L. Keil and et al, *Science* **317** (2007) 1192.
19. S Tomczyk and S W McIntosh, *Astrophysical Journal* **697** (2009) 1384.
20. C R Goddard, G Nistic, V M Nakariakov and I V Zimovets, *Astron. Astrophys* **585** (2016) A137.
21. A Sarkar, B Vaidya, S Hazra and J Bhattacharyya, *Astrophysical Journal* **851** (2017) S120.
22. N S Petrukhin, *Astronomy Letters* **40** (2014) 372.
23. D Yuan and T V Doorselaere, *Astrophysical Journal Supplement Series* **223** (2016) 23.
24. M S Ruderman, A A Shukhobodskiy and R Erdélyi, *Astron. Astrophys* **602** (2017) A50.
25. I De Moortel and V M Nakariakov, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **370** (2012) 3193.
26. W Liu and L Ofman, *Solar Physics* **289**, (2014) 3233.
27. A Abedini, *Iranian Journal of Physics Research* **17**,1 (2017) 91.
28. A Abedini, *Iranian Journal of Physics Research* **17**,5 (2018) 691.