

رهیافت طیفی از منشأ و انتشار نوسانات مگنتوآکوستیکی در نواحی داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی

احسان توایی^۱ و ریحانه صادقی^{۲*}

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

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱/۳۰)

چکیده

در این مقاله به تحلیل در دو ناحیه داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی پرداخته شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش داده‌های آپریس (IRIS) است که از تصاویر SJI استفاده شده تا مناطق داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی، انتخاب شوند. از داده‌های طیفی Mg IIk با دمای ۱۰۰۰۰ درجه کلوین، برای ساخت پروفایل زمانی شدت در قله‌های $h3$ و $k3$ و $h2r$ و $h2v$ و $k2r$ و $k2v$ پروفایل شدت‌دمایی استفاده شده است و با استفاده از تحلیل موجک، مشخصات نوسانی شدت در مناطق داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی، به دست می‌آمده است.

با بررسی پروفایل شدت در قله‌های h و k مشخص شد که رفتار کلی آنها با یکدیگر یکسان می‌باشد و تفاوت در شدت و در نتیجه دمای آنها است. در مورد پروفایل‌های شدت-دما، رفتار کلی قله‌های h و k با یکدیگر یکسانند. با بررسی نتایج تحلیل موجک، به نظر می‌رسد که رفتار نوسانی در قله‌های h و k تقریباً مشابه هستند. با استفاده از نتایج تحلیل موجک، دوره نوسانات شدت نقاط روشن در مناطق داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی، به دست آمده است که با توجه به مقادیر آنها به نظر می‌رسد که نقاط روشن داخلی گرانول‌های خورشیدی منشأ فوتوسفریک دارند و نقاط روشن مرزی گرانول‌های خورشیدی دارای منشأ کروموسفریک هستند. نوسانات شدتی فرکانس بالا با دوره نوسان حدود ۶۴ ثانیه در نتایج دیده شده‌اند. این نوسانات فرکانس بالا تقریباً در تمامی داده‌ها و مناطق مورد بررسی دیده شده‌اند، که تا این لحظه شواهد قوی از منشأ این نوسانات در دست نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اتمسفر خورشید، نوسانات، موجک، کروموسفر، نقاط روشن مغناطیسی، آپریس.

۱. مقدمه

اولین بار در سال ۱۹۷۳ به عنوان عناصری مغناطیسی توصیف شدند (دان و زیرکر، ۱۹۷۳؛ ملترتر، ۱۹۷۴). این عناصر در مناطق مرزی گرانول‌های خورشیدی متمرکزتر و پرشدت‌تر هستند (المیدا و همکاران، ۲۰۱۰). این نقاط در سرتاسر خورشید دیده می‌شوند و همبستگی خوبی با سرعت داپلری (Doppler) دارند (توایی، ۲۰۱۸). تغییرات زمانی سریع در نقاط روشن، باعث تغییرات دائمی در ظاهر یا مکان آنها و در دمای آنها در کروموسفر و TR می‌شود (د لا کروزر و دیگران و همکاران، ۲۰۱۳؛ گوسیچ و همکاران، ۲۰۱۸). نوسانات غالب در کروموسفر بیشتر نوسانات ۳ دقیقه‌ای هستند (استانگالینی و همکاران، ۲۰۱۲) و نوسانات با منشأ فوتوسفری و کروموسفر پایینی اغلب نوسانات ۵ دقیقه‌ای دارند (لایتنس و همکاران،

منطقه خورشید آرام (Quiet Sun) منطقه‌ای از خورشید است که از مناطق فعال و لکه‌های خورشیدی دور است (روبیو و سوارز، ۲۰۱۹). منطقه آرام به دو بخش مرزی گرانول‌های خورشیدی (network) و بخش داخلی گرانول‌های خورشیدی (internetwork) تقسیم می‌شود (دی‌واین و همکاران، ۲۰۰۸). عناصر مغناطیسی ناحیه داخلی گرانول‌های خورشیدی از لحاظ طول عمر کوتاه‌تر و از لحاظ اندازه کوچک‌تر و از لحاظ تعداد کمتر از عناصر مغناطیسی منطقه مرزی گرانول‌های خورشیدی هستند؛ اما به دلیل فراوانی بیشتر نواحی داخلی گرانول‌های خورشیدی، نواحی داخلی گرانول‌های خورشیدی پویاتر در نظر گرفته می‌شوند (روبیو و سوارز، ۲۰۱۹). نقاط روشن مغناطیسی (magnetic bright points) برای

(۱۹۹۸).

دیسک) است و آهنگ بالای آن، رفتار پویای ناحیه TR و کروموسفر را به خوبی نشان می‌دهد (پونتو و همکاران، ۲۰۱۴) (شکل ۱).

۳. نتایج تحلیل داده‌ها

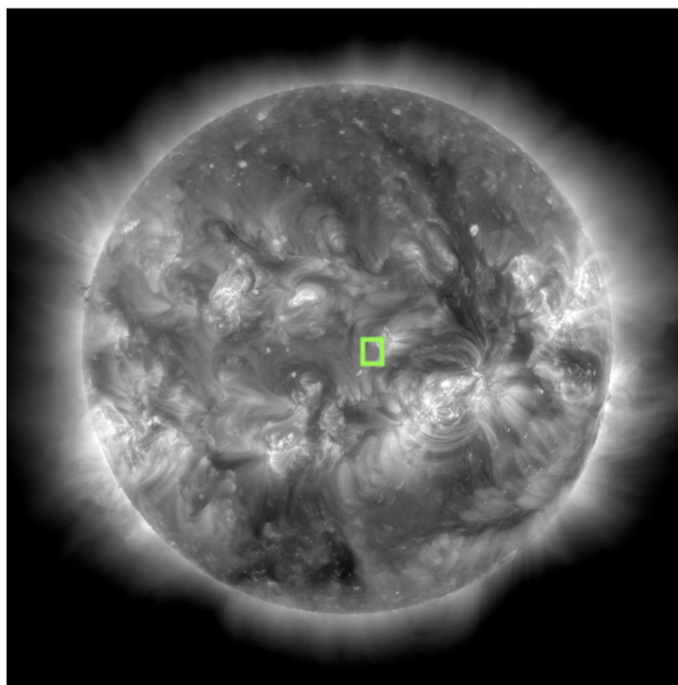
ابتدا، با استفاده از تصاویر SJI نواحی داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی، انتخاب شدند. برای تشخیص حرکات و تغییرات ساختاری نقاط روشن در امتداد ۵۰۰ تصویر SJI، باید برش زمانی SJI‌ها در طول زمان ایجاد شود (شکل ۳).

بدین‌منظور، از SJI Si IV 1403 A (۸۰۰۰۰ درجه کلون)، باریکه‌هایی در نواحی داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی، جدا شده و بر اساس زمان در کنار هم چیده شده است. نمودارهای شکل ۳، به خوبی نمایانگر تغییرات نقاط روشن در طی زمان هستند.

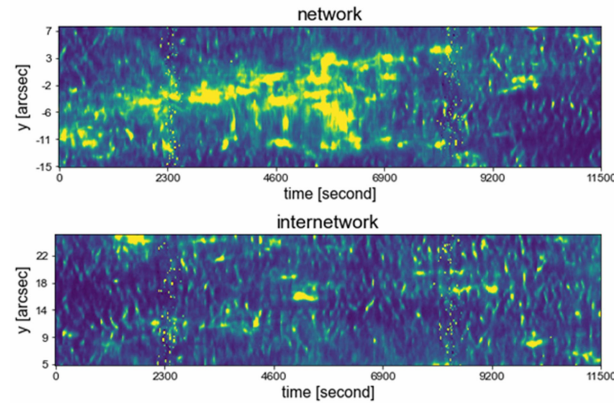
در این تحقیق به بررسی نقاط روشن کروموسفری و تأثیر منشأ این نقاط بر نوسانات شدت پرداخته می‌شود و بدین‌منظور، برش زمانی در طول زمان داده‌ها تهیه می‌شوند تا با کمک تحلیل موجک، خواص نوسانی این مناطق مورد بررسی قرار گیرد تا از منشأ و نحوه انتشار نوسانات مگنتوآکوستیکی در نواحی داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی شناخت بیشتری پیدا شود.

۲. داده‌ها و مشاهدات

مشاهدات مورد استفاده در این تحقیق شامل توالی داده‌های IRIS میدان مغناطیسی خورشید آرام در مرکز دیسک در ۱۶-۲۰۱۴ در ساعت ۰۷:۲۳ تا ۱۱:۰۵ U.T. تفکیک فضایی آیریس ۰/۴-۰/۳ ثانیه قوسی و اندازه پیکسل آن ۰/۱۶۶ ثانیه قوسی (۱۲۰ کیلومتر در مرکز



شکل ۱. تعیین محل دقیق مورد بررسی بر روی دیسک خورشیدی با فیلترگرام AIA 193Å در تاریخ ۲۰۱۴/۰۵/۱۶ ساعت ۱۰:۱۲ که توسط مشاهده‌گر دینامیک خورشیدی SDO گرفته شده است. مستطیل سبز ناحیه مورد تحقیق در این مطالعه را نشان می‌دهد.



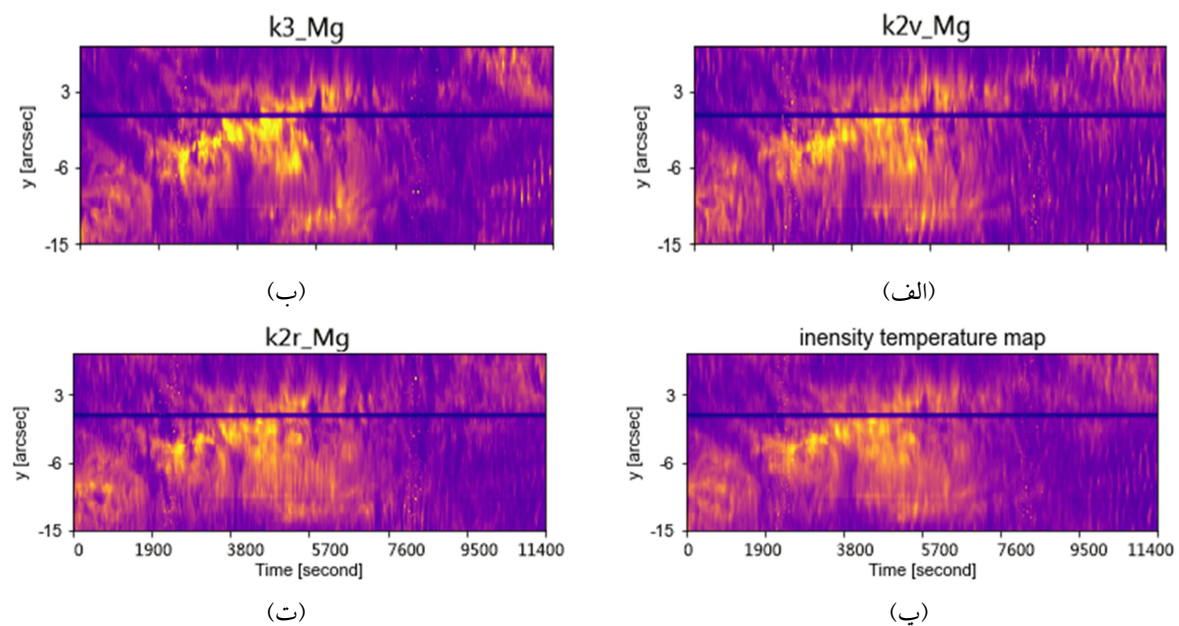
شکل ۲. نقاط روشن داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی در طول زمان (شدت در این نمودارها از ۰ تا ۱۱۷ و نرمال‌شده به مقدار میانگین و از آبی تیره تا زرد روشن است). نقاط زرد رنگی که در نمودارهای مربوط به ۲۳۰۰ و ۸۳۰۰ ثانیه مشاهده می‌شود، پرتوهای کیهانی خورشیدی یا ذرات پر انرژی خورشیدی (SEP) هستند (توایی و همکاران، ۲۰۱۵).

$k2v$ به ترتیب شدت قله $k2r$ و $2v$ هستند و در رابطه با واحدهای آنها باید گفت که همگی از جنس شدت و با واحد $nWm^{-2}Hz^{-1}sr^{-1}$ هستند. و با استفاده از طیف، برش زمانی شدت دمایی $Mg II$ هسته مرکزی $Mg II h \& k$ ، و قله‌های شاخص آبی و قرمز $k2v$ و $k2r$ و $h2v$ و $h2r$ از طیف $Mg II$ به دست آمده است (شکل ۳، ۴، ۵ و ۶).

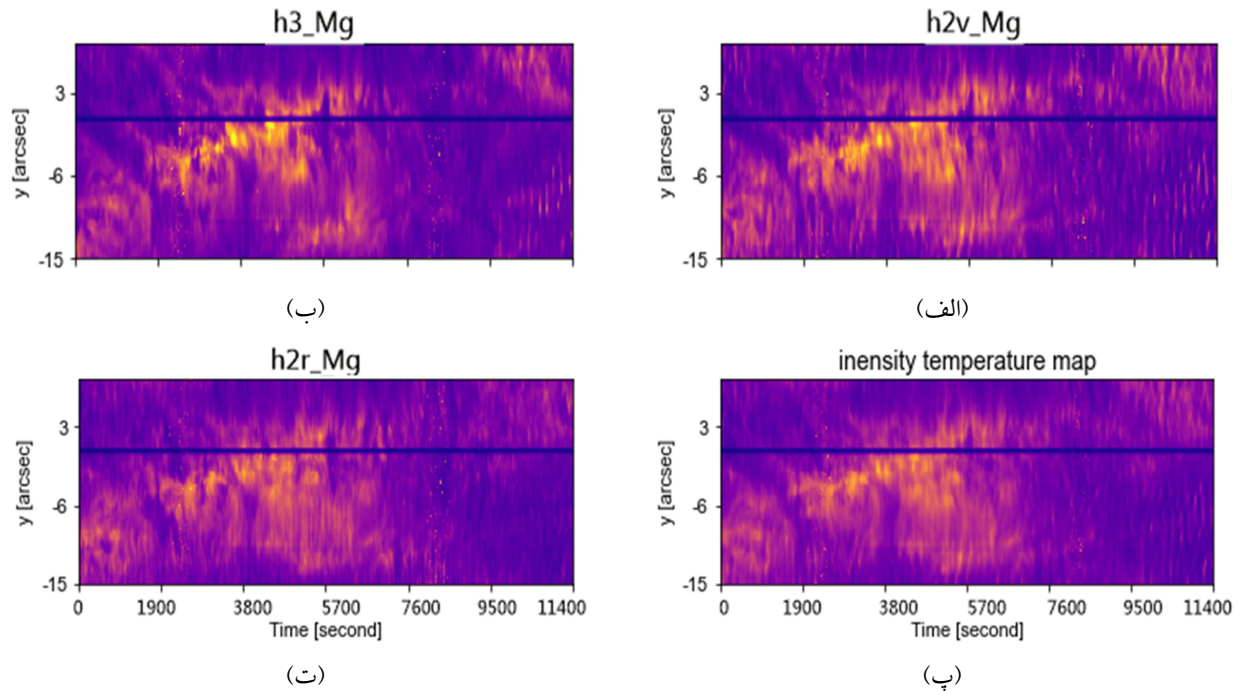
$$B_{temp} = (k2v + k2r)/2 \quad (۱)$$

با بررسی تغییرات شدت قله‌ها طیف $Mg II k$ در طول زمان در داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی، می‌توان به برش زمانی شدت دست یافت (شکل ۳، ۴، ۵ و ۶).

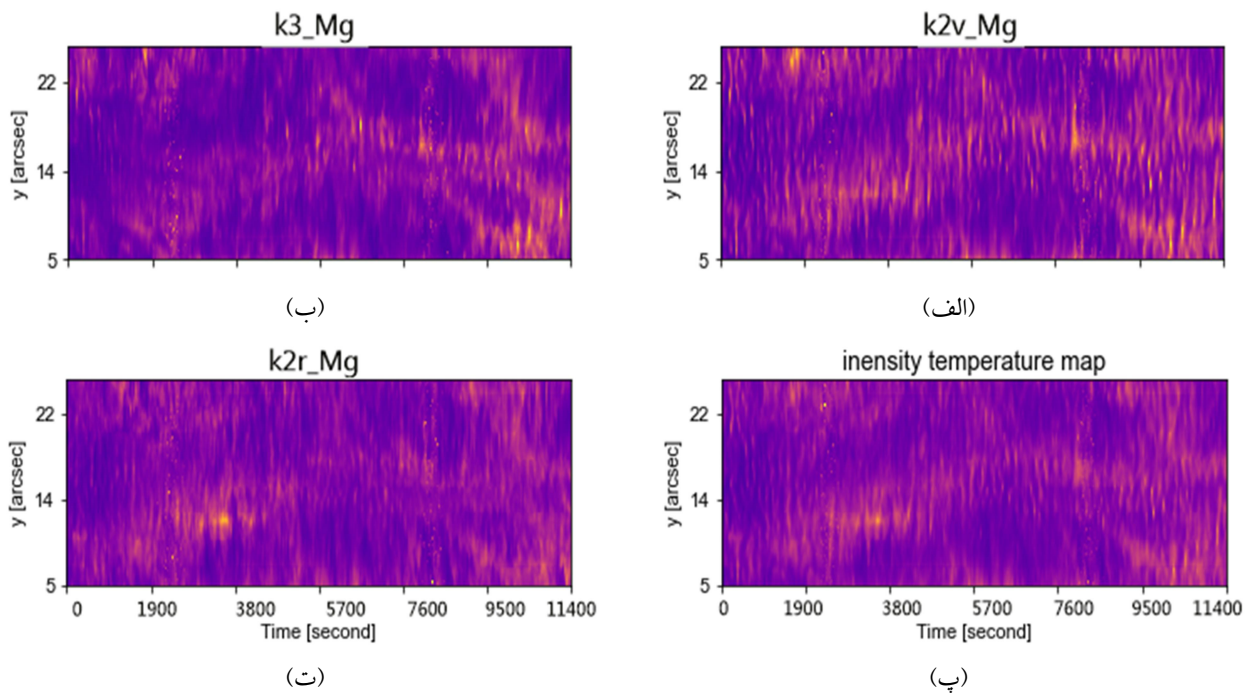
از آنجایی که شدت هردو قله‌های $k2v$ و $k2r$ از طیف $Mg II k$ به خوبی با دما در ارتفاع عمق نوری ارتباط دارد و از رابطه (۱) می‌توان محاسبات مربوط به شدت دما را انجام داد (لینارتس و همکاران، ۲۰۱۳) (در این رابطه B_{temp} ، شدت دما، $k2r$ و



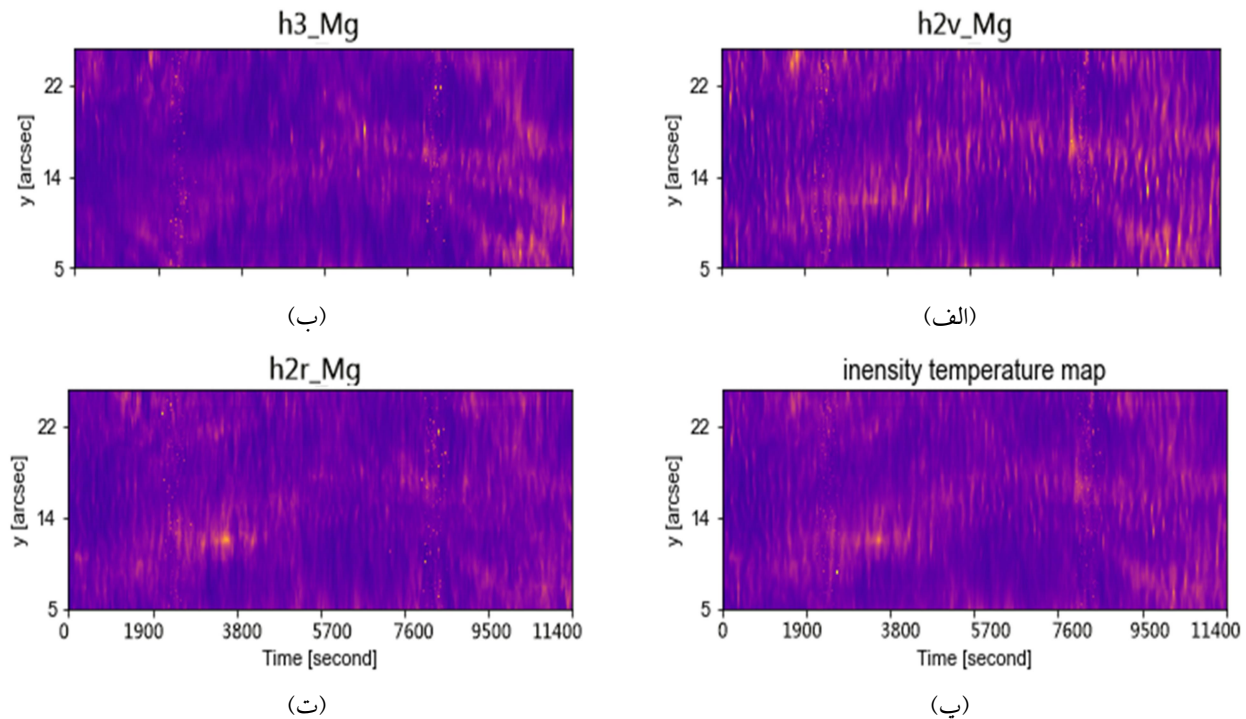
شکل ۳. برش زمانی شدت در قله‌های طیف $Mg II k$ در ناحیه مرزی گرانول‌های خورشیدی (شدت در هر چهار نمودار از ۰ تا ۲۲۶ و نرمال‌شده به مقدار میانگین و از آبی تیره تا زرد روشن هستند). (الف) پروفایل شدت قله $k2v$ ، (ب) پروفایل شدت قله $k3$ ، (پ) پروفایل شدت دمایی، (ت) پروفایل شدت قله $k2r$



شکل ۳. برش زمانی شدت در قله‌های طیف Mg II h در ناحیه مرزی گرانش‌های خورشیدی (شدت در هر چهار نمودار از ۰ تا ۲۲۶ و نرمال‌شده به مقدار میانگین و از آبی تیره تا زرد روشن هستند). (الف) پروفایل شدت قله $h2v$ ، (ب) پروفایل شدت قله، (پ) پروفایل شدت دمایی، (ت) پروفایل شدت قله $h2r$.



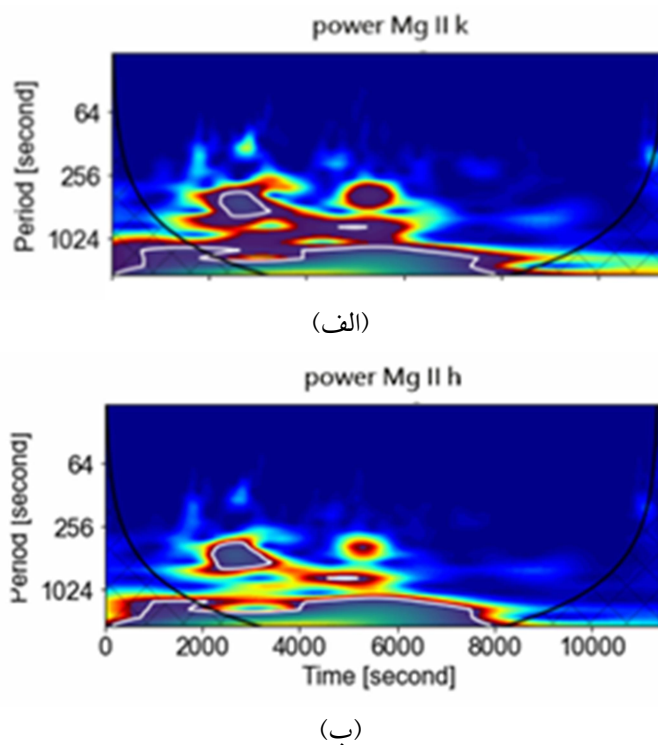
شکل ۴. برش زمانی شدت در قله‌های طیف Mg II k در ناحیه داخلی گرانش‌های خورشیدی (شدت در هر چهار نمودار از ۰ تا ۲۲۶ و نرمال‌شده به مقدار میانگین و از آبی تیره تا زرد روشن هستند). (الف) پروفایل شدت قله $k2v$ ، (ب) پروفایل شدت قله $k3$ ، (پ) پروفایل شدت دمایی، (ت) پروفایل شدت قله $k2r$.



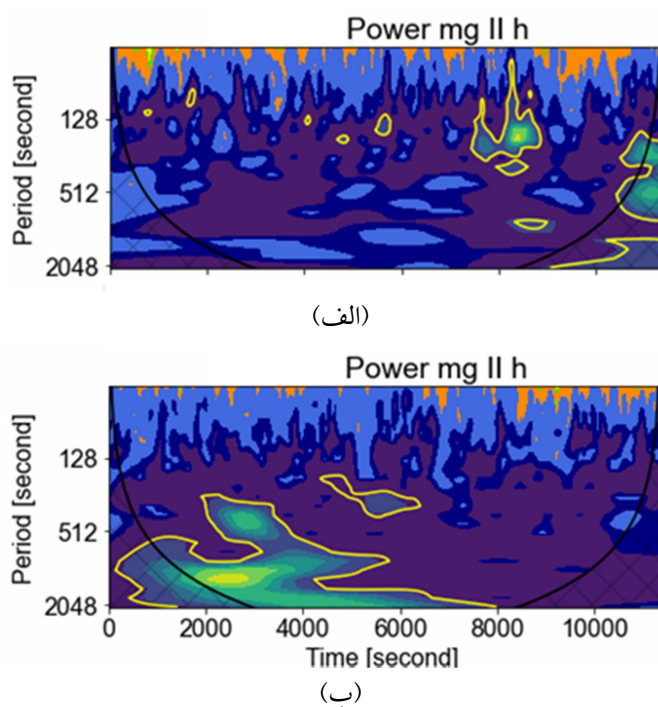
شکل ۵. برش زمانی شدت در قله‌های طیف $Mg II h$ در ناحیه داخلی گرانش‌های خورشیدی (شدت در هر چهار نمودار از ۰ تا ۲۲۶ و نرمال‌شده به مقدار میانگین و از آبی تیره تا زرد روشن هستند). (الف) پروفایل شدت قله $h2v$ ، (ب) پروفایل شدت قله، (پ) پروفایل شدت دمایی $h3$ ، (ت) پروفایل شدت قله $h2r$

موجک مورلت دارای اعضای مختلفی است که معمولاً با یک عدد اصلی خوانده می‌شوند (مثل مورلت ۵، مورلت ۷ و...). این عدد اصلی بیانگر تعداد دوره‌های موج سینوسی در زیر گنبد گاوسی می‌باشد. یکی از دلایل انتخاب موجک مورلت برای تحلیل‌های این پژوهش، نداشتن لبه تیز است که رایپل را کاهش می‌دهد و دقت تشخیص نوسانات را بهتر می‌کند. یکی دیگر و یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از موجک مورلت، عدم تغییر تفکیک زمانی موج است. به دلایل ذکر شده، مورلت ۵ معقول‌ترین و قابل اعتمادترین انتخاب برای حصول نتایجی با دقت بالای زمانی و فرکانسی برای این پژوهش بوده است. با اعمال تبدیل موجک مورلت به پارامترهای استخراج‌شده از برش زمانی شدت پریودگرام‌ها برای نقاط روشن به دست می‌آید (شکل ۷ و ۸).

یکی از روش‌های رایج برای بررسی ویژگی‌های نوسانی، استفاده از تحلیل موجک (wavelet analysis) می‌باشد. این روش به‌خاطر تنوع و منعطف بودن انواع موجک برای انواع تحلیل، روشی کاربردی به‌نظر می‌رسد. موجک‌ها و کانولوشن آنها با موج‌ها، منجر به استخراج داده‌های زمان و فرکانس و توان می‌شود. یکی دیگر از مزیت‌های تحلیل موجک نسبت به تحلیل‌های مشابه همچون، فوری و فوری کوتاه زمان و یا فوری پنجره‌ای، داشتن همزمان تفکیک زمانی و فرکانسی و قابلیت بهینه‌سازی تفکیک زمانی و فرکانسی است. لازم به‌ذکر است که به‌علت اصل عدم قطعیت، تفکیک زمان و فرکانس بر هم اثر گذارند و نیاز به انتخاب بازه تفکیک زمان و فرکانس به‌صورت بهینه است. موجک مورلت (morlet wavelet)، از طریق ضرب یک موج سینوسی در یک گاوسین، به‌دست می‌آید. خانواده



شکل ۶. مقایسه تحلیل موجک شدت در قله‌های $\text{Mg II k \& h}$ در مناطق مرزی گرانیول‌های خورشیدی، در این نمودارها مخروط اطمینان با خطوط مشکی و مشبک نشان داده شده‌اند، داده‌ای داخل این مخروط از اطمینان ۹۷ درصدی برخوردارند. (الف) تحلیل موجک شدت نقاط روشن در مناطق مرزی گرانیول‌های خورشیدی و قله Mg II h ، (ب) تحلیل موجک شدت نقاط روشن در مناطق مرزی گرانیول‌های خورشیدی و قله Mg II k (مقادیر در هر دو نمودار از ۰ تا ۲۰۰۰ و نرمال‌شده به مقدار میانگین و از آبی تیره تا زرد روشن هستند).



شکل ۷. (الف) تحلیل موجک شدت در ناحیه داخلی گرانیول‌های خورشیدی Mg II k ، (ب) تحلیل موجک شدت در ناحیه مرزی گرانیول‌های خورشیدی Mg II k ، در این نمودارها، مخروط اطمینان با خطوط مشکی و مشبک نشان داده شده‌اند، داده‌ای داخل این مخروط از اطمینان ۹۷ درصدی برخوردارند. (مقادیر در هر دو نمودار از ۰ تا ۲۰۰۰ و نرمال‌شده به مقدار میانگین و از آبی تیره تا زرد روشن هستند).

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با مقایسه پروفایل شدت و دما در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که قله‌های h و k از رفتار مشابهی پیروی می‌کنند با این تفاوت که قله k نسبت به h شدت و در نتیجه دمای بالاتری دارد.

با بررسی تحلیل موجک مربوط به داده‌های هر دو قله h و k (شکل ۷) می‌توان نتیجه گرفت که رفتار نوسانی در این دو قله کاملاً مشابه یکدیگر هستند.

نوسانات غالب کروموسفری ۳ دقیقه‌ای توسط استانگالینی و همکاران، ۲۰۱۲ و نوسانات فوتوسفری ۵ دقیقه‌ای توسط لایتس و همکاران، ۱۹۹۸ معرفی شده‌اند.

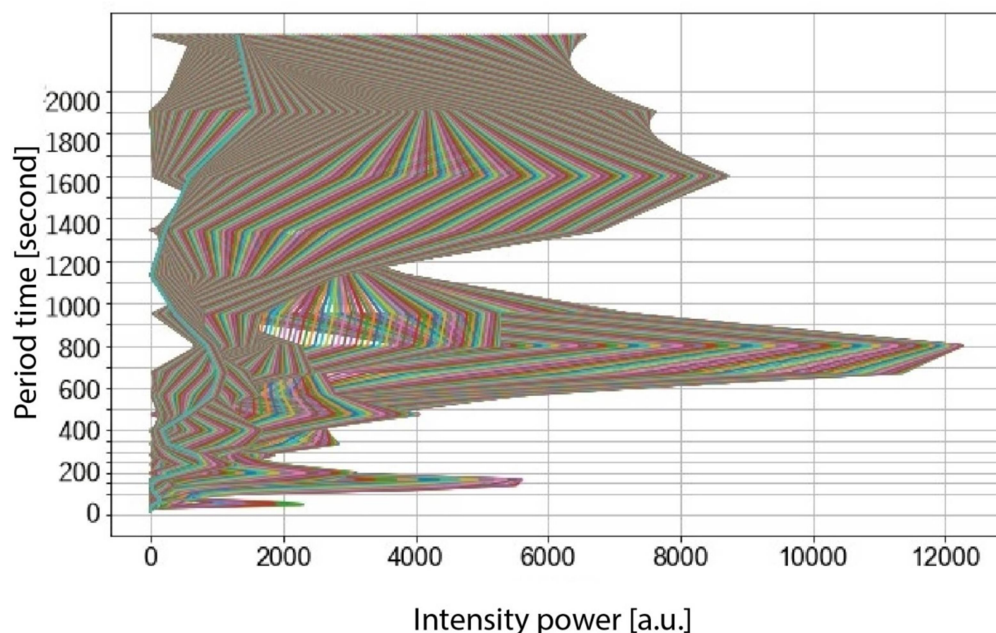
با بررسی شکل ۸ که مربوط به تحلیل موجک دو ناحیه متفاوت داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی است، دوره نوسانات شدت برای دو منطقه داخلی و مرزی گرانول‌های خورشیدی، محاسبه شده است که این اعداد، در حدود ۱۸۰ ثانیه برای نقاط روشن داخلی گرانول‌های خورشیدی و ۳۰۰ ثانیه برای نقاط روشن مغناطیسی مناطق مرزی گرانول‌های خورشیدی ثبت شده است. که مبین این مهم است که نقاط روشن مغناطیسی مناطق مرزی گرانول‌های خورشیدی منشأ فوتوسفریک و نقاط روشن

داخلی گرانول‌های خورشیدی منشأ کروموسفری دارند. در نتایج تحلیل موجک این تحقیق، نوسانات شدتی با دوره نوسان حدود ۶۴ ثانیه نیز دیده شده است. نمونه‌ای از این نوسانات در شکل ۹ مشهود است.

این نوسانات فرکانس بالا تقریباً در تمامی داده‌ها و مناطق مورد بررسی دیده شده‌اند. این فرکانس بالا با مشاهدات محققان فیزیک خورشیدی از نوسانات فوتوسفر و کروموسفر متفاوت است؛ در نتیجه نمی‌توان آن را مرتبط با آن نوسانات دانست. در طی جست‌وجوهایی که در رابطه با این طیف از نوسانات فرکانس بالا انجام شده، به‌نظر می‌رسد که اولین بار است که مشاهده این نوع نوسانات فرکانس بالا گزارش شده است.

به‌نظر می‌رسد که این نوسانات فرکانس بالا، می‌توانند نقش مهم و بسزایی در گرمایش ناحیه TR داشته باشند. به‌همین دلیل مطالعه دقیق آن جهت پی‌بردن به علل و مکانیزم گرمایشی TR ضروری محسوب می‌شود.

تا این لحظه شواهد قوی از منشأ و علت وجودی این نوسانات در دست نمی‌باشد و امیدواریم که با بررسی‌های دقیق‌تر و مبسوط‌تر بتوانیم شناخت بهتری از این دسته از نوسانات فرکانس بالا پیدا کنیم.



شکل ۸. نوسانات شدت فرکانس بالای مشاهده‌شده در نتایج تحلیل موجک. در این نمودار طیف‌های مختلف زمانی بر حسب دوره نوسانات به‌توان رسم شده شده‌اند. به‌طور مشهودی، اولین قله غالب در حدود دوره نوسان ۶۴ ثانیه‌ای دیده می‌شود.

مراجع

- Almeida, J. S., Bonet, J. A., Viticchié, B. and Moro, D. D., 2010, Magnetic bright points in the quiet Sun. *The Astrophysical Journal Letters*, 715(1), L26.
- de la Cruz Rodriguez, J., De Pontieu, B., Carlsson, M. and van der Voort, L. R., 2013, Heating of the magnetic chromosphere: observational constraints from Ca II $\lambda 8542$ spectra. *The Astrophysical Journal Letters*, 764(1), L11.
- De Wijn, A. G., Lites, B. W., Berger, T. E., Frank, Z. A., Tarbell, T. D. and Ishikawa, R., 2008, Hinode observations of magnetic elements in internetwork areas. *The Astrophysical Journal*, 684(2), 1469.
- Dunn, R. B. and Zirker, J. B., 1973, The solar filigree. *Solar Physics*, 33(2), 281-304.
- Gošić, M., de la Cruz Rodríguez, J., Pontieu, B. D., Rubio, L. R. B., Carlsson, M., Pozuelo, S. E., Ortiz, A. and Polito, V., 2018, Chromospheric heating due to cancellation of quiet Sun internetwork fields. *The Astrophysical Journal*, 857(1), 48.
- Leenaarts, J., Pereira, T. M. D., Carlsson, M., Uitenbroek, H. and De Pontieu, B., 2013, The formation of IRIS diagnostics. II. The formation of the Mg II h&k lines in the solar atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 772(2), 90.
- Lites, B. W., Thomas, J. H., Bogdan, T. J. and Cally, P. S., 1998, Velocity and magnetic field fluctuations in the photosphere of a sunspot. *The Astrophysical Journal*, 497(1), 464.
- Mehlretter, J. P., 1974, Observations of photospheric faculae at the center of the solar disk. *Solar Physics*, 38(1), 43-57.
- De Pontieu, B., Lemen, J.R., Kushner, G.D., Akin, D.J., Allard, B., Berger, T., Boerner, P., Cheung, M., Chou, C., Drake, J.F. and Duncan, D.W., 2014, The interface region imaging spectrograph (IRIS). *Solar Physics*, 289(7), 2733-2779.
- Rubio, L. B. and Suárez, D. O., 2019, Quiet Sun magnetic fields: anobservational view , *Living Reviews in Solar Physics*, 16, 1.
- Stangalini, M., Giannattasio, F., Moro, D. D. and Berrilli, F., 2012, Three-minute wave enhancement in the solar photosphere. *Astronomy & Astrophysics*, 539, L4.
- Tavabi, E., Koutchmy, S. and Golub, L., 2015, Tavabi, E., Koutchmy, S., & Golub, L. (2015). Limb Event Brightenings and Fast Ejection Using IRIS Mission Observations. *Solar Physics*, 290(10), 2871-2887.
- Tavabi, E., 2018, Synchronized observations of bright points from the solar photosphere to the corona. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476(1), 868-874.

A spectral approach to the origin and propagation of magnetoacoustics oscillations in the network and internetwork areas of solar granules

Tavabi, E.¹ and Sadeghi, R.^{2*}

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

2. M.Sc. Student, Department of Physics, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

(Received: 16 Jan 2022, Accepted: 19 April 2022)

Summary

In this paper, a spectral approach to the origin and propagation of magnetoacoustic oscillations in the network and internetwork areas of solar granules is performed. The data used in this study are mostly from Interface Region Imaging Spectrometer (IRIS). Slit Jaw Images (SJIs) data of IRIS at wavelengths of 1400 angstroms related to Si IV and 2796 angstroms related to Mg II h / k and 2832 angstroms related to Mg II w s, are used to select network and internetwork areas. The data of the Mg II k spectrum with a wavelength of 2796 angstroms and a temperature of 10,000 Kelvin have been used to construct the temporal profile of the intensity at the peaks of h3, k3, h2r, h2v, k2r and k2v, and the prospective profile of intensity temperature. One of the common methods for temporal and frequential characteristics analysis is the use of wavelet analysis. This method seems to be a practical method due to the variety and flexibility of wavelet types for different types of analysis. Wavelets and their convolution with waves lead to the extraction of time, frequency and power data. It should be noted that due to the uncertainty principle, resolution of time and frequency interact and its need to select optimum limit of the time and frequency resolution. One of the reasons for choosing Morlet Wavelet for the analysis of this study is the lack of a sharp edge, which reduces the ripple and improves the accuracy of detect the fluctuations properties. Another and one of the most important reasons for using the Morlet wavelet is that it does not change the temporal resolution of the wave. For these reasons, Morlett 5 was the most sensible and reliable choice for high-temporal and frequency-specific results for this study. Using wavelet analysis, the oscillation characteristics of the intensity are obtained in the network areas and internetwork areas. By Investigation of the intensity profiles in h and k peaks, it was found that the general behavior in them was the same and the only difference was in the intensities of these peaks and therefore their temperatures. In the case of intensity temperature profiles, the general behavior for intensity temperature profiles extracted from h and k peaks, also seems to be the same. By investigation of the wavelet analysis results, it appears that the oscillating behavior at the h and k peaks is almost similar. Using the results of wavelet analysis, in this study, the periods of oscillations in the intensities of bright points in the network and internetwork have been obtained. According to their values, it seems that the bright points of the internetwork have a photospheric origin and the bright points of the network have a chromospheric origin. Another result of the wavelet analysis of this study was the intensity of oscillations with a period of about 64 seconds. This high frequency differs from the solar researchers' observations of photosphere and chromosphere oscillations, so it cannot be related to those oscillations. It seems that this is the first time that this type of high frequency oscillations has been reported. It seems that these high frequency oscillations can play an important role in heating the TR. For this reason, Accurate study of these high frequency oscillations is necessary to understand the causes and heating mechanisms of TR. These high frequency oscillations have been seen in almost all data and areas under study, so far there is no strong evidence of the origin and cause of these high frequency oscillations, and we hope that with more detailed and extensive studies we can better understand the properties and reason of these oscillations.

Keywords: solar atmosphere, wavelet, chromosphere, magnetic bright points, IRIS.

* Corresponding author:

rayhane.sadeghi@gmail.com