

## رفتار ناحیه انتقال در انتشار امواج در اتمسفر خورشید

زهرا فاضل

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

پست الکترونیکی: z\_fazel@tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۲۶)

### چکیده

مطالعه امواج مغناطویدرودینامیکی در ساختارهای مغناطیسی خورشیدی مانند حلقه‌های تاجی، سیخک‌ها و ... می‌تواند برای بررسی مسئله گرمایش جو بیرونی خورشید اهمیت بسزایی داشته باشد. برای این منظور، یک تیوب شار مغناطیسی در حضور جریان ایستا و میدان مغناطیسی متغیر در یک لایه جوی طبقه‌بندی شده در نظر گرفته می‌شود. ناحیه انتقال یک ناحیه مرزی بین لایه رنگین سپهر و تاج خورشید است که تغییرات بسیار سریع در دما و چگالی دارد. تأثیر ناحیه انتقال بر میرایی امواج آلفون و تغییرات دما با ارتفاع در تیوب شار مفروض اعمال شد. مدل دو بعدی دکارتی برای حل معادلات مغناطویدرودینامیک (MHD) استفاده شد و نتایج به صورت نمودارهای تغییرات زمانی و مکانی سرعت و میدان مغناطیسی اختلالی، میرایی را به دست دادند. نمودارها نشان دادند که میرایی امواج آلفونی بیشتر با زمان قابل مشاهده‌اند تا با مکان، به طوری که هر چه میرایی با آهنگ بیشتر رخ دهد انتقال انرژی به کرونا بیشتر خواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** خورشید، امواج مغناطویدرودینامیکی، جریان ایستا، ناحیه انتقال

به رهایی انرژی مغناطیسی امواج و تبدیل آنها به انرژی جنبشی (حرارتی) محیط می‌شود.

### ۱. مقدمه

اوستربروک (۱۹۶۱) با مطالعه امواج مغناطویدرودینامیکی، گرمایش رنگین سپهر، پلازماها و تاج خورشید را بررسی کرد. سازوکارهای اندرکنش امواج با پلاسماهای محیط که منجر به تولید شوک‌ها و سپس اتلاف آنها می‌شوند با انتقال انرژی، باعث گرمایش محیط می‌شوند [۵].

صفری و همکاران (۲۰۰۶) سازوکار جذب تشدید امواج مغناطویدرودینامیک در تیوب‌های شار مغناطیده را در حضور ناهمگنی شعاعی چگالی بررسی کردند. آنها با فرض تأثیرات مقاومتی و چسبندگی در یک لایه مرزی نازک پلاسما، نشان دادند که امواج حجمی و سطحی می‌توانند سهم مساوی در گرمایش تاج داشته باشند [۶].

رنگین سپهر و تاج خورشید لایه‌های بیرونی جو خورشید را تشکیل می‌دهند. تاج خورشید یک ناحیه با چگالی بسیار پایین و دمای بسیار بالا است که این تناقض به صورت مسئله گرمایش تاج در فیزیک خورشید مطرح است. یکی از نظریه‌های مهم مطرح شده برای حل این مسئله، حضور امواج مغناطویدرودینامیکی در پدیده‌های مغناطیسی جو خورشید مانند حلقه‌های تاجی و سیخک‌ها است [۱]. این پدیده‌ها پلاسماهای مغناطیده‌ای هستند که به صورت موجبر عمل کرده و موجب انتشار امواج می‌شوند. اندرکنش امواج مغناطویدرودینامیکی با محیط از طریق سازوکارهای جذب تشدید [۲]، جفت شدگی مدها [۳] و اختلاط فازی [۴]، منجر

در این مقاله، برای مطالعه میرایی امواج آلفونی در تیوب‌های شار کروموسفری از کد شبیه‌سازی<sup>۱</sup> TMC استفاده خواهد شد. برای حل معادلات امواج که شامل معادله پایستگی ماده، پایستگی تکانه و معادله القا است، ابتدا آنها را خطی‌سازی و بی‌بعدسازی کرده، سپس شرایط اولیه و مرزی مناسب معرفی خواهند شد. پس از حل معادلات، نتایج حاصله به صورت نمودارهای تغییرات مکانی و زمانی سرعت و میدان مغناطیسی رسم خواهند شد. در آخر، بحث و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

## ۲. مدل تئوری

### ۲.۱. معادلات اساسی

یک مدل دوبعدی دکارتی در صفحه  $(x, z)$  برای تیوب شار مغناطیسی در رنگین سپهر خورشید در نظر می‌گیریم. در این مدل، اثرات گرانش به خاطر تغییرات چگالی تیوب با ارتفاع آن، چسبندگی و تغییرات محلی دما (اثر ناحیه انتقال) در محاسبات وارد خواهند شد. همچنین، پلاسمای مورد بررسی تراکم ناپذیر فرض خواهد شد. سرعت اولیه پلاسمای تیوب را ثابت (جریان پایا) و میدان مغناطیسی تعادلی را متغیر با مکان خواهیم گرفت. به خاطر تغییرات چگالی و میدان مغناطیسی با ارتفاع، سرعت آلفونی نیز غیریکنواخت خواهد بود. معادلات MHD غیر آرمانی حاکم بر دینامیک پلاسما به صورت زیر است:

$$\rho \partial \vec{V} / \partial t + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} + \rho \vec{g} + \rho \nu \nabla^2 \vec{V}, \quad (1)$$

$$\partial \vec{B} / \partial t = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}), \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2)$$

که در آن،  $p = \frac{\rho RT}{\mu}$  فشار گاز کامل،  $\rho$  چگالی جرمی،  $V$  سرعت پلاسما،  $T$  دما،  $B$  میدان مغناطیسی،  $\mu$  وزن مولکولی متوسط و  $\vec{g} = (0, 0, g)$  شتاب گرانش خورشید است.  $\nu$  ضریب چسبندگی است و مقدار  $\nu \rho$  برای یک پلاسمای هیدروژنی کاملاً یونیده،  $10^{-17} T^{(5/2)} kg^{(-1)} s^{(-1)}$  است [۱۵].

ملروز و سیمپسون (۱۹۷۷) با مطالعه جفت شدگی امواج آلفونی با مدهای سریع و آرام نوسانات مغناطوسوتی در تاج خورشید، شرایط رویداد این سازوکار میرایی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که هرگاه سرعت صوت با سرعت آلفونی برابر باشد جفت شدگی و در واقع تبدیل شکلی از امواج به شکل دیگر اتفاق می‌افتد و در این حین، انرژی به صورت گرما به محیط منتقل می‌شود [۷].

معمولاً دو مدل قابل توجه برای گرمایش تاج خورشید مطرح است که یکی شراره‌های کوچک-مقیاس ناشی از اتصال مجدد مغناطیسی [۸] و دیگری گرمایش ناشی از اتلاف امواج آلفونی منتشر شونده در تیوب‌های شار مغناطیسی [۹ و ۱۰] است.

کودو و شیباتا (۱۹۹۹) تشکیل سیخک‌ها و گرمایش تاج خورشید را با در نظر گرفتن حرکات تصادفی فوتوسفری منتشر شونده در راستای یک تیوب شار مغناطیسی بازشبیه‌سازی کردند. آنها نشان دادند که امواج آلفونی، شار انرژی کافی را به تاج منتقل می‌کنند [۱۱].

هرگاه گرادیان چگالی یک محیط بر راستای میدان مغناطیسی عمود باشد، سرعت آلفون تابعی از مختصه عرضی خواهد بود. در یک خط میدان مغناطیسی، امواج آلفون با سرعت آلفون منتشر می‌شوند. بعد از مدت زمان و مکان معینی، اختلالات توسط امواج آلفون خطوط میدان مغناطیسی همسایه با افزایش ارتفاع از فاز خارج شده، طول موج‌های متفاوتی پیدا می‌کنند و گرادیان‌های بزرگ در جبهه موج آلفون در جهت ناهمگنی ایجاد می‌کنند. این همان سازوکار اختلاط فازی است که باعث اتلاف شده و به انرژی موجود در موج اجازه می‌دهد پلاسما را گرم کند.

مطالعه اختلاط فازی امواج آلفونی در شرایط جریان و میدان مغناطیسی متغیر نشان داده است که تحت این شرایط، میرایی امواج آلفون ایستاده افزایش می‌یابد [۱۲]. شبیه‌سازی‌های عددی انتشار تپ‌های آلفونی در هندسه میدان‌های مغناطیسی دو بعدی نشان دادند که زمان لازم برای این که قسمت‌های مختلف تپ در تاج ظاهر شوند به چگالی پلاسما و ویژگی‌های میدان مغناطیسی بستگی دارد [۱۳ و ۱۴].

<sup>1</sup> Tearing Mode Code

جدا شده اند. همچنین،  $z_{\omega} = 200 \text{ km}$  پهنای ناحیه انتقال واقع در محل  $z_r = 2000 \text{ km}$ ، بالای سطح خورشید است.

### ۲.۲. اختلال

برای تولید و انتشار امواج در تیوب شار، ابتدا اختلالی به صورت تپ اولیه در تیوب در حالت تعادل اعمال می‌شود. با انتشار اختلال در تیوب، سرعت و میدان مغناطیسی پلاسما به خاطر حضور وشکسانی و تغییرات دمایی محیط دستخوش تغییر خواهند شد. اثر وشکسانی در فرایند انتشار امواج، منجر به میرایی و اتلاف آنها خواهد شد. برای این منظور، پس از خطی‌سازی معادلات MHD غیر آرمانی، آنها را بی‌بعد کرده و به شکل زیر به دست آوردیم:

$$\partial B_1 / \partial t = [B_{,x}(x, z) \frac{\partial v_1}{\partial x} + B_{,z}(x, z) \frac{\partial v_1}{\partial z}] - v_1 \frac{\partial B_0}{\partial z}, \quad (8)$$

$$\partial v_1 / \partial t = \frac{1}{\rho_0(x, z)} [B_{,x}(x, z) \frac{\partial B_1}{\partial x} + B_{,z}(x, z) \frac{\partial B_1}{\partial z}] - v_1 \frac{\partial v_1}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_1, \quad (9)$$

چگالی، سرعت، میدان مغناطیسی و مختصات زمان و مکان همگی بی‌بعد هستند. معادلات فوق با شرایط اولیه زیر حل می‌شوند:

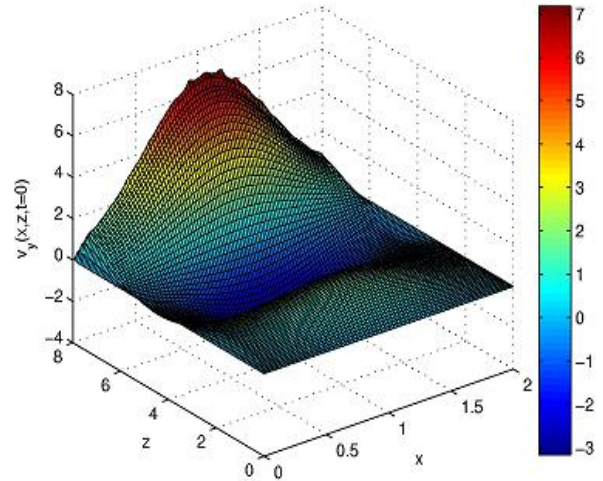
$$v_1(x, z, t=0) = v_{A_0} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{d}\right)^2\right] \sin(k_v z) e^{z/H}, \quad (10)$$

$$B_1(x, z, t=0) = 0, \quad (11)$$

که  $d$  پهنای جعبه شبیه‌سازی اولیه است. شرایط مرزی بسته برای امواج ایستاده در تیوب اعمال می‌شود. در شکل ۱ تپ سرعت اولیه توسط معادله (۱۰) نشان داده می‌شود. ضریب  $k_v$  برای داشتن امواج ایستاده در تیوب است.

### ۳. نتایج عددی

معادلات (۸) و (۹) همزمان به طور عددی با استفاده از روش‌های تفاضل محدود و رانگ کوتای مرتبه ۴ حل شدند. جعبه شبیه‌سازی منطبق بر تیوب شار مغناطیسی به صورت دو بعدی در راستای محورهای  $(x, z)$  به ترتیب با ابعاد (۰,۲) و (۰,۸) در نظر گرفته شد. مقادیر عددی پارامترهای مهم در حل معادلات عبارتند از:



شکل ۱. جعبه موج اولیه برای  $d = 0.3 a$  را نشان می‌دهد.

سرعت و میدان مغناطیسی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\vec{V} = v_1 \hat{k} + v_1(x, z, t) \hat{j}, \quad (3)$$

$$\vec{B} = B_0 e^{-kz} \{ \cos[k(x-a)] \hat{i} - \sin[k(x-a)] \hat{k} \} + b_1(x, z, t) \hat{j}, \quad (4)$$

که  $a$  شعاع نوعی تیوب است [۱۴]. چون میدان مغناطیسی تعادلی آزاد از نیرو است، نیروهای گرادیان فشار با گرانش توازن هستند. بنابراین داریم:

$$p_0(x, z) = p_0(x) e^{-\int_{z_r}^z \frac{dz'}{H(z')}} , \quad (5)$$

$$\rho_0(x, z) = \frac{\rho_0(x) T_0}{T_0(z)} e^{-\int_{z_r}^z \frac{dz'}{H(z')}} ,$$

که در آن  $\rho_0(x)$  از رابطه سرعت آلفون برای اتمسفر طبقه بندی شده ناشی از گرانش به دست می‌آید:

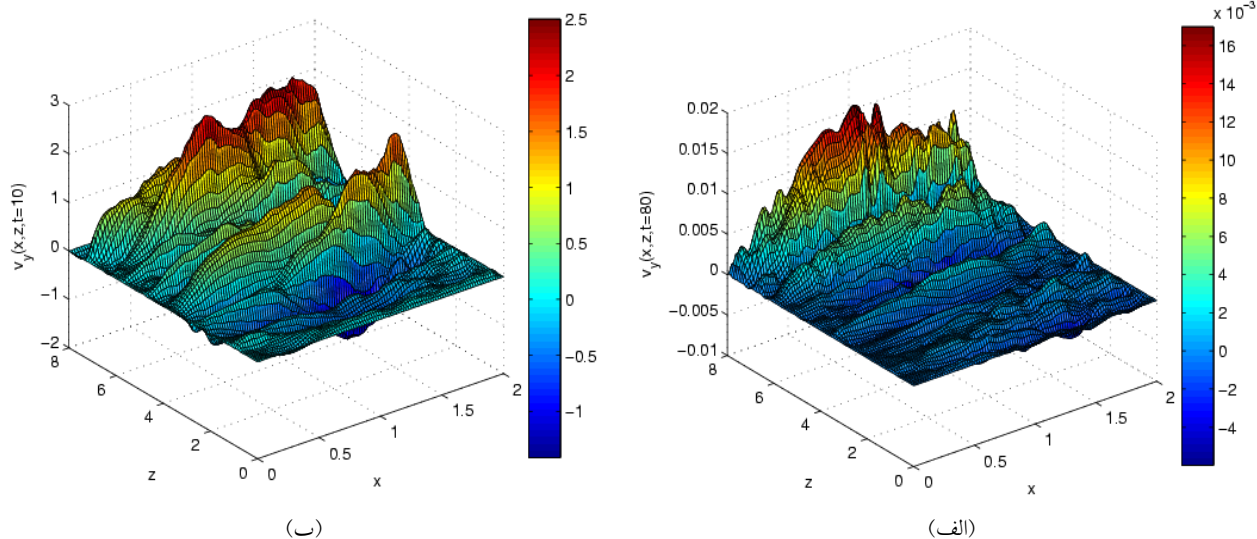
$$\rho_0(x) = \rho_0 [2 + \tanh(\alpha(x-a))]^{-2}, \quad (6)$$

و  $H(z) = \frac{k_B T_0(z)}{mg}$  ارتفاع مقیاس فشار است. کمیت  $\alpha$  میزان ناهمگنی در سراسر میدان مغناطیسی را کنترل می‌کند.

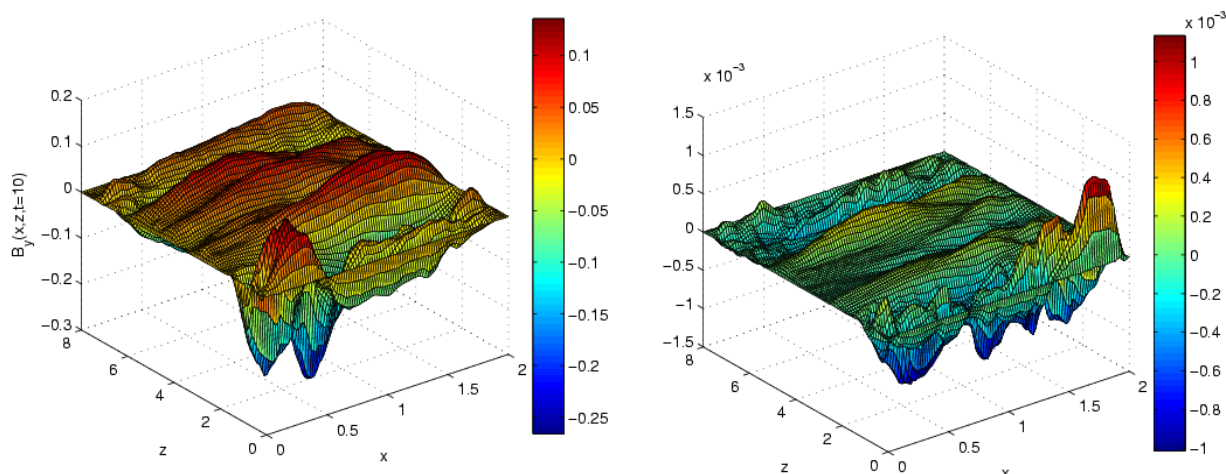
رابطه تغییرات دمای محیط با ارتفاع به صورت زیر است که شامل ناحیه انتقال جو خورشید است:

$$T_0(z) = \frac{1}{\gamma} T_c [1 + d_t + (1 - d_t) \tanh(\frac{z - z_{\omega}}{z_{\omega}})], \quad (7)$$

در اینجا،  $d_t = T_{ch} / T_c$  است،  $T_{ch}$  دمای رنگین سپهر پایین و  $T_c$  دمای تاج خورشید است که از یکدیگر توسط ناحیه انتقال



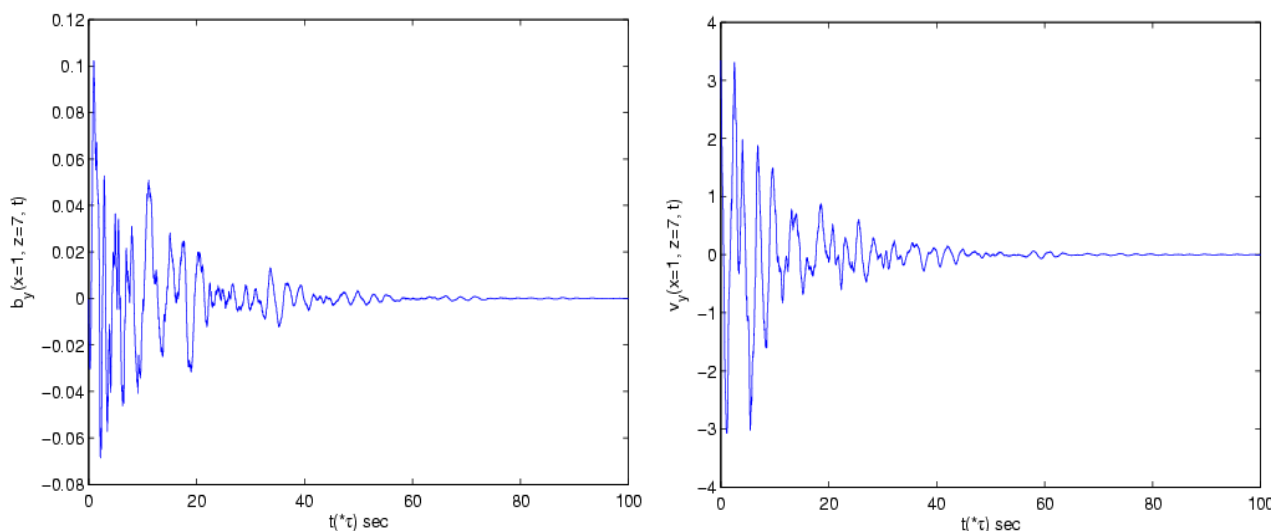
شکل ۲. نمودارهای تغییرات مؤلفه عرضی سرعت اختلالی تیوب را نسبت به مکان  $(x, z)$  برای  $k = \pi/8$  نشان می‌دهد. برای مقایسه، دو گام زمانی  $t = 10\tau(s)$  و  $t = 80\tau(s)$  در نظر گرفته شده‌اند.



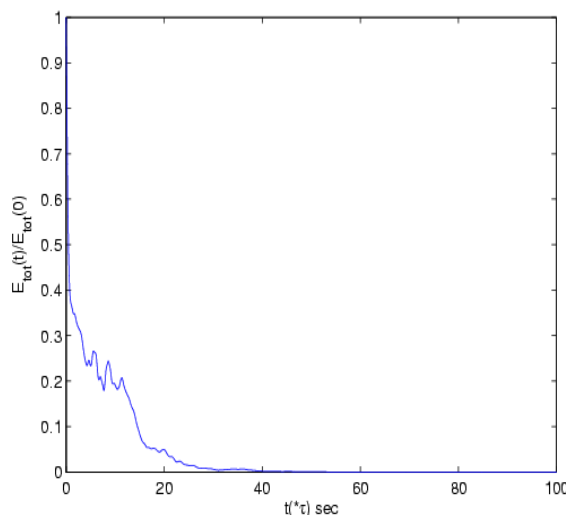
شکل ۳. نمودارهای تغییرات مؤلفه عرضی میدان مغناطیسی اختلالی را نسبت به مکان  $(x, z)$  برای  $k = \pi/8$  نشان می‌دهد. برای مقایسه، دو گام زمانی  $t = 10\tau(s)$  و  $t = 80\tau(s)$  در نظر گرفته شده‌اند.

کروموسفر،  $T_c = 3 \times 10^4 K$  دمای تاج،  $\alpha = 2$ ،  $\tau = 13 s$ ، مقیاس زمانی آلفونی و  $R = 8300 m^2 / sK$  ثابت جهانی گاز. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب، نمودارهای تغییرات سرعت اختلالی و میدان مغناطیسی اختلالی در تیوب شار را نسبت به مکان  $(x, z)$  نشان می‌دهند. برای مقایسه، نمودارها برای دو گام زمانی  $t = 10\tau(s)$  و  $t = 80\tau(s)$  را نشان دادیم. در این شکل‌ها، سرعت به مقدار  $V_{A,0}$  بهنجار شده است. در حضور ناحیه انتقال و طبقه‌بندی گرانشی لایه‌ها، فرایند میرایی بیشتر با زمان اتفاق می‌افتد تا با مکان.

شعاع تیوب شار،  $a = 1000 km$ ، پهنای تب اولیه،  $V_0 = 50 km/s$ ، سرعت اولیه پلاسما،  $T_0 = 14000 K$ ، دمای اولیه،  $p_0 = 3/7 \times 10^{-2} N/m^2$  فشار اولیه،  $B_0 = 1/2 \times 10^{-3} T$ ،  $\rho_0 = 1/9 \times 10^{-11} kg/m^3$  میدان مغناطیسی تعادلی،  $V_{A,0} = 50 km/s$ ، سرعت آلفون اولیه،  $\mu = 0/6$  شتاب گرانش در سطح خورشید، جرم مولکولی متوسط،  $H = 712 km$  ارتفاع مقیاس فشار،  $k = \pi/8$  و  $k_v = \pi/3$  (اعداد موج بی‌بعد)،  $z_r = 6000 km$  ارتفاع مرجع،  $T_{ch} = 15 \times 10^4 K$  دمای



شکل ۴. نمودارهای تغییرات سرعت و میدان مغناطیسی اختلالی بر حسب زمان را برای موقعیت  $x = 1000 km$  و  $z = 7000 km$  نشان می‌دهد. اعداد روی محورهای بعد هستند.



شکل ۵. نمودار تغییرات انرژی کل تیوب بر حسب زمان را برای  $d = 0.3a$  نشان می‌دهد.

گسترش می‌یابد که به عنوان لختی در مقابل نوسانات عمل می‌کند.

شایان ذکر است که تأثیر طبقه‌بندی چگالی روی میدان مغناطیسی ناچیز است. این موضوع با داده‌های رصدی تلسکوپ نوری خورشیدی از پدیده‌های کروموسفری در توافق است [۱۶].

شکل ۵ نمودار تغییرات زمانی انرژی کل تیوب را نشان می‌دهد.

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho_0 (v_x^2 + v_z^2) + \frac{b_x^2 + b_z^2}{8\pi}$$

تغییرات فوق از رابطه به دست می‌آید. در نمودار زیر، انرژی کل به مقدار کل اولیه‌اش به‌دست می‌آید. این نمودارها نشان می‌دهند که گرادیان‌های

شکل ۴، نمودارهای تغییرات سرعت اختلالی و میدان مغناطیسی اختلالی را با زمان نشان می‌دهند. در مرحله اول اختلاط فازی، میرایی اتفاق می‌افتد، این رفتار می‌تواند به خاطر حضور ناحیه انتقال با گرادیان چگالی و دما باشد.

در اولین ارتفاع، دامنه کل نوسانات سرعت اختلالی مقادیری نزدیک به مقادیر اولیه دارند. با افزایش ارتفاع (در  $z = 7000 km$  دامنه سرعت اختلالی برخلاف رفتار میدان مغناطیسی اختلالی، افزایش می‌یابد. با این وجود در هر دو، رفتار نمایی میرایی مشهود است. به عبارتی، دامنه نوسانات سرعت با افزایش ارتفاع به خاطر کاهش قابل ملاحظه چگالی

چگالی ناشی از حضور ناحیه انتقال باعث وقوع اختلاط فازی افزایشی در امواج آلفون ایستا می شود.

#### ۴. نتیجه گیری

برای بررسی نقش ناحیه انتقال بین کروموسفر و تاج خورشید، رفتار امواج آلفون در یک تیوب شار مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت. این امواج می توانند در ساختارهای باز مانند سیخک ها یافت شوند و البته یک سازوکار مؤثر برای گرمایش تاج خورشید را معرفی می کنند. چنین ساختارهایی در مقایسه با حفره های تاجی بسیار کوچک هستند.

در این مقاله، ما تیوب شاری با جریان پایا و میدان مغناطیسی متغیر در نظر گرفتیم. تیوب مفروض در ارتفاعات پایین تر چگال بوده اما با افزایش ارتفاع رقیق تر می شود. تغییرات چگالی در راستای محور تیوب شار منجر به سرعت آلفون متغیر شد

#### مراجع

(پدیده اختلاط فازی). با این شرایط، نتایج حاصل در نمودارها نشان دادند که اختلاط فازی امواج آلفون بیشتر در زمان مشاهده اتفاق می افتد تا در مکان. دامنه سرعت اختلالی با افزایش ارتفاع افزایش می یابد در حالی که دامنه میدان مغناطیسی کاهش را نشان می داد. با این وجود، این هر دو کمیت اختلالی با گذر زمان کاهش دامنه را نشان دادند.

نقش ناحیه انتقال در میرایی امواج که با تغییرات دما با ارتفاع وارد شد، نشان داد که این ناحیه می تواند به عنوان عاملی برای شتابدار کردن آهنگ میرایی باشد. نمودار انرژی نیز کاهش مقدار دامنه با زمان را به صورت یک تابع نمایی به دست داد. با توجه به نمودار انرژی کل تیوب، تقریباً در نزدیکی  $t = 40\tau = 520s$  میرایی رخ می دهد. این مقیاس زمانی معادل  $1/6$  دقیقه است و در توافق با طول عمر یک تیوب شار مغناطیسی نوعی مانند سیخک (۱۵-۵ دقیقه) [۱۷] است.

1. V M Nakariakov and D Y Kolotkov, *Annual Rev. of Astron. & Astrophys.* **58** (2020) 441.
2. M Ruderman, D Berghmans, M Goossens, and S Poedts, *Astron. & Astrophys.* **320** (1997) 305.
3. S Moriyasu, T Kudoh, T Yokoyama, and K Shibata, *Astrophys. J.* **601** (2004) 107.
4. J Heyvaerts and E R Priest, *Astron. & Astrophys.* **117** (1983) 220.
5. D E Osterbrocks, *Astrophys. J.* **134** (1961) 347.
6. H Safari, S Nasiri, K Karami, and Y Sobouti, *Astron. & Astrophys.* **448** (2006) 375.
7. D B Melrose and M A Sympton, *Australian J. of phys.* **30** (1977) 647.
8. B C Low, *NATO ASI Series C* **481** (1996) 133.
9. R Erdelyi and I Ballai, *Astron. Nachr.* **328** (2007) 726.
10. T M Mishonov, Y G Maneva, M V Stoev and A M Varonov, *Magnetohydrodynamics* **55** (2019) 295.
11. T Kudoh and K Shibata, *K. Astrophys. J.* **514** (1999) 493.
12. P D Smith, D Tsiklauri, and M S Ruderman, *Astron. & Astrophys.* **475** (2007) 1111.
13. P J Cargill, D S Spicer, and S T Zalesak, *Astrophys. J.* **488** (1997) 854.
14. K Murawski and T V Zaqarashvili, *Astron. & Astrophys.* **519** (2010) A8.
15. E R Priest, "Solar Magnetohydrodynamics", Reidel, Dordrecht. (1982)
16. G Verth, M Goossens, and J S He, *Astrophys. J. Lett.* **733** (2011) 15.
17. T V Zaqarashvili and R Erdelyi, *Space Sci. Rev.* **149** (2009) 335.