

Research Paper



Study of Interaction of the Magnetoacoustic-gravity Waves  
with the Solar Macro Spicules



Zahra Fazel\*<sup>1</sup>



This paper is an open access and licensed under the CC BY NC license.



DOI:10.22034/STRAP.2023.15722

**Reference to this article:** Fazel, Z. (2023). Study of interaction of the magnetoacoustic-gravity waves with the solar macro spicules. *Scientific Researches in Theoretical and Applied Physics*, 1(1), 47-52.

Keywords

A B S T R A C T

Magnetoacoustic waves are longitudinal waves in the presence of magnetic forces which can be generated and propagated in the solar atmospheric waveguides, for examples: sunspots in the photosphere, spicules in the chromosphere, coronal loops in the corona and etc. Each of these phenomena as the waveguides can be considered in the form of a magnetic flux tube, and the behavior of waves in them can be studied by providing a model. For this purpose, a two-dimensional Cartesian model is used to solve the wave equations, and a simulation code is used to solve them numerically. In this work, the effects of gravity and viscosity are considered in the equations of the magnetohydrodynamic (MHD) waves. Our goal is to study and investigate the damping of the magnetoacoustic-gravity waves in solar magnetic flux tubes. The results which are presented in the form of time-space diagrams of the velocity and magnetic field variables, will effectively show the process of the wave damping.

Received: 2022/09/14

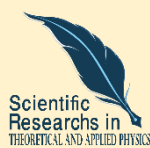
Accepted: 2022/12/21

Available: 2023/06/10

\* Corresponding Author: Zahra Fazel  
E-mail: z\_fazel@tabrizu.ac.ir

1. Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

## مقاله پژوهشی



## مطالعه برهم کنش امواج مغناطوسوتی-گرانشی با ماکرو اسپیکول‌های خورشیدی



زهرا فاضل<sup>۱\*</sup>



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کرییتیو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: فاضل، زهرا. (۱۴۰۱). مطالعه برهم کنش امواج مغناطوسوتی-گرانشی با ماکرو اسپیکول‌های خورشیدی. پژوهش‌های علمی در فیزیک نظری و کاربردی. ۱(۱) ۴۷-۵۲.

DOI:10.22034/STRAP.2023.15722



## چکیده

امواج مغناطوسوتی، امواج طولی در حضور نیروهای مغناطیسی هستند که در موجبرهای اتمسفر خورشید تولید و منتشر می‌شوند، به عنوان مثال، لک‌های مغناطیسی در نور کره، اسپیکول‌ها در رنگین کره و حلقه‌های تاجی در تاج خورشید و غیره. هر کدام از این پدیده‌ها را به عنوان موجبر می‌توان به صورت یک تیوب شار مغناطیسی در نظر گرفت و با ارائه مدلی رفتار امواج در آن‌ها را مطالعه کرد. برای این منظور، یک مدل دو بعدی دکارتی در حل معادلات موج به کار می‌رود و برای حل عددی آن‌ها از یک برنامه شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. در این کار، اثرات گرانش و چسبندگی در معادله امواج مغناطوسوتی در دینامیک در نظر گرفته می‌شوند. هدف ما، مطالعه و بررسی میرایی امواج مغناطوسوتی-گرانشی در تیوب‌های شار مغناطیسی خورشیدی است. نتایج حاصل که به صورت نمودارهای زمانی-مکانی متغیرهای سرعت و میدان مغناطیسی ارائه می‌شوند روند میرایی امواج را به طور موثر نشان خواهند داد.

## کلیدواژه‌ها

امواج مغناطوسوتی، اتمسفر خورشید، تیوب‌های شار مغناطیسی، اتلاف

دریافت شده: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳

پذیرفته شده: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

منتشر شده: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

\* نویسنده مسئول: زهرا فاضل

رایانامه: z\_fazel@tabrizu.ac.ir

## مقدمه

تاج خورشید سومین لایه از اتمسفر بیرونی خورشید است که در زمان کسوف قابل رویت می‌گردد. تاج خورشید یک ناحیه بسیار شفاف با چگالی بسیار پایین و دمای بسیار بالا است که این تناقض بصورت مساله گرمایش تاج در فیزیک خورشید مطرح است [1]. برای حل این مساله، کارهای زیادی صورت گرفته است. یکی از نظریه‌های مهم در بررسی گرمایش اتمسفر بیرونی خورشید، حضور امواج مغناطوسوتی MHD در پدیده‌های مغناطیسی اتمسفر خورشید است [2]. این پدیده‌ها که پلاسماهای مغناطیسی هستند به عنوان موجبر عمل می‌کنند. به عنوان مثال می‌توان به اسپیکول-های رنگین کره و حلقه‌های تاجی اشاره نمود. انتشار امواج یکی از مکانیسم-های مهم در انتقال انرژی به لایه‌های بالاتر اتمسفر خورشید و گرمایش لایه‌ها محسوب می‌شود. اندرکنش امواج مغناطوسوتی با محیط، منجر به رهایی انرژی مغناطیسی امواج و تبدیل آن‌ها به انرژی جنبشی محیط می‌گردد. امواج مغناطوسوتی-گرانشی نوع کامل امواج مغناطوسوتی-دینامیک هستند که در موجبرهای اتمسفر خورشید می‌توانند تحریک، تولید و انتشار یابند [3]. میرایی امواج کاندیدای مهمی در گرمایش رنگین کره و تاج خورشید محسوب می‌شود. مکانیسم میرایی امواج می‌تواند به روشهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد مانند اختلاط فازی [4]، جفت شدگی مدها [5] و جذب تشدید [6, 7].

ماکرو اسپیکول‌ها که معمولا به عنوان جت‌های خورشیدی توصیف می‌شوند، پدیده‌هایی با طول بزرگتر از اسپیکول معمولی و با طول عمر طولانی‌تر (در حدود ۱۵-۱۰ دقیقه) هستند و اکثرا در خطوط طیفی ناحیه انتقال مرئی هستند [8].

در این مقاله، برای مطالعه اندرکنش امواج مغناطوسوتی-گرانشی با یک تیوب شار مغناطیسی (یک ماکرو اسپیکول) و مشاهده اتلاف امواج، از کد شبیه-سازی TMC<sup>۱</sup> استفاده خواهد شد. برای حل معادلات امواج که شامل معادله پایستگی ماده، پایستگی تکانه و معادله القا می‌باشد، 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 گردید.

## مدل تئوری

در این مقاله، یک مدل دوبعدی دکارتی  $(x, z)$  برای تیوب شار مغناطیسی مفروض در نظر گرفته شده است. اثر گرانش بخاطر تغییرات چگالی تیوب با ارتفاع آن و اثر چسبندگی در محاسبات وارد خواهند شد. پلاسما مورد بررسی تراکم پذیر فرض خواهد شد. به خاطر حذف امواج آلفون، تغییرات در راستای محور  $y$  در نظر گرفته نخواهند شد. معادلات MHD غیر ایده‌آل حاکم بر دینامیک پلاسما به صورت زیر می‌باشند:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (۱)$$

$$\rho \partial \vec{V} / \partial t + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} + \rho \vec{g} + \rho \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (۲)$$

$$\partial \vec{B} / \partial t = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}), \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (۳)$$

$$\partial p / \partial t + \nabla \cdot (p \vec{V}) = (1 - \gamma) p \nabla \cdot \vec{V} \quad (۴)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی جرمی،  $p = \frac{k_B}{m} \rho T$  فشار گاز،  $T$  دما،  $k_B$  ثابت بولتزمن،  $\vec{V}$  سرعت پلاسما،  $\vec{B}$  میدان مغناطیسی،  $\vec{g} = (0, 0, g)$  شتاب گرانش خورشید که برابر است با  $g = 272 m/s^2$  و  $\nu$  ضریب چسبندگی می‌باشند. مقدار  $\nu \rho$  برای یک پلاسما هیدروژنی کاملا یونیزه،  $1 s^{-1} kg m^{-1} T^{5/2} \times 10^{-17} \times 2.2$  است [9].

در مدل دوبعدی، برای مطالعه اندرکنش امواج با پلاسما محیط، باید معادلات MHD را حل کنیم. لذا با ایجاد اختلالی در تیوب شار به صورت پالس اولیه در سرعت، معادلات MHD حاکم بر مساله را بررسی می‌کنیم.

## اختلال

سرعت و میدان مغناطیسی در تیوب شار به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{V} = V_0 \hat{k} + \vec{V}_1(x, z, t) \hat{j} \\ \vec{B} = B_0 \hat{k} + \vec{B}_1(x, z, t) \quad (۵)$$

که در آن  $V_0$  و  $B_0$  سرعت و میدان مغناطیسی اولیه یا تعادلی پلاسما هستند که مقدار عددی آن‌ها در جدول ۱ آمده است. کمیات  $\vec{V}_1$  و  $\vec{B}_1$  مقادیر اختلالی می‌باشند که در زیر مولفه‌های آن‌ها نوشته شده است.

در حالت تعادل، نیروی گرادیان فشار با نیروی گرانش در توازن است، لذا داریم:  $-\nabla \rho + \rho \vec{g} = 0$  (تعادل هیدروستاتیکی در تیوب). فشار و چگالی تعادلی نیز به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$p_0(z) = p_0 e^{-z/H} \\ \rho_0(z) = \rho_0 e^{-z/H} \quad (۶)$$

که در آن،  $H = \frac{k_B T}{mg}$  ارتفاع مقیاس فشار می‌باشد.

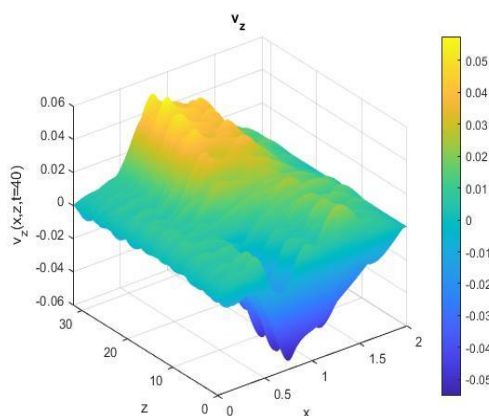
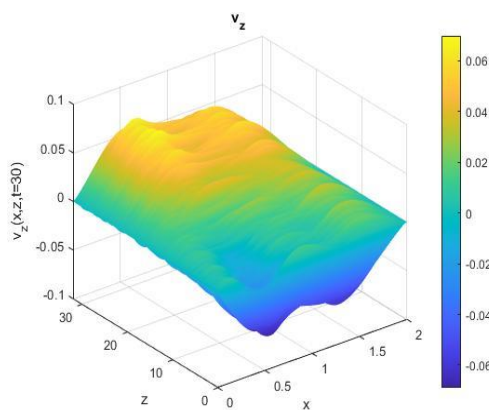
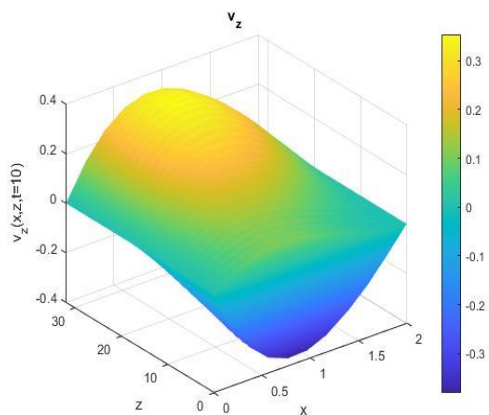
با اعمال این فرضیات، معادلات (۴-۱) را ابتدا خطی‌سازی کرده، سپس بی بعد می‌کنیم. برای حل معادلات از شرایط اولیه و مرزی زیر استفاده می‌گردد:

$$[v_x, 0, v_z](x, z, t=0) = v_{A0} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{d}\right)^2\right] \\ \times \sin(kz) \exp\left(\frac{z}{H}\right) \quad (۷)$$

$$[b_x, 0, b_z](x, z, t=0) = A_B \sin(\pi x) \sin(\pi z) \quad (۸)$$

شکل ۱. نمودار تغییرات سرعت اختلالی بر حسب مکان  $(x, z)$  را در زمان  $t = 0$  نشان می‌دهد.

شکل ۱. نمودار تغییرات سرعت اختلالی بر حسب مکان در  $t = 0$ .



شکل ۲. نمودارهای تغییرات مولفه قائم سرعت اختلالی بر حسب مکان در گام‌های زمانی  $t = 10\tau$ ،  $t = 30\tau$  و  $t = 40\tau$  به ترتیب از بالا به پایین را نشان می‌دهد. مقادیر عددی کمیات روی محورهای بی‌بعد می‌باشند.

که در آن،  $v_{A0} = \sqrt{\frac{B_0^2}{\rho\mu_0}}$  سرعت آلفون اولیه،

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tesla.m / A}$  ضرایب تراوایی، دامنه اختلال میدان مغناطیسی، شعاع تیوب،  $d$  پهنای پالس اولیه،  $k$  عدد موج می‌باشند. شرایط مرزی نیز عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} v_{x,z}(x=0, z, t) &= v_{x,z}(x=2, z, t) \\ v_{x,z}(x, z=0, t) &= v_{x,z}(x, z=30, t) \\ b_{x,z}(x=0, z, t) &= b_{x,z}(x=2, z, t) \\ b_{x,z}(x, z=0, t) &= b_{x,z}(x, z=30, t) \end{aligned} \quad (9)$$

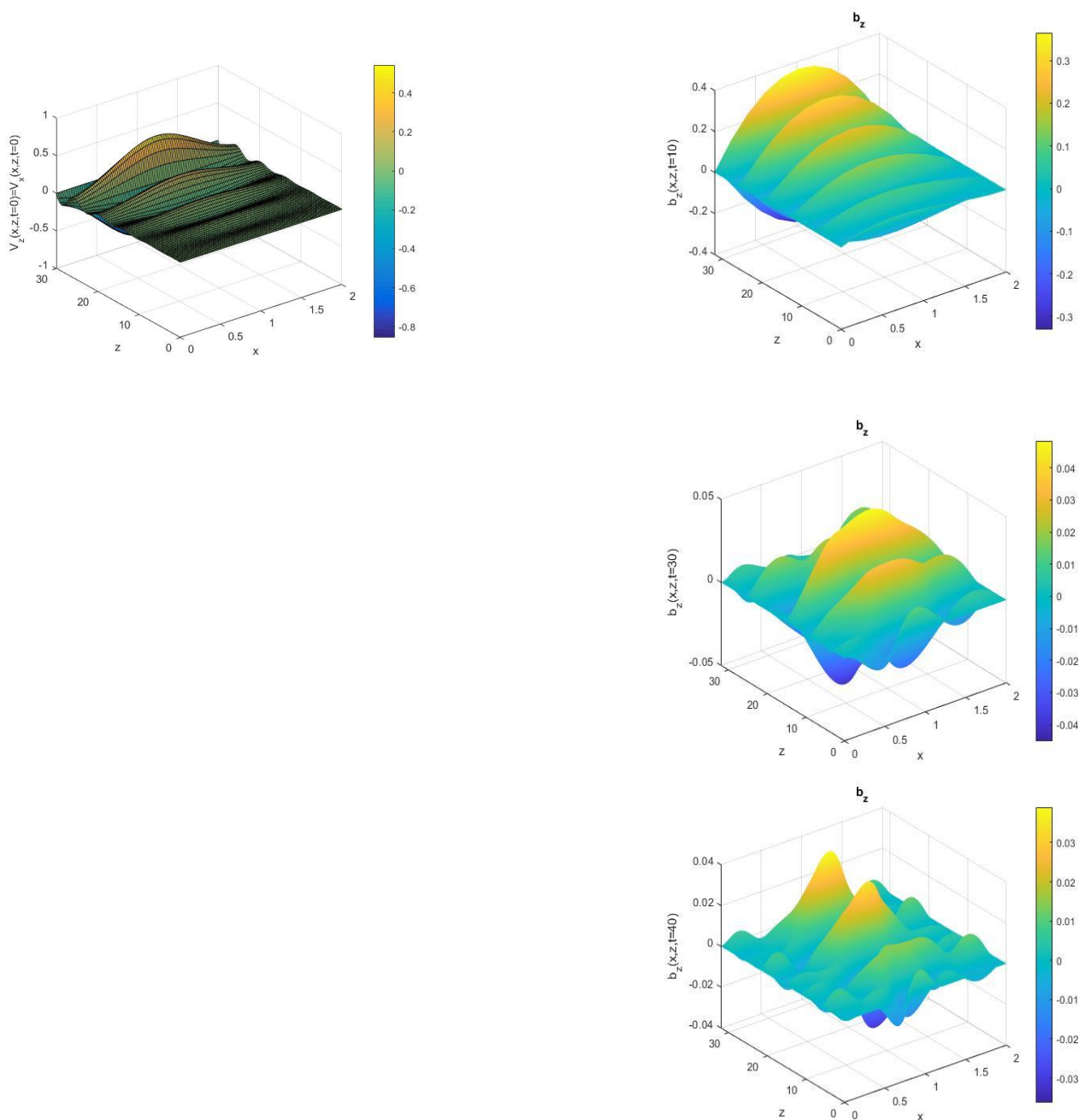
اعداد در نظر گرفته شده برای مختصات  $(x, z)$  در معادله (۹)، مقادیر بی‌بعدی هستند که برای ابعاد جعبه شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

### نتایج عددی

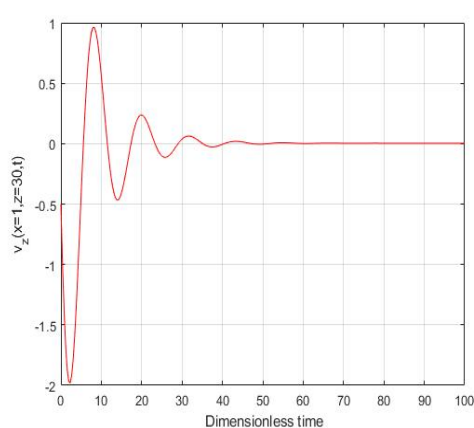
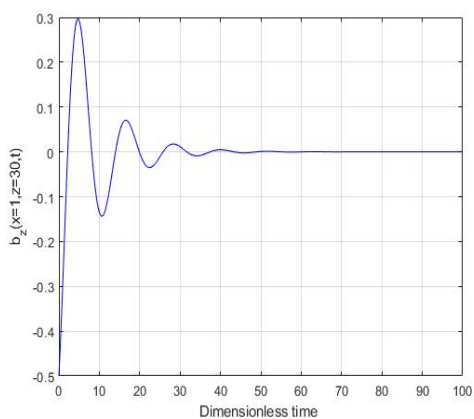
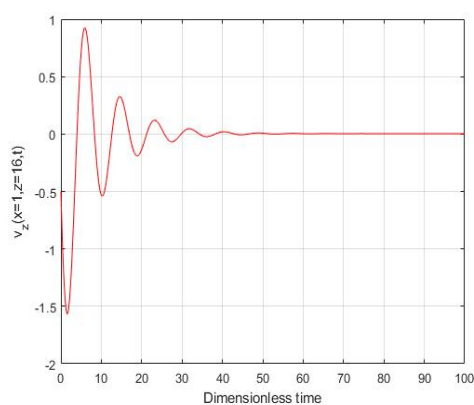
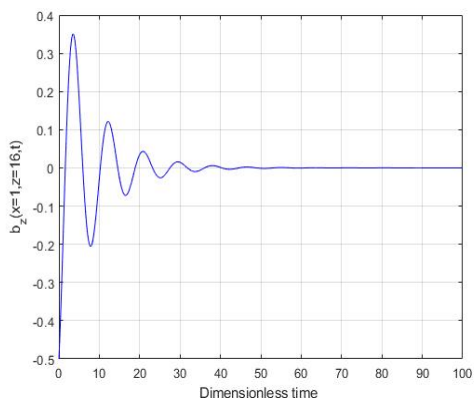
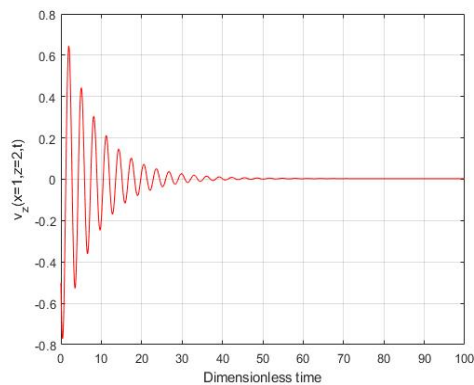
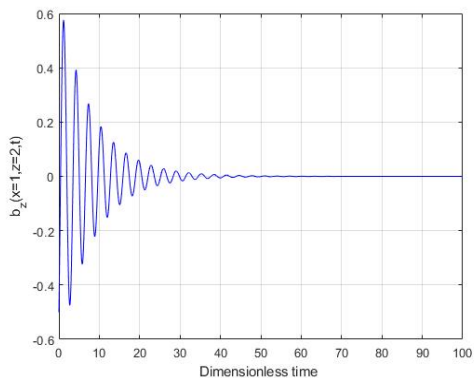
برای حل معادلات مغناطوهیدرودینامیک خطی و بی‌بعد شده در برنامه شبیه‌سازی، از روش دیفرانسیل محدود برای مشتق‌گیری مکانی و از روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ برای مشتق‌گیری زمانی استفاده می‌شود. جعبه شبیه‌سازی مفروض دارای ابعاد  $x = (0, 2)$  و  $z = (0, 30)$  است که راستای محور  $x$  متناظر با قطر تیوب شار و راستای محور  $z$  متناظر با ارتفاع آن می‌باشد. داده‌های خروجی برنامه تا دقت ۱۷ رقم اعشار داده می‌شود. گام زمانی نیز  $0.001$  در نظر گرفته شده است. در جدول زیر مقادیر کمیات آورده شده است.

جدول ۱. مقادیر عددی کمیات فیزیکی ثابت در تیوب شار

$a = 500 \text{ km}$	شعاع تیوب شار
$h = 10000 \text{ km}$	ارتفاع تیوب شار
$d = 0.5a$	پهنای پالس اولیه
$V_0 = 50 \text{ km / s}$	سرعت اولیه پلاسمای تیوب
$T_0 = 14000 \text{ K}$	دما
$p_0 = 3.7 \times 10^{-2} \text{ N / m}^2$	فشار اولیه
$\rho_0 = 1.9 \times 10^{-10} \text{ kg / m}^3$	چگالی اولیه
$B_0 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ T}$	میدان مغناطیسی اولیه
$V_{0A} = 50 \text{ km / s}$	سرعت آلفون
$C_0 = 20 \text{ km / s}$	سرعت صوت
$\mu = 0.6$	جرم مولکولی متوسط
$R = 8300 \text{ m}^2 / \text{sK}$	ثابت عمومی گاز
$H = 712 \text{ km}$	ارتفاع مقیاس فشار
$\tau = 10 \text{ s}$	مقیاس زمانی مشخصه
$k = \pi / 3$	عدد موج
$A_s = 10^{-8}$	دامنه اختلال میدان مغناطیسی



شکل ۳. نمودارهای تغییرات مولفه قائم میدان مغناطیسی بر حسب مکان در گام‌های زمانی  $t = 10\tau$ ،  $t = 30\tau$  و  $t = 40\tau$  به ترتیب از بالا به پایین را نشان می‌دهد. مقادیر عددی کمیات روی محورها بی بعد می‌باشند.



شکل ۵. نمودار تغییرات زمانی مولفه  $z$  میدان مغناطیسی اختلالی برای موقعیت‌های مختلف جعبه شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. از بالا به پایین به ترتیب موقعیت ته، میانه و قله تیوب می‌باشند.

شکل ۴. نمودار تغییرات زمانی مولفه  $z$  سرعت اختلالی برای موقعیت‌های مختلف جعبه شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. از بالا به پایین به ترتیب موقعیت ته، میانه و قله تیوب می‌باشند.

### بحث و نتیجه‌گیری

برای مطالعه اندرکنش امواج مغناطوسوتی-گرانشی با یک موجبر خورشیدی، یک تیوب شار مغناطیسی در نظر گرفتیم که در حالت تعادل دارای سرعت و میدان مغناطیسی اولیه یکنواخت در راستای محور تیوب (محور Z) بود. با در نظر گرفتن تغییرات فشار و چگالی اولیه تیوب (معادله ۶) به صورت یک تابع نمایی از ارتفاع Z، لایه‌بندی گرانشی در ساختار پلاسما در نظر گرفته شد. چنانچه، پلاسما در ارتفاعات پایین تیوب دارای چگالی بالا بوده اما با افزایش ارتفاع رقیق تر می‌گردد.

همچنین در این ساختار همدمایی فرض شد و اثرات چسبندگی تیوب نیز در معادلات حرکت وارد گردید. برای تولید و انتشار امواج در سیستم، اختلافی به صورت یک پالس سرعت ایجاد شد. روند انتشار اختلال اولیه در تیوب بر حسب مکان و زمان با توجه به شرایط اولیه و مرزی تعریف شده در مساله، در نمودارهای ۲، ۳، ۴ و ۵ نشان داده شد.

تغییرات سرعت و میدان مغناطیسی اختلالی با مکان و زمان، انتشار اختلال را با کاهش محسوس دامنه نوسانات بدست دادند. با توجه به نمودارها، میرایی امواج با گذشت زمان بارزتر از میرایی در مکان اتفاق افتاد. به عبارتی اثر گرانش در اتلاف امواج ناچیز بوده و چسبندگی سیال نقش اصلی را به عهده داشته است. در اثر میرایی امواج، انرژی امواج کاهش یافته و به صورت انرژی جنبشی به محیط منتقل می‌شود. زمان میرایی بدست آمده از محاسبات (۱۵-۱۰ دقیقه)  $t_d = 7.5 \text{ min}$  کوتاهتر از طول عمر رصد شده ماکرو اسپیکول (۱۵-۱۰ دقیقه) [8] بدست می‌آید که نشان می‌دهد توافق خوبی بین داده‌های نظری و رصدی برقرار است.

### منابع و مراجع

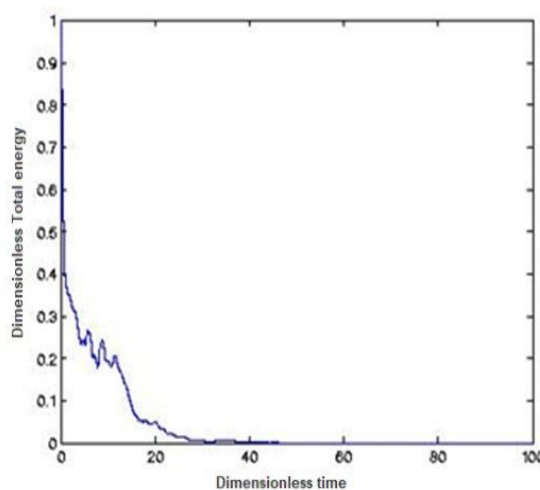
- [1] B. Elden, Die deutung der emissionslinien im spektrum der sonnenkorona, *Zeitschrift fur Astrophysik*, 22 (1943) 30.
- [2] D.G. Wentzel, Hydromagnetic surface waves on cylindrical fluxtubes, *Astronomy & Astrophysics*, 76 (1979) 20-23.
- [3] K. Murawski, A.K. Srivastava, J.A. McLaughlin, R. Oliver, Numerical simulations of magnetoacoustic-gravity waves in the solar atmosphere, *Solar Physics*, 283 (2013) 383-399.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-012-0202-7>
- [4] J. Heyvearts, E.R. Priest, Coronal heating by phase-mixed shear Alfvén waves, *Astronomy & Astrophysics*, 117 (1983) 220-234.
- [5] Z. Fazel, Mode coupling in solar spicule oscillations, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 16 (2016) 17-23.  
<https://doi.org/10.1088/1674-4527/16/1/017>
- [6] H. Safari, S. Nasiri, K. Karami, Y. Sobouti, Resonant absorption in dissipative flux tubes, *Astronomy & Astrophysics*, 448 (2006) 375-378.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/20053588>
- [7] P. Antolin, T. Vandoorselaere, Influence of resonant absorption on the generation of kelvin-helmholtz instability, *Frontiers in Physics*, 7 (2019) 1-16.  
<https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00085>
- [8] I.P. Loboda, S.A. Bogachev, What is a macro spicule?, *Astrophysical Journal*, 871 (2017) 230-244.  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aafa7a>
- [9] E.R. Priest, *Solar magnetohydrodynamics*, Dordrecht, Reidel, (1982).

شکل ۲، نمودارهای مربوط به تغییرات مولفه Z سرعت اختلالی با مکان را برای چهار گام زمانی  $t = 10, 30, 40$  (بی بعد) نشان می‌دهند (با ضرب کردن زمان بی بعد در مقیاس زمانی مشخصه  $\tau$ ، می‌توان زمان بر حسب ثانیه را بدست آورد).

شکل ۳، نمودارهای مربوط به تغییرات مولفه Z میدان مغناطیسی اختلالی با مکان را برای چهار گام زمانی فوق الذکر نمایش می‌دهند. در نمودارهای شکل‌های (۳ و ۲)، با افزایش ارتفاع نوسانات نیز افزایش یافته اما با گذشت زمان دامنه تغییرات مکانی سرعت و میدان مغناطیسی یک روند کاهشی نشان می‌دهد که بیانگر میرایی امواج در پلاسما بر حسب زمان است. همچنین در شکل‌های (۴ و ۵)، نمودارهای مربوط به تغییرات زمانی سرعت و میدان مغناطیسی اختلالی برای موقعیت‌های مختلف جعبه شبیه‌سازی نشان داده شده‌اند. همه کمیت‌ها در نمودارها بدون بعد می‌باشند. با توجه به ابعاد جعبه مفروض، موقعیت‌های  $(x, z) = (1, 2), (1, 16), (1, 30)$  انتخاب شدند. این مقادیر عددی با ضرب کردن در شعاع تیوب شار، بر حسب کیلومتر بیان می‌شوند.

در شکل ۴، نمودارهای زمانی در هر سه موقعیت ته، نقاط میانی و قله تیوب، میرایی امواج مشاهده می‌شود. در این نمودارها، دامنه نوسانات به طور موثری با سپری شدن زمان کاهش می‌یابند. زمان میرایی امواج را می‌توان از نمودار انرژی کل که مجموع انرژی جنبشی و انرژی مغناطیسی است بدست آورد.

شکل ۶، نمودار تغییرات زمانی انرژی کل تیوب را که از رابطه  $E_{tot} = \frac{1}{2} \rho_0 (v_x^2 + v_z^2) + \frac{b_x^2 + b_z^2}{8\pi}$  بدست می‌آید نشان می‌دهد.



شکل ۶. تغییرات انرژی کل با زمان.

زمان میرایی با توجه به شکل ۶، در حدود  $t_d = 45\tau = 7.5 \text{ min}$  می‌باشد که در مقایسه با طول عمر یک ماکرو اسپیکول (۱۵-۱۰ دقیقه)، قابل قبول است. چنانچه، قبل از بین رفتن ماکرو اسپیکول، میرایی امواج مغناطوسوتی-گرانشی اتفاق می‌افتد.