

میرائی امواج مغناطو صوتی-گرانشی در تیوبهای شار مغناطیسی در کروموسفر خورشید

فاضل، زهرا؛ فرشباف، فریبا
دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز-ایران

چکیده

امواج مغناطو صوتی-گرانشی، امواجی در حضور نیروهای مغناطیسی، گرادیان فشار و گرانش هستند که میتوانند در موجبرهای ناحیه کروموسفر خورشید (به عنوان مثال در اسپیکولها) تولید و منتشر شوند. اسپیکولها را میتوان به صورت تیوبهای شار مغناطیسی در نظر گرفت و با ارائه مدلی برای آنها رفتار امواج را مطالعه کرد. هدف ما در این مقاله، مطالعه و بررسی میرائی امواج مغناطو صوتی-گرانشی با وارد کردن عوامل اتلافی (مانند ویسکوزیته و مقاومت مغناطیسی) در معادلات مغناطو هیدرودینامیکی (MHD) مناسب میباشد. با شبیهسازی یک اسپیکول به صورت یک جعبه دوبعدی در مختصات دکارتی، معادلات MHD را با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی در آن حل کردیم. از نتایج حاصل از حل عددی این معادلات، نمودارهای تغییرات زمانی سرعت و میدان مغناطیسی اختلالی و نمودار تغییر زمانی انرژی کل امواج را بدست آوردیم. این نمودارها، میرائی سریع امواج با زمان در شرایط اسپیکولی را نشان دادند.

Damping of magnetoacoustic-gravity waves in magnetic flux tubes in the solar chromosphere

Fazel, Zahra, Farshbaf, Fariba
Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz-Iran

Abstract

Magnetoacoustic-gravity waves are the waves at the presence of magnetic, pressure gradient and gravitation forces that can generate and propagate in the waveguides of the solar chromosphere (i.e. in spicules). Spicules can be considered as the magnetic flux tubes and one can study the behavior of waves by providing a model. Our purpose in this paper is the study and investigation of the damping of the magnetoacoustic-gravity waves by applying the dissipative agencies (viscosity and magnetic resistivity) in the MHD equations. By simulating a spicule as a two-dimensional box in Cartesian coordinates, the MHD equations were solved considering the initial and boundary conditions in it. From the obtained results of the numerical solution of these equations, we obtained the plots of the temporal variations of the perturbed velocity and magnetic field, and the plot of the total energy variation of the waves with time. These plots demonstrate the fast damping of waves with time in the spicules conditions.

مقدمه

در کروموسفر خورشید، تشکیل موجبرهایی مانند اسپیکولها که به عنوان تیوبهای شار مغناطیسی در نظر گرفته می شوند، نقش مهمی در انتقال انرژی از اتمسفر پایین به تاج خورشیدی ایفا میکنند. انرژی توسط امواجی که در موجبرها منتشر می شوند، انتقال می یابد. امواج مغناطو هیدرودینامیکی (ناشی از اندرکنش میدان مغناطیسی و پلاسما) در اسپیکولها می توانند تولید و منتشر شوند. حل معادلات مربوط به این پدیدهها که تلفیق معادلات مربوط به مکانیک سیالات و الکترومغناطیس است و به معادلات MHD معروف هستند، اطلاعات وسیعی در مورد نحوه انتشار این امواج به دست میدهد. امواج مغناطو صوتی-گرانشی نوعی از این امواج هستند که در اثر حرکت پلاسما تحت تاثیر میدان مغناطیسی، گرادیان فشار و لایه بندی گرانشی در اتمسفر خورشید تولید می شوند [1]. اگر در نوشتن معادلات حاکم بر پلاسما مغناطیسه (حرکت و القا ...)، عوامل اتلافی از جمله ویسکوزیته محیط و پخش مغناطیسی را در نظر بگیریم، میتوانیم میرائی این امواج را به خوبی بدست آوریم [2]. برای حل این معادلات که به صورت معادلات دیفرانسیلی کوپل شده به یکدیگر میباشند، از روش حل عددی می توان استفاده کرد [3]. ما در اینجا ابتدا، معادلات اساسی حاکم بر سیستم را معرفی خواهیم کرد. در بخشهای بعد، وضعیت تعادلی سیستم و اختلال وارد شده بر آن را

تعریف میکنیم. در پایان، نتایج حاصل از حل معادلات را که بصورت نمودارهای تغییرات زمانی سرعت اختلالی رسم شدهاند، ارائه خواهیم کرد. در این نمودارها، میرائی امواج را نشان خواهیم داد.

معادلات اساسی مدل

برای مطالعه میرائی امواج مغناطوسوتی – گرانشی از معادلات MHD غیرایدهآل برای یک محیط ناهمگن با در نظر گرفتن لایه‌بندی گرانشی استفاده میکنیم. در شبیهسازی عددی، اسپیکول را به عنوان یک جعبه دوبعدی در مختصات دکارتی در نظر میگیریم که یک بعد آن قطر اسپیکول (محور x) و بعد دیگر آن، ارتفاع اسپیکول (محور z) میباشد. بنابراین معادلات MHD به صورت زیر خواهند بود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} + \rho \vec{g} + \rho \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \vec{V}) = (1 - \gamma) p \nabla \cdot \vec{V} \quad (4)$$

در این روابط، $P = \frac{\rho}{\mu} RT$ فشار گاز، ρ چگالی جرمی، $\vec{g} = (0, 0, -g)$ شتاب گرانشی خورشید، V سرعت جریان، B میدان مغناطیسی، T دما، $\gamma = \frac{5}{3}$ شاخص آدیاباتیک، μ_0 ضریب تراوایی مغناطیسی خلا و R ثابت عمومی گازها میباشند.

حالت تعادل

ما فرض میکنیم اسپیکول دارای سرعت اولیه یکنواخت V_0 در راستای محور (محور z) است و یک میدان مغناطیسی مستقیم و یکنواخت B_0 در راستای محور z در آن حضور دارد.

$$\vec{V}_0 = V_0 \hat{k} \quad (5)$$

$$\vec{B}_0 = B_0 \hat{k} \quad (6)$$

در این روابط، $V_0 = 25 \text{ km.s}^{-1}$ و $B_0 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ Tesla}$ میباشند. همچنین چگالی اولیه تیوب که تابع ارتفاع در نظر میگیریم، بصورت زیر تعریف میشود:

$$\rho_0(z) = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (7)$$

در این رابطه، $\rho_0 = 6.9 \times 10^{-10} \text{ kg.m}^{-3}$ و ارتفاع مقیاس فشار $H = 400 \text{ km}$ میباشند. رابطه فشار اولیه نیز مانند چگالی اولیه تعریف میگردد. در حالت تعادل، توازن نیروها برقرار است.

اختلال

یک اختلال اولیه به صورت پالس به سرعت پلازما اعمال میکنیم. این اختلال میتواند ناشی از حرکات گرانشی در کروموسفر باشد. در آغاز یعنی $t=0$ ، اختلالی دوبعدی در سرعت ایجاد میکنیم:

$$[V_x, V_z](x, z, t=0) = V_{x0} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{d}\right)^2\right] \sin(kz) \exp\left(\frac{z}{4H}\right) \quad (8)$$

حال با تعریف شرایط اولیه و اختلال مساله، معادلات اساسی (معادلات 1-4) خطی سازی و سپس بی بعد میشوند تا برای حل عددی به کمک برنامه Matlab مورد استفاده قرار گیرند. در محاسبات عددی، مقادیر پارامترها عبارتند از:

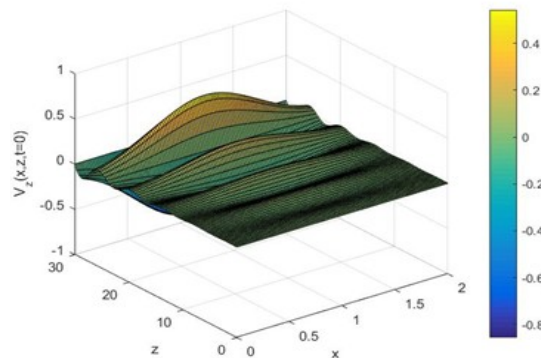
$V_{A0}=50\text{km.s}^{-1}$ سرعت آلفون، $a=250\text{km}$ شعاع اسپکول، $d=(0.5a)\text{km}$ عرض پالس اولیه،

$k=\frac{\pi}{3}$ عدد موج، $g=272\text{m.s}^{-2}$ گرانش خورشید، $T=8000\text{K}$ ، $R=8300\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$ ثابت

عمومی گازها، $\mu=0.6$ وزن مولکولی متوسط، $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{Tesla.m.A}^{-1}$ ضریب تراوایی

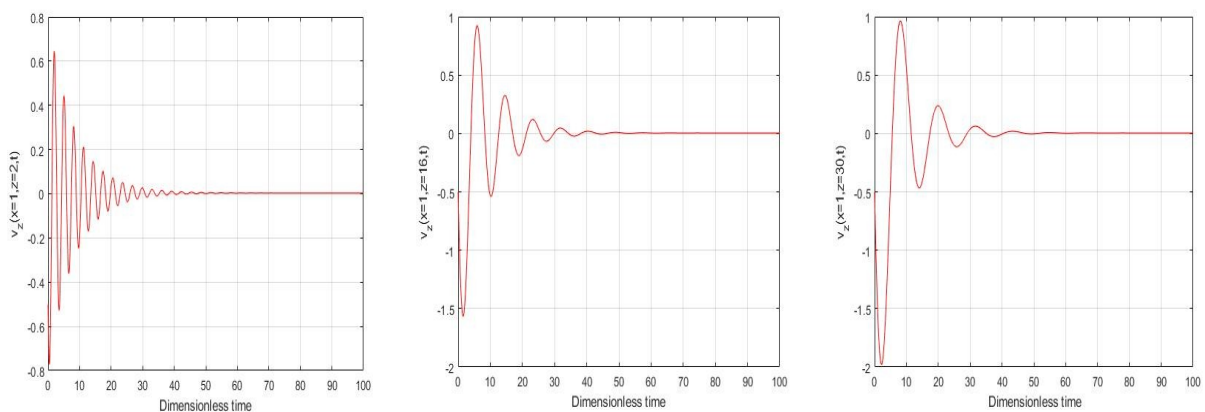
خلا، $\nu=10^3\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ضریب ویسکوزیته و $\eta=10^3\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ضریب پخش مغناطیسی میباشند.

شکل 1، سرعت اختلال اولیه را بر حسب مکان، $x=(0, 2)$ و $z=(0, 30)$ (ابعاد جعبه شبیهسازی) نشان میدهد. در شکل، کمیتها بی بعد میباشند.



شکل 1: سرعت اختلال اولیه در $t=0$ را نشان می دهد.

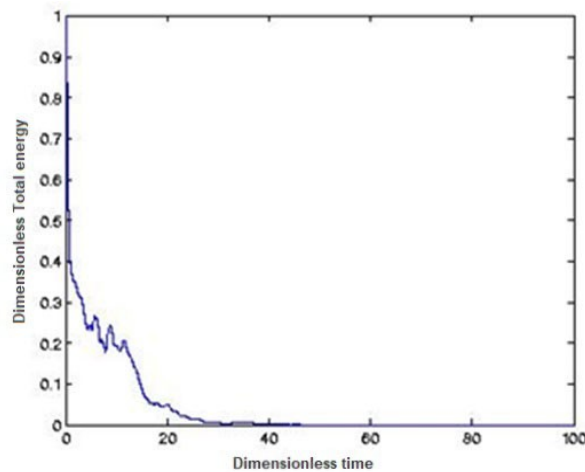
شکل 2 تغییرات مولفه قائم (مولفه z) سرعت اختلالی را با زمان بی بعد در بازه زمانی 100 واحد نشان میدهد. در این شکل، تغییرات سرعت برای موقعیت وسط جعبه ($x=1$) در z های مختلف (پایین، وسط و بالای جعبه) به ترتیب از چپ به راست مختلف نشان میدهد.



شکل 2: تغییرات زمانی مولفه قائم سرعت اختلالی در سه موقعیت ته، وسط و قله تیوب شار را نشان میدهد.

در این نمودارها، محور افقی زمان بی بعد است که با ضرب کردن در مقیاس زمان آلفون ($\tau=5\text{s}$) بر حسب ثانیه بدست می آید. در محور قائم، مقادیر سرعت اختلالی نیز به سرعت آلفون بی بعد شده اند. شکل 3، نمودار تغییرات زمانی انرژی کل امواج (مجموع انرژی جنبشی و مغناطیسی) را نشان میدهد. انرژی کل از مولفه های سرعت و میدان مغناطیسی اختلالی با

رابطه $E_{tot} = \frac{1}{2}\rho(V_x^2 + V_z^2) + \frac{(b_x^2 + b_z^2)}{8\pi}$ محاسبه میشود. در این نمودار نیز مقادیر محورهای زمان و انرژی، بی بعد هستند.



شکل 3: تغییرات زمانی انرژی کل را نشان میدهد.

نتیجه‌گیری

با اعمال پالس اولیه سرعت به حالت تعادل پلاسمای مورد نظر، اختلال در سیستم را با حل معادلات MHD مربوطه بررسی کردیم. همانطور که از معادلات MHD انتظار داشتیم، مطالعه تغییرات سرعت اختلالی، میرایی امواج با زمان را به خوبی نشان دادند. ما در شکل 2 برای مرکز تیوب شار ($x=1$)، سه موقعیت مختلف ارتفاع آن (ته، وسط و قله) را در نظر گرفتیم که میرایی امواج در زمان در تمام قسمت‌ها مشاهده گردید. با افزایش ارتفاع، تعداد نوسانات سرعت اختلالی کمتر شده اما دامنه نوسان افزایش جزئی نشان داد. نمودار تغییرات زمانی انرژی کل امواج نیز کاهش سریع این انرژی را با گذشت زمان بدست داد. اثر میرایی امواج در حول و حوش گام زمانی $t = 40$ اتفاق افتاد که در حدود $t = 40 \times 5s = 200s$ می‌باشد.

مراجع

- [1] Murawski K, Srivastava, A.K, Mclavghtlin J.A, Oliver R., (2013), Numerical Simulation of Magnetoacoustic-Gravity Waves in the Solar Atmosphere, Solar Phys., 383, 399.
- [2] Ebadi H., Hosseinpour M., (2012), Phase mixing of standing Alfvén waves with shear flows in solar spicules, Astrophys.Space Science, 343, 11.
- [3] Fazel Z, Ebadi H., (2013), On the role of transition region on the Alfvén wave phase mixing in solar spicules, Astrophys. Space Science, 346, 319.