

شبیه سازی امواج مغناطوهیدرودینامیکی حلقه‌های شار میدان مغناطیسی استوانه‌ای

شهریار اسمعیلی، مجتبی نصیری زرنندی، ندا داداشی، حسین صفری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

چکیده

نوسانات حلقه‌های تاج، و انتشار امواج مغناطوهیدرودینامیک در تاج و ناحیه‌ی گذار از تصاویر تلسکوپ فضایی تریس در سال ۱۹۹۹ مشاهده شده است. نوسانات لوله‌های شار مغناطیده به دسته‌های کینک، سوسپسی و پیچشی طبقه بندی می‌شوند. همچنین امواج در لوله‌های شار به دسته‌های دیگر سطحی، حجمی و نشتی تقسیم بندی می‌شوند. در این اینجا معادله موج مربوطه به صورت عددی حل و امواج مغناطوهیدرودینامیک در شرایط تاج شبیه‌سازی می‌شوند. نمونه‌هایی از وجوه نوسانی مذکور در نتایج حل عددی انجام شده به خوبی دیده می‌شوند.

مطالعه امواج مغناطوهیدرودینامیک در شناخت گرمایش تاج اهمیت ویژه‌ای دارند. همان گونه که در زمین شناسی از امواج برای تشخیص ساختار داخل زمین استفاده می‌شود از لرزه‌شناسی خورشیدی و لرزه‌شناسی تاج جهت تعیین ساختارهای داخل خورشید و نوسان‌های تاج استفاده می‌گردد. به طور کلی امواج و ناپایداری‌ها از اختلالات که در یک سیستم به وجود می‌آیند نشات می‌گیرند. برای پلاسما مغناطیده علاوه بر فشار گاز، نیروی فشار مغناطیسی و تنش مغناطیسی همانند نیروی بازگرداننده عمل خواهند کرد. در نتیجه تنوع امواج منتشر شده در این محیط خیلی بیشتر از امواج موجود در یک گاز خنثی خواهد بود. با داشتن معادلات مغناطوهیدرودینامیک از امواج آلفن، مغناطوآکوستیک آرام و مغناطوآکوستیک سریع ایجاد می‌شوند [۱].

اگر پلاسما غیر همگن باشد دیگر این سه موج نمی‌توانند به طور جداگانه حضور داشته باشند و با هم جفت می‌شوند. در چنین حالتی این امکان وجود دارد که یک موج در قسمتی از پلاسما به صورت موج مغناطوآکوستیک آرام و در بخشی دیگر به صورت موج آلفن ظاهر شود. اگر فرض کنیم که یک لوله‌ی تاج در درون یک پلاسما بدون نیرو قرار گرفته باشد سه نوع موج سطحی، حجمی و نشتی در آن انتشار می‌یابد. لوله‌های شار نوسانات مختلفی دارند، هر یک از این نوسانات به ترتیب با اعداد موج k, m, n در مخنصات استوانه‌ای $(\hat{r}, \hat{\phi}, \hat{z})$ بیان می‌شوند. اعداد موج $m=1, m=0$ و $m=2$ به ترتیب وجوه نوسانی سوسپسی، کینک و شیاری هستند [۲]. در اینجا با استفاده نرم افزار کامسال^۱ به حل عددی معادله موج بدست آمده از معادلات مغناطوهیدرودینامیک ایده‌آل در سه بعد و شبیه سازی امواج حاصل با کمک یک نمایه‌ی چگالی شعاعی پرداخته شده است. موارد زیر به عنوان الگوی لوله‌ی شار در نظر گرفته شده است:

۱. از فشار گرمایی در مقایسه با فشار میدان صرف نظر شده است. ۲. از اثرات خمیدگی حلقه‌ها صرف نظر

می‌شود. ۳. از فشار گرانشی صرف نظر می‌شود.

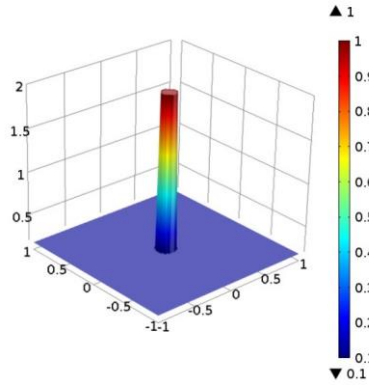
با فرض‌های فوق و در غیاب جملات اتلافی معادلات ایده‌آل پلاسما به معادله موج زیر منجر می‌گردد [۳]

$$\nabla^2 \mathbf{B}(\vec{r}, t) - \frac{\omega^2}{V_A^2} \mathbf{B}(\vec{r}, t) = 0, \quad \vec{V}_A = \frac{\vec{B}_0}{\sqrt{4\rho\pi}} \quad (1)$$

که در آن V_A سرعت آلفن موضعی و \mathbf{B} میدان مغناطیسی زمینه است. نمایه‌ی چگالی در لوله بصورت ρ_e, ρ_i برای داخل و خارج لوله به کمک یک تابع پله‌ای در مرز استوانه‌ای به شعاع a توسط معادله‌ی زیر توصیف می‌شود (شکل ۱).

$$\rho(x, y) = (\rho_e - \rho_i)\theta(a - \sqrt{x^2 + y^2}) + \rho_e \quad (2)$$

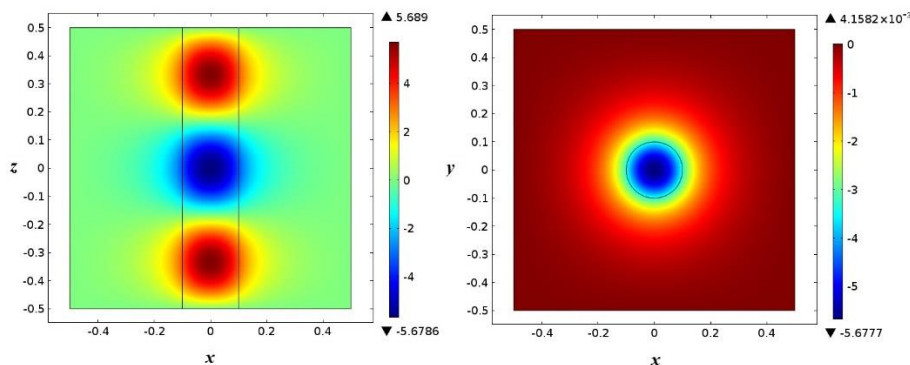
^۱ COMSOL



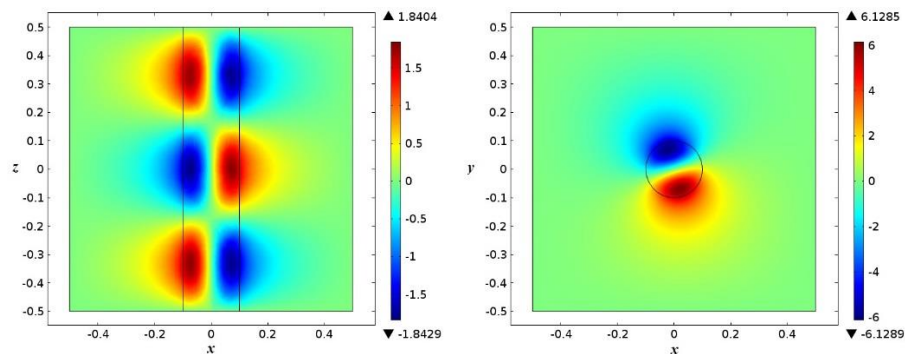
شکل ۱: نمایه‌ی چگالی شعاعی هموار شده در نزدیکی سطح لوله.

نتیجه گیری

در اینجا با حل عددی معادله موج (رابطه ۱) وجوه نوسانی لوله‌ی شار مغناطیسی در شرایط حلقه‌های تاج خورشید (با صرف نظر کردن از فشار گاز، انحنای حلقه‌ها، فشار گرانشی و کلیه‌ی نیروهای اتلافی) بررسی شده و نمایه‌ی چگالی به صورت تابع دلتا و درامتدادهای دیگر ثابت فرض شده است (شکل ۱). وجوه نوسانی سوسیسی که در آن محور حلقه ثابت مانده و سطح جانبی آن در امتداد محور حلقه نوسان می‌کند، در شکل ۲ گره و شکم قابل مشاهده است. وجه سوسیسی $m = 0$ با عدد موج شعاعی $n = 1$ (وجه اصلی) و عدد موج طولی در امتداد محور حلقه $k = 3$ نمایش داده شده است. در وجه نوسانی کینک $m = 1$ محور حلقه دارای نوسان است، در شکل ۳ وجه کینک با اعداد موج $n = 2$ و $k = 3$ مشخص است.

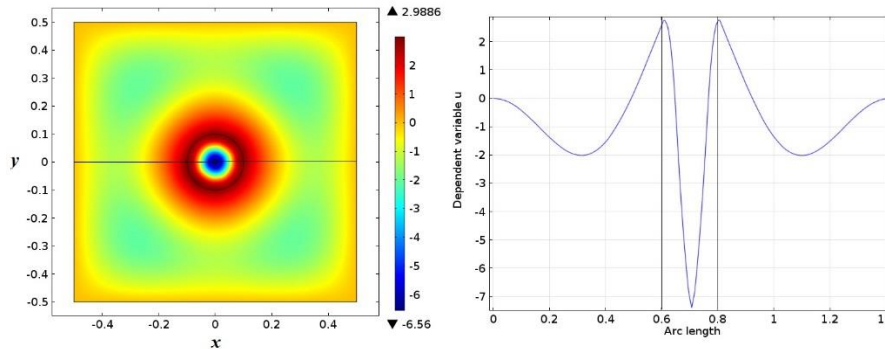


شکل ۲: نمایش وجه سوسیسی $m = 0$ (چپ) گره و شکم در راستای محور حلقه با عدد موج $k = 3$. خطوط موازی مشکی رنگ دیواره‌های جانبی استوانه را در یک برش طولی از لوله شار نشان می‌دهند. راست) نمایش موج سوسیسی اصلی با عدد موج $n = 1$ در صفحه $x - y$. خط دایره‌ای مشکی رنگ محیط استوانه را در یک برش عرضی از لوله شار نشان می‌دهد.

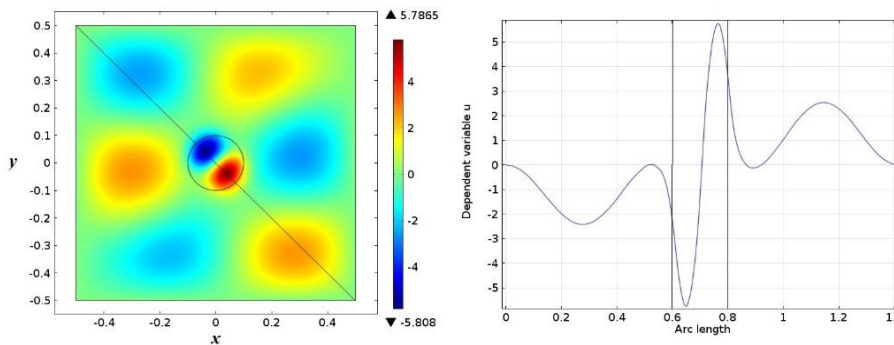


شکل ۳: نمایش وجه کینک $m = 1$ (چپ) گره و شکم در راستای محور حلقه با عدد موج $k = 3$. استوار است) نمایش موج کینک با عدد موج $n = 2$ در صفحه $x - y$.

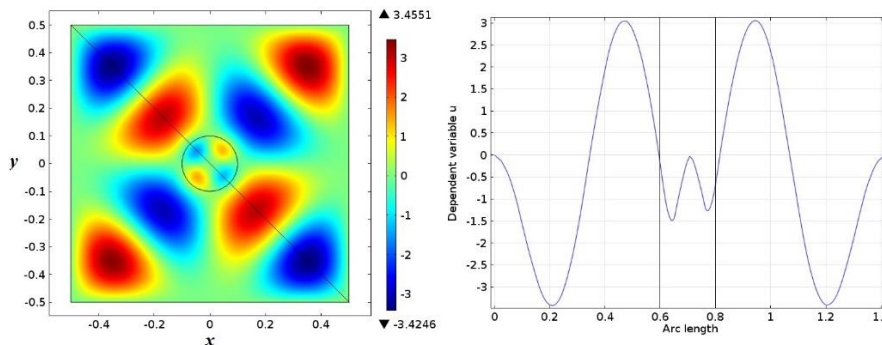
اگر موج در سطح لوله منتشر شود یعنی دامنه‌اش در سطح جانبی حلقه بیشترین مقدار را داشته باشد موج سطحی (شکل ۴) و اگر موج در خارج از لوله رفتار نمایی و میراشونده داشته باشد و دامنه‌اش در داخل حلقه ماکسیمم باشد موج حجمی داریم (شکل ۵). امواج نشتی در خارج لوله منتشر می‌شوند و انرژی را به سمت خارج و محیط تاج انتقال می‌دهند لذا دامنه موج در بیرون حلقه بیشترین مقدار را دارد (شکل ۶).



شکل ۴: نمایش وجه سطحی، عمده دامنه موج در سطح جانبی حلقه دیده می‌شود (چپ) نمایش در صفحه $x-y$ ، برش خطی در امتداد محور x مشاهده می‌شود. راست) نمایش دامنه در یک برش خطی در راستای محور x .



شکل ۵: نمایش وجه حجمی، دامنه موج در داخل حلقه بیشترین مقدار و در بیرون حلقه رفتار میرا شونده دارد. (چپ) نمایش در صفحه $x-y$ برش خطی از دو قله مشاهده می‌شود. راست) نمایش دامنه در یک برش خطی نشان داده شده در پنجره سمت چپ.



شکل ۶: نمایش وجه نشتی، امواج نشتی در خارج حلقه منتشر می‌شوند و دامنه موج در بیرون حلقه بیشترین مقدار را دارد. (چپ) نمایش در صفحه $x-y$ برش خطی از دو قله مشاهده می‌شود. راست) نمایش دامنه در یک برش خطی نشان داده شده در پنجره سمت چپ. این شبیه‌سازی نوسان‌های محیط مغناطیسی برای مطالعه وجوه نوسانی مختلف در شرایط چند حلقه و نمایه‌ی چگالی دو و سه بعدی در حال انجام است.

مرجع‌ها

1. Aschwanden, M. J., "Physics of the Solar Corona", Springer, 2004, P302-P425.
2. Nakariakov, V., Verwicht, E., Living Rev. Solar Physics, 2005.
3. Safari, H., Nasiri, N., Karami, K., Sobouti, Y., Astronomy & Astrophysics, 2005, P448, 375.