

# تحول پلازما حول نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی

سمیه صبری<sup>1</sup>، حسین عبادی<sup>1</sup>

<sup>1</sup>گروه فیزیک نظری و اختر فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

## چکیده

چگونگی تحول پلازما حول نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی که توسط پالس اولیه آلفونی غیرخطی مورد اختلال قرار گرفته است، مورد بررسی قرار می گیرد. نقاط تهی مغناطیسی رصد شده در تاج خورشید در واقع سه بعدی می باشند. این در حالی است که اکثر مطالعات انجام گرفته در این زمینه به منظور ساده سازی مسئله، نقاط تهی مغناطیسی دو بعدی را مد نظر قرار داده اند. بنابراین در این کار با در نظر گرفتن نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی، با استفاده از کد پلوتو معادلات مغناطوهیدرو دینامیکی مقاومتی حل شده و چگونگی تحول پلازما مورد مطالعه قرار می گیرد نشان داده شده است که پیشروی موج آلفونی غیرخطی حول نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی با تولید امواج مغناطوهیدرو دینامیکی سریع و آرام، اختلال چگالی پلازما را در پی دارد.

## Plasma evolutions around a 3D magnetic null point

S. Sabri<sup>1</sup>, H. Ebadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Theoretical Physics and Astrophysics, Physics Faculty, University of Tabriz, P.O.Box 51664, Tabriz, Iran

## Abstract

*It is investigated how the plasma evaluates due to the propagation of the nonlinear Alfvén wave. Magnetic null points that are detected in the solar corona have 3D structures. While most of the studies were considered simple 2D structures instead of the real 3D ones. Then, in this study, we consider the real 3D structure with a 3D magnetic null point and use the PLUTO code to solve the resistive MHD equations to find out how the plasma evaluates. It is found that nonlinear Alfvén wave propagation around a 3D magnetic null point results in plasma density perturbations due to the perturbations of the magnetoacoustic waves.*

## مقدمه

رفتار امواج مغناطوهیدرو دینامیکی در مجاورت نقاط تهی مغناطیسی به ازای مدل‌های دوبعدی به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [1-4]. طی آن کارهای انجام شده با فیزیک مسئله و چگونگی رفتار امواج در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی آشنا شدیم. از نتایج مهم بدست آمده از کارهای قبلی می توان به جایگزیدگی امواج آلفون در مجاورت خطوط میدان مغناطیسی و جایگزیدگی امواج مغناطوآکوستیک در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی اشاره نمود. جایگزیدگی امواج مغناطوآکوستیکی آرام و سریع در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی، تولید چگالی جریان الکتریکی قابل ملاحظه ای را در نقطه تهی مغناطیسی در پی داشت. به طوریکه به علت چگالی جریان الکتریکی بالای تولید شده در اثر پیشروی امواج مغناطوآکوستیک حول نقطه تهی مغناطیسی، شاهد وقوع پدیده بازاتصال مغناطیسی و همچنین شار پلازما قابل ملاحظه ای بودیم. این در حالی است که پیشروی موج آلفونی در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی به علت تولید چگالی جریان الکتریکی ناچیز، منجر به وقوع بازاتصال مغناطیسی نگردید. از آنجائیکه نقاط تهی مغناطیسی موجود در اتمسفر خورشید در واقع سه بعدی می باشند، از اینرو بر آن شدیم تا مسئله را در حالت کاملتر سه بعدی مورد بررسی و مطالعه قرار دهیم. باید خاطر نشان شد که به علت پیچیدگی مسئله سه بعدی و مخصوصاً زمان بالایی که حل عددی معادلات مغناطوهیدرو دینامیکی در سه بعد طول میکشد، اغلب مطالعات انجام

گرفته در این زمینه دوبعدی می باشند. لذا مطالعات سه بعدی محدود انجام شده در این زمینه اغلب چگونگی تشکیل چگالی جریان الکتریکی را مورد بررسی قرار داده اند [5-6].

## معادلات اساسی و شرایط تعادل

تئوری مغناطوهیدرودینامیکی یک توصیف ماکروسکوپی از چگونگی پیشروی امواج مغناطوهیدرودینامیکی در محیط پلاسمای فضایی فراهم می کند. از اثرات گرانش خورشید، ویسکوزیتی پلازما به علت ناچیز بودن در تاج خورشید صرف نظر شده است. بنابراین معادلات مغناطوهیدرودینامیکی را به صورت زیر داریم

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right] = \left( \frac{\nabla \times B}{\mu} \right) \times B - \nabla p,$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta \nabla^2 B,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho v),$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -v \cdot \nabla p - \gamma p \nabla \cdot v + (\gamma - 1) \eta / \mu (\nabla \times B)^2.$$

در معادلهای فوق  $\rho$  چگالی جریان،  $v$  سرعت پلازما،  $B$  میدان مغناطیسی یا القاء مغناطیسی،  $P$  فشار

پلازما،  $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$  نفوذ پذیری مغناطیسی،  $\sigma$  هدایت پذیری الکتریکی،  $\eta = 1/\mu\sigma$  پراکندگی

مغناطیسی،  $\varepsilon = p/\rho(\gamma-1)$  چگالی انرژی داخلی مشخصه می باشد که در آن  $\gamma = 5/3$  نسبت گرماهای مشخصه می باشد.

سیستم مورد مطالعه در این بخش حاوی یک نقطه ی تهی سه بعدی با پالس اولیه ی آلفونی دایروی با تقارن سمتی در یک فاصله ی مشخص از نقطه ی تهی می باشد. میدان مغناطیسی تعادلی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$B = (x, y, -2z) \quad (2)$$

معادله ی فوق نشانگر یک نقطه ی تهی مغناطیسی سه بعدی است که القاء مغناطیسی در مرکز صفر می باشد و پالس اولیه تعریف شده به سیستم به صورت زیر می باشد:

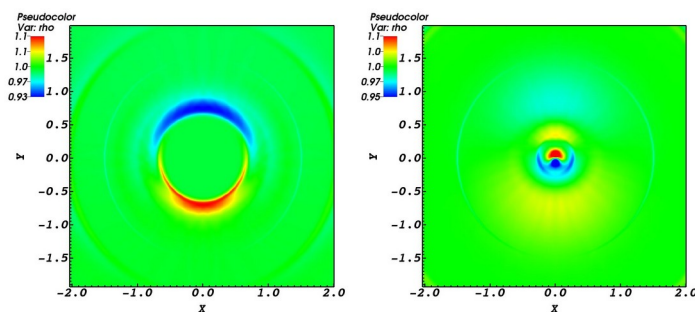
$$V.A = v_A = A_0 \sin\left[\pi \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - r_1}{r_0}\right] \frac{B_x}{B_x^2 + B_y^2} \quad (3)$$

قابل ذکر است که معادلات مغناطوهیدرودینامیکی به طور عددی با استفاده از کد پلوتو که ابزار دقیقی برای مطالعه ی دینامیک غیرخطی سیال مغناطیده است، حل می شوند. [7]

## نتایج و بحث

اهمیت نقاط تهی مغناطیسی سه بعدی فقط محدود به پلاسمای فضایی نبوده بلکه نقش مهمی را در مغناطوسفر زمین و همچنین پلاسمای آزمایشگاهی بازی می کند. از اینرو مطالعه رفتار امواج مغناطوهیدرودینامیکی در مجاورت این ساختارهای مغناطیسی که گرادیان های بالای میدان مغناطیسی را در پی دارند، می تواند حائز اهمیت باشد. نکته قابل ملاحظه این است که در میان امواج مغناطوهیدرودینامیکی، امواج آلفونی می توانند حامل انرژی در امتداد خطوط میدان مغناطیسی در لایه های اتمسفری بالاتر باشند. [8] در این مطالعه، در ابتدا پالس آلفونی را به سیستم سه بعدی تعریف شده در بخش فوق، اعمال نمودیم. پیشروی موج آلفون در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی اختلالات امواج مغناطو آکوستیک سریع و آرام را نیز در پی داشت. قسمت قابل ملاحظه موج آلفونی در امتداد محور اسپاین جایگزیده گردید. قابل ذکر است که از ویژگی های بارز نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی، حضور محور اسپاین و صفحه فن می باشد. خطوط

میدان مغناطیسی در جهت های مختلف در امتداد محور اسپاین به نقطه تهی مغناطیسی می رسند یا آن را ترک می کنند. در این مطالعه محور اسپاین منطبق بر محور  $z$  و صفحه فن در صفحه  $xy$  واقع شده است. امواج مغناطوآکوستیک تراکم پذیر به وجود آمده در اثر پیشروی موج آلفونی، حول نقطه تهی مغناطیسی جایگزیده شدند که این یکی از ویژگی های اصلی امواج مغناطوآکوستیکی می باشد. قابل ذکر است که چگونگی پیشروی امواج حول نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی و همچنین چگونگی تشکیل صفحات جریان الکتریکی در ساختار سه بعدی قبلا مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [9-10].



شکل 1: تغییرات چگالی پلازما در چهار لحظه  $t = 0.4s, 0.9s$

به عبارت دیگر پیشروی موج آلفون غیر خطی تولید امواج ثانویه را در پی دارد. علت تولید این امواج، جفت شدگی غیر خطی متغیرهای عرضی با متغیرهای طولی در معادلات مغناطوایدروینامیکی می باشد. اختلال فشار کل پلازما امواج مغناطوآکوستیک طولی ( امواج آرام) و امواج مغناطوآکوستیک سریع که در جهت عمود به سطوح شار قطبیده اند را تولید می کند. بنابراین موج آلفون اولیه، سیال را با دو مولفه ی سرعت دیگر برانگیخته می نماید. مولفه های سرعت تولید شده، مولفه ی سرعت موازی با میدان مغناطیسی تعادلی و مولفه ی سرعت عمود بر سطوح شار مغناطیسی می باشند که به ترتیب امواج مغناطوآکوستیک آرام و سریع نامیده می شوند. از اینرو موج آلفونی غیرخطی در طی پیشروی به سمت نقطه تهی مغناطیسی با تولید امواج مغناطوآکوستیک سریع و آرام منجر به تغییرات چگالی پلازما می شود. قابل ذکر است که این نتایج در دو بعد نیز گزارش شده بود که این مطالعه نشان داد که پیشروی موج آلفونی در سه بعد نیز اختلالات امواج مغناطوآکوستیک تراکم پذیر و در نتیجه اختلالات چگالی را در پی داشت. در واقع تغییر میدان مغناطیسی منجر به گرادیان فشار مغناطیسی می گردد که جریان پلازما را در نتیجه تغییرات چگالی پلازما را در پی دارد. همانطور که در شکل 1 قابل مشاهده می باشد، چگونگی اختلال چگالی پلازما در نتیجه پیشروی موج آلفون در مجاورت نقطه تهی سه بعدی نمایش داده شده است که به علت تولید اختلال های امواج مغناطوآکوستیکی، اختلال چگالی پلازما حول نقطه تهی با ویژگی رمبش حول نقطه تهی مغناطیسی قابل مشاهده است.

## نتیجه گیری

نقاط تهی مغناطیسی و امواج مغناطوایدروینامیکی به وفور در اتمسفر خورشید وجود دارند از اینرو مطالعه چگونگی رفتار امواج مغناطوایدروینامیکی در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی حائز اهمیت می باشند. قابل ذکر است که در پلازماهای فضای، مطالعه ساختار واقعی سه بعدی پیچیدگی های خاصی دارد. در این کار، رفتار موج آلفونی غیرخطی در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی مورد بحث و مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از کد پلوتو برای حل معادلات مغناطوایدروینامیکی استفاده گردید. در مطالعات دو بعدی نشان داده شده بود که پیشروی موج آلفون در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی دو بعدی، اختلال های امواج تراکم پذیر مغناطوآکوستیکی و در نتیجه اختلال پلازما را در پی دارد. طی این کار انجام شده نشان داد شد که موج آلفون غیرخطی در مسئله کامل تر و پیچیده تر سه بعدی نیز اختلالات امواج مغناطوآکوستیکی و در نتیجه

اختلال پلازما را منجر می گردد. از اینرو می توان گفت اثرات غیرخطی پیشروی موج آلفون در مجاورت نقطه تهی مغناطیسی سه بعدی با نتایج بدست آمده در مدل‌های ساده تر دو بعدی سازگار می باشند.

## سپاسگزارى

شپهسازی عددی این کار با استفاده از شبکه سوپرکامپیوتری دانشگاه ku Leuven انجام گردید.

## مرجع‌ها

- [1] S.Sabri., S.Poedts & H.Ebadi., 2019, A&A, 623, A81  
[2] S.Sabri., S.Vasheghani Farahani., H.Ebadi.M.Hosseinpour., Z.Fazel, 2018, MNRAS, 479, 4991  
[3] Sabri, S., Ebadi, H., & Poedts, S. 2020, ApJ, 902, 11  
[4] Sabri, S., Vasheghani Farahani, S., Ebadi, H., & Poedts, S. 2020, Sci. Rep., 10,15603  
[5] Galsgaard, K., & Pontin, D. I. 2011a, A&A, 529, A20  
[6] Galsgaard, K., Priest, E. R., & Titov, V. S. 2003, Space Physics, 108, 1  
[7] Mignone, A., Bodo, G., Massaglia, S., Matsako, T., Tesileanu, O., Zanni, C., and Ferrari, A., 2007, Astrophys. J. Suppl, 170, 228.  
[8] Hollweg, J. V, 1992, ApJ, 389, 731  
[9] Sabri, S., Ebadi, H., & Poedts, S. 2021, ApJ, 922, 123  
[10] Sabri, S., Ebadi, H., & Poedts, S. 2022, ApJ, accepted