بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

شبیه‌سازی تولید سالیتون‌های یون-صوت غباری

مریم نوری کادیجانی، فائزه امین منصور، عرفانه بهجت، حسین عباسی

دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده –در پژوهش حاضر با استفاده از یک کد هیبرید که در آن دینامیک الکترون‌ها با استفاده از معادله ولاسوف و دینامیک یون‌ها با استفاده از معادلات سیالی دنبال می‌شود، به شبیه‌سازی فرآیند تولید سالیتون‌های یون- صوت غباری در یک پلاسمای غباری غیرمغناطیده، در حضور الکترون‌های ابرگرم و به دام افتاده از یک اختلال اولیه گوسی پرداخته‌ایم. دینامیک کند تغییر یون‌ها باعث می‌شود که اختلال گوسی اولیه، به سالیتون‌های یون- صوت غباری تجزیه شود. اثر پارامترهای مختلف روی نحوه تولید این سالیتون‌ها بررسی و با نتایج عددی حل معادله تعمیم یافته کورته وگ د-وریس(*mKdV*) مقایسه شده است.

کلید واژه- الکترون‌های ابرگرم و به دام افتاده، پلاسمای غباری، سالیتون‌های یون-صوت غباری، شبیه‌سازی هیبرید.

Simulation of Dust Ion Acoustic Solitons Excitation

Maryam Nouri Kadijani, Faezeh Aminmansoor, Erfaneh Behjat, Hossein Abbasi

Department of Energy Engineering and physics, Amir Kabir University and Technology, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, dynamics of generation process of a localized perturbation into Dust-Ion-Acoustic Solitons, in presence of superthermal and trapped electrons by using a Hybrid code are simulated. Slowly varying dynamics of the order of ion motion causes an initial localized perturbation to be disintegrated to Dust-Ion-Acoustic Solitons. The influence of some parameters on generation process are investigated and the simulation results are compared to numerical results.

Keywords: Dust-Ion-Acoustic Solitons, Dusty Plasma, Hybrid Simulation, Superthermal and Trapped Electrons.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعه پلاسماهای غباری از جایگاه ویژه‌ای در میان پژوهشگران فیزیک پلاسما برخوردار شده است. این اهمیت نه به خاطر غیرقابل حذف بودن ذرات غبار از محیط اطراف ما است بلکه، به خاطر فهم پدیده‌های جمعی مختلفی (تغییر مدهای پلاسمایی، تشکیل مدهای جدید و ...) است که در پلاسماهای آزمایشگاهی و پلاسماهای فضایی (مثل یونسفر زمین، حلقه‌های سیاره‌ای و ...) رخ می‌دهند[1].

سالیتون، یک ساختار جایگزیده و غیرخطی است که بعلت توازن بین اثرات غیرخطی و پاشندگی در محیط‌های غیرخطی و پاشنده تشکیل و منتشر می‌شود. نحوه انتشار یک بعدی سالیتون‌ها، توسط معادله KdV ، توضیح داده می‌شود. اخیرا یک مطالعه تجربی [2] و نظری [3] روی نحوه‌ی تولید سالیتون‌های یون-صوت غباری در پلاسمای غباری انجام شده است. در این پژوهش یک روش شبیه‌سازی برای بررسی تحول این سالیتون‌ها در یک پلاسمای غباری از یک اختلال اولیه گوسی ارائه می‌شود. حل عددی این مساله در [3] انجام شده است. اما با توجه به تقریب‌های بکار گرفته شده در حل عددی، ما برآن شدیم که یک روش شبیه‌سازی به دور از این تقریب‌ها، برای این مساله ارائه دهیم.

۲- سیستم معادلات

برای بررسی انتشار امواج یون-صوت غباری در پلاسمای غیرمغناطیده، یون‌ها و ذرات غبار را سرد و الکترون‌ها را داغ فرض می‌کنیم. بنابراین معادلات سیالی برای یون‌ها بصورت زیر است؛

$$\frac{\partial n_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(n_i v_{ix}\right)=0, \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial v_{ix}}{\partial t}+v_{ix}\frac{\partial v_{ix}}{\partial x}=-\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}=(n_e-1)+\rho(1-n_i). \qquad (۳)$$

شرط خنثایی در حالت تعادل بصورت

$$n_{0e}+z_d n_{0d}=z_i n_{0i}, \qquad (۴)$$

تعریف می‌شود. در معادلات فوق $n_\alpha/n_{0\alpha}\equiv n_\alpha$، $ez_i\varphi/T_e\equiv\varphi$، $x/\lambda_{De}\equiv x$ بی‌بعد شده‌اند. n_α چگالی ذرات پلاسما ($\alpha=e,i,d$) و $n_{0\alpha}$ چگالی تعادلی آنها، وقتی که هیچ اختلالی به پلاسما وارد نشده است، e بزرگی بار الکترون، φ پتانسیل خودسازگار الکتریکی، T_e دمای الکترونی، c_s سرعت یون صوت، z_α چگالی بار ذرات پلاسما، λ_{De} طول دبای الکترون و $\rho=\frac{z_i^2 n_{i0}}{n_{e0}}$، است. ذرات غبار ساکن در نظر گرفته شده‌اند[4].

برای مدل کردن الکترون‌های ابرگرم و به دام افتاده از تابع توزیع لورنتسی (کاپا) استفاده شده است[3]

$$\begin{cases} f_f(v)=\frac{n_{\infty e}c_\kappa}{v_T\sqrt{2\pi}}\left[1+\frac{1}{(2\kappa-3)v_T^2}\left(v^2-\frac{2e\varphi}{m_e}\right)\right]^{-\kappa} & |v|>\sqrt{\frac{2e\varphi}{m_e}}, \\ f_t(v)=\frac{n_{\infty e}c_\kappa}{v_T\sqrt{2\pi}}\left[1+\frac{\beta}{(2\kappa-3)v_T^2}\left(v^2-\frac{2e\varphi}{m_e}\right)\right]^{-\kappa} & |v|\le\sqrt{\frac{2e\varphi}{m_e}}, \end{cases} \qquad (۵)$$

که در آن

$$c_\kappa=\frac{\Gamma(\kappa)}{\left(\kappa-3/2\right)^{1/2}\Gamma(\kappa-1/2)}$$

و $f_f(v)$ و $f_t(v)$ به ترتیب توابع توزیع سرعت الکترون‌های آزاد و به دام افتاده، $v_T=\sqrt{T_e/m_e}$ سرعت حرارتی الکترون‌ها، $\beta<0$ ثابت به دام افتادگی الکترون‌ها و $\kappa>3/2$ شاخص دور بودن از تعادل ماکسولی است که در حد $\kappa\to\infty$ معادله (۵) توزیع ماکسولی را نتیجه می‌دهد. از آنجا که چگالی، انتگرال تابع توزیع روی فضای سرعت است برای $\left(ez_i\varphi/T_e<<1\right)$ خواهیم داشت،

$$n_e=1+\frac{a_\kappa}{z_i}\varphi-\frac{4\left(1-\beta\right)}{3\sqrt{\pi}}\frac{b_\kappa}{z_i^{3/2}}\varphi^{3/2}, \qquad (۶)$$

که در آن،

$$a_\kappa=\frac{2\kappa-1}{2\kappa-3},$$

$$b_\kappa=\frac{\Gamma(\kappa+1)}{\left(\kappa-3/2\right)^{3/2}\Gamma(\kappa-1/2)}.$$

با استفاده از مختصات‌اتساع یافته‌ی

$$\zeta=\varepsilon^{1/4}\left(x-v_0 t\right)$$
$$\tau=\varepsilon^{3/4}t \qquad (۷)$$

و روش اختلال کاهشی، با حل معادلات (۳)-(۱) و (۶)، معادله mKdV بصورت زیر برای سالیتون‌های یون-صوت غباری بدست می‌آید[3]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

$$\frac{\partial\varphi^{(1)}}{\partial\tau}+\frac{(1-\beta)}{\sqrt{\pi}}\frac{b_\kappa}{a_\kappa^{3/2}}\left(\frac{\rho}{z_i}\right)^{1/2}\sqrt{\varphi^{(1)}}\frac{\partial\varphi^{(1)}}{\partial\zeta}+\frac{\rho^{1/2}}{2a_\kappa^{3/2}}\frac{\partial^3\varphi^{(1)}}{\partial\zeta^3}=0. \quad (۸)$$

که در آن $v_0=\sqrt{\rho/a_\kappa}$ و $\varphi^{(1)}=v_0^2 n_i^{(1)}$ (علامت (1) نشان دهنده‌ی مرتبه اول اختلال می‌باشد) است.

۳- الگوریتم شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی پلاسمای مورد بررسی از یک کد هیبرید، که در آن الکترون‌ها جنبشی و یون_ها سیالی‌اند استفاده شده است. برای بررسی دینامیک الکترون‌ها از معادله ولاسوف، که به روش مسیرهای مشخصه حل شده است، بصورت زیر استفاده می‌شود[5].

$$\frac{\partial f_e}{\partial t}+v_e\frac{\partial f_e}{\partial x}+\frac{1}{\alpha}\frac{\partial\varphi}{\partial x}\frac{\partial f_e}{\partial v_e}=0 \quad (۹)$$

که در آن $\alpha=m_e/m_i$ نسبت جرم الکترونی به یونی است. در این شبیه‌سازی فضای فاز شامل شبکه‌ای با ابعاد $L_x\times L_v$ است که معادلات (۳)-(۱) بر روی نقاط این شبکه ($n_x\times n_v$) حل می‌شوند. شبکه دیگر در فضای فاز، یک شبکه دینامیک متشکل از نقاط فازی است که در ابتدای برنامه به هریک از آنها یک مختصه مکانی، سرعت و یک مقدار f_{pe} مطابق با معادله (۵) بعنوان شرایط اولیه الکترونی داده می‌شود. مقدار f_{pe} بعنوان مشخصه آن نقطه فاز بوده و تا پایان برنامه ثابت است. اطلاعات نقاط فاز بر روی نقاط شبکه درون‌یابی می‌شوند و چگالی الکترونی روی نقاط شبکه محاسبه می‌شود. همزمان چگالی یونی با استفاده از معادلات سیالی محاسبه شده و سرانجام معادله پواسون به روش FFT روی این نقاط حل می‌شود. میدان‌های حاصله از حل معادله پواسون روی نقاط فاز درون‌یابی می‌شوند و این نقاط تحت میدان‌های بدست آمده موقعیت و سرعت جدید خود را بدست می‌آورند و بدین صورت حلقه برنامه تکمیل می‌شود.

۳-۱- سالیتون‌های یون-صوت غباری

به منظور شبیه‌سازی تولید سالیتون‌های یون-صوت غباری، از یک پروفایل گوسی به عنوان پتانسیل اختلالی اولیه بصورت

$$\varphi=Ae^{-(x/\Delta-c)^2} \quad (۱۰)$$

استفاده شده است. که در آن A، Δ و c به ترتیب دامنه، پهنا و موقعیت بیشینه دامنه‌ی اختلال می‌باشند. مهمترین پارامتر در این شبیه‌سازی انتخاب شرایط اولیه مناسب برای سرعت و چگالی یون‌هاست.

برای بدست آوردن چگالی اولیه یونی از معادله پواسون (۳) استفاده می‌شود که چگالی الکترونی از معادله (۵) و پتانسیل از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود

$$n_i=\int f_e dv-\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}. \quad (۱۱)$$

برای بدست آوردن سرعت اولیه یونی، معادلات (۲) و (۱) را در حالت پایا در دستگاه مختصات $\xi=x-Mt$ با شرایط مرزی $\xi\to\infty,\varphi\to 0,\partial\varphi/\partial\xi\to 0$ حل می‌کنیم در نتیجه

$$v_i=M-\sqrt{M^2-2\varphi} \quad (۱۲)$$

$$n_i=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{2\varphi}{M^2}}} \quad (۱۳)$$

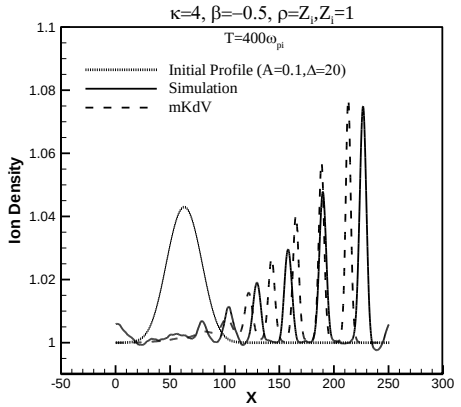
بدست می‌آیند. با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۳)، مقدار M محاسبه می‌شود و با قرار دادن در معادله (۱۲) سرعت اولیه یونی محاسبه می‌شود. برای مقایسه بهتر نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از حل عددی، با توجه به اینکه معادله mKdV (۸) در چارچوب متحرکی با سرعت v_0 بدست آمده است، سیستم معادلات جعبه شبیه‌سازی نیز در این دستگاه مختصات حل می‌شوند.

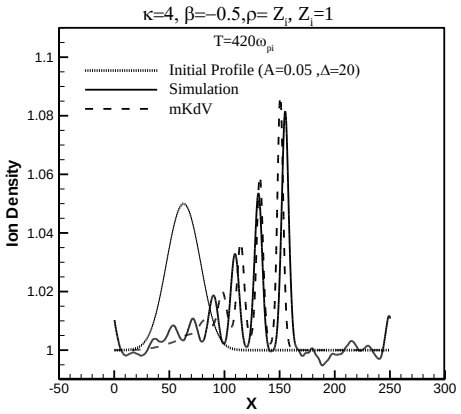
۴- نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اثر پارامترهای مختلف مثل دمای الکترونی، پارامتر به‌دام‌اندازی الکترونی و چگالی بار یونی روی فرآیند تقسیم پروفایل گوسی به سالیتون‌های یون- صوت غباری از لحاظ کیفی کاملا مشابه نتایج حاصل از حل عددی معادله (۸) منطبق با [3] می‌باشند. عدم انطباق کمی نیز به دلیل تقریب‌های بکار گرفته شده در روش اختلال کاهشی است. که این تقریب‌ها شامل ۱- حذف جملات مرتبه ۳ به بالا در بدست آوردن معادله mKdV [۳] و ۲- استفاده از مدل سیالی و حذف اثرات مربوط به تحولات تابع توزیع الکترونی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود با کاهش دامنه پروفایل گاوسی اولیه، نتایج عددی و شبیه‌سازی همچنان که انتظار می‌رود به هم نزدیک می‌شوند زیرا با کاهش دامنه،

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

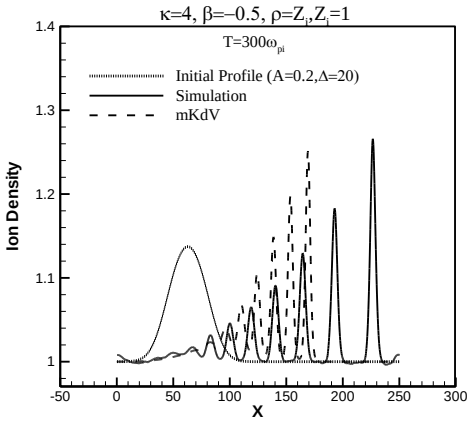
اثر تقریب‌های عددی و جملات حذف شده کاهش می‌یابد. اما همچنان تفاوت‌های کمی به چشم می‌خورند.





شکل ۱: فرآیند تقسیم پروفایل گوسی به سالیتون‌های یون-صوت غباری در جعبه شبیه‌سازی با $n_x = 1024$، $n_v = 4801$، $L_x = 250$ و گام زمانی $dt = 0.01$ (بالا) $A = 0.1, \Delta = 20$ (پایین) $A = 0.05, \Delta = 20$

شکل ۲ اثر افزایش دامنه‌ی پروفایل گاوسی اولیه را روی فرآیند تقسیم شدن نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دامنه پروفایل گوسی، سرعت تولید سالیتون‌ها و تعداد آنها افزایش می‌یابد و نتایج شبیه‌سازی و عددی اختلاف قابل ملاحظه‌ای با هم دارند که این امر نمی‌تواند صرفا به دلیل حذف جملات مرتبه ۳ به بالا در روش اختلال کاهشی باشد. ما در شبیه‌سازی جنبشی خود نشان دادیم که این تفاوت بعلت حذف اثرات ناشی از تحولات تابع توزیع سرعت الکترونی در مدل KdV (سیالی) است. بنابراین برای بررسی این پدیده نیازمند استفاده از شبیه‌سازی ولاسوف که در آن تحولات تابع توزیع الکترونی در نظر گرفته می‌شود، می‌باشیم.



شکل ۲: فرآیند تقسیم پروفایل گوسی به سالیتون‌های یون-صوت غباری در جعبه شبیه‌سازی با $n_x = 1024$، $n_v = 4801$، $L_x = 250$ و گام زمانی $dt = 0.01$ که $A = 0.2, \Delta = 20$

۵- جمع‌بندی

فرآیند تحول یک اختلال اولیه گوسی به سالیتون‌های یون-صوت غباری در پلاسمای غباری شامل الکترون‌های به دام افتاده و ابرگرم شبیه‌سازی شد. هر چند نتایج شبیه‌سازی و عددی[3] با دقت خوبی در حد دامنه‌های کوچک بر هم منطبقند، اما مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای بررسی این پدیده نمی‌توان از تحولات تابع توزیع سرعت الکترونی چشم‌پوشی کرد. بنابراین از مزیت‌های مدل شبیه‌سازی به مدل KdV می‌توان به ۱- عدم استفاده از تقریب‌های روش اختلال کاهشی در حذف برخی از جملات ۲- استفاده از نظریه جنبشی که در آن تحولات تابع توزیع الکترونی در نظر گرفته می‌شود که هدف اصلی این پژوهش نیز می‌باشد۳- امکان استفاده از مدل شبیه‌سازی برای دامنه‌های بزرگتر از محدوده مدل KdV اشاره کرد.

مراجع

[1] Shukla A, Mamun A A, Introduction to Dusty Plasma Physics, IOP, Bristol, London (2002).

[2] Nakamura Y, Sarma A, Observation of ion-acoustic solitary waves in a dusty plasma, **PHYSICS OF PLASMA** 8, (2001) 3921

[3] Abbasi H, Hakimi Pajouh H, A proposal for dust-ion-acoustic soliton Excitation in a discharge plasma, **PHYSICS OF PLASMAS** 16 (2009) 033704.

[4] Shukla P. K, Silin V. P, Dust ion acoustic wave, **Physica Scripta** 45 (1992) 508.

[5] Kazeminezhad F, Kuhn S, Tavakoli A, Vlasov model using kinetic phase point trajectories, **PHYSICAL REVIEW E** 67, (2003) 026704.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]