

## مدل سازی عددی غلاف پلاسما در چشمه های پلاسمایی مغناطیده و فعال

ملک گودار، سارا؛ حاتمی\*، محمد محسن

دانشکده فیزیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

در این کار با استفاده از مدل دو سیالی، ساختار غلاف در پلاسماهای فعال و مغناطیده به ازای دماهای مختلف یونی مورد مطالعه قرار می گیرد. بدین منظور با در نظر گرفتن اثرات یونیزاسیون، برخوردهای یون-خشتی و الکترون-خشتی معادلات اصلی مدل ارایه شده (معادلات پیوستگی و حرکت برای یون ها و الکترونها) به طور عددی حل خواهند شد و تأثیر تغییر دمای یونی بر ساختار غلاف پلاسما از جمله پهنای غلاف، چگالی خالص بار در ناحیه غلاف و انرژی برخوردی یون ها به سطح کاتد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## Numerical modeling of plasma sheath in magnetized active plasma sources

Malek Goodar, Sara; Hatami\*, Mohammad Mohsen (m\_hatami@kntu.ac.ir)

Physics department of K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

*In this work, using a two-fluid model, the structure of sheath in active magnetized plasmas is investigated for different values of ion temperature. In order to do this, considering the effects of ionization, ion-neutral and electron-neutral collisions, the basic equations of the model (the momentum and continuity equations for electrons and ions) will be solved numerically and the effect of ion temperature on plasma sheath structure such as sheath thickness, net charge density in the sheath and ion impact energy on the cathode will be analyzed.*

PACS No. 52, 68

در بیشتر بررسی هایی که تاکنون انجام شده است از برخورد الکترون با ذرات خشتی، یونیزاسیون و دمای یونها صرف نظر شده است و علی رغم حضور میدان مغناطیسی، الکترونها در حالت تعادل گرمایی فرض شده اند و لذا از تابع توزیع بولتزمن برای توصیف چگالی آنها استفاده شده است [۲-۶]. این در حالی است که در مقالات متعددی از جمله منبع [۷]، نادرست بودن استفاده از تابع توزیع بولتزمن برای الکترونها در پلاسماهای مغناطیده نشان داده شده است.

در این کار با در نظر گرفتن اثرات یونیزاسیون و برخورد (برخورد های یون-خشتی و الکترون-خشتی) و نیز معادلات پیوستگی و

### مقدمه

مطالعات تئوری سطح مشترک بین سطح فلزی و پلاسما از آن جهت لازم و ضروری می باشد که تکنولوژی پلاسما از کاربردهای متنوعی در صنایع گوناگون از جمله لایه نشانی سطح فلزات به منظور ارتقا خواص آنها، ساخت لایه های نازک فلزی و غیره برخوردار است. در این بین شناخت مکانیزم غلاف پلاسما، بررسی ویژگی های اساسی آن مانند پهنای غلاف و یا انرژی برخوردی ذراتی که به سطح فلز می رسند و شبیه سازی رفتار آن ها در شرایط مختلف، به علت کاربردهای زیادی که پلاسما در صنعت دارد از اهمیت خاصی برخوردار می باشد.

$$(5) v_{jn} = (\alpha_j / \lambda_D) v_j$$

که  $\alpha_j$  ضریب برخوردی هر یک از گونه ها می باشد. از برخورد های یون-یون و الکترون-الکترون به علت کوچک بودن فرکانس آنها و همچنین از قسمت اینرسی الکترون به علت کوچک بودن جرم الکترون صرف نظر شده است [۲۰]. همچنین پتانسیل الکتریکی  $\phi$  توسط معادله ی پواسون به صورت زیر تعریف می شود:

$$\nabla^2 \phi = e(n_e - n_i) / \epsilon_0. \quad (6)$$

با استفاده از متغیر های بی بعد زیر معادلات (۶)-(۱) را بی بعد می کنیم:

$$\chi = x / \lambda_D, \quad \eta = e\phi / T_e, \quad N_j = n_j / n_{j0}, \quad u_j = v_j / c_s, \\ \tilde{v}_l = v_l / \omega_{pl}, \quad \beta_j = (\epsilon_0 / m_j n_0)^{1/2} B, \quad \beta_e = \beta_i \sqrt{M} \\ M = m_i / m_e, \quad T = T_i / T_e.$$

که  $c_s = (T_e / m_i)^{1/2}$  سرعت صوت یون در پلاسما،  $\lambda_D = (\epsilon_0 K T_e / n_0 e^2)^{1/2}$  طول دبابی و  $\omega_{pl} = (n_0 e^2 / \epsilon_0 m_i)^{1/2}$  فرکانس یونی پلاسما می باشند. با استفاده از کمیت های فوق، معادلات بی بعد به صورت زیر به دست می آیند:

$$\frac{dN_i}{d\chi} = \frac{-N_i}{(T - u_{ix}^2)} \quad (7)$$

$$\left[ \frac{d\eta}{d\chi} + u_{iy} \beta_i \sin(\theta) + \alpha_i u_i u_{ix} + \tilde{v}_l \frac{N_e T}{N_i u_{ix}} \right] + \frac{\tilde{v}_l N_e}{u_{ix}},$$

$$\frac{du_{ix}}{d\chi} = \frac{u_{ix}}{T - u_{ix}^2} \left[ \frac{d\eta}{d\chi} + u_{iy} \beta_i \sin(\theta) + \alpha_i u_i u_{ix} + \tilde{v}_l \frac{N_e T}{N_i u_{ix}} \right], \quad (8)$$

$$\frac{du_{iy}}{d\chi} = \beta_i \left( \sin \theta - \frac{u_{iz}}{u_{ix}} \cos \theta \right) - \alpha_i u_i u_{iy} / u_{ix}, \quad (9)$$

حرکت برای الکترونها به ارایه مدلی کامل تر برای بررسی ساختار غلاف در پلاسماهای فعال پرداخته می شود و سپس به کمک این مدل، اثر دمای یونی بر برخی مشخصات ناحیه غلاف در پلاسماهای فعال و مغناطیده مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج این تحقیق می تواند در برخی کاربردهای عملی پلاسما از جمله کاشت یون بر روی ماده هدف و یا جلوگیری از تغییر شکل یافتن کاتد در اثر برخورد ذرات پر انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

### مدل غلاف و معادلات اصلی

در این بررسی یک پلاسمای یون-الکترون شامل یونهای گرم یک بار یونیزه شده را در نظر می گیریم و فرض می کنیم که الکترونها توزیعی غیر بولتزمنی داشته باشند. همچنین فرض می کنیم میدان مغناطیسی خارجی طوری به ناحیه غلاف اعمال شده باشد که با راستای عمود بر دیواره ی غلاف زاویه  $\theta$  بسازد، مرز غلاف و پلاسما در  $x=0$  و غلاف در ناحیه ی  $x \geq 0$  قرار دارد. معادلات پیوستگی و حرکت برای یون ها و الکترون ها به صورت زیر قابل نوشتن است:

$$\nabla \cdot (n_i v_i) = v_i n_e, \quad (1)$$

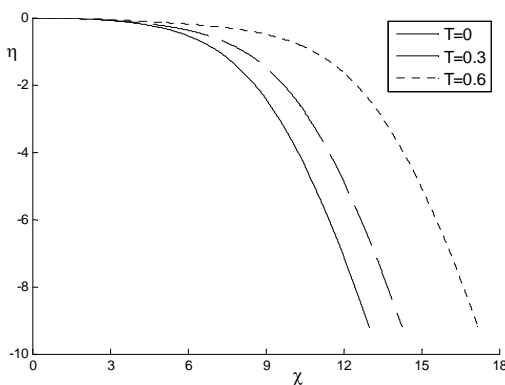
$$\nabla \cdot (n_e v_e) = v_i n_e, \quad (2)$$

$$m_i n_i (v_i \cdot \nabla) v_i = en_i (E_x + \vec{v}_i \times \vec{B}) - \nabla \cdot P_i + f_{ci}, \quad (3)$$

$$0 = en_e (E_x + \vec{v}_e \times \vec{B}) - \nabla \cdot P_e + f_{ce}, \quad (4)$$

که در این روابط  $m_e$  و  $m_i$  به ترتیب جرم یونی و الکترونی،  $n_j$  چگالی ذرات،  $v_j$  سرعت و  $P_j = n_j K T_j$  فشار اسکالر می باشند ( $j$  نمایانگر  $i$  برای یون و  $e$  برای الکترون)،  $E_x = -d\phi/dx$  میدان الکتریکی،  $\vec{B}$  میدان مغناطیسی،  $f_{ci} = -m_i n_i v_{in} \vec{v}_i$  و  $f_{ce} = -m_e n_e v_{en} \vec{v}_e$  یونیواسیون و الکترون-خشتی هستند که  $v_{en}$  و  $v_{in}$  فرکانس های برخوردی بوده و به صورت زیر تعریف می شوند [۶]:

در فاصله ی بیشتری از مرز غلاف و پلاسما شروع می شود. به بیان دیگر افزایش دمای یونی، پتانسیل الکتریکی ( $\varphi$ ) را کاهش می دهد. بنابراین می توان گفت در پلاسماهای فعال و مغناطیده با افزایش دمای یونی پهنای غلاف افزایش می یابد. همانطور که می دانیم شتاب گیری یونها در ناحیه غلاف اتفاق می افتد [۱] و هر چه این ناحیه ضخیم تر باشد یونها فرصت بیشتری برای کسب انرژی لازم جهت برخورد با ماده هدف (کاتد) خواهند داشت. این مساله در تکنیک کاشت یون بسیار حایز اهمیت است.



شکل ۱: منحنی تغییرات پتانسیل الکتریکی به ازای دماهای مختلف با در نظر گرفتن  $\alpha_i = 0/01, \alpha_e = 1, \tilde{v}_i = 0/001, \beta_i = 0/1, \theta = \pi/12$

در شکل (۲) منحنی تغییرات چگالی خالص ذرات باردار ( $\Delta N = N_i - N_e$ ) بر حسب فاصله از مرز پلاسما و غلاف رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دمای یونی مکان وقوع بیشینه چگالی خالص ذرات باردار از مرز غلاف و پلاسما فاصله گرفته و به سطح رسانا نزدیک تر می شود. همچنین با افزایش دما مقدار این بیشینه اندکی کاهش می یابد که با توجه به معادله ی (۷) این تغییرات قابل توجیه می باشند.

در شکل (۳) منحنی تغییرات انرژی جنبشی یونها ( $K = 1/2(u_{ix}^2 + u_{iy}^2 + u_{iz}^2)^{1/2}$ ) نسبت به فاصله از مرز پلاسما و غلاف رسم شده است. با توجه به معادله ی (۸) واضح است که با افزایش دمای یونی نیروی وارد بر یون ها به سمت دیواره بیشتر

$$\frac{du_{iz}}{d\chi} = \beta_i \frac{u_{iy}}{u_{ix}} \cos \theta - \alpha_i u_i u_{iz} / u_{ix}, \quad (10)$$

$$\frac{dN_e}{d\chi} = N_e \left[ \frac{d\eta}{d\chi} - \frac{\beta_i^2 \sin^2(\theta) (\alpha_e u_e) M}{(\alpha_e u_e)^2 + M^2 \beta^2 \cos^2(\theta)} u_{ex} - \alpha_e u_e \frac{u_{ex}}{M} \right], \quad (11)$$

$$\frac{du_{ex}}{d\chi} = \tilde{v}_i - u_{ex} \left[ \frac{d\eta}{d\chi} - \frac{\beta_i^2 \sin^2(\theta) (\alpha_e u_e) M u_{ex}}{(\alpha_e u_e)^2 + M^2 \beta^2 \cos^2(\theta)} - \alpha_e u_e \frac{u_{ex}}{M} \right], \quad (12)$$

$$\frac{d^2\eta}{d\chi^2} = N_e - N_i. \quad (13)$$

شرایط اولیه معادلات فوق به شکل زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\eta = 0, \quad d\eta/d\chi = -0/01, \quad u_{iz} = u_{iy} = u_{ex} = 0, \quad u_{ix} = 1, \quad N_i = N_e = 1.$$

همچنین فرض می کنیم پلاسما مورد بررسی، گاز آرگون با پارامتر های  $M \cong 0/7 \times 10^5$ ،  $T_e = 1eV$  و  $n_0 = 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$  می باشد [۲].

### جدولها، شکلها و روابط ریاضی

در این بخش، با استفاده از معادلات سیالی و با فرض غیر تعادلی بودن الکترونها (غیر بولتزمن بودن تابع توزیع آنها) به بررسی تاثیر دمای یونی بر انرژی یونها و چگالی خالص ذرات باردار در ناحیه غلاف و نیز پتانسیل الکتریکی این ناحیه غلاف پرداخته می شود. برای این منظور شرایط مرزی زیر در نظر گرفته شده اند:

$$\alpha_e = 1, \quad \tilde{v}_i = 0/001, \quad \beta_i = 0/1, \quad \alpha_i = 0/01, \quad \theta = \pi/12$$

در شکل (۱) منحنی تغییرات پتانسیل الکتریکی بهنجار شده ( $\eta$ ) بر حسب فاصله از مرز پلاسما و غلاف ( $\chi$ ) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دمای یونی، افت پتانسیل

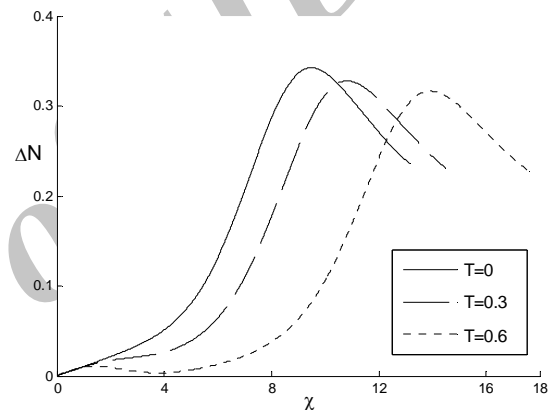
### نتیجه گیری

در این کار، با ارایه یک مدل کامل و با در نظر گرفتن اثرات یونیزاسیون، برخوردهای یون-خنثی و الکترون-خنثی و معادله حرکت برای الکترون ها، رفتار یون ها در غلاف پلاسمای فعال و مغناطیده به ازای دماهای مختلف یونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی نشان داد که با افزایش دما، افت پتانسیل الکتریکی در فاصله ی بیشتری از مرز غلاف و پلاسما و با شیب کمتری صورت می گیرد و پهنای غلاف افزایش می یابد. همچنین ملاحظه شد با افزایش دمای یونها، ذرات باردار در فاصله بیشتری از لبه غلاف تجمع می یابند و انرژی جنبشی آنها در داخل ناحیه غلاف و همچنین انرژی برخورد این یونها به سطح ماده هدف کاهش می یابد.

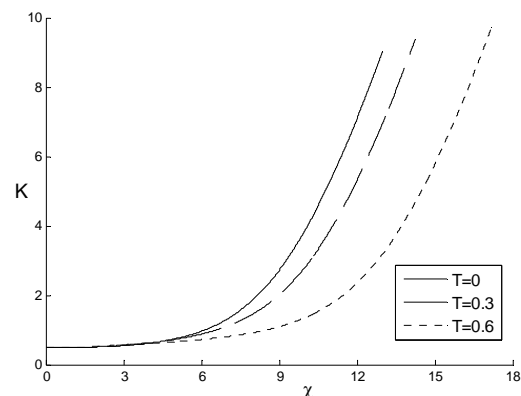
### مرجع ها

- [1] A. M. Lieberman and A. J. Lichtenberg, "Plasma discharges and materials processing", second edition, John Wiley & sons, inc publication. (2005)
- [2] X. Zou et al, "the ion density distribution in a magnetized plasma sheath", *Vacuum* **83** (2009) 205-8.
- [3] S. F. Masoudi, "Effect of pressure on plasma sheath in a magnetic field", *Vacuum* **81** (2007) 871-4.
- [4] M. E. Kaouini et al, "Ion Temperature Effect on Bohm Criterion for Magnetized Plasma Sheath", *J. Fusion Energ* **30** (2011)199-204.
- [5] S. F. Masoudi et al, "Ion dynamics in plasma sheath under the effect of  $E \times B$  and collisional forces", *Vacuum* **84** (2010) 382-6.
- [6] T. E. Sheridan et al, "collisional plasma sheath model", *Phys. Fluids* **10** (1991) 2796-2804.
- [7] J. E. Allen, "The plasma boundary in a magnetic field", *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008) 400 - 405.

می شود و در ابتدا یون های گرمتر شتاب بیشتری دارند و سرعتشان بیشتر است ولی با افزایش سرعت، برآیند نیروی الکتریکی و برخوردی غالب می شود و باعث کاهش سرعت و انرژی جنبشی یون های گرم تر می شود. در نتیجه می توان گفت افزایش دمای یونی به کاهش انرژی جنبشی یون ها در ناحیه غلاف و کاهش انرژی برخورد این یونها به سطح ماده هدف منجر می شود. به بیان دیگر، بسته به جنس ماده هدف ممکن است عمل کاشت یون روی سطح هدف انجام نپذیرد و یا یونهای کاشته شده نتوانند تا عمق زیادی در داخل ماده هدف نفوذ کنند.



شکل ۲: منحنی تغییرات چگالی خالص ذرات باردار به ازای دماهای مختلف با در نظر گرفتن  $\alpha_i = 0/01, \alpha_e = 1, \tilde{v}_i = 0/001, \beta_i = 0/1, \theta = \pi/12$



شکل ۳: منحنی تغییرات انرژی جنبشی یون ها به ازای دماهای مختلف با در نظر گرفتن  $\alpha_i = 0/01, \alpha_e = 1, \tilde{v}_i = 0/001, \beta_i = 0/1, \theta = \pi/12$