

## شبیه‌سازی غلاف یک پلاسمای استیلن فشار پایین در حضور نانوذرات غبار

مروی، زهرا؛ فروتن، غلامرضا؛ پورعلی، نورالدین؛ آخوندی شیرگ، علیرضا

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

## چکیده

با استفاده از یک تقریب چند سیالی، ساختار غلاف پلاسمایی در یک پلاسمای استیلنی کم فشار مورد مطالعه قرار گرفته است. پلازما شامل الکترون‌ها، گونه‌های مختلف یون‌های مثبت و منفی و نانوذرات غبار باردار می‌باشد. اثرات یون‌های منفی روی ساختار غلاف، توزیع‌های فضایی نیروها، تراکم ذرات غبار نزدیک دیواره و شار یون‌های فرودی روی زیرلایه مورد بحث قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در حضور یون‌های منفی افت و خیزهای متناوب فضایی در منحنی‌های مربوط به پارامترهای پلازما و غبار گسترش می‌یابند. پریود فضایی نوسانات از مرتبه چند طول دبابی است و دامنه آن‌ها با افزایش الکترون‌گاتیویته پلازما افزایش پیدا می‌کند. با افزایش الکترون‌گاتیویته در لبه غلاف شار فرودی یون‌های مثبت افزایش می‌یابد، در حالی که شار فرودی ذرات غبار روی دیواره کاهش می‌یابد.

## Simulation of a low pressure acetylene plasma sheath in the presence of dust nanoparticles

Marvi, Zahra ; Foroutan, Gholamreza ; Pourali, Nouredin ; Akhouni Shirg, Alireza  
Department of physics, Faculty of science, Sahand University of Technology, Tabriz.

## Abstract

The structure of plasma sheath in a low pressure acetylene plasma is studied in the frame work of multi-fluid approach. The plasma contains electrons, different species of positive and negative ions, and charged nanosize dust particles. The impacts of the negative ions on the sheath structure, spatial distributions of forces, dust particles accumulation near the wall and the incident flux of positive ions on the substrate were investigated. It is found that in the presence of negative ions, spatially periodic fluctuations are developed in the profiles of the plasma and dust parameters. The spatial period of the fluctuations is a few Deby lengths and their amplitude increases with increasing of the plasma electronegativity. With increasing of the electronegativity at the sheath edge, the incident dust flux on the wall decreases, whereas the positive ion flux increases.

PACS No. (30, 47, 52, 68)

قرار می‌دهد. تاکنون مطالعات عددی و تجربی متعددی به بررسی خصوصیات تخلیه‌های استیلنی اختصاص یافته است [۳،۴]. ولی این مطالعات عمدتاً بر روی ویژگی‌های حجم تخلیه استیلنی صورت گرفته است، در حالی که ساختار غلاف این نوع تخلیه‌ها که تعیین کننده خصوصیات پردازش پلاسمایی است با جزئیات کمتری مورد بحث قرار گرفته است. یون‌های منفی نقش اساسی در شکل‌گیری ذرات غبار دارند و تأثیر قوی روی دینامیک تخلیه پلاسمایی می‌گذارند. در اغلب

## مقدمه

تخلیه پلاسمایی گازهای هیدروکربنی، به ویژه پلاسمای استیلن ( $C_2H_2$ )، محیطی مناسب برای انواع پردازش پلاسمایی از قبیل نهشت فیلم کربنی الماس گونه و سنتز نانوتیوب‌های کربنی به حساب می‌آید [۱،۲]. پلاسمای استیلن قادر به تولید یون‌های پلیمریزه شده بیشتری نسبت به پلاسمای متان است و بنابراین در این نوع پلازماها گرایش بیشتری به تولید غبار وجود دارد. این ویژگی‌ها پلاسمای استیلن را به عنوان یک گاز خوراک مورد توجه

$m_j, n_j$  و  $v_j$ ، به ترتیب جرم، چگالی تعداد و مؤلفه  $z$  سرعت سیالی ذره نوع  $j$  ام ( $j=d, ip, e$ ) هستند. بار غبار و  $q_d$  پتانسیل غلاف می‌باشند. فرکانس یونیزاسیون،  $v_d^{ip,e}$  و  $v_g^{ip,e}$  فرکانس‌های برخورد یون‌های مثبت و الکترون‌ها به ترتیب با غبار و خشتی‌ها می‌باشند. با فرض این که برای یون‌های منفی اتلاف در دیواره بر اتلاف بازترکیب حجمی آن‌ها غلبه کند، این یون‌ها در تعادل بولتزمنی با پتانسیل الکتریکی غلاف قرار می‌گیرند [8]،

$$n_{in} = n_{0in} \exp\left(\frac{e\phi}{T_{in}}\right), \quad (7)$$

که  $in = C_2H^-, C_4H^-, C_6H^-$  و  $T_{in} < T_e$  دمای یون‌های منفی می‌باشد. در نهایت معادله پواسون، چگالی تعداد ذرات باردار پلاسما را به پتانسیل الکتریکی غلاف مرتبط می‌سازد

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} = 4\pi \left[ e \left( n_e + \sum_{in} n_{in} - \sum_{ip} n_{ip} \right) - n_d q_d \right], \quad (8)$$

در معادله (۴) نیروی کشش یونی ( $F_{di}$ ) به سمت زیرلایه و نیروی کشش خشتی ( $F_{dn}$ ) در جهت لبه غلاف بر نانوذرات غبار وارد می‌شود. بار تعادلی روی غبار ( $q_d$ ) از موازنه جریان‌های باردار کننده غبار به دست می‌آید

$$\sum_{ip} I_{ip} + \sum_{in} I_{in} + I_e = 0, \quad (9)$$

که  $I_{ip}, I_{in}$  و  $I_e$  به ترتیب جریان‌های یون مثبت، یون منفی و الکترون می‌باشند که از طریق تئوری حرکت مداری محدود برای هر یک از گونه‌ها (OML) تعیین می‌شوند [9]. برای شبیه‌سازی عددی، ابتدا معادلات (۱)–(۸)، با استفاده از روابط نرمالیزاسیون مناسب نرمالیزه می‌شوند [۱۰] و معادلات حاصل با در نظر گرفتن شرایط مرزی در لبه غلاف به روش رونگ-کوتای مرتبه چهارم حل می‌شوند [۱۰]. به طور همزمان، بار غبار نیز در هر نقطه از غلاف از حل معادله (۹) به دست آمده و در شبیه‌سازی معادلات غلاف وارد می‌شود.

### نتایج و بحث

در این بخش نتایج شبیه‌سازی غلاف پلاسما استیلین مرکب از چهار نوع یون مثبت ( $H_2^+, C_4H_2^+, C_2H_2^+, Ar^+$ )، سه نوع یون منفی ( $C_6H^-, C_4H^-, C_2H^-$ ) و ذرات غبار باردار ارائه می‌شود.

مطالعات پیشین روی غلاف پلاسما یغباری [۵–۷]، اثرات یون‌های منفی نادیده گرفته شده است. این ذرات می‌توانند در طول زمان خاموشی یک تخلیه پالسی یا در انتهای پردازش پلاسمایی و در نبود سدهای الکترواستاتیکی به داخل غلاف نفوذ کرده و دینامیک غلاف را نیز تحت تاثیر قرار دهند. در این کار، ساختار غلاف پلاسما استیلین با چهار نوع یون مثبت، سه نوع یون منفی و نانوذرات غبار مورد بررسی قرار می‌گیرد. از میان نیروهای وارد بر نانوذرات غبار، نیروی الکتریکی، گرانشی، کشش یونی و کشش خشتی در نظر گرفته شده‌اند. فرض شده است که ذرات غبار به عنوان چشمه برای الکترون‌ها و یون‌ها عمل کنند.

### معادلات مدل

در این بخش به توصیف مدل چندسیالی یک بعدی ناحیه غلاف پلاسمایی در یک تخلیه استیلینی می‌پردازیم. لبه غلاف در  $z=0$  و غلاف در  $z>0$  در نظر گرفته می‌شود. در لبه غلاف پتانسیل الکترواستاتیکی صفر و شرط شبه ختثائیت در این نقطه برقرار است. برای الکترون‌ها و یون‌های مثبت، اثرات یونیزاسیون، برخورد با خشتی‌ها و اتلاف بواسطه تجمع توسط ذرات غبار در نظر گرفته شده است. از برهم کنش میان ذرات غبار صرف نظر شده است. در این تقریب، چگالی و سرعت ذرات به وسیله معادلات پیوستگی

$$\frac{d}{dz}(n_d v_d) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz}(n_{ip} v_{ip}) = v_{ion}^{ip} n_e - v_d^{ip} n_d, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz}(n_e v_e) = \sum_{ip} v_{ion}^{ip} n_e - v_d^e n_d, \quad (3)$$

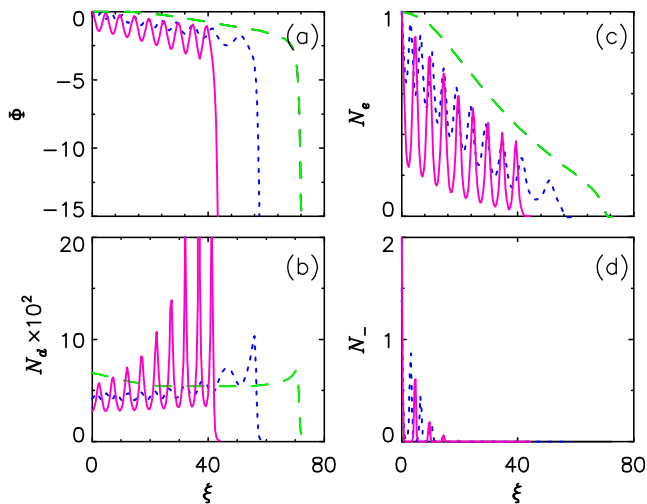
و معادلات ممنتوم

$$m_d v_d \frac{dv_d}{dz} = -q_d \frac{d\phi}{dz} + m_d g + F_{id} + F_{nd}, \quad (4)$$

$$m_{ip} v_{ip} \frac{dv_{ip}}{dz} = -e \frac{d\phi}{dz} - \frac{T_{ip}}{n_{ip}} \frac{dn_{ip}}{dz} - m_{ip} v_g^{ip} v_{ip}, \quad (5)$$

$$0 = e \frac{d\phi}{dz} - \frac{T_e}{n_e} \frac{dn_e}{dz} - m_e v_g^e v_e. \quad (6)$$

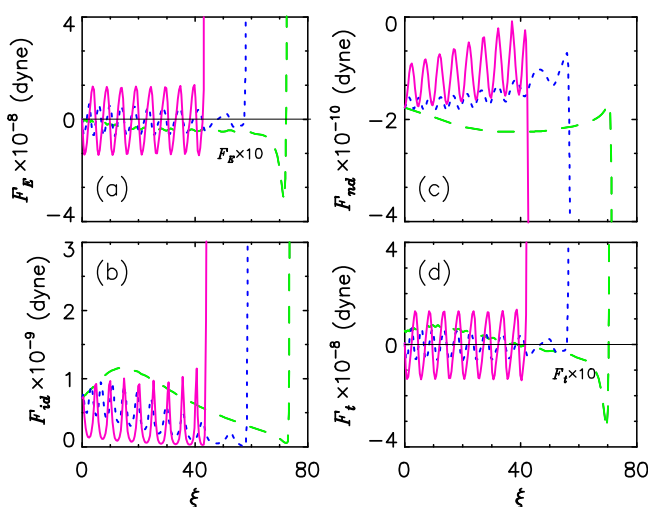
توصیف می‌شوند، که در آن  $ip = Ar^+, C_2H_2^+, C_4H_2^+, H_2^+$  و



شکل ۱: توزیع فضایی، (a) پتانسیل الکتریکی، (b) چگالی الکترون و (c) چگالی یون‌های منفی به ازای سه مقدار مختلف الکترون‌گاتیویته:  $\alpha = 0$  (خط تیره)،  $\alpha = 1.5$  (نقطه‌چین) و  $\alpha = 2.5$  (خط پر).

های غلاف موازنه دو نیروی الکتریکی و کشش یونی روی غبار است.

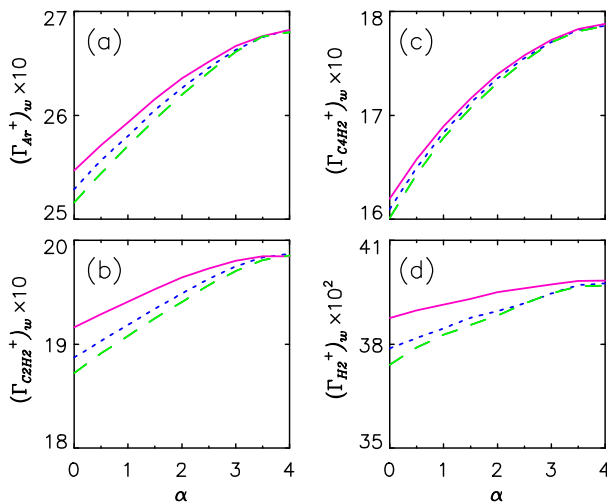
شکل ۳ وابستگی ماکزیمم چگالی غبار  $(N_d)_m$  و شار فرودی غبار روی زیرلایه  $(\Gamma_d)_w$  را به الکترون‌گاتیویته  $\alpha$  در مقادیر  $\gamma$  مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۳(a) دیده می‌شود که به ازای تمامی مقادیر  $\alpha$ ، چگالی ماکزیمم غبار در  $\gamma$  های بیشتر کوچکتر است.  $(N_d)_m$  وابستگی غیریکنواختی را به  $\alpha$  نشان می‌دهد، در حالی که شار فرودی غبار به طور خطی با  $\alpha$  کاهش می‌یابد. از



شکل ۲: توزیع فضایی (a) نیروی الکتریکی، (b) کشش یونی، (c) کشش خشی و (d) نیروی کل وارد بر ذرات غبار به ازای مقادیر مشابه  $\alpha$  در شکل (۱).

پارامترها و شرایط مرزی به کار رفته در این شبیه سازی عبارتند از:  
 $T_e = 1\text{eV}$  ،  $n_g = 10^{15}\text{cm}^{-3}$  ،  $n_{0e} = 10^{10}\text{cm}^{-3}$   
 $r_d = 4 \times 10^{-6}\text{cm}$  ،  $T_{ip} = 0.05\text{eV}$  ،  $T_{in} = 0.1\text{eV}$   
 که  $\rho = 2\text{gr/cm}^3$  و  $\Phi_w = -12$  ،  $\rho_d$  و  $\Phi_w$  به ترتیب شعاع غبار، چگالی جرمی غبار و پتانسیل نرمالیزه دیواره می‌باشند. برای بررسی اثر یون‌های منفی بر ساختار غلاف، توزیع فضایی پارامترهای غلاف و ویژگی های غبار بر حسب مقادیر مختلف الکترون‌گاتیویته در لبه غلاف ( $\alpha = \sum_{in} \alpha_{in}$  ،  $\alpha_{in} = n_{0in}/n_{in}$ ) و نسبت دمای الکترون به یون‌های منفی ( $\gamma = T_e/T_{in}$ ) به دست آمده‌اند. شکل ۱ منحنی‌های تغییرات پتانسیل غلاف و چگالی‌های الکترونی، ذرات غبار و یون‌های منفی را برحسب فاصله نرمالیزه  $\xi$  از لبه غلاف به ازای سه مقدار مختلف الکترون‌گاتیویته  $\alpha$  نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، حضور یون‌های منفی موجب گسترش نوسانات فضایی در منحنی‌های پتانسیل الکتریکی و چگالی الکترونی ناحیه غلاف شده است. به دلیل کاهش دمای موثر ذرات منفی در اثر افزایش الکترون‌گاتیویته، ضخامت غلاف کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش ضخامت غلاف قدرت میدان الکتریکی و در نتیجه دامنه نوسانات افزایش می‌یابد.

توزیع فضایی نیروهای مختلف وارد بر ذرات غبار به ازای تغییر در الکترون‌گاتیویته در شکل ۲ نشان داده شده است. در پلاسماهای فشار پایین (کمتر از ۱۰۰ میلی تور) و برای ذرات غبار در مقیاس نانو، دو نیروی الکتریکی و کشش یونی در مقایسه با نیروهای کشش خشی و گرانشی، بر دینامیک ذرات غبار حاکم می‌باشند. برای توضیح رفتار نوسانی غلاف باید توجه کرد که در غیاب یون‌های منفی، نیروی کشش یونی بر نیروی الکتریکی غلبه می‌کند و ذرات غبار را به سمت دیواره شتاب می‌دهد، که این منجر به کاهش چگالی تعداد این ذرات خواهد شد (شکل ۱(b)). نتیجه کاملاً متفاوتی در حضور یون‌های منفی دیده می‌شود. با توجه به شکل‌های ۲(a) و ۲(b)، با فاصله از لبه غلاف نیروی الکتریکی (نیروی بازدارنده روی ذرات غبار باردار منفی) به سرعت افزایش پیدا می‌کند و در نقطه‌ای معین بر نیروی کشش یونی غلبه کرده و موجب تراکم موضعی ذرات غبار و شکل‌گیری اولین ماکزیمم در چگالی غبار می‌گردد. به این ترتیب دلیل ایجاد نوسانات در منحنی



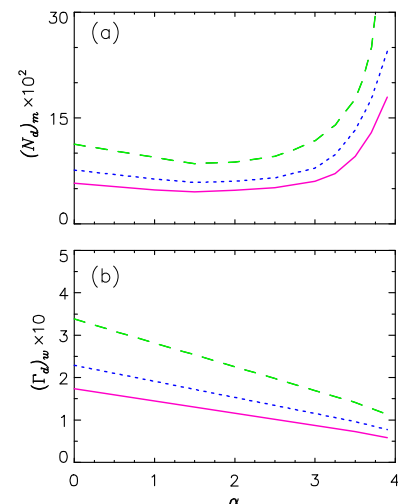
شکل ۴: وابستگی شار یون‌های مثبت به الکترونگاتیویته  $\alpha$ ، به ازای سه مقدار مختلف  $\gamma$  مشابه در شکل (۳).

های غلاف گسترش می‌یابد و دامنه این نوسانات با الکترونگاتیویته افزایش پیدا می‌کند. شار فرودی یون‌های مثبت با  $\alpha$  و  $\gamma$  تقویت می‌شود، درحالی‌که شار فرودی ذرات غبار با هر دوی این پارامترها کاهش می‌یابد. برای اجتناب از آلودگی غباری زیرلایه، در نظر گرفتن  $\alpha \approx 3$  انتخاب مناسبی جهت کاهش همزمان تراکم غبار بالای زیرلایه و شار فرودی غبار روی زیرلایه می‌باشد. نتایج حاصل در بسیاری از فرایندهای پردازش مواد توسط پلاسماهای دمایی پایین شامل نانو ساخت پلاسمایی، تصحیح سطوح و نهشت فیلم نازک، از کاربرد بالایی برخوردار می‌باشد.

## مرجع‌ها

- [۱] J. Robertson, *Mater. Sci. Eng. R* **37** 129 (2002).
- [۲] K. Ostrikov, *Rev. Mod. Phys.* **77**, 489 (2005).
- [۳] K. D. Blecker, A. Bogaerts, and W. Goedheer, *Phys. Rev. E* **73** 026405 (2006).
- [۴] K. Ostrikov, *Plas Proc. Polym.* **4**, 27 (2007).
- [۵] B. P. Pandey, A. Samarian, and S. V. Vladimirov, *Phys. Plasmas* **14**, 093703 (2007).
- [۶] G. Foroutan, *Phys. Plasmas* **17**, 123711 (2010).
- [۷] G. Foroutan and A. Akhondi, *J. Appl. Phys.* **112**, 073301 (2012).
- [۸] I. G. Kouznetsov, A. J. Lichtenberg, and M. A. Lieberman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **5**, 662 (1996).
- [۹] P. K. Shukla and A. A. Mamun, "Introduction to Dusty Plasma Physics" (IOP, Bristol, 2002).

[۱۰] مروی، زهرا؛ فروتن، غلامرضا؛ «سنتر کنترل شده میکروساختارهای دو بعدی منظم در پلاسماهای فعال با چگالی بالا»؛ *مجله علوم و مهندسی سطح*، شماره ۱۲، سال ۱۳۹۰، صفحه ۴۹ تا ۶۰.



شکل ۳: وابستگی (a) ماکزیمم چگالی تعداد غبار و (b) شار فرودی غبار روی زیرلایه به الکترونگاتیویته  $\alpha$ ، به ازای سه مقدار مختلف پارامتر  $\gamma$ :  $\gamma = 5$  (خط تیره)،  $\gamma = 10$  (نقطه چین) و  $\gamma = 20$  (خط پر).

مقایسه شکل‌های ۳(a) و ۳(b)، می‌توان نتیجه گرفت که برای مینیمم کردن شار فرودی غبار و جلوگیری از انباشت آن روی زیرلایه، الکترونگاتیویته  $\alpha \approx 3$  انتخاب مناسبی است. یکی از مهمترین فاکتورها در پردازش مواد توسط پلاسما، کنترل شار یون‌های مثبت در سطح زیرلایه است. برای بررسی اثر الکترونگاتیویته روی شار یون‌های مثبت، در شکل ۴ شار این یونها بر حسب تابعی از  $\alpha$  و به ازای سه مقدار مختلف پارامتر  $\gamma$  محاسبه شده است. از آن جایی که چگالی یون‌های منفی با  $\alpha$  افزایش می‌یابد، به ازای یک  $n_{0e}$  معین در لبه غلاف، چگالی یون‌های مثبت باید افزایش یابد تا شرط شبه خنثائیت در لبه غلاف برقرار شود و این منجر به افزایش شار فرودی یون‌های مثبت با  $\alpha$  می‌گردد. همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد که شار یون‌های مثبت با  $\gamma$  نیز افزایش می‌یابد.

## نتیجه گیری

از یک مدل چندسیالی برای بررسی اثرات چگالی و دمایی یون‌های منفی روی ساختار غلاف استیلنی و دینامیک نانوذرات غبار بهره گرفته شده است. نتایج به صورت زیر خلاصه می‌شود:  
در حضور یون‌های منفی نوسانات فضایی در منحنی‌های مشخصه