

بررسی پروب لانگمویر و تحلیل منحنی مشخصه جریان - ولتاژ توسط کد محاسباتی

یحیی صادقی*

پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران

تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹

چکیده:

یکی از تکنیک‌های اساسی برای پیمایش پارامترهای پلاسما، استفاده از پروبهای الکترواستاتیکی است. پروبهای الکترواستاتیکی پلاسما در سال ۱۹۲۴ توسط اروینگ لانگمویر Irving Langmuir ابداع گردید [۱ و ۲]. این دستگاه ساده اولین وسیله تشخیص برای اندازه گیری چگالی الکترونها و یونها، دمای الکترون، پتانسیل پلاسما و پتانسیل شناور (*Electron & Ion Density, Electron Temperature, Plasma Potential & Floating Potential*) میباشد. در این روش اندازه گیری از یک الکتروود فلزی کوچک و یا پروب که ولتاژهای متفاوتی به آن اعمال میشود، استفاده میگردد. کیفیت بالای پروبهای الکترواستاتیکی، آنها را ابزار خوبی برای مطالعه نوسانات پلاسما نموده است. دقت اندازه گیری مشخصات پلاسما به وضعیت و نوع استفاده از آنها بستگی دارد. طراحی، ساخت و استفاده از پروب بسیار ساده بوده ولی تفسیر و تئوری آن بسیار پیچیده و مشکل میباشد [۳ و ۴]. تحقیق پیش رو به بررسی پروب لانگمویر و ارائه کد محاسباتی برای تحلیل منحنی جریان - ولتاژ می پردازد. یکی از اهداف مهم، به نشان دادن روشی در تحلیل داده های منحنی ولتاژ-جریان پروب لانگمویر اختصاص دارد. در این مقاله کوشش کرده ایم تا مکانیسم و روش را شرح داده و بر پیدا کردن یک ارزیابی تقریبی داده های منحنی ولتاژ-جریان در پروب لانگمویر متمرکز خواهیم شد و در بخش پایانی نتایج را خواهیم دید.

کلید واژه: تحلیل، پروبهای الکترواستاتیکی، پروب لانگمویر، دما و چگالی الکترونها.

۱- **مقدمه:** پروبهای لانگمویر معمولاً شامل یک و یا چند الکتروود رسانای فلزی بوده که درون پلاسما قرار میدهند. این الکتروودها از نوعی فلزات با دمای ذوب بالا مانند تنگستن و یا نیکل که توسط عایقی - معمولاً سرامیک - احاطه شده است. یک منبع تغذیه متصل به زمین برای تغییرات پتانسیل پروب در ناحیه بالا و پایین پتانسیل پلاسما استفاده شده و جریان اندازه گیری شده توسط پروب جمع آوری شده و خروجی آن یک مشخصه جریان - ولتاژ (I-V) است که امکان یافتن پارامترهای اولیه پلاسما را فراهم می‌سازد.

۲- **مطالب پایه ای پیرامون پروب لانگمویر:** تئوریهای اصلی برای جمع آوری یونها را میتوان بصورت زیر بیان نمود: الف - تئوری Allen-Boyd-Reynolds (ABR)، ب- تئوری Bernstein-Rabinowitz توسعه یافته توسط Laframboise که به آن تئوری BRL میگویند. ج - تئوری محدودیت حرکت مداری لانگمویر (Orbital Motion Limited theory). تئوری OML توسط موت - اسمیت [۲] و لانگمویر [۱] توسعه یافت. برای توزیع ماکسولی یونها در دمای Ti، جریان OML در پروب استوانه ای توسط رابطه زیر بیان

$$I = A_p J_r \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \chi^{1/2} + e^\chi (1 - \text{erf}(\chi^{1/2})) \right] \xrightarrow{\chi \gg 1} A_p J_r \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{1 + \chi} \quad \text{میشود.}$$

در اینجا $\chi \equiv -eV_p / KT_i$ ولتاژ پروب، V_p و A_p سطح پروب، J_r جریان تصادفی یونها است. یکی از فاکتورهایی که در تحلیل پروب لانگمویر نقش اساسی دارد فاکتور مهم ξ_p است (ξ_p نسبت شعاع پروب به اندازه λ_D طول دبی است: $\lambda_D \equiv (\epsilon_0 KT_e / ne^2)^{1/2}$) . در تئوری OML برای اندازه حرکت زاویه ای یونها که در آن از شکل گیری غلافها صرفنظر شده و تئوری ABR شامل غلافها بوده [۸] و از حرکت مداری صرفنظر شده و تئوری BRL هر دو حالت را در منحنی $I_i - V_p$ برای مقادیر کمی از ξ_p در بر میگیرد [۹] و این منحنی ها میتوانند از این توابع بوجود بیایند.

$$i = \frac{I_i}{enA_p} \left(\frac{KT_e}{2\pi M} \right)^{-1/2}; \quad \eta \equiv -\frac{e(V_p - V_s)}{KT_e}; \quad \frac{1}{i^4} = \frac{1}{(A\eta^B)^4} + \frac{1}{(C\eta^D)^4}$$

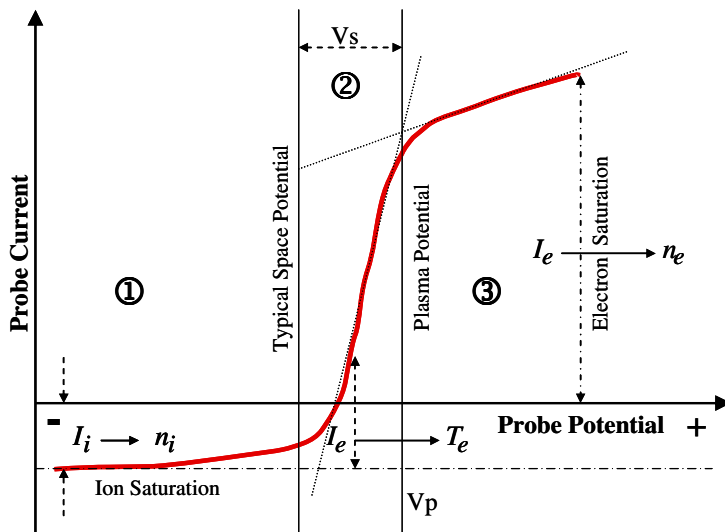
A و B و C و D پارامترهای تابع بر حسب ξ_p هستند که میتوان آنها را بصورت زیر نشان داد.

$$A = a + 1 / \left(\frac{1}{b\xi^c} - \frac{1}{d \ln(\xi/f)} \right); \quad B, D = a + b\xi^c \exp(-d\xi^f); \quad C = a + b\xi^{-c} \quad (1)$$

و ضرایب f, e, d, c, b, a در رابطه بکار برده و میتواند منحنیهای Laframboise را دوباره سازی کند. با استفاده از منحنی $I_i^2 - V_p$ که رابطه نزدیکی با تئوری BRL دارد میتوان جریان الکترون را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$I_e = neA_p \left(\frac{KT_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \exp\left[-\frac{(V_p - V_s^e)}{KT_e} \right] \quad (2)$$

۳- نمودار مشخصه I-V خروجی پروب لانگمویر: یکی از مشخصات اساسی پروب، منحنی مشخصه



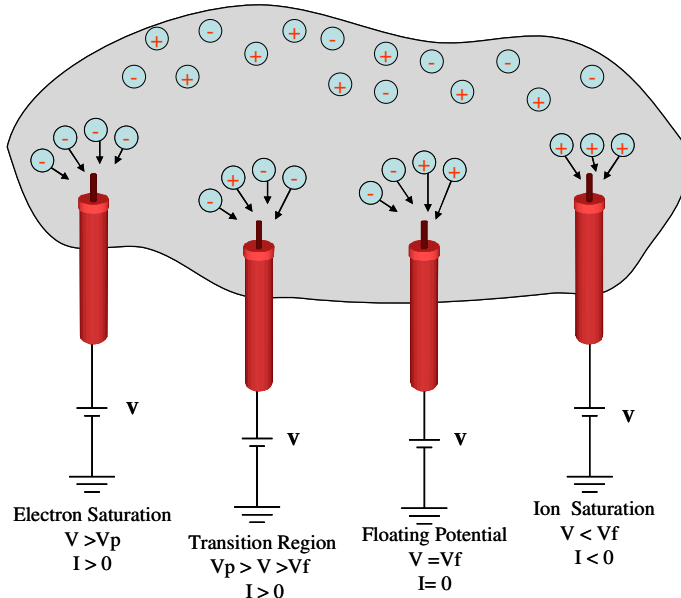
شکل ۱ شماتیک کلی ولتاژ-جریان جاروب شده توسط یک

پروب لانگمویر در پلاسما و نواحی مختلف در منحنی ولتاژ-جریان

میزان جریان یونها توسط معیار بوهلم زمانیکه حرارت یونها خیلی پایین تر از حرارت الکترونهاست تحت بررسی در پلاسما باشد، بیان شده است. جریان یون وابسته به حرارت الکترون را میتوان به وسیله رابطه زیر با توجه

ولتاژ- جریان است که آنرا به سه ناحیه میتوان تقسیم نمود که در هر کدام از این نواحی میتوان یک و یا چند پارامتر پلاسما را تعیین نمود [۷ و ۶]. پروب وقتی که نسبت به پتانسیل پلاسما را به طور افزایشی بصورت منفی بایاس شده ناحیه اشباع یونی قابل دسترسی میباشد. در این ناحیه (ناحیه ۱) فقط یونهای مثبت به پروب خواهند رسید. توضیح ناحیه اشباع جریان بسیار مشکل میباشد.

به پارامترهای $n_{i\infty}$ چگالی یون جایی که، آشفتگی به وسیله میدان الکتریکی پروب را ندارد و S مساحت رویه پروب، معین نمود: $I_i = 0.6 \times n_{i\infty} e S \sqrt{\frac{T}{m_i}}$. این بیان صریحاً فقط در غلاف بدون تصادم با شرط اینکه مسیر



شکل ۲ جمع‌آوری یونها و الکترونها در نواحی مختلف در منحنی ولتاژ-جریان پروب لانگمیر

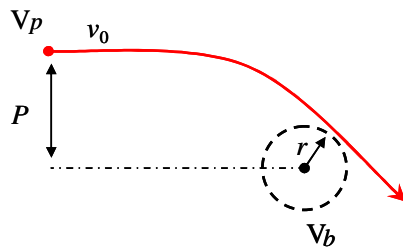
آزاد متوسط بزرگتر از اندازه غلاف باشد، معتبر است. در این حالت یک جریان منفی ثابت (جریان اشباع یون) را می‌توان اندازه‌گیری کرد و از این جریان می‌توان چگالی یون n_i را بدست آورد.

الکترون‌ها از یک ناحیه که غلاف خوانده میشود (جایی نزدیک به سطح پروب که پتانسیل اعمالی به وسیله پروب توسط پلاسما حفاظ نشده) جمع‌آوری خواهند شد، زمانیکه پروب بایاس میشود پتانسیل آن کمی کوچکتر از پتانسیل پلاسما بوده و فقط ذراتی که انرژی کافی برای غلبه بر سد پتانسیل دارند، جمع‌آوری خواهند شد.

به این ناحیه (ناحیه ۲ در شکل ۱) **ناحیه کند کننده الکترون** گوئیم که بسادگی قابل توضیح بوده، در این ناحیه پروب در واقع به عنوان یک سلکتور انرژی رفتار میکند، فقط الکترون‌هایی با انرژیهای جنبشی به اندازه کافی بزرگ که بر سد پتانسیل غلبه مینمایند را جمع‌آوری میکند. اگر پنخس الکترون در تعادل گرمایی بصورت موضعی باشد، تابع توزیع انرژی الکترونی را ماکسولی فرض شده و شدت جریان این حالت از این

رابطه پیروی میکند: $I_e = n_e e A_p \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{e(V - V_p)}{kT_e} \right)$. I_e جریان الکترونی است، n_e چگالی

عددی الکترون، e بار الکترون، A_p مساحت پروب، k ثابت بولتزمان، T_e حرارت الکترون و m_e جرم الکترون میباشد. با استفاده از رسم لگاریتم طبیعی $\ln[I_e]$ بر ولتاژ اعمال شده V ، دمای الکترون و چگالی عددی الکترون در جانشانی T_e در رابطه بدست خواهد آمد. در این حالت هم الکترونها و هم یونها در تولید جریان در الکتروند دخیل هستند پس جریان در ناحیه دوم بصورت مجموع جریان یون و جریان الکترون خواهد بود. **ناحیه الکترون شتاب یافته** (ناحیه ۳) را به وسیله نظریه حرکت مداری میتوان توصیف نمود و یک بیان برای جریان الکترونی در این ناحیه بصورت زیر میتواند باشد: بار نقطه‌ای در یک پتانسیل بایاس V_b ، که از یک الکترون با بار e که بوسیله فاصله r_0 با پتانسیل V_p جدا شده را در نظر بگیرید است. رابطه شدت جریان



جمع آوری شده به وسیله یک پروب استوانه‌ای معین و یک تابع توزیع سرعت الکترون (ماکسولی) و با توجه به شکل ۳ صورت زیر خواهد بود:

$$I_e = n_e e A_p \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \times \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{e(V - V_p)}{kT_e} \right)^{1/2}$$

شکل ۳: شماتیک برای نظریه حرکت مداری

نتیجه ترسیم مربع جریان الکترونی بر ولتاژ، متمایل به یک خط مستقیم خواهد بود و شیب آن اندازه چگالی $(n_e)^2$ را به دست می‌دهد. در حالت سوم که پتانسیل الکتروود از یک حد بیشتر شده و جریان به حالت اشباع رسیده و چگالی جریان حاصله، مربوط به جریان اشباع الکترون خواهد بود که علاوه به چگالی بر چگالی جریان یون به جرم یون و الکترون بستگی دارد.

۴- ارزیابی منحنی جریان ولتاژ پروب لانگمویر بصورت زیرانجام می پذیرد:

- با تطبیق خطی منحنی Straight-Line Fit جریان اشباع یونها و انجام تفریق جریان یونها از کل جریان الکترونها را بدست می آوریم [۶].
- رسم لگاریتمی منحنی جریان الکترون در برابر ولتاژ
- تعیین پتانسیل پلاسما و جریان اشباع الکترونها از تقاطع خطوط تطبیق خطی
- تعیین دمای الکترونها با توجه به تغییرات لگاریتمی جریان مربوط به تغییرات ولتاژ
- تعیین چگالی الکترونها از روی جریان اشباع الکترونها و دمای الکترون

۵- نتایج تحلیل برای تعیین دما و دانسیته پلاسما با استفاده از کد محاسباتی

با توجه به رابطه $\eta \equiv -\frac{e(V_p - V_s)}{kT_e}$ جریان الکترونها برابر خواهد بود با: $I_e(mA) = Qe^{-\eta}$. با قرار دادن

$$Q = 10^3 S n_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \quad \text{مقادیر، رابطه بار بصورت زیر خواهد شد:}$$

$$\frac{Q}{n_e S} = 10^3 (1.6 \times 10^{-19}) \left[\frac{(1.6 \times 10^{-12}) T_e (eV)}{(2\pi)(0.91 \times 10^{-27})} \right]^{1/2} = 268 \times 10^{-11} \sqrt{T_e} \rightarrow Q = 268 n_1 S \sqrt{T_e}$$

در این رابطه چگالی مضربی از 10^{11} cm^{-3} میباشد.

$$\rightarrow I_e = 268 n_1 S T_e^{1/2} e^{\frac{(V_p - V_s)}{T_e}} \quad \text{در انتها رابطه برای تعیین جریان الکترونها بدست می آید:}$$

لگاریتم جریان الکترونها را بصورت معادله خطی با ضریب زاویه m و عرض از مبدا B ، برای تعیین دما

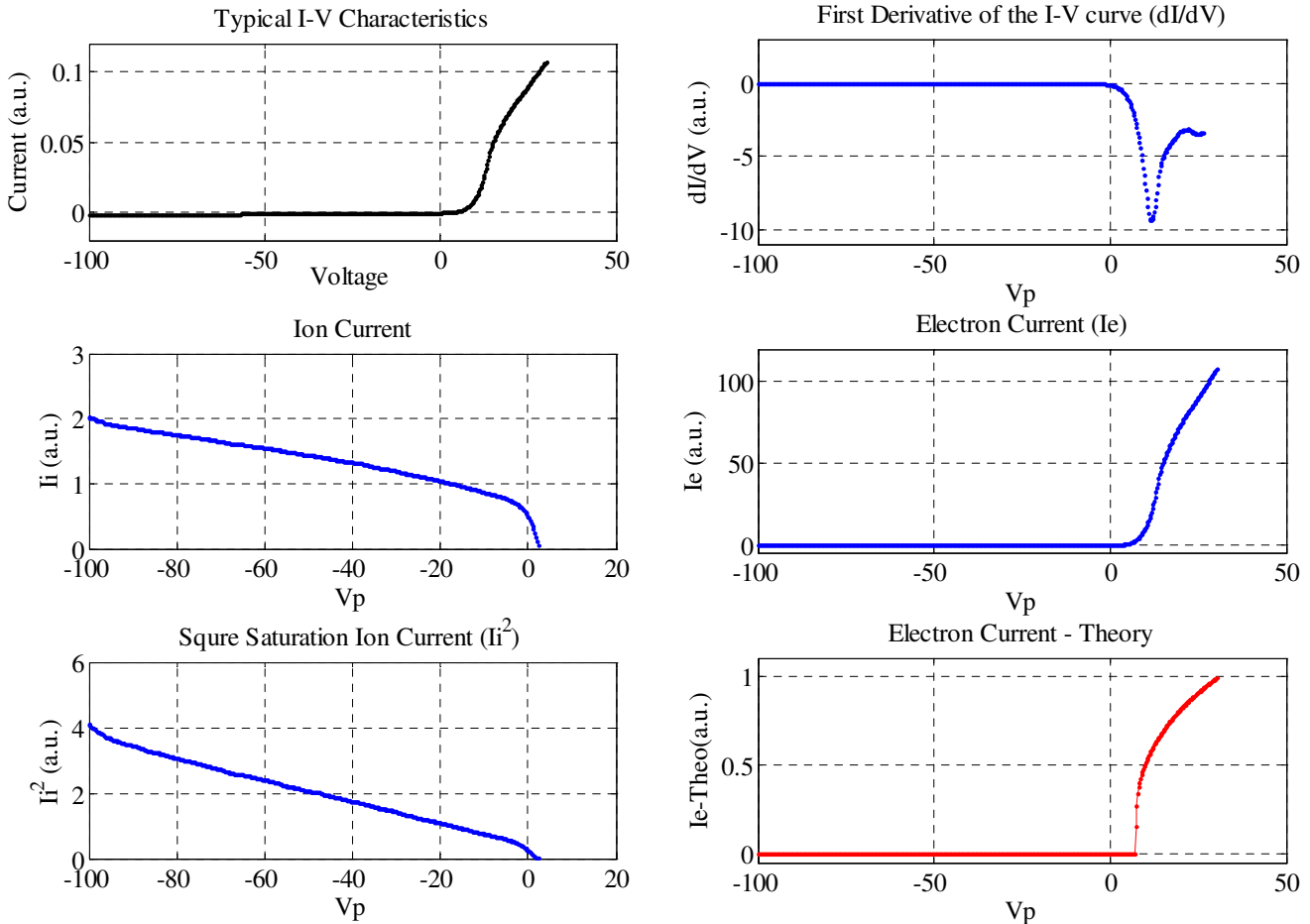
$$\ln I_e = \ln(268n_1ST_e^{1/2}) + \frac{(V_p - V_s)}{T_e} = mV_p + B \quad \text{و چگالی الکترونها از روابط زیر استفاده میگردد:}$$

$$T_e(eV) = 1/B \quad ; \quad n_1 = \exp(M + \frac{V_s}{T_e}) / 268ST_e^{1/2}$$

نمونه داده های اولیه و نتایج تحلیل شده توسط کد محاسباتی:

R_p	L	S	AR	Gas	KT_e	λ_D	ξ	V_s	T_e	eV_s	iV_s	n_1
0.0075	1.0	0.047	1.004	40	2.161	0.002	4.05	14.3	2.16	14.0	14.3	3.45

با استفاده از منحنی $I_i^2 - V_p$ که رابطه نزدیکی با تئوری BRL دارد جریان الکترونها را تعیین نمودیم (معادله ۲). و با توجه به منحنی $I_i - V_p$ برای مقادیر کمی از ξ برای پارامترهای تابع (D و C و B و A) بر حسب ξ (معادله ۱) مقادیر زیر بدست آمد. $A = 1.5519$; $B = 0.54983$; $C = 1.2404$; $D = 0.35607$.



شکل ۴: نتایج تحلیل نمونه داده تجربی جریان-ولتاژ پروب لانگمور شامل

مشتق جریان، جریان الکترون و یونها، جریان اشباع یونها

۶- نتیجه گیری: پروب لانگمویر و نکات مهم آن از قبیل منحنی مشخصه و روش ارزیابی جریان-ولتاژ مورد بررسی قرار گرفتند و چگونگی استفاده از تحلیل در مشخص کردن پارامترهای مورد بحث توضیح داده شدند. برای داده نوعی جریان-ولتاژ ما موفق به تعیین جریان الکترون و یونها، جریان اشباع یونها، با استفاده از تطبیق خطی منحنی و رسم لگاریتمی منحنی جریان الکترون در برابر ولتاژ، تقاطع خطوط تطبیق خطی و تغییرات لگاریتمی جریان مربوط به تغییرات ولتاژ و تعیین چگالی الکترونها از روی جریان اشباع الکترونها و دمای الکترون گردیدیم.

سپاسگذاری: جا دارد از حمایت های بیدریغ جناب آقای دکتر فرهد ریاست محترم پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته ای و مشورت های سودمند مهندس حسین رسولی در این پژوهش تشکر بنمائیم.

مراجع

- [1] Langmuir I 1923 J. Frank. Inst. 196 751.
- [2] Mott-Smith H M and Langmuir I 1926 Phys. Rev. 28 727.
- [3] Huddleston R H and Leonard SL, eds. (New York: Academic Press) Plasma Diagnostic Techniques.
- [4] Chung, P. M., Talbot, L. and Touryan, K. J., Electrostatic Probes in Stationary and Flowing Plasmas, Springer-Verlag, New York, 1975.
- [5] F.F. Chen, Electric Probes, in "Plasma Diagnostic Techniques", ed. by R.H. Huddleston and S.L. Leonard (Academic Press, New York), Chap. 4, pp. 113-200 (1965).
- [6] Francis F. Chen, Saturation Ion Currents to Langmuir Probes, Journal of Applied Physics, Vol. 36, No. 3 (Part 1), 675-678, March 1965 Copyright 1965 by the American Institute of Physics Printed in U. S. A.
- [7] Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics, Francis F. Chen, Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEE-ICOPS meeting, Jeju, Korea, June 5, 2003
- [8] Allen, J.E., Boyd, R.L.F., and Reynolds, P. 1957 Proc. Phys. Soc. (London) B70 297
- [9] Laframboise, J.G. 1966 Univ. Toronto Inst. Aerospace Studies Rept. 100 (June, 1966).