

## ساخت پروب ماخ دو وجهی و اندازه گیری سرعت و شار ذرات پلاسما در تخلیه تابان مخلوط گاز سیلان با هلیوم

قاسمی داغی، مجید - ایرجی، داود\*

دانشگاه امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه گداخت

### چکیده

پروب ماخ دووجهی به منظور اندازه گیری شار ذرات پلاسمای تخلیه تابان از دو صفحه فولاد ضدزنگ (SS304) ساخته شده است. نمودار ولتاژ - جریان پروب ماخ دو وجهی رسم شده و با یکدیگر مقایسه شده اند. همچنین پارامترهای پلاسما همچون دما، چگالی پلاسما، فرکانس پلاسما و شعاع دمای نیز اندازه گیری شده است. در نهایت با استفاده از جریان های اشباع یونی اندازه گرفته شده توسط دو وجه پروب در پلاسمای مخلوط گاز سیلان با هلیوم، سرعت و شار فرودی یون ها در پلاسمای تخلیه تابان بدست آمد.

کلیدواژه: پروب ماخ دووجهی - جریان اشباع یونی - سرعت ذرات پلاسما - شار ذرات پلاسما

### مقدمه

پروب ماخ یکی از ساده ترین و مفید ترین وسایل اندازه گیری مشخصه های پلاسما از جمله : سرعت ذرات پلاسما ، عدد ماخ، سرعت چرخش پلاسما و ترابرد ذرات می باشد. ساده ترین پروب های ماخ از دو وجه ساخته شده اند که توسط عایق از یکدیگر جدا شده و هر کدام نسبت به جریان اشباع یونی بایاس شده اند. اگر شارش خالص ذرات پلاسما وجود داشته باشد وجهی که در جهت شارش ذرات پلاسما قرار دارد بیشترین جریان اشباع یونی (I<sub>Upstream</sub>) و وجه دیگر کمترین جریان اشباع یونی یعنی (I<sub>Downstream</sub>) را جمع می کند.

عدد ماخ یونی ( $M_i$ ) از نسبت جریان های اشباع یونی ( $R$ ) که از این دو وجه بدست می آید، قابل محاسبه می باشد. این نسبت با رابطه زیر بیان می شود [۱]:

$$R = \frac{I_{Up}}{I_{Down}} \quad (1)$$

در این رابطه  $I_{Up}$  توسط وجهی که در جهت شارش ذرات پلاسما قرار دارد و  $I_{Down}$  توسط وجهی که در خلاف جهت آن قرار دارد، بدست می آید. ارتباط عدد ماخ و  $R$  با رابطه زیر بیان می شود [۱]:

$$M_i = M_c \ln R \quad (2)$$

$M_c$  فاکتور کالیبراسیون پروب ماخ نامیده می شود و تابعی از نسبت دمای الکترون و یون می باشد [۲-۴]. با استفاده از پروب ماخ می توان سرعت شارش ذرات پلاسما را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$M_i = U/C_s \quad (3)$$

در این رابطه  $C_s = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}$  سرعت صوتی یون،  $U$  سرعت شارش ذرات پلاسما،  $T_e$  دمای الکترون،  $m_i$  جرم یون و  $k$  ثابت بولتزمن می باشد [۱-۳].

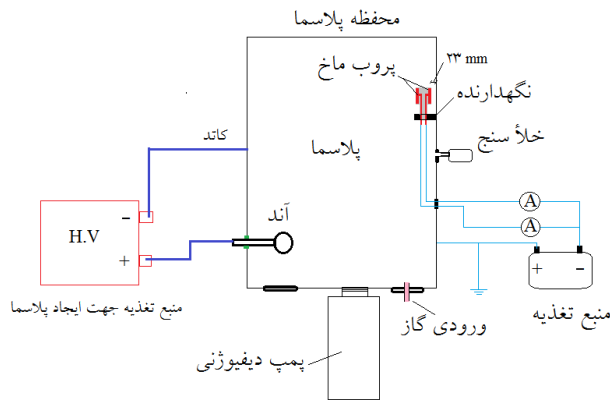
## روش کار

پلاسماهای مورد استفاده در این آزمایش پلاسماهای تخلیه تابان (DC glow discharge) با ترکیبی از گازهای سیلان و هلیوم با نسبت ۱ به ۹ می باشد. ولتاژ تخلیه ۴۶۰ ولت و جریان تخلیه الکتریکی ۹۲,۶ میلی آمپر در فشار  $1,6 \times 10^{-1}$  torr می باشد. محفظه ایجاد پلاسما، استوانه ای با قطر ۳۵ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر از جنس Stainless Steel 304 در شکل (۱) نشان داده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی گاز سیلان و هلیوم در جدول (۱) درج شده است.

جدول (۱): مشخصات کلی گاز سیلان (Silane) و هلیوم (Helium) [۶].

هلیوم	سیلان	
He	H4-Si	فرمول ملکولی
4 g/mole	32.13 g/mole	وزن ملکولی

None	-185.2 °C	نقطه ذوب
-267.9 °C	-111.7 °C	نقطه جوش



(ب)



(الف)

شکل (۱): (الف) محفظه پلاسمای glow discharge؛ (ب) شماتیکی از سیستم محفظه پلاسما، پروب ماخ، منابع تغذیه و سیستم خلأ

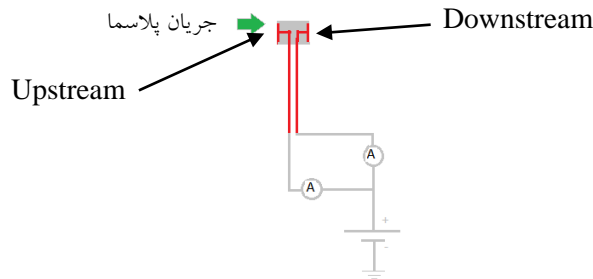
پروب ماخ دو وجهی از دو صفحه دایره‌ای فولاد ضدزنگ (SS304) با قطر ۹ میلی‌متر و فاصله ۱۰ میلی‌متر نسبت به یکدیگر ساخته شده است. این دو وجه با عایق اپوکسی طوری از یکدیگر جدا شده اند که فقط سطح آنها با پلاسما در تماس می باشند (شکل ۲).



شکل (۲): پروب ماخ دو وجهی

این پروب به صورتی در داخل محفظه قرار گرفته است که یک وجه آن به سمت مرکز پلاسما (Upstream) است و وجه دیگر به طرف دیواره محفظه خلأ (Downstream) با فاصله ۲۳ میلی‌متر از آن قرار دارد. شکل (۳) مدار الکتریکی پروب ماخ دو وجهی را نشان می دهد. در این آزمایش علاوه بر اندازه گیری جریان اشباع یونی، نمودار

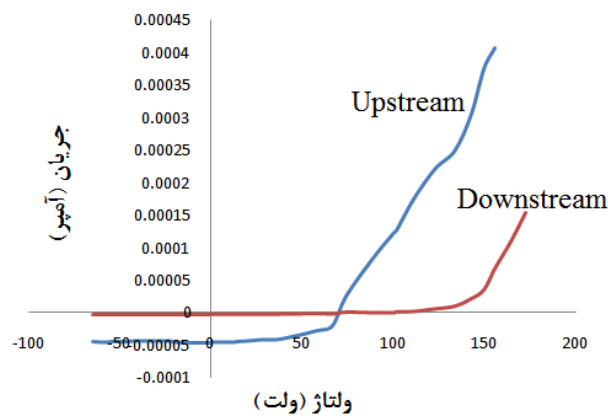
ولتاژ - جریان برای هر دو وجه پروب رسم شده و پارامترهای پلازما بر مبنای اندازه گیری های انجام شده توسط هر دو وجه پروب بدست آمده و بایکدیگر مقایسه شده اند. نمودارهای مربوط به این آزمایش در ادامه نشان داده می شود.



شکل (۳): مدار الکتریکی پروب دو وجهی

## نتایج

شکل (۴) نمودار ولتاژ - جریان برای پروب دو وجهی (Upstream و Downstream) را نشان می دهد. این نمودار برای هر دو سطح پروب رسم شده است. محاسبات مربوط به دما، چگالی الکترون، فرکانس پلازما و... با توجه به این نمودار انجام شده و در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۴): نمودار ولتاژ - جریان دو وجه پروب ماخ

مطابق نمودار ولتاژ- جریان به دست آمده، وجوه پروب ماخ در ولتاژهای کمتر از ۵۰- ولت می‌توانند یون‌ها را به طور کامل جمع‌آوری کنند یا به عبارتی به جریان اشباع یونی برسند. لذا در این مطالعه برای اندازه‌گیری با پروب ماخ، هر دو وجه پروب ماخ با ولتاژ ۸۰- ولت بایاس شده‌اند.

جدول (۲): پارامترهای پلاسمای مخلوط گاز سیلان و هلیوم در فشار  $p = 1.6 \times 10^{-1} \text{ torr}$ ، محاسبه شده با پروب ماخ دو وجهی. ولتاژ بایاس پروب ماخ برای بدست آوردن جریانهای اشباع یونی برابر ۸۰- ولت می‌باشد.

Downstream	Upstream	پارامتر مورد نظر
۸,۲	۱۲,۵	دمای الکترون (eV)
$4,5 \times 10^{13}$	$5,4 \times 10^{14}$	چگالی ( $\text{m}^{-3}$ )
$37,8 \times 10^{10}$	$13,12 \times 10^{11}$	فرکانس پلاسما ( $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ )
۱۰۷۸۵	۱۳۳۱۵	سرعت صوتی یون (m/s)
۳۱۷	۱۱۳	شعاع دبای ( $\mu\text{m}$ )
۳	۴۵	جریان اشباع یونی ( $\mu\text{A}$ )

با توجه به جریان‌های اشباع یونی بدست آمده، ابتدا عدد ماخ ( $M_i$ ) و سپس سرعت ذرات پلاسما (Upstream و Downstream) را محاسبه می‌کنیم. طبق مدل جنبشی چانگ (Chung's kinetic model) برای پلاسمای با نسبت

$$\frac{T_i}{T_e} < 1 \quad \text{مقدار } M_c \approx 0.83 \text{ خواهد بود [۴]:}$$

$$M_i = M_c \ln R = 0.83 \ln\left(\frac{45}{3}\right) = 2.247$$

جرم یونی ترکیب گازی فوق ( $m_{igas}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m_{igas} = (0.1 \times m_{iSiH_4}) + (0.9 \times m_{iHe}) = (0.1 \times 5.3 \times 10^{-26} \text{ kg}) + (0.9 \times 0.664 \times 10^{-26} \text{ kg}) = 1.128 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

که  $m_{iSiH_4}$  جرم یونی سیلان و  $m_{iHe}$  جرم یونی هلیوم می‌باشد.

$$C_{sUpstream} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_{igas}}} = \sqrt{\frac{(12.5ev \times 1.6 \times 10^{-19})j}{1.128 \times 10^{-26} kg}} \approx 13315 \frac{m}{s}$$

$$U_{Upstream} = C_{sUp} M_i = \sqrt{\frac{kT_e}{m_{igas}}} M_i = 13315 \left(\frac{m}{s}\right) \times 2.247 = 29919 \frac{m}{s}$$

$$C_{sDownstream} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_{igas}}} = \sqrt{\frac{(8.2ev \times 1.6 \times 10^{-19})j}{1.128 \times 10^{-26} kg}} \approx 10785 \frac{m}{s}$$

$$U_{Downstream} = C_{sDown} M_i = \sqrt{\frac{kT_e}{m_{igas}}} M_i = 10785 \left(\frac{m}{s}\right) \times 2.247 = 24234 \frac{m}{s}$$

سرعت خالص ( $U_{net}$ ) ذرات به سمت دیواره برابر حاصلضرب عدد ماخ و میانگین سرعت‌های  $C_{sDown}$  و  $C_{sUp}$  می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{net} = M_i \times \left(\frac{C_{sUp} + C_{sDown}}{2}\right) = 2.247 \times \left(\frac{13315 + 10785}{2}\right) = 12050 \frac{m}{s}$$

در نهایت شارخالص ذرات یون بر روی دیواره با رابطه  $\Gamma_{net} = \bar{n} \times U_{net}$  قابل محاسبه می‌باشد.

در این رابطه  $\Gamma_{net}$  شار خالص ذرات به سمت دیواره و  $\bar{n} \approx 2.9 \times 10^{14} m^{-3}$  چگالی متوسط ذرات می‌باشد که در محل پروب با میانگین‌گیری چگالی بدست آمده از دو وجه پروب محاسبه شده است. اکنون شار خالص یونها

به سمت دیواره را محاسبه می‌کنیم:

$$\Gamma_{net} = \bar{n} \times U_{net} = 2.9 \times 10^{14} m^{-3} \times 12050 \frac{m}{s} = 3.5 \times 10^{18} m^{-2} s^{-1}$$

## بحث و نتیجه گیری

با توجه به نمودار ولتاژ- جریان (شکل ۴) مشاهده می‌شود که جریان اشباع یونی Downstream کمتر از جریان اشباع یونی Upstream می‌باشد. همانگونه که در جدول (۲) نیز مشخص می‌باشد به خاطر اینکه دما در نزدیکی دیواره کمتر از داخل محفظه می‌باشد،  $C_{sDown} < C_{sUp}$  و در نهایت سرعت ذرات پلاسما در این ناحیه کمتر از

قسمت داخلی محفظه می‌باشد ( $U_{Down} < U_{Up}$ ). در داخل محفظه نسبت به نزدیک دیواره، چگالی زیاد و طول دبای کم شده است. اختلاف سرعت ذرات بدست آمده در دو وجه پروب به وضوح نشانگر وجود جریان ذرات یون به سمت دیواره است. شار خالص ذرات در حدود  $3.5 \times 10^{18} m^{-2} s^{-1}$  می‌باشد. این یافته می‌تواند در تعیین زمان مورد نیاز در فرایند لایه نشانی سیلیکون استفاده شود.

## مراجع

- [1] Akira Ando , Toshiaki Watanabe, Takashi Watanabe, Ryuichi Sato, Kenji Harata, Hiroyuki Tobari, Kunihiro Hattori, Masaaki Inutake, Evaluation of Mach probe characteristics and measurement of high-Mach-number plasma flow, Thin Solid Films 506– 507 (2006)
- [2] Yong-Sup CHOI, Hyun-Jong WOO, and Kyu-Sun CHUNG, Deduction of plasma flow in a collisional un-magnetized plasma, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 (2010)
- [3] X. Zhang, D. Dandurand, T. Gray, M. R. Brown, and V. S. Lukin, Calibrated cylindrical Mach probe in a plasma wind tunnel, Review Of Scientific Instruments 82, 033510 (2011)
- [4] Kyu-Sun Chung, Why Is the Mach Probe Formula Expressed as  $R = J_{up}/J_{dn} = \exp[KM^\infty]$ ? , Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 10A, pp. 7914–7916 (2006)
- [5] Takumi Abe and Koh - ichiro Oyama, Langmuir probe, An Introduction to Space Instrumentation, Edited by K. Oyama and C. Z. Cheng, 63–75 (2013)
- [6] Compressed Gas Association. Handbook of compressed gases. Springer Science & Business Media, (1999)