

طراحی، بهینه‌سازی و ساخت پمپ کندوپاش یونی

غلامرضا بذرافشان^۱، جواد رحیقی^۱، ناصر وثوقی^۲ و امید سیفی^۱

۱. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی (IPM) طرح ملی چشمه نور ایران

۲. تهران، دانشگاه صنعتی شریف

پست الکترونیکی: bazrafshan@ipm.ir

چکیده

این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف پمپ کندوپاش یونی را بر اساس شبیه‌سازی پلاسما و کندوپاش بررسی می‌کند و سپس فرایند ساخت پمپ کندوپاش یونی بر اساس شبیه‌سازی صورت گرفته ارائه خواهد شد. انتخاب پارامترها و طراحی پمپ بر اساس محاسبات و شبیه‌سازی‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و چگالی الکترون صورت گرفته است. چگالی الکترون نسبت به تغییرات شعاع سلول، ارتفاع سلول، ولتاژ آند و میدان مغناطیسی محاسبه و بهینه‌سازی شد. سرعت پمپ از جریان یونی که وابسته به چگالی الکترون است، به همراه بهره کندوپاش و احتمال جذب مولکول‌های گاز تخمین زده شد و بر اساس آن، ابعاد بهینه پمپ یونی که بهترین سرعت پمپاژ را داشته باشد به دست آمد. محاسبات و شبیه‌سازی‌ها نشان داد که برای ولتاژ ۳۶۰۰ ولت و میدان مغناطیسی ۰/۰۸ تسلا، سلول آند با شعاع ۸ میلی‌متر و فاصله آند و کاتد برابر با ۷ میلی‌متر می‌توان بیشترین سرعت پمپاژ را انتظار داشت. سپس فرایند ساخت پمپ یونی بر اساس داده‌های انتخاب شده از شبیه‌سازی و با انتخاب مواد مناسب و همچنین با تمیزکاری و پخت مناسب انجام گرفت. در پایان پس از انجام آزمایش‌های صورت گرفته، داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه گردید.

واژه‌های کلیدی: پمپ یونی، بهره کندوپاش، نرم‌افزار شبیه‌سازی کامسول، پلاسما

۱. مقدمه

انواع مختلف شتاب‌دهنده‌ها که عموماً نگهداری فشار در آنها در بازه کوچکی نزدیک 10^{-9} تور اهمیت دارد، استفاده می‌شود. به عنوان مثال در طراحی مفهومی شتاب‌دهنده ملی ایران (ILSF) حدود ۱۰۰۰ عدد از این نوع پمپ مورد نیاز است. برای اولین بار پنینگ^۳ پدیده اسپاتر شدن کاتد به دلیل بمباران سطح کاتد توسط یون‌های مثبت را مشاهده و به عنوان تجزیه کاتدی^۴

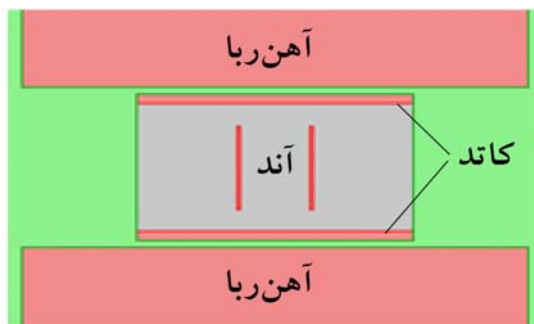
پمپ کندوپاش یونی^۱ یا به اختصار SIP که معمولاً به اختصار پمپ یونی خوانده می‌شود معمول‌ترین پمپ مورد استفاده در خلأ بسیار بالا^۲ است و به دلیل کاربری ساده، نداشتن قطعه متحرک، کم حجم بودن، قیمت مناسب و عاری بودن از آلودگی روغنی به طور گسترده‌ای در فیزیک انرژی بالا و به خصوص

۳. Penning

۴. Cathode disintegration

۱. Sputter Ion Pump

۲. Ultra High Vacuum



شکل ۲. نمایی دو بعدی از پمپ یونی که در شبیه سازی استفاده می شود.

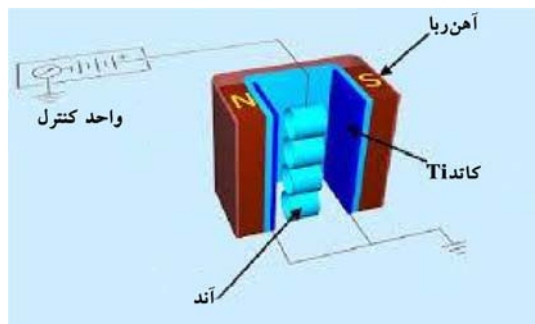
از این نرم افزار به دست آمده که در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود میدان های مغناطیسی باید هم راستا با محور مرکزی استوانه باشند، در غیر این صورت همان طور که در بخش بعدی خواهیم دید عدم هم راستایی باعث کاهش سرعت پمپاژ خواهد شد.

۳. سرعت پمپاژ و شبیه سازی چگالی الکترون

در فضای بین آند و کاتد، به الکترون ها نیروهای ترکیبی الکتریکی و مغناطیسی وارد می شود تا در مسیرهای مارپیچی طولانی تری حرکت کنند. یون های گاز نیز که از برخورد گاز با الکترون ها حاصل می شوند، به سمت کاتد شتاب می گیرند و سبب کندوپاش ماده کاتد می شوند. سپس ماده کاتد با یک احتمالی روی سطوح داخلی دفن می گردد و معمولاً با تشکیل عناصر پایدار با مولکول های هوا عمل پمپاژ انجام می گیرد. بنابراین سرعت پمپاژ طبق رابطه (۱) با تعداد یون های ایجاد شده درون سلول متناسب خواهد بود.

$$S = C \sum_k N_i \eta(E, \theta) P(r), \quad (1)$$

در رابطه فوق S سرعت پمپاژ و واحد آن لیتر بر ثانیه و N_i تعداد یون هایی است که به سطح کاتد برخورد می کنند، $\eta(E, \theta)$ بازده کندوپاش یون ها در سطح تیتانیوم است، $P(r)$ احتمال دفن تیتانیوم روی سطح آند می باشد، ضریب C اثر هدایت^۲ مولکول ها در فضای بین آند و کاتد است که توسط هارتویگ^۱ محاسبه گردیده [۳] و ضریب k فاکتور تصحیح در



شکل ۱. نمایی سه بعدی از مولفه های پمپ کندوپاش یونی.

گزارش کرد [۱]. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پمپ یونی شامل یک آند استوانه ای است (که به آن سلول پنینگ هم می گویند) و دو صفحه کاتد تیتانیومی در دو طرف آن و عمود بر محور استوانه قرار دارد و کل مجموعه تحت میدان مغناطیسی هم محور با محور استوانه است. با برقراری میدان الکتریکی بین دو الکتروود، مولکول های هوا یونیزه شده و به سمت کاتد فعال هدایت می شوند تا پس از کندوپاش شدن در نهایت دفن شوند و باعث کاهش فشار درون محفظه گردد. میدان مغناطیسی نیز سبب افزایش یونش می گردد [۲].

۲. روش کار

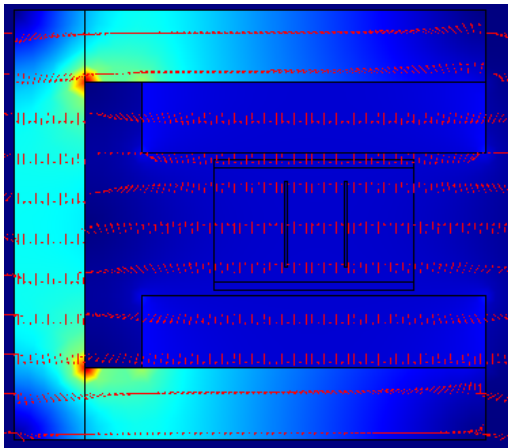
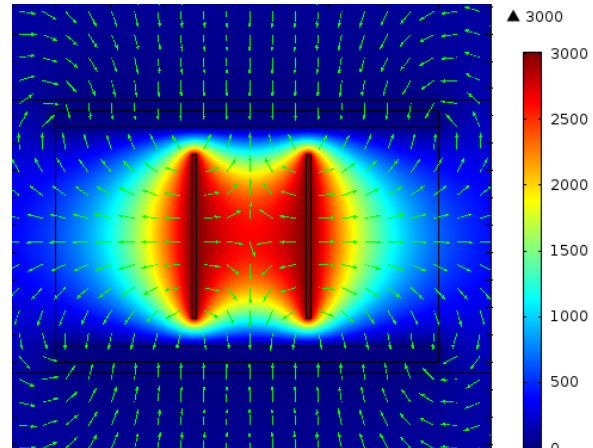
سرعت پمپ یونی به پارامترهای زیادی از جمله قطر و ارتفاع آند، فاصله بین آند و کاتد، ولتاژ اعمالی و میدان مغناطیسی اعمال شده بستگی دارد. در بهینه سازی ابعاد سلول های پنینگ برای به دست آوردن بیشترین سرعت پمپاژ، در ابتدا توزیع پتانسیل الکتریکی و میدان مغناطیسی در فضای بین آند و کاتد به صورت دو بعدی و سه بعدی محاسبه شد و سپس چگالی الکترونی در آند به روش المان محدود شبیه سازی گردید. طرح واره ای دو از بعدی سیستم شبیه سازی شده پمپ یونی در شکل ۲ نشان داده شده است.

در گام اول توزیع پتانسیل الکتریکی بین دو الکتروود با استفاده از نرم افزار کامسول^۱ محاسبه گردید که در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، ولتاژ آند برابر با $+5kV$ و کاتد ولتاژ صفر دارد. همچنین توزیع میدان مغناطیسی نیز با استفاده

۲. Conductance

۱. Hartwig

۱. COMSOL Multiphysics

شکل ۴. توزیع میدان مغناطیسی وقتی $B=0.08$ تسلا است.

شکل ۳. توزیع پتانسیل الکتریکی مربوط به یک سلول پنینگ.

جدول ۱. جدول الگوهای برخورد و واکنش های بین الکترون و آرگون.

E	B	A	$\Delta E(eV)$	نوع واکنش	فرمول
۰٫۴۱	۰٫۹۳	۱٫۹۹E-۱۴	۰	پراکندگی کشسان	$e + Ar \rightarrow e + Ar$
۱۸٫۱	۰٫۶۲	۸٫۷۷E-۱۵	۱۱٫۵	برانگیختگی	$e + Ar \rightarrow e + Ar^*$
۲۴٫۷	۰٫۴۹	۲٫۱۵E-۱۴	۱۵٫۸	یونش	$e + Ar \rightarrow 2e + Ar^+$

خنثی ($1/m^3$) می باشد. در جدول ۱ واکنش بین مولکول های گاز آرگون و الکترون های آزاد آورده شده است.

احتمال برهم کنش را به شکل تابع توزیع ماکسول فرض کردیم و مقدار آن از داده های سطح مقطع برهم کنش برای هر واکنش مطابق با جدول فوق به دست می آید:

$$k_j = AT_e^B \exp\left(\frac{-E}{T_e}\right). \quad (5)$$

در این رابطه A و B ضرایب ثابت، E و T_e به ترتیب انرژی و دمای الکترون ها بر حسب الکترون ولت می باشند. نتیجه شبیه سازی چگالی الکترون با نرم افزار کامسول به دست آمد و بازه زمانی مورد استفاده برای حل پلازما به گونه ای باید به نرم افزار داده شود که چگالی یون با چگالی الکترون برابر شود (شکل ۵).

همان طور که از شکل ۵ دیده می شود چگالی الکترون در مرکز بیشترین مقدار را دارد. همچنین تئوری فضای تاریک آند و فضای تاریک کاتد در مفاهیم پلازما سرد را می توان در شکل ۶ و ۷ مشاهده کرد.

جریان آند است [۴]. با استفاده از روش المان محدود و با کمک گیری از توزیع میدان های الکتریکی و مغناطیسی که در شبیه سازی های بالا به دست آورده شد، پلازما سرد درون آن را بررسی کرده و چگالی الکترون و چگالی یون را به دست می آوریم. معادلاتی که برای یافتن چگالی الکترون به کار می بریم عبارتند از [۵]:

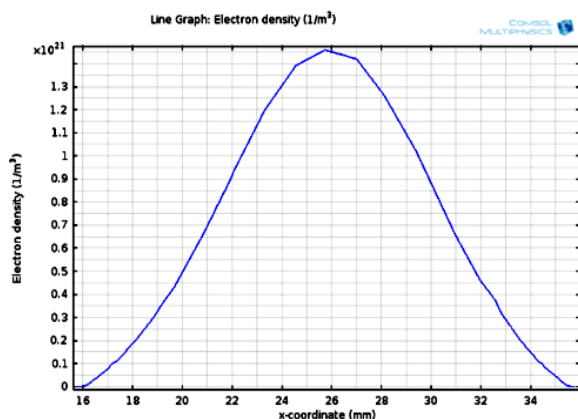
$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e, \quad (2)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \mathbf{E})n_e - D_e \nabla n_e. \quad (3)$$

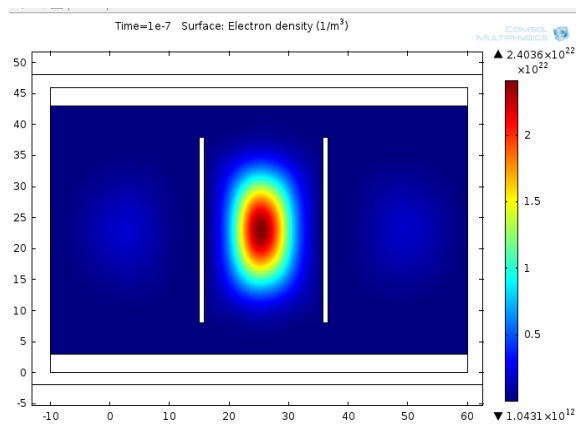
در این روابط n_e چگالی الکترون ($1/m^3$), R_e نرخ برهم کنش الکترون ($1/m^3 s$), μ_e گذردهی الکتریکی الکترون، \mathbf{E} میدان الکتریکی و D_e ضریب پخش الکترون همگی در یکای SI می باشند. منبع الکترون یا مجموع نرخ برهم کنش های الکترون به صورت زیر تعریف می شود:

$$R_e = \sum_{i=1}^M x_j k_j N_n n_e. \quad (4)$$

در این روابط x_j کسر مولی نوع هدف برای واکنش j , k_j احتمال برهم کنش برای واکنش j (m^3/s), N_n چگالی ذرات

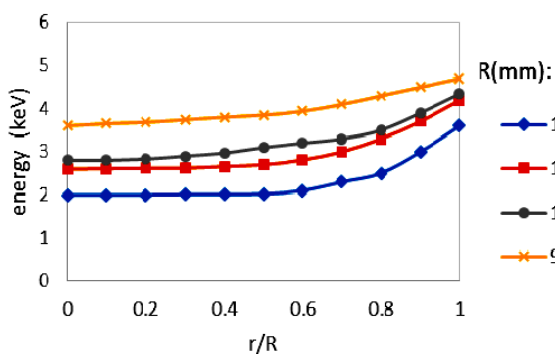


شکل ۶. نمودار چگالی و دمای الکترون روی خط مورد نظر در شکل ۵.

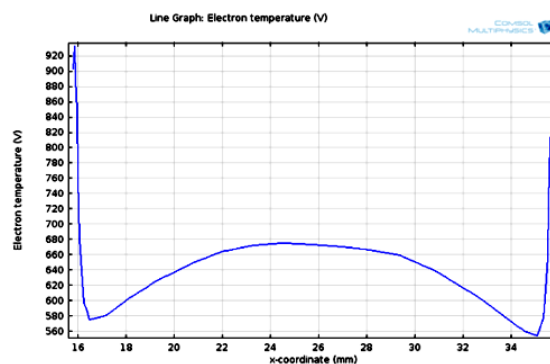


شکل ۵. توزیع چگالی الکترون در فضای بین آند و کاتد در ولتاژ ۳۶۰۰ ولت و

میدان مغناطیسی ۰٫۰۸ تسلا، $R = 8 \text{ mm}$ و $G = 7 \text{ mm}$.



شکل ۸. نمودار انرژی یون‌های برخوردی به سطح کاتد در ولتاژ ۳۶۰۰ ولت و میدان مغناطیسی ۰٫۰۸ تسلا.



شکل ۷. نمودار دمای الکترون روی خط مورد نظر در شکل ۲.

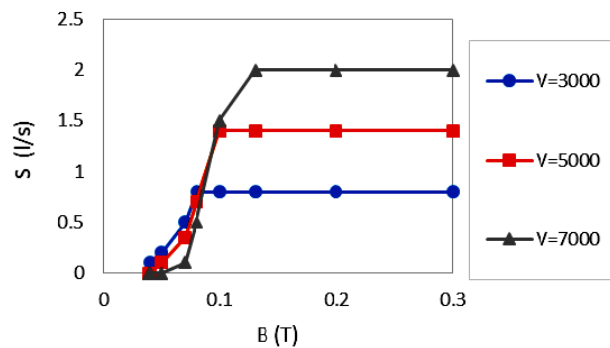
$$\eta_{E, \theta} = \eta_n(E) \cos^{-f}(\theta). \quad (6)$$

در اینجا $\eta_n(E)$ تعداد یون‌هایی است که انرژی E دارند و اندیس n نشان دهنده برخورد عمودی و پارامتر f مربوط به جنس گاز و سطح کاتد است که برای برخورد آرگون با تیتانیوم برابر ۱٫۵- می‌باشد [۴].

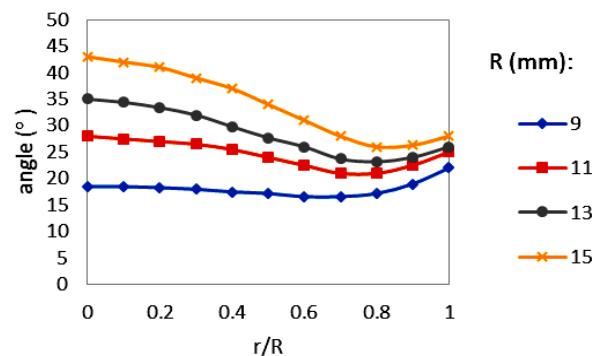
سرعت پمپاژ برای پارامترهای مختلف بررسی شد. در شکل ۱۰ نمودار سرعت پمپاژ برحسب اندازه میدان مغناطیسی و در ولتاژهای مختلف رسم شده است و نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی یونش بیشتری در سلول ایجاد خواهد شد و سرعت پمپاژ افزایش می‌یابد اما پس از یک مقدار مشخص، سرعت پمپاژ ثابت می‌ماند [۷]. همچنین واضح است که هرچه ولتاژ آند بالاتر باشد سرعت

برای دست آوردن بهره کندوپاش، باید در ابتدا توزیع انرژی و زاویه یون‌ها روی سطح کاتد به دست آیند، باید توزیع انرژی و زاویه یون‌ها روی سطح کاتد را بدانیم. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، نمودار انرژی یون برحسب مکان برخورد r به صورت شکل ۸ به دست می‌آید. همان طور که از شکل ۸ و ۹ دیده می‌شود، یون‌هایی که در مکان‌های نزدیک R (شعاع آند) به سطح کاتد برخورد می‌کنند، انرژی بالاتر و زاویه کمتری نسبت به خط عمود بر سطح کاتد دارند که این موضوع با مطالعات تئوری کاملاً تطابق دارد [۴].

با محاسبه این دو پارامتر، ما می‌توانیم بهره کندوپاش را در تمام نقاط سطح کاتد با استفاده از رابطه زیر محاسبه کنیم [۶]:



شکل ۱۰. نمودار سرعت پمپاژ بر حسب میدان مغناطیسی و در ولتاژهای مختلف در فشار 10^{-7} Torr و با $R = 8 \text{ mm}$ و $G = 7 \text{ mm}$.



شکل ۹. نمودار زاویه یون‌های برخوردی به سطح کاتد در ولتاژ 3600 ولت و میدان مغناطیسی 0.08 تسلا.

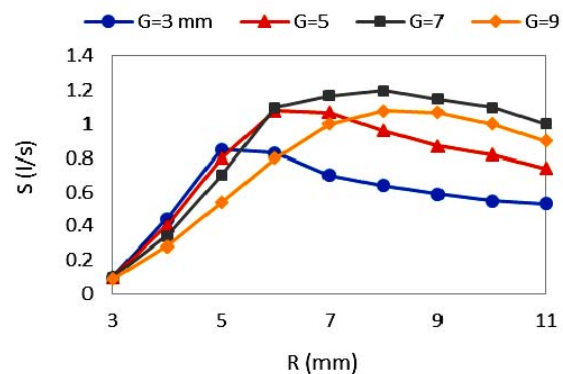
۴. ساخت پمپ کندوپاش یونی

با استفاده از شبیه‌سازی‌هایی که در بالا انجام شد، داده‌های اولیه و اصلی برای ساخت پمپ کندوپاش یونی به دست آمد. با توجه به اینکه محیط داخل پمپ عملاً در شرایط UHV قرار دارد، انتخاب و تهیه مواد با کیفیت مناسب و همچنین انتخاب مناسب فرایند تمیزکاری و پخت اهمیت بالایی دارد. پمپ باید بتواند دمای 250° تا 450° درجه را به راحتی تحمل کند. همچنین تمام بدنه پمپ باید بتواند میدان مغناطیسی را به راحتی از خود عبود دهد. به همین منظور کلیه سطوح داخلی بدنه پمپ و آند از جنس استیل ضدزنگ ۳۱۶ L و کاتد یک ورقه تیتانیوم ۹۹.۹٪ می‌باشد.

تمامی قطعات به دقت با محلول سود سوزآور و تری‌کلرواتان و با اسید نیتریک و طی شرایط خاص شسته شد. سپس به منظور کاهش واجذب حرارتی، پمپ ساخته شده تا دمای حدود 250° درجه سانتیگراد و در فشار $6-10$ تور پخت گردید. شکل ۱۲ پمپ ساخته شده و شکل ۱۳ اتصال سلول‌های پنینگ و صفحات کاتد به همراه عایق بین آنها که همگی درون پمپ قرار می‌گیرد را نشان می‌دهند.

۵. نتایج

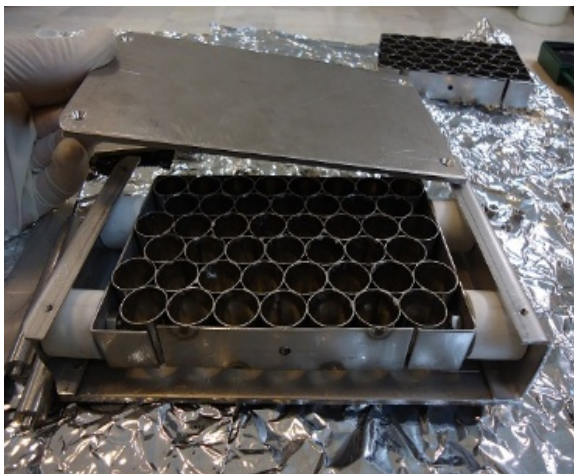
پس از انجام آزمایش‌های صورت گرفته روی پمپ یونی ساخته شده، این پمپ توانست حدود ۸ لیتر هوا را در مدت حدود ۴ ساعت از فشار 10^{-4} Torr تا فشار 10^{-8} Torr تخلیه کند.



شکل ۱۱. سرعت پمپاژ بر حسب مقادیر مختلف شعاع و در فواصل متغیر بین آند و کاتد، در فشار 10^{-7} Torr و میدان مغناطیسی $0.08T$ و ولتاژ 3600 ولت.

پمپاژ نیز افزایش خواهد یافت.

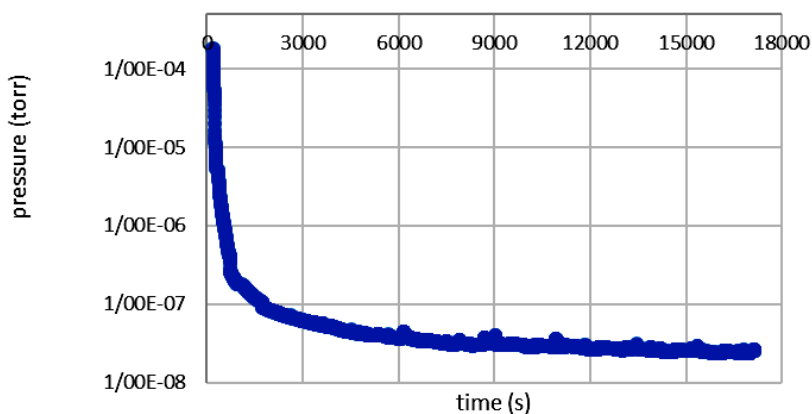
در شکل ۱۱ نمودار سرعت پمپاژ بر حسب شعاع آند و در فواصل مختلف بین آند و کاتد (G) رسم شده است و نشان می‌دهد با افزایش G به شعاع بیشتری نیاز داریم تا سرعت پمپاژ بیشینه باشد. از این رو، برای ولتاژ آند 3600 ولت و میدان مغناطیسی 0.08 تسلا (به دلیل محدودیت ساخت و تهیه در آزمایشگاه)، سلول آند با شعاع ۸ میلی‌متر و فاصله آند تا کاتد برابر با ۷ میلی‌متر انتخاب شد. البته ممکن است حالت‌های بهینه دیگری نیز وجود داشته باشد که می‌توان پس از ساخت و انجام آزمایش‌های مختلف روی آنها، بهترین حالت ممکن را به دست آورد.



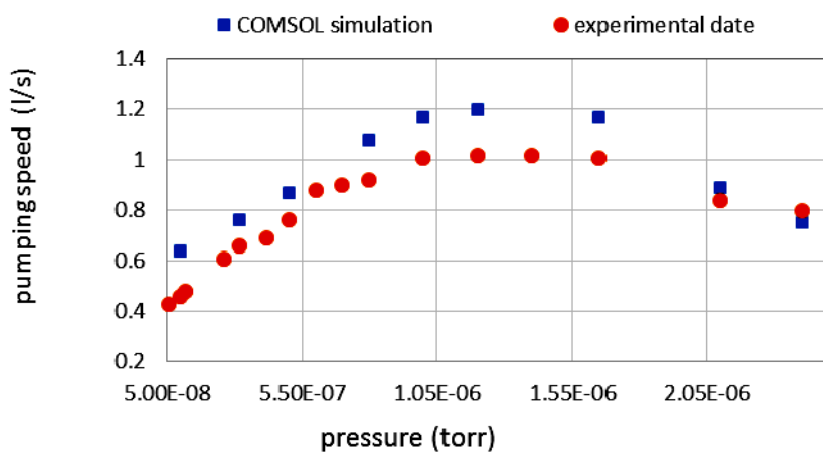
شکل ۱۳. اتصال سلول‌ها پنینگ و صفحات کاتد به یکدیگر.



شکل ۱۴. پمپ یونی ساخته شده در شتاب دهنده ملی ایران.



شکل ۱۴. نمودار فشار بر حسب زمان در پمپ یونی ساخته شده.



شکل ۱۵. نمودار سرعت پمپاژ بر واحد سلول آند بر حسب فشار و مقایسه بین شبیه‌سازی و داده تجربی، در میدان مغناطیسی ۰/۸ تسلا، ولتاژ ۳۶۰۰ ولت،

$$G = 7 \text{ mm} \text{ و } R = 8 \text{ mm}$$

افزایش جریان یون‌هاست. اما با افزایش تدریجی فشار و عبور از یک فشار خاص، به عنوان مثال بالاتر از 10^{-6} Torr، تجمع الکترون‌ها در وسط سلول آند مطابق با شکل ۲ باعث ایجاد میدان الکتریکی در جهت کاهش میدان الکتریکی اصلی خواهد گردید و موجب می‌شود که یون‌ها به طور متوسط انرژی کمتری دریافت کرده و میزان کندوپاش در سطح کاتد کاهش یابد. بنابراین پس از آن فشار مشخص، سرعت پمپاژ کاهش خواهد یافت. همان طور که در شکل دیده می‌شود این شبیه‌سازی می‌تواند تغییرات سرعت پمپاژ بر حسب فشار را به خوبی نشان دهد.

این نتایج نشان داد که می‌توان از این شبیه‌سازی که توسط نرم‌افزار کامسول ایجاد گردید در پمپ یونی به خوبی بهره گرفت.

شیب منفی نمودار فشار-زمان در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با این پمپ می‌توان به فشارهای کمتر نیز دست یافت اما وجود الاستومرها باعث می‌شود نرخ واجذب حرارتی بالا رفته و مانع از پایین آمدن فشار شود.

در شکل ۱۵ نمودار سرعت پمپاژ یک سلول پنینگ بر حسب فشار نشان داده شده است که در آن محاسبات شبیه سازی، با نموداری که از آزمایش روی پمپ یونی ساخته شده به دست آمده، مقایسه شده است.

همان طور که از شکل ۱۵ پیداست، در نمودار سرعت پمپاژ بر حسب فشار، با افزایش فشار در ابتدا سرعت پمپاژ افزایش می‌یابد ولی پس از یک محدوده فشار خاص، سرعت پمپاژ کاهش می‌یابد.

افزایش سرعت پمپاژ بر حسب فشار در ابتدای نمودار به دلیل زیاد شدن مولکول‌های محبوس در محفظه و به عبارتی

مراجع

- Frans, Michel Penning, "Coating by cathode disintegration", U.S. Patent. 2,146,025. 7 Feb. (1939).
- M Audi, and M De Simon, "Ion pumps", *Vacuum* 37.8-9 (1987) 629.
- W Schuurman, "On the theory of electrical characteristics of a penning discharge at low magnetic field", *Physica* 43.4 (1969) 513.
- M D Malev, "Gas absorption and outgassing of metals", *Vacuum* 23.2 (1973) 43.
- H Hartwig and J S Kouptsidis, "A new approach for computing diode sputter-ion pump characteristics", *Journal of Vacuum Science and Technology* 11.6 (1974) 1154.
- Y Suetsugu and M Nakagawa, "An improved empirical formula for pumping speeds of ion pumps in the high magnetic field mode", *Vacuum* 42.12 (1991) 761.
- Lieberman, A Michael, and J Alan, Lichtenberg. *Principles of plasma discharges and materials processing*. John Wiley & Sons, (2005).