

## بررسی متغیرهای تأثیرگذار در افزایش زمان محصورسازی الکترون‌ها در حالت بتای پایین در یک رآکتور پلی‌ول

محسن باقری، احمد سالار الهی، محمد کاظم سالم\*، محمود قرآن نویسی  
مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۴۵۱۵-۷۷۵، تهران - ایران

\*Email: mkssalem@gmail.com

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۹

### چکیده

در یک رآکتور پلی‌ول، وجود یک کاتد مجازی پایدار و پرانرژی به منظور شتاب گرفتن یون‌ها و ایجاد برهم‌کنش‌های همجوشی لازم است. افزایش زمان محصورسازی الکترون‌های تشکیل‌دهنده کاتد مجازی در عملکرد رآکتور پلی‌ول بسیار مهم است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه بعدی به کمک نرم‌افزار کامسول وابستگی کاتد مجازی به متغیرهای مؤثر در یک پلی‌ول مورد بررسی قرار گرفته است. زمان محصورسازی ابر الکترونی به فاصله حلقه‌ها، شعاع حلقه‌ها، جریان حلقه‌ها و انرژی جنبشی الکترون‌های تزریق شده به داخل پلی‌ول بستگی دارد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، چگونگی وابستگی متغیرهای ذکر شده با زمان محصورسازی را به دست آورده و سپس یک مدل ریاضی برای زمان محصورسازی معرفی می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** پلی‌ول، زمان محصورسازی الکترون‌ها، کامسول، شبیه‌سازی، حالت بتای پایین

## Investigation of effective parameters in increasing the confinement time of electrons in a low beta Polywell device

M. Bagheri, A. Salar Elahi, M.K. Salem\*, M. Ghoranneviss

Plasma Physics Research Center, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 14515-775, Tehran - Iran

### Research Article

Received 29.5.2022, Accepted 20.8.2022

### Abstract

In a polywell reactor, it is critical to have a stable and energetic virtual cathode that is necessary to accelerate ions and create fusion interactions. Increasing the confinement time of virtual cathode electrons is of critical importance in the performance of polywell reactors. In this paper, COMSOL Multiphysics software was used to perform a three-dimensional numerical simulation in order to investigate the impacts of effective variables of a polywell on the virtual cathode. The findings indicated that the confinement time depends on the distance between the coils, coil radius, coil current, and the kinetic energy of the injected electrons. In addition, by using the simulation results, the dependence of the mentioned parameters on the confinement time is obtained, and then a mathematical model was developed.

**Keywords:** Polywell, Electrons confinement time, Comsol, Simulation, Low beta mode



## ۱. مقدمه

راکتور پلی‌ول یک دستگاه محصورساز پلاسمای چند قطبی مغناطیسی است که توسط باسارد<sup>۱</sup> معرفی شد [۱]. در واقع راکتور پلی‌ول مدل اصلاح شده‌ای از دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی لختی<sup>۲</sup> می‌باشد. در این دستگاه، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، دو الکتروود مشبک کروی هم‌مرکز نقش کاتد و آند را بازی می‌کنند. در اثر یک اختلاف پتانسیل بالا بین دو الکتروود یک چاه پتانسیل الکترواستاتیکی عمیق ایجاد می‌شود و یون‌های تزریق شده در این چاه پتانسیل به طرف مرکز شتاب می‌گیرند. یون‌ها پس از چندین رفت و برگشت در ناحیه مرکزی انرژی لازم را کسب کرده و در اثر برخورد یون‌های پر انرژی با یکدیگر برهم‌کنش‌های همجوشی اتفاق می‌افتد.

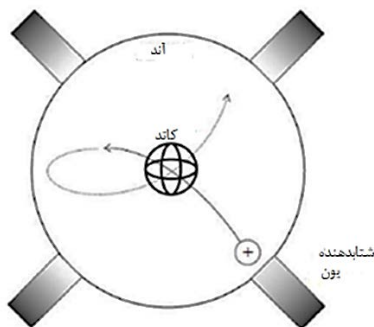
علی‌رغم سادگی سیستم‌های محصورسازی الکترواستاتیکی لختی مشکل بزرگی وجود داشت که مانع از به‌کارگیری آن به‌عنوان یک راکتور تولید توان همجوشی پایدار می‌شد. در واقع، برخورد تعدادی از یون‌ها با شبکه‌ها<sup>۳</sup> (به‌خصوص شبکه داخلی) باعث اتلاف زیاد انرژی می‌گردید و حتی در نهایت منجر به ذوب شدن کاتد می‌شد. چنین فرایند اتلافی یکی از موانع اساسی در به‌کارگیری این سیستم‌ها به‌عنوان یک منبع تولید توان همجوشی پایدار بود [۲]. برای حل این مشکل، جایگزین کردن کاتد مجازی بجای کاتد فیزیکی توسط لیورنف<sup>۴</sup> پیشنهاد داده شد [۳]. این ایده توسط باسارد عملیاتی شد و دستگاه پلی‌ول نام گرفت [۴]. هم‌چنان‌که در شکل ۲ نشان داده شده، پلی‌ول از سه جفت حلقه عمود برهم تشکیل شده است، طوری که گویی هر حلقه روی یکی از وجوه مکعب قرار گرفته است. جریان در هر جفت حلقه هم‌اندازه و خلاف یکدیگر است. از برهم‌نهی میدان‌های مغناطیسی حلقه‌ها، تعدادی کاسپ<sup>۵</sup> (خمیدگی‌هایی شبیه نوک هلال) ایجاد می‌شود. کاسپ‌های ذکر شده شامل ۱۴ کاسپ نقطه‌ای (۶ کاسپ در مرکز حلقه‌ها که به کاسپ‌های وجوه معروف‌اند و ۸ کاسپ که در گوشه‌های مکعب پلی‌ول تشکیل می‌شوند و به کاسپ گوشه معروف‌اند) و ۱۲ کاسپ خطی (کاسپ‌های کناری) می‌باشد. در شکل ۲ محل تشکیل کاسپ‌ها نشان داده شده است.

در چنین هندسه مغناطیسی مقارنی هرچه از وجوه به سمت مرکز پیش رویم شدت میدان مغناطیسی کم می‌شود طوری که یک ناحیه خلأ مغناطیسی در مرکز پلی‌ول ایجاد شده و یک چاه مغناطیسی خلق می‌شود. الکترون‌های تزریق شده در

مرکز چاه مغناطیسی (مرکز پلی‌ول) به‌واسطه اثر آیینه مغناطیسی به‌دام می‌افتند [۵] و در نهایت وقتی تراکم آن‌ها به اندازه کافی زیاد شد یک ابر الکترونی متراکم را تشکیل می‌دهند. این ابر الکترونی نقش کاتد مجازی را در پلی‌ول ایفا می‌کند. یون‌ها در چاه پتانسیل الکتریکی ایجاد شده توسط کاتد مجازی شتاب گرفته و در نهایت پس از چندین رفت و برگشت و کسب انرژی کافی همجوشی اتفاق می‌افتد [۶، ۷]. شکل ۳ به‌طور شماتیک نحوه محصور شدن الکترون‌ها و هم‌چنین فرار برخی از آن‌ها از کاسپ‌ها را نشان می‌دهد.

در ساختار پلی‌ول علاوه بر عمق چاه پتانسیل الکتریکی، ماندگاری الکترون‌های به‌دام افتاده که کاتد مجازی را تشکیل می‌دهند نیز بسیار اهمیت دارد. الکترون‌ها پس از چندین رفت و برگشت در نهایت پس از قرار گرفتن (پراکنده شدن) در مخروط اتلاف از کاسپ‌های نقطه‌ای به‌وجود آمده در مرکز وجوه و گوشه‌های مکعب پلی‌ول فرار می‌کنند.

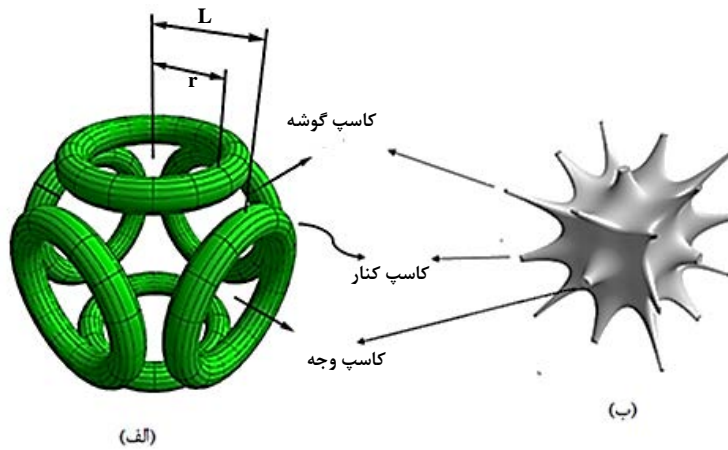
هرچند در پلی‌ول دیگر معضل موجود در دستگاه‌های محصورسازی الکترواستاتیکی لختی، یعنی برخورد یون با کاتد فیزیکی وجود ندارد و در ضمن هندسه کاسپی پلی‌ول به‌گونه‌ای است که پلاسمای درون آن دارای پایداری مگنتو هیدرو دینامیک<sup>۶</sup> است [۵]، اما باز هم اتلاف‌های وجود دارد که سیستم از آن رنج می‌برد و مانع از آن می‌شود که از پلی‌ول به‌عنوان یک راکتور تولید توان همجوشی مورد استفاده قرار گیرد [۸]. خروج زود هنگام الکترون‌ها از کاسپ‌های نقطه‌ای و خطی که باعث کاهش زمان محصورسازی الکترون‌ها است، به‌عنوان یک مکانیسم اصلی اتلاف شناخته می‌شود، چرا که وقتی ابر الکترونی (کاتد مجازی) پرانرژی و متراکم با زمان پایداری کافی به‌وجود نیاید عمق چاه پتانسیل آن‌قدر نیست تا یون‌ها به شتاب لازم جهت واکنش همجوشی برسند.



شکل ۱. فرایند محصور شدن یون در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی لختی.

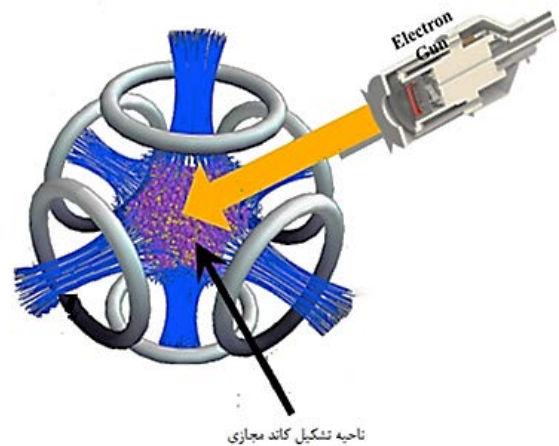
1. Bussard
2. Inertial Electrostatic Confinement Fusion
3. Grid
4. Lavrent'ev
5. Cusp





شکل ۲. الف) شمایی از ساختار حلقه‌های پلی‌ول، ب) کاسپ‌های ایجاد شده به ساختار میدان مغناطیسی پلی‌ول [۸].

کمیتی بدون بعد و برابر با نسبت نصف طول مکعب پلی‌ول  $L$  به شعاع حلقه جریان  $r$  در نظر گرفته شده است، یعنی  $S=L/r$ ، (شکل ۲ الف را مشاهده نمایید). در این جا از طریق شبیه‌سازی سه بعدی با نرم‌افزار کامسول، محصورسازی الکترون‌ها و زمان پایداری کاتد مجازی داخل پلی‌ول با بتای کم مورد آنالیز قرار گرفته است. در هر مرحله یکی از چهار پارامتر تأثیرگذار یعنی شعاع حلقه، جریان سیم‌پیچ، انرژی الکترون و عامل فاصله متغیر و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است، سپس اثر این چهار پارامتر روی زمان محصورسازی الکترون‌ها بررسی می‌شود و در نهایت به کمک نتایج به‌دست آمده یک مدل ریاضی برای زمان محصورسازی معرفی می‌گردد.



شکل ۳. شمایی از تشکیل ابر الکترونی در مرکز پلی‌ول و فرار الکترون‌ها از کاسپ‌ها.

## ۲. معادلات حاکم

### ۱.۲ میدان مغناطیسی پلی‌ول

میدان مغناطیسی در پلی‌ول از برهم‌نهی میدان مغناطیسی هر حلقه جریان ایجاد می‌شود. میدان مغناطیسی حلقه‌های جریان پلی‌ول را می‌توان به کمک معادلات ماکسول مشخص کرد، در شرایط استاتیکی داریم:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{B} \quad (2)$$

$$\vec{H} = \mu^{-1} \vec{B} \quad (3)$$

که  $B$  چگالی شار مغناطیسی،  $H$  شدت میدان مغناطیسی،  $A$  پتانسیل برداری مغناطیسی،  $J$  چگالی جریان و  $\mu$  گذردهی مغناطیسی در خلأ است.

از ترکیب روابط (۲) و (۳) با رابطه (۱) می‌توان نوشت:

$$\vec{\nabla} \times (\mu^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (4)$$

تاکنون چندین مطالعه با موضوعات تخمین زمان محصورسازی ابر الکترونی، بررسی عمق چاه پتانسیل، تابع توزیع سرعت و انرژی الکترون‌ها در داخل پلی‌ول و غیره از طریق ارائه مدل‌های تحلیلی، شبیه‌سازی و هم‌چنین تجربی در حالت بتای پایین و بالا انجام شده است [۹-۱۶]. در برخی از مطالعات انجام شده، زمان محصورسازی الکترون‌ها برحسب متغیرهایی هم‌چون شعاع پلی‌ول، انرژی جنبشی اولیه الکترون‌های تزریق شده و جریان حلقه‌ها از طریق تئوری مداری ذره (با استفاد از مدل ذره در سلول)<sup>۱</sup> و هم‌چنین به کمک داده‌های تجربی حاصل از عمق چاه پتانسیل برای پلی‌ول با بتای پایین به‌دست آمده بود [۱۰-۱۳].

در این مقاله علاوه بر تأثیر متغیرهای ذکر شده بر زمان محصورسازی تأثیر فاصله بین حلقه‌های پلی‌ول نیز بر محصورشدن کاتد مجازی بررسی شده است. عامل فاصله ( $S$ )

1. Particle-In-Cell (PIC)





شکل ۴. شمایی از میدان مغناطیسی یک پلی‌ول [۱۲].

### ۳.۲ ساده‌سازی معادله حرکت با توجه به فرض بنای کم

در فرایند محصورسازی الکترون‌ها در پلی‌ول و ایجاد کاتد مجازی در مرکز دستگاه عوامل مختلفی دخالت دارند که باید در معادله حرکت الکترون‌ها در نظر گرفته شود. عواملی هم‌چون تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از اثرات بار فضا روی حرکت الکترون‌ها، تأثیر میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط جریان الکتریکی ناشی از شار الکترون‌های خروجی از کاسپ‌ها، برهم‌کنش‌های کولنی الکترون‌ها، برخورد الکترون‌ها با یک‌دیگر و غیره. هر یک از این عوامل در افزایش یا کاهش زمان محصورسازی تأثیر دارد. مثلاً میدان مغناطیسی ناشی از شار الکترون‌های خروجی از کاسپ‌ها نیرویی به الکترون‌های در حال فرار وارد می‌کند و مانع از خروج آن‌ها می‌شود در نتیجه زمان محصورسازی افزایش می‌یابد یا برخورد الکترون‌ها با یک‌دیگر باعث پراکندگی ذرات شده و در نهایت موجب فرار الکترون‌ها از کاسپ‌ها و کاهش زمان محصورسازی می‌شود.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در این مقاله پلی‌ول در حالت بنای پایین مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق تعریف عامل بتا نسبت فشار پلاسما به فشار مغناطیسی است. از آن‌جا که فشار پلاسما به چگالی ذرات بستگی دارد بنابراین وقتی بتا کوچک در نظر گرفته شود یعنی چگالی ذرات کم است. به همین سبب می‌توان از اثرات بار فضا و هم‌چنین تأثیر برهم‌کنش الکترون‌ها با یک‌دیگر صرف‌نظر کرد، پس اثر نیروی الکتریکی وارد بر الکترون‌ها و هم‌چنین نیروی ناشی از برخورد ذرات را می‌توان نادیده گرفت. بنابراین معادله حرکت به صورت زیر ساده می‌شود:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (۶)$$

پس با مشخص شدن پتانسیل برداری مغناطیسی  $\vec{A}$  می‌توان میدان مغناطیسی را به‌دست آورد.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، پیکربندی میدان مغناطیسی پلی‌ول به گونه‌ای است که در مرکز دستگاه میدان مغناطیسی تقریباً صفر است، به طوری که یک نقطه خلاً مغناطیسی ایجاد می‌شود و میدان به طرف مرکز و کنارها افزایش می‌یابد. جهت گرادیان میدان مغناطیسی در همه جا به طرف بیرون است در نتیجه این ساختار دارای پایداری مگنتو هیدرودینامیک می‌باشد.

در یک دستگاه پلی‌ول ۱۴ کاسپ نقطه‌ای وجود دارد که احتمال فرار الکترون‌ها از هر یک از کاسپ‌ها بستگی به نرخ آئینه آن‌ها دارد [۵]. در صورتی که عامل فاصله کم باشد و حلقه‌های مجاور نزدیک به هم باشند آنگاه شدت میدان مغناطیسی در مرکز حلقه‌ها کم‌تر از میدان در گوشه‌ها است در نتیجه اتلاف از کاسپ‌های وجوه بیش‌تر است [۱۳].

### ۲.۲ مسیر الکترون در میدان مغناطیسی مولتی کاسپ

هنگامی که الکترون‌ها به داخل پلی‌ول تزریق می‌شوند تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی قرار می‌گیرند. مسیر الکترون‌ها و مدت زمان اقامت الکترون‌ها در دستگاه پلی‌ول را می‌توان به کمک حل معادله زیر تخمین زد.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \vec{F}_{col} \quad (۵)$$

که  $m$  جرم الکترون،  $v$  سرعت الکترون،  $E$  میدان الکتریکی،  $B$  میدان مغناطیسی،  $e$  مقدار بار الکترون است. در رابطه فوق جمله اول سمت راست نیروی لورنتس است و جمله دوم سمت راست نیروی ناشی از برخورد ذرات می‌باشد. با توجه به محدودیت توان پردازش و ظرفیت کامپیوتر در هنگام شبیه‌سازی روابط تا حد امکان ساده‌تر در نظر گرفته می‌شود. به منظور ساده‌سازی، ما در مطالعه خود جریان الکتریکی پلی‌ول را ثابت فرض می‌کنیم. در نظر گرفتن حالت استاتیکی در عمل نیز دور از واقعیت نیست چرا که زمان محصور شدن الکترون‌ها از تغییر جریان در پلی‌ول خیلی کوچک‌تر است.



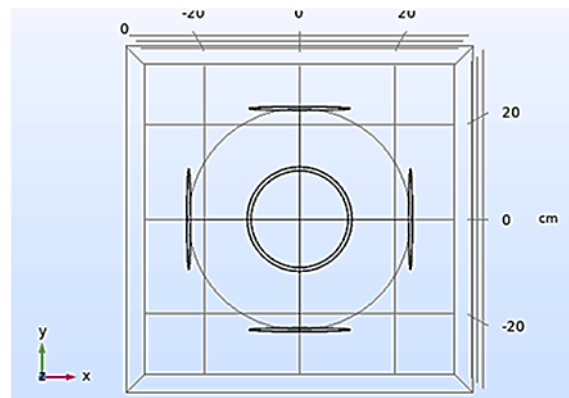
### ۳. ارائه مدل شبیه‌سازی و اعتبارسنجی

#### ۱.۳ مدل شبیه‌سازی

ساختار رآکتور پلی‌ول شامل شش پیچه جریان است که درون یک محفظه قرار دارد. در مدل ارائه شده هر پیچه به صورت یک حلقه سیم بسیار نازک با سطح مقطع کوچک فرض شده است. تفنگ الکترونی در نزدیک مرکز یکی از حلقه‌ها قرار می‌گیرد. جریان الکترونیکی توسط منبع تغذیه به حلقه‌های پلی‌ول اعمال شده و باعث تشکیل یک پیکربندی مغناطیسی مولتی کاسپی می‌شود. الکترون‌ها به طور هم‌زمان و با انرژی جنبشی اولیه یکسان در امتداد محور حلقه به مرکز پلی‌ول فرستاده می‌شوند و توسط پیکربندی کاسپ مغناطیسی محصور می‌گردند. به کمک نرم‌افزار کامسول و با حل معادله حرکت (معادله ۶) برای تک تک الکترون‌ها، مسیر آن‌ها ردیابی شده تا در نهایت از پلی‌ول خارج شوند. نرخ کاهش چگالی تعداد الکترون‌های درون پلی‌ول محاسبه و در نتیجه زمان محصورسازی ابر الکترونی به دست می‌آید.

#### ۲.۳ ایجاد هندسه، انتخاب فیزیک

ابتدا هندسه رآکتور پلی‌ول را باید ایجاد کرد. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک محدوده برای اجرای فیزیک یا فیزیک‌های شبیه‌سازی باید تعیین شود. این محدوده به صورت یک مکعب بزرگ تعریف شده که حلقه‌های پلی‌ول درون آن قرار می‌گیرند. همچنین یک ناحیه کروی شکل به شعاع  $L$  در داخل پلی‌ول در نظر گرفته می‌شود، به طوری که کاتد مجازی یا ابر الکترونی در این ناحیه شکل می‌گیرد. با ردیابی ذرات در این ناحیه چگونگی واپاشی کاتد مجازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین دقت در انجام محاسبات در این ناحیه، در نتیجه نهایی بسیار اهمیت دارد.



شکل ۵. هندسه یک رآکتور پلی‌ول فرضی که در نرم‌افزار کامسول طراحی شده است (ابعاد فرضی انتخاب شده است).

پس از طراحی هندسه پلی‌ول و محدوده عملیاتی، فیزیک‌هایی که باید اعمال شوند از زیربرنامه‌های<sup>۱</sup> نرم‌افزار کامسول انتخاب می‌گردد. برای این منظور از زیربرنامه AC/DC دو زیرشاخه میدان‌های مغناطیسی (mf)<sup>۲</sup> و ردیابی ذرات باردار (cpt)<sup>۳</sup> با یکدیگر کوپل می‌شود. در قسمت محاسبه، زیرشاخه mf را در حالت مستقل از زمان در نظر گرفته و با توجه به قانون آمپر میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط حلقه‌های پلی‌ول به دست می‌آید. پس از محاسبه میدان مغناطیسی، زیرشاخه cpt وارد عمل می‌شود. در این قسمت محاسبات را در حالت وابسته به زمان انتخاب کرده و با توجه به قانون لورنتس نیروی اعمال شده به تک تک الکترون‌ها محاسبه و در نهایت ذرات ردیابی می‌شوند.

شاید سوال پیش آید که چرا در این شبیه‌سازی از زیربرنامه پلاسما استفاده نشده است؟ در جواب باید گفت هر چند نرم‌افزار کامسول یک ابزار بسیار قدرتمند در زمینه مهندسی و فیزیک است اما محدودیت‌هایی هم دارد، از جمله این محدودیت‌ها شبیه‌سازی رفتار پلاسما می‌باشد. در واقع در رآکتور پلی‌ول برای این که شرایط جهت برهم‌کنش همجوشی مهیا شود باید بتا نزدیک به ۱ باشد به عبارتی باید چگالی زیاد در نظر گرفته شود، حال این که در چگالی زیاد باید تمام برخوردها و همچنین اثرات بار فضا نیز مد نظر قرار گیرد. در این صورت باید از مدل جنبشی یا مدل ترکیبی مسأله را حل کرد. که فعلاً در حیطه‌ی توان نرم‌افزار کامسول نیست. چرا که کامسول بر پایه المان محدود کد نویسی شده در حالی که برای حل معادلات جنبشی روش‌هایی مثل مونت کارلو به کار می‌رود. به همین دلیل به جای به کارگیری زیربرنامه پلاسما از زیر شاخه مربوط به ردیابی ذرات استفاده شده است. با این روش رفتار تک تک ذرات بررسی می‌شود هر چند این روش قادر است نتایج شبیه‌سازی را به شرایط واقعی نزدیک کند اما در چگالی بالا کامپیوتر قادر به پردازش نیست. به عنوان مثال با پردازنده ۷ هسته‌ای تا  $10^6$  ذره برای هر مرحله شبیه‌سازی بیش از ۷۲ ساعت طول می‌کشد. در ضمن به منظور اطمینان از صحت مفروضات در نظر گرفته شده، شبیه‌سازی در چگالی پایین و (حدی که پرازنده امکان پردازش داشته باشد) با در نظر گرفتن برخوردها انجام شد. با توجه به این که زمان پردازش خیلی افزایش یافت اما تفاوت قابل ملاحظه‌ای در زمان محصورسازی مشاهده نشد.

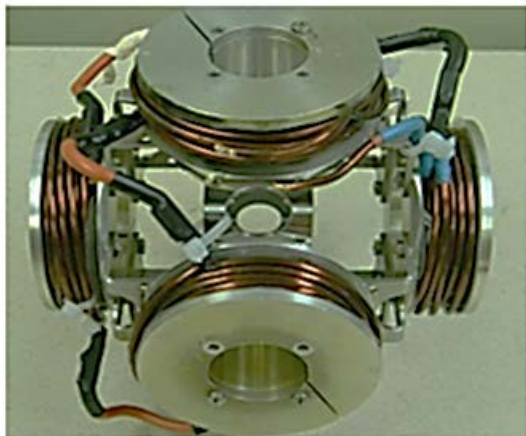
1. Module
2. Magnetic Fields
3. Charged Particle Tracing



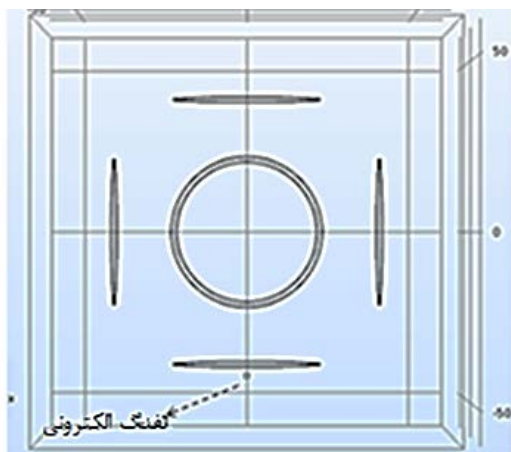


یک مدل کوچک آزمایشگاهی می‌باشد که در دانشگاه سیدنی به منظور بررسی زمان محصورسازی براساس اندازه‌گیری عمق چاه پتانسیل طراحی و ساخته شده است [۱۱].

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده، در ابتدا هندسه رآکتور این پلی‌ول توسط نرم‌افزار کامسول در سه بعد طراحی گردید. به منظور مقایسه نتایج، متغیرهای شبیه‌سازی مشابه رآکتور پلی‌ول مذکور انتخاب شد. جزییات در جدول ۱ ذکر شده است. هر پیچه به صورت یک حلقه سیم بسیار نازک با سطح مقطع کوچک در مرکز پیچه واقعی نظر گرفته شده است. در طراحی صورت گرفته (همان‌گونه که در شکل ۶ ب نشان داده شده) یک تفنگ الکترونی در نزدیک مرکز یکی از حلقه‌های پلی‌ول، جمعیتی از الکترون‌ها را به صورت پالسی با انرژی جنبشی اولیه مشخصی به مرکز پلی‌ول تزریق می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۶. الف) شمای ساده شده از پلی‌ول ساخته شده توسط کورنیش و همکارانش، ب) هندسه مدل شبیه‌سازی شده.

### ۳.۳ روش تعیین زمان محصورسازی

تعداد ۱۰۰۰۰ الکترون به داخل پلی‌ول تزریق می‌شود، این الکترون‌ها در داخل میدان مغناطیسی مولتی کاسپ پلی‌ول، و به واسطه اثر آینه مغناطیسی مدتی در ناحیه مرکز پلی‌ول به دام می‌افتند و در نهایت از یکی از کاسپ‌های پلی‌ول خارج می‌شوند. با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه بعدی، الکترون‌ها ردیابی می‌شوند تا در نهایت از داخل دستگاه خارج می‌گردند. حجم ناحیه داخل پلی‌ول برابر ناحیه‌ای کروی به شعاع  $L$  (نصف طول مکعب پلی‌ول) فرض شده است. آغاز زمان واپاشی ابر الکترونی وقتی در نظر گرفته می‌شود که اولین الکترون‌ها به مرز برسند، از آن به بعد واپاشی ابر الکترونی شروع می‌گردد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان‌دهنده کسری از الکترون‌های داخل پلی‌ول است که با گذشت زمان به صورت نمایی کاهش می‌یابد و از رابطه زیر پیروی می‌کند.

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-bt} \quad (7)$$

که  $N_0$  تعداد الکترون‌های اولیه تزریق شده داخل دستگاه است و  $N(t)$  تعداد الکترون‌های باقی مانده داخل پلی‌ول در زمان  $t$  می‌باشد.

سپس به کمک جعبه‌ابزار برازش منحنی<sup>۱</sup> در نرم‌افزار متلب پارامتر  $b$  به دست آمده و در نتیجه طول عمر یا زمان محصورسازی،  $t_c = \frac{1}{b}$  مشخص می‌شود. در واقع زمان محصورسازی، زمانی است که تعداد الکترون‌های موجود در پلی‌ول به  $1/e$  تعداد اولیه کاهش می‌یابد.

### ۴.۳ مدل سازی یک پلی‌ول آزمایشگاهی

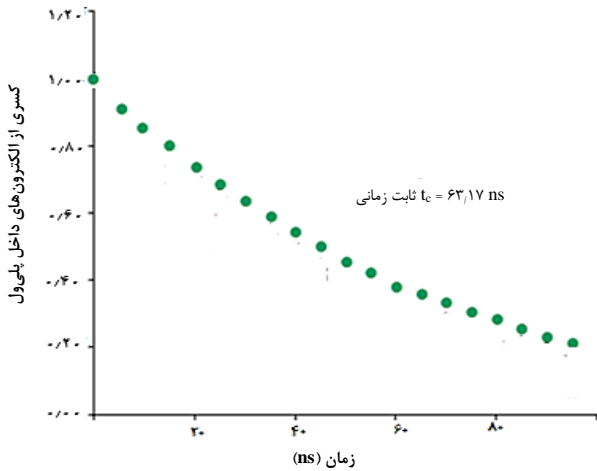
چندین دستگاه پلی‌ول آزمایشگاهی بتای پایین در دانشگاه سیدنی طراحی و ساخته شده است [۱۰-۱۲]. تمرکز اصلی طراحان این دستگاه‌ها اندازه‌گیری عمق چاه پتانسیل در پلی‌ول و تأثیر متغیرهایی همچون میدان مغناطیسی و فشار زمینه روی آن [۱۱، ۱۲]، بررسی متغیرهای مؤثر در محصور شدن الکترون‌ها و ارائه یک قانون سنجش برای زمان محصورسازی [۱۰]، و اندازه‌گیری انرژی الکترون‌ها در پلی‌ول به منظور بررسی چگالی و تابع توزیع انرژی در پلی‌ول بوده است [۱۶].

رآکتور پلی‌ولی که توسط کورنیش<sup>۲</sup> و همکارانش ساخته شده است و حلقه‌های آن در شکل ۶ الف نیز نشان داده شده،

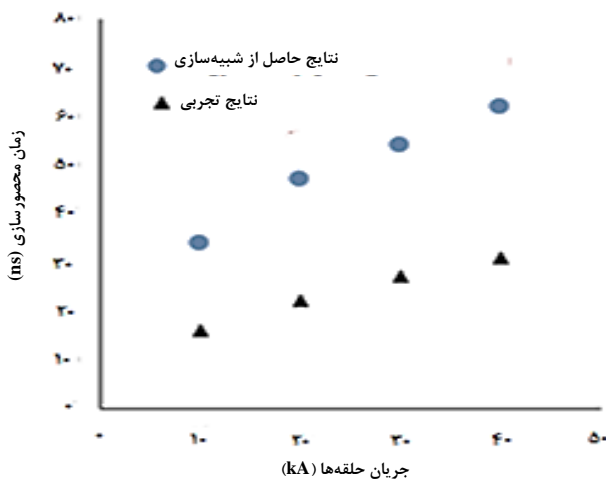
1. Curve Fitting Toolbox
2. Cornish



میدان الکتریکی باشد که در عمل در درون پلی‌ول ایجاد می‌شود و در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است. در واقع این میدان می‌تواند به‌خاطر تشکیل یک چاه پتانسیل الکتریکی باشد که منجر به دفع الکترون‌ها از داخل دستگاه می‌شود، از طرفی عمق این چاه پتانسیل با افزایش جریان حلقه‌ها افزایش می‌یابد [۹]. و دیگر این‌که صفحه جمع‌آوری پروپ‌های قرار گرفته در پلی‌ول اختلالی در میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند؛ و در نتیجه، جریان تزریقی در غیاب صفحه متفاوت خواهد بود.



شکل ۷. کسری از الکترون‌های داخل پلی‌ول برحسب زمان با در نظر گرفتن متغیرهای جدول ۱.



شکل ۸. نتایج میانگین مدت زمان محصورسازی الکترون‌های در پلی‌ول کورنیش به دو روش شبیه‌سازی و تجربی.

جدول ۱. متغیرهای دستگاه کورنیش و متغیرهای مدل شبیه‌سازی شده در کامسول

مشخصه پلی‌ول Cornish		متغیرهای مدل شبیه‌سازی شده	
قطر خارجی	۶۰ mm	قطر حلقه	۴۲٫۵ mm
قطر داخلی	۲۵ mm	طول مکعب پلی‌ول	۷۷٫۵ mm
جریان حلقه	۴۰ kA	جریان حلقه	۴۰ kA
پتانسیل بایاس	۴۰۰ V	انرژی جنبشی اولیه الکترون‌ها	۴۰۰ eV

با توجه به متغیرهای مشخص شده در جدول ۱، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در منحنی شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کسری از الکترون‌های داخل پلی‌ول با گذشت زمان طبق رابطه زیر به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp[-(15,83 \pm 0,12) \times 10^6 t] \quad (8)$$

متوسط زمان محصورسازی در مدل ارائه شده برابر با  $t_c = (63,17 \pm 0,5) ns$  می‌باشد.

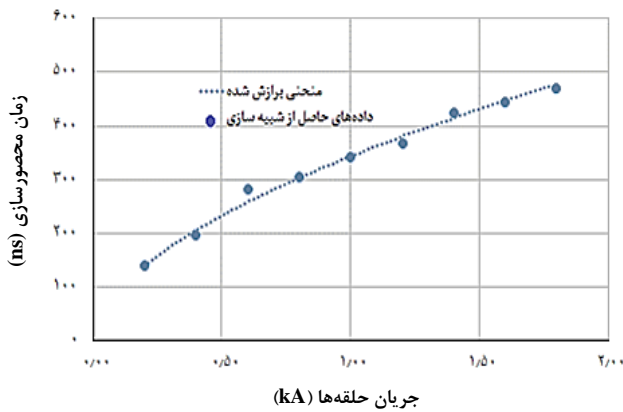
#### ۵.۳ مقایسه مدل ارائه شده با نتایج تجربی

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی ارائه شده در این مقاله، نتایج حاصل از تخمین زمان محصورسازی دو مدل برای جریان‌های ۱۰ تا ۴۰ کیلو آمپر و الکترون‌های ۴۰۰ الکترون ولتی تزریق شده در پلی‌ول با هم مقایسه و در شکل ۸ نشان داده شده است. مدلی که در این مقاله ارائه شده یک مدل شبیه‌سازی سه بعدی است که با حل معادله حرکت الکترون‌ها و در نتیجه ردیابی مسیر آن‌ها به روش المان محدود زمان محصورسازی را تخمین می‌زند. مدل دیگر توسط کورنیش و همکارانش ارائه شده است. در این مدل به کمک داده‌های تجربی که توسط پروپ‌های لانگمیر به‌دست آمده پتانسیل الکتریکی پلی‌ول اندازه‌گیری شده و سپس به کمک آن زمان محصورسازی تخمین زده شده است [۱۱].

اگر چه در مدل شبیه‌سازی شده فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی در نظر گرفته شده است، با این وجود مقایسه نتایج توافق نسبتاً خوبی را به خصوص در جریان‌های کم نشان می‌دهد.

زمان محصورسازی از طریق شبیه‌سازی بیش‌تر از نتایج تجربی است. این اختلاف با افزایش جریان حلقه‌ها بیش‌تر می‌شود. دلایل این اختلاف، یکی ممکن است به‌واسطه تأثیر





شکل ۹. منحنی تغییرات زمان محصورسازی الکترون‌ها نسبت به جریان. بقیه متغیرهای مؤثر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

#### ۳.۴ تأثیر شعاع حلقه بر زمان محصورسازی

در این حالت ابعاد مکعب پلی‌ول با تغییر شعاع حلقه‌ها تغییر داده شده و بقیه متغیرهای تأثیرگذار ثابت فرض می‌شود، سپس زمان محصور شدن الکترون‌ها بررسی می‌گردد. به همین منظور جریان پلی‌ول ۱۰ kA، انرژی جنبشی الکترون‌ها ۰.۱ keV، عامل فاصله  $S = 1/3$  انتخاب شده و شعاع حلقه از ۱۰ cm تا ۱۰۰ cm تغییر داده می‌شود. در هر مرحله از شبیه‌سازی زمان محصورسازی محاسبه می‌گردد. تغییران زمان محصورسازی برحسب شعاع در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هرچه شعاع حلقه‌ها افزایش یابد به همان نسبت زمان محصورسازی نیز زیاد می‌شود. به عبارتی یک رابطه خطی بین این دو پارامتر برقرار است.

$$t_c \propto r^{1.3 \pm 0.5} \quad (10)$$

(در این برازش ضریب تشخیص برابر ۰.۹۹۷۵ است.)

#### ۴.۴ تأثیر انرژی جنبشی اولیه الکترون‌های تزریق شده بر زمان محصورسازی

در این مرحله از شبیه‌سازی انرژی جنبشی اولیه الکترون‌ها متغیر و ابعاد پلی‌ول و جریان حلقه ثابت فرض می‌شود، سپس زمان محصورسازی محاسبه می‌گردد. به همین منظور جریان حلقه ۱۰ kA، شعاع حلقه ۱۰ cm و عامل فاصله  $S = 1/3$  در نظر گرفته شده و انرژی جنبشی اولیه الکترون‌ها از ۰.۱ keV تا ۱ keV تغییر داده می‌شود. شکل ۱۱ زمان محصور شدن الکترون‌ها را برحسب انرژی اولیه الکترون‌ها نشان می‌دهد. زمان محصورسازی الکترون‌ها با افزایش انرژی جنبشی اولیه الکترون‌ها کاهش می‌یابد. از برازش منحنی رابطه زیر بین زمان محصورسازی و انرژی جنبشی به دست می‌آید.

$$t_c \propto E^{-(0.75 \pm 0.2)} \quad (11)$$

(ضریب تشخیص برای رابطه ۱۱ برابر ۰.۹۹۸۵ است.)

#### ۴.۴ بررسی متغیرهای مؤثر بر زمان محصورسازی

##### ۱.۴ فرایند کار

تعداد ۱۰۰۰۰ الکترون از تفنگ الکترونی به مرکز پلی‌ول فرستاده می‌شوند. پس از رسیدن به مرکز یک ابر الکترونی متراکم را تشکیل داده و سپس در همه جهات شروع به واپاشی می‌کنند. هنگامی که اولین الکترون از داخل پلی‌ول (که مطابق شکل ۵ یک ناحیه کروی به شعاع L داخل مکعب پلی‌ول در نظر گرفته شده) خارج شود شروع زمان واپاشی در نظر گرفته می‌شود. در هر مرحله از شبیه‌سازی با مشخص شدن منحنی نمایی واپاشی، که کاهش تعداد الکترون‌ها برحسب زمان را نشان می‌دهد، ثابت زمانی یا زمان محصور شدن الکترون‌ها به دست می‌آید. با تغییر پارامتر متغیر، منحنی واپاشی و در نهایت زمان محصورسازی به دست می‌آید. با انتقال داده‌ها به نرم‌افزار متلب منحنی تغییرات زمان محصورسازی برحسب متغیرهای متغیر در هر مرحله رسم شده و سپس وابستگی زمان محصورسازی به متغیرهای ذکر شده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

##### ۲.۴ تأثیر جریان پلی‌ول بر زمان محصورسازی

در این حالت جریان حلقه‌ها را از ۰.۲ kA تا ۱.۸ kA تغییر داده و بقیه متغیرهای تأثیرگذار ثابت در نظر گرفته می‌شود. تعداد ۱۰۰۰۰ الکترون با انرژی جنبشی اولیه ۱۰۰ eV از تفنگ الکترونی به مرکز پلی‌ول فرستاده می‌شوند. شعاع حلقه‌ها و هم‌چنین عامل فاصله به ترتیب  $r = 10$  cm و  $S = 1/3$  cm انتخاب شده‌اند. در این مرحله از شبیه‌سازی با تغییر دادن جریان، زمان محصورسازی الکترون‌ها مشخص می‌شود. چگونگی تغییرات زمان محصور شدن الکترون‌ها نسبت به جریان حلقه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود زمان محصورسازی با افزایش جریان به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. به کمک برازش منحنی توسط نرم‌افزار متلب رابطه حاکم بر داده‌های عددی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$t_c \propto I^{1.54 \pm 0.6} \quad (9)$$

در این برازش ضریب تشخیص ۱ برابر ۰.۹۹۰۷ است که نشان می‌دهد رابطه ۹ قابل اطمینان است.

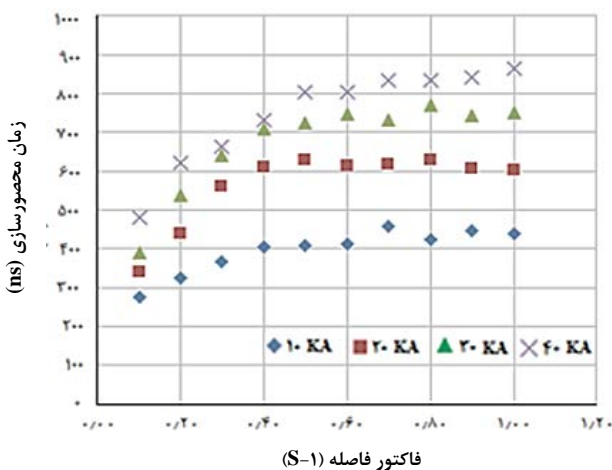
1. R-Square



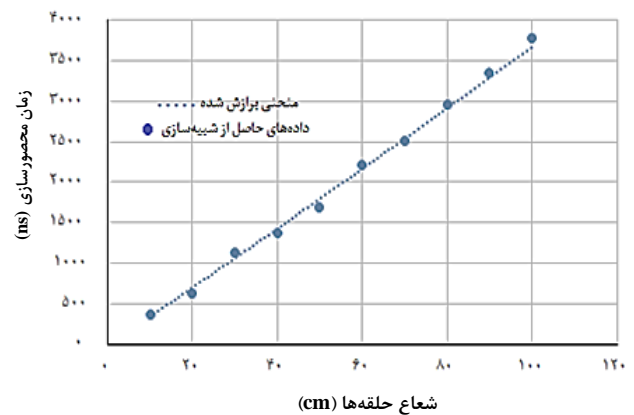


محصورسازی برحسب تابعی از عامل فاصله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عامل فاصله از ۱ تا ۱/۵، زمان محصورسازی نیز افزایش می‌یابد و در محدوده ۱/۵ تا ۲ زمان محصورسازی تقریباً ثابت می‌ماند. در حقیقت، در این محدوده، اگرچه حجم ناحیه محصورسازی در پلی‌ول زیاد می‌گردد اما در عوض اتلاف الکترون‌ها از کاسپ‌های گوشه نیز زیاد می‌شود و در نتیجه زمان محصورسازی ثابت می‌ماند. شکل ۱۳، حاصل شبیه‌سازی سه بعدی، برای سه پلی‌ول با عامل فاصله‌های ۱/۱، ۲ است. در این شبیه‌سازی، تعداد ۱۰۰۰۰ الکترون به مرکز پلی‌ول تزریق شده و مسیر تک‌تک ذرات ردیابی شده است.

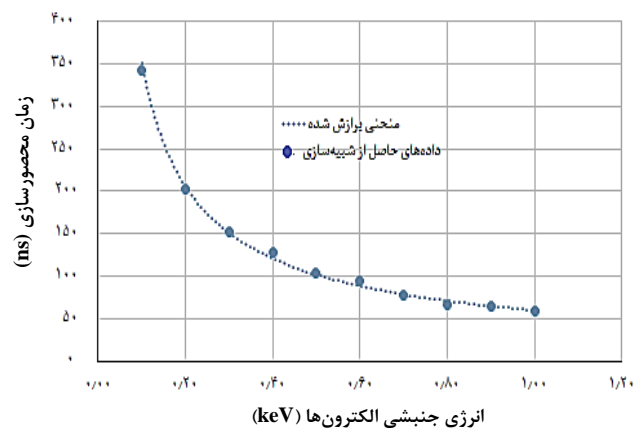
به وضوح دیده می‌شود که میزان فرار الکترون‌ها از کاسپ‌های وجوه و گوشه‌ها به پارامتر S بستگی دارد. اتلاف الکترون‌ها از کاسپ‌های خطی کناره نسبت به کاسپ‌های نقطه‌ای وجوه و گوشه بسیار کم‌تر است. در ضمن در صورتی که عامل فاصله کوچک باشد (همان‌طور که در شکل ۱۳ الف مشاهده می‌شود) اتلاف از کاسپ‌های وجوه (مرکز حلقه‌ها) نسبت به کاسپ‌های گوشه بیشتر است، درحالی‌که با افزایش عامل فاصله این موضوع برعکس می‌شود (شکل ۱۳ ب را مشاهده کنید).



شکل ۱۲. تغییرات زمان محصورسازی برحسب فاکتور فاصله. بقیه متغیرهای مؤثر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۰. منحنی تغییرات زمان محصورسازی الکترون‌ها نسبت به شعاع. عوامل مؤثر دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۱. منحنی تغییرات زمان محصورسازی الکترون‌ها نسبت به انرژی جنبشی الکترون‌ها. عوامل مؤثر دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

#### ۵.۴ تأثیر عامل فاصله بر زمان محصورسازی

یکی از متغیرهای تأثیرگذار در زمان محصورسازی عامل فاصله است. برای این منظور، عامل فاصله را از ۱ تا ۲ تغییر داده در حالی‌که بقیه متغیرها ثابت در نظر گرفته می‌شود. هنگامی‌که عامل فاصله تقریباً برابر  $S=1$  باشد یعنی قطر حلقه‌ها تقریباً برابر با طول مکعب پلی‌ول است (حلقه‌های مجاور تقریباً به هم جسیبیده‌اند) و وقتی این پارامتر برابر  $S=2$  باشد یعنی طول مکعب پلی‌ول دو برابر قطر حلقه است.

الکترون‌ها با انرژی  $100 \text{ eV}$  از تفنگ الکترونی به مرکز پلی‌ول تزریق می‌شوند. در این‌جا شعاع  $10 \text{ cm}$  و جریان حلقه‌ها به ترتیب  $10$ ،  $20$ ،  $30$  و  $40$  کیلو آمپر انتخاب شده است. در مرحله بعد با به‌کار بردن داده‌های شبیه‌سازی در جعبه‌ابزار برازش منحنی در متلب، زمان محصورسازی الکترون‌ها برای عامل فاصله‌های مختلف به‌دست می‌آید. شکل ۱۲ زمان



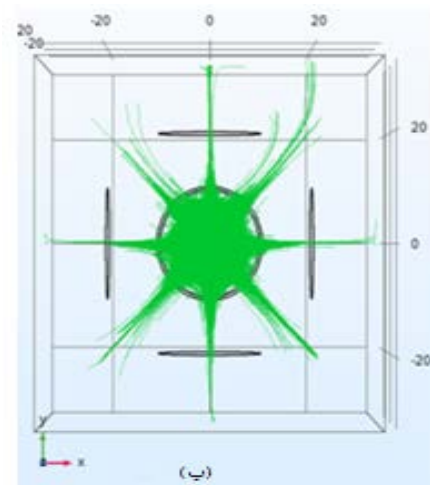
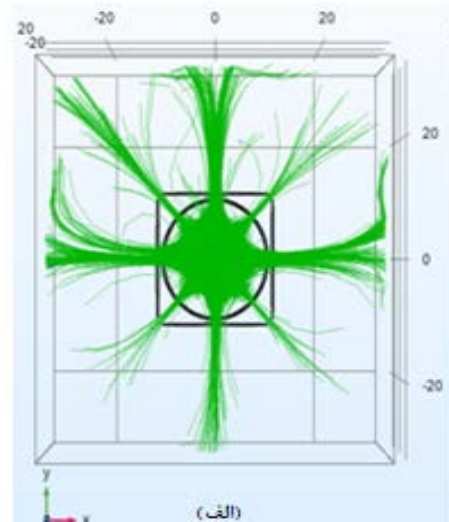
دلیل اختلاف در دو مدل شبیه‌سازی شده می‌تواند به واسطه این باشد که در روش تئوری مداری ذره، سازوکار اتلاف در پلی‌ول را همانند مدل تئوری محصورسازی آینه مغناطیسی بررسی می‌کند. بنابراین اتلاف از کاسپ‌های خطی کنار در مقابل اتلاف از کاسپ‌های نقطه‌ای ناچیز در نظر گرفته می‌شود. درحالی‌که در شبیه‌سازی از انجام گرفته در این مقاله، با توجه به نیروی مغناطیسی که به ذره وارد می‌شود، مسیر حرکت هر الکترون به کمک حل معادله حرکت ردیابی می‌شود تا این که از یکی از کاسپ‌های خطی یا نقطه‌ای خارج شود. به همین دلیل الگوی حاصل از شبیه‌سازی ما یعنی رابطه ۱۲ نسبت به رابطه ۱۳ به مدل تجربی که توسط کورنیش و همکارانش معرفی شد و در زیر بیان شده نزدیک‌تر است [۱۱].

$$t_c \propto \frac{\sqrt{I}r}{E} \quad (14)$$

#### ۵. نتیجه‌گیری

افزایش زمان محصورسازی الکترون‌ها در نتیجه ماندگاری کاتد مجازی در عملکرد راکتور پلی‌ول بسیار مهم است. به کمک شبیه‌سازی سه بعدی محصورسازی ابر الکترونی در پلی‌ول و در حالت چگالی پایین بررسی شد. با افزایش جریان و شعاع حلقه و کاهش انرژی جنبشی اولیه الکترون‌ها، زمان محصورسازی افزایش می‌یابد. به طوری‌که این تغییرات را می‌توان در یک الگوی ریاضی قابل پیش‌بینی جای داد. از طرفی تأثیر عامل فاصله نیز به طور دقیق مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که وقتی عامل فاصله از ۱ تا ۱/۵ زیاد شود آن‌گاه زمان محصورسازی الکترون‌ها نیز افزایش می‌یابد و برای فواصل ۱/۵ تا ۲، زمان محصورسازی تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع در صورتی‌که متغیرهای (I, E & r) ثابت باشند، حالت بهینه برای زمان محصورسازی وقتی اتفاق می‌افتد که عامل فاصله حدوداً در محدوده ۱/۵ تا ۱/۸ باشد.

این نتیجه با فرض داشتن یک چگالی الکترون کم و عدم توجه به اثرات بار فضا به دست می‌آید. با این حال، توجه به اثرات بار فضا (چگالی بالا)، زمان محصورسازی را کمی تغییر می‌دهد، اما الگوی رفتار زمان محصورسازی بر مبنای عوامل مؤثر ذکر شده احتمالاً مشابه نتایج حاضر خواهد بود. توجه به اثرات بار فضا می‌تواند موضوع کار آینده باشد.



شکل ۱۳. ردیابی مسیر الکترون‌ها در مدت ۱۲۰ ns بعد از تزریق. (الف) فاکتور فاصله ۱/۱، (ب) فاکتور فاصله ۲.

#### ۱۶.۴ ارائه الگوی سنجش

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی به نظر می‌رسد از بین چهار پارامتر مؤثر بر زمان محصورسازی می‌توان یک الگوی رفتاری برای زمان محصورسازی بر پایه سه متغیر جریان، انرژی الکترون و شعاع حلقه به صورت زیر نوشت.

$$t_c \propto \frac{\sqrt{I}r}{E^{\frac{r}{4}}} \quad (12)$$

از طرفی گامرسال<sup>۱</sup> و همکارانش از روش تئوری مداری ذرات (و ه کمک شبیه‌سازی به روش ذره در سلول) الگوهای رفتاری زمان محصورسازی را به صورت زیر به دست آوردند [۱۰].

$$t_c \propto \frac{\sqrt{I}r^{\frac{r}{2}}}{E^{\frac{r}{4}}} \quad (13)$$

1. Gummarsall

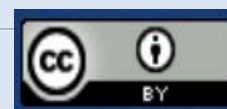


## مراجع

1. R.W. Bussard, *Some physics considerations of magnetic inertial-electrostatic confinement: A new concept for spherical converging-flow fusion*, *Fusion Sci. Technol.*, **19**, 273 (1991).
2. J. Hedditch, R. Bowden-Reid, J. Khachan, *Fusion energy in an inertial electrostatic confinement device using a magnetically shielded grid*, *Phys. Plasmas*, **22**, 102705 (2015).
3. O.A. Lavrent'ev, *Electrostatic and electromagnetic high-temperature plasma traps*, *Ann.N.Y. Acad. Sci.*, **251**, 152 (1975).
4. R.W. Bussard, *Some Physics Considerations of Magnetic Inertial-Electrostatic Confinement: A New Concept for Spherical Converging-Flow Fusion*, *Fusion Technol.*, **19**, 273 (1991).
5. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, *Plenum Press* (1984).
6. R. Bussard, *Method and apparatus for creating and controlling nuclear fusion reactions*, *US Patent*, **5**, 160, 695, 3 November (1992).
7. R. Bussard, *Method and apparatus for controlling charged particles*, *US Patent Application*, 0187086/2008, 7 August (2008).
8. M. Carr, et al, *Low beta confinement in a Polywell modelled with conventional point cusp theories*, *Physics of Plasmas*, **18**, 112501 (2011).
9. F. Kazemyzade, et al, *Dependence of potential well depth on the magnetic field intensity in a polywell reactor*, *J. Fusion Energ.*, **31**, 341 (2013).
10. D. Gummersall, et al, *Scaling law of electron confinement in a zero beta polywell device*, *Phys. Plasmas*, **20**, 102701 (2013).
11. S. Cornish, et al, *The dependence of potential well formation on the magnetic field strength and electron injection current in a polywell device*, *Phys. Plasmas*, **21**, 092502 (2014).
12. M. Carr, J. Khachan, *The dependence of the virtual cathode in a polywell<sup>TM</sup> on the coil current and background gas pressure*, *Physics of Plasmas*, **17**, 052510 (2010).
13. M. Bagheri, et al, *The effect of spacing factor on the confinement time of the electrons in a low beta Polywell device*, **10**, 055305 (2020).
14. J.G. Rogers, *A Polywell Fusion Reactor Designed for Net Power Generation*, *Fusion Energy*, **37**, 1-20 (2017).
15. J. Park, et al, *High-energy electron confinement in a magnetic cusp configuration*, *Phys. Rev.*, X **5**, 021024 (2015).
16. D. Poznic, J. Ren, J. Khachan, *Electron density and velocity functions in a low beta polywell*, *Phys. Plasmas*, **26**, 022703 (2019).
17. *COMSOL Multiphysics<sup>TM</sup> 5.2a*, *COMSOL, Inc.*, 2016, <http://www.comsol.com>.
18. J.A. Bittincourt, *Fundamentals of Plasma Physics*, **3rd ed.**, (Springer, 2004).

## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## استناد به این مقاله

محسن باقری، احمد سالار الهی، محمد کاظم سالم، محمود قرآن‌نویس (۱۴۰۲)، بررسی متغیرهای تأثیرگذار در افزایش زمان محصورسازی الکترون‌ها در حالت بتای پایین در یک رآکتور پلی‌ول، ۱۰۵، ۳۸-۴۸

DOI: [10.24200/nst.2022.1136.1748](https://doi.org/10.24200/nst.2022.1136.1748)

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1484.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1484.html)

