

## طراحی و ساخت تفنگ الکترونی جهت شتابدهنده الکترون با انرژی 10MeV

علی محمد پورصالح\*, سعید حاصل طلب, محمد جواد موسوی, حسینعلی بابائی, مجتبی مرتضوی

سازمان انرژی اتمی, پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای, پژوهشگاه کاربرد پرتوها

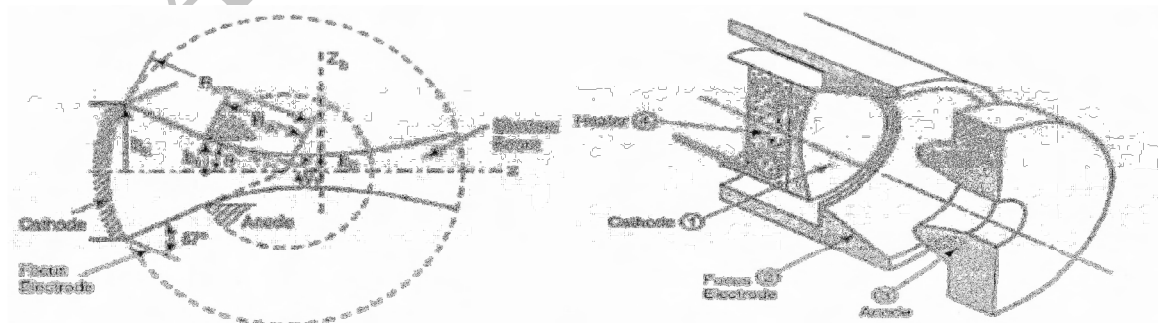
### چکیده:

این مقاله به چگونگی طراحی و ساخت تفنگ الکترونی بهینه شده جهت اغلب شتابدهنده الکترون پرداخته هرچند که منظور اصلی استفاده آن در یک شتابدهنده صنعتی الکترون با انرژی 10MeV و توان 100KW است. طراحی تفنگ الکترونی مورد نظر براساس ساختار ترمیونی صورت گرفته و جهت کنترل بهینه جریان باریکه این تفنگ الکترونی بصورت تریود شامل الکترودهای کاتد گرید و آند میباشد با استفاده از مگنتهای همگرائی باریکه الکترون خروجی کاملاً همگرا و دارای سطح مقطع بسیار مناسب بوده و قابلیت کنترل و انحراف جهت باریکه الکترون در راستای افقی و عمودی را دارد. حداکثر انرژی باریکه خروجی این تفنگ الکترونی 50KeV و محدوده کنترل جریان آن 0-20mA است.

**کلید واژه:** تفنگ الکترونی, شتابدهنده الکترون, ترمیونی, تریود, مگنت همگرائی

### مقدمه:

تفنگ الکترونی بعنوان منبع تولید الکترون یکی از اجزای اصلی شتابدهنده های الکترون میباشد. در شتابدهنده ها نیاز به باریکه الکترون اولیه ای است که سطح مقطع کوچک و توزیع انرژی و شدت جریان مناسبی داشته باشد. اغلب شتابدهنده های الکترون از تفنگ الکترونی با ساختار ترمیونی استفاده می کنند. شکل ساختار یک تفنگ الکترونی ترمیونی ساده را نشان می دهد که در آن حرارت تولیدی توسط یک سیم گرم کننده به یک صفحه فلزی بنام کاتد منتقل میشود و در مقابل کاتد الکترون آند جهت ایجاد یک میدان قوی قرار میگیرد.



شکل ۲: ساختار هندسی کاتد و آند

شکل ۱: ساختمان یک تفنگ الکترونی ساده

در طراحی ساده ترین تفنگ الکترونی مطابق شکل ۲ توسط دو روزنه به شعاعهای  $b_c$  مربوط به کاتد و  $b_1$  مربوط به آند که در فاصله  $d$  از یکدیگر قرار دارند در عمل محدودیت اساسی در مقدار جریانی که از این دو روزنه می گذرد وجود دارد این محدودیت در اثر بار فضای بین دو روزنه و مستقل از  $b_1, b_c$  است و فقط به نسبت آنها بستگی دارد مقدار جریان ماکزیمم تفنگ الکترونی با معادله (۱) بدست می آید [1]

$$I_{max} = 38.5T_0^{3/2}(2r_0/d)^2 \quad (1)$$

در این رابطه  $d$  فاصله آند از کاتد  $r_0$  نسبت شعاع آند و کاتد و  $T_0$  انرژی الکترون در روزنه آند است. همچنین با توجه به ابعاد و زاویای بین کاتد و آند نشان داده شده در شکل ۲ برای جریان عبوری از الکترون گان می توان از معادله (۲) استفاده نمود [2]

$$I = 29.3 \times 10^{-6} \frac{1-\cos\theta}{\alpha^2} V^{3/2} \quad (2)$$

که در آن  $\alpha = \gamma - 0.3\gamma^2 + 0.75\gamma^3$  و  $\gamma = \ln \frac{R_a}{R_c}$  در این رابطه زاویه شعاعی کاتد با  $\theta$  و ولتاژ بین کاتد و آند را با  $V$  نشان داده شده است در صورتیکه این رابطه را خلاصه کنیم می توان این رابطه را بصورت معادله (۳) نوشت [2]

$$I = P \times V^{3/2} \quad (3)$$

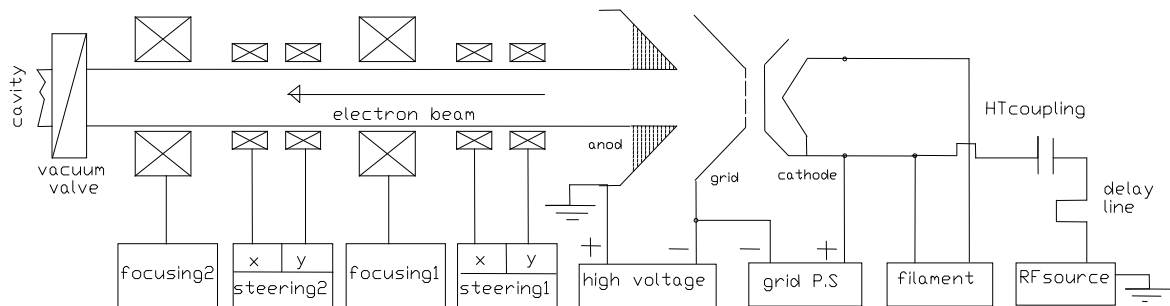
لذا در این رابطه فاکتور  $P$  یا  $perveance$  را داریم که این فاکتور وابسته به ساختار و پارامترهای هندسی تفنگ الکترونی است که فاکتور مهمی در طراحی تفنگ الکترونی است همچنین حداکثر جریان مورد نیاز در تفنگ الکترونی با توجه به توان و انرژی دستگاه شتابدهنده مورد نظریا توجه به معادله (۴) تعیین می گردد

$$W_{(kW)} = E_{(MeV)} \times I_{(mA)} \quad (4)$$

بطور مثال اگر توان شتابدهنده 100kW و انرژی آن 10MeV باشد میزان جریان حداکثر در خروجی تفنگ الکترونی در شتابدهنده مورد نظر ۰ میلی آمپر محاسبه می گردد. [3,4]

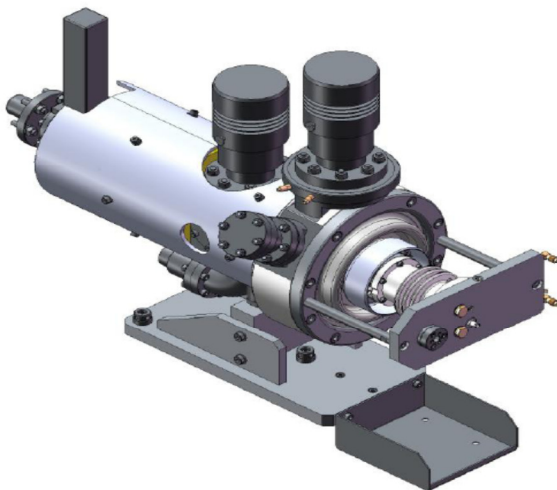
### روش کار:

طراحی و ساخت تفنگ الکترونی مورد نظر جهت استفاده در یک شتابدهنده صنعتی الکترون با انرژی 10MeV و توان 100KW صورت گرفته است که طرح کلی آن مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است



شکل ۳: طرح کلی تفنگ الکترونی

ساختار این تفنگ الکترونی باید به گونه ای باشد که قادر به تولید باریکه با سطح مقطع وامیتانس مناسب بوده و قابلیت تنظیم جریان باریکه در محدوده توانی دستگاه شتابدهنده را داشته باشد چنانچه گفتیم منبع مولد الکترون اولیه کاتد می باشد اما جهت کنترل جریان الکترون خروجی کاتد از الکتروود گرید که یک توری بسیار ریز است در فاصله نزدیکی مقابل کاتد استفاده می شود. قطعه اصلی مولد الکترون اولیه کاتد به شماره TH381 ساخت شرکت THALES در نظر گرفته شده است این قطعه شامل فیلمان گرید و کاتد است که اصطلاحاً "آنا کاتد" می نامیم که تصویر این قطعه در شکل ۴ نشان داده شده است [5] همچنین این قطعه در تفنگ الکترونی می بایست در مقابل یک میدان الکتریکی قوی قرارگیرد که الکتروود اصلی این میدان آند نامیده میشود لذا این گونه الکترون گان را بدلیل استفاده از سه الکتروود اصلی کاتد گرید و آند تفنگ الکترونی تربود مینامند [6] در این قسمت به مباحث طراحی قطعات مربوط به بدنه اصلی و محفظه شتاب و مسیره های عبوری باریک الکترون و همچنین به اصول کار تفنگ الکترونی طراحی شده می پردازیم. نمائی سه بعدی و کامل تفنگ الکترونی طراحی شده جهت شتابدهنده الکترون مورد نظر در شکل ۵ نشان داده شده است.

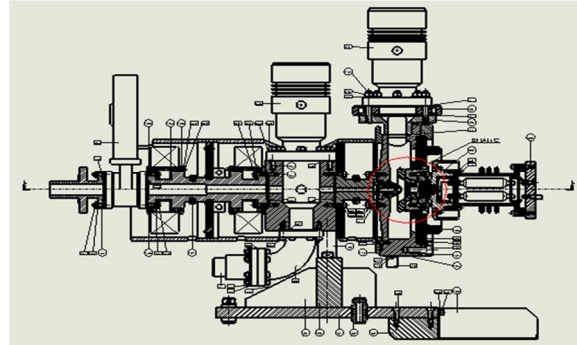
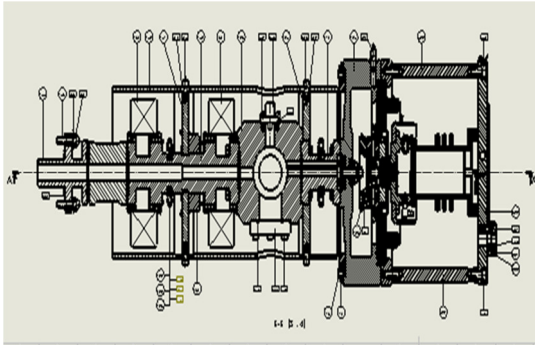


شکل ۵: نمائی سه بعدی از تفنگ الکترونی طراحی شده

شکل ۴: کاتد مورد استفاده در تفنگ الکترونی

تفنگ الکترونی تشکیل شده از قطعات مکانیکی که بدلیل حفظ خلاء در مسیر باریکه الکترون، محل اتصال آنها به یکدیگر از صافی سطح بالایی تشکیل شده است. جنس اغلب قطعات از فلز استیل ضد زنگ ۳۱۶ می باشد که هیچگونه پس ماند مغناطیسی را در خود نگه نمی دارند برای طراحی قطعات تفنگ الکترونی با توجه به الگو ارائه شده در شکل ۳ و فرمولهای ۱ الی ۴ ابعاد و اندازه های قطعات مختلف تفنگ الکترونی طراحی و سپس توسط نرم افزار solid works مدلسازی گردیدند. شکلهای ۶ و ۷ جزئیات طرح درنمای جانبی و دید از بالا را نشان می دهد که شامل اجزای مربوط به پایه نگهدارنده و اتصالات کاتد و همچنین

اتصالات ولتاژ بالا و محفظه شتاب یا روزنه آند محل‌های اتصال پمپها و سنسورهای خلا مگنتهای متمرکز کننده و همچنین مگنتهای تعیین مسیر و یا انحراف باریکه الکترون در راستای افقی و عمودی است.



شکل ۷: نمای دید از بالا و برش بدنه تفنگ الکترونی

شکل ۶: نمای جانبی قطعات بدنه تفنگ الکترونی

همچنین شکل ۸ نقشه انفجاری و سه بعدی قطعات بدنه تفنگ الکترونی طراحی شده در نرم افزار solid works از طرف راست به چپ با جزئیات کامل از قطعات بکار رفته را نشان می دهد.

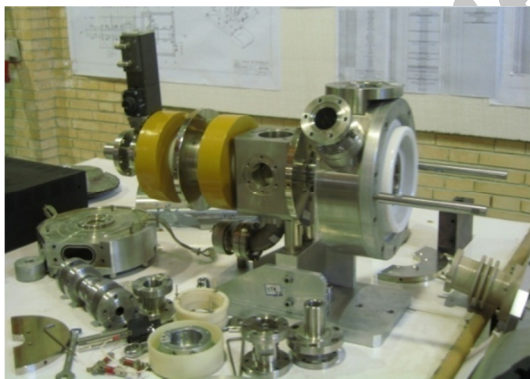


شکل ۸: نقشه انفجاری از قطعات بکار رفته در تفنگ الکترونی

در این طرح ولتاژ تغذیه فیلمان در محدوده ۶ الی ۹.۵ ولت قابل تنظیم می باشد که می توان از نوع ac یا dc نظر گرفت که در اینجا ولتاژ ac مورد نظر بوسیله یک ترانس با ورودی متغیر تامین میشود که بوسیله تغییر سیگنال متناوب ورودی محدوده مذکور قابل دسترس می باشد تغییر ولتاژ فیلمان بستگی به کاهش طول عمر و کاهش راندمان کاتد دارد بعبارت دیگر شروع بکار کاتد با ولتاژ ۶ ولت می باشد و با کاهش راندمان این ولتاژ تا حدود ۹.۵ قابل افزایش است جهت کنترل جریان باریکه از سطح کاتد بوسیله یک منبع کنترلی که مطابق شکل ۱ بصورت بایاس معکوس به گرید نسبت به کاتد متصل است استفاده می کنیم بطوری که اگر سطح این ولتاژ صفر باشد الکترونها تولیدی از سطح کاتد تحت تاثیر میدان اعمالی از طرف آند بدون محدودیت و تا حداکثر جریان نامی خود که با توجه به معادله (۱) محاسبه می گردد شتاب می گیرند اما در صورتیکه ولتاژ اعمالی بصورت معکوس افزایش یابد از شدت این جریان کاسته خواهد شد بنابراین با تغییر سطح ولتاژ اعمالی به گرید جریان باریکه الکترون در شتابدهنده قابل کنترل است که با توجه به توان



شتابدهنده مورد نظر این محدوده بین ۰ تا ۱۰ میلی آمپر می باشد همچنین میزان میدان الکتریکی بین کاتد و آند در عمل بسیار مهم و تاثیر گذار در جریان باریکه الکترون می باشد میزان ولتاژ اعمالی بین آند و کاتد می بایست بالا و در چندین هزار ولت باشد که بستگی به فاصله بین آند و کاتد شکل الکتروود آند و میزان خلا داخل تفنگ الکترونی دارد که در این طرح 50kV در نظر گرفته شده است. از مباحث دیگر در طراحی تعیین میزان خلا مورد نیاز و تجهیزات خلا از جمله نوع پمپهای خلا و سنسورهای اندازه گیری و محل نصب آنها می باشد در اینجا خلا در محدوده  $10^{-9}$  mbar در نظر گرفتیم که توسط یک پمپ اولیه دیافراگمی و دو پمپ تریبویجاد میشود. باتوجه به اینکه میدان ناشی از تجهیزات خلا و همچنین سایر میدان مغناطیسی خارج از محدوده تفنگ الکترونی بر روی مسیر حرکت باریکه الکترون تولیدی در تفنگ الکترونی تاثیر گذار است جهت جلوگیری از نفوذ این میدانها قطعات مربوط به مسیر حرکت باریکه الکترون در یک پیوسته فلزی استوانه ای شکل قرار می گیرد این پیوسته شامل دو نیمه بوده که تصویر آن در شکل ۸ مشاهده می شود. مگنت های همگرایی بکار رفته در واقع یک سیم پیچ با ۱۲۰۰ دور در ۳۴ لایه باسیم مسی به قطر ۱ میلیمتر است که بدلیل میدان یکنواخت و موازی در مسیر حرکت باریکه الکترون باعث همگرایی آن می شود. همچنین مگنتهای منحرف کننده که در شکل ۱ اسیتینگ نامیده شده است شامل دو مگنت دو قطبی است که جهت انحراف باریکه در راستای عمودی و افقی مورد استفاده قرار می گیرد. شکل ۹ تصویر منبع تغذیه ولتاژ بالا (H.V) با قابلیت تولید ولتاژ 50KV DC با قدرت جریان دهی 20mA و منبع تغذیه مربوط به مگنتهای همگرایی و منحرف کننده با محدوده تغییرات ولتاژ در رنج 18VDC +/- و جریان 2A تا 0 و شکل ۱۰ مراحل ساخت تفنگ الکترونی ساخته شده در پژوهشکده کاربرد پرتوها را نشان می دهد.



شکل ۱۰: مراحل ساخت تفنگ الکترونی

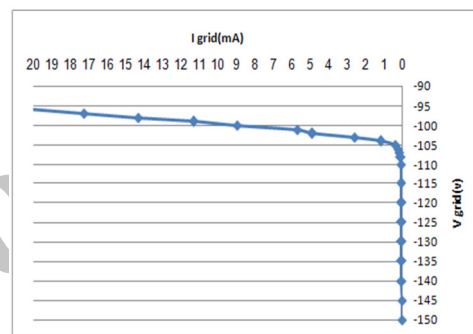
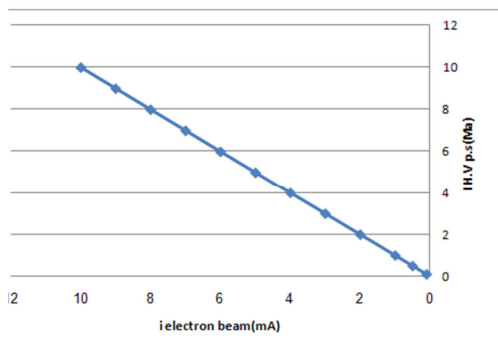


شکل ۹: دستگاه منبع تغذیه ولتاژ بالا و تغذیه مگنتها

### نتایج :

با توجه به آزمایشات صورت گرفته و ولتاژهای اعمالی مختلف به الکتروود گرید و کاتد جریان عبوری از این دو الکتروود مطابق نمودار شکل ۱۱ می باشد با توجه به این نمودار در می یابیم که در ولتاژ معکوس 150V- بین گرید و کاتد هیچ جریانی از سد گرید عبور نمی کند ولی با کاهش این ولتاژ تا حد 108V- جریانی کمی در حد 0.01mA تا 0.2mA را شاهد هستیم و از ولتاژ 108V- به بعد کاهش کم ولتاژ گرید باعث افزایش

زیادجریان عبوری است و در ولتاژی حدود 96V- حداکثر جریان عبوری از گرید را شاهد هستیم حداکثر جریان بهینه این تفنگ الکترونی با توجه به مشخصات کاتد و محاسبات بر اساس معادلات (۲) و (۳) و همچنین تستهای عملی در حدود ۲۰ میلی آمپر می باشد. همچنین با توجه به اندازه گیری انجام شده حداکثر انرژی باریکه خروجی از تفنگ الکترونی طراحی شده 50KeV است. طی آزمایش دیگری با توجه به اندازه گیری های صورت گرفته در جریانهای مختلف باریکه الکترون و جریان کشیده شده از منبع تغذیه ولتاژ بالا یک تناسب خطی مطابق نمودار شکل ۱۲ مشاهده میشود که این نتیجه با تحلیل فیزیکی کاملاً سازگاری دارد زیرا در هنگام عبور باریکه الکترون از میدان ناشی از الکتروود آند متناظر با ذرات الکترون با بار منفی نیاز به بار مثبت است که باعث میشود جریان باریکه الکترون و جریان کشیده شده از منبع تغذیه یکسان باشد. شکل ۱۱: ارتباط بین ولتاژ و جریان عبوری از گرید کاتد شکل ۱۲: تاثیر جریان باریکه الکترون بر منبع ولتاژ بالا



### بحث و نتیجه گیری :

تفنگ الکترونی طراحی شده دارای قابلیت های ویژه ای است که سطح مقطع کاملاً همگرا با قابلیت تنظیم همگرایی و انحراف در راستای افقی و عمودی و قابلیت تغییر سطح انرژی و همچنین جریان باریکه خروجی در محدوده مورد نظر برخی از ویژگی های آن است و لذا تفنگ الکترونی طراحی شده علاوه بر استفاده در شتابدهنده الکترون مورد نظریاً اطمینان بالا قابل استفاده در انواع شتابدهنده های صنعتی الکترون نیز می باشد.

### مراجع:

- [1] محمد بلوری زاده ، فیزیک اتمی و ملکولی روشهای تجربی، نشر فلامک ، صفحات ۱۷۶—۱۸۳ ، سال ۱۳۸۱
- [2] c.g.karmark, medical electron accelerators, standford university ,page67-69,1993
- [3] J.pottier,;a new type of RF electron accelerator ;nucl.instr.meth.phys.res, b40,94, 1989
- [4] m.stanley Livingston,john p.blewett.particle accelerators.page 106-118,1986
- [5] iba document-rhodotron tt200-j2-control system&wiring [wbs 25.01.08.00]-1998
- [6]arvind jain,a.r.chindarkar,k.c.mittal;design and operating experience of triode electron guns for industrial electron accelerators:bahabha atomic centre,Mumbai 400085,2007