



روند طراحی مفهومی یک چندبرابرکننده ولتاژ با تغذیه موازی برای شتاب‌دهنده الکترواستاتیک

اویس حسن پور^۱، فرشاد قاسمی^{۱*}، فریدون عباسی دوانی^۲، محمد نظری^۱

۱. گروه پژوهشی شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران
۲. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۱۷۱۹، تهران - ایران

*Email: fsghasemi@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۷/۱۸

چکیده

شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک، شتاب‌دهنده‌هایی هستند که از یک اختلاف پتانسیل ثابت‌بازمان برای ایجاد میدان الکتریکی مناسب و در نتیجه شتاب‌دهی یون و الکترون استفاده می‌کنند. شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون که از شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک پرکاربرد در صنعت است، از یک مدار چندبرابرکننده ولتاژ برای تولید ولتاژ موردنیاز برای شتاب‌دهی استفاده می‌کند. المان‌های خازنی مدار چندبرابرکننده ولتاژ در شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون توسط الکتروود نیمه‌استوانه‌ای که در یک آرایه‌ی ستونی قرار دارند تشکیل می‌شود. طراحی این ستون از الکتروودها که به ستون افزایش‌دهنده ولتاژ نیز موسوم است فرایندی پیچیده است که نیازمند مطالعه و شبیه‌سازی در دو حوزه الکترومغناطیس و مدل مداری به صورت هم‌زمان است. طراحی مفهومی این ساختار نیز به دلیل به هم پیوستگی برخی پارامترها امری پیچیده می‌باشد. در این مقاله پس از معرفی مختصر بخش‌های مختلف یک شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون و پرداختن دقیق به بخش ستون افزایش‌دهنده ولتاژ، به ارائه‌ی یک روند برای طراحی مفهومی ستون افزایش‌دهنده ولتاژ یک شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون می‌پردازیم.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌دهنده، الکترواستاتیک، ولتاژ بالا، چندبرابرکننده

A method for conceptual design of a parallel-fed voltage multiplier for electrostatic accelerator

O. Hasanpour¹, F. Ghasemi^{*1}, F. Abbasi Davani², M. Nazari¹

1. Accelerator Research Group, Physics and Accelerators School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran
2. Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 16765-1719, Tehran – Iran

Research Article

Received 27.7.2022, Accepted 10.10.2022

Abstract

Electrostatic accelerators use a constant potential difference to create a suitable electric field and accelerate ions and electrons. One of the most widely used electronic accelerators in the industry, the dynamitron accelerator uses a voltage multiplier circuit to generate the voltage required for acceleration. The capacitor elements of the voltage multiplier circuit in the dynamitron accelerator are constituted of semi-cylindrical electrodes located in a columnar array. The design of this column of electrodes, also known as the voltage multiplier column, is a complex process. It requires the study and simulation of electromagnetic fields and circuit models. The conceptual design of this structure is also complicated due to parameter interdependence. In this article, after a brief introduction to different parts of the dynamitron accelerator and details of voltage multiplier columns, a process for the conceptual design of the voltage columns of a dynamitron accelerator is presented.

Keywords: Accelerator, Electrostatic, High-voltage, Multiplier



۱. مقدمه

شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک شامل شتاب‌دهنده‌هایی می‌شوند که از اختلاف پتانسیل ثابت با زمان برای ایجاد میدان الکتریکی مناسب و در نتیجه شتاب‌دهی ذره‌ی باردار استفاده می‌کنند. از میدان الکتریکی ثابت می‌توان برای شتاب‌دهی به هر نوع ذره‌ی باردار (الکترون، یون‌های مثبت و یون‌های منفی) استفاده کرد. ایجاد اختلاف پتانسیل با استفاده از روش مناسب و اعمال آن به یک تیوب شتاب‌دهی، دو مرحله‌ی اصلی در فرایند شتاب‌دهی در انواع شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک است. طراحی تیوب شتاب‌دهی که اعمال میدان الکتریکی و در نتیجه فرایند شتاب‌گیری ذره در آن اتفاق می‌افتد وابسته به جریان و نوع ذره است؛ اما منبع تولید ولتاژ بالا تقریباً از نوع ذره مستقل است، به نحوی که از یک نوع مولد می‌توان برای شتاب‌دهی به الکترون و یون استفاده کرد [۱]. البته مشخصات منبع تغذیه به کاربرد شتاب‌دهنده و به تبع آن به نوع ذره وابسته است؛ به عنوان مثال برای مولد داینامیترون امکان جریان‌دهی بالاتر مولد- که بیش‌تر برای الکترون کاربرد دارد- و یا دقت بالاتر در مقدار ولتاژ آن- که بیش‌تر برای یون کاربرد دارد- می‌تواند دو هدف متفاوت باشد که در طراحی آن مؤثر خواهد بود.

تاکنون منابع تغذیه‌ی مختلفی برای تولید ولتاژ مورد نیاز برای شتاب‌دهی به روش الکترواستاتیک توسعه داده شده‌اند. در مولد وان دوگراف^۱ که کار تولید ولتاژ بالا را برای شتاب‌دهنده‌ای به همین نام بر عهده دارد از روش جمع‌آوری بار و ثابت نگه‌داشتن آن در یک پایانه‌ی ولتاژ بالا استفاده می‌شود [۲]. مولدهای ولتاژ بالای پلترون^۲ و لدرترون^۳ نیز مانند وان دوگراف عمل می‌کنند با این تفاوت که از تسمه‌های متفاوت برای انتقال بار به یک رسانای بزرگ و بهره‌گیری از پتانسیل الکتریکی ایجاد شده حاصل از آن استفاده می‌کنند [۳]. گروه دیگر از مولدهای ولتاژ بالای پر کاربرد در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک، از مدارهای الکتریکی چندبرابرکننده ولتاژ هستند که از افزایش پله‌ای ولتاژ استفاده می‌کنند. مولدهای کوک‌کرافت- والتون، ICT^۴ و ELV از این نوع هستند [۴، ۵]. شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون که در این مقاله بدان پرداخته می‌شود نیز از این نوع از مولدها است [۵]. هریک از این مدارها سازوکار و نیز ملاحظات ساخت مربوط به خود را دارند. عدم وجود قطعات متحرک مکانیکی و در نتیجه نگهداری ساده‌تر و

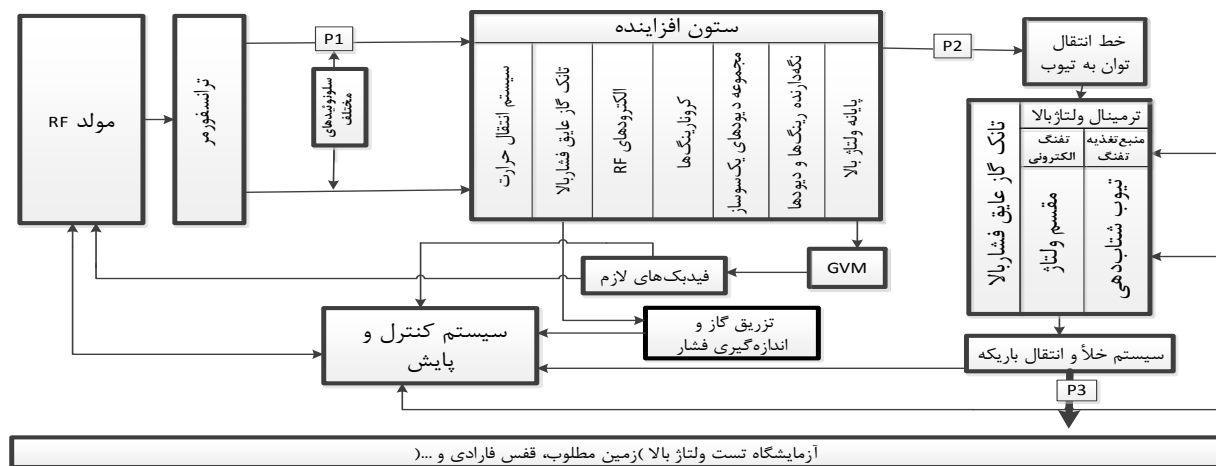
عمر بالاتر و نیز امکان دستیابی به جریان بالاتر، مهم‌ترین مزیت‌های این گروه از مولدها نسبت به گروه قبلی می‌باشد. مولد داینامیترون از انواع پر کاربرد در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک است، به نحوی که مبنای دسته‌ای از شتاب‌دهنده‌های تجاری بر پایه‌ی استفاده از این نوع مولد می‌باشد [۶، ۷]. شرکت IBA برای تولید انواع شتاب‌دهنده‌های الکترون برای کاربردهای صنعتی و شرکت HVEC برای تولید انواع شتاب‌دهنده‌های پروتون و یون برای کاربردهای تحقیقاتی از پیشگامان استفاده از این نوع مولد می‌باشند. علاوه بر شرکت‌ها، در سال‌های اخیر دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی دیگری نیز برای کاربردهای مختلف، ساخت این نوع از شتاب‌دهنده را مدنظر قرار داده‌اند [۸-۱۰]. ستون افزایش‌دهی ولتاژ مهم‌ترین بخش این نوع مولدها محسوب می‌شود که وظیفه‌ی افزایش پله‌ای ولتاژ را تا مقدار مورد نظر برعهده دارد. این مقاله طراحی مفهومی ستون افزایش‌دهی ولتاژ این مولد را ارائه می‌دهد و در آن سعی شده است تا روند طراحی یک ستون افزایش‌دهی ولتاژ به صورت مرحله‌به‌مرحله تشریح شود. برای این هدف ابتدا اجزاء شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون و جایگاه ستون افزایش‌دهی ولتاژ در آن تشریح شده است و در ادامه پس از ارائه‌ی توضیحاتی از نحوه‌ی عملکرد ستون افزایش‌دهی در ایجاد ولتاژ نهایی مورد نیاز، پارامترهای مهم طراحی آن معرفی شده‌اند. پس از تشریح کامل مراحل طراحی، نتایج مربوط به طراحی یک شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون بر اساس مراحل مذکور ارائه شده است.

۲. معرفی اجزاء شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، مولد ولتاژ بالای یک شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون یک مدار چندبرابرکننده بر اساس یک‌سوسازی سیگنال متناوب است [۱۱]. مدار داینامیترون یک ورودی متناوب فرکانس بالا را تبدیل به یک خروجی مستقیم با بزرگی چندبرابر دامنه‌ی ولتاژ ورودی می‌کند. ابتدا یک ولتاژ متناوب فرکانس بالا توسط یک نوسان‌ساز تولید شده و سپس این ولتاژ متناوب بعد از چندبرابر شدن در یک ترانسفورمر افزایش‌دهنده به یک مدار یک‌سوساز و چندبرابرکننده داده می‌شود. خروجی این مدار، که یک ولتاژ مستقیم و پایدار است، به تیوب شتاب‌دهی اعمال می‌شود. نوسان‌ساز فرکانس بالا، ترانسفورمر فرکانس بالا، مدار یک‌سوساز شامل دیودها و خازن‌ها و سیستم شتاب‌دهی از اجزای اصلی یک شتاب‌دهنده‌ی داینامیترون هستند؛ اما قسمت‌های ضروری دیگری نیز در این شتاب‌دهنده وجود دارند. شکل ۱ اجزای یک شتاب‌دهنده داینامیترون را نشان می‌دهد.

1. Van de Graaff
2. Pelletron
3. Laddertron
4. Insulating Core Transformer





شکل ۱. نمایش بلوک دیباگرامی اجزای مختلف یک شتاب دهنده داینامیترن نوعی.

میزان اتلاف این ترانسفورمر در راندمان کل ستون افزایشده اثر دارد. در مورد استفاده از ترانسفورمرها در یک مولد داینامیترن دو رهیافت وجود دارد؛ حالت اول استفاده از ترانسفورمر معمولی و متصل کردن یک سر از سیم پیچ اولیه و ثانویه به زمین است. حالت دوم استفاده از ترانسفورمر سروسط و زمین کردن سر وسط سیم پیچ ثانویه است [۱۸، ۱۹]. علاوه بر بیش تر بودن ولتاژ نهایی در مولدهایی که از ترانسفورمر ثانویه سروسط استفاده می کنند، تقارن مداری در ستون افزایشده یکی از ویژگی های استفاده از این نوع ترانسفورمر می باشد به نحوی که می توان یک صفحه ی خنثای مجازی در وسط ستون افزایشده در نظر گرفت [۱۹].

بخش اساسی و خصوصیت ویژه ی شتاب دهنده ی داینامیترن منبع ولتاژ بالای آن یا به عبارت دیگر ستون چندبرابرکننده ی ولتاژ آن می باشد که در بخش بعد به آن پرداخته می شود.

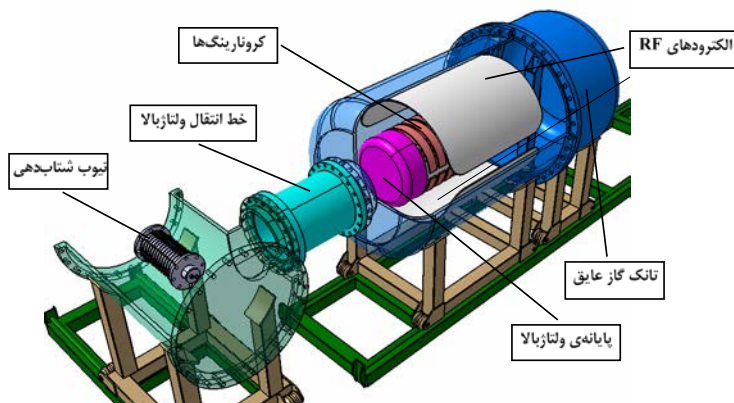
جزء بعدی این شتاب دهنده، محفظه ی تیوب شتاب دهی و متعلقات آن می باشد. در واقع محفظه ی تیوب شتاب دهی به کاررفته در شتاب دهنده های داینامیترن مشابه انواع دیگر شتاب دهنده های الکترواستاتیک از تغذیه الکترونی، منبع تغذیه ی تغذیه ی تغذیه، مقسم ولتاژ، سیستم خلأ و سیستم انتقال باریکه و پرتو دهی تشکیل شده است. برای جانمایی تیوب شتاب دهی این شتاب دهنده دو رهیافت وجود دارد. تیوب شتاب دهی می تواند درون ستون افزایشده ی ولتاژ قرار بگیرد که در این حالت همه ی مجموعه ی شتاب دهنده در یک تانک عایق قرار خواهد گرفت [۱۱، ۲۰]. در رهیافت دوم تیوب شتاب دهی در محفظه ای مجزا قرار می گیرد و ولتاژ ایجاد شده در ستون افزایشده با یک خط انتقال ولتاژ بالا به تیوب شتاب دهی منتقل شود [۲۱، ۲۲]. شکل ۲ این رهیافت را نشان می دهد.

مدار مولد داینامیترن در واقع ارتقاء یافته ی مدار چندبرابرکننده ی ولتاژ از نوع کوک کرافت- والتون است [۱۲]. در بسیاری از منابع از این مولد به عنوان کوک کرافت- والتون با تغذیه ی موازی یاد می شود [۴، ۱۳-۱۵]. منظور از موازی بودن تغذیه، طریقه ی شارژ شدن متفاوت خازن ها در این مدار نسبت به کوک کرافت- والتون می باشد [۴]. برای اطلاعات بیش تر در مورد شباهت ها و تفاوت های این مولدها می توان به مرجع [۱۵] رجوع کرد.

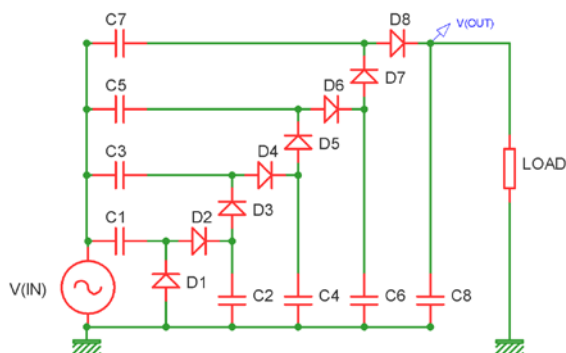
مولد RF ذکر شده در شکل ۱ یک نوسان ساز است که ورودی قسمت ستون افزایشده را فراهم می کند. این بخش، سیگنال ورودی تک فاز یا سه فاز برق شهر را دریافت کرده و در خروجی خود سیگنالی با توان مورد نیاز در محدوده ی فرکانس بالا (معمولاً بین ۲۰ تا ۱۲۰ کیلوهرتز) ارائه می دهد. روش های مختلفی برای تولید این ولتاژ متناوب فرکانس بالا وجود دارد. موتور ژنراتور، لامپ خلأ و سوئیچ زنی نیمه هادی انواع روش های استفاده شده برای این بخش می باشند [۱۱، ۱۶].

برای دستیابی به دامنه ی ولتاژ بالاتر در ورودی ستون افزایشده، از ترانسفورمر افزایشده بین مولد RF و ستون افزایشده استفاده می شود. هرچه دامنه ی ولتاژ متناوب ورودی به ستون چندبرابرکننده ی ولتاژ بیش تر باشد، به ازای تعداد طبقات برابر، ولتاژ مستقیم خروجی از آن که برای شتاب دهی استفاده می شود بیش تر خواهد بود و در نتیجه امکان شتاب دهی ذرات تا انرژی بیش تر میسر خواهد شد. در این ترانسفورمر با افزایش دامنه ی ولتاژ، جریان خروجی نسبت به ورودی کاهش می یابد. با توجه به بالا بودن فرکانس و اثر اشباع و پسماند هسته ها، معمولاً این ترانسفورمرها بدون هسته طراحی و ساخته می شوند [۱۷].





شکل ۲. نمایی از درون محفظه‌ی گاز یک مولد داینامیترتون.



شکل ۳. مدل مداری مولد داینامیترتون ایده‌آل ۶ طبقه.

این مدار فقط مدل‌کننده‌ی ستون افزایشدهی ولتاژ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ستون افزایشدهی ولتاژ از اجزاء الکترودهای RF، رینگ‌های (حلقه‌های) کرونا، دیودهای یک‌سوساز و پایانه‌ی ولتاژ بالا تشکیل شده است. این اجزاء برای جلوگیری از پدیده‌ی تخلیه‌ی الکتریکی در داخل یک تانک گاز عایق پرفشار قرار می‌گیرند.

در واقع با پیاده‌سازی مدار مشابه شکل ۳ می‌توان انتظار یک‌سوسازی سیگنال متناوب و اخذ ولتاژ ثابت را داشت. شکل ۴ ولتاژ ورودی و خروجی همان مدار شکل ۳ را در زمان‌های حالت گذرا و حالت مانا نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود این مدار سیگنال ورودی AC را به ولتاژ ثابت خروجی تبدیل می‌کند. در ولتاژهای پایین این مدار می‌تواند روی برد الکترونیکی به راحتی پیاده شود. در این حالت عناصر مداری شکل ۳ را می‌توان از قطعات معمول انتخاب کرد. مدار فوق در ولتاژ پایین با عناوین *Karthus-Fischer cascade voltage Doubler* و *On-chip high-voltage generator* و *Dickson Charge Pumps* یاد می‌شود و در انواع مولدهای ولتاژ پایین و نیز ایجاد ولتاژهای نسبتاً بالا در تراشه‌های NMOS و تأمین تغذیه‌ی تگ‌های RFID کاربرد دارد [۲۴-۲۶].

کوچک‌بودن سیستم مزیت رهیافت اول و دسترسی آسان به بخش‌های مختلف و نیز راحتی در حفاظ‌سازی بخش شتابدهی و آسانی نگهداری و تعمیر از مزیت‌های رهیافت دوم است [۶، ۲۲، ۲۳].

بخش کنترل و پایش که شامل سنسورها، پرآب‌ها، پردازنده‌های سیگنال، تجهیزات شبکه، PLC و مواردی از این دست می‌باشد، وظیفه‌ی اعمال اینترلاک‌ها، نمایش وضعیت کنونی سیستم به کاربر و دادن قابلیت تغییر مقادیر به کاربر را بر عهده دارد. در شتاب‌دهنده‌های داینامیترتون این بخش شامل یک سیستم نمونه‌گیری از پایانه‌ی ولتاژ بالا و ارسال آن به نوسان‌ساز نیز می‌باشد. هدف این نمونه‌گیری ثابت‌نگاه‌داشتن ولتاژ پایانه با تغییر دامنه‌ی ولتاژ ورودی است [۱۶]. جریان در خط انتقال ورودی و خروجی از داینامیترتون همواره باید در محدوده‌ی مناسبی باشد که این وظیفه نیز بر عهده‌ی سیستم کنترل می‌باشد.

ولتاژ فرکانس‌بالای ورودی به ستون افزایشدهی ولتاژ به الکترودهای RF بیرونی که در شکل ۲ دیده می‌شوند اعمال می‌شود. از آن‌جاکه ولتاژ اعمالی بین این دو الکترودها فرکانس بالایی دارد باعث یونیزاسیون و گرم‌شدن گاز عایق درون محفظه شود. لذا داینامیترتون‌های توان‌بالا به یک سیستم انتقال حرارت و گردش گاز با استفاده از فن مجهز هستند [۹].

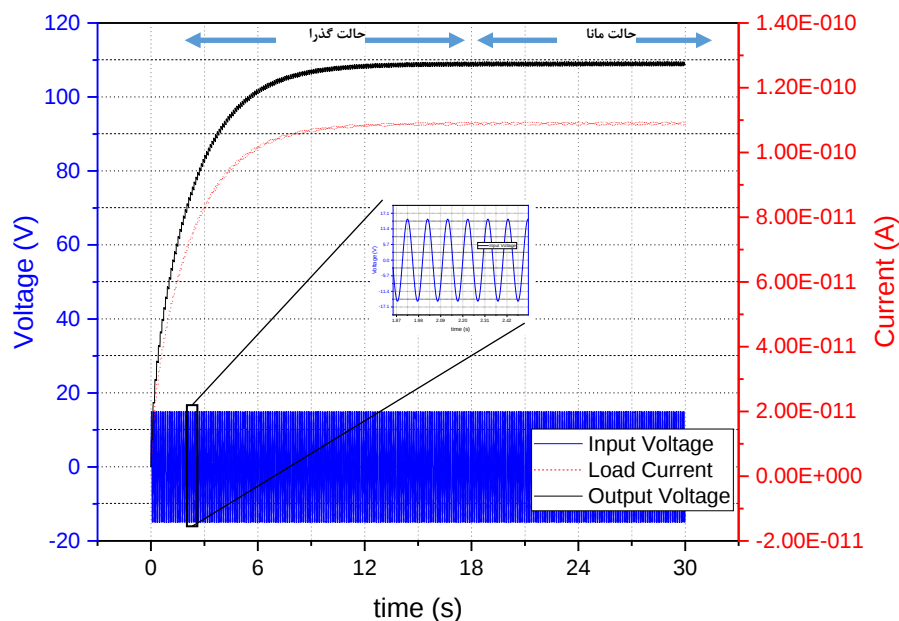
۳. معرفی ستون افزایشدهی ولتاژ

قسمت مهم و متمایزکننده‌ی شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون ستون افزایشدهی ولتاژ آن است. در این مقاله عنوان ستون چندبرابرکننده‌ی ولتاژ نیز برای آن استفاده شده است. ستون افزایشدهی ولتاژ بخشی است که وظیفه‌ی تولید ولتاژ شتابدهی را بر عهده دارد. در شکل ۳ مدار معادل ساده‌ی یک ستون افزایشدهی مشاهده می‌شود.

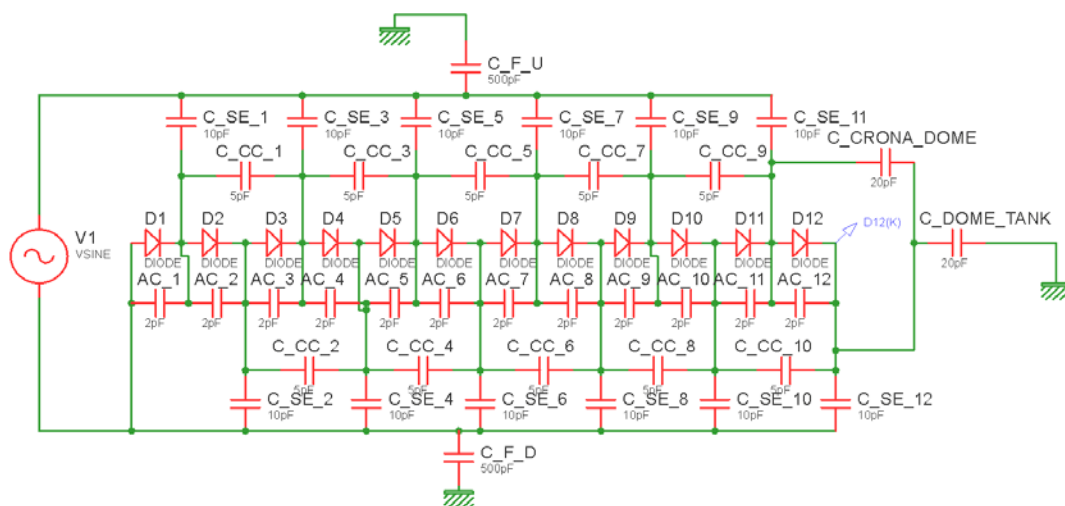


خازن‌های تشکیل‌شده در ستون افزایش‌دهی ولتاژ یک شتاب‌دهنده دینامیترن نمی‌باشد. علاوه بر خازن‌های دلخواه، خازن‌هایی به صورت ناخواسته تشکیل می‌شوند. با احتساب تمامی ظرفیت‌های خازنی تشکیل‌شده در ساختار به مدار معادل شکل ۵ می‌رسیم. خازن‌های نشان داده‌شده در شکل ۵ بین صفحات رسانای خمیده مختلف شکل ۲ تشکیل می‌شود و به‌طور مجزا در شکل ۶ قابل مشاهده‌اند.

در ولتاژهای بالا رعایت ملاحظات مختلف، به‌ویژه ملاحظات تخلیه‌ی کرونا، در انواع اتصالات مداری شکل ۳ باعث می‌شود تا خازن‌های این مدار به‌صورت فیزیکی با صفحات مناسب که الکترودهای RF و حلقه‌های کرونا هستند، پیاده‌سازی شوند. همان‌طور که اشاره شد این مجموعه در یک تانک گاز عایق قرار می‌گیرد. شکل ۲ اجزاء درون تانک یک مولد چندبرابرکننده دینامیترن را نمایش می‌دهد. شکل ۳ مدل‌کننده‌ی همه‌ی

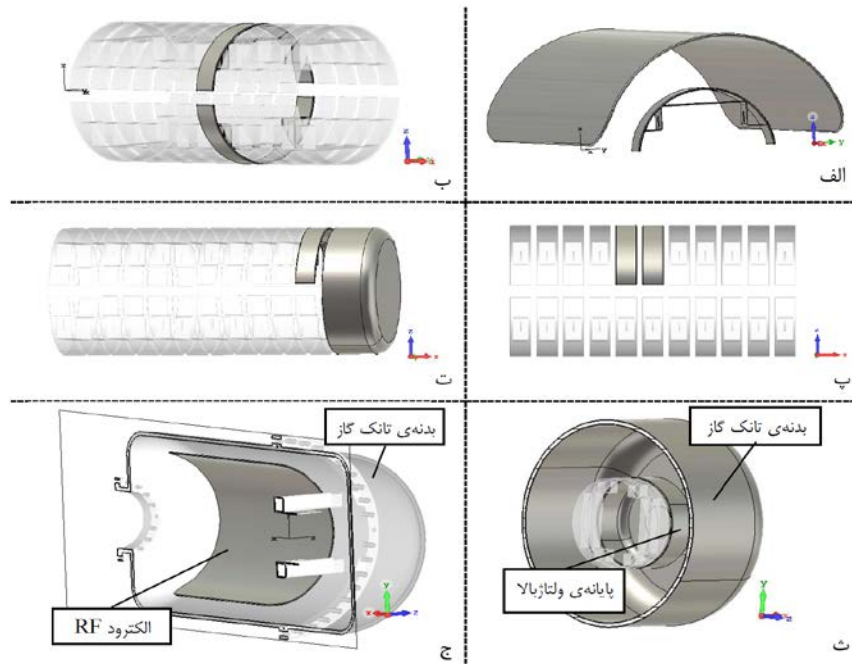


شکل ۴. ولتاژهای ورودی و خروجی به ستون چندبرابرکننده.



شکل ۵. مدار ستون افزایش‌دهی دینامیترن با در نظر گرفتن ظرفیت‌های خازنی ناخواسته.





شکل ۶. انواع خازن‌های تشکیل‌شده در ستون افزایش‌دهنده ولتاژ شتاب‌دهنده دینامیترتون، الف) ظرفیت خازنی بین یک کرونینگ و یک الکترو RF، ب) ظرفیت خازنی بین دو کرونینگ مقابل هم، پ) ظرفیت خازنی بین دو کرونینگ مجاور، ت) ظرفیت خازنی بین کرونینگ پایانی و پایانه ولتاژ بالا، ث) ظرفیت خازنی بین پایانه ولتاژ بالا و بدنه تانک گاز، ج) ظرفیت خازنی بین یک الکترو RF و بدنه تانک گاز.

داده شده، خازن تشکیل‌شده بین کرونینگ آخر و پایانه ولتاژ بالا ($C_{\text{crown_terminal}}$) که در شکل ۶ ت مشاهده می‌شود و خازن $C_{\text{terminal_tank}}$ که بین پایانه ولتاژ بالا و بدنه تانک گاز تشکیل می‌شود و در شکل ۶ ث قابل مشاهده است. هرکدام از این خازن‌های تشکیل‌شده ملاحظات خاصی را به همراه دارد که باید در تحلیل مدار و ولتاژ بالا بررسی شده و در طراحی مکانیکی به آن‌ها پرداخته شود.

خازن‌های C_f با توجه به محل قرارگیری به صورت بار برای منبع تغذیه عمل می‌کنند. هرچه مقدار این خازن بیشتر باشد مقدار امپدانس آن کمتر و جریان عبوری از آن بیشتر خواهد شد. خازن $C_{\text{terminal_tank}}$ نیز با توجه به محل قرارگیری مانند بار برای ستون افزایش‌دهنده عمل می‌کند. هرگونه جریان کشیده‌شده از مدار باعث کاهش ولتاژ خروجی و افزایش رپل ولتاژ می‌شود.

طراحی ستون افزایش‌دهنده ولتاژ دینامیترتون مستلزم تصمیم‌گیری در مورد پارامترهایی می‌باشد که مقدار آن‌ها به هم وابسته است. مراجع [۱۸، ۱۹] معادلات مربوط به مدار مولد دینامیترتون را با جزئیات ارائه داده‌اند. خروجی ستون افزایش‌دهنده ولتاژ دینامیترتون به صورت کلی از رابطه‌ی (۱) پیروی می‌کند که در آن n تعداد دیودها (دو برابر تعداد طبقات)، U_0 دامنه ولتاژ متناوب ورودی و k ضریبی به نام ضریب کوپلینگ است. مقدار C_{ac} از ظرفیت کرونینگ‌های مقابل هم (شکل ۶ ب) به

در شکل ۵، خازن‌های C_{se} ظرفیت خازنی تشکیل‌شده بین یک کرونینگ با الکترو RF مقابل آن می‌باشند (شکل ۶ الف). از آن‌جا که دو سر دیودهای مدار ستون افزایش‌دهنده، به صورت بایاس معکوس ولتاژ بالایی در حدود دوبرابر دامنه ولتاژ ورودی می‌افتد، از حد تحمل یک دیود، به تنهایی، خارج بوده و لذا باید چندین دیود با یک‌دیگر سری شوند. به این مجموعه دیودهای سری‌شده، مجموعه دیودی و یا مجموعه یک‌سوسازی یا دیود استک گفته می‌شود. از آن‌جا که هر دیود یک ظرفیت خازنی درونی^۱ دارد، این مجموعه دیودی نیز یک ظرفیت خازنی معادل خواهد داشت.

از آن‌جا که دیود استک‌ها بین دو کرونینگ مقابل هم بسته می‌شوند، پس درواقع خازن آن‌ها با خازن تشکیل‌شده بین دو کرونینگ مقابل هم (شکل ۶ ب) موازی می‌باشد؛ بنابراین C_{ac} متشکل از این دو المان خازنی می‌باشد.

خازن C_{cc} بین دو کرونینگ مجاور هم تشکیل می‌شود (شکل ۶ پ). ولتاژ دوسر این خازن‌ها در تحلیل مداری پارامتر مهمی است که در طراحی هندسی باید به مقدار آن توجه کرد. دیگر خازن‌های ایجادشده خازن‌های تشکیل‌شده بین الکتروهای RF و بدنه تانک (C_f) که در شکل ۶ ج نشان

۱. ظرفیت خازنی ناحیه تخلیه



عنوان ورودی برای بررسی ملاحظات ولتاژ بالا در نرم افزار تحلیل الکترومغناطیسی قرار می گیرد.

برای شروع، همان طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، باید یک هدف مشخص را در نظر گرفته شود. این هدف شامل ولتاژ نهایی و جریان کشیده شده ی مورد نظر می باشد. بررسی ها نشان می دهد که ولتاژ بین کروارینگ آخر (نزدیک ترین کروارینگ به پایانه ولتاژ بالا) و الکترو د RF مقابل (شکل ۶ الف) بیش ترین اختلاف پتانسیل مشاهده شده در ستون افزایش ولتاژ است بنابراین خروجی انرژی نهایی برای باریکه، با توجه به فشار و نوع گاز عایق، حداقل فاصله ی کروارینگ آخر و الکترو د RF مقابل را تعیین می کند. البته برای در نظر گرفتن حاشیه ی امنیت، ولتاژی که بررسی ملاحظات ولتاژ بالا برای آن انجام می شود ۲۰ درصد از ولتاژ هدف بیش تر در نظر گرفته می شود. متناوب و مستقیم بودن ولتاژ اعمالی به قطعات در تعیین ولتاژ شکست گاز پارامتری مؤثر است [۲۷]. گاز خالص SF_۶ و ترکیب N_۲ و CO_۲ با نسبت های ۸۰٪ به ۲۰٪ به ترتیب حداکثر ولتاژی برابر ۱۰ و ۲۵ مگا ولت بر متر را در فشار ۱۴ اتمسفر تحمل می کنند.

با توجه به این که دیود یک سوساز باید ولتاژی از مرتبه ی چند ده کیلو ولت را در بایاس معکوس متحمل شود و دیود های معمول چنین تحملی ندارند، به همین خاطر به جای یک دیود یک سوساز، از چندین دیود سری به عنوان مجموعه ی یک سوسازی استفاده می شود. اندازه و تعداد دیود هایی که باید سری شوند تا قدرت تحمل ولتاژ مورد نظر تأمین شود، حداقل شعاع کروارینگ ها (قسمت داخلی در شکل ۲) را مشخص می کند. در بررسی برای انتخاب دیود، سه ویژگی دیود ها مورد بررسی قرار می گیرد. این پارامتر های عبارت اند از ولتاژ شکست، ظرفیت خازنی ناحیه تخلیه و ابعاد. ترکیبی از این سه پارامتر به گونه ای در نظر گرفته می شود که با داشتن کم ترین ظرفیت خازنی معادل ممکن، بیش ترین ولتاژ معکوس قابل تحمل به دست آید.

انتخاب دیود و تشکیل مجموعه ی دیودی اولاً حداکثر دامنه ی ولتاژ ورودی را مشخص می نماید. این مورد از این حقیقت ناشی می شود که ولتاژ معکوس دوسر دیود ها تقریباً ۲ برابر دامنه ی ولتاژ ورودی است. اندازه ی مجموعه ی دیودی، شعاع کروارینگ ها و در نتیجه شعاع الکترو د RF را مشخص می کند. همان گونه که اشاره شد کروارینگ ها و الکترو د های RF تشکیل دهنده ی خازن های C_{se} هستند و طبق رابطه ی (۲) بیشینه مقدار (C_{se} کمینه فاصله ی الکترو د RF با کروارینگ ها) مطلوب ترین حالت می باشد. بنابراین در این مرحله به تخمین اولیه ای از C_{se} نیز دست می یابیم.

علاوه ی ظرفیت خازنی ناحیه ی تخلیه ی دیود ها تشکیل می شود. اگر جریان I از مدار کشیده شود، ولتاژ خروجی به اندازه ی U_{drop} افت می کند و رپل ولتاژ برابر با U_{ripple} خواهد بود [۱۸]. در مدل مداری ستون چند برابر کننده ی ولتاژ، مقدار های هر گروه از خازن ها می تواند روی بزرگی ولتاژ و جریان خروجی، رپل ولتاژ و جریان خروجی، حداکثر ولتاژ ها و جریان های مشاهده شده در نقاط مختلف مدار و هم چنین حداکثر جریان کشیده شده از منبع تغذیه و پارامتر هایی نظیر آن ها اثر داشته باشند. ولتاژ خروجی تعیین شده به عنوان هدف، روی فاصله ی کروارینگ ها از الکترو د های RF (شکل ۶ الف)، فاصله ی کروارینگ ها روی C_{se} و روی ولتاژ خروجی اثر گذار است. ابعاد تانک، از ملاحظات ولتاژ بالای ساختار به دست می آید و روی جریان کشیده شده از منبع تغذیه مؤثر است.

$$U = nU_k - U_{drop} \pm U_{ripple} \quad (1)$$

$$k = 1 + \frac{C_{ac}}{C_{se}} \quad (2)$$

$$U_{drop} = \frac{I(n-1)}{f C_{se} k} \quad (3)$$

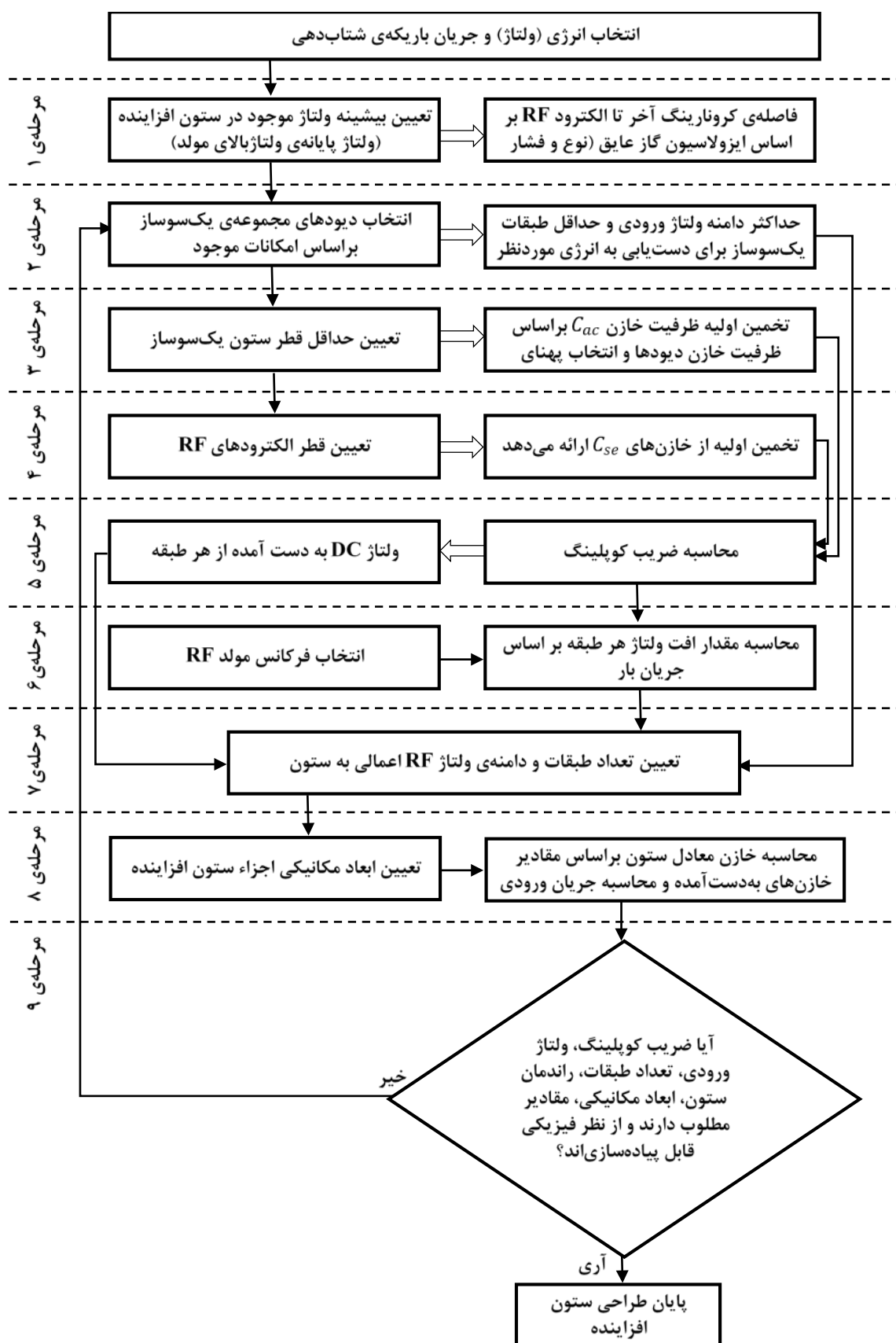
$$U_{ripple} = \frac{I}{2f C_{se}} \quad (4)$$

۴. روند طراحی مفهومی ستون افزایش ولتاژ

موارد ذکر شده در بخش قبل تعدادی از چالش های تصمیم گیری در مورد پارامتر های نهایی یک ستون افزایش ولتاژ هستند. لزوم یک برنامه و روند مشخص اولاً برای فهم بهتر هم بستگی پارامتر ها و ثانیاً برای رسیدن به مقدار نهایی اندازه ها و مقادیر باعث شد تا یک روند برای طراحی مفهومی ستون افزایش ولتاژ داینامی ترون به دست آید. این روند نتیجه ی مطالعه و بررسی دقیق پیوستگی پارامتر های ستون افزایش ولتاژ داینامی ترون می باشد. روند یاد شده برای طراحی یک مولد داینامی ترون به طور عام کاربرد دارد. این رهیافت مرحله به مرحله برای رسیدن به پارامتر های نهایی در فلوچارت شکل ۷ نمایش داده شده است. برای شروع مراحل طراحی لازم است در مورد رهیافت های یاد شده (نوع ترانسفورمر، جانمایی تیوب شتاب دهی) انتخاب مناسب صورت گرفته باشد.

طراحی ستون افزایش ولتاژ داینامی ترون در دو حوزه ی مختلف انجام می شود: حوزه ی اول تحلیل مداری برای بررسی ولتاژ و جریان خروجی و حوزه ی دوم تحلیل الکترومغناطیسی برای بررسی ملاحظات ولتاژ بالا است. برای بررسی ملاحظات ولتاژ بالا، ولتاژ نقاط مختلف ساختار ستون افزایش ولتاژ باید مشخص باشد. این اطلاعات از نرم افزار تحلیل مدار به دست آمده و به





شکل ۷. فلوچارت مراحل رسیدن به پارامترهای نهایی در طراحی ستون افزایشنده ولتاژ شتاب‌دهنده داینامی‌ترون.



مراجع

1. M.R. Cleland, New York, United States Patent US2875394A, (24 February 1959).
2. Tech Engineering News, Vols. 13-14, Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, (1932).
3. C. Westerfeldt, in: *Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications*, (Berlin Heidelberg, Springer, 2005), 89-100 (2005).
4. I. Boscolo, F. Giuliani, M. Roche, Powerful high-voltage generators for FELTRON, the electrostatic-accelerator FEL amplifier for TeV colliders, *Nuc. Inst. & Met. Phys. Res. Sec., A*: **318**, 1-3, 465 (1992).
5. M.R. Cleland, CERN Accelerator School: Specialised CAS Course on Small Accelerators, (CERN, Zeegse, The Netherlands, 2005).
6. R.A. Galloway, et al., The new IBA self-shielded dynamitron accelerator for industrial applications, *Rad. Phys. & Chem.*, **71**, 283 (2004).
7. M.R. Cleland, B.P. Offermann, The Dynagen IV — A compact high-intensity neutron source, *Nuc. Inst. & Met*, **145**, 41 (1977).
8. Beam Technology Development Group - Accelerator and Pulse Power Division: Bhabha Atomic Research Centre (BARC), <http://www.barc.gov.in/btdg/appd/electron.html#a5>.
9. DD Type (Dynamitron®) | Dasheng Electron Accelerator, <http://www.dasheng.com/en/dd.html>.
10. S. Matsuyama, et al., Improvement of the energy stability of the Tohoku Dynamitron accelerator for microbeam and nanobeam applications, *Int. Jr. PIXE*, **23**, 69 (2013).
11. C.C. Thompson, M.R. Cleland, High-power dynamitron accelerators for X-ray processing, *Nuc. Inst. & Met. Phys. Res. Sec., B*, 40-41, 1137 (1989).
12. A. Toudeshki, et al, Development of a new cascade voltage-doubler for voltage multiplication, *Chin. Jr. Eng.*, (2014).
13. J. Cerny, *Nuclear Spectroscopy and Reactions* (Elsevier, 2012).
14. M. Nazari, et al., 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17), (Copenhagen, Denmark, 2017).
15. F. Hinterberger, *Electrostatic accelerators*, (CERN, 2006).
16. M.R. Cleland, K.H. Morganstern, A New High-Power Electron Accelerator, *IRE Trans. Ind. Elec. IE-7*, 36-40 (1960).
17. K.C. Mittal, et al., Asian Particle Accelerator Conference (Indore, India, 2007).
18. M.R. Cleland, P. Farrell, Dynamitrons of the Future, *IEEE Tran. Nuc. Sci.*, **12**, 227 (1965).
19. C.C. Thompson, M.R. Cleland, Design equations for dynamitron type power supplies in the megavolt range, *IEEE Tran. Nuc. Sci.*, **16**, 124 (1969).
20. P.R. Hanley, et al., The Tandem Dynamitron, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **16**, 90 (1969).

داشتن مقدارهای C_{ac} و C_{se} به ما مقدار ضریب کوپلینگ را نتیجه می‌دهد و داشتن این ضریب از رابطه‌ی $U_{(one\ stage)}=U_0/k$ مقدار ولتاژ DC را که در هر طبقه ایجاد می‌شود به دست می‌دهد. از طرف دیگر داشتن ضریب k و معلوم بودن جریان هدف I از رابطه‌ی (۳) و تعیین کردن یک فرکانس RF ورودی بهینه، مقدار U_{drop} را تعیین می‌کند. با معلوم بودن U_{drop} ، در نظر نگرفتن U_{ripple} و مشخص بودن هدف U و I ، مقدار n که تعداد طبقات ستون افزایشده است مشخص می‌شود.

مرحله‌ی بعدی این فرایند طراحی مکانیکی ساختار داده‌شده با توجه به ملاحظات جلوگیری از تخلیه‌ی کرونا، استحکام، قیمت، وزن و ... می‌باشد. بعد از این مرحله تمامی خازن‌های موردنیاز برای تشکیل ستون افزایشده با داشتن هندسه‌ی دقیق الکترودها به دست می‌آید. مشخص بودن این خازن‌ها ما را قادر می‌سازد تا یک مقدار خازن معادل کل برای ستون افزایشده محاسبه کنیم. با در نظر گرفتن مقدار امپدانس این خازن و معلوم بودن فرکانس ولتاژ ورودی به راحتی می‌توان مقدار جریانی که از منبع تغذیه یا از سر ثانویه‌ی ترانسفورمر کشیده می‌شود را دانست. بعد از طراحی ترانسفورمر و مشخص شدن مقدار توان اتلافی ترانسفورمر، می‌توان توان و ولتاژ ورودی به اولیه‌ی سیم‌پیچ را به دست آورد. تنها در صورتی می‌توان طرح مکانیکی نهایی را مورد قبول دانست که پارامترهایی نظیر انرژی و جریان خروجی، رپل انرژی و جریان خروجی، راندمان، هزینه، ضریب کوپلینگ، ولتاژ ورودی، جریان کشیده‌شده از منبع تغذیه و ... مقادیری مجاز و منطقی داشته باشند. در غیر این صورت تمامی این مراحل از مرحله‌ی طراحی مجموعه‌های دیودی تکرار خواهند شد.

۵. نتیجه‌گیری

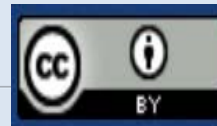
اجزاء مختلف یک شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیک از نوع داینامیترن در این مقاله معرفی شد. پیچیدگی‌های طراحی ستون افزایشده‌ی ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی داینامیترن و پارامترهای اثر گذار در طراحی بیان و تشریح شد. یک روند برای طراحی ستون افزایشده‌ی ولتاژ یک شتاب‌دهنده از نوع داینامیترن به دست آمد که برای طراحی مفهومی شتاب‌دهنده‌ی داینامیترن از هر نوع قابل استفاده است.



21. M.M. Cleland, C.C. Thompson, H.F. Malone, *The prospects for very high-power electron accelerators for processing bulk materials*, *Rad. Phys. & Chem.*, **9**, 547 (1977).
22. M.R. Cleland, et al., *New high-current Dynamitron accelerators for electron beam processing*, *Inst. & Met. Phys. Res. Sec.*, **B, 79**, 861 (1993).
23. R.A. Galloway, T.F. Lisanti, M.R. Cleland, *A new 5 MeV-300 kW dynamitron for radiation processing*, *Rad. Phys. & Chem.*, **71**, 551 (2004).
24. A. Nik Ahmad Kamil Zainal, et al., *Analysis of voltage multiplier circuit simulation for rain energy harvesting using circular piezoelectric*, *Mech. Sys. & Sig. Proc.*, **101**, 211 (2018).
25. J.F. Dickson, *On-chip high-voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved voltage multiplier technique*, *IEEE Jr. Sol. Cir.*, **11**, 374 (1976).
26. B.R. Marshall, M.M. Morys, G.D. Durgin, *IEEE International Conference on RFID (2015)*.
27. A. Beroual, M.L. Coulibaly, *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, (San Francisco, CA, USA, 2016).

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

اویس حسن پور، فرشاد قاسمی، فریدون عباسی دوانی، محمد نظری (۱۴۰۲)، روند طراحی مفهومی یک چندبرابرکننده ولتاژ با تغذیه موازی برای شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، ۱۰۶، ۹۳-۱۰۲

DOI: [10.24200/nst.2022.1180.1769](https://doi.org/10.24200/nst.2022.1180.1769)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1509.html

