



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

اویس حسن پور<sup>۱</sup>، فرشاد قاسمی<sup>۱\*</sup>، فریدون عباسی دوانی<sup>۲</sup>، محمد نظری<sup>۱</sup>

۱. گروه پژوهشی شناگرها، پژوهشکده فیزیک و شناگرها، 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. Hasanpour<sup>1</sup>, F. Ghasemi<sup>1\*</sup>, F. Abbasi Davani<sup>2</sup>, M. Nazari<sup>1</sup>

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 ثابت‌بازمان برای ایجاد میدان الکتریکی مناسب و در نتیجه شتاب‌دهی ذره باردار استفاده می‌کنند. از میدان الکتریکی ثابت می‌توان برای شتاب‌دهی به هر نوع ذره 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 مرحله 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؛ به‌عنوان مثال برای مولد داینامیترتون 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 موردنیاز برای شتاب‌دهی به روش الکترواستاتیک توسعه داده شده‌اند. در مولد وان دوگراف<sup>۱</sup> 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 پلترتون<sup>۲</sup> و لدرترون<sup>۳</sup> 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 ایجادشده حاصل از آن استفاده می‌کنند [۳]. گروه دیگر از مولدهای ولتاژ بالای پرکاربرد در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک، از مدارهای الکتریکی چندبرابرکننده ولتاژ هستند که از افزایش پله‌ای ولتاژ استفاده می‌کنند. مولدهای کوک‌کرافت- والتون، ICT<sup>۴</sup> و ELV از این نوع هستند [۴، ۵]. شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون 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 داینامیترتون از انواع پرکاربرد در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک است، به‌نحوی 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 موردنظر 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 به‌صورت مرحله‌به‌مرحله تشریح شود. برای این هدف ابتدا اجزاء شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون 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 موردنیاز، پارامترهای مهم طراحی آن معرفی شده‌اند. پس از تشریح کامل مراحل طراحی، نتایج مربوط به طراحی یک شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون بر اساس مراحل مذکور ارائه شده است.

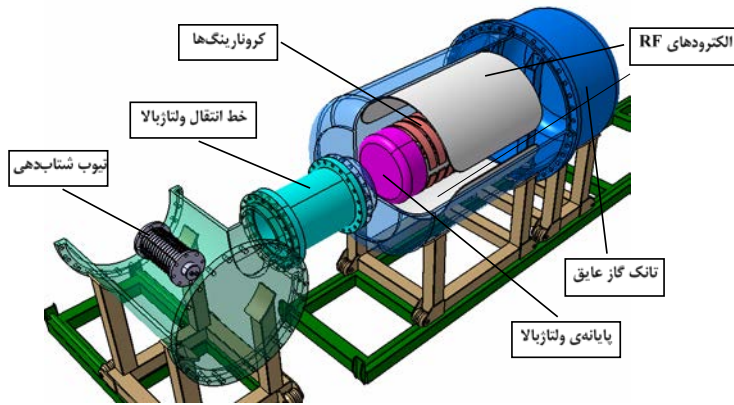
## ۲. معرفی اجزاء شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، مولد ولتاژ بالای یک شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون یک مدار چندبرابرکننده بر اساس یک‌سوسازی سیگنال متناوب است [۱۱]. مدار داینامیترتون 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 چندبرابرشدن 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 داینامیترتون هستند؛ اما قسمت‌های ضروری دیگری نیز در این شتاب‌دهنده وجود دارند. شکل ۱ اجزای یک شتاب‌دهنده داینامیترتون را نشان می‌دهد.

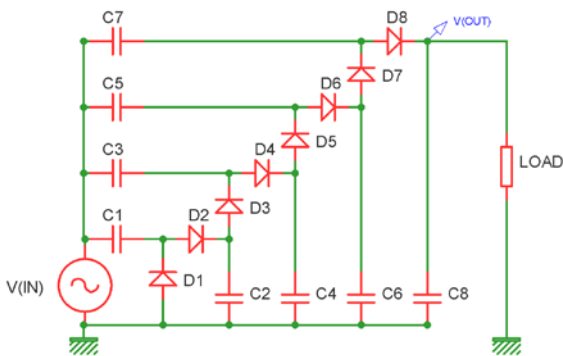
1. Van de Graaff
2. Pelletron
3. Laddertron
4. Insulating Core Transformer







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



شکل ۳. مدل مداری مولد داینامیترتون ایده‌آل ۶ طبقه.

این مدار فقط مدل‌کننده‌ی ستون افزایش‌دهنده ولتاژ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ستون افزایش‌دهنده 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*، *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 [۲۲، ۲۳].

بخش کنترل و پایش که شامل سنسورها، پراب‌ها، پردازنده‌های سیگنال، تجهیزات شبکه، PLCها 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 افزایش‌دهنده 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].

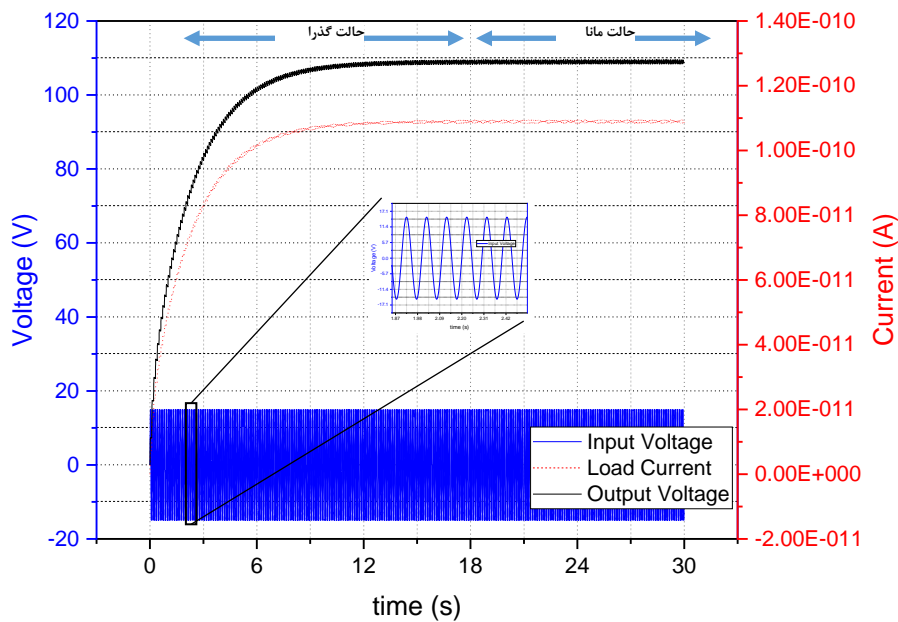
### ۳. معرفی ستون افزایش‌دهنده ولتاژ

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

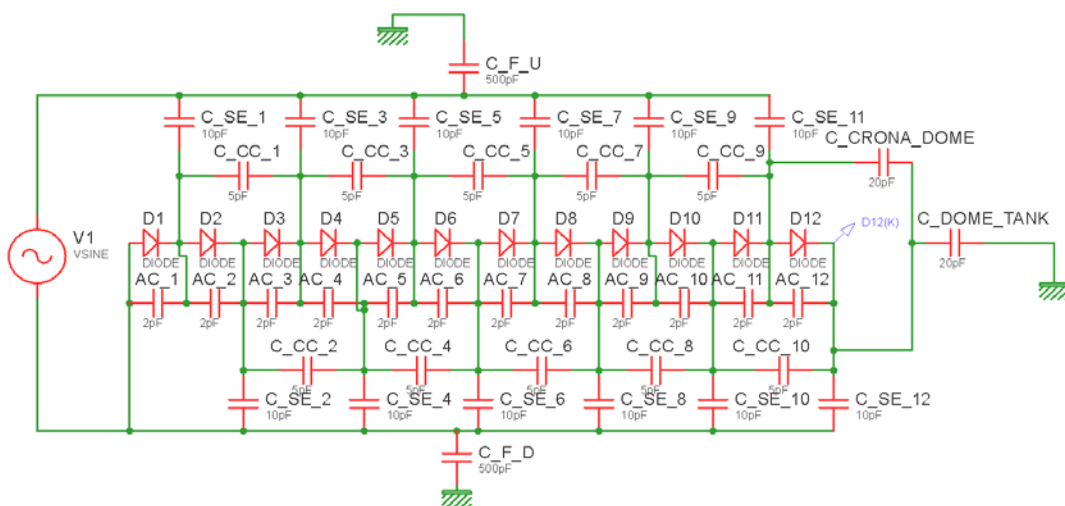


خازن‌های تشکیل‌شده در ستون افزایش‌دهنده ولتاژ یک شتاب‌دهنده دینامیترن نمی‌باشد. علاوه بر خازن‌های دلخواه، خازن‌هایی به صورت ناخواسته تشکیل می‌شوند. با احتساب تمامی ظرفیت‌های خازنی تشکیل‌شده در ساختار به مدار معادل شکل ۵ می‌رسیم. خازن‌های نشان داده‌شده در شکل ۵ بین صفحات رسانای خمیدهی مختلف شکل ۲ تشکیل 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 چندبرابرکنندهی دینامیترن را نمایش می‌دهد. شکل ۳ مدل‌کنندهی همه‌ی



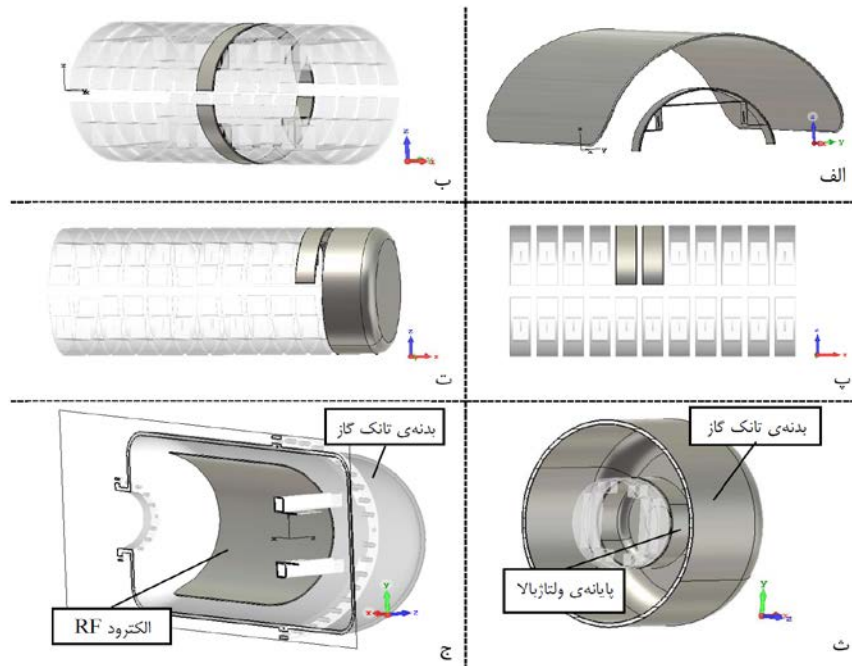
شکل ۴. ولتاژهای ورودی و خروجی به ستون چندبرابرکننده.



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







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

داده شده، خازن تشکیل شده بین کرونینگ آخر و پایانه ولتاژبالا ( $C_{\text{Crona\_terminal}}$ ) که در شکل ۶ ت مشاهده می‌شود و خازن  $C_{\text{terminal\_tank}}$  که بین پایانه ولتاژبالا و بدنه تانک گاز تشکیل می‌شود و در شکل ۶ ث قابل مشاهده است. هرکدام از این خازن‌های تشکیل شده ملاحظات خاصی را به همراه دارد که باید در تحلیل مدار و ولتاژبالا 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 کشیده شده از مدار باعث کاهش ولتاژ خروجی و افزایش ریپل 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 تشکیل شده بین یک کرونینگ با الکتروود 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 سری شده، مجموعه دیودی و یا مجموعه یک‌سوسازی یا دیود استک گفته می‌شود. از آن‌جا که هر دیود یک ظرفیت خازنی درونی<sup>۱</sup> 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 تشکیل شده 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 ایجاد شده خازن‌های تشکیل شده بین الکتروودهای RF و بدنه تانک ( $C_f$ ) که در شکل ۶ ج نشان

۱. ظرفیت خازنی ناحیه‌ی تخلیه



عنوان ورودی برای بررسی ملاحظات ولتاژبالا در نرم افزار تحلیل الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد.

برای شروع، همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، باید یک هدف مشخص را در نظر گرفته شود. این هدف شامل ولتاژ نهایی و جریان کشیده‌شده‌ی موردنظر می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ولتاژ بین کرونینگ آخر (نزدیک‌ترین کرونینگ به پایانه ولتاژبالا) و الکتروود RF مقابل (شکل ۶ الف) بیش‌ترین اختلاف پتانسیل مشاهده‌شده در ستون افزایشده ولتاژ است بنابراین خروجی انرژی نهایی برای باریکه، با توجه به فشار و نوع گاز عایق، حداقل فاصله‌ی کرونینگ آخر و الکتروود RF مقابل را تعیین می‌کند. البته برای در نظر گرفتن حاشیه‌ی امنیت، ولتاژی که بررسی ملاحظات ولتاژبالا برای آن انجام می‌شود ۲۰ درصد از ولتاژ هدف بیش‌تر در نظر گرفته می‌شود. متناوب و مستقیم بودن ولتاژ اعمالی به قطعات در تعیین ولتاژ شکست گاز پارامتری مؤثر است [۲۷]. گاز خالص SF<sub>۶</sub> و ترکیب N<sub>۲</sub> و CO<sub>۲</sub> با نسبت‌های ۸۰٪ به ۲۰٪ به ترتیب حداکثر ولتاژی برابر ۱۰ و ۲۵ مگاولت بر متر را در فشار ۱۴ اتمسفر تحمل می‌کنند.

با توجه به این‌که دیود یک‌سوساز باید ولتاژی از مرتبه‌ی چندده کیلوولت را در بایاس معکوس متحمل شود و دیودهای معمول چنین تحملی ندارند، به همین خاطر به جای یک دیود یک‌سوساز، از چندین دیود سری به‌عنوان مجموعه‌ی یک‌سوسازی استفاده می‌شود. اندازه و تعداد دیودهایی که باید سری شوند تا قدرت تحمل ولتاژ موردنظر تأمین شود، حداقل شعاع کرونینگ‌ها (قسمت داخلی در شکل ۲) را مشخص می‌کند. در بررسی برای انتخاب دیود، سه ویژگی دیودها مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پارامترهای عبارت‌اند از ولتاژ شکست، ظرفیت خازنی ناحیه تخلیه و ابعاد. ترکیبی از این سه پارامتر به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که با داشتن کم‌ترین ظرفیت خازنی معادل ممکن، بیش‌ترین ولتاژ معکوس قابل تحمل به دست آید.

انتخاب دیود و تشکیل مجموعه‌ی دیودی اولاً حداکثر دامنه‌ی ولتاژ ورودی را مشخص می‌نماید. این مورد از این حقیقت ناشی می‌شود که ولتاژ معکوس دوسر دیودها تقریباً ۲ برابر دامنه‌ی ولتاژ ورودی است. اندازه‌ی مجموعه‌ی دیودی، شعاع کرونینگ‌ها و در نتیجه شعاع الکتروود RF را مشخص می‌کند. همان‌گونه که اشاره شد کرونینگ‌ها و الکتروودهای RF تشکیل‌دهنده‌ی خازن‌های C<sub>se</sub> هستند و طبق رابطه‌ی (۲) بیشینه مقدار (C<sub>se</sub> کمینه فاصله‌ی الکتروود RF با کرونینگ‌ها) مطلوب‌ترین حالت می‌باشد. بنابراین در این مرحله به تخمین اولیه‌ی از C<sub>se</sub> نیز دست می‌یابیم.

علاوه‌ی ظرفیت‌خازنی ناحیه‌ی تخلیه‌ی دیودها تشکیل می‌شود. اگر جریان I از مدار کشیده شود، ولتاژ خروجی به اندازه‌ی U<sub>drop</sub> افت می‌کند و ریپل ولتاژ برابر با U<sub>ripple</sub> خواهد بود [۱۸]. در مدل مداری ستون چندبرابرکننده‌ی ولتاژ، مقدارهای هر گروه از خازن‌ها می‌تواند روی بزرگی ولتاژ و جریان خروجی، ریپل ولتاژ و جریان خروجی، حداکثر ولتاژها و جریان‌های مشاهده‌شده در نقاط مختلف مدار و هم‌چنین حداکثر جریان کشیده‌شده از منبع تغذیه و پارامترهایی نظیر آن‌ها اثر داشته باشند. ولتاژ خروجی تعیین‌شده به‌عنوان هدف، روی فاصله‌ی کرونینگ‌ها از الکتروودهای (RF شکل ۶ الف)، فاصله‌ی کرونینگ‌ها روی C<sub>se</sub> و روی ولتاژ خروجی اثرگذار است. ابعاد تانک، از ملاحظات ولتاژبالای ساختار به دست می‌آید و روی جریان کشیده‌شده از منبع تغذیه مؤثر است.

$$U = nU_o/k - U_{drop} \pm U_{ripple} \quad (1)$$

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

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

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

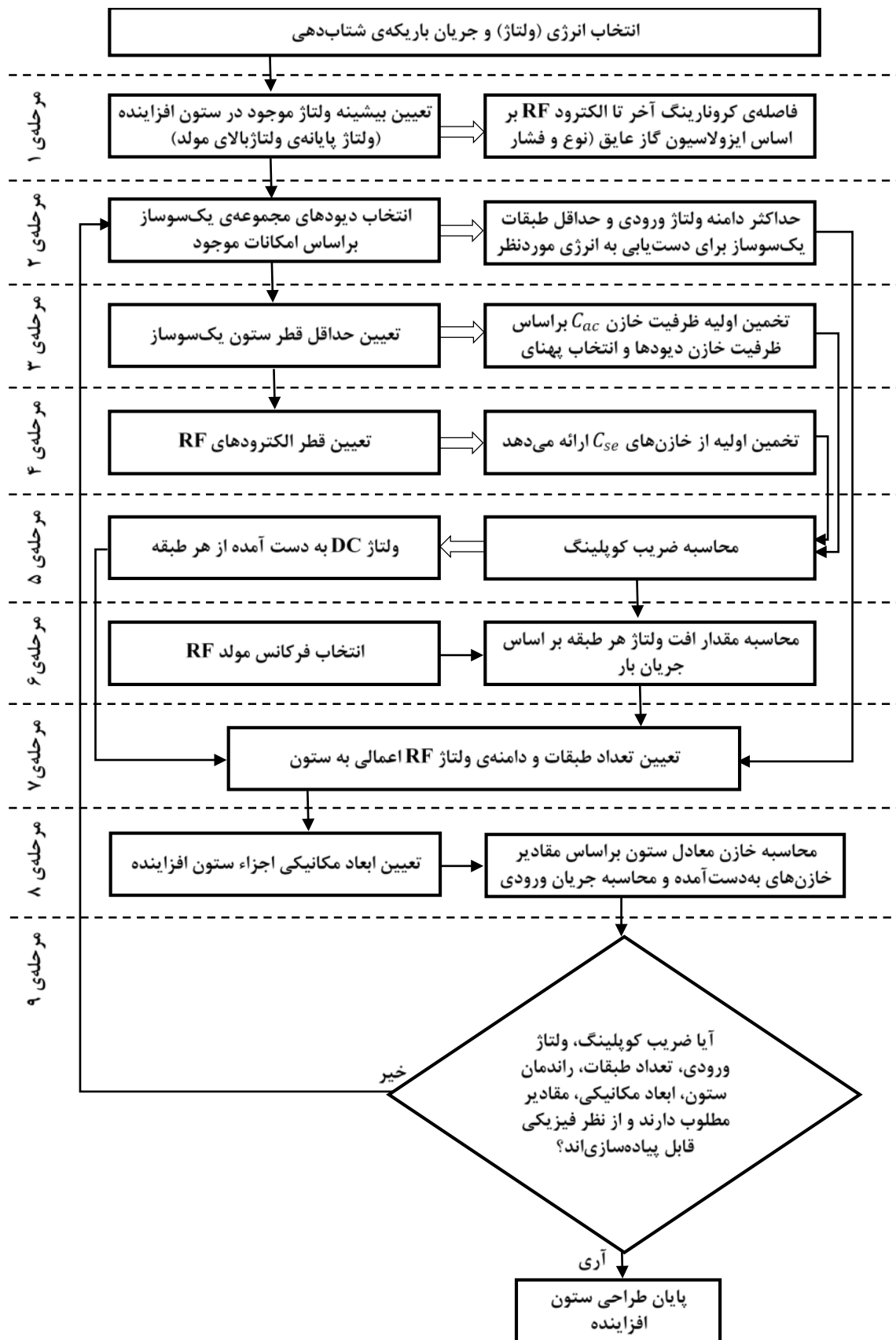
#### ۴. روند طراحی مفهومی ستون افزایشده‌ی ولتاژ

موارد ذکرشده در بخش قبل تعدادی از چالش‌های تصمیم‌گیری در مورد پارامترهای نهایی یک ستون افزایشده‌ی ولتاژ هستند. لزوم یک برنامه و روند مشخص اولاً برای فهم بهتر هم‌بستگی پارامترها و ثانیاً برای رسیدن به مقدار نهایی اندازه‌ها و مقادیر باعث شد تا یک روند برای طراحی مفهومی ستون افزایشده‌ی داینامیترون به دست آید. این روند نتیجه‌ی مطالعه و بررسی دقیق پیوستگی پارامترهای ستون افزایشده‌ی ولتاژ داینامیترون می‌باشد. روند یادشده برای طراحی یک مولد داینامیترون به‌طور عام کاربرد دارد. این رهیافت مرحله‌به‌مرحله برای رسیدن به پارامترهای نهایی در فلوجارت شکل ۷ نمایش داده شده است.

برای شروع مراحل طراحی لازم است در مورد رهیافت‌های یادشده (نوع ترانسفورمر، جانمایی تیوب شتاب‌دهی) انتخاب مناسب صورت گرفته باشد.

طراحی ستون افزایشده‌ی ولتاژ داینامیترون در دو حوزه‌ی مختلف انجام می‌شود: حوزه‌ی اول تحلیل مداری برای بررسی ولتاژ و جریان خروجی و حوزه‌ی دوم تحلیل الکترومغناطیسی برای بررسی ملاحظات ولتاژبالا است. برای بررسی ملاحظات ولتاژبالا، ولتاژ نقاط مختلف ساختار ستون افزایشده باید مشخص باشد. این اطلاعات از نرم‌افزار تحلیل مدار به دست آمده و به





شکل ۷. فلوجارت 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 افزایشدهنده است مشخص می‌شود.

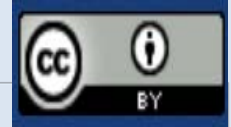
مرحله‌ی بعدی این فرایند طراحی مکانیکی ساختار داده‌شده با توجه به ملاحظات جلوگیری از تخلیه‌ی کرونا، استحکام، قیمت، وزن و ... می‌باشد. بعد از این مرحله تمامی خازن‌های موردنیاز برای تشکیل ستون افزایشدهنده با داشتن هندسه‌ی دقیق الکترودها به دست می‌آید. مشخص بودن این خازن‌ها ما را قادر می‌سازد تا یک مقدار خازن معادل کل برای ستون افزایشدهنده 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، رپیل 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 داینامیترتون در این مقاله معرفی شد. پیچیدگی‌های طراحی ستون افزایشدهنده‌ی ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون و پارامترهای اثر گذار در طراحی بیان و تشریح شد. یک روند برای طراحی ستون افزایشدهنده‌ی ولتاژ یک شتاب‌دهنده از نوع داینامیترتون به دست آمد که برای طراحی مفهومی شتاب‌دهنده‌ی داینامیترتون 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](https://jonsat.nstri.ir/article_1509.html)

