

## طراحی و شبیه‌سازی ترانس RF مربوط به شتاب‌دهنده داینامی‌ترون با سطح انرژی ۸۰۰KeV سعید، آذربرا؛ حسین، خلفی؛ سیدعبدالمهدی، آقایان؛ حمیدرضا، مرادی؛ فرشاد، قاسمی

معاونت توسعه کاربرد پرتوها، شرکت ساخت و توسعه شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آن‌ها

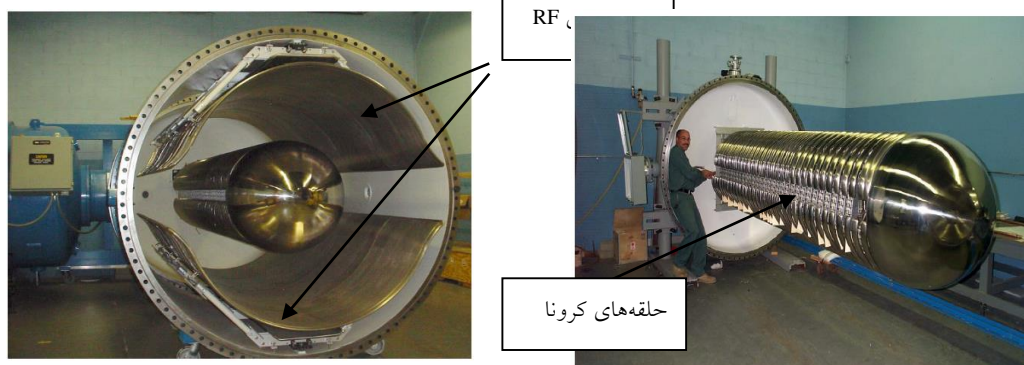
### چکیده

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی ترانس RF شتاب‌دهنده داینامی‌ترون به عنوان یکی از قسمت‌های مهم در طراحی و ساخت این نوع شتاب‌دهنده پرداخته شده است. با در نظر گرفتن شرایط کاری ترانس از جمله فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز، ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و کارکرد مدار در حالت رزونانسی دو مدل ترانس هسته هوا و ترانس هسته فریت پیشنهاد شده و با هم مقایسه شده است.

کلیدواژه: ترانسفورماتور، رزونانسی، داینامی‌ترون، شتاب‌دهنده

### مقدمه

شتاب‌دهنده داینامی‌ترون به عنوان یکی از پرکاربردترین شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک با کاربرد صنعتی (شتاب‌دهی به الکترون) و همچنین کاربرد تحقیقاتی (شتاب‌دهی به یون) شناخته می‌شود. شمای کلی این نوع شتاب‌دهنده در شکل ۱ دیده می‌شود. [۱]



شکل ۱: شمای کلی شتاب‌دهنده داینامی‌ترون.

در راستای طراحی و ساخت شتاب‌دهنده داینامی‌ترون تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحلیل و شبیه‌سازی نحوه عملکرد شتاب‌دهنده داینامی‌ترون، طراحی و شبیه‌سازی کوپلینگ خازنی این شتاب‌دهنده، طراحی و شبیه‌سازی تیوب شتابدهی مناسب و طراحی و شبیه‌سازی مولد RF اشاره کرد. [۲-۵]

از جمله بخش‌های مهم و کلیدی در ساخت این شتاب‌دهنده، ترانس RF آن می‌باشد. استفاده از ترانس در سیستم شتاب‌دهنده داینامی‌ترون، می‌تواند مزیت‌های مختلفی را در پی داشته باشد. اولاً اینکه بخاطر افزایش ولتاژ تغذیه می‌توانیم تعداد طبقات ستون افزایش یافته ولتاژ را کاهش دهیم و ثانیاً وجود ترانس باعث ایجاد ایزولاسیون بین منبع تغذیه و محفظه ولتاژ فشارقوی خواهد شد. که از لحاظ ایمنی سیستم مهم و موثر خواهد بود. از این رو این مقاله به ارائه پیشنهاد روشی در مورد طراحی و ساخت ترانس RF شتاب‌دهنده داینامی‌ترون با سطح انرژی ۸۰۰KeV پرداخته است.



با اعمال ولتاژ ۳ فاز ۳۸۰ ولت ۵۰ هرتز به ورودی مبدل RF، شکل موج سینوسی با فرکانسی در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ کیلو هرتز در خروجی آن تولید می گردد. با استفاده از یک ترانسفورمر افزایش ولتاژ پیدا کرده و به دامنه‌ای در حدود ۱۰۰ کیلوولت می‌رسد.

استفاده از روش‌های متداول طراحی ترانس فشار قوی بدلیل فرکانس کاری این سیستم غیر ممکن می‌باشد زیرا تلفات هسته به شدت افزایش می‌یابد و راندمان سیستم به شدت کاهش می‌یابد. برای این منظور دو روش پیشنهاد می‌گردد. یکی استفاده از ترانس هسته هوا و دیگری استفاده از ترانس هسته فریت، که هر یک از این دو روش را بررسی و مقایسه می‌کنیم.

### ترانس هسته فریت

به طور کلی فریت به آن دسته از مواد مغناطیسی اطلاق می‌شود که جزء اصلی تشکیل دهنده آنها اکسید آهن است و پارامترهای مغناطیسی مطلوبی نظیر ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی، اندوکسیون اشباع و مقاومت ویژه الکتریکی بالا در حدود  $10^{12} \Omega.cm$  از جمله اصلی‌ترین خصیصه‌های آنها به شمار می‌رود. بدین جهت کاربردهای بسیار وسیعی را در زمینه صنایع برق، الکترونیک، مخابرات، کامپیوتر و... به خود اختصاص داده‌اند.

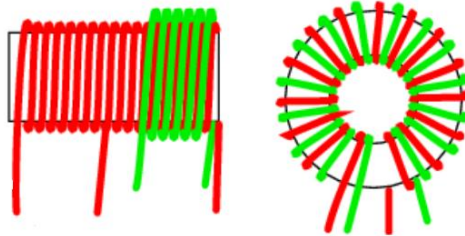
با وجودی که آلیاژهای مغناطیسی و سیستم‌های فلزی، بالاترین ضریب نفوذپذیری مغناطیسی را دارا می‌باشند اما به دلیل مقاومت الکتریکی پایین، امکان استفاده از آنها در فرکانسهای بالاتر از ۱ KHz عملاً میسر نیست و بنابراین امکان استفاده از فریت‌های مغناطیسی سرامیکی از این حیث در محدوده فرکانسی وسیعی وجود دارد. بر این اساس ترکیبات متعددی با ساختارهای کریستالی متفاوت برای کاربردهای مختلف معرفی شده‌اند.

ترانس با هسته فریت بدلیل پارامترهای مغناطیسی مطلوب که در بالا ذکر شد به ویژه مقاومت ویژه الکتریکی بالا و شار نشستی کم، بسیار گزینه مناسبی می‌باشد ولی بدلیل اینکه در ایران تولید کننده این نوع هسته‌ها نیستیم و به دلیل محدودیت‌های موجود، نمی‌توان هسته با کیفیت بالا تهیه کرد. البته هسته فریت قابل استفاده در این ترانس ملاحظات خاص خود را دارد که آن را از هسته‌های فریت متداول موجود در بازار متمایز می‌کند. از جمله آنها می‌توان به توانایی تحمل ولتاژ ۱۰۰ کیلو ولت که بحث عایقی خاص خود را دارد اشاره کرد. در ادامه به بررسی ترانس هسته هوا که می‌تواند جایگزین ترانس‌های هسته فریت شود می‌پردازیم.

### ترانس هسته هوا

ترانس هسته هوا یک ترانس خاص می‌باشد که در مدارهای فرکانس رادیویی معمولاً استفاده می‌شود. همان‌طور که از اسم این ترانس مشخص است ترانس هسته هوا، ترانسی است که سیم پیچ آن دور یک هسته عایق پیچیده می‌شود که معمولاً هسته آن به شکل یک لوله توخالی می‌باشد. ضریب کوپلینگ و القای متقابل بین سیم‌پیچ‌ها در ترانس هسته هوا کمتر از ترانس‌های هسته آهنی می‌باشد. اما ویژگی‌های نامطلوب هسته‌های فرومغناطیسی از جمله تلفات جریان فوکو، هیستریزیس، اشباع ترانس و... به طور کامل در ترانس هسته هوا برطرف می‌شوند.

ترانس هسته هوا می‌تواند به فرم استوانه‌ای یا حلقوی پیچیده شود. نمونه‌ای از ترانس استوانه‌ای و حلقوی یا تروئیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. از مزیت‌های ترانس حلقوی نسبت به ترانس استوانه‌ای می‌توان به شار نشتی کمتر اشاره کرد.

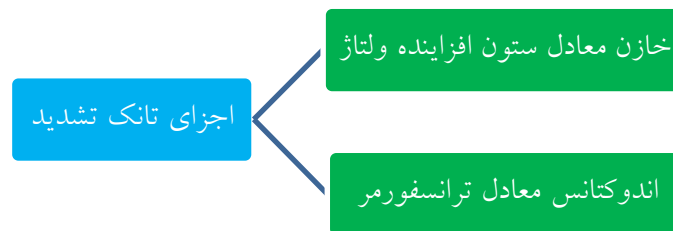


شکل ۲: شمایی از ترانس حلقوی و استوانه‌ای.

کاهش اندوکتانس متقابل در ترانس هسته هوا نسبت به ترانس هسته فریت بدلیل افزایش شار نشتی، از معایب ترانس هسته هوا می‌باشد. با ارائه این مقدمات گزینه پیشنهادی برای ترانس، ترانس هسته هوا می‌باشد که در ادامه به طراحی یک ترانس هسته هوای مناسب می‌پردازیم.

### طراحی ترانس مناسب برای شتاب‌دهنده داینامی‌ترون

از مزیت‌های کارکرد مدار در حالت رزونانس می‌توان به کاهش تلفات کلید زنی، کاهش تداخل رادیویی (RFI)، کاهش تداخل الکترومغناطیس (EMI)، کوچکتر شدن ابعاد مولد RF و افزایش راندمان مولد RF اشاره کرد. در نتیجه فرکانس کلیدزنی و اندوکتانس معادل ترانس که در طراحی باید به آن توجه نمود و خازن معادل ستون شتاب‌دهی به گونه‌ای انتخاب و طراحی می‌شوند که عملکرد مدار در حالت رزونانسی را تضمین کنند. اجزای تشکیل دهنده این تانک تشدید (رزونانسی) در شکل ۳ دیده می‌شوند:



شکل ۳: اجزای تشکیل دهنده تانک تشدید.

فرکانس کلید زنی را حدود ۱۰۰ کیلو هرتز در نظر می‌گیریم. با استفاده از نرم افزار CST مقادیر خازنی  $C_{se}$  و  $C_{ac}$  محاسبه شد که به ترتیب برابر ۸ و ۲ پیکوفاراد می‌باشد. خاصیت خازنی که هر حلقه کرنا با الکترودهای RF تشکیل می‌دهد، خازن کوپلینگ نام دارد و آن را با  $(C_{se})$  نشان می‌دهند. دو حلقه کرنا با هم مخالف هم هستند نیز تشکیل خاصیت خازنی می‌دهند  $(C_{ac})$ . همچنین  $N = 16$  که نشان دهنده تعداد طبقات است طبق روابط محاسبه شد [۳]. با جایگذاری مقدار  $C_{se}$  در رابطه ۱،  $C_a$  بدست می‌آید و با جایگذاری مقدار  $C_{ac}$  در

رابطه ۱ حاصل جمع  $C_c$ ،  $C_d$  و  $C_e$  محاسبه می‌شود. مقدار خازن  $C_g$  و  $C_f$  به ترتیب برابر  $۱/۵$  و  $۰/۵$  پیکو فاراد بدست آمد. در نهایت مقدار خازن معادل تانک،  $C_T$ ، از رابطه ۲ بدست می‌آید. [۶]

$$C_{se} = \left(\frac{2}{N}\right)C_a \quad (1)$$

$$C_{ac} = \left(\frac{C_c + C_d + C_e}{2N}\right)$$

$$C_T = \frac{1}{2} \left[ C_f + C_g + \frac{C_a(C_c + C_d + C_e)}{C_a + C_c + C_d + C_e} \right] \quad (2)$$

که  $C_a$  خازن معادل بین الکتروود RF و حلقه کرونا،  $C_b$  خازن معادل بین حلقه کرونا و سایر قسمتهای زمین شده در محفظه که مجموع خازنهای  $C_c$ ،  $C_d$  و  $C_e$  می‌باشد.  $C_c$  خازن مربوط به حلقه کرونا و تیوب باریکه،  $C_d$  خازن مربوط به حلقه کرونا و صفحه زمین شده RF،  $C_e$  خازن مربوط به حلقه کرونا های روبروی هم می‌باشند.

$C_f$  ظرفیت خازنی بین الکتروود RF و سطح تانک شتابدهنده،  $C_g$  خازن بین الکتروود RF و لبه های مخزن می‌باشند. با جایگذاری مقادیر بدست آمده از بالا مقدار خازن  $C_T$  برابر  $۱۷/۵$  پیکو فاراد محاسبه شد. خازن معادل تانک و سلف معادل ترانس تشکیل مدار تشدید می‌دهند که مقدار سلف معادل ترانس برای اینکه سیستم به رزونانس برود باید طوری طراحی شود که برابر مقدار  $L$  بدست آمده از رابطه ۳ باشد.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

با جایگذاری مقدار  $C=۱۷/۵$  پیکو فاراد و  $f=۱۰۰$  کیلوهرتز در رابطه بالا مقدار  $L$  برابر با  $۱۴۵$  میلی هانری بدست می‌آید.

روش طراحی ترانس:

روش‌های مختلفی برای طراحی ترانس وجود دارد که در این مقاله از یکی از روشهای معتبر طراحی ترانس سوئیچینگ استفاده کرده‌ایم. نرم افزارهای مختلفی برای طراحی ترانس وجود دارد که می‌تواند در تعیین پارامترهای اولیه ترانس به ما کمک کند ولی به تنهایی نمی‌توانند برای طراحی ترانس کافی باشند. یکی از نرم افزارهای کاربردی در زمینه طراحی ترانس، نرم افزار Magnetic Designer می‌باشد که با داشتن پارامترهای اولیه ترانس اعم از جنس و نوع هسته، مقدار ولتاژ، جریان، فرکانس نامی و ... می‌توان مشخصات کلی ترانس مورد نظر را استخراج کرد. [۷]

گام اول: اولین مرحله در طراحی ترانس تعیین پارامترهای الکتریکی و شرایط کاری ترانس می‌باشد. این پارامترها عبارتند از: ولتاژ اولیه و ثانویه ترانس، فرکانس نامی، فرکانس سوئیچینگ ترانس، بیشینه تلفات، بیشینه دمای قابل تحمل ترانس و روش خنک کاری آن.

مشخصات مربوط به ترانس مطلوب در جدول ۱ آورده شده است.

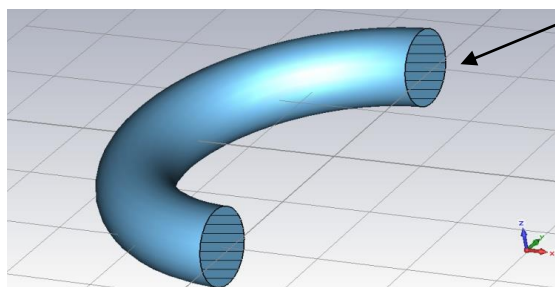
جدول ۱: مشخصات ترانس موردنظر

$V_p$ ولتاژ اولیه (kV)	۱۰
$V_s$ ولتاژ ثانویه (kV)	۱۰۰
توان نامی (kW)	۲۰
فرکانس سوئیچینگ (kHz)	۱۰۰
فرکانس نامی ترانس (kHz)	۱۰۰
بیشینه تلفات ترانس (W)	۲۰۰
بسیه دمای قابل تحمّل ( $^{\circ}C$ )	۱۰۰
روش خنک کاری	گاز $SF_6$

گام دوم: محاسبه نسبت دور با استفاده از نسبت ولتاژ اولیه و ثانویه ترانس، که در رابطه ۴ بدست آمده است.

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_s}{V_p} = \frac{100 \times 10^3}{10000} = 10 \quad (4)$$

که  $N_s$  تعداد دور سیم پیچ ثانویه و  $N_p$  تعداد دور سیم پیچ اولیه می‌باشد. گام سوم: تعیین جنس و نوع هسته: در تعیین جنس و طراحی هسته فاکتورهای گوناگونی تاثیرگذارند که از آن جمله می‌توان به توپولوژی مدار استفاده شده (که در حالت عادی کار می‌کند یا رزونانسی)، فرکانس عملکرد مدار، مقادیر توان، ولتاژ ورودی و خروجی ترانس، افزایش دمای مجاز و حجم و اندازه ترانس اشاره کرد. هسته پیشنهادی با توجه به شرایط کاری، از نوع حلقوی و از جنس هسته هوا می‌باشد. گام چهارم: تعیین مشخصات هندسی هسته اعم از طول متوسط هسته ( $l_c$ ) سطح مقطع ( $A_c$ ) و حجم هسته ( $V_c$ ) می‌باشد که با استفاده از نرم افزار **Magnetic Designer** و با در نظر گرفتن مشخصات جدول ۱، مقادیر این کمیت‌ها محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است.



سطح مقطع ( $A_c$ )

جدول ۲: مشخصات ابعاد هسته ترانس

$A_c (m^2)$	۰/۱۲۶
$V_c (m^3)$	۰/۷۸۹
$l_c (m)$	۶/۲۸

شکل ۴: نمایی از برش عرضی هسته ترانس

در شکل ۴ نمایی از برش عرضی ترانس نشان داده شده است.

گام پنجم: محاسبه تعداد دور ثانویه ترانس با استفاده از قانون فارادی: تعداد دور ثانویه ترانس ( $N_s$ ) از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$N_s = \frac{V_o}{B \times A \times f} \quad (5)$$

که  $V_o$  ولتاژ ثانویه ترانس،  $B$  چگالی شار مغناطیسی که با استفاده از نرم افزار **Magnetic Designer** بدست می‌آید،  $f$  فرکانس نامی ترانس و  $A$  سطح مقطع ترانس می‌باشند. با جایگذاری مقادیر در رابطه ۵ مقدار  $N_s = 2500$  محاسبه شد.

گام ششم: محاسبه تعداد دور اولیه ترانس: تعداد دور اولیه ترانس با استفاده از رابطه ۴ و باتوجه به مقادیر ولتاژ در جدول ۱ بدست می‌آید.

گام هفتم: تعیین ساختار سیم پیچی

ساختار سیم پیچی بایستی طوری انتخاب گردد که ترانس مورد نظر کمترین تلفات اهمی و بیشترین ضریب کویلینگ را داشته باشد. از آنجاییکه هسته ترانس از نوع حلقوی می باشد به همین دلیل برای بازدهی بیشتر ترانس، از سیم پیچی روی هم استفاده می کنیم بدین ترتیب که سیم پیچ فشار ضعیف را ابتدا روی هسته پیچیده و از روی آن سیم پیچ فشار قوی را می پیچیم. نکته قابل توجه این است که با توجه به اختلاف ولتاژ بالای بین سیم پیچ اولیه و ثانویه، در این نوع سیم پیچی بایستی جنبه عایقی بوبین ها را در نظر گرفته تا منجر به ایجاد شکست عایقی و اتصال کوتاه نگردد. [۷]

گام هشتم: محاسبه تلفات اهمی سیم پیچی اولیه و ثانویه:

در فرکانسهای بالا اثر پوستی منجر به عبور جریان از سطح داخلی سیم می شود. از اینرو سطح مقطع موثر سیم کم شده و به تبع آن تلفات سیم پیچ افزایش می یابد. از اینرو با انتخاب یک سیم مناسب می توان میزان این تلفات را کاهش داد.

سیم پیشنهادی در این طراحی از نوع **Litz**، ۱۰۰ سیمه و با مقاومت ویژه  $\frac{m\Omega}{cm}$  ۰/۵۴ بوده و با توجه به میزان جریان عبوری از دو سیم پیچ می توان قطر آنها را از روی جدول استاندارد محاسبه کرد. مقاومت **dc** و **ac** هر یک از سیم پیچی ها از رابطه ۶ بدست می آید:

$$R_{dc} = \rho.MLT.N \quad (6)$$

$$R_{ac} = 0.6R_{dc}$$

که  $\rho$  مقاومت ویژه سیم، **MLT** طول متوسط یک دور از سیم پیچ و **N** تعداد دور سیم پیچ می باشد. در نتیجه میزان تلفات اهمی هر یک از سیم پیچی ها از رابطه ۷ بدست می آید:

$$P_{dc} = R_{dc}.I_{dc}^2 \quad (7)$$

$$P_{ac} = R_{ac}.I_{ac}^2$$

کل تلفات اهمی ترانس از مجموع تلفات **ac** و **dc** بدست می آید:

$$P_{ohmic} = P_{dc} + P_{ac} \quad (7)$$

با توجه به مراحل طراحی ترانس که در بالا ذکر شد، مشخصات ترانس مطلوب را با استفاده از نرم افزار **Magnetic Designer** و محاسبات مربوط، بدست آوردیم. مشخصات کلی ترانس نهایی در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار اندوکتانس ترانس با مقدار اندوکتانس مطلوب جهت ایجاد رزونانس در مدار شتابدهنده همخوانی دارد. همچنین مقدار تلفات اهمی ترانس از مقدار بیشینه مجاز آن (جدول ۱) کمتر می باشد.

جدول ۳: مشخصات الکتریکی ترانس طراحی شده

قطر سیم اولیه (mm)	۰/۸۱
قطر سیم ثانویه (mm)	۰/۲۲
تعداد دور اولیه $N_p$	۲۲۵
تعداد دور ثانویه $N_s$	۲۲۵۰
تلفات اهمی سیم پیچ اولیه (W)	۸/۱۹



تلفات اهمی سیم پیچ ثانویه (W)	۱۶/۲۸
$R_{dc}$ مقاومت سیم پیچ اولیه ( $\Omega$ )	۲/۰۴
$R_{dc}$ مقاومت سیم پیچ ثانویه ( $\Omega$ )	۴۰۷
اندوکتانس مغناطیس کننده ترانس (mH)	۱۴۵
$B_{max}$ چگالی شار مغناطیسی (T)	۰/۰۵

### نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی ترانس RF شتاب دهنده داینامیترون به عنوان یکی از قسمت‌های مهم در طراحی و ساخت این نوع شتاب دهنده پرداخته شد. با در نظر گرفتن شرایط کاری ترانس از جمله فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز، ولتاژ ۱۰۰ کیلو ولت و کارکرد مدار در حالت رزونانسی، دو مدل ترانس هسته هوا و ترانس هسته فریت بررسی شد. ترانس پیشنهادی در این طراحی ترانس هسته هوای حلقوی می باشد که پارامترهای این ترانس با توجه به روابط موجود وبا استفاده از نرم افزارهای CST و Magnetic Designer محاسبه شد.

### مرجع ها

۱. Hellborg, R., *Electrostatic accelerators: fundamentals and applications*. ۲۰۰۵: Springer.
۲. مرادی حمید رضا، "انتخاب و شبیه سازی مولد ولتاژ بالای مناسب برای شتابدهنده ی تاندم ۴ مگا الکترون ولت"، نوزدهمین کنفرانس هسته ای ایران، اسفند ۱۳۹۱.
۳. مرادی، حمیدرضا، "طراحی و شبیه سازی کوپلینگ خازنی ستون افزایشده ولتاژ ۸۰۰ کیلو ولتی در مولد شتاب دهنده داینامیترون با نرم افزار CST"، اولین کنفرانس ملی شتاب دهنده ها و کاربرد آنها، ۶ و ۷ آذرماه ۱۳۹۲-تهران.
۴. آقایان سید عبدالمهدی، "طراحی و شبیه سازی تیوب شتابدهنده صنعتی الکترواستاتیک با انرژی ۸۰۰ keV"، اولین کنفرانس ملی شتابدهنده ها و کاربرد آنها، ۶ و ۷ آذرماه ۱۳۹۲-تهران.
۵. قاسمی فرشاد، "طراحی و شبیه سازی مولد RF مربوط به شتاب دهنده داینامیترون با سطح انرژی ۸۰۰ KeV"، اولین کنفرانس ملی شتابدهنده ها و کاربرد آنها، ۶ و ۷ آذرماه ۱۳۹۲-تهران.
۶. Thompson, C. and M. Cleland, *Design Equations for Dynamitron Type Power Supplies in the Megavolt Range*. Nuclear Science, IEEE Transactions on, ۱۹۶۹. ۱۶(۳): p. ۱۲۴-۱۲۹.
۷. Pressman, A., *Switching power supply design*. ۱۹۹۷: McGraw-Hill, Inc.