

## روشی نوین برای بهبود کارایی لامپ تریود بازتابی در مد غالب

سید محمدجواد رضوی<sup>۱\*</sup>، نادر شفیعی خواه<sup>۲</sup>، سید محسن رضوی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۳- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۶/۰۷/۱۵، پذیرش: ۹۷/۰۲/۰۴)

### چکیده

لامپ تریود بازتابی یکی از انواع ویرکیتورها از خانواده لامپ‌های ماکروویو توان بالا است. از جمله کاربردهای دفاعی این لامپ‌ها اختلال در عملکرد سامانه‌های دشمن از طریق ایجاد یک میدان الکترومغناطیسی شدید روی هدف است. یکی از عوامل کاهش بازده این لامپ‌ها توزیع توان در مدهای غیر غالب است (مد غالب TE<sub>11</sub> است)، مسئله مورد اهمیت دیگر توان نسبی مؤلفه فرکانسی اصلی است، در این مقاله نشان داده شد که با قرار دادن دو صفحه فلزی در ابتدا و انتهای محور آند و کاتد توان نسبی در مد غالب و فرکانس اصلی به صورت هم‌زمان بهبود می‌یابد. نتایج بیانگر افزایش توزیع توان حدود ۱۲ درصدی در مد غالب و ۲۶ درصدی در فرکانس اصلی (۱٫۶ گیگاهرتز) است.

**کلیدواژه‌ها:** تریود بازتابی، ویرکیتور، مد غالب، لامپ‌های ماکروویو

## A Novel Method for Improving the Efficiency of a Reflex Triode Tube in a Dominant Mode

S. M. J. Razavi\*, N. Shafieikhah, S. M. Razavi

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 07/10/2017; Accepted: 24/04/2018)

### Abstract

*The vircator is one among several types of high power microwave sources. The reflex triode is one of the varieties of vircators. One of the defensive application of these tubes is the disruption of enemy systems by creating a strong electromagnetic field on the target. One of the factors that reduces the efficiency of these tubes is the distribution of power in non-dominant modes (dominant mode is TE<sub>11</sub>), the important issue is the relative power of the main frequency component, in this paper we first show that by placing two metal plates at the beginning and end of the axis of the anode and the cathode, we can simultaneously improve the relative power of the dominant mode and the main frequency. Distributed power in the dominant mode and the main frequency increased by 12% and 26%, respectively.*

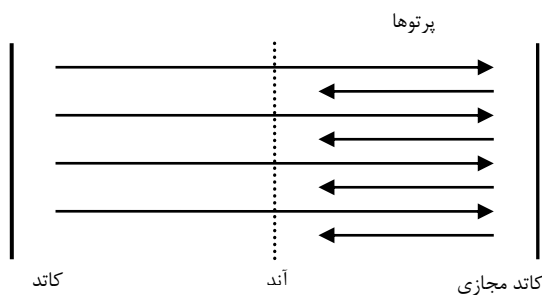
**Keywords:** Reflex Triode, Vircator, Dominant Mode, Microwave Tubes

\* Corresponding Author E-mail: razavismj@mut.ac.ir

## ۱. مقدمه

بازتابی به دلیل داشتن بازدهی بهتر، ابعاد کوچک‌تر، استخراج توان ماکروویو بهتر، دارای هندسه ساده‌تر که باعث سادگی در ساخت می‌شود نسبت به سایرین مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است [۴]. علی‌رغم همه این مزیت‌ها، این لامپ‌ها دارای بازدهی پایین هستند. به صورت معمول بازده این لامپ‌ها کمتر از چند درصد بیان شده است [۶].

قاعده کلی تولید موج ماکروویو توسط نوسان‌ساز با کاتد مجازی در شکل (۱) نشان داده شده است. اگر بین صفحات آند و کاتد یک پالس ولتاژ قوی اعمال کنیم، یک پرتو الکترونی در شکاف دیود سرعت می‌گیرد. پرتو الکترونی از داخل آند عبور می‌کند و به محدوده سمت دیگر آند تزریق می‌شود. چنانچه جریان پرتو تزریقی از جریان محدودیت بار فضایی<sup>۱۵</sup> این محیط بیشتر باشد، کاتد مجازی در مکان خاصی شکل می‌گیرد و مقدار قابل‌توجهی از پرتو الکترونی را منعکس می‌کند. رابطه کلی جریان محدودیت بار فضایی  $I_{SCL}$  برای محیطی که پرتو الکترونی در آن حرکت می‌کند به صورت رابطه (۱) است [۲]:



شکل ۱. مفهوم نوسان کاتد مجازی

$$I_{SCL} (KA) = \frac{8.5}{G} \left( \gamma_0^{\frac{2}{3}} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

که  $\gamma_0$  همان فاکتور نسبیست است و با ولتاژ آند-کاتد در

دیود ( $V_0$ ) به صورت زیر رابطه دارد:

$$\gamma_0 = 1 + \frac{eV_0}{mc^2} = 1 + \frac{V_0 (KV)}{511} \quad (2)$$

و  $G$  به هندسه وابسته است،  $m$  و  $e$  نیز به ترتیب جرم و بار الکترون هستند. مکان تشکیل کاتد مجازی در حدود فاصله آند-کاتد دورتر از آند قرار دارد. با تشکیل کاتد مجازی دو اتفاق به طور هم‌زمان رخ می‌دهد [۲]:

۱- مکان کاتد مجازی به عقب و جلو نوسان می‌کند که فرکانس این نوسان در حدود فرکانس پلاسما  $\omega_p$  است.

۲- برخی از الکترون‌ها از درون کاتد مجازی عبور کرده و دور

گسترش روزافزون سیستم‌های الکترونیکی در حوزه‌های نظامی، غیرنظامی و تجاری باعث شده است که بسیاری از زیرساخت‌ها و ساختارها وابستگی بسیار زیادی به مدارات الکترونیکی داشته باشند [۱]. در پی این وابستگی فناوری، تهاجم به مدارات الکترونیکی در برنامه‌های نظامی و راهبردی قرار گرفته است و امواج الکترومغناطیسی پر قدرت می‌توانند تجهیزات فوق‌را دچار اختلال موقت یا دائمی کنند [۱].

لامپ‌های ماکروویو توان بالا به دلیل دارا بودن توان زیاد سیاست در حد چند صد مگاوات و نیز برخی مشخصه‌های بارز فرکانسی از اهمیت بالایی برخوردارند. برخی از این لامپ‌ها عبارتند از مگنترون نسبیتی<sup>۱</sup>، کلاپسترون نسبیتی<sup>۲</sup>، نوسانگر عایق ساز مغناطیسی<sup>۳</sup>، نوسانگرهای موج برگشتی<sup>۴</sup>، ویرکتور<sup>۵</sup>، ژیراترون<sup>۶</sup> و لیزرهای الکترون آزاد<sup>۷</sup> [۲]. این لامپ‌ها کاربردهای زیادی در صنعت و سامانه‌های نظامی نظیر فرستنده‌های پر قدرت، رادارهای توان بالا، کوره‌های پلاسمایی، شتاب‌دهنده‌ها، انتقال توان در کاربردهای فضایی (انتقال توان از زمین به فضا و برعکس) و... دارند [۲]. نوسان‌سازهای کاتد مجازی<sup>۸</sup> که به نام ویرکتور نیز خوانده می‌شوند به نسلی از لامپ‌های ماکروویو توان بالا گفته می‌شود که قادرند پالس‌های ماکروویوی در سطح توان ده‌ها مگاوات و بیشتر و محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۲۰ گیگاهرتز تولید کنند [۳ و ۴]. عملکرد آن‌ها بر این پایه استوار است که با تزریق جریان درون یک موج‌بر یا محفظه تشدید پدیده‌ای به نام کاتد مجازی شکل می‌گیرد که دارای شرایط ناپایدار است. نوسان‌سازهای کاتد مجازی از این ویژگی ناپایداری استفاده کرده و انرژی پرتو الکترونی را به انرژی ماکروویو تبدیل می‌کنند. ویرکتورها به دلیل توان خروجی بالا و عدم نیاز به میدان مغناطیسی خارجی دارای اهمیت‌اند [۴]. اعضای خانواده این دسته از نوسان‌سازها عبارت‌اند از: ویرکتور محوری<sup>۹</sup>، تراپود بازتابی<sup>۱۰</sup>، ردیترون<sup>۱۱</sup>، ویرکتور هم‌محور<sup>۱۲</sup> و ویرکتور فیدبکی<sup>۱۳</sup> که با نام اختصاری ویرتود<sup>۱۴</sup> نیز شناخته می‌شود [۲]. لامپ تراپود

<sup>1</sup> Relativistic Magnetrons

<sup>2</sup> Relativistic Klystrons

<sup>3</sup> Magnetically Insulated Line Oscillator (Milo)

<sup>4</sup> Backward Wave Oscillator

<sup>5</sup> Vircators

<sup>6</sup> Gyrotrons

<sup>7</sup> Free-Electron Lasers

<sup>8</sup> Virtual Cathode Oscillator

<sup>9</sup> Axial Vircator

<sup>10</sup> Reflex-Triode

<sup>11</sup> Reditron

<sup>12</sup> Coaxial Vircator

<sup>13</sup> Feedback Vircator

<sup>14</sup> Virtode

کرده‌اند که کاتد مجازی درون یک محفظه تشدید قرار می‌گیرد و با تنظیم فرکانس رزونانس این محفظه تشدید می‌توان پهنای باند تشعشی و مدهای خروجی را کنترل کرد [۷]. جمعی از محققین کره‌ای نیز توانسته‌اند با قرار دادن رفلکتورهای حلقوی بازدهی لامپ ویرکتور هم‌محور را افزایش دهند که استفاده از این رینگ‌ها باعث تغییرات در مدهای خروجی نیز شده است [۸]. در لامپ‌های ویرکتور محوری نشان داده شده است که با استفاده از چندین آند می‌توان به توان خروجی بیشتری دست یافت و مد غالب خروجی را تغییر داد [۹]. محققین دانشگاه تگزاس تک<sup>۳</sup> با جاروب مکان یک بازتابنده، بازده لامپ ترایود را تا ۱۱ درصد افزایش داده‌اند [۱۰].

یکی از مشکلات لامپ‌های ترایود بازتابی مدهای زیاد سیگنال خروجی است درحالی‌که مطلوب این است که انرژی سیگنال خروجی در یک مد توزیع شده باشد. از طرف دیگر سیگنال خروجی لامپ‌های ویرکتور دارای طیف وسیع فرکانسی است و یکی از مسائل مورد اهمیت نسبت توان توزیع‌شده در فرکانس اصلی به توان توزیع‌شده در فرکانس‌های دیگر است. در لامپ ترایود بازتابی همواره فرکانس اصلی ناشی از نوسان کاتد مجازی است که رابطه تقریبی آن به صورت زیر است [۱۱]:

$$f_{osc} = 0.265 \times \sqrt{\frac{e \times V_{gap}}{m \times d^3}} \quad (3)$$

که در آن،  $e$  و  $m$  به ترتیب بار و جرم الکترون هستند،  $d$  فاصله آند - کاتد و  $V_{gap}$  ولتاژ قرار گرفته دو سر آند - کاتد است.

در ادامه نشان داده شد که با قرار دادن دو صفحه فلزی در ابتدا و انتهای محور آند و کاتد می‌توان به صورت هم‌زمان هم مدهای خروجی را کنترل کرد و هم توان توزیع‌شده در فرکانس اصلی را افزایش داد.

### ۳. شبیه‌سازی ترایود بازتابی

شبیه‌سازی، برای لامپی با مشخصات جدول (۱) انجام شده است.

جدول ۱. مشخصات لامپ

دامنه ولتاژ سیگنال اعمالی	۲۰۰ کیلوولت
فاصله آند و کاتد	۲۸ میلی‌متر
شعاع محفظه لامپ	۸۹ میلی‌متر
شعاع کاتد	۴۰ میلی‌متر

با قرار دادن یک پرآب میدان الکتریکی در فاصله ۲ متری از دهانه خروجی لامپ، موج میدان الکتریکی به صورت شکل (۲) به دست می‌آید.

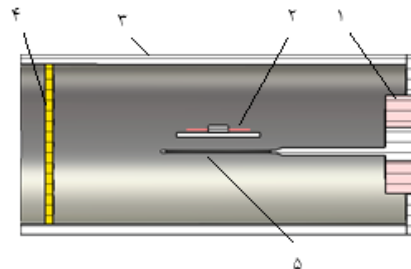
می‌شوند، اما مقدار دیگری از آن‌ها به سمت کاتد حقیقی برمی‌گردند و وقتی که نزدیک کاتد شدند به خاطر پتانسیل بازدارنده کاتد مجدداً به سمت کاتد مجازی برمی‌گردند، در این میان الکترون‌ها دچار یک حرکت نوسانی شده‌اند که به نام نوسان انعکاس شناخته می‌شود. اگر بتوانیم مشخصات لامپ را طوری تنظیم کنیم که نوسان کاتد مجازی و نوسان انعکاس الکترون‌ها در یک فرکانس تشعشع کنند عملکرد لامپ بهینه خواهد شد.

برای تحلیل و شبیه‌سازی‌ها در این مقاله از بخش PIC نرم‌افزار CST استفاده شده است که این کد ذرات باردار را نیز در محاسبات خود وارد می‌کند و به برهمکنش الکترون‌ها و میدان‌های الکترومغناطیسی می‌پردازد.

در این مقاله ابتدا مختصری از معرفی لامپ ترایود بازتابی می‌آید سپس یک ایده برای بهبود مشخصه‌های مد و فرکانس لامپ ترایود بازتابی ارائه شده است و با شبیه‌سازی به اثبات رسیده است.

### ۲. ترایود بازتابی

لامپ ترایود بازتابی دارای بخش‌های گوناگونی مانند کاتد، آند، محفظه رزونانسی و پنجره خروجی است که در این تحقیق مورد بررسی و شبیه‌سازی با استفاده از کد ذره در سلول<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد. شماتیک لامپ ترایود بازتابی را در شکل (۲) می‌بینید:



۱. عایق خلأ ۲. کاتد ۳. محفظه لامپ ۴. پنجره موجبری ۵. آند

شکل ۲. شماتیک لامپ ترایود بازتابی

پارامترهای زیادی بر عملکرد این لامپ مؤثرند که از آن جمله می‌توان از مشخصات پالس ولتاژی، فاصله آند-کاتد، شفافیت آند و جنس کاتد نام برد.

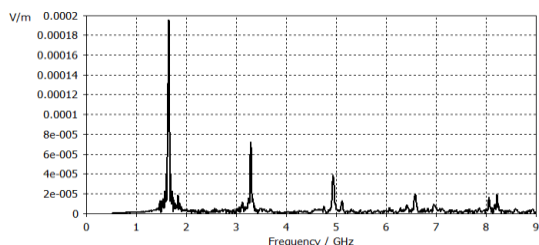
تا به حال دلیل محکمی برای پایین بودن بازده این لامپ‌ها ارائه نشده است، اما یکی از علل بازدهی پایین توزیع توان در مدهای زیاد و همچنین طیف فرکانسی خروجی وسیع است. محققان زیادی در سراسر جهان در دو دهه اخیر بر روی افزایش بازده نوسان‌ساز با کاتد مجازی تمرکز کرده‌اند. برخی از محققین برای لامپ‌های ویرکتور محوری<sup>۲</sup> ساختار جدیدی پیشنهاد

<sup>3</sup> Texas Tech University

<sup>1</sup> Particle-In-Cell

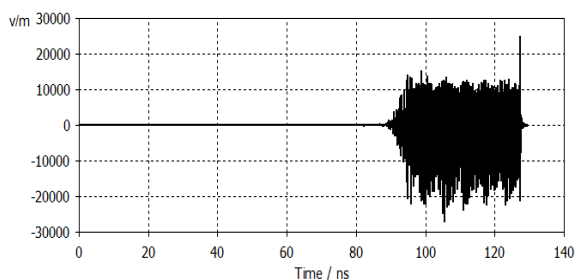
<sup>2</sup> Axial Vircator

پس از اصلاح لامپ دامنه میدانی الکتریکی پرآب نزدیک چهار برابر شد (۳/۹۸ برابر) که این امر باعث افزایش چشمگیر بازدهی لامپ دوم می‌شود. طیف فرکانسی خروجی لامپ دوم به صورت شکل (۷) به دست می‌آید.



شکل ۷. طیف فرکانس سیگنال خروجی لامپ دوم

با مقایسه FFT های خروجی مشاهده می‌شود که طیف سیگنال خروجی لامپ دوم تمیزتر است، همچنین در لامپ دوم نسبت دامنه فرکانس اصلی به دامنه سایر مؤلفه‌های فرکانسی افزایش یافته است. ضخامت صفحات فلزی پارامتری تعیین کننده بر بیشینه توان خروجی است، مطابق شکل (۸) با تغییر ضخامت این صفحات از ۱۶ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر دامنه میدانی الکتریکی پرآب ۲۶٫۶ درصد کاهش می‌یابد.



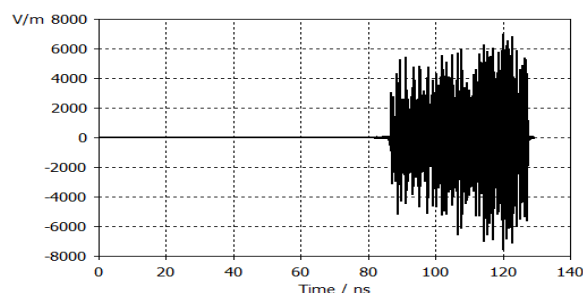
شکل ۸. سیگنال خروجی لامپ دوم با قرار دادن صفحات فلزی با ضخامت ۱۲ میلی‌متر

تأثیر تغییر ضخامت صفحات فلزی بر میدانی الکتریکی اندازه‌گیری شده توسط پرآب در شبیه‌سازی در جدول (۲) مشاهده می‌شود.

جدول ۲. تأثیر تغییر ضخامت صفحات فلزی

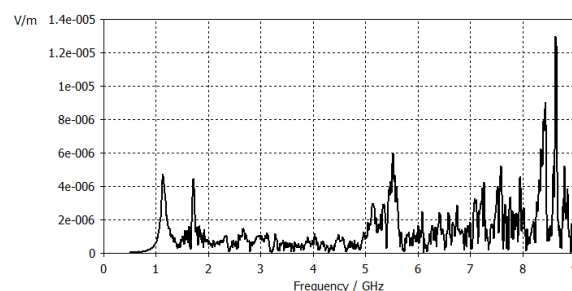
ضخامت صفحات فلزی (میلی‌متر)	دامنه میدانی الکتریکی اندازه‌گیری شده (kv/m)
۱۲	۱۱
۱۶	۱۵
۲۰	۱۰

تأثیر قرار دادن صفحه فلزی با ضخامت ۱۶ میلی‌متر بر توزیع توان در فرکانس اصلی و مد غالب در شکل‌های (۹) و (۱۰) بررسی شده است، همان‌طور که مشخص است استفاده از صفحه فلزی موجب افزایش ۲۶ درصدی توزیع توان در فرکانس اصلی شده است.



شکل ۳. سیگنال خروجی لامپ اول

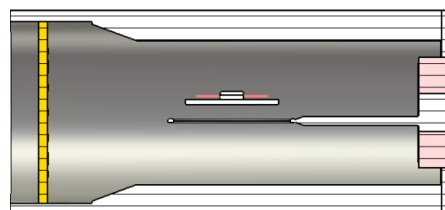
با گرفتن FFT از این شکل موج، طیف فرکانسی به شکل (۴) حاصل می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت طیف سیگنال خروجی دارای مؤلفه‌های فرکانسی زیادی است.



شکل ۴. طیف فرکانسی سیگنال خروجی لامپ اول

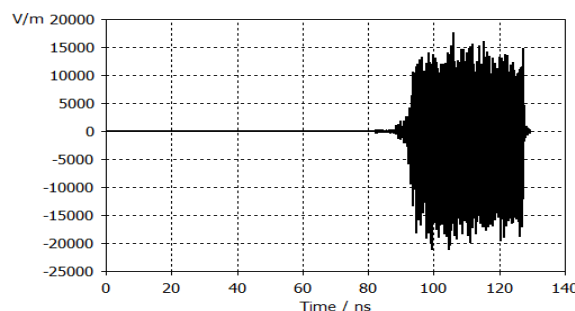
### ۳-۱. شبیه‌سازی ساختار اصلاح شده

ساختار لامپ اول با اضافه کردن دو صفحه هادی با ضخامت ۱۶ میلی‌متر اصلاح شد. این دو قطعه فلزی می‌توانند بعد از ساخته شدن لامپ اول به آن اضافه گردند. شماتیک لامپ را در حالتی که دو صفحه فلزی در بالا و پایین محور آند و کاتد قرار گرفته است را در شکل (۵) مشاهده می‌شود.



شکل ۵. شماتیک لامپ دوم

سیگنال دریافتی پرآب به صورت شکل (۶) است.



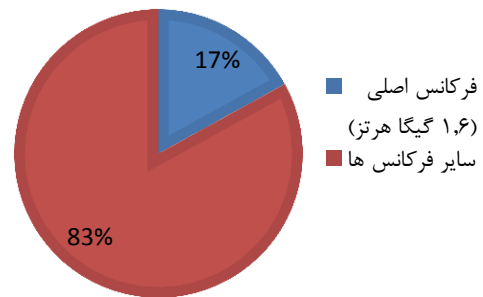
شکل ۶. سیگنال خروجی لامپ دوم (ضخامت صفحات فلزی ۱۶ میلی‌متر است)

#### ۴. نتیجه گیری

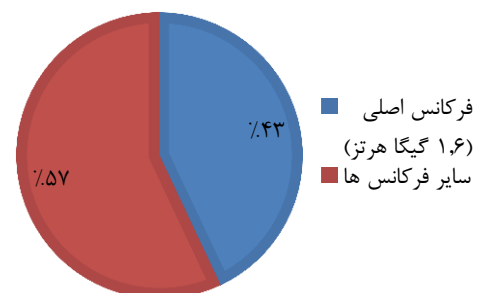
یک لامپ ترایود بازتابی در حالتی که از دو صفحه فلزی در ابتدا و انتهای محور آند و کاتد استفاده شده است، شبیه سازی شد. نشان داده شد که استفاده از این صفحات فلزی موجب خالص سازی مد و فرکانس خروجی می شود به طوری که توزیع توان در مد غالب حدود ۱۲ درصد و در فرکانس اصلی ۲۶ درصد افزایش یافت. در واقع اصلاح ساختار اولیه لامپ موجب عملکرد مناسب تر لامپ شد.

#### ۵. مرجع ها

- [1] Mardani Shahrehabak, M.; Kamyab Sharif, M. "Construction of Conductivity Concrete as Modern Material in Electromagnetic Shielding"; *Advanced Defence Sci. & Technol.* 2014, 5, 211-217 (in Persian).
- [2] Benford, J.; Swegle, J. A.; Schamiloglu, E. "High power microwaves"; CRC Press, 2015.
- [3] Benford, J.; Price, D.; Sze, H.; Bromley, D. "Interaction of a Vircator Microwave Generator with an Enclosing Resonant Cavity"; *J. Appl. Phys.* 1987, 61, 2098-2100.
- [4] Santos, A. L.; Araujo Filho, B. S.; Barroso, J. J.; Maciel, H. S. "Microwave Generation by a Virtual Cathode Enclosed in a Circular Cavity Placed Transversally in a Cylindrical Waveguide"; *IEEE Int. Vac. Elect. C.* 2008, 368-369.
- [5] Roy, A.; Menon, R.; Sharma, V.; Patel, A.; Sharma, A.; Chakravarthy, D. "Features of 200 kV, 300 ns Reflex Triode Vircator Operation for Different Explosive Emission Cathodes"; *Laser Part. Beams* 2013, 31, 45-54.
- [6] Baryshevsky, V.; Gurinovich, A.; Gurnevich, E.; Molchanov, P. "Experimental Study of a Triode Reflex Geometry Vircator"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2017, 45, 631-635.
- [7] Moller, C.; Elfsberg, M.; Larsson, A.; Nyholm, S. E. "Experimental Studies of the Influence of a Resonance Cavity in an Axial Vircator"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010, 38, 1318-1324.
- [8] Jeon, W.; Sung, K. Y.; Lim, J. E.; Song, K. B.; Seo, Y.; Choi, E. H. "A Diode Design Study of the Virtual Cathode Oscillator with a Ring Type Reflector"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2005, 33, 2011-2016.
- [9] Champeaux, S.; Gouard, P.; Cousin, R.; Larour, J. "3-D PIC Numerical Investigations of a Novel Concept of Multistage Axial Vircator for Enhanced Microwave Generation"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015, 43, 3841-3855.
- [10] Mankowski, J. J.; Chen, X.; Dickens, J. C.; Kristiansen, M. "Experimental Optimization of a Reflex Triode Virtual Cathode Oscillator"; *Proc. Int. Conf. High Power Particle Beams* 2004, 426-429.
- [11] Karlsson, M.; Olsson, F.; Filipsson, G.; Edbom, E. "Comparison between Experimental and Numerical Studies of a Reflex Triode"; *IEEE Int. Pulsed Power Conf.* 2005, 210-213.

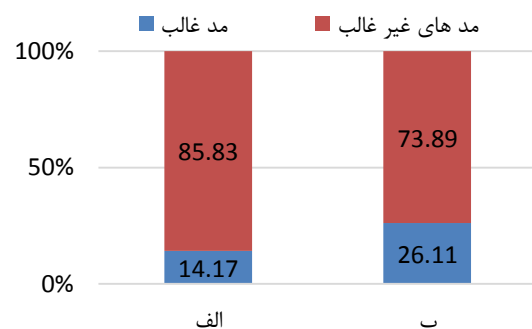


شکل ۹. توزیع توان در فرکانس های مختلف لامپ اول



شکل ۱۰. توزیع توان در فرکانس های مختلف لامپ دوم

شکل (۱۱) نیز بیانگر افزایش حدود ۱۲ درصدی توزیع توان در مد غالب در صورت استفاده از صفحه فلزی است.



شکل ۱۱. توزیع توان در مدهای مختلف. الف) لامپ اول ب) لامپ دوم

در واقع با قرار دادن صفحات هادی و در نتیجه کاهش فضای حرکت الکترون های کاتد مجازی، مؤلفه های فرکانسی کمتری در خروجی خواهیم داشت، به بیان دیگر کاتد مجازی یک نقطه متمرکز نیست بلکه متشکل از یک توده ابر الکترونی است، این صفحات فلزی از نوسان الکترون های پراکنده جلوگیری کرده و دامنه حرکتی آن ها را محدود می کند که موجب فرکانس های خروجی کمتری می شود و این امر افزایش توزیع توان در فرکانس اصلی را در پی دارد.