

## بررسی روشهای تنظیم دقیق فرکانس رزونانس سیکلوترون ۱۰ MeV

حسین پاشایی مجیدآباد<sup>۱\*</sup>، معصومه محمدیان<sup>۱</sup>، حسین افریده<sup>۱</sup>

۱. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

در طراحی و ساخت شتابدهنده سیکلوترون، جابجایی فرکانس رزونانس ناشی از خطای مجاز اندازه‌گیری ساخت و مونتاژ و محیط عملکرد و تست امری اجتناب ناپذیر است. از طرفی ممکن است، اختلافی بین مقادیر تست و شبیه‌سازی وجود داشته باشد که می‌تواند به دلیل ساده‌سازی‌های انجام شده در شبیه‌سازی ناحیه مرکزی که حساس به فرکانس است باشد. یا برخی ساختارهای کوچک همچون اتصالات به بدنه و سوراخ‌های روی دیواره محفظه خلأ که ممکن است در شبیه‌سازی‌ها به طور دقیق مدلسازی نشده و یا نادیده گرفته شده باشند. امکان مغایرت جنس مواد تشکیل دهنده کاواک نیز با آنچه به‌طور ایده‌آل در نظر گرفته شده است نیز از دیگر مواردی است که رخ می‌دهد. مهمترین پارامتری که عوامل بالا بر روی آن تاثیر می‌گذارند، فرکانس رزونانس است، که جابجایی کوچکی در فرکانس رزونانس موجب افزایش تلفات بازگشتی می‌شود و همچنین ذره همزمانی خود را با فرکانس RF از دست می‌دهد، بنابراین برای جبران سازی خطا باید تنظیم دقیق فرکانسی صورت گیرد. یکی از روش‌های تنظیم دقیق فرکانسی در سیکلوترون‌ها روش خازنی می‌باشد. در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی چند روش تنظیم دقیق فرکانس رزونانس از طریق تنظیم دقیق خازنی در سیکلوترون ۱۰ مگا الکترون ولت با استفاده از نرم افزار CST MWS پرداخته شده است.

**کلیدواژه‌ها:** سیکلوترون، فرکانس رزونانس، تنظیم دقیق فرکانسی

## Investigation of Frequency fine tune methods in 10 MeV cyclotron

H.PashaeiMajidabda<sup>۱\*</sup>, M.Mohamadian<sup>۱</sup>, H.Afarideh<sup>۱</sup>

1. Physics Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In the design and construction of a cyclotron accelerator, resonant frequency shifts due to fabrication and assembly tolerances, environmental performance and testing are inevitable. On the other hand, there may be a discrepancy between the test values and the simulation, as it may be due to the simplification of the central area simulation, which is frequency sensitivity. Or sometimes they are small structures such as couplers, engagement of tuner to body and holes in the walls of the chamber that are not accurately modeled or ignored. The possibility of discrepancies between the ingredients of cavity and what is ideally considered is another case that occurs. The most important parameter that causes it to rise is the resonant frequency, which resonates a small shift in frequency and causes increase in return losses, and the particle lose time with the RF frequency, as a result, to compensate for the error, precise frequency adjustment or tuning must be employed. One of the tuning methods in cyclotrons is capacitive tuning. In this paper, several capacitive tuning methods in 10MeV cyclotron are designed and simulated using CST MWS software.

**Keywords:** Cyclotron, Resonant Frequency, Fine Tune.

## ۱. مقدمه

امروزه به کارگیری دانش هسته‌ای به‌ویژه شتابدهنده‌ها در بخش پزشکی امری اجتناب ناپذیر است. با توجه به افزایش نیازهای پزشکی، از سال ۱۹۹۰ به بعد، تعداد تجربه ساخت سیکلوترون‌های تجاری افزایش پیدا کرد. سیکلوترون‌ها اغلب برای تولید رادیو ایزوتوپ‌ها و پروتون تراپی استفاده می‌شوند. تعداد زیادی شرکت مانند EBCO, IBA و GE سیکلوترون‌های کوچک را برای تولید رادیوایزوتوپ ساخته‌اند، که انرژی بین ۵ تا ۱۸ مگا الکترون ولت را پوشش می‌دهند [۱].

در مجموع یک سیکلوترون به صورت دو آهنربای دوقطبی بزرگ برای ایجاد یک میدان مغناطیسی یکنواخت طراحی می‌شود، که یک ولتاژ نوسانی برای ایجاد میدان الکتریکی در فاصله شکاف دو بخش به نام‌های DEE و Liner که از اجزای کاواک سیکلوترون هستند، اعمال می‌شود. ذرات به مرکز این ساختار تزریق می‌شوند تا در شکاف‌ها از طریق میدان الکتریکی اعمال شده، شتاب گیرند [۲].

## ۱.۲ اجزای سیکلوترون

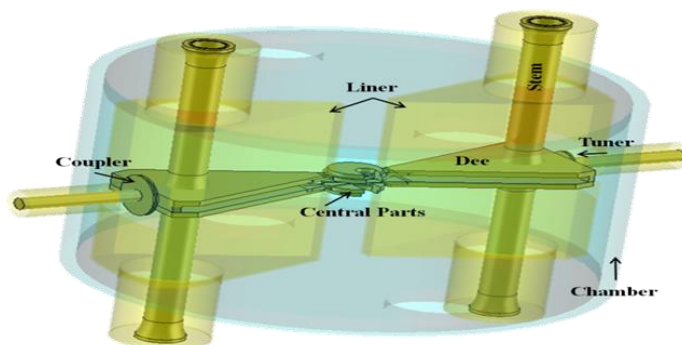
یک سیکلوترون با رده انرژی متوسط، از اجزای مختلفی مانند مگنت، چشمه یونی، سیستم RF، سیستم خلاء، سیستم خنک‌کننده، سیستم منابع تغذیه و ... ساخته شده است.

## ۳. سیستم RF سیکلوترون

یکی از مهم‌ترین بخش‌های شتاب‌دهنده، سیستم RF می‌باشد که هم از لحاظ دقت و هم از جنبه تکنولوژی مورد استفاده، تأثیر مستقیم در دقت عملکرد کل شتاب‌دهنده خواهد داشت. سیستم RF سیکلوترون از زیر بخش‌هایی مانند مدار فرکانس رادیویی سطح پایین LLRF، سیستم تقویت کننده RF، خط انتقال و کاواک تشکیل شده است. روند کاری این سیستم به این صورت است که ابتدا سیگنال RF سطح پایینی در LLRF تولید شده و پس از تقویت در لامپ تقویت کننده توان، به وسیله خط انتقال توسط خازن‌های کوپلینگ وارد کاواک می‌شود [۳].

## ۱.۳ کاواک سیکلوترون

کاواک سیکلوترون خود به زیر بخش‌های مختلفی که شامل Liner, Dee, Stem, Coupler و خازن تنظیم دقیق فرکانسی می‌شود، تقسیم می‌گردد. شکل ۱ این بخش‌ها را نشان می‌دهد [۴].

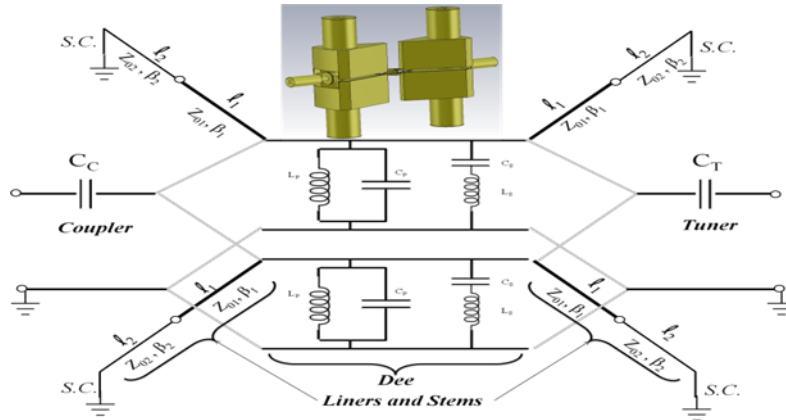


شکل ۱. ساختار کلی کاواک سیکلوترون

وظیفه اصلی کاواک سیکلوترون، شتابدهی به ذرات می‌باشد. در واقع ساختار کاواک معادل یک مدار RLC است که در فرکانس مدنظر رزونانس می‌کند. بنابراین هرچه قدر فرکانس رزونانس کاواک به فرکانس مد نظر نزدیک باشد، بازدهی سیکلوترون بیشتر خواهد شد.

### ۲.۳. خازن های کوپلینگ و تنظیم دقیق فرکانسی

دو خازن قابل تنظیم که به صورت دو صفحه دایروی موازی با یکدیگر ساخته شده اند و به صورت سری با ساختار کلی می‌باشند، خازن کوپلینگ در ابتدای کاواک جهت انتقال توان RF به داخل کاواک و خازن تنظیم دقیق فرکانسی در انتهای کاواک قرار دارند. مدار معادل آنها در ساختار کلی در شکل ۲ بیان شده است.



شکل ۲. مدار معادل ساختار کلی کاواک

این صفحات دایروی از یک طرف به کناره های Dee و از سمت دیگر به مغزی داخلی الکتروود خط انتقال توان ورودی اتصال دارند. در شکل بالا CC و CT به ترتیب خازن‌های کوپلینگ و خازن‌های تنظیم دقیق فرکانسی مشاهده شده در دو سمت کاواک هستند [۲].

### ۴. روش های تنظیم دقیق فرکانسی خازنی

در حالت کلی تنظیم دقیق فرکانسی به معنی یکسان کردن فرکانس داخل کاواک با فرکانس رزونانس مد نظر می باشد. همانطور که اشاره شد، در طراحی و ساخت شتابدهنده سیکلوترون، جابجایی فرکانس رزونانس ناشی از خطای مجاز اندازه‌گیری ساخت و مونتاژ و محیط عملکرد و تست امری اجتناب ناپذیر است. از طرفی ممکن است، اختلافی بین مقادیر تست و شبیه سازی وجود داشته باشد که می تواند به دلیل ساده سازی های انجام شده در شبیه سازی ناحیه مرکزی که حساس به فرکانس است باشد. و یا برخی ساختارهای کوچک همچون اتصالات به بدنه و سوراخ های روی دیواره محفظه خلأ که ممکن است در شبیه سازی ها به طور دقیق مدلسازی نشده و یا نادیده گرفته شده باشند. امکان مغایرت جنس مواد تشکیل دهنده کاواک نیز با آنچه به طور ایده آل در نظر گرفته شده از دیگر مواردی است که رخ می دهد [۵ و ۶].

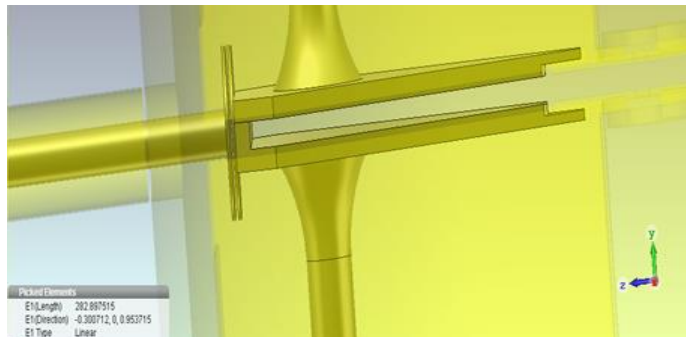
لذا مهمترین پارامتری که عوامل مختلف یاد شده، بر روی آن اثر می گذارند فرکانس رزونانس است و تغییر کوچک در فرکانس رزونانس موجب افزایش تلفات بازگشتی می شود و باعث می شود که ذره همزمانی خود را با فرکانس RF از دست بدهد. بنابراین برای جبران سازی خطا باید تنظیم دقیق فرکانسی صورت گیرد. روشی که اغلب برای تنظیم دقیق در سیکلوترون ها به کار می رود، تنظیم دقیق فرکانسی به روش خازنی می باشد [۷ و ۸]. در روش خازنی از دو صفحه رسانای موازی، به عنوان خازن استفاده می شود، که ظرفیت خازنی از رابطه ۱ بدست می آید. در این رابطه A مساحت صفحات خازن، d فاصله بین صفحات و  $\epsilon$  ضریب دی الکتریک برای محیط بین دو صفحه است.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

در خازن صفحه‌ای ظرفیت خازنی تنها به عوامل، فاصله بین صفحات (d)، مساحت موثر بین صفحات (A) و ضریب دی‌الکتریک بستگی دارد. همچنین برای از بین بردن اثرات لبه، هندسه صفحات را دایره و یا نیم دایره انتخاب می‌کنند. که اگر هندسه به صورت دایره باشد با تغییر d می‌توان مقدار ظرفیت خازن را تغییر داد که متداول ترین روش تنظیم دقیق فرکانسی در سیکلوترون‌ها می‌باشد، اما اگر از هندسه دو صفحه نیم دایره استفاده شود با ثابت نگه داشتن یک صفحه و دوران دادن صفحه دیگر می‌توان مساحت موثر بین صفحات را تغییر داد. جابجایی و دوران صفحه دوم خازن توسط سرووموتور صورت می‌گیرد. تغییر ظرفیت خازنی بین صفحات موجب تغییر ظرفیت خازنی کل کاواک و تنظیم فرکانس رزونانس آن می‌شود.

#### ۱.۴. تنظیم دقیق فرکانسی به روش خازنی با تغییر فاصله بین صفحات (تغییر d)

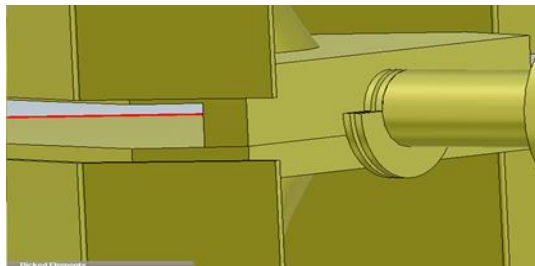
در روش تنظیم دقیق فرکانس با تغییر فاصله بین صفحات، از دو صفحه دایروی موازی هم استفاده شده است. که یکی از صفحه‌ها به Dee کاواک متصل شده و ثابت است، صفحه روبرو به شفت یک سرووموتور خطی، جهت تغییر فاصله متصل است، که از نظر الکتریکی این صفحه به پتانسیل صفر مجموعه سیکلوترون وصل شده است. شکل ۳ محل صفحات خازنی و نحوه اتصال آن به کاواک را نشان می‌دهد.



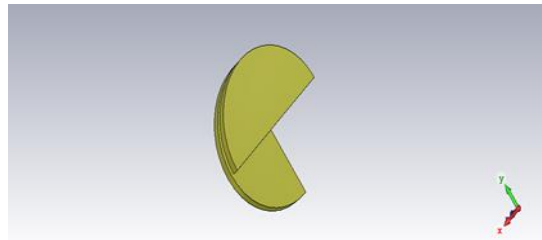
شکل ۳. محل اتصال دیسک دوم به Dee کاواک

#### ۲.۴. تنظیم دقیق فرکانسی به روش خازنی با تغییر مساحت موثر بین صفحات بصورت دو صفحه نیم دایره‌ای (تغییر A)

در روش تنظیم دقیق فرکانسی با تغییر مساحت موثر بین صفحات، از دو صفحه نیم دایره موازی هم مانند شکل ۴ الف استفاده شده است. همانند روش قبلی یکی از صفحات به Dee کاواک متصل شده و ثابت است، صفحه روبرو به شفت یک سرووموتور متصل است که از نظر الکتریکی این صفحه به پتانسیل صفر مجموعه سیکلوترون وصل شده است. شکل ۴ ب محل اتصال دیسک دوم به Dee کاواک را نشان می‌دهد.



ب. نحوه اتصال دیسک های خازنی به Dee کاواک



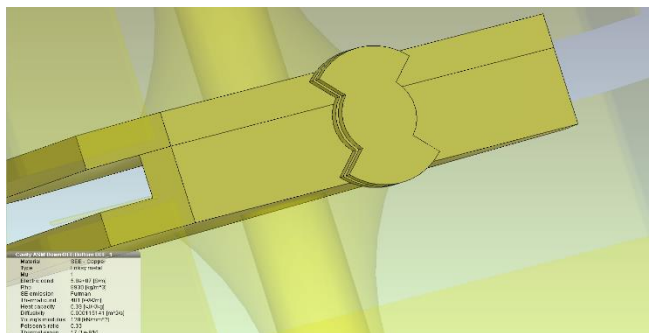
الف. صفحات خازن نیم دایره‌ای

شکل ۴. الف) صفحات خازنی نیم دایره ای، ب) نحوه اتصال صفحات خازنی به Dee کاواک

با چرخش شفت سروموتور صفحه دوم خازن شروع به چرخش می‌کند و چون صفحه مقابل ثابت است با چرخش صفحه دوم مساحت موثر بین دو صفحه تغییر می‌کند و با توجه به رابطه ۱، A با ظرفیت خازنی رابطه مستقیم دارد، لذا افزایش و کاهش A ظرفیت خازن بین صفحات را افزایش و کاهش می‌دهد. همچنین در اینجا نیز تغییر ظرفیت خازنی بین صفحات گویای تغییرات فرکانس رزونانس داخل کاواک می‌باشد.

#### ۳.۴. تنظیم دقیق فرکانسی به روش خازنی با تغییر مساحت موثر بین صفحات به صورت هندسه پره‌ای

در روشی دیگر می‌توان به جای نیم دایره کردن صفحات خازنی آنها را به صورت پره‌ای مانند شکل ۵ در نظر گرفت. همانند روش قبلی یکی از صفحات به Dee کاواک متصل شده و ثابت است، صفحه روبرو به شفت یک سروموتور متصل است که از نظر الکتریکی این



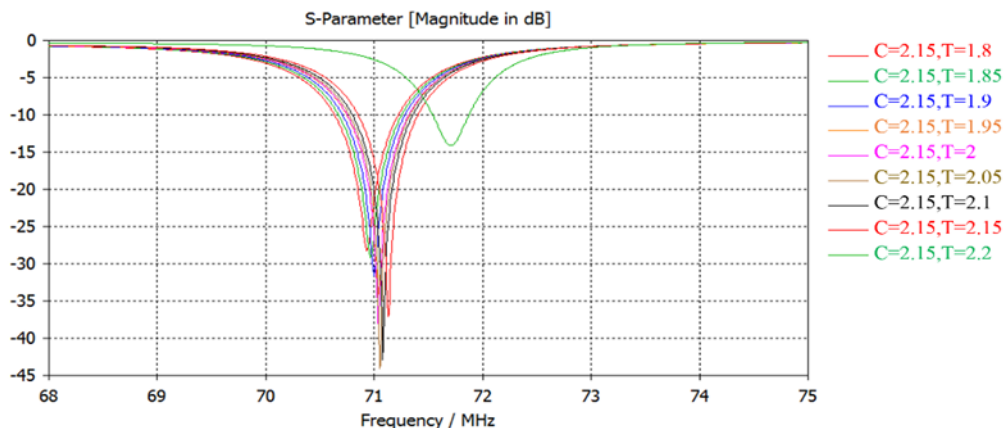
صفحه به پتانسیل صفر مجموعه سیکلوترون وصل شده است. در این نوع هندسه نیز با چرخش صفحه دوم، مساحت موثر بین صفحات تغییر می‌کند. در نتیجه ظرفیت خازن و فرکانس کاواک تغییر می‌کند.

شکل ۵. صفحات خازن پره‌ای

در تنظیم دقیق فرکانسی به روش خازنی با تغییر مساحت موثر بین صفحات خازن، در هندسه نیم دایره می‌توان صفحه دوم را از صفر درجه تا ۱۸۰ درجه چرخش داد و بعد از ۱۸۰ درجه تغییرات ظرفیت خازنی تکرار می‌شود در واقع دوره تناوب تغییرات ظرفیت خازنی در این روش ۱۸۰ درجه می‌باشد، همچنین در هندسه پره‌ای مانند شکل ۵، صفحه دوم را می‌توان از صفر تا ۹۰ درجه چرخاند و دوره تناوب نیز در این روش ۹۰ درجه می‌باشد بنابراین هرچقدر تعداد پره‌ها را افزایش دهیم سریعتر به تنظیم دقیق فرکانسی می‌رسید. اما با افزایش تعداد پره‌ها، دوره تناوب تغییرات خازنی کوچکتر می‌شود، در این صورت زاویه‌های چرخش برای تنظیم دقیق فرکانسی کوچکتر خواهد شد و دقت تنظیم دقیق فرکانسی پایین خواهد آمد. همچنین با افزایش تعداد پره‌ها اثرات لبه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند.

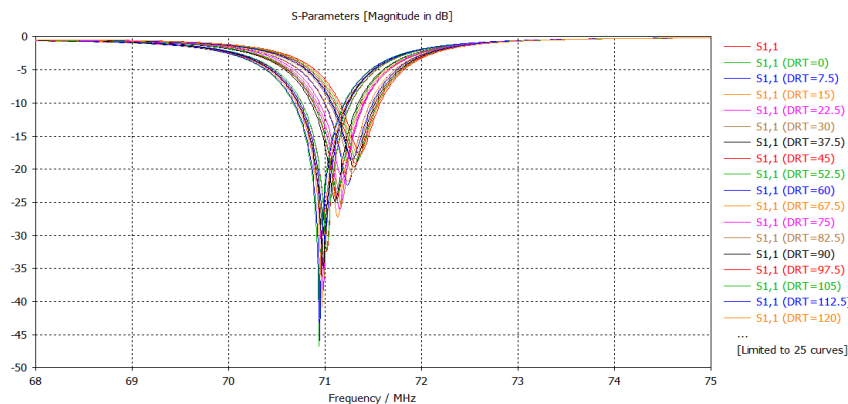
#### ۴.۴. بررسی میزان تغییر فرکانس رزونانس بر اساس تغییر فاصله بین دو صفحه و مساحت موثر بین صفحات خازن تنظیم دقیق فرکانسی

شبهه سازی‌ها برای فرکانس مورد نظر ۷۱ MHz، با صفحات خازن کوپلر با فاصله بین صفحات ثابت ۲/۱۵ میلی‌متر، به قطر ۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر برای هر سه روش در نرم افزار CST در قسمت Microwave Studio، به همراه ساختار کل کاواک انجام شده است. در روش اول تغییر فاصله بین صفحات به صورت متغییر از ۱/۸ میلی‌متر تا ۲/۲ میلی‌متر با بازه‌های نیم درجه، تغییر داده شده است و نتایج پارامتر پراکندگی S11 که گویای جابجایی فرکانس رزونانس است به صورت شکل ۶ می‌باشد.



شکل ۶. پارامتر پراکندگی  $S_{11}(\text{dB})$  و بررسی تغییرات مکان فرکانس رزونانس با تغییر فاصله بین صفحات خازن تنظیم دقیق فرکانسی در فاصله بین صفحات ثابت خازن کوپلینگ

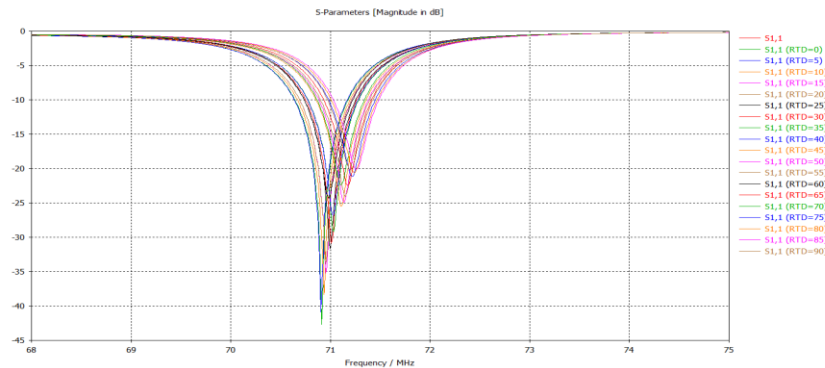
در روش دوم که صفحات به صورت نیم دایره می‌باشد، صفحه نیم دایره دوم در فاصله  $1/4$  میلی‌متر نسبت به صفحه روبرو، به صورت دورانی با زاویه چرخش از صفر تا  $180^\circ$  درجه دوران داده شده است، که جابجایی فرکانس رزونانس با بازه‌های دوران  $7/5^\circ$  درجه در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷. پارامتر پراکندگی  $S_{11}(\text{dB})$  و بررسی تغییرات مکان فرکانس رزونانس با تغییر مساحت موثر بین صفحات خازن تنظیم دقیق فرکانسی با هندسه نیم دایره، در فاصله بین صفحات ثابت خازن کوپلینگ. DRT نشان دهنده درجه چرخش صفحه دوم خازن نسبت به صفحه اول می‌باشد.



در روش سوم که صفحات بصورت پره‌ای می‌باشند، صفحه دوم، در فاصله  $1/4$  میلی‌متر نسبت به صفحه روبرو، بصورت دورانی با زاویه چرخش از صفر تا  $90$  درجه دوران داده شده است. شکل ۸ جایجایی فرکانس رزونانس را با فواصل  $5$  درجه چرخش را نشان می‌دهد.



شکل ۸. پارامتر پراکندگی  $S_{11}(dB)$  و بررسی تغییرات مکان فرکانس رزونانس با تغییر مساحت موثر بین صفحات خازن تنظیم دقیق فرکانسی با هندسه پره‌ای، در فاصله بین صفحات ثابت خازن کوپلینگ DRT نشان دهنده درجه چرخش صفحه دوم خازن نسبت به صفحه اول می‌باشد.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌شود که میزان توان برگشتی در بهترین حالت کمتر از  $40$  dB می‌باشد. در صورتی که توان برگشتی مطلوب از پورت ورودی کمتر از  $20$  dB باشد، با تغییر فاصله صفحات خازن تنظیم دقیق فرکانسی به اندازه  $400$  میکرومتر، بازه تغییرات جایجایی فرکانس قابل قبول را می‌توان تا  $1$  مگاهرتز افزایش داد.

مقایسه سه روش بکاررفته جهت تنظیم دقیق فرکانس رزونانس که معایب و مزایای هر سه روش را بیان می‌نماید، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مقایسه روشهای تنظیم دقیق فرکانسی

معایب	مزایا	روشهای تنظیم دقیق فرکانس رزونانس
نیاز به خطی سازی حرکت چرخشی موتور ← هزینه بیشتر	کاهش اثرات لبه‌ها به دلیل دایره‌ای کامل بودن هندسه	۱ تنظیم دقیق فرکانسی به روش تغییر فاصله بین صفحات
خطای بیشتر به علت وجود قسمت خطی	بازه تنظیم ظرفیت خازنی بیشتر به علت تغییرات خطی	۲ تنظیم دقیق فرکانسی به روش تغییر مساحت موثر بین صفحات با هندسه نیم دایره
تکرار ظرفیت خازنی بعد از چرخش $180$ درجه ← بازه تنظیم کمتر اثرات لبه بیشتر نسبت به روش اول	عدم نیاز به قسمت خطی سازی در موتور به علت تغییرات ظرفیت خازنی چرخشی ← هزینه و خطا کمتر	۳ تنظیم دقیق فرکانسی به روش تغییر مساحت موثر بین صفحات با هندسه پره‌ای
اثرات لبه بیشتر نسبت به روش اول و دوم	عدم نیاز به قسمت خطی سازی در موتور به علت تغییرات ظرفیت خازنی چرخشی ← هزینه و خطا کمتر سرعت تنظیم دقیق فرکانسی بیشتر نسبت به روش دوم	



## ۵. نتیجه گیری

برای تنظیم دقیق فرکانسی برای سیکلوترون‌های کوچک با روش خازنی، تغییر فاصله بین صفحات به کار گرفته می‌شود، با مقایسه سه روش بررسی شده، مشاهده می‌شود که روش تغییر مساحت موثر بین صفحات در روش‌های دو و سه هم از نظر اقتصادی و هم از نظر تعمیر و نگهداری به دلیل حذف قسمت خطی ساز سروموتور، بهتر از روش اول می‌باشد. همچنین خطای لغزش کوچک صفحات هنگام تنظیم دقیق فرکانسی نیز از بین می‌رود. بنابراین روش‌های دوم و سوم می‌تواند، روش‌های پیشنهادی برای جایگزینی روش اول باشند.

## مراجع

۱. Mohamadian, M., et al. *Equivalent Circuit Model of Cyclotron RF System*. in 21st Int. Conf. on Cyc. and Their App., Zurich, Switzerland, September 11-16, (2016).
۲. Mohamadian, M., H. Afarideh, and M. Ghergherehchi, *Accurate electromagnetic simulation and design of cyclotron cavity*. IEEE Trans. on Nuc. Sci., 2016. **64**, 2: p. 809-815.
۳. صلح‌جو، راحله، همکاران.. طراحی شتاب‌دهنده سیکلوترون ۱۰ مگاالکترون ولت. مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۵(۲)، ۲۲۵-۲۳۴، (۲۰۱۹).  
(In Persian)
۴. Mohamadian, M., et al. *Tuner System Optimization in 10 MeV Cyclotron Cavity*. 12th Int. Com. Acc. Phys. Conf., Shanghai, China, 12-16 October 2015. (2016).
۵. H.S. Song et al, *Development of 1.5 kW RF Driver for Compact Cyclotron*, Proc. of Cyc., Vancouver, BC, Canada, (2013).
۶. V. Sabaiduc, *Resonator system for the best 70MeV cyclotron*, Proc. of Cyc. ,Vancouver, BC, Canada, (2013).
۷. S. W. Shin et al, *Development of the RF cavity for the SKKUCY-9 compact cyclotron*, Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. A **795**, 276-283, (2015).
۸. L. Cao et al, *Preliminary Design of RF Cavities for the Cyclotron CYCHU-10*, Proc. of PAC09, Vancouver, BC, Canada