



طراحی شبکه سینکروترون برای باریکه پروتون

حسین زاده، مریم

پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

چکیده:

هدف این کار تحقیقی طراحی یک سیستم شتابدهنده برای تولید پروتونهای حدود ۲۵۰ میلیون الکترون ولت برای پروتون تراپی می باشد. بدین منظور سیکلوترون ۳۰ مگا الکترون ولت واقع در سازمان انرژی اتمی کرج که قادر است باریکه پروتون را حداکثر تا ۳۰ مگا الکترون ولت شتاب دهد به یک شتابدهنده سینکروترون پروتون که برای اهداف پزشکی طراحی شده است تزریق می گردد. برای این طراحی از کد کامپیوتری و AGILE استفاده شده است.

کلمات کلیدی: (Synchrotron, Beam dynamic, Proton Therapy and WinAGILE).

مقدمه:

سینکروترون، شتابدهنده‌ای دایروی برای شتاب باریکه الکترون برای بدست آوردن تابش سینکروترونی و همچنین پروتون و کربن برای درمان می باشد. این شتابگر به علت ارزان بودن نسبت به شتابگرهای خطی و قابلیت خروج باریکه در انرژی‌های مختلف، شتابگر مناسبی برای پروتون تراپی می باشد [1]. هم اکنون شتابگرهای سینکروترون زیادی در امریکا و اروپا و حتی در آسیا (ژاپن) وجود دارند. در اینجا سعی بر این است که اصول اساسی یک سینکروترون برای باریکه پروتون برای هدف درمان توضیح داده شود. همچنین پارامترهای حفره RF را محاسبه می کنیم. در این مقاله پروتون‌ها را از $30 MeV$ تا $250 MeV$ با سختی مغناطیسی $2,43 Tm$ شتاب می دهیم. این طراحی مرکب از دو کمان اکروماتیک است. هر کمان باریکه پروتون را به اندازه 180° درجه دوران می دهد. این شبکه طراحی شده شامل ۸ سلول می باشد که هر سلول شامل دو چهار قطبی مغناطیسی، یک شش قطبی و دو تا دوقطبی مغناطیسی می باشد. توابع بتا از جمله پارامترهای اصلی برای طراحی شبکه می باشند و به گونه‌ای بهینه شده اند تا شرایط لازم برای استخراج باریکه را برآورده نماید. پارامترهای $twiss$ به دست آمده برای ساختار کانونی محاسبه شده توسط کد AGILE ارائه شده است [2]. برای باریکه پروتونی از یک حفره RF با ولتاژ تقریبی 160 ولت و فرکانس $2,3$ تا 14 مگاهرتز استفاده شده است. در سال 2008 دو عدد مقاله یکی برای کنفرانس هسته‌ای و دیگری برای ژورنال ایرانی با این مفاهیم چاپ شده است [3,4].



روش کار :

سیستم تزریق کننده شامل یک سیکلوترون 30 MeV و یک چشمه یونی 30 KeV برای تولید باریکه یونی است. سیکلوترون 30 MeV مگا الکترون ولت موجود در کرج در بازه عملیاتی 65 MHz باریکه پروتون را تا 30 MeV شتاب می دهد. جریان باریکه 300 میکروآمپر و امیتنس آن برای جریان 0.2 میکروآمپر در قسمت خروج باریکه از شتابدهنده در جهات افقی و عمودی به ترتیب برابر 1.76×10^{-5} و 5.79×10^{-6} میلی ردا اندازه گیری شده است. همچنین امیتنس محاسبه شده در صفحه طولی برابر با 1.6 eVs می باشد. این مقدار از جریان با تعداد 1.25×10^5 پروتون بر ثانیه مطابقت دارد که برای پروتون تراپی جریان نسبتاً زیادی است بنابراین برای داشتن ذرات مورد نیاز برای تراپی روش تزریق چند دور^۱ از سیکلوترون به سینکروترون طراحی شده اتخاذ می گردد [1].

در سینکروترون طراحی شده برای این منظور محیط آن حدوداً 49.4 متر می باشد که 12 عدد مغناطیس خمشی^۲ با بیشینه چگالی شار 0.637 تسلا استفاده شده است (شکل ۱). همچنین برای نصب تزریق کننده، المان خارج کننده^۳ و حفره^۴ RF دو فضای آزاد بلند^۵ و چهار فضای آزاد کوتاه^۶ تعبیه شده است. این مدل از سینکروترون طراحی شده دارای ساختار همگرا کننده^۷ دابل^۸ با پارامترهای اپتیکی متفاوت برای تزریق و خروج باریکه می باشد. برای کمینه کردن روزنه^۹ مگنت ها و بهینه کردن هزینه، باید مقدار $\beta_x + \beta_y$ را کمینه کنیم [1]. برای این هدف فرض می کنیم که $\sigma_x = \sigma_y$ و بنابراین

$$r^2 = \epsilon_x \beta_x + \epsilon_y \beta_y = \epsilon_x (\beta_x + \beta_y) \quad [1]$$

^۱ Emittance

^۲ Horizontal and vertical direction

^۳ mrad

^۴ Longitudinal plane

^۵ Multiturn injection

^۶ Circumference

^۷ Bending magnet

^۸ Injection and extraction elements

^۹ RF cavity

^{۱۰} Long drift space

^{۱۱} Short drift space

^{۱۲} Doublet focusing structure

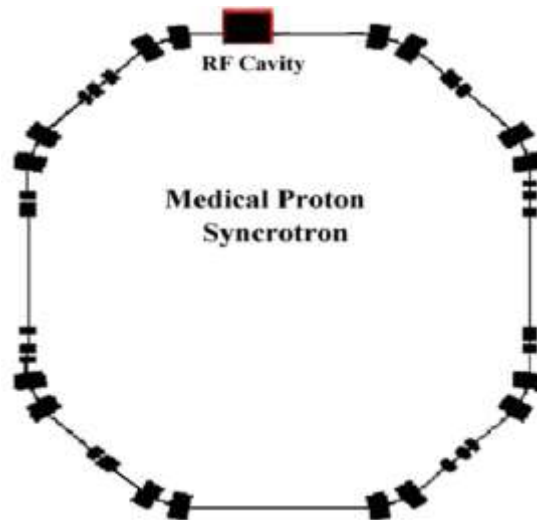
^{۱۳} aperture

با کمینه کردن رابطه زیر:

$$\frac{L(1+\sin\frac{\mu}{2})+L}{\sin\mu}\beta_x + \beta_y = \hat{\beta} + \check{\beta} = \quad [2]$$

$$\frac{d(\hat{\beta} + \check{\beta})}{d\mu} = \frac{d}{d\mu} \frac{2L}{\sin\mu} = 0 \quad [3]$$

$$\cos\mu = 0 \rightarrow \mu = 90^\circ \frac{-L}{\sin\mu^2} \quad [4]$$



شکل ۱: نمایی از سینکروترون پروتون طراحی شده

سینکروترون برای اینکه می‌تواند ذرات باردار با انرژی‌های مختلف را شتاب دهد به عنوان شتاب دهنده برای سرطان تراپی بکار می‌رود. در هر شبکه ای از این سینکروترون مگنت از نوع قطاع دایره^{۴۳}بعلت توزیع میدان ساده تر در مقایسه با مگنت مستطیلی استفاده شده است. این محاسبات، با کد AGILE انجام شده است [2].

انرژی باریکه مورد نیاز برای یون تراپی دو کمیت سختی مغناطیسی باریکه و فرکانس چرخشی را در طراحی ماشین مشخص می‌کند. سختی مغناطیسی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$[5] B\rho = \frac{P}{q} = \frac{10^6}{nc} p[\text{MeV}/c] = \frac{10^6}{nc} \beta\gamma E_r[\text{MeV}] = \frac{10^6}{nc} \sqrt{E_k^2 + 2E_k E_r}$$

^{۴۳} Sector magnet



P اندازه حرکت ذره، q بار ذره، n حالت بار ذره، E_k انرژی جنبشی ذره، E_r انرژی سکون ذره است. انرژی جنبشی بوسیله آهنگ عمق نفوذ دلخواه ذره تعیین می‌شود. اگر اندازه حرکت ذره اندکی تغییر کند مدار حرکت متناسب با آن بصورت زیر خواهد داشت:

$$[6] \alpha = \frac{p}{R} \frac{dR}{dp}$$

این عبارت تراکم ممتوم نامیده می‌شود که بوسیله میدان منحرف کننده بوجود می‌آید. در این رابطه p اندازه حرکت ذره و R شعاع فیزیکی سینکروترون می‌باشد. اگر ممتوم ذره تغییر کند سرعت های مختلف هم خواهد داشت. نتیجه این دو اثر بصورت تغییر فرکانس چرخشی بروز می‌کند:

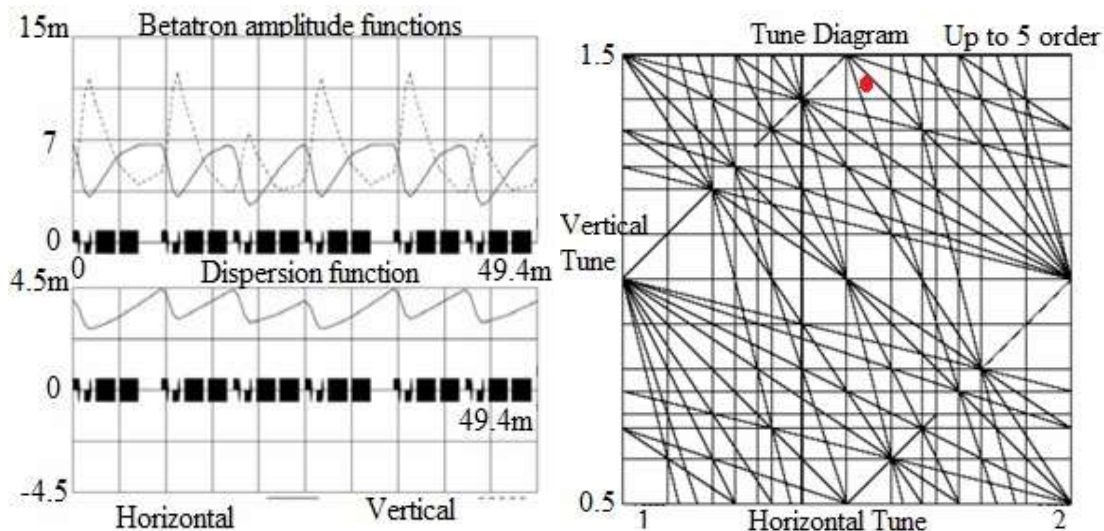
$$[7] \eta = \frac{p}{f_r} \frac{df_r}{dp}$$

f_r = فرکانس چرخش

در انرژی گذار $\eta = 0$ می‌باشد. همچنین در این نقطه

$$[8] \gamma_{tr} = \frac{1}{\alpha}$$

در این ماشین طراحی شده $\gamma < \gamma_{tr}$. این بدان معنی است که همیشه زیر نقطه گذار قرار دارد. این گدیده بعلت کوچک بودن اندازه ماشین طراحی شده است. پارامترهای Twiss و منحنی تیون این شبکه در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. پارامترهای توئیس شامل توابع بتا و تابع پاشندگی در طول شبکه می‌باشد که دارای نوسان می‌باشند و بیشینه تابع بتا تعیین کننده قطر داخلی مگنت ها در مسیر باریکه می‌باشد.



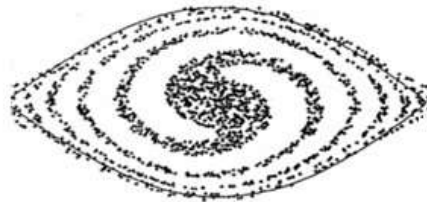
شکل ۳: منحنی تیون سینکروترون تا مرتبه ۵. شکل ۲: پارامترهای Twiss سینکروترون مدل شده



شتاب باریکه توسط امواج رادیویی انجام می‌شود. برای افزایش انرژی باریکه بایستی بین فرکانس RF با تغییرات جریان در مگنت های خمشی و چهار قطبی همزمانی زمانی صورت گیرد. قبل از شتاب‌دهی، باریکه یونی بر روی هارمونیک مرتبه دوم فرکانس چرخشی سیکلوترون بعنوان تزریق کننده سینکروترون تنظیم می‌شود و این هارمونیک در طول فرایند شتاب ثابت باقی می‌ماند [5]. برحسب نسبت بین سرعت ذره در تزریق کننده و خروجی از شتاب دهنده فرکانس RF بایستی در بازه ۲,۳ تا ۱۴ مگاهرتز باشد.

$$[9]\omega_s = \frac{v}{R} \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

پهن‌شدگی ممتوم ($\Delta P/p$) بعد از فرایند دسته‌بندی باریکه حدودا $\pm 0.2\%$ خواهد بود. برای جلوگیری از رشته رشته‌ای شدن باریکه همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است. این عدد در نقطه تزریق باریکه بایستی مطابق با حفره RF حدودا ۱,۸۱ الکترون ولت ثانیه باشد [5].



شکل ۴: باریکه کاملا رشته رشته شده درون حفره RF

ولتاژ مورد نیاز برای شتاب V_{acc} توسط زمان مورد نیاز برای فرایند شتاب تعیین می‌شود که این پارامتر وابسته به بیشینه صعود میدان دو قطبی است، ($dB/dt = 0.425T/s$)، که این مقدار از صعود میدان با زمان شتاب ۱ ثانیه برای رسیدن به انرژی ۲۵۰ مگاالکترون ولت مطابقت دارد. برای این آهنگ افزایش میدان، حداقل ولتاژ ۱۶۰ ولت مورد نیاز می‌باشد. کروماتیسیتی اشاره به اثرات وابسته به اندازه حرکت دارد [1]. این اسم از آنجا ناشی می‌شود که اندازه حرکت یون مشابه فرکانس و رنگ در اپتیک کلاسیک عمل می‌کند. تابع پاشندگی که از دو قطبی‌های منحرف کننده برای یونهای با اندازه حرکت متفاوت بوجود می‌آید یک اثر کروماتیسیتی است ولی معمولا مفهوم کروماتیسیتی به آن ارجاع داده نمی‌شود. اثری که از تفاوت همگرا کنندگی چهارقطبی بعلت تفاوت اندازه حرکت بوجود می‌آید باعث تغییر فاز نوسانی بتاترونی باریکه یا تیون نسبت به اندازه حرکت می‌شود. این اثر که کروماتیسیتی نام دارد به طرق زیر نشان داده می‌شود:

$$Q' = \frac{\Delta Q/Q}{\Delta P/p} \quad \text{و} \quad Q'' = \frac{\Delta Q}{\Delta P/p} \quad [10]$$

که اولی همواره استفاده می‌شود و دومی بعلت تقارنی که دارد مورد توجه قرار می‌گیرد.



کروماتیسیته ذاتی شبکه سینکروترون طراحی شده بترتیب در صفحات افقی و عمودی عبارتند از: ۱,۳۹۷ و ۰,۳۹۷-
کروماتیسیته ذاتا پدیده ناخوشایندی است چون در موارد شدید به ناپایداری باریکه و پراکندگی فرکانس می‌شود. برای
تصحیح کروماتیسیته معمولا از مگنت های شش قطبی استفاده می‌شود. کروماتیسیته از ابتدا تا انتهای طراحی بررسی و
تصحیح می‌شود. پس از طراحی و اصلاحات کامل کروماتیسیته ردیابی باریکه در فضای فاز انجام می‌شود. بعد از
ردیابی باریکه توسط کد کامپیوتری، روزنه دینامیکی کوچکتر از روزنه فیزیکی مگنت ها می‌باشد و با وجود ۱۰۰۰ دور
چرخش باریکه در سینکروترون هنوز حالت پایدار برای باریکه وجود دارد و ذرات نابود نمی‌شوند.

نتایج:

در این مقاله با انتخاب المانهای سینکروترون از قبیل چهار قطبی با طول ۰,۵ متر، برای همگرا کردن باریکه و دو قطبی با
طول ۲ متر برای ایجاد خمش در باریکه محاسبات مفهومی و همچنین شبیه سازی را انجام دادیم. شعاع خمش باریکه در
این شبکه سینکروترونی ۰/۵۲۳۶ متر می‌باشد. در این محاسبات مفهومی و شبیه‌سازی‌های انجام شده در نهایت به شبکه‌ای
از المانهای با محیط ۴۹/۴ متر رسیدیم که پس از بررسی سلولهای مختلف مورد استفاده در شبکه های سینکروترون از
جمله FODO و TBA، بهترین نوع سلول انتخاب شده از نوع سلول دوگانه می‌باشد که به تعداد ۶ عدد یکی پس از
دیگری در کد وارد شده و در نهایت شبکه نهایی سینکروترون ترسیم می‌شود. انرژی باریکه تزریق شده ۳۰ مگا الکترون
ولت و همچنین انرژی باریکه استخراج شده ۲۵۰ مگا الکترون ولت می‌باشد. در نهایت با اعمال شش قطبی در شبکه
سینکروترون به کروماتیسیته طبیعی ۱,۳۹۷- در بعد افقی و همچنین به کروماتیسیته طبیعی ۱,۳۹۷- در بعد عمودی
رسیدیم.

بحث و نتیجه گیری:

در این تحقیق تعدادی از پارامترهای شبکه برای سلول انتخاب شده محاسبه شده است. همچنین پارامترهای RF برای
شتاب باریکه محاسبه شده است. برای تزریق باریکه به این مدل از سینکروترون روش تزریق چند دور بهترین گزینه می
باشد. محاسبات مربوط به تزریق باریکه و همچنین انتخاب روش مناسب برای درمان در دست بررسی است.



بیت و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



مراجع :

- [۱] Bryant, P. J. and Johnsen, K., 1993, "The Principle of Circular Accelerators and Storage Rings", Camb University Press.
- [۲] Bryant, P.J., 2006, "WINAGILE program", AC-Division. CERN, CH 1211, Geneva 23, Switzerland.
- [3] Hosseinzadeh, M., Ghergherechi, M., Mohammadzadeh, A. H., Fegghi, S. A. H. & Afarideh, H. (2008). Lattice design of dedicated synchrotron for proton therapy, Proc. 16 International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16-488321, May 11-15, Orlando, Florida, USA.
- [4] Ghergherechi, M., Hosseinzadeh, M., et al, "Extraction of 250 MeV Proton Beam by Injection of the 30 MeV Cyclotron Proton Beam into the Conceptually Designed Medical Proton Synchrotron", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction A, Vol. 32, No. A4, 2008.
- [5] Turner, S., 1992, "CAS CERN ACCELERATOR SCHOOL FIFTH GENERAL ACCELERATOR PHYSICS COURSE", University of Jyväskylä, Finland, 7-18 September 1992, VOL. II. ISSN 0007-8328, ISBN 92-9083-057-3.