Research Paper

Lattice Design of Synchrotron for Proton Beam

Maryam Hosseinzadeh[1], Maryam Akbari Nasaji[*2]

Received: 2019.05.14
Accepted: 2020.01.25

Abstract
A compact model of synchrotron accelerator facility is proposed for the treatment of deep-seated tumors with proton therapy. The extracted beam from the existing C-30 cyclotron is first injected into the modelled synchrotron. The injected beam is specified with its longitudinal plane as well as its horizontal and vertical emittances. For this design to be compatible with the cyclotron C-30, the synchrotron should be kept compact and the number of magnet components must be low. The modeled synchrotron layout is designed using the computer codes MADX and AGILE in order to accelerate the injection proton ions from 30 MeV to a maximum extraction energy of 250 MeV with magnetic rigidity of 2.433 Tm. In this lattice arrangement with phase advance of about 90 degrees in two horizontal and vertical planes doublet cells are utilized. This ring consists of two long straight sections for RF and injection/extraction equipment, as well as four short straight sections. For chromaticity correction, two families of sextupoles are used. To prohibit emittance growth, a matching at injection in longitudinal plane was performed. The proton beam energy spread of 2% can be improved to 0.1% at injection by using the designed achromatic system. For the proton beam acceleration, a RF cavity with an approximate voltage of 160 V with a frequency in the range of 2.3 up to 14 MHz is used.

Keywords: *Synchrotron, Lattice Design, Twiss Parameters, Computer Code AGILE*

[1] Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI,Tehran,Iran. m.hosseinzadeh5176@gmail.com
[2] Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI,Tehran,Iran. (Corresponding Author). mnasaji2353@gmail.com

فصلنامهٔ علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال نهم، پیاپی ۱۷، تابستان ۱۳۹۸

مقاله پژوهشی

محاسبات دینامیک باریکهٔ شبکهٔ سینکروترون برای شتاب باریکهٔ پروتون به منظور استفاده در پروتون‌تراپی[1]

مریم حسین‌زاده[2]، مریم اکبری نساجی[3]*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵

چکیده

هدف این تحقیق طراحی سامانهٔ شتابدهنده برای تولید پروتون‌های دارای انرژی حدود ۲۵۰ میلیون الکترون‌ولت برای پروتون‌تراپی است. بدین منظور، سیکلوترون ۳۰ مگا الکترون‌ولتی واقع در سازمان انرژی اتمی کرج که قادر است باریکهٔ پروتون را حداکثر تا ۳۰ مگا الکترون‌ولت شتاب دهد به یک شتاب دهندهٔ سینکروترن پروتون که برای اهداف پزشکی طراحی شده است تزریق می‌شود. برای این طراحی از دو کد کامپیوتری MADX و AGILE استفاده شده است.

واژگان کلیدی: *سینکروترن، طراحی شبکه، پروتون‌تراپی، پارامترهای توییس، کدAGILE.*

---

[1] DOI: 10.22051/jap.2020.26112.1126

[2] پژوهشکدهٔ فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران.
m.hosseinzadeh5176@gmail.com

[3] پژوهشکدهٔ فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران.
(نویسنده مسئول) mnasaji2353@gmail.com

۱. مقدمه

سینکروترن شتابدهنده‌ای دایره‌ای برای شتاب باریکهٔ الکترون برای به دست آوردن تابش سینکروترنی و همچنین پروتون و کربن برای درمان است. این شتابدهنده به علت ارزان بودن، نسبت به شتابدهنده‌های خطی و قابلیت خروج باریکه در انرژی‌های مختلف، شتابدهندهٔ مناسبی برای پروتون‌تراپی است. هم اکنون شتابدهنده‌های سینکروترن زیادی در امریکا و ارو پا و حتی در آسیا (ژاپن) وجود دارند. در اینجا سعی کرده‌ایم اصول اساسی یک سینکروترن را برای تولید باریکهٔ پروتون برای هدف درمان توضیح دهیم. همچنین، پارامترهای حفرهٔ RF را محاسبه می‌کنیم. با کمک این نوع شتابدهنده، پروتون‌ها را از ۳۰MeV تا ۲۵۰MeV با سختی مغناطیسی ۲,۴۳ Tm شتاب می‌دهیم. این طراحی مرکب از دو کمان آکروماتیک است. هر کمانْ باریکهٔ پروتون را به اندازهٔ ۱۸۰ درجه دوران می‌دهد. شبکهٔ طراحی‌شده شامل ۸ یاخته می‌باشد که هر یاخته شامل دو چهارقطبی مغناطیسی و یک شش‌قطبی و دو دوقطبی مغناطیسی است. توابع بتا از جمله پارامترهای اصلی برای طراحی شبکه است و به گونه‌ای بهینه شده است که شرایط لازم را برای استخراج باریکه برآورده نماید. پارامترهای توییسِ به‌دست‌آمده برای ساختار کانونی محاسبه‌شده توسط کد AGILE ارائه شده است. برای باریکهٔ پروتونی از یک حفرهٔ RF با ولتاژ تقریبی ۱۶۰ ولت و فرکانس ۲,۳ تا ۱۴ MHz استفاده شده است.

۲. تزریق‌کننده

سامانهٔ تزریق‌کننده شامل یک سیکلوترون 30MeV و یک چشمهٔ یونی 30KeV برای تولید باریکه یونی است. سیکلوترون ۳۰ مگا الکترون‌ولت موجود در کرج در بازهٔ عملیاتی ۶۵ MHz باریکهٔ پروتون را تا ۳۰ MeV شتاب می‌دهد. جریان باریکه ۳۰۰ میکرو آمپر و گسیلندگی (Admittance) آن برای جریان ۰,۲ میکروآمپر در قسمت خروج باریکه از شتابدهنده در جهات افقی و عمودی به ترتیب برابر 1.76×10^{-5} و 5.79×10^{-6} اندازه‌گیری شده است. همچنین گسیلندگی محاسبه‌شده در صفحهٔ طولی برابر با 1.6 eVs است. این مقدار از جریان با تعداد 1.25 e15 پروتون بر ثانیه مطابقت دارد که برای پروتون‌تراپی جریان نسبتاً زیادی است، بنابراین برای داشتن ذرات مورد نیاز برای درمان روش تزریق چند دور از سیکلوترون به سینکروترن طراحی شده اتخاذ می‌شود [۱].

۳. مدل سینکروترن

در سینکروترن طراحی‌شده برای این منظور محیط آن حدوداً ۴۹,۴ متر است، که ۱۲ عدد آهنربای خمشی با بیشینهٔ چگالی شار ۰,۶۳۷ تسلا استفاده شده است (شکل ۱). همچنین برای نصب

تزریق‌کننده و قطعهٔ خارج‌کننده و حفرهٔ RF، دو فضای آزاد بلند و و چهار فضای آزاد کوتاه تعبیه شده است. این مدل از سینکروترن دارای ساختار همگراکنندهٔ دوبل با پارامترهای اپتیکی متفاوت برای تزریق و خروج باریکه است. در این سینکروترن از یاختهٔ دوبل (Doublet) به عنوان هستهٔ تشکیل‌دهندهٔ شبکه استفاده شده است. دلیل عمده و اساسی استفاده از این هسته کوچک بودن آن و اشغال فضای کمتر است. به دلیل اینکه سینکروترن‌های پروتون‌تراپی اغلب اندازهٔ کوچکی نسبت به سینکروترن‌های صنعتی دارند و گهگاه در محیط‌های درمانی از قبیل بیمارستان‌ها استفاده می‌شوند، باید یاختهٔ مورد استفاده در آنها نیز فضای کمتری اشغال کند. در یاختهٔ رایج در شبکهٔ سینکروترن که تحت عنوان FODO شناخته می‌شود، فاصلهٔ اجزاء و آهنرباها زیاد است، که به گران‌تر بودن آن می‌انجامد. به همین منظور در سینکروترن مدنظر در این مقاله از یاخته دوبل استفاده می‌شود.

باریکهٔ پروتون را با تقریب خوبی می‌شود دایره‌ای در نظر گرفت یعنی $s_x = s_y$ یا به عبارت دیگر $\varepsilon_x = \varepsilon_y$. در این حالت، آرمانی‌ترین زاویهٔ فاز برای داشتن کوچکترین روزنه طبق محاسبات زیر برابر ۹۰ درجه است. از آنجا که، طبق روابط زیر شعاع باریکه متناسب با مجموع توابع بتا در بعد افقی و عمودی است، برای کمینه کردن روزنهٔ آهن‌رباها و کاهش هزینه، باید مقدار $\beta_y+\beta_x$ را کمینه کنیم [۲]. برای دستیابی به این هدف، فرض می‌کنیم $s_x = s_y$ و بنابراین

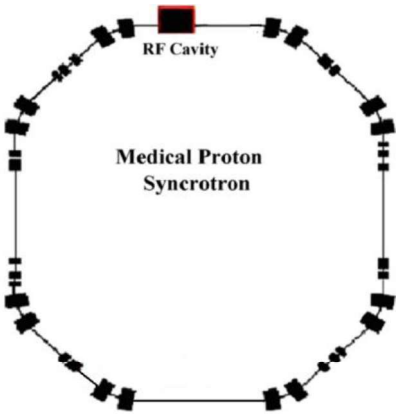
$$r^2 = e_x b_x + e_y b_y = e_x(b_x + b_y)$$

که با کمینه کردن رابطهٔ زیر به دست می‌آید،

$$b_x + b_y = \hat{b} + \overset{(}{b} = \frac{L(1+\sin\frac{m}{2}) + L(1-\sin\frac{m}{2})}{\sin m},$$

$$\frac{\mathrm{d}(\hat{b} + \overset{(}{b})}{\mathrm{d}m} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}m}\frac{2L}{\sin m} = 0, \quad \frac{-L}{\sin^2 m}\cos m = 0 \;\Rightarrow\; m = 90^\circ$$

سینکروترن برای اینکه می‌تواند ذرات باردار دارای انرژی‌های مختلف را شتاب دهد، در درمان سرطان به کار می‌رود. در هر شبکه از این سینکروترن، آهنربایی به شکل قطاع دایره به علت توزیع میدان ساده‌تر در مقایسه با آهنربای مستطیلی استفاده می‌شود. این محاسبات، با کدهای MAD [۳]و AGILE [۴] انجام شده است و نتایج شبیه‌سازی و محاسبات با استفاده از این کدها در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ طرحی از سینکروترن پروتون.

جدول ۱ خلاصهٔ پارامترهای اصلی شبکهٔ سینکروترن محاسبه‌شده با استفاده از کد.

محیط	۴۹/۴ متر
نوع شبکه	DOUBLET
طول قطعه بلند/کوتاه	۰/۷ و ۲/۴۸ متر
تعداد کل یاخته‌ها	۶
انرژی یون تزریق‌شده (MeV)	۳
انرژی یون خارج‌شده(MeV)	۲۵۰
طول دوقطبی	۲متر
طول چهارقطبی	۰/۵ متر
شعاع خمش	m۰/۵۲۳۶
بیشینه تابع β (H/V)	۷,۱۴۵ /۱۲,۳۵۱
کمینه تابع β (H/V)	۲,۶۹۳/۳,۷۲۵
کروماتیسیتی طبیعی H	-۱,۳۹۷
کروماتیسیتی طبیعیV	-۱,۳۹۷
کوک‌شوندگی Q_x/Q_y	۱,۵۴/۱,۴۴
انتقال گاما	۱,۵۱۳

انرژی باریکهٔ مورد نیاز برای یون‌تراپی دو کمیت سختی مغناطیسی باریکه و فرکانس چرخشی را در طراحی ماشین مشخص می‌کند [۵]. سختی مغناطیسی توسط رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود،

$$B_r = \frac{P}{q} = \frac{10^6}{nc} P[MeV/c] = \frac{10^6}{nc} b_y E_r[MeV] = \frac{10^6}{nc}\sqrt{E_k^2 + 2E_k E_r}$$

که در آن، P تکانهٔ ذره، q بار ذره، n بار ذره، E_k انرژی جنبشی ذره، E_r انرژی سکون ذره است. انرژی جنبشی به وسیلهٔ آهنگ عمق نفوذ دلخواه ذره تعیین می‌شود. اگر تکانهٔ ذره اندکی تغییر کند مدار حرکتی متناسب با آن به صورت زیر خواهد داشت،

$$a = \frac{P}{r}\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}P}$$

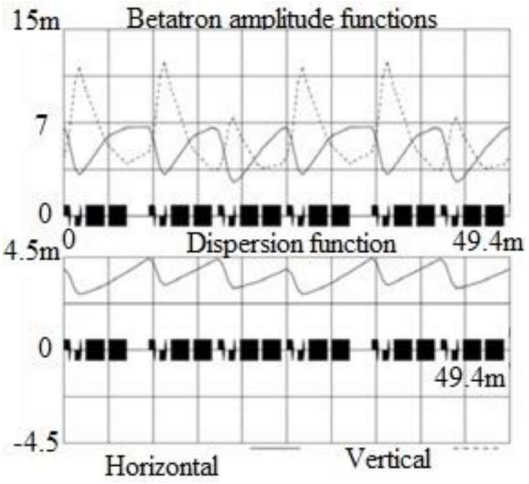
این عبارت فشردگی تکانه نامیده می‌شود که به وسیلهٔ میدان منحرف‌کننده به وجود می‌آید. در این رابطه، r شعاع فیزیکی سینکروترن است. اگر تکانهٔ ذره تغییر کند سرعت‌های مختلف هم خواهد داشت. نتیجهٔ این دو اثر به صورت تغییر فرکانس چرخشی بروز می‌کند،

$$h = \frac{P}{f_r}\frac{\mathrm{d}f_r}{\mathrm{d}P}$$

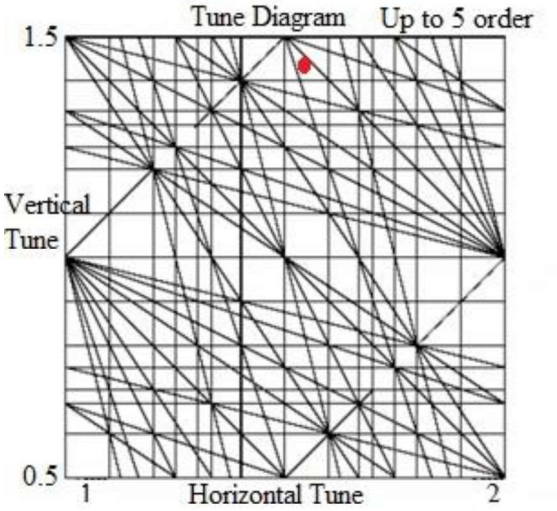
در این رابطه f_r فرکانس چرخشی در انرژی گذار $h = 0$ است [۲]. همچنین، در این نقطه داریم

$$g_{tr} = \frac{1}{\sqrt{a}}$$

در ماشین طراحی‌شده، داریم $\gamma<\gamma_{tr}$، یعنی همیشه زیر نقطهٔ گذار قرار دارد. این پدیده به علت کوچک بودن اندازهٔ ماشین طراحی‌شده است. پارامترهای توییس [۵] و منحنی کوک‌شوندگی [۲] این شبکه در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ پارامترهای توییس سینکروترن مدل‌شده.



شکل ۳ منحنی کوکِ سینکروترن تا مرتبهٔ ۵.

شکل ۲ نوسانات بتاترونی را در طول شتابدهنده نشان می‌دهد و همچنین توزیع تابع پراکندگی را که با استفاده از کد به دست آمده است.

۴. شتاب‌دهنده

باریکه را امواج رادیویی شتاب می‌دهد. برای افزایش انرژی باریکه باید بین فرکانس RF با تغییرات جریان در آهنرباهای خمشی و چهارقطبی همزمانی صورت گیرد. قبل از شتاب‌دهی، باریکهٔ یونی بر روی هماهنگ مرتبهٔ دوم فرکانس چرخشی سیکلوترون به عنوان تزریق‌کنندهٔ سینکروترن تنظیم می‌شود و این هماهنگ در طول فرایند شتاب ثابت باقی می‌ماند [۲]. برحسب نسبت بین سرعت ذره در تزریق‌کننده و خروجی از شتاب‌دهنده، فرکانس RF باید در بازهٔ ۲٫۳ تا ۱۴ مگا هرتز باشد،

$$w_s = \frac{n}{R}\sqrt{1 - \frac{1}{g^2}}$$

پهن‌شدگی تکانه $(\mathrm{D}P / P)$ بعد از فرایند خوشه‌سازی باریکه[1] حدوداً $\pm 0.2\%$ خواهد بود. برای جلوگیری از رشته‌رشته‌ای شدن باریکه[2] همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است [۲]، این عدد در نقطهٔ تزریق باریکه باید مطابق با حفرهٔ RF حدوداً ۱٫۸۱ الکترون‌ولت ثانیه باشد.

---

[1] Bunching
[2] Filamentation

شکل ۴ باریکهٔ کاملاً رشته‌رشته شده درون حفرهٔ RF.

ولتاژ مورد نیاز برای شتاب Vacc توسط زمان لازم برای فرایند شتاب‌دهی تعیین می‌شود، که این پارامتر وابسته به بیشینهٔ صعود میدان دوقطبی است، ($\mathrm{d}B/\mathrm{d}t = 0.425T/s$)، که این مقدار از صعود میدان با زمان شتاب ۱ ثانیه برای رسیدن به انرژی ۲۵۰ مگا الکترون‌ولت مطابقت دارد. برای این آهنگ افزایش میدان، حداقل ولتاژ ۱۶۰ ولت مورد نیاز است.

۵. تصحیح کروماتیسیتی

کروماتیسیتی اشاره به اثرات وابسته به تکانه دارد [۶]. این اسم از آنجا ناشی می‌شود که تکانهٔ یون مشابه فرکانس و رنگ در اپتیک کلاسیک عمل می‌کند. تابع پاشندگی که از دوقطبی‌های منحرف‌کننده برای یون‌های با تکانهٔ متفاوت به وجود می‌آید یک اثر کروماتیسیتی است، ولی معمولاً مفهوم کروماتیسیتی به آن ارجاع داده نمی‌شود. اثری که از تفاوت همگراکنندگی چهارقطبی به علت تفاوت تکانه به وجود می‌آید باعث تغییر فاز نوسانی بتاترونی باریکه یا کوک‌شدگی نسبت به تکانه می‌شود. این اثر که کروماتیسیتی نام دارد به طرق زیر نشان داده می‌شود،

$$Q' = \frac{\mathrm{D}Q/Q}{\mathrm{D}P/P} \quad \text{و} \quad Q' = \frac{\mathrm{D}Q}{\mathrm{D}P/P}$$

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

کروماتیسیتی ذاتی شبکهٔ‌سینکروترن طراحی‌شده به ترتیب در صفحات افقی و عمودی عبارتند از: ۱,۳۹۷ و ۱,۳۹۷–. کروماتیسیتی ذاتاً پدیدهٔ ناخوشایندی است چون در موارد شدید به ناپایداری باریکه و پراکندگی فرکانس می‌انجامد. برای تصحیح کروماتیسیتی معمولاً از آهنرباهای شش‌قطبی استفاده می‌شود. کروماتیسیتی از ابتدا تا انتهای طراحی بررسی و تصحیح می‌شود. پس از طراحی و اصلاحات کامل کروماتیسیتی، ردیابی باریکه در فضای فاز انجام می‌شود. بعد از ردیابی باریکه توسط کد رایانه‌ای، روزنهٔ دینامیکی کوچکتر از روزنهٔ فیزیکی آهنرباهاست و با وجود ۱۰۰۰ دور چرخش باریکه در سینکروترن هنوز حالت پایدار برای باریکه وجود دارد و ذرات نابود نمی‌شوند.

۶. شرح کدهای MADX و WINAGILE

برنامه طراحی شتابدهنده‌ها (Methodical Accelerator Design-MAD) روشمند است و قابلیت کاربرد برای شتابدهنده‌های دایره‌ای دارد. این کد در شتابدهنده‌های دایره‌ای در CERN از قبیل PS و SPS و LHC و در تعداد زیادی آزمایشگاه‌های دیگر به کار می‌رود.

داده‌هایی که ماشین را توصیف می‌کند به صورت ماژول‌هایی در حافظهٔ پویای سامانه نگهداری می‌شود و بر روی فایل‌های خارجی سرریز می‌شود. گرافیک آن به GKS متصل است و برای رسم مدارها و طیف فوریهٔ مدارهای ذرات به کار می‌رود. نرم‌افزار MAD قابل اجرا بر روی سامانه‌های Cray و IBM و Nord VAX است. موارد استفاده از کد MAD اینهاست: محاسبهٔ پارامترهای اپتیکی ماشین، شبیه‌سازی و اصلاح نقص‌ها و کاستی‌های ماشین، محاسبهٔ کمیت‌های دلخواه (Matching)، محاسبهٔ وضعیت دینامیکی باریکه، قابل استفاده برای رینگ و خطوط انتقال. این برنامه همچنین قادر به محاسبات مربوط به ردیابی ذرات و روزنهٔ دینامیکی و اثر بار فضایی است.

برنامهٔ (Windows Alternating Gradient Interactive Lattice design) موسوم به WINAGILE نیز کدی است که برای اهداف آموزشی در آزمایشگاه CERN نوشته شده است. این کد نیز همانند MAD در این مسائل استفاده می‌شود: محاسبهٔ پارامترهای اپتیکی ماشین، شبیه‌سازی و اصلاح نقص‌ها و کاستی‌های ماشین، محاسبهٔ کمیت‌های دلخواه (Matching)، محاسبات مربوط به ردیابی ذرات، روزنهٔ دینامیکی و اثر بار فضایی و عیوب مربوط به ماشین، همچنین هدر رفتگی نظام‌مند انرژی بر اثر تابش‌های سینکروترنی. کد WINAGILE قادر به رسم طرحی از شبکهٔ سینکروترن و همچنین دیاگرام کوک نیز می‌باشد.

۷. فهرست اصطلاحات

طول یاخته = L	شعاع شبکه = R
شعاع روزنه = r	فاکتور تراکم = A
دامنهٔ تابع بتاترون = β	گسیلندگی باریکه مربوط به مساحت فضایی که باریکه اشغال می کند = ε
پراکندگی فرکانس زاویه‌ای =η	فاز نوسانی باریکه = μ
سطح مقطع باریکه = σ	

۸. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پس از بررسی یاخته‌های پایهٔ مورد استفاده در طراحی شبکهٔ سینکروترن به منظور پروتون‌تراپی، شبکهٔ دوبل با دو آهنربای خمشی با شعاع خمش ۰٫۵۲۳۶ متر، به عنوان مناسب‌ترین

یاختهٔ پایه انتخاب شد. از مزایای این شبکه متراکم بودن و اشغال کمترین فضای ممکن است. چون این سامانه در مقابل سینکروترن‌های موجود کوچک است، همیشه زیر نقطهٔ عبور قرار دارد. با توجه به باریکهٔ موجود با گسیلندگی در بُعد طولی حدود ۱٫۶۲۲ الکترون‌ولت، سامانهٔ RF متناسب برای این کار باید فرکانسی در محدودهٔ ۲٫۳ تا ۱۴ مگاهرتز داشته باشد. همچنین، محاسبات مربوط به کروماتیسیتی در این تحقیق انجام شد و مقادیر ۱٫۳۹۷ و ۱٫۳۹۷- برای آن در بُعد طولی عمودی به دست آمد. برای اصلاح این کروماتیسیتی در دو بُعد افقی و عمودی شش‌قطبی‌هایی باید در مسیر باریکه درون شبکه تعبیه شود. تعدادی از پارامترهای شبکه برای یاختهٔ انتخاب‌شده محاسبه شده است. همچنین پارامترهای RF برای شتاب باریکه محاسبه شده است. برای تزریق باریکه به این مدل از سینکروترن روش تزریق چند دور بهترین گزینه است. محاسبات مربوط به تزریق باریکه و همچنین انتخاب روش مناسب برای درمان در دست بررسی است. در ادامهٔ این تحقیق، روش مناسب را برای خروج باریکه از سینکروترن مخصوص پروتون‌تراپی بررسی خواهیم کرد. روش مورد استفاده "استخراج کُند" است، که دلیل استفاده از آن، افزایش زمان خروج باریکه برای فرصت استفاده از باریکهٔ پروتون خروجی برای پروتون‌تراپی است. روش مورد استفاده در طراحی این سینکروترن روشی عمومی در طراحی همهٔ انواع سینکروترن‌ها از جمله سینکروترن‌های صنعتی است، با این تفاوت که در سینکروترن‌های صنعتی یاختهٔ غالب FODO است، که از یک چهارقطبی همگراکننده و فضای آزاد و یک چهارقطبی واگراکننده تشکیل شده است.

منابع

[1] Turner S., "CAS CERN ACCELERATOR SCHOOL FIFTH GENERAL ACCELERATOR PHYSICS COURSE", University of Jyvaskyla, Finland, 7-18 September 1992, VOL. II. ISSN 0007-8328, ISBN 92-9083-057-3 (1992).
[2] Bryant P. J. and Johnsen K., *The Principle of Circular Accelerators and Storage Rings*, (Camb University Press, 1993).
[3] Schmidt F., "MAD appendix", CERN Program library entry (T5001) CH-1211, Geneva 23, Switzerland (1990).
[4] Bryant P. J., "WINAGILE program", AC-Division. CERN, CH 1211, Geneva 23, Switzerland (2006).
[5] Turner S., "CAS CERN ACCELERATOR SCHOOL FIFTH GENERAL ACCELERATOR PHYSICS COURSE", University of Jyvaskyla, Finland, 7-18 September 1992, VOL. I. ISSN 0007-8328, ISBN 92-9083-057-3 (1992).
[6] Guiducci S., "Chromaticity", Proceeding of CAS 2007 (CERN Accelerator School), Frascati National Laboratories – INFN, Frascati, Italy (2007).