طراحی و شبیه سازی مگنت های خم کننده درسیستم خط تزریق باریکه از سیکلوترون۱۴MeV به سیکلوترون قطاع مجزای ۱۰۰MeV با استفاده از کد CST

خدادادی مهرآبادی،محمد* [۱]– بیگانه،علی[۲] –آفریده،حسین[۳]

[۱و۳] دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی وفیزیک ، گروه کاربرد پرتوها

[۲]سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

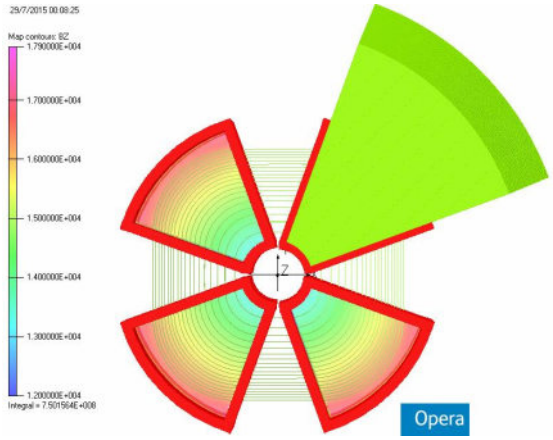
مگنت های خم کننده در سیستم خط تزریق باریکه از سیکلوترون ۱۴MeV به سیکلوترون قطاع مجزای ۱۰۰MeV با استفاده از کد CST طراحی و شبیه سازی شده است. در طراحی سیستم خط انتقال، باریکه به صورت شعاعی به شتاب دهنده‌ی اصلی وارد می شود. برای خم کردن باریکه و قرار دهی آن بر روی اولین مدار پایدار، به دو دستگاه مگنت خم کننده احتیاج می باشد. به منظور دست یابی به یک مدل اولیه، در ابتدا مگنت های خم کننده با استفاده از کد POISSON شبیه سازی شده اند. این مدل یک تقریب اولیه برای مدلی است که در مرحله ی بعد جزییات آن با استفاده از نرم افزار CST شبیه سازی شده است.

کلمات کلیدی: *سیکلوترون قطاع مجزا، خط تزریق باریکه، مگنت خم کننده، نرم افزار CST*

مقدمه :

درسال ۱۳۹۲ طراحی یک شتاب دهنده‌ی سیکلوترون قطاع مجزا در دستور کار دانشگاه صنعتی امیرکبیر قرار گرفت. این سیکلوترون قابلیت شتاب دهی به پروتون را تا انرژی ۱۰۰MeV خواهد داشت. مهمترین کاربردهای این شتاب دهنده پروتون تراپی و تولید باریکه‌ی یونی برای انجام تحقیقات فیزیک هسته‌ای است. طراحی مگنت این شتاب دهنده به صورت ۴ قطاع مجزا از یکدیگر انجام شده است. تولید میدان مغناطیسی در هر قطاع توسط سیم پیچ های مستقل از هم انجام می شود. این نوع پیکر بندی امکان متمرکز کردن باریکه در راستای عمودی در انرژی های بالا را فراهم می‌کند. شکل ۱ شبیه سازی مگنت های این شتاب دهنده به همراه مسیرهای بسته‌ی حرکت باریکه را در نرم افزار Opera-3d نشان می‌دهد [۱]. از آن جا که طراحی میدان مغناطیسی ای که با استفاده از آن بتوان ذره را از انرژی های بسیار پایین تا انرژی های بسیار بالا درون سیکلوترون خم کرد در عمل بسیار مشکل است، لازم است ذره در ابتدا با استفاده از یک پیش شتاب دهنده شتاب بگیرد و سپس به صورت شعاعی از طریق یکی از دره‌های شتاب دهنده‌ی قطاع مجزا وارد ناحیه‌ی

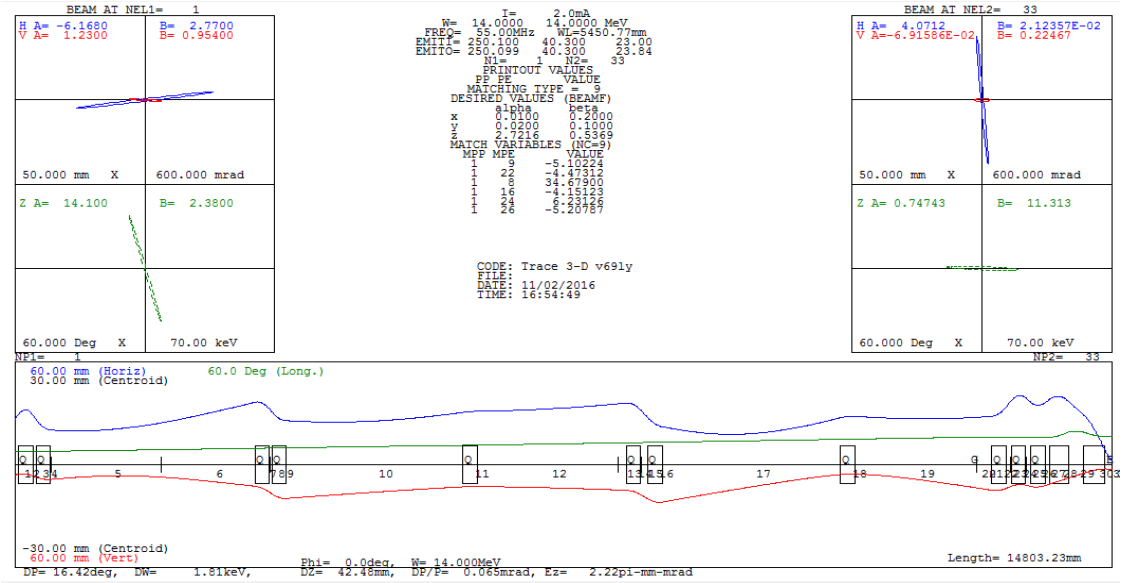
مرکزی شود و سپس از طریق مگنت های خم کننده وارد سیکلوترون ۱۰۰MeV شود. در این پروژه از یک شتاب دهنده‌ی سیکلوترون ۱۴MeV ساخت شرکت IBA به عنوان پیش شتاب دهنده استفاده شده است[۲].



شکل شماره(۱):شبیه سازی مگنت سی‌کلوترون قطاع مجزای ۱۰۰MeV با استفاده از نرم افزار Opera-3d.

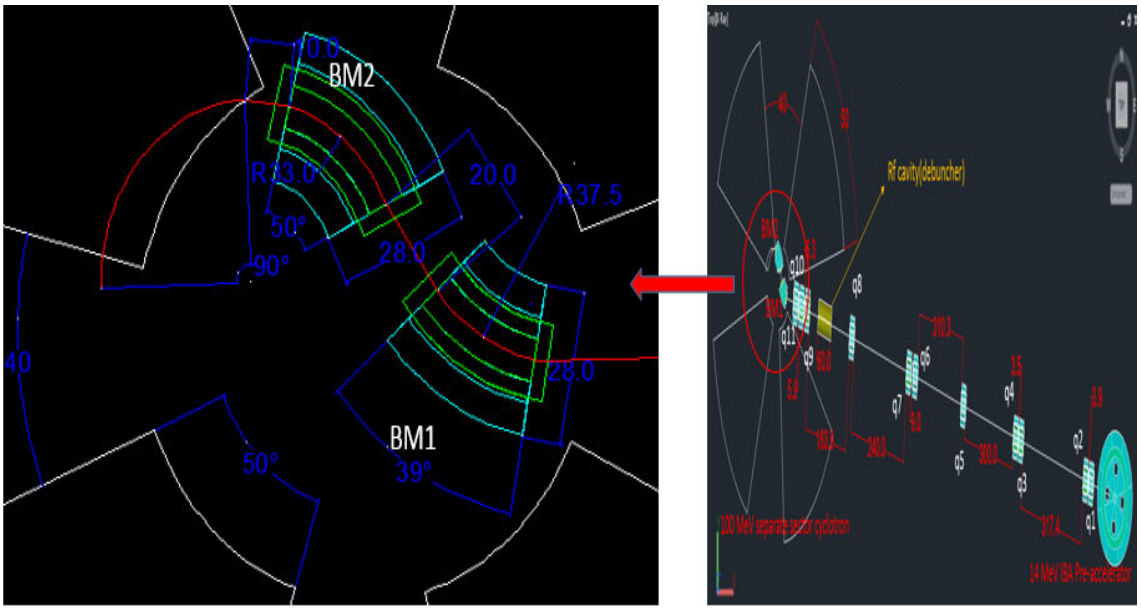
روش کار :

روش انجام این پروژه شامل محاسبه‌ی پارامترهای مورد نیاز باریکه به هنگام تزریق، انطباق باریکه‌ی پیش شتاب دهنده با باریکه‌ی مورد نیاز، طراحی سیستم خط انتقال و تزریق باریکه با استفاده از کد Trace، استخراج تعداد و مقادیر میدان مغناطیسی مگنت های خم کننده، تعداد چهار قطبی های مغناطیسی و فاصله ی آن ها از یکدیگر به همراه محاسبه‌ی گرادیان میدان مغناطیسی مورد نیاز برای متمرکز کردن باریکه و در نهایت شبیه سازی ابزارهای مورد استفاده در خط تزریق می باشد. شکل ۲ سیستم خط انتقال شبیه سازی شده با استفاده از کد Trace-3d را نشان می دهد[۳].



شکل شماره(۲):شبیه سازی سیستم خط تزریق باریکه با استفاده از کد Trace-3d.

در شکل ۳ سیستم تزریق باریکه به همراه چگونگی قرار گیری مگنت های خم کننده در ناحیه ی مرکزی سیکلوترون قطاع مجزا نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در ناحیه‌ی مرکزی این سیکلوترون، دو مگنت خم کننده وجود دارد که وظیفه‌ی خم کردن باریکه و قرار دادن آن بر روی اولین مدار پایدار را برعهده دارند. چیدمان این دو مگنت به گونه ای انجام شده است که مگنت شماره‌ی ۱ ذره را به صورت ساعتگرد و مگنت شماره ی ۲ ذره را به صورت پاد ساعتگرد در ناحیه ی مرکزی سیکلوترون اصلی بچرخاند. این مساله به کاهش اثر پاشیدگی باریکه به دلیل انحراف در انرژی ذرات کمک می کند.



شکل شماره(۳):نقشه‌ی طراحی سی‌ستم خط تزری‌ق باری‌که.

محاسبات اولیه

با توجه به محاسبات انجام شده با استفاده از کد Trace-3d و رابطه‌ی شماره‌ی ۱ که بیانگر سختی مغناطیسی است، ویژگی های مگنت های خم کننده تعیین و در جدول ۱ لیست شده اند.

$$B.r = \sqrt{\frac{T^2 + 2TE_0}{300z}} \qquad (۱)$$

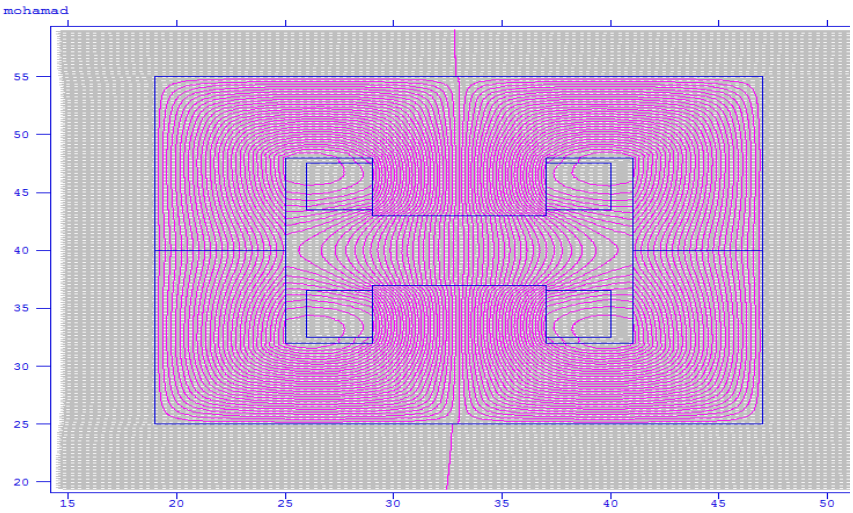
در این رابطه R شعاع قطب مگنت، B میدان مغناطیسی همزمانی، T انرژی جنبشی ذره، E_0 انرژی ذره در حال سکون و z بار الکتریکی ذره نسبت به بار الکترون است. از آنجا که گاف میانی کوچک بین قطب‌های مگنت باعث کاهش آمپر–دور لازم برای تولید میدان مغناطیسی در صفحه‌ی میانی می‌شود، قطر خارجی تیوپ خط انتقال که برابر با ۶ سانتی متر می باشد به عنوان گاف بین قطب های مگنت در نظر گرفته شده است تا توان مصرفی سیم‌پیچ ها تا حد ممکن کاهش یابد.

جدول شماره (۱): ویژگی های مگنت های خم کننده در ناحیه مرکزی.

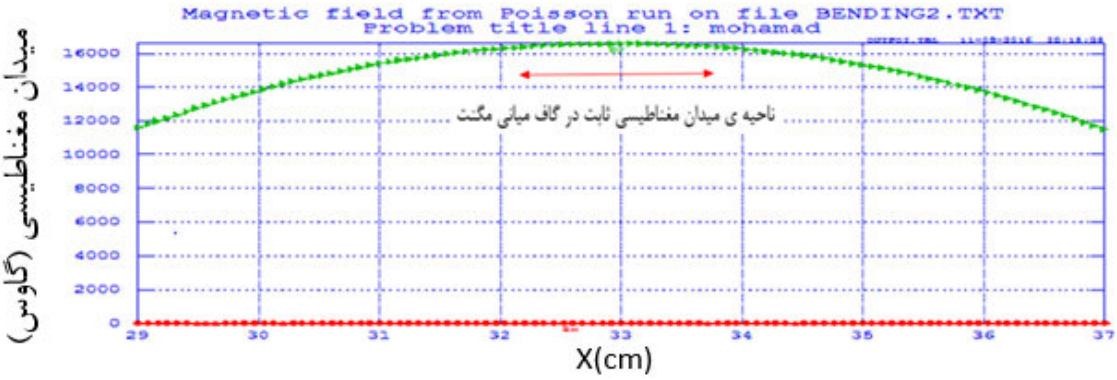
پارامتر	مگنت خم کننده شماره ۱	مگنت خم کننده شماره ۲
انرژی باریکه‌ی ورودی	۱۴ MeV	۱۴ MeV
زاویه خمش	۳۹ درجه	۵۰ درجه
میدان مغناطیسی مورد نیاز	۱/۴۴تسلا	۱/۶۴تسلا
شعاع خمش	۰/۳۷۵متر	۰/۳۳ متر
گاف بین قطب ها	۶ سانتی متر	۶ سانتی متر

شبیه سازی ۲ بعدی مگنت های خم کننده با استفاده از کد POISSON

پس از آنکه همه‌ی جنبه های نظری مدل در نظر گرفته شد، برای تعیین ابعاد مگنت، شکل سیم پیچ‌ها و میزان چگالی جریان مورد نیاز برای تولید میدان مغناطیسی مورد نیاز برای خم کردن باریکه در ناحیه‌ی مرکزی، شبیه‌سازی ۲ بعدی با استفاده از کد POISSON انجام گرفت. یکی از مهمترین مزایای این نوع محاسبات ۲ بعدی، امکان انجام مش بندی مثلثی بسیار ریز در حل مساله است که نهایتا منجر به نتایج دقیق تر، خصوصا روی نقاطی که اثرات موضعی ایجاد می کنند، می‌شود[۴]. برای بهینه کردن شکل سطح مقطع مگنت بر اساس ویژگی های میدان مغناطیسی مورد نیاز، یک فرآیند تکرار شونده با استفاده از این کد انجام گرفت. شکل ۴ سطح مقطع بهینه شده‌ی مگنت به همراه خطوط میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. در شکل ۵ نمودار میدان مغناطیسی در صفحه‌ی میانی مگنت بر حسب شعاع قطب مگنت نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، میدان مغناطیسی شبیه سازی شده بر روی شعاع خمش برابر با ۱/۶۴ تسلا است و علاوه بر آن میدان مغناطیسی در شعاع ۷/۵ میلی متری از شعاع چرخش کاملا ثابت مانده است.



شکل شماره(۴):سطح مقطع بهینه شده‌ی مگنت در کد POISSON.

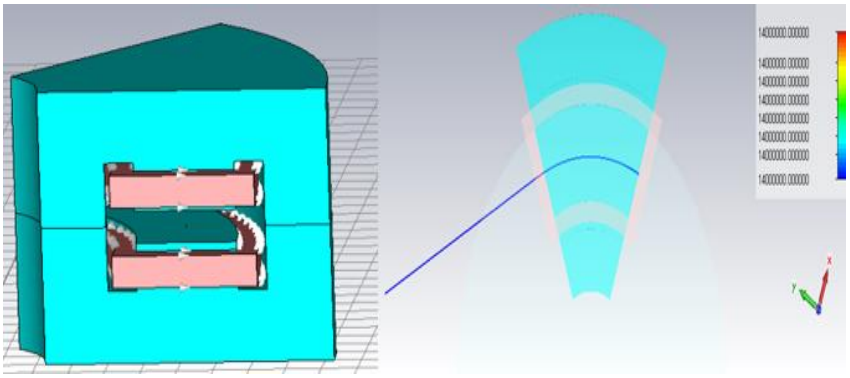


شکل شماره(۵):میدان مغناطیسی بر حسب شعاع قطب مگنت.

شبیه سازی ۳ بعدی مگنت های خم کننده با استفاده از نرم افزارCST

ازآنجا که شبیه‌سازی ۳ بعدی به مدل واقعی نزدیک‌تر است، در این مرحله شبیه‌سازی مگنت با جزییات کامل‌تری پیگیری شد. پس از آنکه سطح مقطع مگنت با استفاده از شبیه سازی ۲بعدی به دست آمد، طراحی سه بعدی قطاع‌های مگنت و سیم پیچ های آنها با استفاده از نرم افزارCST انجام شد و جنس مگنت ها استیل ۱۰۱۰- تعیین گردید. به دلیل مطابقت بیشتر مدل با مش‌بندی ۶ وجهی، در محاسبات میدان مغناطیسی از این نوع مش‌بندی استفاده شد[۵]. یک فرآیند پی در پی به منظور دست یابی به میدان مغناطیسی مورد نیاز برای خم کردن باریکه در ناحیه‌ی مرکزی، با در نظر گرفتن شرایط اشباع ماده‌ی مگنت انجام شد. در این فرآیند هندسه‌ی مدل به ویژه سطح قطب‌ها، گام به گام در نرم افزار AutoCAD تغییر کرد و نتیجه‌ی تغییر در نرم افزار CST تحلیل گردید. پس از آن، مدل به ماژول CST-particle tracking منتقل گردید و باریکه با انرژی

۱۴MeV و جریان ۲ میلی آمپر برای ورود به آن تعریف گردید. شکل ۶ مدل نهایی مگنت خم کننده‌ی شماره‌ی ۲ را برای سیستم خط تزریق باریکه نشان می دهد. چرخش باریکه درزاویه‌ی ۵۰ درجه در این شکل با استفاده از ماژول CST-particle tracking تایید گردید. مهمترین پارامترهای مگنت‌های طراحی شده برای ناحیه ی مرکزی سیستم تزریق باریکه در جدول ۲ لیست شده اند.



شکل شماره(۶):مدل نهایی مگنت خم کننده‌ی سی‌ستم تزری‌ق.

جدول شماره (۲): ویژگی های اساسی مگنت های خم کننده در ناحیه مرکزی.

پارامتر	مقدار برای مگنت شماره۱	مقدار برای مگنت شماره ۲
ارتفاع مگنت	۳۰ سانتی متر	۳۴ سانتی متر
طول مگنت	۲۸ سانتی متر	۲۸ سانتی متر
شعاع گاف بین قطب ها	۳۰ میلیمتر	۳۰ میلیمتر
ناحیه‌ی میدان با کیفیت	$-15mm \prec R \prec 15mm$	$-25mm \prec R \prec 25mm$
مرتبه ی خطای میدان مغناطیسی	10^{-4}	10^{-4}
میدان مغناطیسی در شعاع خمش	۱/۴۴تسلا	۱/۶۴ تسلا
تعداد آمپر– دور سیم پیچ ها	۱۴ کیلوآمپر– دور	۱۱ کیلوآمپر– دور
مساحت مقطع سیم پیچ	۴۰□۳۰ میلیمتر مربع	۴۰□۳۰ میلیمتر مربع
چگالی جریان سیم پیچ ها	۱۱/۶ آمپر بر میلیمتر مربع	۹/۱۶ آمپر بر میلیمتر مربع

بحث ونتیجه گیری :

طراحی و شبیه سازی مگنت های خم کننده‌ی سیستم خط انتقال باریکه از شتاب دهنده‌ی ۱۴MeV به سیکلوترون قطاع مجزای ۱۰۰MeV ارائه شد. در مرحله‌ی طراحی، از کد Trace-3d به منظور تعیین ویژگی های مگنت خم کننده در خط انتقال استفاده شد. پس از آن با استفاده از کد POISSON ، سطح مقطع مگنت و شکل سیم پیچ ها بهینه گردید. انجام شبیه سازی ۲ بعدی باعث بالارفتن سرعت شبیه سازی در مرحله‌ی بعدی شد. نهایتا جزئیات مگنت با استفاده از نرم افزارCST شبیه سازی و نتایج ارایه گردید.

مراجع :

[۱] بیگانه، علی، طراحی و شبیه سازی مگنت شتاب دهنده‌ی سیکلوترون قطاع مجزای ۱۰۰ مگاالکترون ولتی با استفاده از نرم افزار TOSCA ، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای گرایش کاربرد پرتوها، دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران،۱۳۹۴.

[2] W. Kleeven, "The IBA self extracting cyclotron project," in *NUKLEONIKA*, Louvain-La-Neuve, Belgium, 2003.

[3] k.R.Crandall, Trace-3d documentation, Los Alamos National Laboratory: Los Alamos, New Mexico 87545, 1997.

[4] LAACG, "User's guide for the POISSON/SUPERFISH groups of code," Los Alamous national laboratory, 1978.

[5] Computer Simulation Technology, CST EM studio manuall, Germany, http://www.cst.de.

[6] K. Wille, "The physics of particle accelerators," in An introduction, Dortmund, Oxford University Press, 1996, pp. 83-84.

پاسخ به سوالات داور محترم مقاله:

با عرض سلام و خسته نباشید خدمت داور محترم.

ضمن تشکر از جناب عالی به خاطر ارائه نظرات ارزشمندتان که حتما در بالابردن کیفیت مقاله موثر بوده است، در این متن تلاش شده است تا به سوالات شما نقطه به نقطه پاسخ داده شود. امید است که مورد توجه حضرتعالی قرار گیرد.

از زحمات شما کمال تشکر و امتنان را دارم.

۱- فرمت مقاله رعایت نشده است و هیچ کدام از اشکال و جداول زیر نویس و توضیحات ندارد.

پاسخ: زیر نویس کلیه ی شکل ها و جداول به همراه غلط های نگارشی تصحیح گردیدند.

۲ -در مورد اطلاعات اولیه و پایه طراحی از جمله کیفیت میدان و ناحیه مورد نیاز یکنواختی میدان اطلاعاتی داده نشده است.

کیفیت میدان مغناطیسی و ناحیه ی یکنواختی میدان درون جدول شماره ی ۲ قرار داده شده است.

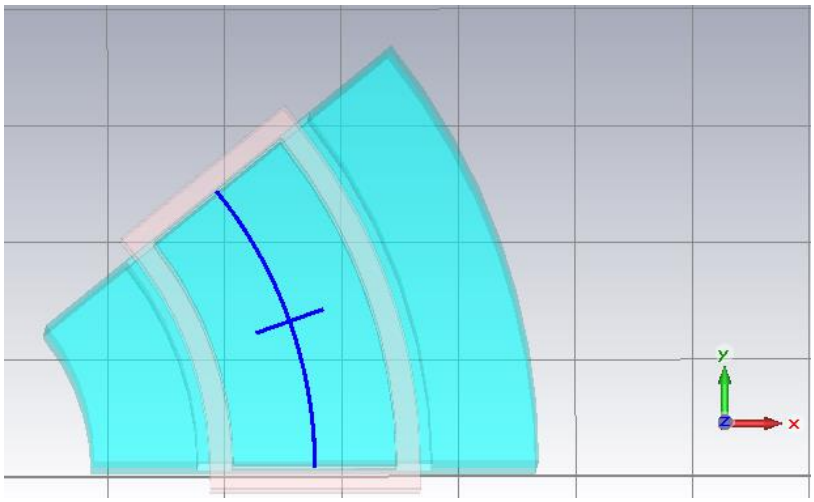
با توجه به فضای بسیار کم مقاله، امکان ارائه نمودارهای آن وجود ندارد.

بررسی کیفیت میدان مغناطیسی دو قطبی و تعیین محدوده‌ی پایدار میدان مغناطیسی در اطراف شعاع پایداری، از مهمترین مواردی است که لازم است انجام شود. مطابق تعریف، شعاع پایداری میدان مغناطیسی برای یک دوقطبی، شعاعی است از مرکز شعاع پایداری تا نقطه ای که در آن شرایط زیر برقرار باشد[مطابق مرجع زیر]:

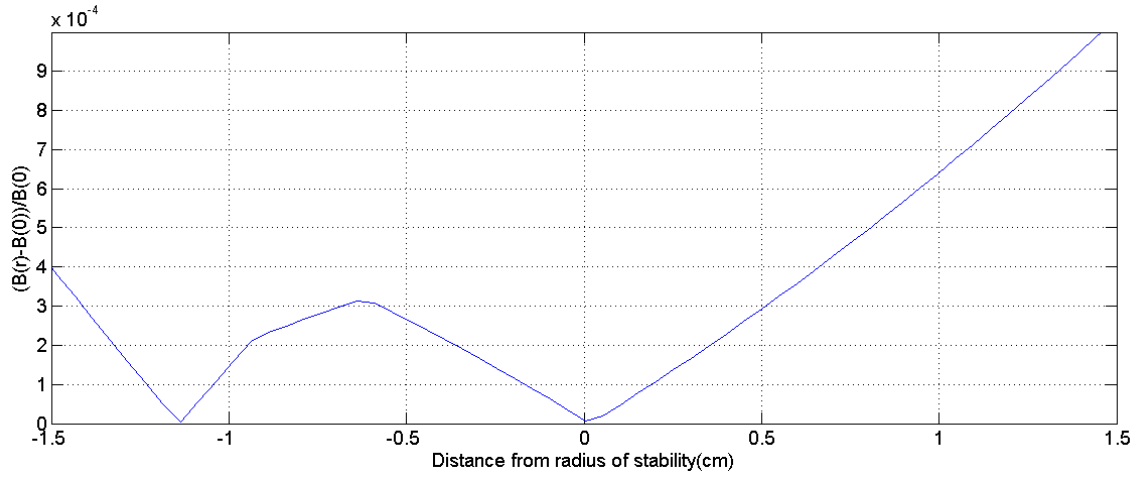
Th.Zickler,Basic design and engineering of normal-conducting,iron-dominated electromagnets,CERN,Geneva,Switzerland.

$$\frac{\Delta B}{B(0)} = \frac{B_z(r) - B_z(0)}{B(0)} \leq 10^{-4}$$

به منظور تعیین شعاع پایدار میدان مغناطیسی، همانگونه که در شکل زیر نشان داده شده است، خطی به طول ۳ سانتی متر در دو طرف مرکز شعاع پایداری رسم شد و میدان مغناطیسی روی این خط با استفاده از نرم افزار CST استخراج گردید.پس از آن مقادیر خطا در بازه ای که کمتر از 10^{-4} است، تعیین گردید. شکل زیر نمودار خطای میدان مغناطیسی را در اطراف شعاع پایداری نشان می دهد.با توجه به این نمودار، می توان محدوده ی میدان مغناطیسی با کیفیت برای این مگنت را در بازه ی $-15mm \prec R \prec 15mm$ تعیین کرد. این تحلیل داده برای مگنت شماره ی ۲ نیز انجام شده است و نتایج به جدول ۲ اضافه گردیده است.



استخراج داده های میدان مغناطیسی بر روی خط نشان داده شده.



خطای میدان مغناطیسی در اطراف شعاع پایداری.

۳- یکی از دوقطبی ها در مقاله طراحی شده است و هیچ توضیحی در مورد شباهت و یا تفاوت های الکتریکی هر دو مغناطیس آورده نشده است.

ویژگی های کلی هر دو قطبی در کنار هم در جدول ۲ لیست شده اند.

۴- در صورت تامین میدان مغناطیسی با کیفیت دلخواه در دو بعد نباید نیازی به باز طراحی مقطع قطب در سه بعد باشد! که در این مقاله در طراحی سه بعدی نیز مقطع قطب بهینه و بازطراحی شده است.
با توجه در اینکه در کد POISSON امکان تعریف دقیق ضریب تراوایی مغناطیسی مواد مختلف وجود ندارد، همواره نتایج آن هنگامی که ضریب تراوایی مغناطیسی ماده ی مگنت به طور دقیق به کد cst ارایه گردد، اندکی تغییر در نتایج ایجاد می شود. نتایج دو بعدی ای که با استفاده از کد poisson به دست می آیند همواره یک تقریب از مدل سه بعدی هستند که فقط باعث افزایش سرعت شبیه سازی در مرحله ی سه بعدی می شوند.
در این پروژه ضریب تراوایی ماده ی مگنت مستقیما از سازنده دریافت گردید و تغییرات آن با تغییر شار میدان مغناطیسی به نرم افزار CST ارایه گردیده است.

۵- سطح مقطع دوقطبی با لوله خلا کاملا در تماس است و ایا این مشکلی از لحاظ نصب ایجاد نمی کند؟
در طراحی اجزای این خط با مشورت با تیم طراحی مکانیکی اجزا، سایز گاف مگنت برابر با قطر خارجی تیوپ انتقال در نظر گرفته شده است و اندکی تلورانس برای جای دهی آسان تیوپ درون گاف مگنت های خم کننده و روزنه ی چهار قطبی ها ، بر روی ساخت تیوپ در نظر گرفته می شود.

۶- با توجه به استفاده از کد OPERA-3D در مقاله چه نیازی به طراحی با کد CST بوده است؟
برای رفع ابهام از این مساله لازم به توضیح است که کد OPERA-3D برای طراحی مگنت سیکلوترون قطاع مجزا به کار گرفته شده است. طراحی اجزای مغناطیسی در این پروژه در فاز اول با استفاده از نرم افزار cst و در فاز دوم با استفاده از کد opera-3d انجام می شود. این ترتیب برای مگنت سیکلوترون قطاع مجزای ۱۰۰ مگا الکترون ولت نیز رعایت شده است.

۷- در طراحی سه بعدی در مورد میدان مغناطیسی، کیفیت میدان ، زاویه ورودی و خروجی sector magnetهیچ اطلاعاتی داده نشده است.
میدان مغناطیسی، کیفیت میدان و محدوده ی پایداری میدان مغناطیسی در جدول ۲ لیست شده اند. علاوه بر این برای روشن شدن مساله نقشه ی مدل در نرم افزار Auto CAD ترسیم و در شکل شماره ی ۳ جایگزین شکل قبلی گردید.

۸-چگالی جریان دوقطبی ۱۱.۶ آمپر بر میلیمتر مربع گزارش شده است و چگالی بسیار بالایی در الکترومغناطیس هاست.

بیشینه ی چگالی جریان در طراحی مگنت شتاب دهنده ها به دلیل عملکرد با اطمینان بالا برابر با ۱۰ آمپر بر میلیمتر مربع است. اما برای طراحی اجزای خط انتقال از قبیل مگنت های خم کننده و sector magnet ها امکان بالا بردن جریان وجود دارد. به عنوان مثال در مقاله ی نوشته شده در مرجع زیر، سازنده ی مگنت اقدام به طراحی یک مگنت خم کننده برای تزریق به شتاب دهنده ی IPCR کرده است. در این مگنت، چگالی جریان ۵۲ آمپر بر میلیمتر مربع اختیار شده است. با توجه به فضای بسیار کم در ناحیه ی مرکزی سیکلوترون های قطاع مجزا، بالا رفتن چگالی جریان امری اجتناب ناپذیر است.

Y.Yano, "Beam injection and extraction system for the IPCR ssc," in *Proceedings of the 9th International Conference on Cyclotrons and their Applications*, Caen, France, 1981.