

تطبیق پذیری باریکه H^- در قسمت انرژی پایین و متوسط ماشین $Linac^4$ در سرن

معصومه یارمحمدی ستری^۱ و محمد لامعی رشتی^۲

۱. پژوهشکده ذرات و شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، بزرگراه ارتش، تهران

۲. سرن، ژنو، سوئیس

پست الکترونیکی: masoomeh.yarmohammadi.satri@cern.ch

چکیده

$Linac^4$ ماشین شتاب دهنده خطی تحت ساخت در سرن است که H^- را تا 160 MeV شتاب می‌دهد و در آینده نزدیک به عنوان تزریق کننده مجموعه ساختار شتابدهی پروتون در سرن، جانشین $Linac^2$ خواهد شد. $Linac^4$ تشکیل شده است از: چشمه یونی با انرژی 45 keV ، بخش انتقال دهنده باریکه انرژی پایین، $LEBT$ و شتاب دهنده RFQ با بسامد $352/2\text{ MHz}$ که باریکه را تا انرژی 3 MHz شتاب می‌دهد. سپس انتقال دهنده باریکه با انرژی متوسط، $MEBT$ ، قرار دارد که بخش قسمت کننده باریکه را شامل می‌شود و در تونل $Linac^4$ نصب و باریکه آن راه اندازی شده است. $LEBT$ شامل دو سیمولوله و جعبه اندازه‌گیری است. $MEBT$ از سه کاواک موج رادیویی و ۱۱ چهار قطبی مغناطیسی تشکیل شده است که وظیفه انتقال و تطبیق دادن باریکه خروجی از چشمه یونی، با حفظ ترتیب، به RFQ و DTL را اجرا می‌کند. در این مقاله فرایند تطبیق پذیری باریکه H^- خروجی از چشمه یونی 45 keV به RFQ و باریکه 3 MeV به DTL ارائه شده است. فاز راه اندازی باریکه در $MEBT$ با اندازه‌گیری گسیلندگی باریکه آماده برای تزریق به DTL با گسیلندگی متر از نوع شکاف- شبکه که در ادامه $MEBT$ نصب شده بود، تکمیل شد.

واژه‌های کلیدی: $Linac^4$ ، تطبیق پذیری باریکه، $LEBT$ ، $MEBT$ ، سیمولوله، چهار قطبی مغناطیسی، کاواک موج رادیویی

۱. مقدمه

درخشندگی^۳ ماشین را افزایش خواهد داد.

$Linac^4$ تشکیل شده است از:

۱. چشمه موج رادیویی حجمی، تولید کننده باریکه یونی با انرژی 45 keV .

۲. بخش انتقال دهنده باریکه انرژی پایین، $LEBT$ ، که از دو سیمولوله^۵ تشکیل شده است (شکل ۱. الف).

۳. شتاب دهنده چهار قطبی موج رادیویی، RFQ با بسامد

پروژه $Linac^4$ اولین قدم از پروژه ارتقاء سیستم تزریق کننده به ماشین برخورددهنده بزرگ LIU^1 ، در سرن می‌باشد. ماشین شتاب دهنده خطی $Linac^4$ در تونلی، ۱۲ متر زیر زمین تحت ساخت می‌باشد و یون H^- را در طول ۸۰ متر تا 160 MeV شتاب می‌دهد. این ماشین، جایگزین شتاب دهنده خطی $Linac^2$ خواهد شد و تزریق کننده پروتون به مجموعه شتابگرها در ماشین برخورد دهنده بزرگ، LHC^2 ، خواهد بود و

۳. Luminosity

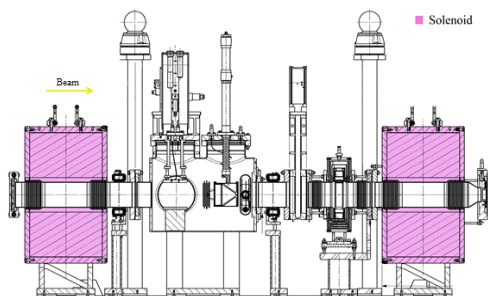
۴. Low Energy Beam Transport

۵. Solenoid

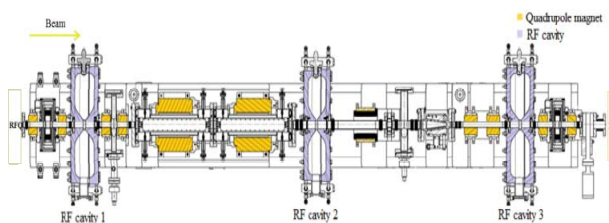
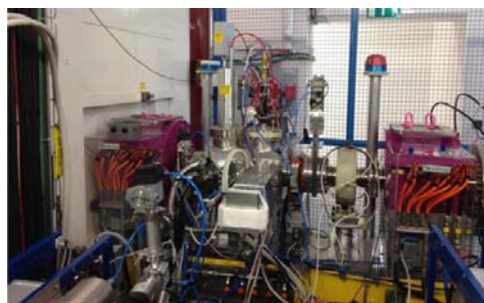
۶. Radio Frequency Quadrupole

۱. Large Hadron Collider injectors upgrade (LIU)

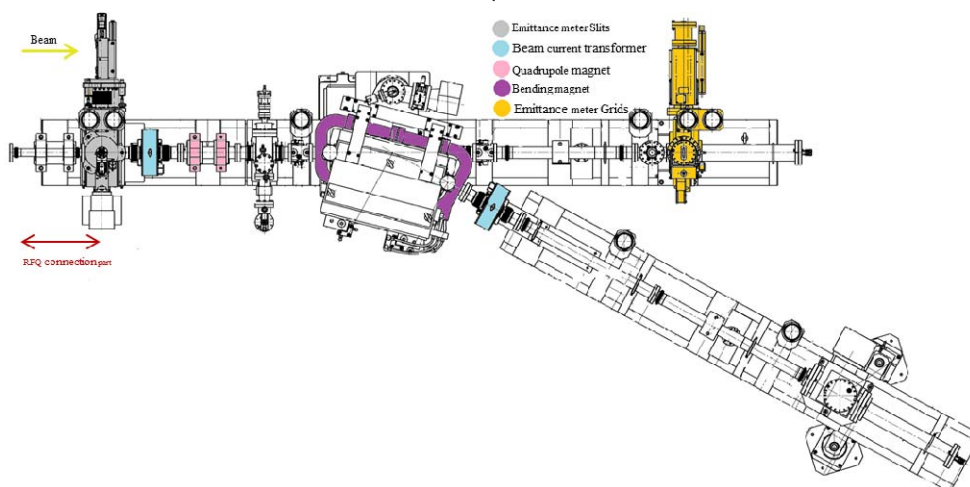
۲. Large Hadron Collider



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱. طرح‌واره و تصویر: (الف) LEBT، (ب) MEBT، (ج) میز اندازه‌گیری موقت.

۷. ساختار شتاب دهنده خطی PIMs^۲ که باریکه را تا ۱۶۰ MeV شتاب می‌دهد. راه اندازی ماشین شتاب دهنده Linac^۴ در تونل در سال ۲۰۱۳ آغاز شد و باریکه H⁻ با شدت ۱۵ mA برای راه اندازی و شتابدهی به ماشین تزریق شد. اندازه‌گیری باریکه با ابزارهای نصب شده بر روی میز اندازه‌گیری (شکل ۱. ج) که به صورت موقت در ادامه RFQ و

۳ MeV و انرژی ۳۵۲/۲ MHz

۴. بخش انتقال دهنده باریکه با انرژی متوسط، MEBT^۱ (شکل ۱. ب).

۵. شتاب دهنده خطی DTL^۳ با انرژی ۵۰ MeV.

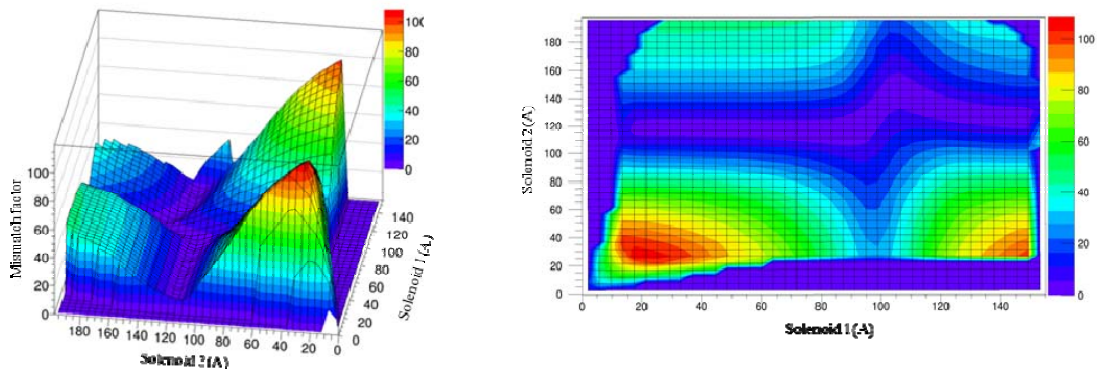
۶. شتاب دهنده خطی CCDTL^۳ با انرژی ۱۰۰ MeV.

۴. Pi-Mode Structure

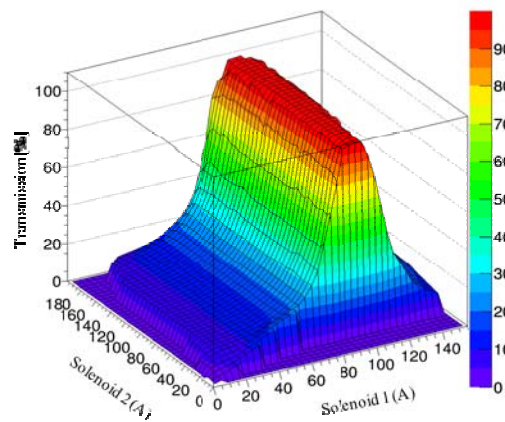
۱. Medium Energy Beam Transport

۲. Drift Tube Linac

۳. Cell-Coupled Drift Tube



شکل ۲. تغییرات کمیت عدم تطبیق باریکه با RFQ تابعی از قدرت دو سیمولوله LEBT در حالی که اثر فضا- بار ۱۵ mA در نظر گرفته شد.



شکل ۳. تغییرات میزان انتقال باریکه خارج شده از چشمه تا ورودی RFQ، تابعی از قدرت سیمولوله‌های LEBT در حالی که اثر فضا- بار ۱۵ mA در نظر گرفته شد.

۲. تطبیق باریکه 45 keV به شتاب دهنده RFQ

مهم‌ترین نقش LEBT، تطبیق و تزریق باریکه خروجی از چشمه یونی به شتاب دهنده RFQ می‌باشد. به این منظور، پارامترهای مشخصه باریکه توسط دو سیمولوله LEBT به مقدار قابل پذیرش توسط RFQ تغییر داده می‌شود. شبیه‌سازی بر روی قدرت سیمولوله بر حسب جریان، با هدف کمینه کردن کمیت عدم تطبیق^۴ و بیشینه کردن مقدار باریکه منتقل شده به ورودی RFQ انجام شد.

به منظور تولید بازه‌ای برای تغییر قدرت سیمولوله‌ها برای تزریق به هنگام راه اندازی باریکه، شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت: حضور (شکل ۲ و ۳) و عدم حضور (شکل ۴ و ۵) اثر فضا- بار^۵ بهینه

MEBT نصب شد، انجام پذیرفت. این میز از دو بازو تشکیل شده است که شامل تبدیل‌گر شدت جریان، BCT^۱، گسیلندگی متر از نوع شکاف- شبکه^۲ و تصویگر بسته‌های باریکه، BSM^۳ است. این مقاله نحوه تطبیق دادن باریکه به شتاب دهنده‌های نصب شده در ادامه چشمه، با حفظ ترتیب: RFQ و DTL را به استفاده از کد شبیه‌سازی v4.07 Travel [۱] و TrcaerD [۲] و Delta [۳] توضیح می‌دهد. اندازه‌گیری‌هایی به منظور مقایسه با نتایج شبیه‌سازی و اطمینان از تطبیق پذیری و تزریق باریکه به ماشین‌ها انجام شده است.

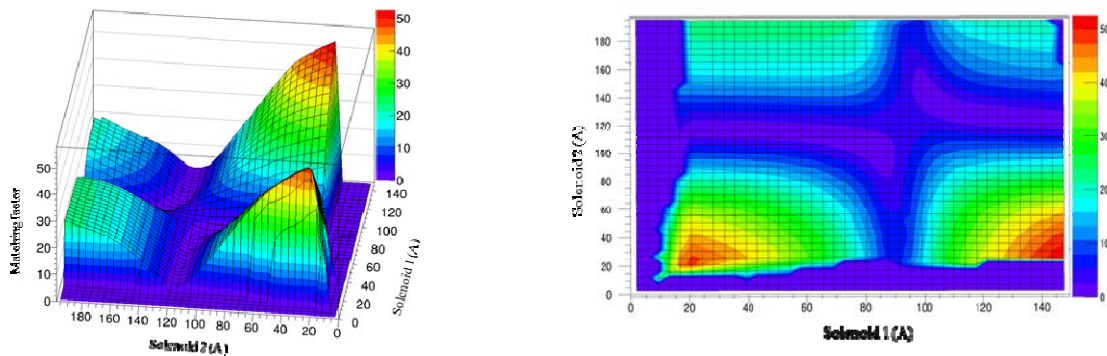
۱. Beam Current Transformer

۲. Slit-and-grid Emittance meter

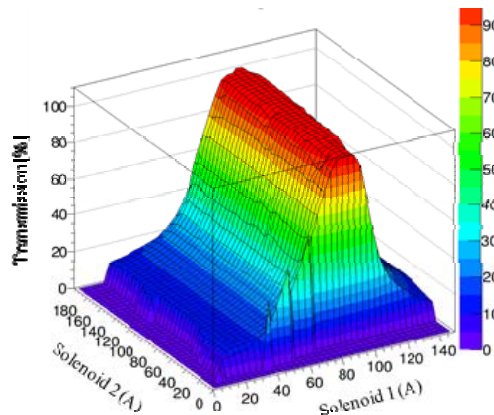
۳. Bunch Shape Monitor

۴. Mismatching factor

۵. Space charge



شکل ۴. تغییرات کمیت عدم تطبیق باریکه با RFQ تابعی از قدرت دو سیمولوله LEPT، در غیاب اثر فضا-بار.



شکل ۵. تغییرات میزان انتقال باریکه خارج شده از چشمه تا ورودی RFQ، تابعی از قدرت سیمولوله‌های LEPT، در غیاب اثر فضا-بار.

۳. تطبیق باریکه ۳ MeV به شتاب دهنده DTL

MEBT شامل ۱۱ چهارقطبی مغناطیسی و ۳ کاواک موج رادیویی^۲ است. این اجزاء به منظور انتقال و آماده کردن باریکه خروجی از RFQ برای تطبیق با صفحه عرضی، طولی و تزریق به ماشین شتاب دهنده DTL در ساختار Linac^۴ طراحی شده‌اند. در هنگام راه اندازی باریکه ۳ MeV و تزریق آن به شتاب دهنده DTL، به منظور کاهش پارامترهای تاثیرگذار، تطبیق پذیری و تزریق باریکه در دو مرحله اجرایی شد:

۳.۱. تطبیق باریکه به صفحه عرضی

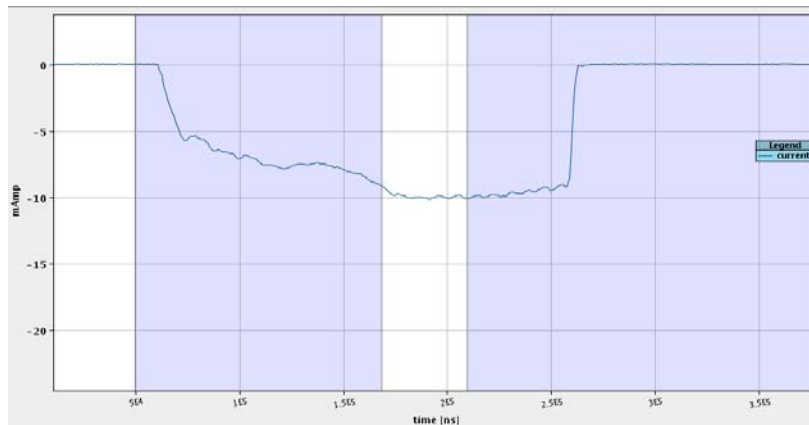
به منظور تزریق باریکه ۱۰ mA به DTL در شرایطی که کاواک‌های موج رادیویی غیرفعال نگه داشته شده و باریکه تنها تحت تاثیر چهارقطبی مغناطیسی است، تطبیق پذیری مورد

شد. پس از نصب RFQ و میز اندازه‌گیری موقت در ادامه LEPT در تونل Linac^۴، سیمولوله‌ها بر اساس مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله شبیه‌سازی تنظیم شدند. با توجه به توانایی انتقال ۷۰٪ باریکه تزریق شده به RFQ، جریان ۱۰ mA در نتیجه تطبیق و تزریق صحیح به RFQ به وسیله BCT نصب شده بر روی بازوی مستقیم میز اندازه‌گیری، نزدیک به خروجی RFQ، اندازه‌گیری شد (شکل ۶).

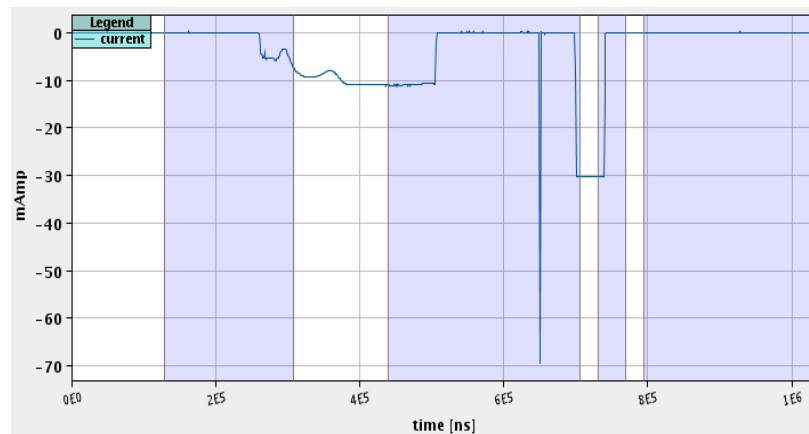
برای اطمینان از عملکرد RFQ در شتاب دادن باریکه‌ای از انرژی ۴۵ keV به ۳ MeV، دوقطبی خم کننده^۱ برای انحراف ذرات با انرژی ۳ MeV تنظیم شد. چنان که شکل ۷ نشان می‌دهد، جریان اندازه‌گیری شده به وسیله BCT موجود در بازوی خم شده میز اندازه‌گیری برابر با جریان خارج شده RFQ است.

۲. RF cavity

۱. Bending magnet



شکل ۶. اندازه‌گیری جریان باریکه 3 MeV خارج شده از RFQ، به وسیله BCT که روی بازوی مستقیم میز اندازه‌گیری موقت نصب شده است.



شکل ۷. جریان اندازه‌گیری شده با BCT که در ادامه دوقطبی خم کننده بر روی بازوی خمیده میز اندازه‌گیری نصب شده است.

۲.۳. تطبیق باریکه در صفحه عرضی و طولی

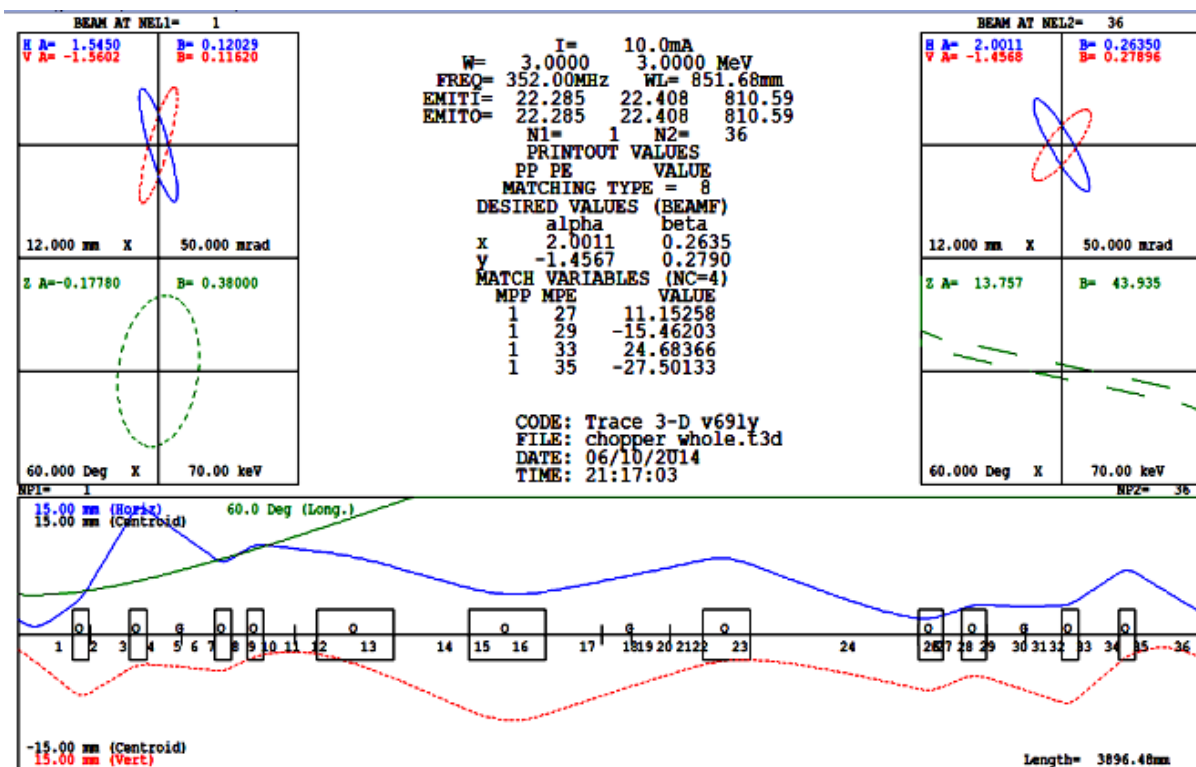
باریکه خروجی از RFQ تحت شرایطی که تمام اجزاء MEBT با مقدار ایده‌ال فعال باشند، شبیه‌سازی شده تا میزان قدرت اجزاء برای انتقال باریکه به ورودی DTL متناسب با مقدار قابل انتظار تعیین شود (شکل ۱۱).

شکل ۱۲ تصویر فضای فاز طولی باریکه منطبق شده به DTL را در هنگام فعال بودن کاواک‌ها و شرایط ایده‌ال MEBT برای تطبیق پذیری نشان می‌دهد. باریکه تزریق شده به DTL در راستای این ماشین شبیه‌سازی شد و چنان که از شکل ۱۲ قابل انتظار بود، باریکه در راستای این ماشین شتاب دهنده ساختار دوره‌ای دارد (شکل ۱۳).

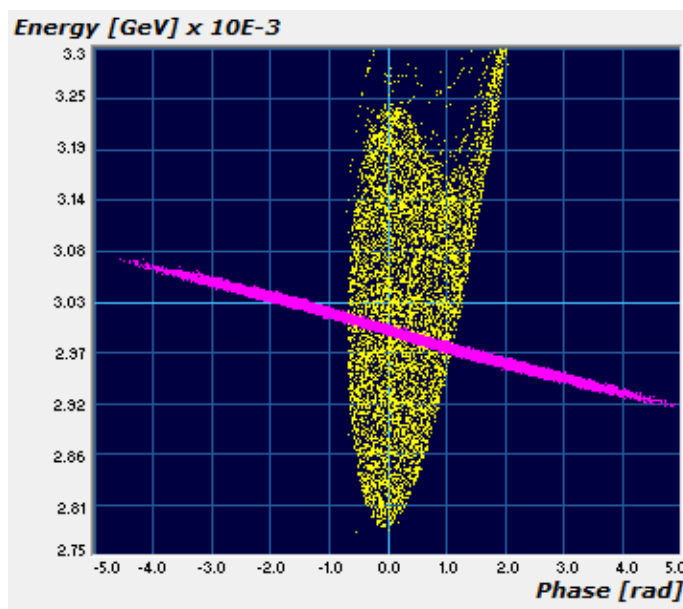
بررسی قرار گرفت. برای تغییر مشخصه باریکه^۱ خروجی از RFQ و تطبیق آن با مقدار قابل پذیرش توسط DTL [۴]، قدرت چهار قطبی‌ها با استفاده از برنامه Trace۳D، شبیه‌سازی شد (شکل ۸).

شکل ۹ تصویر فضای فاز طولی باریکه منطبق شده به DTL را در هنگام غیرفعال بودن کاواک‌های MEBT نشان می‌دهد. باریکه تزریق شده به DTL در راستای این ماشین شبیه‌سازی شده و چنان که از شکل ۹ قابل انتظار بود، بخشی از باریکه در راستای این ماشین شتاب دهنده از دست می‌رود (شکل ۱۰).

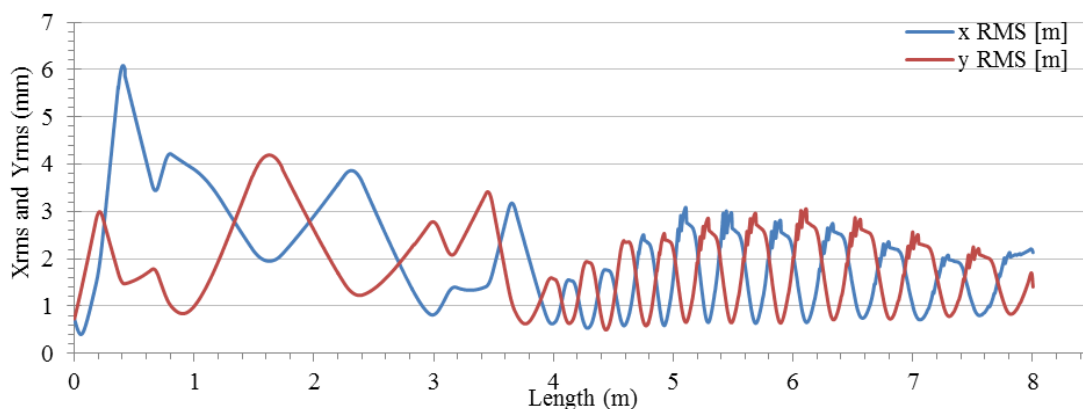
۱. Twiss parameters



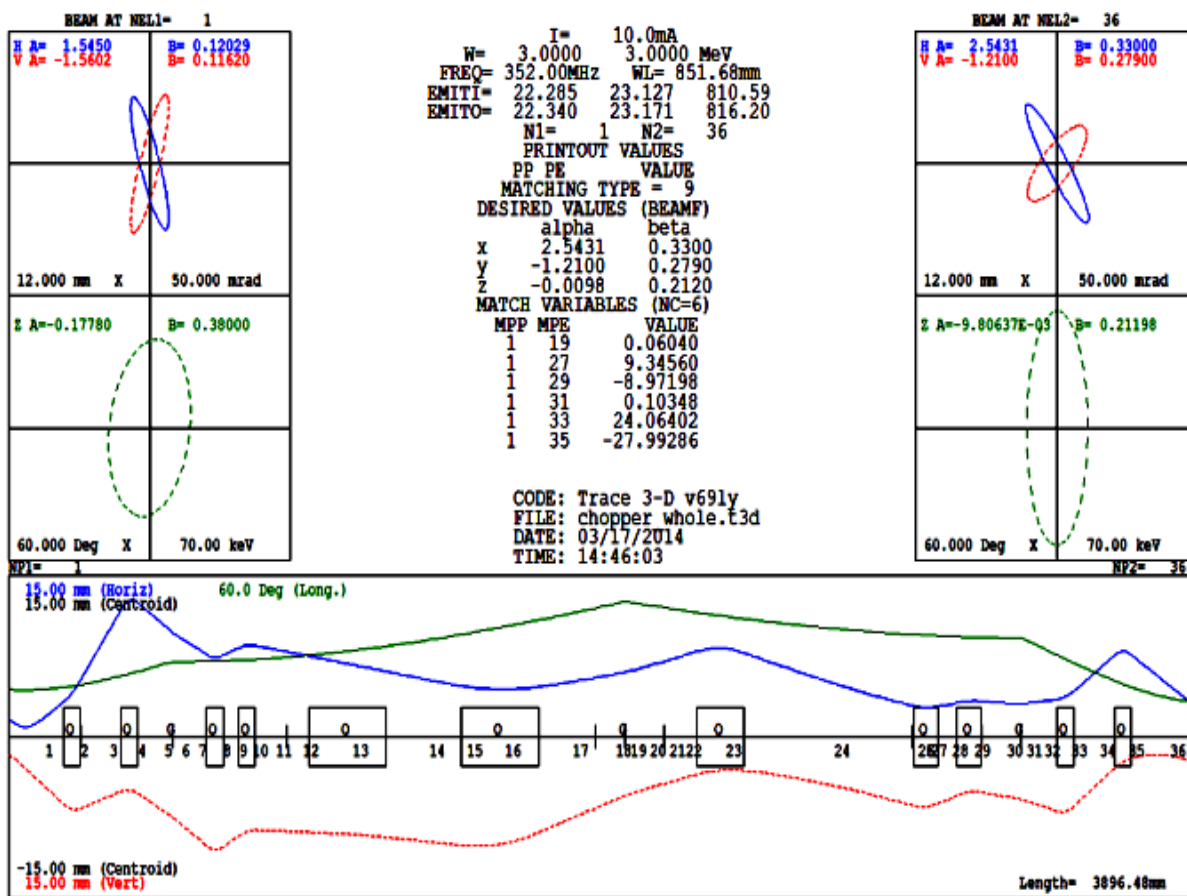
شکل ۸. تصویر Trace 3D در حالی که قدرت چهار چهارقطبی آخر MEBT در شرایط کاواک‌های موج رادیویی غیرفعال برای تطبیق باریکه خروجی RFQ به DTL مشخص شده است.



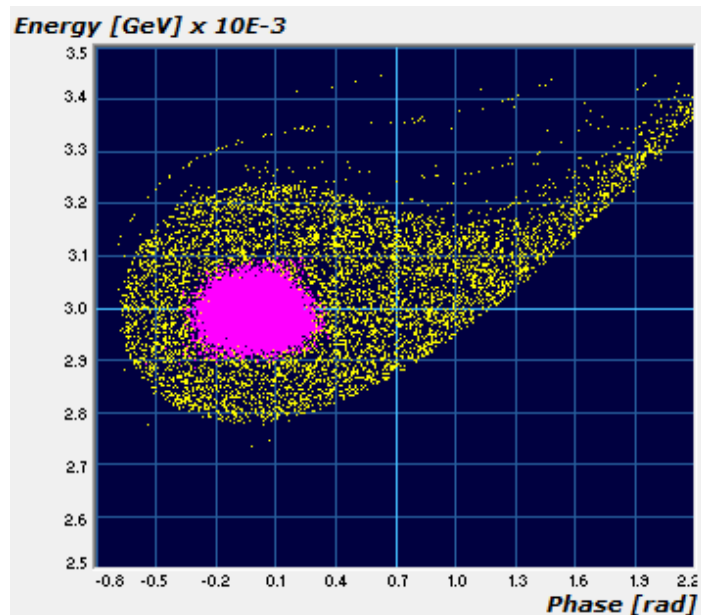
شکل ۹. پذیرفتاری طولی DTL (زرد) با فضای فاز طولی مربوط به باریکه ورودی به DTL (صورتی) مقایسه شده است. باریکه خروجی از RFQ در شرایطی با DTL منطبق شده است که کاواک‌های موجود در MEBT غیرفعال بودند.



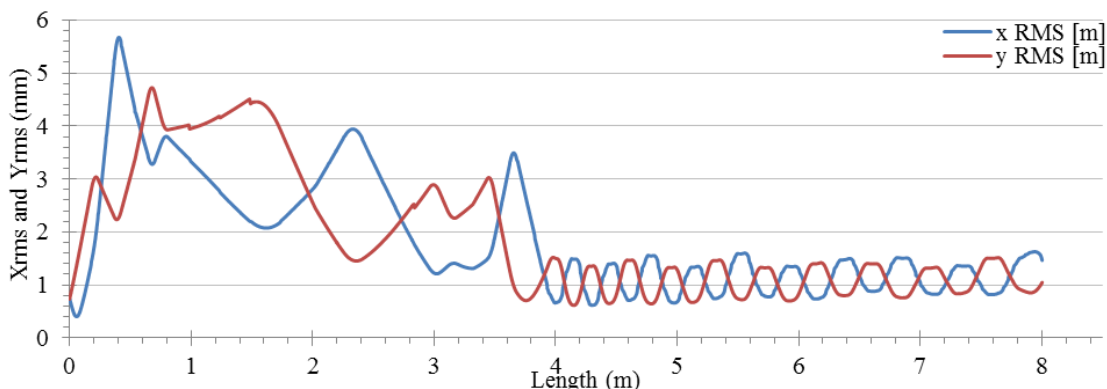
شکل ۱۰. پوشه باریکه در امتداد MEBT و اولین تانک DTL. باریکه خروجی از RFQ در شرایطی با DTL منطبق شده است که کاواک‌های موجود در MEBT غیرفعال بودند.



شکل ۱۱. تصویر Trace 3D در حالی که مقادیر چهار، چهارقطبی آخر MEBT و کاواک‌های موج رادیویی برای تطبیق کامل باریکه خروجی RFQ به DTL مشخص شده است.



شکل ۱۲. پذیرفتاری طولی DTL (زرد) در مقایسه با فضای فاز طولی مربوط به باریکه ورودی به DTL (صورتی) در شرایطی که کاواکهای MEBT فعال بودند.



شکل ۱۳. پوشه باریکه در امتداد MEBT و اولین تانک DTL در حالی که باریکه خروجی از RFQ تحت شرایط ایده‌آل MEBT برای تطبیق پذیری و تزریق به DTL تنظیم شده است.

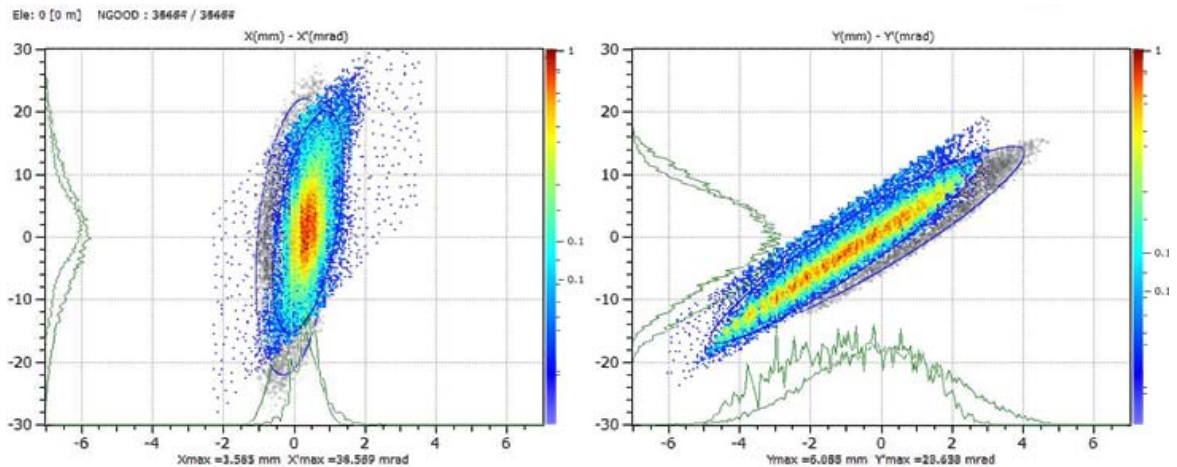
پیش از جابه‌جایی میز اندازه‌گیری و اتصال ماشین DTL در

ادامه MEBT، به منظور اطمینان از تزریق صحیح باریکه به DTL، اجزاء MEBT بر طبق مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی، شکل ۱۱، تنظیم شدند و تصویر فضای فاز عرضی باریکه با استفاده از گسیلندگی متر شکاف- شبکه در ابتدای DTL اندازه‌گیری شد. شکل ۱۴ توافق خوبی بین باریکه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در ورودی DTL را نشان

می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

شرایط تزریق باریکه H⁻ به LEPT و MEBT مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های مورد نیاز جهت پیش‌بینی قدرت اجزاء موجود در LEPT و MEBT به منظور تطبیق باریکه با ماشین‌های شتاب دهنده نصب شده در ادامه هر یک با استفاده



شکل ۱۴. فضای فاز عرضی باریکه (رنگی) در مقایسه با باریکه شبیه‌سازی شده در ورودی DTL در حالی که اجزاء MEBT برای تطبیق پذیری ایده‌آل باریکه خروجی RFQ به ورودی DTL تنظیم شده‌اند [۵].

سپاس‌گزاری

این مقاله از پایان‌نامه دکتری نویسنده اول این مقاله استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از اعضای گروه دینامیک و راه‌اندازی باریکه $Linac^4$ سرن اعلام نمایند.

از برنامه‌های شبیه‌سازی انجام پذیرفت. اندازه‌گیری‌های انجام شده با استفاده از BCT و گسیلندگی متر از نوع شکاف- شبکه که در زمان راه‌اندازی باریکه به طور موقت در تونل $Linac^4$ نصب شدند، بیانگر تشابه بسیاری خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری است. $Linac^4$ آمادگی لازم برای نصب شتاب دهنده بعدی، DTL، و تزریق باریکه 3 MeV به آن را کسب کرد.

مراجع

1. A Perrin, J-F Amand, T Mütze, J-B Lallement, and S Lanzone, "CERN TRAVEL v4.07 user manual", (April 2007).
2. K R Crandall and D P Rusthoi, "TRACE 3-D Documentation", Third edition, (May 1997).
3. T Mütze and S Lanzone, "Delta user manual", (April 2007).
4. M Yarmohammad Satri *et al.*, "Beam Matching to the CERN Linac4 Drift Tube Linac during the beam commissioning at 3 MeV", 22th IPM physics spring conference.
5. A M Lombardi, "Commissioning of the low-energy part of Linac4", Proceedings of LINAC2014, Geneva, Switzerland, (August-September 2014).