مروری بر اندازه گیری چهارقطبی های پارامغناطیس لینک ۴ در سرن

*کسایی، سمیرا [۱]- لامعی رشتی، محمد[۲]

[۱]پژوهشگاه دانشهای بنیادی، پژوهشکده ذرات و شتابگرها

[۲]پژوهشگاه دانشهای بنیادی، پژوهشکده ذرات و شتابگرها

چکیده:

لینک ٤، یک شتابدهنده‌ی خطی برای شتابدهی به یون‌های هیدروژن منفی در سرن است. این تزریق کننده‌ی خطی با انرژی *MeV* ۱٦۰ و بسامد *HzM* ۳۵۲ کار می‌کند. این شتابدهنده شامل تقریبا ۱۲۰ آهنربای چهارقطبی پارامغناطیس است. سیم‌پیچ چرخان و سیم کشیده برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مغناطیسی این آهنرباها با دقت بالا استفاده می‌شود. موضوع این مقاله بررسی چالش های اندازه گیری انتگرال گرادیان، کیفیت میدان، آفست و جهت محور مغناطیسی این آهنرباهاست. اثر خطاهای سیستماتیک با اندازه‌گیری در آرایش‌های مختلف کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: *آهنربای چهارقطبی پارامغناطیس، سیم پیچ چرخان، محور مغناطیسی، مولفه ی چندقطبی*

مقدمه :

لینک ٤، از یک چشمه‌ی هیدروژن منفی، چهارقطبی بسامد رادیویی، شتابدهنده‌ی خطی لوله رانشی[۱]، شتابدهنده‌ی لوله رانشی سلول جفت شده[۲] و شتابدهنده‌ی مد پی تشکیل شده است. شتابدهنده‌ی لوله رانشی یک ساختار ۱۹ متری متشکل از سه تانک است که با ۱۰۹ چهارقطبی پارامغناطیس تجهیز می‌شود [۱]. انتگرال گرادیان این آهنرباها در گستره‌ی Tm/m ۱/۲ تا Tm/m ۲/٤ است. شعاع روزنه‌ی این آهنرباها mm ۱۱ است و از نظر طولی به دو دسته‌ی mm ٤٥ در تانک اول و mm ۸۰ در تانک‌های دوم و سوم تقسیم می‌شوند [۲].

یکنواختی انتگرال گرادیان $\Delta\int Gds/\int Gds$ برای تمام هارمونیک‌ها تا مرتبه‌ی۱۰ داخل دایره‌ای به شعاع mm ۷/۵ باید بهتر از ۱٪ باشد. در شتابدهنده‌های خطی، باریکه‌ی ذرات از هر آهنربا تنها یک بار عبور می‌کنند و بنابراین اثرات غیر خطی هارمونیک‌های بالاتر کوچکتر است. آفست محور مغناطیسی و خطای جهت میدان این چهارقطبی‌ها به ترتیب باید کمتر از mm ۰/۱ و mrad ۱ باشد.

دراین مقاله ابتدا روش اندازه‌گیری این آهنرباهای پارامغناطیس را بر پایه‌ی سیم‌پیچ چرخان توصیف می‌کنیم. سیم‌پیچ چرخان براساس قانون القای فارادی کار می‌کند. شار مغناطیسی در سیم‌پیچ اندازه‌گیری تغییر می‌کند

---

[۱] Drift tube linac
[۲] Cell-Coupled drift tube linac

و ولتاژ القایی به سیستم جمع‌آوری داده (انتگرال‌گیر یا ولت‌سنج) منتقل می‌شود. از شار اندازه‌گیری شده و پارامترهای سیم‌پیچ میدان تعیین می‌شود. تعدادی از آهنرباها با سیستم سیم کشیده نیز اندازه‌گیری شده‌اند. به دلیل خطاهای ناشی از تاثیر هارمونیک‌های بالاتر در سیستم سیم کشیده، کالیبراسیون انجام شده برای یک چهارقطبی با خطای متوسط ۰/۳٪ برای دیگر چهارقطبی‌ها معتبر است.

سپس نشان می‌دهیم چگونه با اندازه‌گیری در آرایش های مختلف اثر آفست‌های سیستماتیک سیستم سیم-پیچ چرخان حذف می‌شود. در نهایت نتایج آزمایش شامل انتگرال گرادیان و مولفه‌های هارمونیک میدان، محور مغناطیسی و جهت میدان را خلاصه خواهیم کرد.

روش اندازه‌گیری مغناطیسی:

اندازه‌گیری این آهنرباها به دلیل روزنه‌ی کوچک آن‌ها چالش برانگیز است. عمدتا اندازه‌گیری با استفاده از یک سیم‌پیچ چرخان (شکل ۱) به قطر ۱۹ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر انجام می‌شود [۳]. این سیم‌پیچ دارای زاویه‌ی گشودگی ۰/۷٤ رادیان متناظر با حساسیت صفر بین هارمونیک‌های مرتبه هشت و نه (و مضارب صحیح آن‌ها) است. این انتخاب، حساسیت قابل قبول این سیم‌پیچ به هارمونیک‌ها تا مرتبه‌ی هفت را تضمین می‌کند. دقت اندازه‌گیری هارمونیک‌ها به دقت پارامترهای هندسی سیم‌پیچ یعنی مساحت و شعاع آن وابسته است. این پارامترها از کالیبراسیون استاندارد و روش دقیق‌تر کالیبراسیون در محل آهنربا در آزمایشگاه I8 در سرن به دست آمده اند. [٤ و ٥].

شکل ۱ نیمکت سیم‌پیچ چرخان برای آزمایش یک آهنربای چهارقطبی پارامغناطیس را نشان می‌دهد. نیمکت آزمایش شامل یک موتور با سرعت چرخش یک دور در ثانیه است. اگرچه در سرعت‌های بالاتر، سیگنال ولتاژ قوی‌تر است اما ناپایداری مکانیکی سیستم چرخان افزایش می‌یابد و تکرارپذیری نتایج کاهش می‌یابد. تغییرات سرعت سیم‌پیچ در طول چرخش نتایج را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد زیرا سیگنال ولتاژ با استفاده از یک رمزگذار زاویه‌ای با دقت بالا و با نرخ 2^{17} نمونه در دور انتگرال‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری‌ها هشت تا ۱۰ بار متوالی تکرار می‌شوند و نتایج متوسط گیری می‌شود تا تاثیر خطاهای تصادفی کاهش یابد.

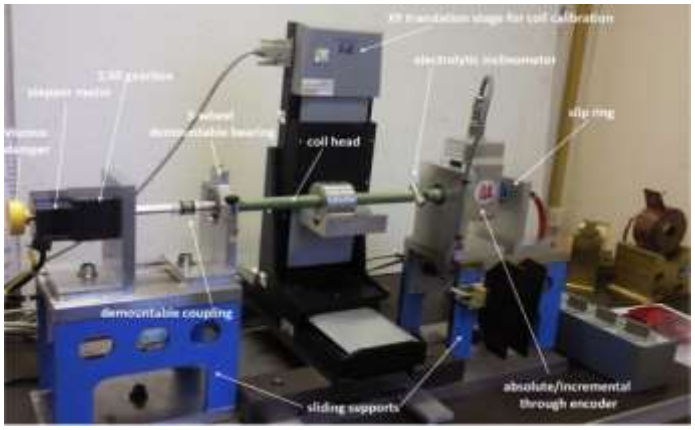
از آنالیز داده‌های شار با تبدیل فوریه، پارامترهای میدان مانند شدت میدان مغناطیسی و مولفه های چندقطبی به‌دست می‌آید. شار مغناطیسی خروجی از سیم‌پیچی به طول L_c و تعداد دور N_t. از رابطه‌ی زیر بدست می-آید:

$$\Phi = Re\left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{R_{ref}^{n-1}} k_n e^{in\theta}\right] \qquad (۱)$$

در این رابطه ضرایب C_n مولفه های چند قطبی میدان هستند و ضرایب حساسیت سیم‌پیچ K_n با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$k_n = \frac{N_t L_c}{n}\left[\left(R_0 + i\frac{W_{eff}}{2}e^{i\alpha}\right)^n - \left(R_0 - i\frac{W_{eff}}{2}e^{i\alpha}\right)^n\right]e^{in\varphi_0} \qquad (۲)$$

در این رابطه R_0 و W_{eff} شعاع متوسط و پهنای موثر سیم‌پیچ است. دو زاویه‌ی φ_0 و α به ترتیب فاز اولیه و زاویه‌ی کجی سیم‌پیچ است [٦].



شکل شماره (۱) نیمکت اندازه‌گیری آهنرباهای چهارقطبی پارامغناطیس با سیم‌پیچ چرخان.

علاوه بر انتگرال گرادیان و مولفه‌های هارمونیک، محور مغناطیسی نیز با سیم‌پیچ چرخان اندازه‌گیری می‌شود. به ویژه تلرانس ۰/۱ میلی‌متر برای محور چهارقطبی باید رعایت شود زیرا عملا بعد از نصب آهنرباها داخل لوله رانشی امکان تنظیم مکانیکی وجود ندارد. این اندازه‌گیری به دلیل فقدان هدف‌های ثابت[۱] یا سطوح مرجع، که در بسیاری از چهارقطبی‌های متعارف وجود دارد چالش برانگیز است. آفست محور مغناطیسی نسبت به محور مکانیکی مرجع (محور استوانه‌ی بیرونی) اندازه‌گیری می‌شود. دو پین به جدایی زاویه‌ای ۹۰ درجه، زاویه رول مرجع را تعیین می‌کند و نصب و راه‌اندازی آهنربا به عنوان چهارقطبی همگرا و یا واگرا را داخل لوله رانشی فراهم می‌کند.

برای اندازه گیری ابتدا آهنربا را روی نیمکت آزمایش نصب کرده و سیم‌پیچ را به طور طولی نسبت به مرکز آهنربا تنظیم می کنیم. سپس صفر رمز گذار و زاویه‌ی رول سیم‌پیچ را توسط شیب سنج تنظیم می کنیم. سپس اندازه‌گیری‌ها در هشت آرایش مختلف تکرار می‌شوند. با این اندازه‌گیری‌ها می‌توان خطاهای سیستماتیک ناشی از سیم‌پیچ را برآورد و تصحیح کرد و نتایج را از چارچوب سیم‌پیچ به چارچوب آهنربا انتقال داد.

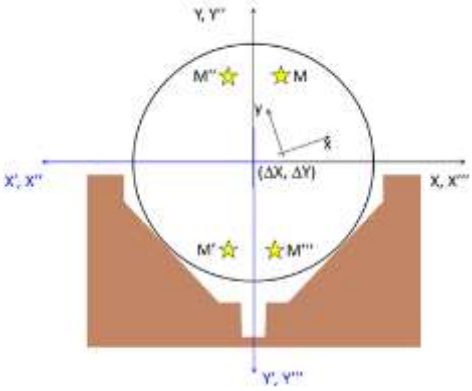
[۱] Fixed targets

تصحیح خطاهای سیستماتیک:

شکل ۲ چهار آرایش برای نصب آهنربا روی تکیه گاه را نشان می دهد. در آرایش مرجع پین شماره یک به سمت رمزگذار است (M). اگر آهنربا را به اندازه‌ی ۱۸۰ درجه حول محور Z بچرخانیم، آفست سیستماتیک بین محور مغناطیسی و محور سیم‌پیچ (XΔ , YΔ) را می‌توان تخمین زد. در این آرایش مولفه‌ی دوقطبی تغییر علامت می‌دهد اما مولفه‌ی چهارقطبی تغییر علامت نمی‌دهد (M').

آرایش دوم از چرخاندن آهنربا حول محورY به‌دست می‌آید. می‌توان نشان داد که مولفه‌ی چهارقطبی نرمال تغییر علامت می‌دهد اما مولفه‌ی چرخیده آن تغییر علامت نمی‌دهد. در این آرایش می‌توان آفست زاویه‌ای بین سیم‌پیچ و محور X چارچوب آهنربا را در آرایش مرجع تعیین کرد (M''). آرایش سوم از چرخاندن آهنربا حول محور X به اندازه‌ی ۱۸۰ درجه به‌دست می‌آید. تنها چندقطبی های نرمال تغییر علامت می‌دهند که از مقایسه با آرایش مرجع می‌توان قابلیت بازتولید نتایج را بررسی کرد(M''').

آرایش چهارم با هدف بررسی خطای عمودی بین دو پین از روی اختلاف زاویه‌ی رول اندازه‌گیری شده نسبت به آرایش مرجع به‌دست می‌آید. آرایش های پنجم تا هفتم به ترتیب تکرار آرایش های چهارم، مرجع و دوم هستند، با این تفاوت که پین دوم در شیار پایینی آهنربا قرار می‌گیرد. در نهایت مولفه‌های چندقطبی با اعمال تبدیلات نسبی مختصات و متوسط‌گیری در تمام آرایش های اندازه‌گیری محاسبه می‌شوند.



شکل شماره (۲) موقعیت نسبی چارچوب سیم‌پیچ چرخان و محور مغناطیسی (با ستاره نشان داده شده است) در مکان‌های آزمایشی صفر تا سه

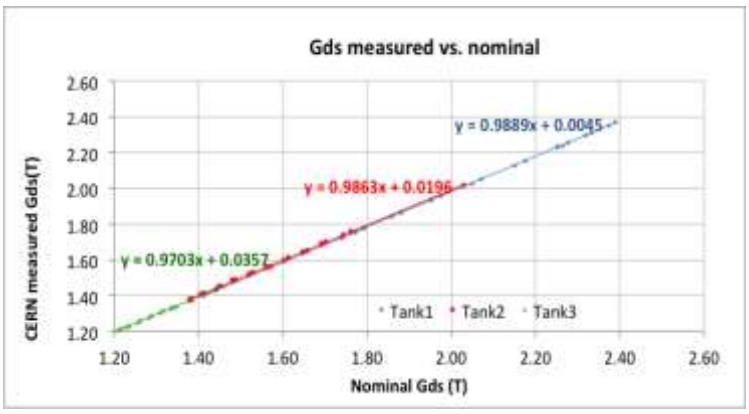
نتایج اندازه‌گیری:

شکل ۳ انتگرال گرادیان اندازه‌گیری شده را برحسب مقادیر نومینال متناظر نشان می‌دهد. به طور متوسط، گرادیان آهنرباهای تانک اول حدود ۱٪ کمتر از مقدار نومینال است، اما برای تانک دوم و سوم اختلاف نسبی سیستماتیک گرادیان نسبت به مقدار نومینال کمتر از ۰/۲٪ است. تکرارپذیری نتایج برابر با ۰/۰۱٪، از انحراف معیار انتگرال گرادیان برروی بیش از هشت اندازه‌گیری متوالی به‌دست می‌آید. قابلیت بازتولید از انحراف معیار انتگرال گرادیان در آرایش‌های مختلف (۰/۰۵٪) نتیجه می‌شود.

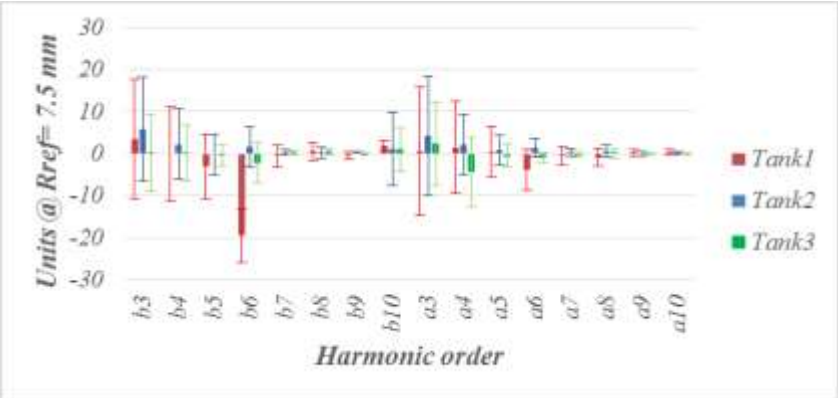
هارمونیک تمام چهارقطبی‌ها تا مرتبه‌ی ۱۰ با سیم‌پیچ اندازه‌گیری شده است. طبق برآورد کوشی انتظار می‌رود مولفه های چندقطبی بالاتر از ۱۰ تاثیر کمی در باریکه‌ی ذرات داشته باشند. شکل ٤ مقدار متوسط هارمونیک‌های نرمال و چرخیده چهارقطبی‌ها را نشان می‌دهد. تنها مولفه‌های شش‌قطبی، ۱۲ قطبی و ۲۰ قطبی در طیف هارمونیک قابل ملاحظه هستند. طبق تقارن چهارقطبی، مولفه‌های ۱۲ قطبی و ۲۰ قطبی مجاز هستند. در اکثر آهنرباها مولفه‌ی شش قطبی بر دیگر مولفه‌ها غلبه دارد که می‌توان آنرا به تلرانس‌های مکانیکی یوغ، اندازه و جهت مغناطش بلوک‌های پارامغناطیس نسبت داد. عمده‌ترین مولفه‌ی سیستماتیک مجموعه، مولفه‌ی ۱۲ قطبی مربوط به تانک اول است (حدود ۰/۲٪). خطای کل دو مرتبه‌ی بزرگی کوچکتر از تلرانس است.

محور مغناطیسی از متوسط نتایج در آرایش‌های مرجع و دوم تعیین می‌شود(شکل ۵). تکرارپذیری از هشت اندازه‌گیری متوالی تخمین زده می‌شود (حدود یک میکرون) که قابل چشم پوشی است. مقدار متوسط و انحراف معیار در راستای x و y، بدون تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین تانک‌ها، ۳۶±۷ mμ- و ۳۷±۳ mμ- است که با تلرانس مکانیکی سازگار است. تنها سه آهنربای چهارقطبی بیرون از تلرانس هستند.

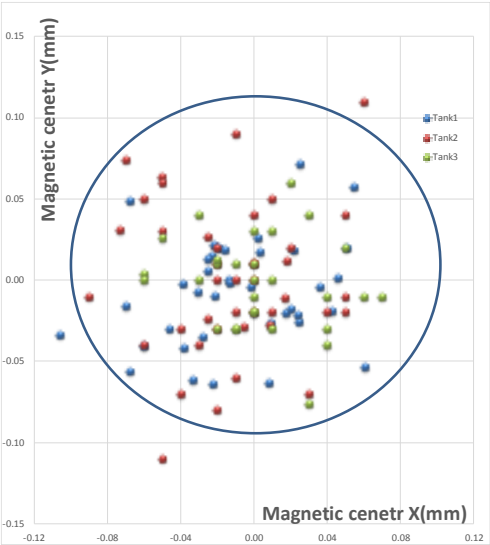
جهت میدان (زاویه‌ی رول) یک چهارقطبی نرمال از فاز مولفه‌ی چرخیده نسبت به مولفه‌ی نرمال با اندازه‌گیری سیم‌پیچ چرخان به‌دست می‌آید. متوسط جهت میدان ۱/٦۸ mrad ±۰/۸۵ - است. تلرانس نومینال یک میلی رادیان است، با این حال شبیه سازی باریکه تایید می‌کند که مقادیر اندازه‌گیری شده قابل قبول هستند. می‌توان خطای تعامد پین ها را، ۲/۷ mrad ±۰/۲ برآورد کرد.



شکل شماره (۳) انتگرال گرادیان اندازه‌گیری شده آهنرباهای پارامغناطیس برحسب مقادیر نومینال



شکل شماره (٤) متوسط هارمونیک‌های نرمال و چرخیده میدان تا مرتبه‌ی ۱۰ برای سه تانک شتابدهنده



شکل شماره (٥) متوسط محور مغناطیسی برای تمام چهارقطبی های پارامغناطیس

بحث ونتیجه گیری :

ترکیب سیم‌پیچ چرخان و سیم کشیده برای اندازه‌گیری چهارقطبی‌های پارامغناطیس داخل تلرانس‌های مورد نیاز به خوبی تطبیق دارند. این دو سیستم مکمل یکدیگر هستند: سیم کشیده شده مرجع قابل اعتمادی برای کالیبراسیون انتگرال گرادیان چهارقطبی است. درحالی که سیم‌پیچ حساسیت لازم برای اندازه‌گیری مولفه های هارمونیک میدان، مرکز مغناطیسی و آفست زاویه‌ای را فراهم می‌کند. اندازه‌گیری با یک سیم‌پیچ به قطر ۱۹ میلی‌متر مشکل است، زیرا اثر تلرانس‌های مکانیکی روی کالیبراسیون بزرگتر است. روش جدید که شامل اندازه‌گیری هر آهنربا در چندین آرایش هندسی برای تخمین و متوسط‌گیری خطاهای سیستماتیک است به ما در مورد قابلیت بازتولید نتایج اطمینان می‌دهد. نتایج اخیر شتابدهنده یعنی به‌دست آمدن باریکه در انتهای شتابدهنده نتایج این مقاله را تایید می‌کند.

مراجع :

[1] G. Bellodi, et al., “Alignment and field error tolerance in Linac4,” CERN-ATS-Note-2011-021.
[2] G. Golluccio et al., “Magnetic Qualification of Permanent Magnet Quadrupoles for CERN’s Linac4,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, June 2012.
[3] G. Golluccio et al., “In situ calibration of rotating sensor coils for magnet testing,” *Rev Sci Instrum.*, vol. 83, p. 013306, Jan 2012.
[4] S. Kasaei et al., “Small-diameter rotating coils for field quality measurements in quadrupole magnets,” in *20th IMEKO TC4 International Symposium*, Benevento,Italy, September 15-17, 2014.
[5] A. K. Jain, “Basic theory of magnets,” in *CERN Accelerator School on Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets*, Anacapri, Italy, April 11-17, 1997.

[6] M. Buzio, "Fabrication and calibration of search coils," in *proceedings of CERN Accelerator School on Magnets*, Bruges, Belgium, June 2009.