

بررسی موردی عملکرد های شتابدهنده ی LHC و برخورد های پروتونی

محمد حسین صحافی^{۱*}، عرفان چولکی^۲

^۱ دانشجوی دکتری فیزیک هسته ای، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

^۲ دانشجوی دکتری فیزیک اتمی و مولکولی، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

Hosseinsahafi91@gmail.com

چکیده

اولین اجرای سه ساله ی برخورد دهنده ی هادرونی بزرگ در بهار سال ۲۰۱۳ تمام شد. در طول این مدت، برخورد دهنده عمدتاً در انرژی پروتویی ۳.۵ و ۴ TeV کار می کرد. در این مقاله عملکردی که در طول اولین اجراء حاصل شده است و چالش های مربوط به عملیات و عملکرد LHC، مورد مطالعه قرار گرفته شده است. چشم انداز کوتاهی از اجرای آتی با انرژی ۶.۵ TeV مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه های کلیدی: برخورد پروتونی، شتابدهنده هادرونی بزرگ، سرماسنج مغناطیسی

۱- مقدمه

در اوایل سال ۱۹۷۷، در حالیکه پیشرفت و توسعه‌ی برخورد دهنده‌ی بزرگ الکترون-پوزیترون در حال اجراء بود، ایده‌های اولیه جهت ساخت یک برخورد دهنده‌ی هادرونی، بعد از اتمام عملیات LEP^۱ در داخل تونل شتاب‌دهنده‌ی مشابه، پدیدار شد. اولین کارگاه برخورد دهنده‌ی هادرونی بزرگ (LHC)^۲ در سال ۱۹۸۴ تشکیل شد. کشورهای عضو CERN در سال ۱۹۹۴ پروژه LHC را تصویب کردند و ساخت آن در سال‌های بعد توسط CERN با مشارکت بین‌المللی کشورهای ژاپن، کانادا و ایالات متحده آمریکا مدیریت شد. کشورهایی نظیر چین، هند و روسیه نیز مشارکت داشتند. شتاب‌دهنده LHC به طور متوسط ۱۰۰ متر در زیر تونل شتاب دهنده‌ی ای بطول ۲۶٫۷ کیلومتری نصب شده است که در ابتدای شتاب دهنده LEP جا داده شده است (شکل ۱).

دو پرتوی پرتون‌ها یا یون‌ها تقریباً با سرعت نور در دو محفظه خلاء مجزا در جهت مخالف می‌چرخند. شتاب‌دهنده از ۸ قوس تشکیل شده است که آهنرباهای دوقطبی ابرسانایی بمنظور منحرف کردن ذرات و ۸ بخش مستقیم طویل (LSS) نصب شده‌اند. آزمایش‌های فیزیکی ذرات بزرگ CMS، ATLAS، ALICE و LHCb در نقاط متقابل (IP)^۳ در وسط چهار LSS^۴ نصب شده‌اند، در حالیکه در دیگر LSS سیستم هم‌راستا ساز (زدایش پرتوی)، سیستم فرکانس رادیویی (RF)^۵ و ابزار دقیق پرتوی و سیستم برای استخراج پرتو جا داده شده است (شکل ۱). میدان دوقطبی با قدرت 8.3T جهت منحرف کردن هادرون‌ها با تکانه‌ی 8TeV در هر واحد بار در داخل تونل مورد نیاز است؛ این میزان ۶۰ درصد بیشتر در شتاب‌دهنده‌های قبلی است. چنین قدرت میدان مغناطیسی بوسیله آهنرباهای دوقطبی ابرسانای ساخته شده از NbTi بدست آمده است [۱]. با طراحی آهنربای ۲ در ۱، دو حلقه در داخل تونل جلویی LEP به قطر 3.8 m فیت شده است (شکل ۲). هر دو حلقه در سرمانسج مجزایی جایگذاری شده است و فاصله‌ی بین دو محفظه‌ی خلا، ۱۹ سانتیمتر است. یک دوقطبی متقابل در شکل ۳ نشان داده شده است. هر دوقطبی بطول ۱۴٫۳ متر و سرمانسج بطول ۱۵ متر می‌باشد. کوپل‌ها (چنبره‌ها) با دقت 30μm جهت تضمین کیفیت میدان خوب، جایگذاری شده‌اند. میزان چندقطبی‌های مرتبه-بالا با شعاع 17 mm، بایستی در حد چند در هزار کنترل شود. علاوه بر آهنرباهای دو قطبی که ۸۵ درصد از هر قوس را تشکیل می‌دهند، شبکه آهنربایی نیز دارای آهنرباهای چهارگوشه‌ای است که پرتو را متمرکز می‌کند، آهنرباهای شش‌تایی که جهت تنظیم وابستگی انرژی میدان‌های مغناطیسی می‌باشد، و قطبهای ۸ گانه که برای تثبیت پرتو می‌باشد. در مجموع ۸۰۰۰ آهنربای ابرسانا برای کنترل دو پرتو مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲].

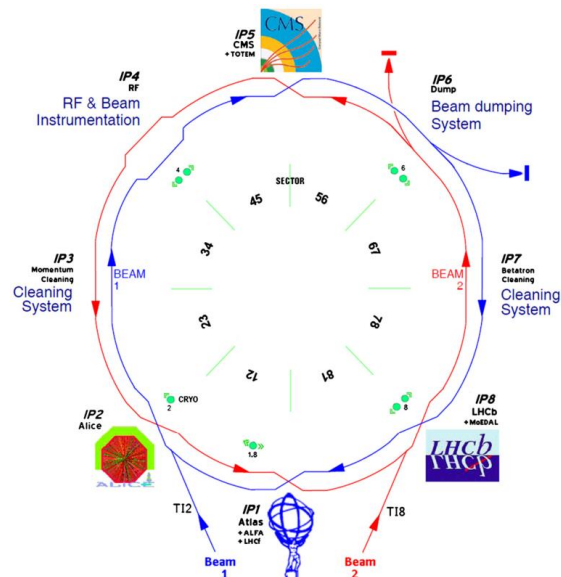
¹ Large Electron Positron

² Large hadron collider

³ Interaction Points

⁴ Long Straight Sections

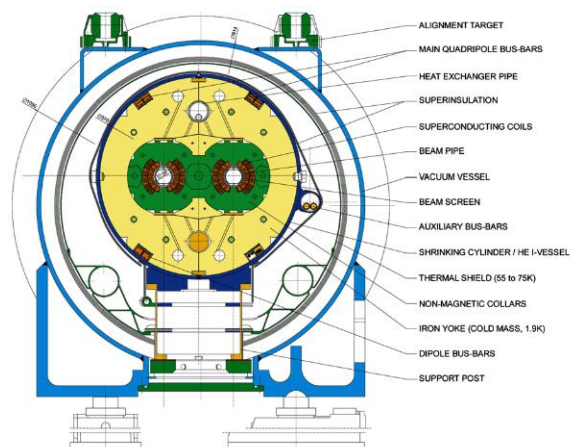
⁵ radio frequency



شکل شماره ۱. طرح LHC با ۸ نقطه تعامل با برجسب IP1 تا IP8. آزمایشات CMS، ALICE، ATLAS و LHCb به ترتیب در IP8 و IP5، IP2، IP1 و IP8 نصب شده اند. پرتو ۱ به IP2 نزدیک است و در جهت عقربه های ساعت حرکت می کند، پرتو ۲ به سمت IP8 تزریق می شود و در جهت عقربه ساعت حرکت می کند. این دو پرتوها موقعیت مبادله بین خارج و داخل حلقه را در هر آزمایش برای اطمینان از اینکه طول مسیر برای هر دو پرتو همان است. دو تیر پرتو در اطراف IP6 قرار دارد.



شکل شماره ۲. نمایش تونل LHC و سرماسنج مغناطیسی در یک بخش قوسی.



شکل ۳. سطح مقطع یک آهنربای دو قطبی مربوط به LHC.

هشت سرمانسج متوالی بطول 2.7 km وجود دارند که هر یک ۱۲۳۲ آهنربای دوقطبی ابر رسانا و ۲۹۲ آهنربای چهارگوشه‌ای قوس‌ها را تا حد دمای عملیاتی 19 K خنک می‌کنند. ۱۴۸ آهنربای چهارگوشه‌ای اصلی ابر رسانا در بخش‌های مستقیم و ابتدای قوس‌ها نصب شده‌اند. پس از خنک‌سازی، سرمانسج‌های LHC در مجموع حاوی ۱۳۰ تن هلیوم مایع هستند. تقریباً ۳۷۰۰۰ تن مواد تا دمای 19K خنک می‌شوند. آهنرباها و سیستم خنک‌کننده‌ی مبتنی بر هلیوم ابرسیال، اجزای مهم فنی LHC هستند. سرمانسج‌ها طولانی‌ترین یخچال‌های روی زمین هستند.

در مجموع ۱۶۰۰ مبدل انرژی دقیق، جریان مورد نیاز آهنرباها برای مدارهای دو قطبی را تأمین می‌کنند تا جریان به 13 kA برسد. برای اغلب آهنرباهای اصلی، پایداری بیش از ۳۰ دقیقه بایستی بهتر از 5ppm (قسمت در میلیون قسمت) باشد. انرژی مغناطیسی ذخیره شده در هر سرمانسج قوس تقریباً 1GJ است. این انرژی بایستی بطور ایمن بیرون کشیده شود چنانچه یکی از آهنرباها خاموش شود، به عبارت دیگر، انتقال از ابر رسانی به حالت رسانی عادی انجام می‌شود. مقاومت در برابر انبساط بزرگ که توانایی جذب انرژی را دارند، به صورت خودکار در صورت خاموش شدن، به مدار تبدیل می‌شود. مقاومت‌های انباشت -بالا که قادر به جذب انرژی هستند بطور خودکار به مدارات در حالت خاموشی وصل می‌شوند[۳].

ذرات در پرتوها در بسته‌های کوچک ذخیره می‌شوند که به نام "خوشه‌هایی" هستند که در چهار آزمایش بزرگ قرار می‌گیرند. آشکارسازها با اندازه‌ای متناظر با ساختمان چند طبقه، در هر یک از چهار نقطه‌ی برخورد نصب شده‌اند، که محصولات حاصل از برخورد ذرات را ثبت می‌کنند. از آنجاییکه فقط کسر کوچکی از برخوردها حائز اهمیت است، داشتن سرعت خیلی زیاد در رویداد مهم می‌باشد، که از طریق تابندگی L مشخص می‌شود. نرخ رویداد یک فرآیند با سطح مقطع σ توسط $\sigma \times L$ بدست می‌آید. تابندگی را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$L = \frac{kfN^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (1)$$

که f فرکانس انتقالی (چرخشی) (11.24 kHz) است، k تعداد خوشه‌ها، N تعداد ذرات در هر خوشه، و σ_x و σ_y اندازه‌های پرتوی افقی و عمودی در نقطه‌ی برخورد هستند. بیشترین تابندگی با کوچکترین سطح مقطع پرتو احتمالی، تعداد زیاد خوشه‌ها و فراوانی بالای خوشه بدست می‌آید. تا حدود ۲۸۰۸ خوشه را می‌توان پر کرد و می‌توان در هر پرتویی شتاب‌دار کرد، حداقل فاصله بین خوشه‌ها 25 ns یا 7.5 m است. خوشه‌ی هر پروتون از 1.7×10^{11} پروتون تشکیل شده است. خوشه‌ها طولی به اندازه‌ی ۷ الی ۱۰ سانتیمتر دارند. حجم نقطه‌ی برخورد پرتو $20 \text{ microns} \times 20 \text{ microns} \times 8 \text{ cm}$ می‌باشد.

در 7TeV، هر پرتوی LHC، مقداری انرژی بمیزان 360 MJ ذخیره می‌کند. این مقدار، مربوط به مقدار انرژی ۸۰ کیلوگرم مواد منفجره است و صد برابر بیشتر از رکوردهای حاصل از شتابدهنده قبلی است

بعد از خروج منبع، پروتون‌ها نخست در یک شتاب دهنده‌ی خطی (LINAC2) تا ۵۰ مگاوات شتاب می‌گیرند. پرتوهای حاصل از LINAC2، در چهار تقویت‌کننده‌ی سینکروترونی پروتون (PSB) به ۱.۴ گیگا الکترون ولت افزایش یافته و سپس توسط سینکروترون پروتونی (PS) تا ۲۶ گیگا الکترون ولت افزایش می‌یابد. سینکروترون پروتونی قدرتمندی (SPS) در انتهای زنجیره‌ی تزریق، پروتون‌ها را برای LHC با انرژی 450GeV از طریق دو خط انتقال بیش از ۳ کیلومتری (T12 و T18) تحویل می‌دهد[۴].

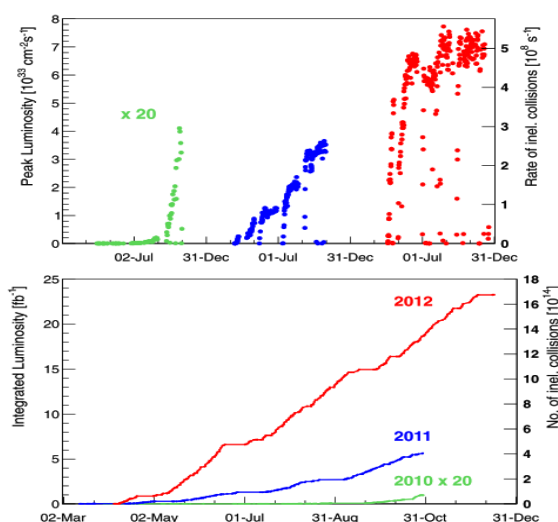
۲- عملکرد LHC

آهنرباهای دوقطبی LHC توسط سه شرکت صنعتی تولید شد و آخرین آهنربای دوقطبی در نوامبر سال ۲۰۰۶ به CERN منتقل شد. هر آهنربایی بر روی خوشه‌های آزمایشی CERN تا میدان مغناطیسی 8.7T تست شد، که این میدان تقریباً ۵ درصد بیشتر از هدف طراحی بود. بعضی خاموشی‌های آزمایشی، برای رسیدن به میدان اسمی 8.3T مورد نیاز بودند. خاموشی‌های آزمایشی بدلیل رهاسازی مقدار خیلی کم انرژی اصطکاک (10-100nJ) به علت حرکت کویل حین افزایش میدان مغناطیسی، می‌باشد. در ژوئن سال ۲۰۰۷، نخستین قوس (قطاع) LHC خنک‌سازی و آماده‌ی راه‌اندازی شد و در آوریل ۲۰۰۸

آخرین آهنربای دوقطبی به داخل تونل LHC برده شده است. یکی از اجزای ضروری فاز راه‌اندازی، آزمایش آهنرباهای ابررسانای LHC و تجهیزات مربوط به برق و حفاظت آن بود [۵].

۳- اجرای فاز اول شتابدهنده‌ی هادرونی

در ۲۰ نوامبر ۲۰۰۹، پرتوها دوباره در هر دو حلقه به گردش درآمدند. سه روز بعد، آشکارسازهای چهار آزمایش نخستین برخورد را در 450 GeV ثبت کردند. در سال ۲۰۰۹ بدلیل تاخیر در طراحی و تهیه‌ی یک سیستم حفاظتی کابل ابررسانای جدید، انرژی به 1.18 TeV محدود شد. نخستین دوره طولانی اجرای LHC در فوریه ۲۰۱۰ با انرژی پرتو 3.5 TeV آغاز شد. در اکتبر سال ۲۰۱۰، تابندگی به $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ رسید، شکل ۶ را ملاحظه کنید [۶]. در نیمه اول سال ۲۰۱۱، تعداد خوشه‌ها به تدریج به میزان ۱۳۸۰ افزایش یافت قبل از اینکه تعداد پروتونها در هر خوشه افزایش یابد. فاصله بین خوشه-ای 50 ns بود. در سپتامبر ۲۰۱۱، اندازه پرتو مجدداً کاهش یافت و حداکثر تابندگی LHC به مقدار $3.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ رسید. در پاییز سال ۲۰۱۲، حداکثر تابندگی در 4 TeV، در بازه‌ی حدود ۲۵ درصد هدف طراحی، و با توجه به انرژی کمتر، به میزان $7.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت [۷].



شکل شماره ۴. Peak (بالا) و یکپارچه (پایین) روشنایی بین ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ برای عملیات پروتون. مقدار نورانی سال ۲۰۱۰ توسط یک عامل ۲۰ ضرب شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

معیار تابندگی مطلق در LHC با استفاده از روشی که در ابتدا توسط واندرا سار میت پیشنهاد شده، کالیبره شده است. معیار تابندگی از طریق اسکن پرتوها در اطراف یکدیگر تعیین می‌شود که امکان دسترسی به اندازه‌ی همپوشانی پرتوی عرضی را فراهم می‌سازد. با تعیین دقیق بار پرتو و کنترل عالی پروفایل‌های پرتوی عرضی، تعیین تابندگی در حد ۲ درصد بدست آمده است. در پایان سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ اجرای LHC، بطور موفقیت آمیزی بمدت ۴ هفته با پرتوهای سری کار کرد. برای اولین اجرای سرب در سال ۲۰۱۰، بمنظور رسیدن به حداکثر تابندگی $3 \times 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ، تعداد خوشه‌ها به ۱۳۷ تا محدود شد. در سال بعد، تعداد خوشه‌ها به ۳۵۸ تا افزایش یافت و تابندگی به $5 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ و با تمرکز بیشتر در نقاط برخورد افزایش یافت. تابندگی یکنواخت کل توسط ATLAS، CMS و ALICE برای هر آزمایش حدود $165 \mu\text{b}$ است. در اوایل سال ۲۰۱۳، چند هفته به اجرای موفق برخورد پرتوی پروتون در یک حلقه با یک پرتو یون سرب در حلقه دیگر (اجرای P-Pb) اختصاص یافت. بهره‌وری اجرای p-Pb جهت انجام اندازه‌گیری انرژی مطلق پرتو با دقت 0.6% است، اطلاعاتی که برای اندازه‌گیریهای سطح مقطع در LHC حائز اهمیت است.

منابع

1. Evans, L.R., *The Large Hadron Collider: a marvel of technology*. 2009: EPFL Press.
2. Assmann, R. *Proceedings of the 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2010)*, Morschach, Switzerland. 2010. PSI.
3. Wenninger, J., *Energy calibration of the LHC beams at 4 TeV*. 2013.
4. Jacobsson, R., R. Alemany-Fernandez, and F. Follin, *The LHCb Online Luminosity Monitoring and Control*. 2013.
5. Ghodgaonkar, D.K., V.V. Varadan, and V.K. Varadan, *A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies*. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 1989. **38**(3): p. 789-793.
6. Hunjra, M., et al., *Polyurethane foam-based radar absorbing sandwich structures to evade detection*. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2017. **19**(6): p. 647-658.
7. Schueler, R., et al., *Agglomeration and electrical percolation behavior of carbon black dispersed in epoxy resin*. Journal of Applied Polymer Science, 1997. **63**(13): p. 1741-1746.

Case study on LHC operations and proton collisions

Mohammad hossein sahafi*

¹Department of Physics, Faculty of Science, University of mazandaran, babolsar, Iran
Hosseinsahafi91@gmail.com

erfan cholaki

⁴Department of Physics, Faculty of Science, Islamic Azad University of Kermanshah branch,
Kermanshah, Iran
erfancholaki@gmail.com

Abstract

The first three year run of the Large Hadron Collider (LHC) ended in the spring of 2013. During this period, the collider was operated mainly at beam energies of 3.5 and 4 TeV. The performances that have been achieved during that first run and the challenges for commissioning and operating the LHC are presented. A brief outlook into the upcoming run at an energy of 6.5 TeV will be given.

Keywords: proton collision, large hadron collider, magnet cryostats