همکاری پژوهشگاه با سرن
در آستانهٔ بیست سالگی

مجتبی محمدی نجف‌آبادی
پژوهشکدهٔ ذرات و شتابگرها

۱. مقدمه

پیشرفت علم فیزیک ذرات در شرایط کنونی این شاخه از فیزیک بیش از پیش نیازمند آزمایش و ابزارهای آزمایشگاهی فوق مدرن است. پژوهش برای درستی‌سنجی نظریه‌های متعدد و یافتن مسیر صحیح در این شاخه بیش از هر زمان دیگری مستلزم کارگروهی و همکاری است. در واقع با توجه به وضعیتِ کنونی پژوهش در فیزیک ذرات بنیادی از نظر پیچیدگی، بودجه‌ای، و نیازمندی‌های فرارشته‌ای، پژوهشگران ناچار به روی آوردن به ارتباطات بیشتر و همکاری بین‌المللی هستند. پُر واضح است که یک جمع کوچک پژوهشی و حتی یک مؤسسهٔ تحقیقاتی علمی به‌ندرت قادر به فراهم کردن تمام تخصص‌ها، مهارت‌ها، و منابع لازم برای پژوهش‌های مورد نظر و پاسخ دادن به اکثر سوالات باز در فیزیک ذرات بنیادی است.

سِرن (CERN)، مؤسسهٔ تحقیقات ذرات بنیادی اروپا، که در سال ۱۹۵۴ تأسیس شد، بزرگترین مرکز تحقیقات در فیزیک ذرات می‌باشد. مأموریت اصلی سرن مطالعهٔ ساختار ماده و رفتار آن در کوچکترین مقیاس ممکن است. تعداد زیادی آزمایش در سرن در حال انجام و امکان‌سنجی برای ساخت در آینده می‌باشد و بزرگترین آزمایش در حال اجرا در شتابدهندهٔ هادرونی بزرگ (LHC) است که درآن پروتون‌ها با سرعت نزدیک به سرعت نور در دو جهت مخالف با یکدیگر برخورد داده می‌شوند. این شتابدهنده که بزرگترین شتابدهندهٔ جهان است از نوع دایره‌ای است؛ محیط آن ۲۷ کیلومتر می‌باشد و در مرز دو کشور سوئیس و فرانسه قرار دارد. در نقاط برخورد پروتون‌ها، آشکارسازهای بزرگ و پیچیده‌ای قرار دارند که اطلاعات ذرات تولید شده بعد از برخورد را برای مطالعه فیزیک در انرژی بالا اندازه‌گیری و ضبط می‌کنند.

شکل ۱ نمایی از شتابدهندهٔ هادرونی بزرگ (LHC) و محل قرار گرفتن چهار آشکارساز بزرگ آن با نامهای ATLAS، CMS، LHCb، و ALICE را نشان می‌دهد.

هدف اصلی و مهم ساخت LHC پاسخ‌دهی به سؤالات پراهمیتی در فیزیک ذرات بنیادی است که به برخی از آنها در زیر اشاره می‌شود:

ـ در مدل استاندارد ذرات بنیادی که مدلی موفق در توصیف ذرات است، مکانیزمی به نام Brout-Englert-Higgs مسئول جرم‌دار کردن ذرات می‌باشد. در این مکانیزم، ذرات در اثر برهم‌کنش با میدانی به نام میدان هیگز که در تمام فضاـزمان قرار دارد، جرم‌دار می‌شوند. ذره‌ای که درگیری و برهم‌کنش سخت‌تری با میدان هیگز داشته باشد، جرم بیشتری کسب می‌کند. مشاهدهٔ ذرهٔ هیگز پیش‌بینی شده در مدل استاندارد با ویژگی‌های آن مهمترین هدفِ ساخت LHC و آشکارسازهای آن بوده است. ذرهٔ هیگز نهایتاً در سال ۲۰۱۲ توسط دو آشکارساز ATLASو CMS با معناداری آماری بسیار قوی مشاهده شد و این یکی از بزرگترین موفقیت‌ها برای LHC و مدل استاندارد ذرات بنیادی است [1-2].

ـ ذرات بنیادی شناخته‌شده تاکنون، که گمان می‌رود تمام کهکشان‌ها از آنها ساخته شده‌اند، حدود ۴٪ از جرم عالم را تشکیل می‌دهند و تصور می‌شود مادهٔ تاریک و انرژی تاریک به ترتیب ۲۳٪ و ۷۳٪ بقیهٔ جرم عالم را تشکیل می‌دهند. پیدا کردن شاهدی بر وجود مادهٔ تاریک یکی دیگر از اهداف مهم LHC است.

ـ گمان می‌رود در زمان انفجار بزرگ (Big Bang) ماده و ضد ماده با میزان یکسان تولید شده باشند ولی آنچه در عالم تاکنون مشاهده شده، ماده است. پاسخ به این سوال که چرا عدم تقارن بین ماده و ضد

شکل ۱. تصویری از شتابدهنده‌های هادرونی بزرگ و محل آشکارسازهای آن

ماده وجود دارد باید با استفاده از LHC مشخص شود.

ـ حدود $۱۰^{-۶}$ ثانیه بعد از انفجار بزرگ، جهان پر از سوپی چگال و داغ بوده است که ذرات در آن محیط با سرعت نزدیک سرعت نور در حرکت بوده‌اند. آن محیط متشکل از کوارک‌ها و گلوئون‌ها بوده که تقریباً آزادانه حرکت می‌کرده‌اند. LHC در فاز برخوردی سُرب‌ـسُرب به جای پروتون شرایطی مشابه آن محیط را فراهم می‌کند و به ما امکان مطالعهٔ آفرینش در مرتبهٔ زمانی $۱۰^{-۶}$ ثانیه بعد از انفجار بزرگ را می‌دهد. مطالعهٔ این محیط که پلاسمای کوارک‌ـگلوئون نام دارد از اهداف مهم LHC است.

بدیهی است ساخت ابزاری که مسئولیت آن مشاهده و اندازه‌گیری ویژگی‌های ذراتی با ابعاد $۱۰^{-۱۵}$ متر و کمتر است و شرایطی خیلی نزدیک به ابتدای آفرینش را کاوش می‌کند، نیازمند فناوری فوق‌العاده، متخصصانی در حوزه‌های مختلف از علوم پایه و مهندسی، و بودجهٔ زیاد است. بنابراین، سرن به خارج از گسترهٔ اروپا توسعه‌یافته و تبدیل به آزمایشگاهی جهانی با همکاری تعداد زیادی مؤسسهٔ تحقیقاتی از بیش از ۴۲ کشور دنیا شده است. قابل توجه اینکه در موارد متعددی سرن مبدع بسیاری از فناوری‌های نوین بوده که به تدریج وارد زندگی روزمره شده است.

۲. تاریخچه همکاری ایران و پژوهشگاه با سرن [۱]

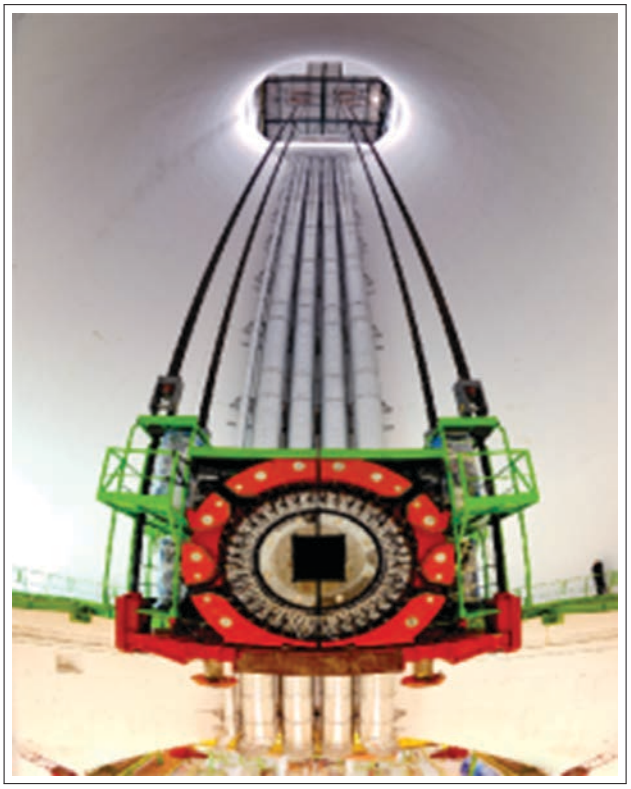
همکاری ایران با سرن پس از مدت‌ها پیگیری و مذاکره‌هایی که توسط دکتر فرهاد اردلان و دکتر حسام‌الدین ارفعی صورت گرفت سرانجام در سال ۲۰۰۱ تحقق پیدا کرد. در سال ۲۰۰۱، گروهی از دست‌اندرکاران سرن شامل برخی از معاونان و مشاوران آنها و همچنین سخنگوی وقت آزمایش CMS و برخی از دست‌اندرکاران علمی آزمایش CMS به ایران سفر کردند و طی یک کارگاه یک‌روزه که در آن دیدگاه‌های علمی و امکانات آموزشی و پژوهشی بررسی شد، تفاهم‌نامه‌ای تهیه شد. این تفاهم‌نامه در نهایت به امضای وزیر وقت علوم، تحقیقات و فناوری و مدیرکل وقت سرن رسید. با حمایت‌های ریاست پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، دکتر محمد جواد لاریجانی، و ریسک‌پذیری و جسارت منحصر به‌فرد پژوهشگاه در ورود به چنین پروژه‌هایی، مقرر شد پژوهشگاه دانش‌های بنیادی از سوی ایران مسئولیت اجرایی برنامهٔ همکاری با سرن را عهده‌دار شود.

مطابق توافق امضاء شده، همکاری با اعزام تعدادی دانشجوی دکتری جهت تهیهٔ رسالهٔ دکتری در سرن در زمینهٔ فیزیک ذرات تجربی و همچنین ساخت میزهای مربوط به کالریمتر هادرونی جلویی (HF) آغاز شد.

با توجه به اینکه میزهای HF می‌بایست تحمل باری در حدود ۳۵۰ تُن را داشته باشند، ساخت آن امری حساس و تخصصی است. بنابراین، گروهی شامل مسئول فنی و چند تن از دانشمندان و مهندسان آزمایش برای کمک به ارزیابی و انتخاب سازندهٔ میزها به ایران آمدند و با هماهنگی با مسئولان وقت وزارت علوم از چند کارخانه که توان چنین کاری را داشتند، بازدید کردند. پس از بررسی و رایزنی‌های مختلف و برگزاری مناقصه، شرکت هپکو برای ساخت میزهای HF انتخاب شد.

میزها طی دو سال با همکاری و پیگیری‌های مداوم پژوهشگاه، سرن و شرکت هپکو ساخته شد و از طریق بندرعباس توسط کشتی به اروپا منتقل و توسط سرن به محل آزمایش در Cessy در فرانسه منتقل شد.

۱. در تهیهٔ برخی مطالب این بخش از اسناد تهیه شده توسط دکتر حسام‌الدین ارفعی استفاده شده است.



شکل ۲. نمایی از انتقال کالریمتر HF به محل آزمایش در حدود ۱۵۰ متر زیر زمین

در این میان با توجه به مسئولیت‌پذیری شرکت هپکو در آن زمان و جو مساعد و مثبت پژوهشگاه، ساخت استوانه‌های محافظ کالریمتر HF نیز به پژوهشگاه و شرکت هپکو واگذار شد که آنها نیز با موفقیت و دقت لازم ساخته و تحویل سرن شد. شکل ۲ نمایی از یکی از آشکارسازهای HF را در حال انتقال به تونل آزمایش که حدود ۱۵۰ متر زیر زمین قرار دارد نشان می‌دهد.

در بخش اعزام دانشجو، در ابتدا سه دانشجوی دکتری به سرن فرستاده شدند تا از طریق همکاری با آزمایش CMS رسالهٔ دکتری خود را به انجام برسانند. این دانشجویان با پژوهشگران تراز اول آزمایش CMS در زمینه‌های جستجو برای علائم ابرتقارن، هیگز باردار و کوارک تاپ همکاری نموده و طی این همکاری توانایی و مهارت لازم در فیزیک ذرات تجربی را کسب کردند و به کشور انتقال دادند.

در انتهای این بخش باید به دیگر فعالیت حائز اهمیت پژوهشگاه که شروع همکاری با سرن در زمینهٔ شتابدهنده است، اشاره کرد. همکاری در زمینهٔ شتابدهنده در توافق امضاء شده بین ایران و سرن وجود نداشت. بنابراین طی مذاکرات متعدد با بخش‌های مختلف سرن در زمینه شتابدهنده، نظر مثبت مسئولان شتابدهندهٔ خطی الکترون-پوزیترون آینده (CLIC) و LINAC4 جلب شد و همکاری با این پروژه‌ها از طریق اعزام دانشجویان دکتری پژوهشگاه آغاز شد و ادامه پیدا کرد. طراحی تزریق‌گر الکترونی، چشمهٔ نور الکترونی فوتوکاتدی، و پژوهش در بخش حلقهٔ انبارش از جملهٔ فعالیت‌های محققان پژوهشگاه برای شتابدهندهٔ CLIC بوده است.

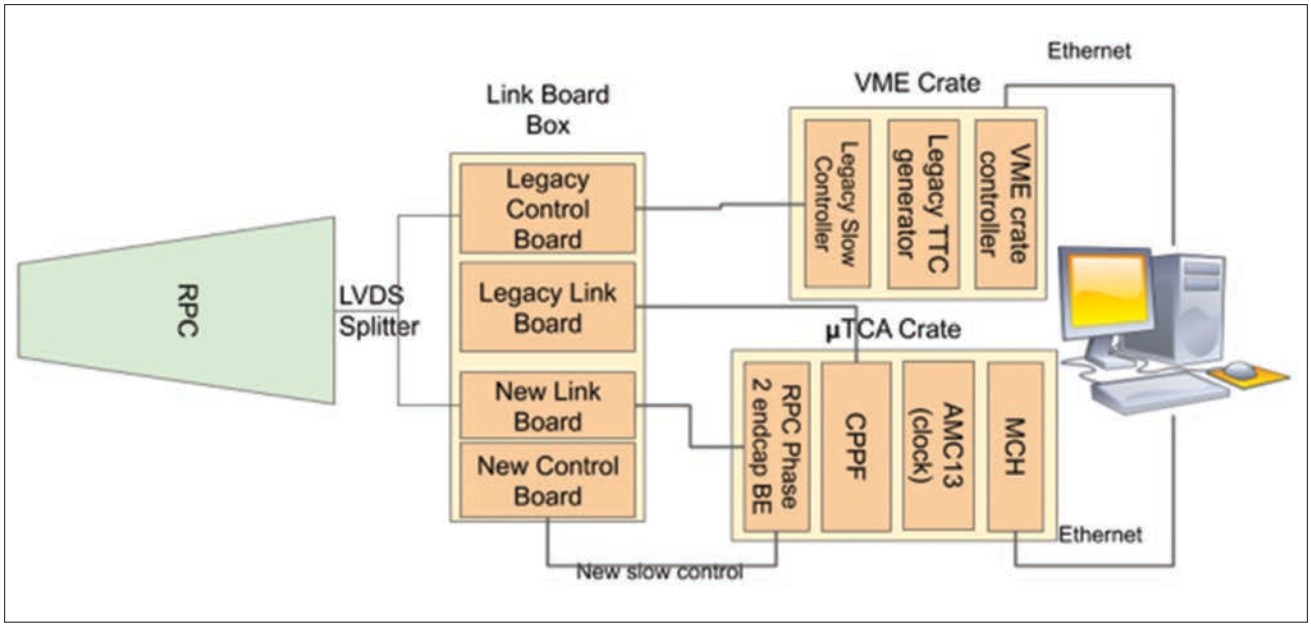
پیش از ورود به بخش بعد، با اغتنام از فرصت، از نقش محوری دکتر **حسام‌الدین ارفعی** یاد می‌کنم که مسئولیت امور همکاری پژوهشگاه با سرن را تا اواسط سال ۱۳۹۵ به عهده داشتند. بی‌شک تلاش‌های ارزندهٔ ایشان در گسترش ارتباط پژوهشگاه با سرن در بخش‌های مختلف منجر به ایجاد پایه‌ای قوی و مستحکم برای پژوهشگاه در سرن شده و به ارتقای جایگاه علمی پژوهشگاه کمک کرده است.

۳. همکاری‌های جاری پژوهشگاه با سرن

از بین تعداد زیادی آزمایش که در بخش‌های مختلف سرن در حال انجام و یا در حال مطالعه برای ساخت در آینده است، پژوهشگاه در فعالیت‌های مذکور در زیر مشارکت دارد.

۱.۳ طراحی و ساخت بوردهای ارتباطی بخش میوئونی آشکارساز CMS

قبل از ورود به بحث اصلی لازم است پیش‌زمینهٔ مختصری راجع به آشکارساز CMS بیان شود. آشکارساز CMS یک آشکارساز چند منظوره است که جهت اندازه‌گیریِ ویژگی‌های ذرات حاصل از برخوردهای پروتون-پروتون و سرب-سرب، که توسط برخورددهندهٔ بزرگ LHC انجام می‌شود، طراحی و ساخته شده است. نتیجهٔ حاصل از این اندازه‌گیری‌ها منجر به کشفیات بزرگی همچون مشاهدهٔ بوزون هیگز در سال ۲۰۱۲ شد. از مطالعهٔ داده‌های ضبط‌شده توسط آزمایش CMS جهت پاسخ‌دهی به سؤالات باز موجود در فیزیک ذرات بنیادی که به برخی از آنها در بخش ۱ اشاره شد، استفاده می‌شود. با توجه به ناکافی بودن میزان داده‌های ضبط‌شده و جهت افزایش حساسیت و دقت اندازه‌گیری‌ها برای پاسخ به سؤالات موجود در فیزیک ذرات بنیادی، آشکارساز CMS و شتابدهنده LHC بایستی ارتقا داده شوند. در این راستا، درخشندگی (Luminosity) شتابدهندهٔ LHC در حدود ۱۰ برابر نسبت به قبل افزایش خواهد یافت و انرژی مرکز جرم برخورد پروتون‌ها به ۱۴ تراالکترون ولت خواهد رسید. این فاز از ارتقای LHC را High-Luminosity LHC (LHC با درخشندگی بالا) و یا اختصاراً HL-LHC می‌نامند. همزمان با این ارتقا برای شتابدهنده،



شکل ۳. نمای شماتیکِ سیستم تست نسخهٔ پیش‌تولیدِ بوردهای جدیدِ ارتباطی و کنترلی و سیستم غربال‌گری و ضبط اطلاعات

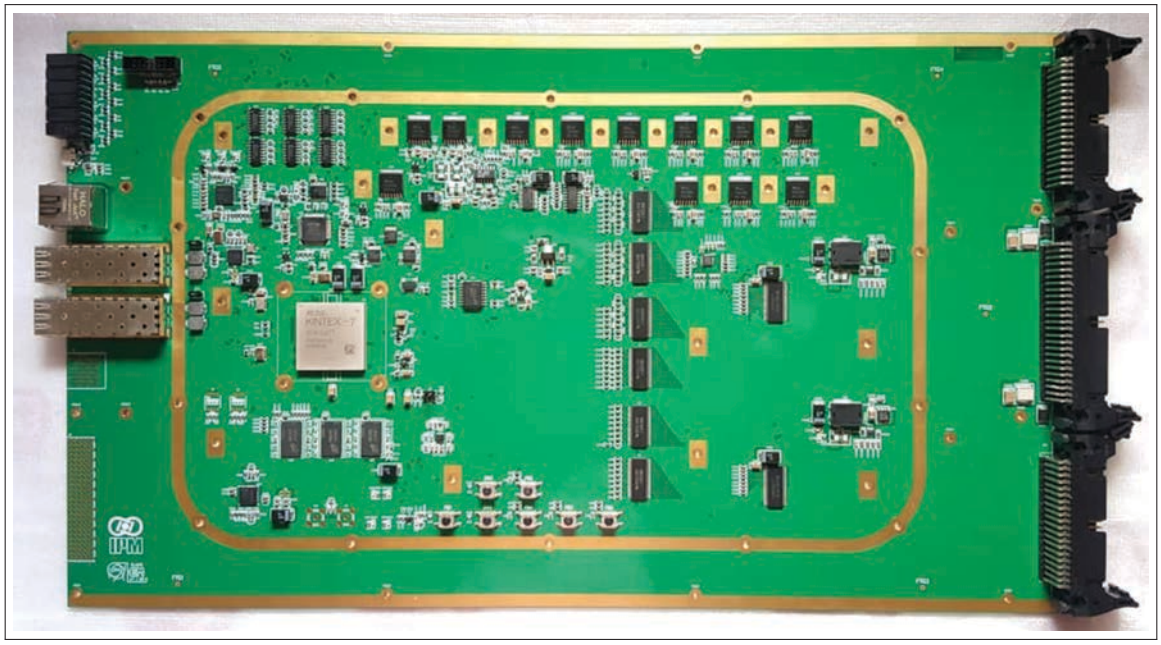
آشکارسازها از جمله تمام قسمت‌های آشکارساز CMS ارتقا می‌یابند.

آشکارسازهای ذرات میوئونی نقش محوری در آشکارساز بزرگ و چندمنظورهٔ CMS به عهده دارند. میوئون‌ها ذرات بنیادی باردار و شبیه الکترون‌ها هستند که دارای جرمی حدود ۲۰۰ برابر جرم الکترون می باشند. میوئون‌ها در اکثر کشف‌های تاریخی از جمله مشاهدهٔ بوزون‌های W ، Z در سرن، کوارک‌های سنگین در آزمایشگاه فرمی و نهایتاً در مشاهدهٔ بوزون هیگز در سرن، نقش بسیار کلیدی داشته‌اند. در واقع یکی از حساس‌ترین علامت‌های تولید ذرات جدید در مدل‌های مختلف نظری و پیش‌بینی شده، اغلب شامل یک یا چند ذرهٔ میوئونی است. از این رو آشکارساز CMS از سه نوع آشکارساز که مکمل یکدیگر هستند، جهت آشکارسازی میوئون‌ها و غربال‌گری رویدادها استفاده می‌کند. این سه نوع آشکاساز میوئونی که همه گازی هستند، RPC، CSC، و DT نام دارند.

در فاز دوم LHC (HL-LHC) در هر ۲۵ نانو ثانیه، حدود ۲۰۰ برخورد پروتون-پروتون به ازای هر دسته از برخوردها روی خواهد داد که سبب تولید میلیاردها ذرهٔ ثانویه در هر ثانیه می‌شود. چنین آهنگ عظیمی از تولید ذرات برای آشکارسازی ذرات و ضبط اطلاعات آنها بسیار چالش‌برانگیز است. بنابراین هم آشکارسازها و هم سیستم‌های الکترونیک متصل به آنها را بایستی برای مواجهه با چنین شار عظیمی از ذرات ارتقا داد. همان‌طور که ذکر شد آشکارسازهای میوئونی RPC یکی از سه نوع آشکارساز برای ذرات میوئون در CMS هستند. RPCها تفکیک‌پذیری زمانی بسیار دقیق‌تری نسبت به دو نوع دیگر یعنی CSC و DT دارند. سیستم پردازش و انتقال اطلاعات میوئون‌ها در آشکارسازهای RPC شامل بخش‌هایی است که در شکل ۳ نشان داده شده است. مجموعهٔ بوردهای کنترلی (control boards) و بوردهای ارتباطی (link boards) بخش اساسی انتقال اطلاعات میوئون‌ها، کنترل، و کالیبراسیون آشکارسازهای RPC هستند.

در اواسط سال ۱۳۹۶ با پیگیری‌ها و جلسات متعدد با مسئولان آزمایش CMS، طراحی، تست و ساخت بوردهای کنترل و بوردهای ارتباطی به پژوهشگاه سپرده شد. این پروژه به عنوان سهم سخت‌افزاری پژوهشگاه در ارتقای آشکارساز CMS محسوب می‌شود. در ابتدا برخی از مسئولان آزمایش CMS با ذکر دلایلی چون عدم وجود سابقهٔ سخت‌افزاری و الکترونیکی قابل توجهِ پژوهشگاه در سرن و مسائل تحریم، تمایلی به اینکه این پروژه به عهدهٔ پژوهشگاه قرار گیرد، نداشتند. با مذاکرات و پیگیری‌های متعدد و همچنین تشکیل تیم جدیدی از متخصصان الکترونیک زبده، مسئولان امر مجاب شدند و نهایتاً این پروژه به طور کامل به عهدهٔ پژوهشگاه گذاشته شد.

یکی از اهداف اصلی طراحی و شناخت بوردهای ارتباطی و کنترلیِ ارتقایافته برای آشکارسازهای میوئونی RPC در آشکارساز CMS، ارتقای تفکیک‌پذیری زمانی برای آشکارسازی رَد میوئون‌ها از ۲۵ نانوثانیه به ۱/۵ نانوثانیه می‌باشد. علاوه بر آن می‌بایستی به این نکته اشاره کرد که این بوردها در HL-LHC مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن شارِ ذرات خروجی خیلی بیشتر و بنابراین آهنگ ارسال داده‌ها باید از مقدار فعلی ۱/۶ گیگا بیت در ثانیه به سرعتی حداقل ۱۰ گیگا



شکل ۴. نمایی از نمونهٔ اولیهٔ بوردهای ارتباطی

بیت بر ثانیه افزایش یابد. در حال حاضر، طراحی نسخهٔ اولیهٔ بوردهای ارتباطی به پایان رسیده است و در مرحلهٔ انجام انواع تست‌ها قرار دارد. در شکل ۴ نمایی از نمونهٔ اولیهٔ بوردهای ارتباطی نشان داده است.

از جمله ویژگی‌های مهم این بورد، استفاده از نسل جدیدی از تراشه‌های الکترونیکی قابل توجه برنامه‌ریزی به نام FPGA است. همچنین پیاده‌سازی سیستم‌های ارتباطی از نوع اترنت ۱ گیگا بیت بر ثانیه و فیبر نوری ۱۰ گیگا بیت بر ثانیه، امکان می‌دهد فرایند استفاده و راه‌اندازی این سیستم بسیار منعطف باشد و کیفیت تبادل اطلاعات افزایش یابد. جدول ۱ مراحل و زمانبندی طراحی، تست، و ساخت و تحویل بوردها به سرن را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول زمانبندی دیده می‌شود، تا تابستان سال ۲۰۲۲ تمام ۱۵۰۰ بورد مورد نیاز در آشکارسازهای میوئونی RPC باید ساخته و تست شده به سرن تحویل داده شود.

۲.۳ فعالیت‌های پژوهشی فیزیک ذرات تجربی در آزمایش CMS

هدف اصلی شتابدهندهٔ LHC و آشکارسازهای آن مانند CMS، تحقیق در فیزیک ذرات و پی بردن به ساختار و رفتار ماده در کوچکترین ابعاد ممکن است. برای حصول این هدف، داده‌های خروجی از برخوردهای پروتون-پروتون که توسط آشکارساز ضبط شده باید جهت مطالعه و استخراج فیزیک مورد نظر تحلیل شوند. تحلیل داده‌ها و

جدول ۱. زمانبندی طراحی، تست و ساخت و تحویل بوردها به سرن. این زمانبندی به تازگی با در نظر گرفتن عواقب ناشی از بیماری کرونا به روز شده است.

	High Level Milestone	Time
Design	Final prototype design ready	June-July 2019 (Done)
Prototype	Initial validation of final prototype at production site	June 2020
	Final validation of final prototype design at CERN	January 2022
	Prototype and documentation finalized	February 2022
	Electronics system review	February 2022
	PCB fabricated and components received	July 2022
Production	First half of boards assembled and tested	November 2022
	Second half of boards assembled and tested	June 2022

مقایسه با پیش‌بینی‌های نظری مرحلهٔ نهایی و مهم کار است که منجر به نتایج فیزیکی و کشفیات مهمی می‌شود. محققان تیم پژوهشگاه در آزمایش CMS در سرن در مطالعات مهمی چون جستجو برای نشانه‌های ابعاد اضافه، اندازه‌گیری ویژگی‌های سنگین‌ترین ذرهٔ بنیادی یعنی کوارک تاپ، فیزیک پراکندگی در زوایای کوچک و جستجو

برای ابرتقارن سهم قابل ملاحظه داشته‌اند. از جمله پژوهش‌های اخیر محققان پژوهشگاه می‌توان به یافتن اولین شاهد برای تولید یک کوارک تاپ همراه یک فوتون و جستجو برای علائم ابعاد اضافه اشاره نمود که به ترتیب در Phys. Rev. Lett. **121** (2018) 221802 و JHEP04 (2019) 114 به چاپ رسیده‌اند. مشارکت مستمر در انجام آزمایش و داده‌گیری در سرن، ارتقای نرم‌افزارهای مورد استفاده توسط آزمایش CMS، طراحی آشکارساز برای فاز ۲ و مشارکت در تهیه، اصلاح، و داوری مقالات از جمله فعالیت‌های دیگر پژوهشگران پژوهشگاه در سرن در آزمایش CMS است.

۳.۳ همکاری در تهیه و توسعهٔ نرم‌افزار شبیه‌سازی طیف‌سنج دقیق پروتون (PPS)

طیف‌سنج دقیق پروتون (Proton Precision Spectrometer یا به اختصار، PPS) آشکارسازی در ناحیهٔ پیشانی آزمایش CMS در سرن برای اسپکتروسکوپی دقیق پروتون‌ها طراحی شده و بدین منظور از آشکارسازهای ردیاب و آشکارسازهای زمانی در هر دو سمت آزمایش CMS و در ناحیهٔ بسیار نزدیک به باریکهٔ پروتونی استفاده شده است. این طیف‌سنجی دقیق امکان مطالعهٔ فرایندهای انحصاری مرکزی را که از برخورد پروتون‌ها ایجاد می‌شوند فراهم می‌کند. در این فرایندها پروتون‌های اولیهٔ دست‌نخورده باقی می‌مانند و برهم‌کنش از طریق تبادل فوتون یا هر ذرهٔ بدون رنگ و بدون بار به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\text{Proton} + \text{Proton} \rightarrow \text{Proton} + \text{Proton} + \text{X}$$

که سیستم X در آشکارساز مرکزی که CMS است دیده می‌شود و پروتون‌های دست‌نخورده توسط آشکارسازهای ردیاب و زمانی در دو سمت آزمایش CMS و در فاصلهٔ ۲۱۵-۲۰۴ متری نقطهٔ برخورد (Interaction Point) آشکارسازی می‌شوند. PPS یک طیف‌سنج مغناطیسی است که از مغناطیس‌هایی که در تونل LHC و در فاصلهٔ بین نقطهٔ برهم‌کنش‌های پروتون‌ها و آشکارسازهای این پروژه قرار دارند استفاده می‌کند و بدین ترتیب، پروتون‌هایی را که انرژی خود را در این برخورد از دست داده‌اند از باریکهٔ اصلی پروتون منحرف می‌کنند و مسیر این پروتون‌ها قابل اندازه‌گیری می‌شود. تهیهٔ نرم‌افزاری برای توصیف هندسهٔ این آشکارساز، تست آن، و ایجاد چارچوب نرم‌افزاری برای تعریف داده‌های دیجیتالی و تبدیل داده‌های خام به داده‌های دیجیتالی، از اهمّ فعالیت‌های پژوهشگران پژوهشگاه در این بخش است.

۴.۳ شتابدهندهٔ حلقوی آینده FCC

شتابدهندهٔ حلقوی آینده (Future Circular Collider یا به اختصار FCC) از برنامه‌های سرن بعد از LHC است که در صورت تأیید و بسته به نتایج فیزیکی حاصل از LHC از سال ۲۰۴۰ شروع به کار خواهد کرد. این شتابدهندهٔ حلقوی در تونلی به محیط ۱۰۰ کیلومتر ساخته می‌شود و برای برخورد در ۴ فاز: پروتون-پروتون، الکترون-پوزیترون، الکترون-پروتون، و یون-یون در حال طراحی می‌باشد.

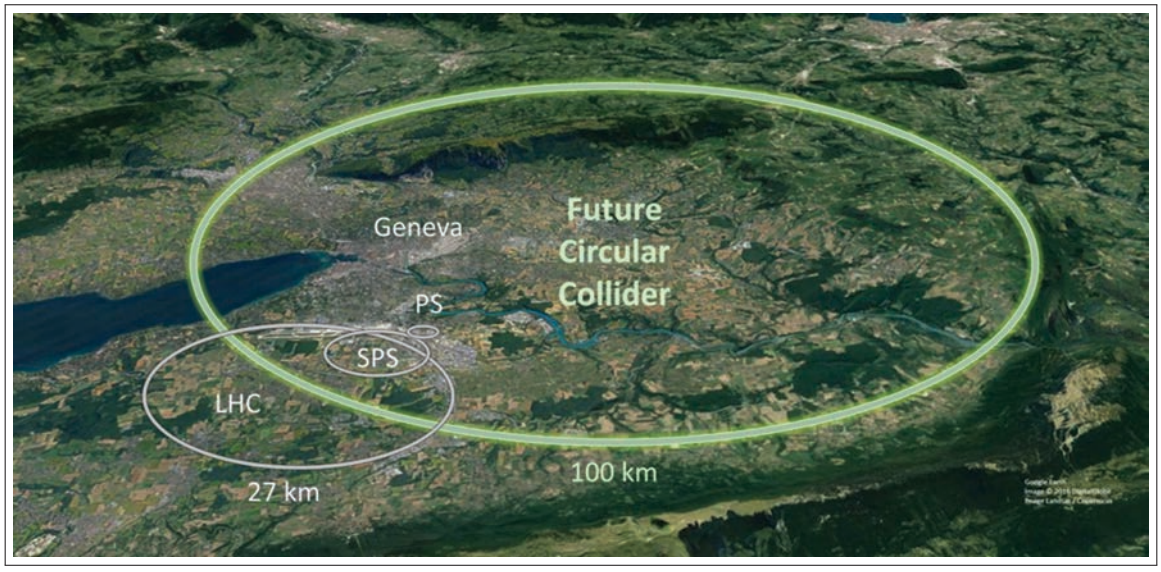
نقشه‌ای از شتابدهندهٔ FCC که در آن LHC و شتابدهنده‌های حلقوی سرن قبل از LHC یعنی PS (Proton Synchrotron) و SPS (Super Proton Synchrotron) نیز نشان داده شده، در شکل ۵ آمده است.

هدف FCC بالا بردن انرژی ذرات برخوردی در فاز پروتون-پروتون تا ۵۰ ترا الکترون ولت و بالا بردن میزان درخشندگی تا $10^{37}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در فاز الکترون-پوزیترون است.

این انتخاب که انرژی مرکز جرم پروتون-پروتون تا ۱۰۰ ترا الکترون ولت بالا برده شود، امکان تولید ذرات بسیار سنگینی را که در LHC تولید نمی‌شدند فراهم می‌سازد و همچنین انتخاب درخشندگی زیاد؛ امکان اندزه‌گیری خیلی دقیق در فاز الکترون-پوزیترون به دلیل درخشندگی بالا را فراهم می‌کند. پژوهشگاه از سال ۲۰۱۳ به این برنامه در سرن پیوست و در مطالعات اولیه و مفهومی در بخش فیزیک کوارک تاپ و بوزون هیگز همکاری می‌کند. طراحی های مفهومی در سال ۲۰۱۹ به پایان رسیدند و در مراجع [3-5] انتشار یافته‌اند که نام و نشانی پژوهشگاه در آنها یافت می‌شود.

۵.۳ طراحی، اندازه‌گیری، و راه‌اندازی چشمه‌های الکترونی و پوزیترونی برای پروژهٔ AWAKE

همان‌طور که قبلاً گفته شد، پژوهش در فیزیک ذرات بنیادی به منظور دست‌یابی به فیزیک حاکم بر ذرات بنیادی تشکیل‌دهندهٔ جهان، امروزه نیازمند برخورددهنده‌هایی است که قابلیت شتابدهی ذرات تا مقیاس انرژی بالاتر از ترا الکترون ولت را داشته باشند. بزرگترین مانع در برابر این مهم، ضعف تکنولوژیکی شتابدهنده‌های امروزی در تولید میدان‌های الکترومغناطیسی با گرادیان بسیار بالا بوده که امروزه در حد 100MeV/m ثابت مانده‌اند. با چنین گرادیانی به منظور برخورد ذرات در حد چند ترا الکترون به شتابدهنده‌هایی با طولی از مرتبهٔ چندین کیلومتر نیاز خواهد بود که عملاً انجام آن را اگر نه غیر ممکن، اما بسیار دشوار می‌سازد. از این‌رو لازم است تا روش‌های مرسوم و فعلی شتابدهی ذرات دچار یک تحول اساسی متناظر با نیازهای به‌روز فیزیک ذرات بنیادی شوند. در همین راستا طی چند سال اخیر مطالعات بنیادی گسترده‌ای در حوزهٔ شتابدهنده‌ها در سرتاسر جهان شروع شده



شکل ۵. نقشهٔ شتاب‌دهندهٔ حلقوی آینده

و در نهایت، روش جایگزین بسیار نویدبخشی بر پایهٔ به‌کارگیری امواج پلاسمایی پیشنهاد گردید. در این روش، باریکه‌ای از ذرات سنگین مانند پروتون‌های پرانرژی وارد یک محیط پلاسمایی شده و انرژی خود را به واسطهٔ برانگیختگی امواج پلاسمایی به الکترون‌ها و پوزیترون‌های تزریق‌شونده در مرحلهٔ بعد خواهند داد. میزان گرادیان تولید شده در این روش طبق برآوردهای آزمایش از مرتبهٔ چند GeV/m است که دهها برابر بالاتر از گرادیان تولیدشده در شتابدهنده‌های امروزی است. این بدان معنی است که طول شتابدهنده‌های آتی در صورت به‌کارگیری این تکنولوژی تا دهها برابر کوچکتر شده و دست‌یابی به برخورددهنده‌هایی با انرژی چندین تراالکترون در ابعاد معقول نیز دور از انتظار نخواهند بود. از این‌رو در سرن یک پروژهٔ آزمایشگاهی بین‌المللی تحت عنوان AWAKE کلید خورده تا نه تنها قابلیت این روش را در بوتهٔ آزمایش قرار دهد بلکه فیزیک حاکم بر چنین شتابدهنده‌ای که در واقع اولین نسل برخورددهنده‌های آتی جهان را معرفی می‌نماید، با جزئیات کامل درک شود. با وجود این، بزرگترین مشکل در برداشتن این گام عظیم علمی نه تولید امواج پلاسمایی مورد نیاز بلکه تولید و انتقال باریکه‌های اصلی برخوردی الکترونی و پوزیترونی با حداکثر کیفیت ممکن می‌باشد که انجام آن به کمک روش‌های مرسوم امکان‌پذیر نیست. بدیهی است که افزایش کیفیت هر چه بیشتر این دو باریکه نه تنها منجر به جذب و شتابدهی کاملاً مؤثر ذرات در امواج پلاسمایی می‌شود، بلکه به افزایش چشمگیر درخشندگی در نقطهٔ برخورد خواهد انجامید که در واقع هدف نهایی هر برخورددهنده‌ای از این دست می‌باشد. از این‌رو از ابتدای این پروژه طراحی نوینی از چشمه‌های یاد شده به عنوان یک هدف اصلی مد نظر قرار گرفته که بتواند همهٔ ویژگی‌های مورد نیاز چنین برخورددهنده‌ای را برآورده سازد. در حال حاضر فرایند طراحی چشمه‌های الکترونی و پوزیترونی این پروژه توسط متخصصان پژوهشگاه دانش‌های بنیادی در حال انجام است و در این زمینه طرح‌های اولیه ارائه و مورد تأیید قرار گرفت. در اولین طراحی، دستیابی به همهٔ پارامترهای مورد نیاز چشمهٔ الکترونی حاصل شد و اکنون فرایند بهینه‌سازی هرچه بیشتر و بررسی دقیق‌تر با در نظر گرفتن کلیهٔ تلورانس‌ها، آثار نامطلوب خطی و غیر خطی و خطاهای اجتناب‌ناپذیر ساخت، در جریان می‌باشد. همچنین مطالعات تخصصی لازم در زمینهٔ بهینه‌سازی هرچه بیشتر چشمهٔ پوزیترونی مورد نیاز در دست انجام است.

۶.۳ طراحی رادیو-فرکانسی ساختار شتابدهی آلوارز برای شتابدهندهٔ پزشکی کربن در پروژهٔ نیمز

مزایای منحصر به فرد استفاده از باریکهٔ پرانرژی پروتون نسبت به روش‌های رایج رادیوتراپی در درمان بیماران سرطانی منجر به رشد چشمگیر تقاضا برای ساخت مراکز درمانی مجهز به این تکنولوژی در جهان شده است. در سال‌های اخیر شرکت‌هایی از قبیل زیمنس، IBA و مؤسساتی از قبیل سرن و (GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research) در این حوزه فعالیت می‌کنند.

علی‌رغم فراگیرشدن درمان بیماران با باریکهٔ پرانرژی پروتونی،

درمان با یون‌های سنگین‌تر مانند کربن از روش‌های جدید درمان به شمار می‌آید. تعداد مراکزی که در حال حاضر مشغول درمان با یون‌های سنگین‌تر از پروتون هستند بسیار محدود است. سرن یکی از پیشگامان توسعهٔ مراکز پزشکی یون‌هایی مثل کربن بوده است. در سال ۲۰۰۰، نتیجهٔ تحقیقات انجام‌شده در سرن در پروژهٔ PIMMS (Proton-Ion Medical Machine Study) منجر به ساخت موفقیت‌آمیز ماشین‌های یون‌درمانی در ایتالیا و اتریش شده است. هزینه‌های بالای ساخت ماشین‌های شتابدهنده، و بزرگ بودن ابعاد ماشین‌های فعلی از جمله موانع در راه مجهز کردن بیمارستان‌ها به سیستم‌های درمان با یون کربن می‌باشد. بنابراین افزایش تعداد مراکز کربن‌درمانی نیازمند تغییرات اساسی در تکنولوژی موجود است.

پس از گذشت حدود بیست سال از اقدام سرن در راه‌اندازی ماشین‌های کربن‌درمانی، این مرکز تصمیم به ورود مجدد به حوزهٔ شتابدهنده‌های پزشکی با هدف تولید ماشین‌هایی با کیفیت باریکهٔ بالاتر و در عین حال با ابعاد کوچک‌تر و اقتصادی‌تر را دارد. در سال ۲۰۱۹ با همکاری SEEIIS (South-East Europe International Institute for Sustainable Technologies)، آغاز به کار در پروژهٔ NIMMS (Next Ion Medical Machine Study) کرد. این پروژه سه هدف عمده دارد: ۱) بهبود طراحی ساخت آهنرباهای ابررسانا؛ ۲) طراحی شتابدهندهٔ دایره‌ای سنکروترونی با قابلیت انبارش جریان بالای باریکه؛ ۳) طراحی شتابدهندهٔ خطی کربن در فرکانس‌های حدود ۷۵۰ مگاهرتز. همکاری پژوهشکدهٔ ذرات و شتابگرها با این پروژه از همان ابتدا در سال ۲۰۱۹ با مشارکت درطراحی شتابدهندهٔ خطی کربن و بخش‌های دیگر شروع شده و ادامه دارد.

۴. دستاوردها و مزایای همکاری با سرن

همکاری پژوهشگاه دانش‌های بنیادی با سرن در آزمایش CMSو در بخش‌های دیگر بدون شک نقطهٔ عطفی درتاریخ علم نوین در ایران است. مشارکت در چنین همکاری علمی عظیم و بی‌بدیلی در سرن در کنار محققان تراز اول از بیش از ۴۲ کشور دنیا، امکان پژوهش در بنیادی‌ترین آزمایش علمی جهان را برای پژوهشگران ایرانی ایجاد کرده است. همکاری با آزمایشگاهی بین‌المللی با سابقهٔ بیش از ۶۵ سال که کشفیات آن منجر به دریافت چندین جایزهٔ نوبل و فناوری‌های نوینی شده که وارد زندگی روزمره گشته است، نه تنها زمینهٔ ورود انواع دانش و فناوری را به کشور فراهم می‌کند بلکه استانداردهای کلی پژوهش در کشور را به بالاترین درجهٔ خود ارتقاء می‌دهد. همکاری پژوهشگاه با سرن در دو دههٔ اخیر فراز و فرودهای زیادی را تجربه کرده و با این حال، دستاوردهای زیادی به همراه داشته است که به برخی از آنها اشاره می‌شود:

- علم فیزیک ذرات بنیادی و انرژی‌های بالا در جهان به طور موازی به صورت نظری و تجربی درحال پیشرفت بوده است، در حالی که در ایران این علم فقط در شکل نظری مطرح شده و توسعه یافته است. همکاری پژوهشگاه با سرن این فرصت را برای پژوهشگران فراهم کرد که در مرزهای فیزیک ذرات بنیادی پژوهش کنند.

- از دیگر دستاوردهای بسیار مهم همکاری با سرن، مشارکت محققان پژوهشگاه در یکی از بزرگترین کشفیات علم فیزیک یعنی مشاهدهٔ بوزون هیگز است که منجر به اعطای جایزه نوبل فیزیک در سال ۲۰۱۳ شد. مقالهٔ مربوط به این کشف در مجلهٔ Phys. Lett. B منتشر شد با تعداد ارجاع بیش از ۱۸۰۰۰ (براساس google scholar) یکی از پُر ارجاع‌ترین مقاله‌های پژوهشگاه می‌باشد.

- انتشار مقالات پژوهشی با نام و نشانی محققان پژوهشگاه در همکاری با آزمایش CMS در سرن یکی از مهمترین دستاوردهای همکاری با سرن می‌باشد. محققان پژوهشگاه در بیش از ۹۶۰ مقاله که همه در مجلات معتبر به چاپ رسیده‌اند به طور مستقیم و یا غیرمستقیم سهیم بوده‌اند.

- ورود به پروژه‌های طراحی، تست، و ساخت آشکارسازها و شتابدهنده‌های مدرن و تربیت نیروی انسانی متخصص در زمینهٔ شتابدهنده، الکترونیک، و آشکارساز ازجمله مزایای مهم همکاری با سرن است.

- ایجاد دسترسی برای پژوهشگران ایرانی به تجهیزات مدرن، آموزش مهارت خاص و امکان دیده شدن و شناخته شدن در سطح جامعهٔ علمی بین‌المللی امکانی است که همکاری با سرن برای پژوهشگاه ایجاد نموده است.

- ترویج علم فیزیک ذرات بنیادیِ تجربی و شتابدهنده‌ها و ایجاد راهی برای مشارکت سایر دانشگاه‌های کشور از اهداف پژوهشگاه در طرح همکاری با سرن بوده است. به منظور گسترش این فعالیت‌ها، تلاش‌های زیادی برای اتصال پژوهشگران سایر مؤسسات کشور به سرن چه مستقیماً و چه از طریق پژوهشگاه شده است. در این راستا، پژوهشگاه تعداد زیادی کنفرانس و کارگاه ملی و بین‌المللی برگزار کرده است و تعداد قابل توجهی از دانشجویان دانشگاه‌های کشور با استادان پژوهشگاه در مورد پروژه‌های سرن همکاری نموده‌اند. عضویت دانشگاه صنعتی اصفهان در آزمایش CMS در سال ۱۳۹۸ نمونه‌ای از دستاوردهای پژوهشگاه در این حوزه است که توسط نیروهای تربیت‌شده توسط پژوهشگاه و کمک پژوهشگاه و همکاران با سابقهٔ آن به انجام

رسید. در واقع همکاری دانشگاه صنعتی اصفهان با سرن نوزادی است که از دل دو دهه همکاری پژوهشگاه با سرن بیرون آمده است.

۵. کلام آخر

همکاری پژوهشگاه با سرن در آزمایش CMS و برخی از پروژه‌های مربوط به شتابدهنده‌ها در سال‌های گذشته نقش فوق‌العاده‌ای در ارتقای جایگاه پژوهشگاه و کشور در رتبه‌بندی‌های علمی داشته است. در سال‌های اخیر به دلایل متعدد، ارزش و اهمیت همکاری‌های علمی میان پژوهشگران جهان بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از جملهٔ انگیزه‌های این توجه، ارتقای کیفیت تولیدات علمی، استفاده از تخصص و مهارت نویسندگان همکار، افزایش تولیدات علمی و ابداع ایده‌های جدید است. سرن با داشتن بیش از ۱۵۰۰۰ محقق که در دهها آزمایش مختلف در حال طراحی، تست، ساخت، و توسعهٔ فناوری و پژوهش در فیزیک می‌باشند، گنجینه‌ای است که بی‌شک نفع پژوهشگاه از هر نظر در توسعهٔ ارتباط با آن می‌باشد. امید است با توجه و بازنگری در خط مشی پژوهشگاه بهرهٔ کافی از آن برده شود و این ارتباط علمی که سال‌ها برای آن تلاش شده، به شایسته‌ترین شکل ممکن ارتقا یابد. تسهیل همکاری، ارتباط، و ارتقای امکانات و تجهیزات کاری، پژوهشگاه را به مؤسسه‌ای قدرتمند در سرن تبدیل می‌کند و از اضطراب پژوهشگران در همکاری خود با مؤسسهٔ سرن می‌کاهد.

۶. قدردانی

لازم است از تمام همکاران پژوهشکدهٔ ذرات و شتابگرها که در بخش‌های مختلف همکاری با سرن فعال هستند و این مقاله انعکاس مختصری از تلاش‌های آنان است قدردانی کنم. از سرکار خانم رفیعی که در تهیه و تنظیم این نوشته مرا یاری کردند، سپاسگزاری می‌نمایم.

مراجع

1. **ATLAS Collaboration**, G. **Aad**, T. **Abajyan**, B. **Abbott**, ... L. **Zwalinski**, *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, Physics Letters B **716** (2012), 1-29.

2. **CMS Collaboration**, S. **Chatrchyan**, V. **Khachatryan**, A.M. **Sirunyan**, ... D. **Wenman**, *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, Physics Letters B **716** (2012), 30-61.

3. A. **Abada**, M. **Abbrescia** and et al., *FCC-ee: The Lepton Collider, Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2*, Eur. Phys. J. ST **228** (2) (2019), 261-623.

4. A. **Abada**, M. **Abbrescia** and et al., *FCC-hh: The Hadron Collider, Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 3*, Eur. Phys. J. ST **228** (4) (2019), 755-1107.

5. A. **Abada**, M. **Abbrescia** and et al., *HE-LHC: The High-Energy Large Hadron Collider, Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 4*, Eur. Phys. J. ST **228** (5) (2019), 1109-1382.

6. A. **Abada**, M. **Abbrescia** and et al., *FCC Physics Opportunities, Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 1*, Eur. Phys. J. C **79** (6) (2019), 474.