مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۵، شمارهٔ ۲، ویژه‌نامه، تابستان ۱۳۹۴
مقاله نامهٔ اولین کنفرانس ملی شتاب دهنده‌ها و کاربرد آن‌ها، آذر ۱۳۹۲

چشمهٔ نور ایران، اولین آزمایشگاه ملی برای تحقیقات بین رشته‌ای

جواد رحیقی[۱]، محمد لامعی رشتی[۱]، رحمان اقبالی[۲و۱]، احسان سلیمی[۱]، حسین قاسم[۳و۱]، خورشید سرحدی[۱]، مرتضی جعفرزاده خطیبانی[۱]، جعفر دهقانی[۱]، فرهاد سعیدی[۱]، آرش صادقی پناه[۱]، اعظم غلامپورآژیر[۱]، سمیه امیری[۱]، ابوالفضل شهوه[۱]، محمد علی رحیمی[۱]، امید سیفی[۱]، اسماعیل احمدی[۱]، سعید پیرانی[۱]، احسان یوسفی[۱]، دنیا شیرنگی[۱]، مهدی شفیعی[۱]، محسن اکبری فسخودی[۱]، امین ایرجی[۱]، بابک کامکاری[۱]، سمیرا فاتحی[۱]، محمد رزازیان[۱]، وحید مرادی[۱]، پیام خدادوست[۱]، مجید هاشمی[۱]، حمیده بیگزاده جلالی[۱]، امیر دانایی فرد[۱]

۱. طرح چشمهٔ نور ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران
۲. دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین
۳. پژوهشکدهٔ ذرات و شتاب‌دهنده‌ها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی تهران

پست الکترونیکی: Javad.rahighi@ipm.ir

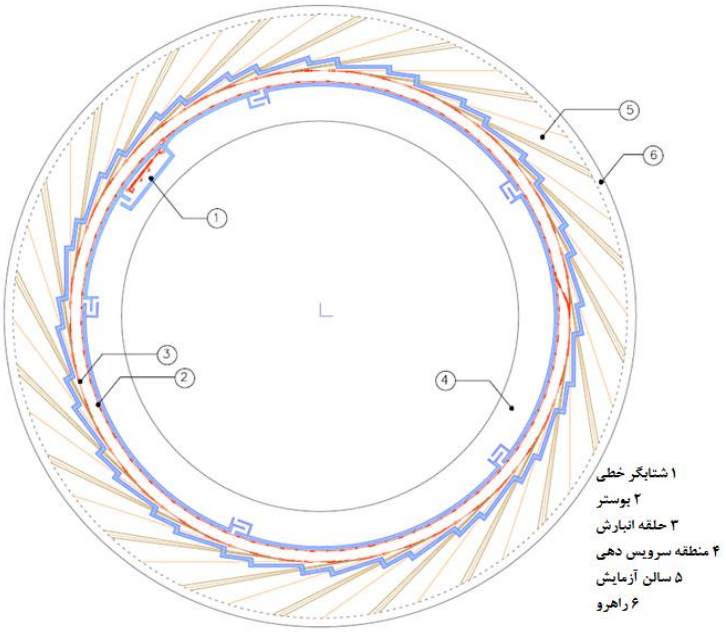
چکیده

طرح چشمهٔ نور ایران (شتابگر ملی ایران)، بزرگترین تسهیلات آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ برای پژوهش‌های بین رشته‌ای در کشور است که با هدف تولید تابش سنکروترونی با درخشندگی بسیار زیاد به منظور انجام آزمایش‌های گوناگون در زمینه‌های فیزیک، شیمی، پزشکی، علم مواد، محیط زیست، نانوفناوری، داروسازی و ... به تصویب رسیده است. بر اساس طراحی‌های انجام شده، چشمهٔ نور ایران شامل یک حلقه انبارش الکترونی با محیط ۵۲۸ متر است که الکترون‌ها با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت، جریان ۴۰۰ میلی آمپر و گسیلندگی ۰٫۴۷۷ نانومترادیان در آن انبار می‌شود. نور تولید شده در خطوط باریکه در طیف وسیعی از انرژی از مادون قرمز تا اشعهٔ ایکس سخت با درخشندگی بسیار زیاد، قطبیدگی دلخواه، انرژی قابل تنظیم ابزار مناسبی برای آزمایش‌های مختلف در زمینه‌های گوناگون علمی است که می‌تواند اطلاعات بسیار دقیقی از جزئیات ساختار ماده را در مقیاس اتمی و مولکولی به دست دهد. طراحی و ساخت بخشی از قطعات شتابگر نظیر تقویت کننده بسامد رادیویی حالت جامد، تفنگ الکترونی گرمایونی، مغناطیس‌های دوقطبی و چهارقطبی، دستگاه‌های اندازه‌گیری میدان مغناطیسی و منابع تغذیه با پایداری بسیار زیاد در آزمایشگاه تحقیق و توسعه طرح شتابگر ملی ایران انجام شده است. این مقاله مشخصات و ویژگی‌های طرح چشمهٔ نور ایران را به همراه دستاوردهای تحقیق و توسعهٔ آن در قالب متن، جداول و شکل‌های مربوطه ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: حلقهٔ انبارش، چشمهٔ نور ایران، درخشندگی، مغناطیس، منبع تغذیه، سیستم بسامد رادیویی

۱. مقدمه

طرح چشمهٔ نور ایران (شتابگر ملی ایران) در راستای تحقق چشم‌انداز و اهداف کلان ملی و به منظور ایجاد اولین آزمایشگاه بزرگ- مقیاس برای پژوهش‌های بین رشته‌ای در



شکل ۱. چیدمان کلی چشمهٔ نور ایران شامل بخش‌های پیش تزریق‌گر، تزریق‌گر، بوستر، حلقهٔ انبارش، خطوط انتقال و بخش آزمایشگاهی.

ایران و پاسخگویی به نیازهای فنی و تخصصی دانشمندان و پژوهشگران کشور، منطقه، و فراتر از آن برنامه‌ریزی شده و انتظار می‌رود تا پایان سال ۲۰۲۰ میلادی در شهر قزوین مورد بهره‌برداری قرار گیرد. چشمهٔ نور ایران شامل یک حلقهٔ انبارش الکترونی با محیط حدود ۵۲۸ متر است که در آن الکترون‌ها با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت، جریان ۴۰۰ میلی آمپر و گسیلندگی ۰٫۴۷۷ نانومترادیان انبار می‌شوند [۱]. طراحی این شتابگر به گونه‌ای است که در هنگام تأسیس، تابش سنکروترونی (نور) تولید شده در خطوط باریکه ابزار مناسبی را برای طیف وسیعی از آزمایش‌ها تولید کرده و با بسیاری از آزمایشگاه‌های مدرن دنیا رقابت خواهد کرد. چیدمان کلی مجموعه شتابگر ملی ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.

در ابتدا الکترون‌های تولید شده در تفنگ الکترونی وارد شتابگر خطی می‌شوند؛ در شتابگر خطی (که شامل سه بخش است) انرژی الکترون‌ها به ۱۵۰ مگا الکترون ولت رسیده و از طریق خط انتقال شتابگر خطی به بوستر (LTB)، به حلقهٔ بوستر (حلقهٔ بالا برندهٔ انرژی) وارد می‌شوند. انرژی الکترون‌ها در بوستر به ۳ گیگا الکترون ولت افزایش می‌یابد و سپس از طریق خط انتقال بوستر به حلقه انبارش (BTS)، به سمت حلقه انبارش هدایت می‌شوند. الکترون‌ها در حلقه انبارش ذخیره شده و با استفاده از مغناطیس‌های خم‌کننده با میدان ۰٫۷۴۸ تسلا و یا اَدَوات جوف‌گذاری[۱] به عنوان چشمهٔ فوتون عمل می‌کند. نور تولید شده وارد خطوط باریکه گردیده و برای استفاده کاربران آماده می‌شود [۲ و ۳].

۲. حلقهٔ انبارش

حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران شامل مغناطیس‌های دوقطبی، چهارقطبی، شش قطبی و مغناطیس‌های اصلاح کننده، انواع پمپ‌های خلاء، کاواک‌های بسامد رادیویی، سیستم‌های اندازه‌گیری و اَدَوات جوف‌گذاری است که هر کدام با هدفی متفاوت در حلقهٔ انبارش چیده می‌شوند. مغناطیس‌های دوقطبی به منظور خم کردن مسیر باریکهٔ الکترونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دوقطبی‌ها همچنین می‌توانند سبب تولید تابش سنکروترونی شوند. هدف از به کارگیری مغناطیس‌های چهارقطبی در حلقه انبارش، کانونی سازی باریکهٔ الکترونی است و به منظور اصلاح ابیراهی‌های باریکهٔ الکترونی و افزایش فضای پایدار آن‌ها از مغناطیس‌های شش‌قطبی استفاده می‌شود. پمپ‌های خلاء با هدف حفظ خلاء بسیار بالا ($\sim 10^{-9}$ Torr)، و ادوات جوف‌گذاری برای تولید تابش سنکروترونی با انرژی و درخشندگی زیاد در حلقه انبارش قرار می‌گیرند.

۱. Insertion devices

جدول ۱. پارامترهای اصلی حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران.

پارامتر	واحد	مقدار
انرژی	گیگا الکترون ولت	۳
جریان	میلی آمپر	۴۰۰
محیط حلقهٔ انبارش	متر	۵۲۸
گسیلندگی باریکه	نانومترادیان	۰٫۴۷۷
فرکانس رادیویی	مگا هرتز	۵۰۰
تعداد دو قطبی	–	۱۰۰
تعداد چهار قطبی	–	۳۲۰
تعداد شش قطبی	–	۳۲۰

جدول ۲. پارامترهای اصلی حلقهٔ بوستر چشمهٔ نور ایران.

پارامتر	واحد	مقدار
انرژی ورودی باریکه	مگا الکترون ولت	۱۵۰
انرژی خروجی باریکه	گیگا الکترون ولت	۳
بیشینه جریان	میلی آمپر	۵
محیط	متر	۵۰۴
گسیلندگی باریکه	نانومترادیان	۳٫۵۰۳
آهنگ تکرار	هرتز	۲
فرکانس رادیویی	مگا هرتز	۵۰۰

طراحی حلقه انبارش چشمهٔ نور ایران به صورت تقارن بیست‌گانه است، بدین معنی که شبکهٔ پایه ۲۰ بار در کل حلقه تکرار شده است. هدف از طراحی این شبکه استفاده از بخش‌های مستقیم[1] تا حد امکان بزرگ برای کاهش گسیلندگی و اندازهٔ باریکه می‌باشد [۱]. حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران دارای ۲۰ فضای عاری از مغناطیس‌های خم‌کننده، هریک به طول ۵٫۱۱ متر، می‌باشد. این بخش‌ها برای وارد کردن ادوات جوف‌گذاری جهت تولید تابش سنکروترون، کاواک‌ها و سیستم‌های تزریق استفاده می‌شوند. پارامترهای اصلی حلقهٔ انبارش در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۳. بوستر (حلقه بالابرنده انرژی)

در بوستر انرژی الکترون‌هایی که از شتابگر خطی وارد شده‌اند از ۱۵۰ مگا الکترون ولت به انرژی نهایی ۳ گیگا الکترون ولت خواهد رسید. محیط حلقهٔ بوستر ۵۰۴ متر بوده و بیشینهٔ جریان باریکه در آن ۵ میلی آمپر با گسیلندگی ۳٫۵۰۳ نانومتر رادیان می‌باشد. در طراحی بوستر چشمهٔ نور ایران کاهش گسیلندگی با لحاظ کردن حداقل هزینه‌های ساخت در نظر گرفته شده است. پارامترهای اصلی بوستر چشمهٔ نور ایران در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

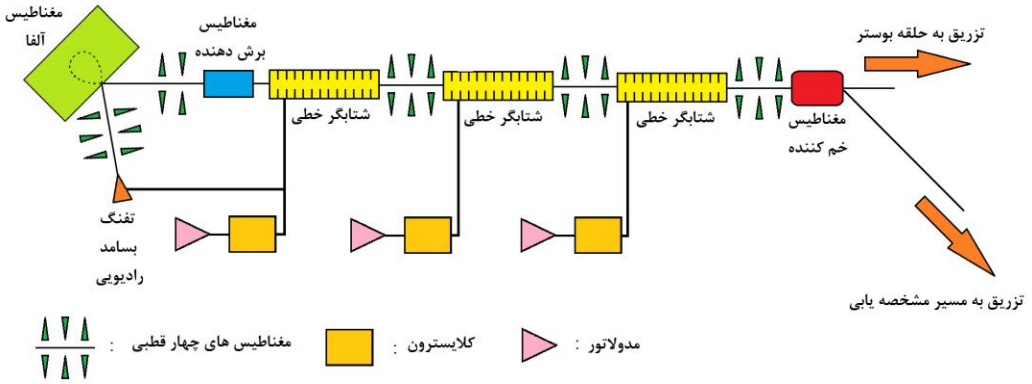
۴. سیستم پیش تزریق‌گر الکترون چشمهٔ نور ایران

پیش تزریق‌گر الکترون چشمهٔ نور ایران یک شتابگر خطی باند S به همراه یک تفنگ الکترونی بسامد رادیویی با کاتد گرمایونی است. مشخصات پیش تزریق‌گر الکترون که در جدول ۳ ارائه شده است، اولین عامل تضمین کنندهٔ تزریق بهینهٔ الکترون‌ها به حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران است. شکل ۲ طرح کلی شبکهٔ پیش تزریق‌گر الکترون چشمهٔ نور ایران را نمایش می‌دهد. در این شبکه یک تفنگ الکترونی بسامد رادیویی با کاتد گرمایونی وظیفهٔ تولید و شتاب‌دهی اولیهٔ الکترون‌ها و نیز دسته بندی اولیهٔ آن‌ها را بر عهده دارد. دسته‌های الکترون پس از خروج از این تفنگ، ۲٫۶MeV انرژی خواهند داشت. پس از آن یک مغناطیس آلفا دسته‌های الکترون خارج شده از تفنگ را در راستای طولی فشرده می‌کند تا برای تزریق به شتابگرهای خطی فشردگی فاز

۱. Straight section

جدول ۳. مشخصات عملکرد پیش تزریق گر الکترون چشمهٔ نور ایران.

انرژی	> ۱۵۰ MeV
بسامد کاری	۲۸۵۶ MHz
آهنگ تکرار	۲ Hz
پراکندگی انرژی	< ۰٫۱٪ (RMS)
گسیلندگی نرمالیزه	< ۱۰ π mm-mrad
عرض پالس چند دسته‌ای[۱]	۱ μs
بار الکتریکی چند دسته‌ای	> ۲ nC
عرض پالس تک دسته‌ای[۱]	< ۱ ns
بار الکتریکی تک دسته‌ای	> ۳۰۰ pC



شکل ۲. طرح کلی شبکهٔ پیش تزریق‌گر الکترون چشمهٔ نور ایران.

مناسب را به دست آورند. یک مغناطیس برش دهنده پس از مغناطیس آلفا قرار داده شده است تا برای عملکرد در حالت تک دسته‌ای، برش مناسب از باریکهٔ خروجی تفنگ الکترونی را به شتابگرهای خطی انتقال دهد. پس از آن الکترون‌ها به مجموعه‌ای از سه شتابگر خطی الکترون تزریق شده و در هر یک ۵۰ MeV انرژی کسب می‌کنند تا به انرژی نهایی ۱۵۰ MeV رسیده و از آنجا به حلقه بوستر و یا مسیر مشخصه‌یابی باریکه تزریق شوند.

به منظور انجام اندازه‌گیری‌های اولیه، یک نمونه از تفنگ الکترونی در چشمهٔ نور ایران ساخته شده است. نتایج اندازه گیری بر روی قطعات تفنگ الکترونی بسامد رادیویی ساخته شده در کشور، خطای ابعاد کمتر از ۲۰μm و صافی سطح با خطای کمتر از ۰٫۸μm را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری‌های کم توان بسامد رادیویی نیز این نتایج را تایید می‌کنند [۴].

۵. الکترومغناطیس‌ها

شبکه‌های حلقهٔ انبارش و بوستر و خطوط انتقال طراحی شده دارای دوقطبی‌هایی با شدت میدان مغناطیسی کمتر از ۱ تسلا هستند که امکان ساخت تمامی الکترومغناطیس‌ها اعم از دوقطبی، چهارقطبی، و شش قطبی با استفاده از فولادهای تولید داخل فراهم است. ساخت این الکترومغناطیس‌ها تجربیات بسیار ارزنده‌ای را در هر یک از زمینه‌های طراحی، ساخت، و اندازه‌گیری میدان مغناطیسی الکترومغناطیس‌های حلقه انبارش سنکروترون در بر داشته است. دستیابی به دانش فنی ساخت این الکترومغناطیس‌ها، گامی بزرگ در توسعهٔ این شاخهٔ بسیار مهم از فناوری ساخت شتاب‌هنده‌ها در ایران است.

طراحی و ساخت نمونه‌های اولیه تعدادی از الکترومغناطیس‌های مورد نیاز در دستور کار تحقیق و توسعهٔ چشمهٔ نور ایران قرار دارد.

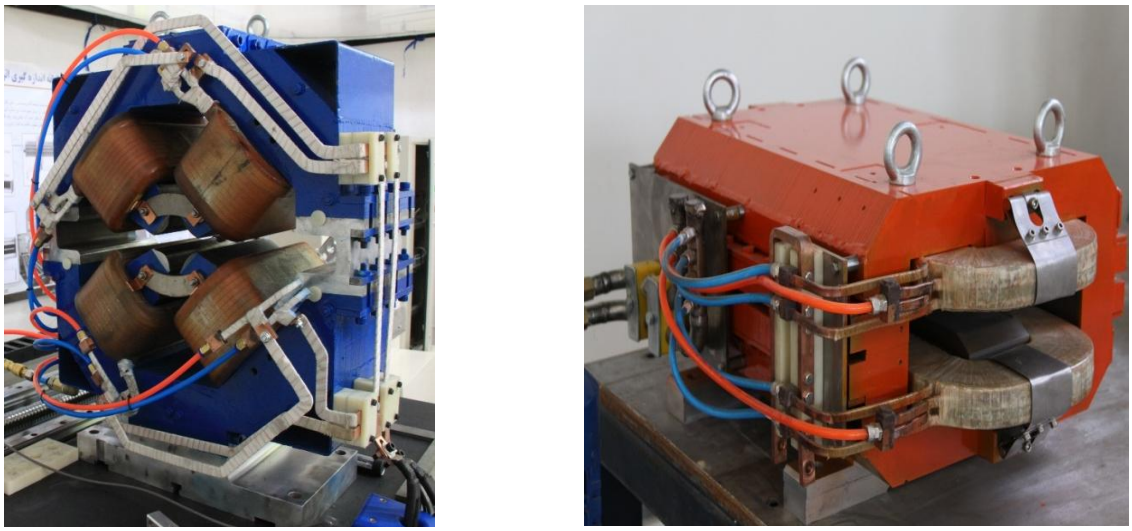
در ادامه به معرفی برخی الکترومغناطیس‌های ساخته شده می‌پردازیم.

جدول ۴. مشخصات الکترومغناطیس دو قطبی نوع H [۵].

میدان	T	۰٫۵
شیب میدان	T/m	–
شکاف عمودی	mm	۳۴
محدودهٔ پایداری میدان	mm	±۲۰
ΔB/B		$<۱\times۱۰^{-۴}$
طول مکانیکی	mm	۵۰۰

جدول ۵. مشخصات الکترومغناطیس و چهارقطبی [۵].

گرادیان	۱۸T/m
شعاع شکاف	۳۰ mm
محدودهٔ پایداری میدان	± ۱۸ mm
ΔB/B	$<۲\times۱۰^{-۴}$
طول مکانیکی	۲۳۳ mm



شکل ۳. مغناطیس دوقطبی نوع H، (راست)، و مغناطیس چهارقطبی، (چپ)، ساخته شده در آزمایشگاه تحقیق و توسعهٔ چشمهٔ نور ایران.

۱.۵. طراحی و ساخت الکترومغناطیس دوقطبی نوع H

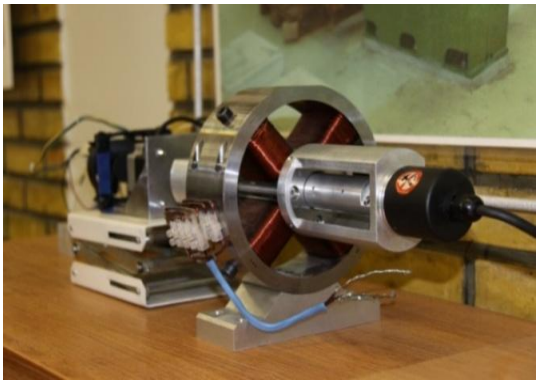
شکل ۳ (راست) دو قطبی مغناطیسی نوع H را نشان می‌دهد که با میدان مغناطیسی ۰٫۵ تسلا و طول مکانیکی ۵۰۰ میلی متر ساخته شد. با ساخت موفقیت آمیز این مغناطیس می‌توان گفت که دانش طراحی و ساخت مغناطیس‌های شتابگر برای اولین بار در ایران به وجود آمده است. مشخصات اصلی این مغناطیس در جدول ۴ آمده است.

۲.۵. طراحی و ساخت الکترومغناطیس چهارقطبی

پس از ساخت نمونهٔ دوقطبی نوع H با میدان کم، طراحی ساخت یک الکترومغناطیس چهارقطبی مربوط به شبکهٔ حلقهٔ انبارش که اطلاعات اولیه آن توسط گروه دینامیک باریکه ارائه شد آغاز گردید. در این نمونه حداکثر تلاش صورت گرفت تا همهٔ بخش‌ها و قطعات این مغناطیس توسط افراد و نیروهای فنی پژوهشگاه، طراحی شده و سرانجام با کمک شرکت‌های داخلی ساخته شود. شیب میدان این چهارقطبی ۱۸ تسلا بر متر و طول مکانیکی آن ۲۳۳ میلی‌متر است (شکل ۳ چپ). سایر مشخصات چهارقطبی فوق در جدول ۵ ارائه شده است.

۳.۵. سیستم‌های اندازه‌گیری مغناطیسی

اندازه‌گیری‌های مغناطیسی به منظور تایید یا عدم تایید کارایی



شکل ۴. سازهٔ مکانیکی میز اندازه‌گیری هال (راست) و پیچهٔ چرخان نمونهٔ چشمهٔ نور ایران (چپ).

انواع الکترومغناطیس‌های چشمهٔ نور ایران صورت می‌گیرد. در این اندازه‌گیری‌ها مشخصه‌های میدان مغناطیسی مانند کیفیت میدان، شدت میدان، مولفه‌های چندقطبی میدان و ... به دست می‌آیند. سامانه‌های اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در چشمهٔ نور ایران که تاکنون ساخته شده‌اند، عبارتند از میز اندازه‌گیری پروب هال (مشتمل بر یک ربات کارتزین با سه درجه آزادی و یک میز ثابت نگاهدارندهٔ الکترومغناطیس) و دستگاه اندازه‌گیری پیچهٔ چرخان (مشتمل بر یک پیچهٔ دوار و یک اینتگریتور ۲۴بیت). میز اندازه‌گیری اثر هال مهم‌ترین ابزار اندازه‌گیری میدان مغناطیسی است که با استفاده از آن می‌توان شدت میدان، کیفیت میدان، و تعیین طول مغناطیسی الکترومغناطیس را اندازه‌گیری نمود. این ابزار از دو نظر ۱) سازه مکانیکی و ۲) حسگر اثر هال لازم است که دقت زیاد داشته باشد. میز اندازه‌گیری هال شامل دست کم سه محور عمود برهم متحرک است که یک دستگاه مختصات دکارتی را می‌سازد. دقت مکانی مورد نیاز برای این میز از مرتبهٔ $۰/۱\ mm$ است. بنابراین مفهوم اندازه‌گیری نقطه به نقطه میدان در این مقیاس، سطحی با مساحت $۰/۱\times۰/۱ mm^{۲}$ خواهد بود. گذار از حالت نقطه به سطح در اندازه‌گیری مغناطیسی به این جهت مجاز است که $\nabla.B = ۰$ است و میدان نسبت به مکان کند تغییر و خوشرفتار است. در طرح چشمهٔ نور ایران این میز با دقت مکان یابی $۰/۰۵\times۰/۰۵\times۰/۰۵\ mm^{۳}$ ساخته شده است. قسمت‌های مختلف میز در شکل ۴ (راست) نشان داده است.

یکی دیگر از دستگاه‌های اندازه‌گیری میدان مغناطیسی پیچه چرخان است، این دستگاه شامل یک سیم پیچ با شکلی متناسب با الکترومغناطیس مورد آزمون است که با چرخش در میدان یک چند قطبی و تحلیل ولتاژ القایی در آن می‌توان پی به مشخصات میدان برد. تفاوت این دستگاه با میز اثرهال در اندازه‌گیری انتگرال محتوای چندقطبی میدان مغناطیسی است. یک نمونه از این پیچهٔ چرخان در طرح چشمهٔ نور ایران ساخته شده است و روش انجام آزمون، داده برداری و تحلیل نتایج آزمون را ارتقاء داده است (شکل ۴ چپ).

۶. طراحی و ساخت منابع تغذیه چشمهٔ نور ایران

الکترومغناطیس‌های بسیار دقیق و قوی از اساسی‌ترین اجزای شتابگر سنکروترون هستند که در آن‌ها انواع مختلف منابع تغذیهٔ جریان-بالای (۲۰۰A، ۳۰۰A و ۶۵۰A) دقیق (حداکثر خطای مطلق کمتر از ppm ۱۰۰)، بسیار پایدار، و کم نوفه (موجک [۱] کمتر از ۵۰ppm)، نقشی کلیدی در عملکرد صحیح آن‌ها دارند [۴]. طراحی و ساخت منابع تغذیه در داخل کشور به گونه‌ای که مناسب برای کار در چشمهٔ نور ایران باشد، علاوه بر صرفه جویی، گامی است در جهت پاسخگویی به نیاز روزافزون صنایع و علوم آزمایشگاهی به استفاده از این نوع منابع تغذیه فوق دقیق. به عنوان مثال، می‌توان به استفاده از این منابع تغذیه در جوشکاری DC با دقت بالا، آب‌کاری با کیفیت مناسب‌تر، مغناطیس‌های MRI و NMR در پزشکی، شتاب‌هنده‌های صنعتی و UPS، نام برد.

طراحی و ساخت یک نمونه منبع تغذیهٔ دو منظوره با قابلیت

۱. Ripple

جدول ۶. مشخصات فنی منبع تغذیه [۶].

خروجی منبع تغذیه در حالت DC	
ولتاژ خروجی	۳۵V
جریان خروجی	۴×۱۲۵A
پایداری جریان (تغییرات بار به ازای ۱۰ تا ۹۰ درصد) و (تغییرات ولتاژ ورودی به ازای ۱۰ تا ۹۰ درصد)	≤۱۰۰ppm
جریان بیشینه	۵۰۰A
پایداری (۱۰۰ثانیه – ۸ ساعت با توجه به بیشینه جریان)	±۲۰ppm
دقت مطلق	±۱۰۰ppm
قدرت تفکیک جریان	۲۰ppm
تکرارپذیری	۱۰۰ppm
قدرت تفکیک جریان اندازه‌گیری شده	۱۸bit
روش خنک سازی	آب
خروجی منبع تغذیه در حالتAC	
جریان بیشینه	۱۰۰ ADC
ولتاژ بیشینه	۳۵VDC
پایداری	±۲۰ppm
دقت مطلق	±۱۰۰ppm
دقت ردگیری جریان بر روی بار سلفی ۵۱ mH	۱۰۰ppm
موجک جریان + نوفه (باتوجه به بیشینه جریان)	۳۰ppm
قدرت تفکیک جریان اندازه‌گیری شده	۱۸bit
بسامد	۲Hz

شکل ۵. منبع تغذیه ساخته شده در طرح چشمهٔ نور.

کار در دو مُدِ جریان ثابت و جریان متغیر با شیب دلخواه برای مغناطیس‌های بوسترطرح چشمهٔ نور ایران انجام شده است (شکل ۵). مشخصهٔ فنی منبع تغذیه در جدول ۶ آورده شده است.

۱.۶. منبع تغذیه مدل‌های IPS-۲۰۱۲۰ و IPS-۲۴۱۰۰

این منبع تغذیه با هدف تهیهٔ یک منبع جریان که بتواند نیازهای ساخت الکترومغناطیس‌ها و اندازه گیری‌های میدان مغناطیسی

جدول۷. مشخصات فنی منبع جریان مدل IPS-24120 [۷].

حداکثر ولتاژ خروجی	۲۴V
حداکثر جریان خروجی	۱۲۰A
حداکثر توان خروجی	۲۸۸۰VA
ضریب تصحیح توان	۰/۹۸ با استفاده از مدار تصحیح کننده فعال
ولتاژ ورودی	۱۹۰ تا ۲۵۰ ولت تک فاز متناوب با فرکانس ۵۰ هرتز
حداکثر توان مصرفی	۳۱۰۰VA
تکنولوژی مورد استفاده	هیبرید، ترکیبی ازسوئیچینگ به عنوان پیش رگولاتور و یک تنظیم کننده خطی
میزان افت و خیز	کمتر از۰۱/ ٪ جریان خروجی در حداکثر توان
تنظیم ولتاژ	ندارد
تنظیم جریان	بهتر از ۴۰ppm از حالت اتصال کوتاه تا بیشینه جریان
نحوه کنترل ولتاژ و جریان	با استفاده از صفحه کلید روی پانل دستگاه
نحوه کنترل جریان از دور	از طریق رابط RS-۲۳۲ و کامپیوتر

جدول۸. پارامترهای سیستم بسامد رادیویی ۵۰۰ مگا هرتز [۴].

پارامتر	سیستم بسامد رادیوویی ۵۰۰ مگا هرتز
حداکثر ولتاژ بسامد رادیویی	۲/۵MV
شماره هارمونیک	۸۸۰
ولتاژ برای هر کاواک	۶۲۵kV
تعداد کاواک‌ها	۴
میرایی مدهای بالاتر	✓
امپدانس شانت	۳/۳MΩ
توان بسامد رادیویی موردنیاز برای هر کاواک	(۵۹+۸۹) = ۱۴۸ kW
توان تولیدی تقویت کننده (با احتساب اتلاف در مسیر)	۱۶۴kW
خط انتقال	موج‌بر

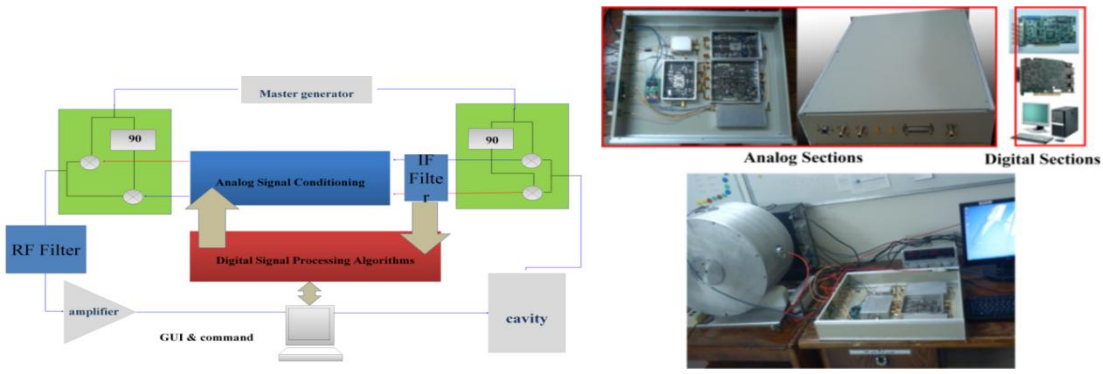
را تامین کند، و همچنین تهیهٔ مدار کنترلی منبع تغذیه که قابلیت کنترل توسط EPICS را داشته و برخی از برنامه‌ها و الگوریتم‌های کنترلی تحت EPICS به روی آن پیاده سازی و اجرا شود، ساخته شده است. مشخصات فنی این منبع تغذیه در جدول ۷ قابل مشاهده است.

۷. سیستم بسامد رادیویی

مشابه بسیاری از چشمه‌های نور نسل سوم، بسامد ۵۰۰MHz برای سیستم بسامد رادیویی چشمه نور ایران انتخاب شده است [۴]. ولتاژ شتاب‌هی موردنیاز در حلقهٔ انبارش ۲/۵MV است تا پذیرندگی مطلوب بالاتر از ۳ درصد و طول عمر باریکه در حدود ۶ ساعت در حلقهٔ انبارش را ایجاد کند. در ادامه برخی از تجهیزات سیستم بسامد رادیویی که در محل آزمایشگاه تحقیق و توسعه چشمهٔ نور ایران ساخته شده‌اند، معرفی می‌گردد.

۱.۷. کاواک

در کاواک‌های مورد استفاده در حلقهٔ انبارش، حذف آثار مدهای مرتبهٔ بالاتر از مد اصلی کاواک بر روی باریکهٔ الکترون، جهت تأمین پایداری باریکهٔ و رسیدن به جریان اسمی در حد ۴۰۰ میلی آمپر، بسیار اساسی است. از میان کاواک‌های مسی مورد استفاده در سایر حلقه‌های انبارش با بسامد تشدید ۵۰۰ مگاهرتز، در کاواک‌های EU[۸]، KEK PF[۹]، ELETTRA [۱۰] اثرات مدهای مرتبهٔ بالاتر با استفاده از روش‌های متفاوتی نظیر کاربرد موجبرهای میراکننده، استفاده از مواد جاذب، و



شکل ۶. بلوک نمودار سامانهٔ بسامد رادیویی کم توان (چپ)، نمونه سامانهٔ ساخته شده حین کار با کاواک آلومینیومی ساخته شده در طرح چشمهٔ نور ایران (راست) [۴].

یا تنظیم دما، کاهش یافته و یا به طور کلی حذف شده است. استفاده از هریک از این کاواک‌ها در حلقهٔ انبارش امکانپذیر است و انتخاب نهایی کاواک بر اساس مقایسهٔ هزینه و زمان پیشنهادی شرکت‌های سازنده انجام خواهد شد. برای تأمین ولتاژ موردنیاز باریکه، ۴ کاواک لازم است که به هریک از آن‌ها توانی در حدود ۱۶۰ کیلووات در فرکانس ۵۰۰ مگاهرتز اعمال می‌گردد.

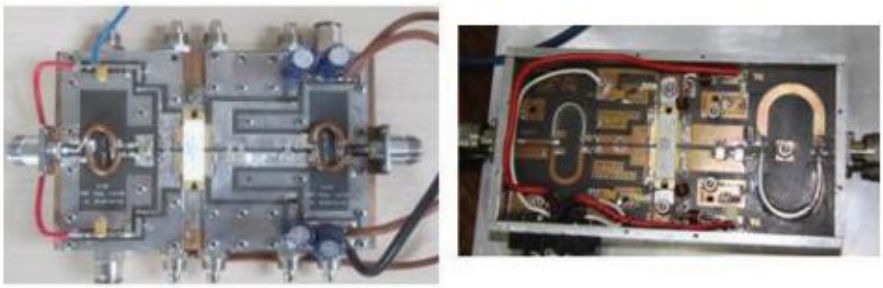
۲.۷. طراحی و ساخت سیستم کنترل بسامد رادیویی کم توان (LLRF)

این سیستم الکترونیکی کم توان برای کنترل دامنه و فاز کاواک از یک حلقهٔ خود تحریک شونده بهره می‌برد؛ به این صورت که کاواک، سیستم الکترونیکی کم توان، و منبع توان فرکانس زیاد در یک حلقهٔ بسته قرار خواهند گرفت. نمودار سامانهٔ الکترونیکی کم توان مورد بحث و نحوهٔ ارتباط آن با کاواک و منبع تغذیهٔ بسامد بالا در شکل۶ نمایش داده شده است. این سیستم از سه بخش اصلی تشکیل شده که عبارتند از: ۱) قسمت ارتباطی آنالوگ، جهت افزایش یا کاهش فرکانس سیگنال (در نمودار شکل۶، سامانه با رنگ سبز نمایش داده شده است)؛ ۲) بخش سخت افزار دیجیتالی که عملیات نمونه برداری از سیگنال فرکانس و انتقال این سیگنال به کامپیوتر و در نهایت تبدیل سیگنال دیجیتال تولید شده توسط کامپیوتر به آنالوگ را بر عهده دارد (در نمودار با رنگ آبی نمایش داده شده است)؛ ۳) بخش نرم افزاری سیستم که با توجه به الگوریتم‌های طراحی شده برای آن عملیات پردازش سیگنال‌ها را بر عهده دارد (در دیاگرام شکل ۶ سامانه با رنگ قرمز نمایش داده شده است). در اندازه‌گیری‌های اولیه سامانهٔ مورد بحث که با استفاده از کاواک آلومینیومی نمونه ساخته شده در چشمهٔ نور ایران صورت گرفته، امکان کنترل فاز و دامنه کاواک میسر گردیده است. اقدامات تکمیلی جهت بهینه‌کردن سرعت حلقه‌های کنترلی و همچنین افزودن حلقه کنترل بسامد و تطبیق آن با حلقهٔ فاز و دامنه در دست انجام است.

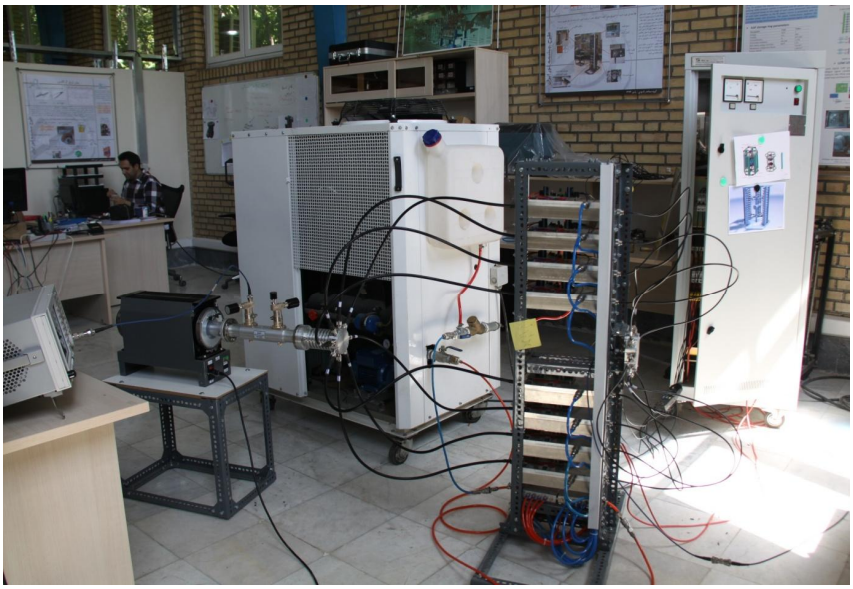
۳.۷. طراحی و ساخت تقویت کنندهٔ حالت جامدی

در تقویت‌کننده‌های حالت جامدی، بر خلاف لامپ‌های ریزموج[۱]، به علت ساختار ماژولار (ساخته شده از چند قطعهٔ جدا از هم)، در صورت خرابی چند ماژول نیازی به توقف کار شتابگر و تعمیر وجود ندارد و سیستم می‌تواند با توان کمتر تا زمان تعمیر و نگهداری به کار خود ادامه دهد [۴]. در حال حاضر در شتابگر Soleil در فرانسه، شتابگر LNLS در برزیل، و شتابگر ESRF در فرانسه از این روش استفاده می‌شود. در شتابگرهایی که در سال‌های اخیر طراحی یا ساخته می‌شوند (مانند SESAME در اردن [۱۱] و SIRUS در برزیل [۱۲])، این تقویت‌کننده‌ها به عنوان گزینهٔ اصلی در تأمین توان فرکانس بالا مطرح هستند و بسیاری از شتابگرهای در حال کار نیز مانند TLS در تایوان [۱۳] و SLS در سوئیس [۱۴] تحقیقات در این

۱. Microwave



شکل ۷. ماژول‌های تقویت کنندهٔ طراحی و ساخته شده در چشمهٔ نور ایران.

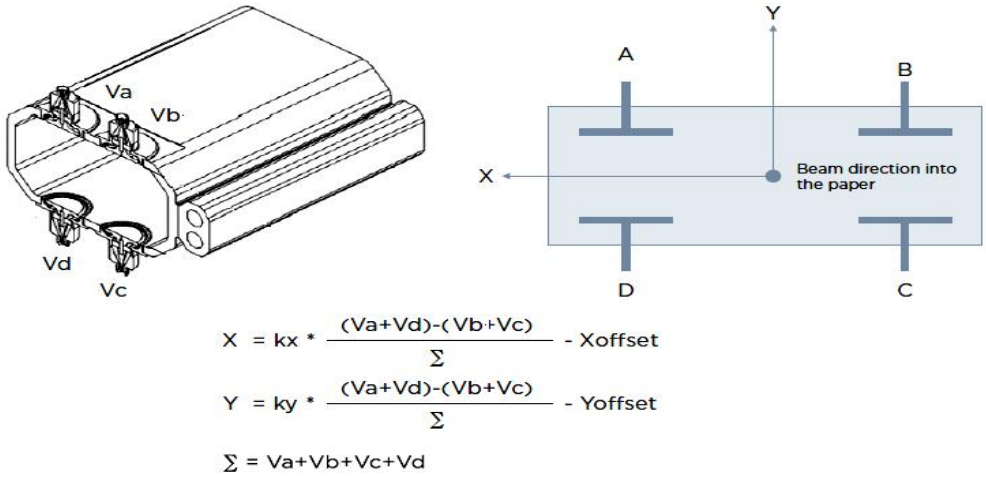


شکل ۸ . تقویت کنندهٔ ۴ کیلووات ساخته شده در حال آزمون در آزمایشگاه بسامد رادیویی چشمهٔ نور ایران.

زمینه را برای به روزرسانی‌های بعدی آغاز کرده‌اند. بنابراین، در طرح چشمهٔ نور ایران نیز استفاده از این نوع تقویت‌کننده‌ها در دستور کار قرار گرفته، و طراحی و ساخت آنها مد نظر است. در اولین گام، دو ماژول تقویت کننده بر اساس دو قطعهٔ مختلف MRFE۶VP۶۱K۲۵HR۶ و BLF۵۷۸ طراحی و آزمایش شده و توان حدود ۷۰۰ وات حاصل گردید (شکل ۷). در قالب همکاری‌های فنی، ماژول‌های فوق در آزمایشگاه رادیویی سزامی آزمایش شدند که مقایسهٔ عملکرد این ماژول‌ها با ماژول فرانسوی نشان‌دهنده برتری‌هایی نظیر تغذیهٔ همزمان، عدم استفاده از خازن‌های متغیر و همچنین توان بالاتر (۶۵۰ وات ماژول فرانسوی [۱۱]) است. همچنین در ایجاد طبقهٔ اول تقویت‌کنندهٔ ۲۰۰ کیلووات موردنیاز در سنکروترون طرح چشمهٔ نور ایران، ترکیب توان ۸ عدد از این ماژول‌ها برای دستیابی به توان ۴ کیلووات انجام شده است (شکل ۸). ساخت انواع سیستم‌های خنک کننده با آب به منظور دفع حرارت ماژول‌ها، ترکیب‌کنندهٔ توان بالا، تقسیم کنندهٔ توان و منابع تغذیهٔ ماژول‌ها در دستور کار قرار داشته که در طراحی و ساخت آنها کلیه ملاحظات مربوط به تقویت‌کنندهٔ نهایی در نظر گرفته شده است. در ادامه ۸ عدد از این تقویت‌کننده‌ها با هم ترکیب شده و توان ۳۰ کیلووات را تولید خواهند نمود. مراحل بعدی شامل ترکیب ۲ تقویت‌کنندهٔ ۳۰ کیلوواتی جهت دستیابی به توان ۵۰ کیلووات و ترکیب ۴ عدد از آنها به منظور دستیابی به توان ۲۰۰ کیلووات خواهد بود.

۸. طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری و کالیبراسیون مکان‌سنج‌ها

یکی از مهم‌ترین و گرانترین ادوات تشخیصی باریکه، مکان سنج‌ها می‌باشند. تشخیص مکان باریکه با دقت ۱ میکرومتر از جمله مشخصه‌های این نوع ابزار است. شکل ۹ نحوهٔ کار این



$$X = kx * \frac{(Va+Vd)-(Vb+Vc)}{\Sigma} - Xoffset$$

$$Y = ky * \frac{(Va+Vd)-(Vb+Vc)}{\Sigma} - Yoffset$$

$$\Sigma = Va+Vb+Vc+Vd$$

شکل ۹. نحوهٔ قرارگیری مکان‌سنج‌ها در کنار هم و نحوهٔ محاسبهٔ مکان با استفاده از ولتاژ خروجی آنها [۱۶].

شکل ۱۰. نمونهٔ طراحی شدهٔ مکان سنج دکمه‌ای مورد کاربرد در طرح چشمهٔ نور ایران (راست). نمونهٔ سامانه – آزمون طراحی شده جهت ارزیابی مکان سنج‌ها قبل از نصب آنها در حلقهٔ باریکهٔ در طرح چشمهٔ نور ایران (چپ).

نوع تشخیص‌گرها را نشان می‌دهد. با قرار دادن ۴ مکان سنج در کنار هم در دو راستای عرضی و طولی می‌توان مکان باریکه را در هر دو راستا تشخیص داد. به واسطهٔ تشخیص مکان باریکه می‌توان مسیر باریکهٔ الکترونی را ردیابی کرده و با کنترل آن پایداری و کیفیت کار سنکروترون را افزایش داد.

بدین منظور اولین ابزار تشخیصی که در طرح چشمهٔ نور ایران مورد ارزیابی و طراحی قرار گرفت، مکان سنج‌های دکمه‌ای بودند. پس از انجام مطالعات اولیه، کدی جهت طراحی این نوع مکان سنج‌ها با نام ILSF-Diagnostic در گروه مشخصه یابی تدوین شد که روند طراحی یک مکان سنج را آسان می‌کند. با کمک این کد و نرم افزار CST مشخصات هندسی مکان سنج دکمه‌ای حلقهٔ انبارش طرح چشمهٔ نور ایران طراحی شد. (شکل ۱۰ راست)

قبل از نصب این مکان سنج‌های دکمه‌ای درحلقهٔ باریکه لازم است تا کیفیت ساخت آنها ارزیابی شود. در نتیجه، وجود یک سامانهٔ آزمون جهت آزمودن صحت کارکرد مکان سنج‌ها ضروری است [۱۶]. بدین منظور یک سامانهٔ آزمون (شکل ۱۰ چپ) با دقت کمتر از ۱۰ میکرومتر و قدرت تفکیک ۰٫۵ میکرو متر طراحی شد. در این سامانه، از یک سیم با قطر ۵۰۰ میکرومتر جهت شبیه سازی باریکه استفاده شد به گونه‌ای که با عبور جریان

جدول ۹. خطوط باریکهٔ طرح چشمهٔ نورایران در روز اول [۱۷].

	خط باریکه Beamline	چشمهٔ تابش	گسترهٔ انرژی (eV)	شار فوتون (p/s)	تفکیک‌دهی (توان تفکیک)	اندازهٔ باریکه (μm)
۱	پراش پودری	مغناطیس خم‌کننده	۶–۳۰k	$۱۰^{۱۲}$	$۱۰^{-۴}$	۱۰۰×۱۰۰
۲	پراش پرتو x از تک‌بلور	نوسان ساز در خلاء	۷–۲۵ k	$۱۰^{۱۳}$	$۱۰^{-۴}$	
۳	EXAFS	مغناطیس لرزاننده	۳–۴۰ k	$۱۰^{۱۳}$	$۱۰^{-۴}$	چند میکرون
۴	نورگسیل در فاز گازی (XPS, AES, ARPES)	نوسان‌ساز الکترومغناطیسی	۱۵–۱۰۰۰	$۱۰^{۱۱}$	۱۰۰۰۰	
۵	طیف‌سنجی الکترون‌ها در حالت جامد	نوسان‌ساز الکترومغناطیسی	۱۰–۱۵۰۰	$۱۰^{۱۲}$	۱۰۰۰۰	
۶	ریزنمایی و طیف‌سنجی توأم	نوسان‌ساز مارپیچ	۱۰–۲۰۰۰	$۱۰^{۱۳}$	بیش از ۸۰۰۰	چند میکرون
۷	بلورنگاری مولکول‌های درشت	مغناطیس لرزاننده	۳–۲۵ k	$۱۰^{۱۲}$		

شکل ۱۱. پمپ یونی ساخته شده در طرح چشمهٔ نور در حال آزمایش برای رسیدن به خلاء $۱۰^{-۱۰}$ تور.

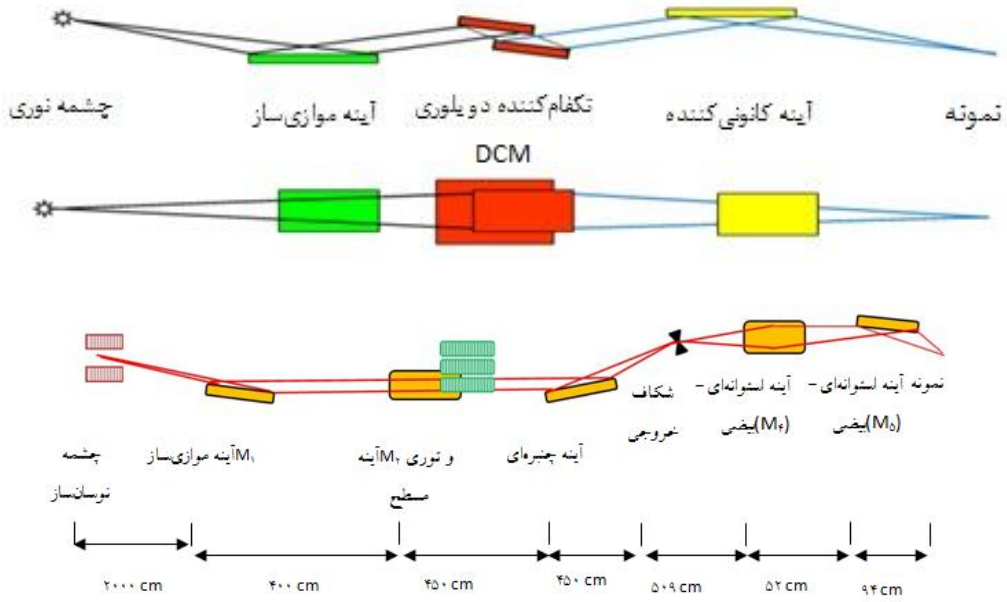
حاصله از یک مولد پالس با فرکانس ۵۰۰ مگا هرتز (فرکانس اسمی طرح شتابگر ملی) از این سیم می‌توان میدان الکتریکی مشابه با گذر خود باریکه از کنار مکان سنج‌ها ایجاد کرد، به گونه‌ای که میزان ولتاژ خروجی این مکان سنج‌ها، میزان خطا از مرکز و جفت‌شدگی آنها با یکدیگر را مورد ارزیابی قرار داد.

۹. طراحی و تجهیز آزمایشگاه خلاء بسیار بالا (UHV)

این آزمایشگاه اولین آزمایشگاه خلاء بسیار بالا (UHV) در کشور است و شامل تجهیزات تولید و پایش خلاء تا فشار حداقل $۱۰^{-۱۰}$ میلی‌بار است. این تجهیزات شامل انواع مختلف پمپ‌ها از قبیل توربو، یونی، تصعید تیتانیم، NEG، و همچنین انواع مختلف فشارسنج با گستره‌های متفاوت، آنالیزور، نشت‌یاب، انواع اتصالات و سایر ادوات مورد نیاز برای ساخت و آزمایش محفظه‌های خلاء خواهد بود. از جمله تجهیزات ساخته شده برای آزمایشگاه خلاء طرح چشمهٔ نور ایران می‌توان به اتصالات KF(Klein)، CF(Con Flat)، پمپ یونی و تجهیزات الکترونیکی پمپ توربو اشاره کرد. همچنین مطالعات و تحقیقات لازم برای دستیابی به فناوری ساخت پمپ یونی، پمپ توربو، پمپ‌های تصعید تیتانیم و پمپ‌ها و پوشش‌های NEG در طرح چشمهٔ نور ایران در حال انجام است (شکل ۱۱).

۱۰. طراحی خطوط باریکه

محققان ایرانی که تحقیقات مرتبط با تحقیقات سنکروترونی دارند، شناسایی شده و اطلاعات مربوط به تحقیقات و تجهیزات مورد نیاز آنها جمع‌آوری شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده و در نتیجه این گردهمایی‌ها و بررسی‌های صورت پذیرفته، ۱۴ خط باریکه (Beamlines) به عنوان نیازمندی‌های کاربران ایرانی شناسایی شده است که با توجه به اولویت‌های تعیین شده ۷ خط باریکه در فاز اول طرح مورد بهره‌برداری قرار خواهد گرفت؛ مشخصات این خطوط باریکه به شرح جدول ۹ است.



شکل ۱۲. تصویری طرحوار از بخش نوری خط باریکهٔ پراش پودری (بالا) و چیدمان قطعات اپتیکی خط باریکهٔ طیف‌سنجی میکروسکوپیکی (پایین) [۱۸].

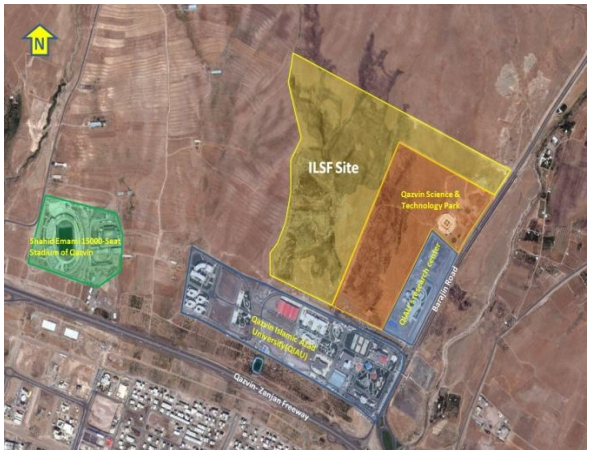
از میان خطوط باریکه روز اول سنکروترون ایران، خط باریکهٔ پراش پودری و طیف‌سنجی میکروسکوپیکی به علت کاربری بسیار زیاد در علوم مختلف به عنوان اولین خطوط باریکه پرتو x سخت و نرم جهت طراحی انتخاب شده‌اند. این خطوط باریکه در تمام سنکروترون‌های فعال دنیا وجود داشته و دارای کاربران فراوانی هستند. بر اساس پیشنهاد کاربران ایرانی [۱۷]، چشمهٔ نور خط باریکهٔ پراش پودری مغناطیس خم کننده، بازه انرژی keV ۳۰-۶، شار فوتونی در مکان نمونه 10^{12} ph/s/۰٫۱٪ B.W، تفکیک‌پذیری انرژی 10^{-4} و اندازه سطح مقطع پرتو در مکان نمونه ۰٫۱×۰٫۱ تا ۱×۱۰ میلی‌متر مربع می‌باشد. خط باریکهٔ طیف‌سنجی میکروسکوپیکی با شار فوتونی بالا (۴۰۰mA at BW٪۰٫۱/Ph/s 3×10^{15}) در محدودهٔ انرژی پرتو ایکس نرم (۹۰ تا ۲۵۰۰ الکترون ولت) به تصویربرداری به روش میکروسکوپی فوتوالکترونی[۱] اختصاص یافته است و گروه زیادی از محققان در زمینه‌های مواد نانو، سیستم‌های الکترونی همبستهٔ قوی و غیره را در برمی‌گیرد. مشخصات پرتو فوتونی در مکان نمونه در این خط باریکه به انرژی فوتون و ترجیح کاربر خط باریکه به توان تفکیک‌پذیری زیاد یا شار فوتونی زیاد در مکان نمونه بستگی دارد. در انرژی ۱۰۰۰eV پرتو فوتونی با بیشینه توان تفکیک‌پذیری ۱۸۲۰ و سطح مقطع در محدوده ۲×۴ تا ۷۴×۲۷ میکرومترمربع در مکان نمونه ایجاد می‌شود (شکل ۱۲).

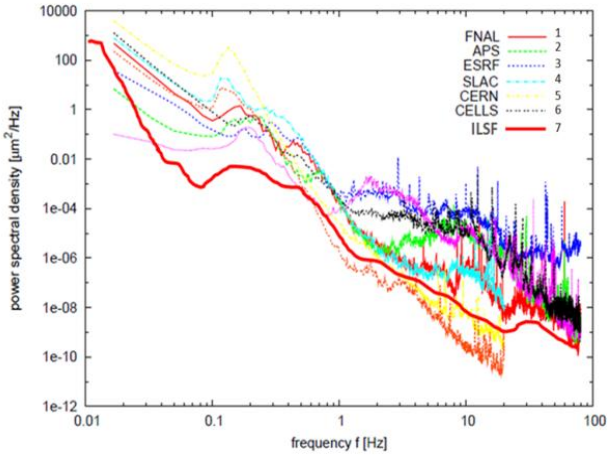
۱۱. ساختگاه چشمهٔ نور ایران(لرزه نگاری و مطالعات ژئوتکنیک)

برای انتخاب زمین مناسب برای استقرار طرح چشمهٔ نور ایران، مطالعات گسترده‌ای انجام شد و چندین محل پیشنهادی در استانهای مختلف کشور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از جمله می‌توان به محلی در رودهن در شرق تهران، اراضی دانشگاه اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان و چند نقطه در امتداد اتوبان تهران- قزوین و در حوالی شهرستان آبیک و قزوین اشاره کرد. در این میان با اعمال نظر و استقبال دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) و مقامات محلی استان قزوین، بخشی از اراضی متعلق به این دانشگاه به عنوان ساختگاه در نظر گرفته شد.

ساختگاه مورد نظر به مساحت ۵۰ هکتار در شمال شهر

۱. Photoemission Electron Microscopy (PEEM)





شکل ۱۳. تصویر هوایی از محل ساختگاه طرح چشمهٔ نور ایران همراه با جانمایی ساختمان‌ها در آن (راست) و نتایج مطالعات لرزه نگاری (چپ).

قزوین در بالادست اتوبان قزوین- زنجان، غرب جاده باراجین، قسمت جنوبی زمین موسوم به اراضی ۳۰۰ هکتاری دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) قزوین، جنب پارک علم و فن‌آوری امام خمینی(ره) قزوین و شمال دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین واقع شده است.

به لحاظ توپوگرافیکی بخش عمده زمین در حدود ۴۰ هکتار، دشت و مابقی به صورت تپه ماهور می‌باشد. حدود ساختگاه به نحوی تعیین شده است که دسترسی به زمین از طریق دو ورودی امکانپذیر باشد. یکی از ورودی‌ها از شرق و از جاده باراجین است. این زمین از بلوار پژوهشگران که ما بین ساختگاه طرح و دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین قرار دارد نیز قابل دسترسی می‌باشد. ورودی جنوبی به عنوان ورودی اصلی طرح در نظر گرفته خواهد شد (شکل ۱۳).

با توجه به حساسیت فوق العاده شتابگر به ارتعاشات زمین، انتخاب زمینی با حداقل ارتعاشات ممکن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج مطالعات لرزه نگاری (مرحلهٔ اول) به خوبی نشان می‌دهد که دامنه ارتعاشات محیطی ساختگاه طرح در مقایسه با سایر شتابگرها در حد مطلوبی قرار دارد. علاوه بر مطالعات لرزه‌نگاری انجام شده(مرحلهٔ اول) مرحلهٔ دوم مطالعات تکمیلی لرزه‌نگاری نیز در آینده نزدیک انجام خواهد شد. هدف از این مطالعات بررسی ارتعاشات زمین در یک بازه زمانی طولانی‌تر می‌باشد تا علاوه بر ارزیابی ارتعاشات زمین در میان مدت، داده‌های بیشتری برای طراحی‌های مهندسی به دست آید. مطالعات تکمیلی لرزه نگاری هم در سطح و هم در عمق انجام می‌گیرد. خاطر نشان می‌شود مطالعات لرزه نگاری مرحله اول به مدت سه روز و در سطح زمین انجام پذیرفته بود (شکل ۱۳ چپ).

علاوه بر اندازه‌گیری ارتعاشات محیطی، ویژگی‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی ساختگاه نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مطالعات ژئوتکنیک ۱۸ گمانه با پراکندگی هدفمند در تمام سایت و با تمرکز ویژه بر محل ساخت ساختمان اصلی، حفر گردیده است. عمیق‌ترین گمانه در محل ساختمان اصلی تا عمق ۵۰ متر انجام شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد جنس لایه‌های زمین تا اعماق حدود ۷ متر عمدتاً درشت‌دانه با درصدی از ماسه یا سیلت است. از این عمق به بعد خاصیت سیمانتاسیون لایه‌ها افزایش پیدا کرده و به تدریج به لایه‌های کنگلومرایی سست و جوان تبدیل می‌شود. عدد SPT خاک نیز در اعماق مختلف برای هر ۱۵ سانتیمتر نفوذ بیشتر از ۵۰ ضربه شده است که در رده لایه‌های بسیار متراکم طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین سرعت امواج برشی به دست آمده از آزمایش‌های درون گمانه‌ای به طور میانگین از ۵۰۰ تا ۶۰۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند که مطابق آیین نامه ۲۸۰۰ نوع زمین، تیپ ۲ محسوب می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که زمین به لحاظ مهندسی برای احداث شتابگر سنکروترونی مناسب می‌باشد چرا که به علت تراکم بالا نشست خاک در دراز مدت ناچیز خواهد بود. همچنین لایه بندی و مشخصات لایه‌های خاک در تمام قسمت‌های زمین از یکنواختی مناسبی برخوردار است (شکل ۱۳).

مراجع

1. J Rahighi et al., "Third generation light source project in Iran", in Proceedings of International Particle Accelerator Conference, San Sebastian, Spain, September 4–9 (2011) 2954.
2. H Ghasem, F Saeidi, and E Ahmadi, "*Low Field Low Emittance Lattice for the Storage Ring of Iranian Light Source Facility*", IOP Publishinng for SISSA Medialab (2013).
3. J Rahighi et al., "*ILSF, A Third Generation Light Source Laboratory in Iran*", in Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, TUOAB202 (2013).
4. Iranian Light Source Facility Conceptual Design Report, Oct. (2012) 210.
5. J Dehghani and F Saeidi, "*ILSF-B-MC-001-IRP-01-01F*", Internal Reports (2014).
6. M Jafarzadeh, E Yousefi, and D Shirangi. "*PS-TN-Report Power Suplly*", 20140415-01, Internal ILSF Report (2014).
7. M Jafarzadeh, E Yousefi, D Shirangi, M Akbari, and J Rahighi. "*New Purposed High Precision Power Supply For Quadrupole Magnets Of ILSF Using Low Resolution Digital PWM*", in Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China (2013).
8. R Heine, et al., "*Characterisation of the eu-hom-Damped Normal Conducting 500mhZ Cavity from the Beam Power Spectrum at delta*", EPAC (2006).
9. J Watanabe et al., "*Design and Cold Model Test of 500 MHz Damped Cavity Forasp Storage Ring rf System*" IPAC (2005).
10. A Fabris et al., "*Field Measurement of the Elettra Cavity High Order Modes*" IPAC (2002).
11. Darweesh Foudeh, "*Sesame Storage Ring rf System*", 17th. ESLS RF Workshop (2013).
12. J Jacob "*New Developments on RF Power Sources*" RF-2, EPAC'06 - Edinburgh, June (2006).
13. Tsung-Chi Yu, et al., "*The Development of High Power Solid-state Mplifier in Nsrrc*", RF-3, IPAC, Japan (2010).
14. M Gaspar, "*Solid State Amplifier Development at PSI*" RF-4 RF Tech 2nd Workshop (2010).
15. R E Shafer, "*Beam Position Monitoring*" , Presented at the First Accelerator Instrumentation Workshop, Upton, NY, Oct. 23–26, AIP Conference Proceedings **212** (1989).
16. Juho Hong, Sojeong Lee, and In Soo Koo, *Journal of the Korean Physical Society*, **59,** 2 (2011).
17. H Khosroabadi, M Tabrizchi, and S Kharrazi, "*Third Users' Meeting & First Workshop on Beamlines of Iranian Light Source Facility (ILSF), ILSF internal Report*", Nov. 21-24 (2010).
18. H Khosroabadi, A Gholampour Azhir, S Amiri, and H Ghasem, "*X- Ray Powder Diffraction Beamline for Iranian Light Source Facility*", in Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China (2013).