

## طراحی شبکه برای حلقه انبارش چشمه نور ایران

حسین قاسم<sup>۱</sup>، اسماعیل احمدی<sup>۲</sup> و فرهاد سعیدی<sup>۳</sup>

۱. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، پژوهشکده ذرات و شتابگرها، تهران
۲. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طرح چشمه نور ایران، تهران
۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۴. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک

پست الکترونیکی: ghasem@ipm.ir

### چکیده

طرح چشمه نور ایران به عنوان یک طرح کلان ملی، با هدف برپایی آزمایشگاه تولید تابش سنکروترونی و به منظور تولید اشعه ایکس با درخشندگی مطلوب برای کاربران است. حلقه انبارش چشمه نور ایران با این هدف در حال طراحی می‌باشد که بتواند باریکه الکترونی پایدار با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت، جریان ۴۰۰ میلی آمپر و گسیلندگی کمتر از ۵ نانومتر رادیان را در خود انبار کند به طوری که در هنگام راه اندازی با سایر چشمه‌های نور سنکروترونی در دنیا قابل رقابت باشد. بدین منظور طراحی‌های مختلفی با خصوصیات متفاوت صورت گرفت که در این مقاله دینامیک خطی و غیر خطی باریکه الکترونی در گزینه اصلی شبکه حلقه انبارش چشمه نور ایران ارائه شده و سایر خصوصیات آن به تفصیل مطالعه شده است.

واژه‌های کلیدی: حلقه انبارش، شبکه، گسیلندگی باریکه الکترونی، درخشندگی

### ۱. مقدمه

یک نوع از کاربری آنها می‌باشد. اما رایج‌ترین استفاده از حلقه‌های انبارش که مورد نظر این مقاله است در آزمایشگاه‌های تولید تابش سنکروترونی می‌باشد که در آنها از حلقه انبارش برای ذخیره نمودن دسته‌های الکترون‌های نسبیتهی به عنوان چشمه تابش امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شود به طوری که امروزه بیش از ۵۰ مرکز تابش سنکروترونی در دنیا در حال کار و تعداد زیادی در حال طراحی و یا ساخت می‌باشند.

حلقه انبارش یک شتاب‌دهنده دایروی از انواع شتاب‌دهنده سنکروترون می‌باشد که با توجه به کاربری آن، ذرات مختلفی را می‌تواند با یک انرژی تقریباً ثابت در خود انبار نماید. ذخیره نمودن دو دسته از ذرات و برخورد دادن آنها باهم برای مطالعه ذرات تولید شده در آشکار سازهای حلقه انبارش مانند آنچه در حلقه انبارش LHC، TEVATRON و HERA انجام می‌گیرد

حلقه انبارش شامل الکترومغناطیس‌های مختلف اعم از الکترومغناطیس دو قطبی، الکترومغناطیس چهار قطبی، الکترومغناطیس شش قطبی و تعدادی الکترومغناطیس اصلاحی می‌باشد که هر یک به منظوری خاص در آن قرار می‌گیرند. از الکترومغناطیس دو قطبی برای ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در طول حرکت الکترون‌ها و در نتیجه خم کردن و یا هدایت دسته‌های الکترونی در حلقه انبارش استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که دسته‌های الکترونی نسبیتهی در طول خم شدن در این دو قطبی‌ها شتاب شعاعی گرفته و تابش الکترومغناطیسی موسوم به تابش سنکروترونی گسیل می‌نمایند. الکترومغناطیس‌های چهار قطبی برای کانونی سازی باریکه به کار گرفته می‌شوند و به منظور اصلاح ابیراهی‌های موجود در انرژی الکترون‌های هر دسته و افزایش ناحیه پایدار آنها در حلقه انبارش از الکترومغناطیس‌های شش قطبی استفاده می‌شود.

علی‌رغم خصوصیات منحصر بفرد و کاربردهای فراوان تابش سنکروترونی در علوم مختلف، منطقه خاورمیانه کماکان فقیر از این علم و تکنولوژی وابسته به آن است. جز مرکز تابش سنکروترون سزامی [۱] در کشور اردن که مجموعه شتاب‌دهنده‌های آن از طرف یونسکو اهدا گردید و پروژه نیمه تمام تابش سنکروترونی در کشور ارمنستان [۲]، هیچ آزمایشگاه تابش سنکروترونی در این منطقه وجود ندارد.

## ۲. طرح چشمه نور ایران

با توجه به نیاز کاربران ایرانی در علوم تجربی مختلف، دانشمندان و اندیشگران ایرانی پس از نشست‌های رسمی و رایزنی‌های غیر رسمی به این نتیجه رسیدند که ساخت سنکروترون ملی (چشمه نور ایران) بیشترین تحول را در ارتقاء علوم مختلف در ایران به همراه خواهد داشت. این پروژه اولین طرح آزمایشگاهی بزرگ مقیاس برای تحقیقات و مطالعات بین رشته‌ای در کشور بوده و تجهیزات شتاب‌هی بسیار عظیم و نوینی را در بر خواهد داشت که شامل مجموعه‌ای از شتابگرهای مقدماتی و یک حلقه انبارش الکترون با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت می‌باشد که باریکه فوتونی بسیار مطلوب

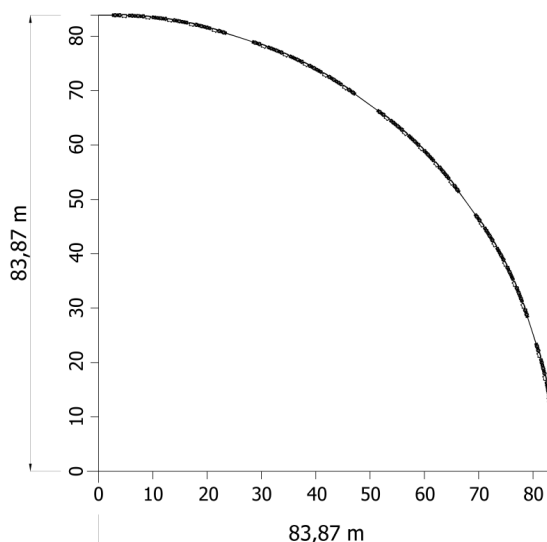
برای طیف وسیع آزمایشگران فراهم و در هنگام بهره برداری با بسیاری از آزمایشگاه‌های تابش سنکروترونی روز جهان از نظر کیفیت، امکانات تجربی و تحقیقاتی برابری خواهد کرد. آزمایشگاه تابش سنکروترونی چشمه نور ایران در پارک علم و فن آوری دانشگاه بین‌المللی امام خمینی شهر قزوین احداث خواهد شد. از آنجائی که رویکرد این مقاله، بررسی حلقه انبارش به‌عنوان چشمه تابش سنکروترونی و به طور خاص، حلقه انبارش چشمه نور ایران است در این مقاله به شتابگرهای مقدماتی پرداخته نشده است [۳].

## ۳. طراحی خطی شبکه حلقه انبارش طرح چشمه

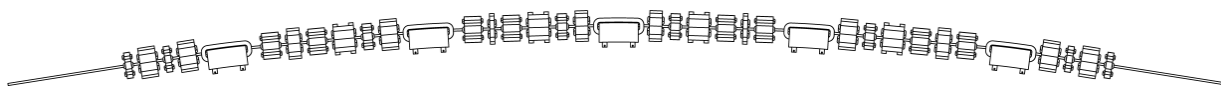
### نور ایران

نحوه قرارگیری و چگونگی چیدمان الکترومغناطیس‌ها در حلقه انبارش اصطلاحاً طراحی شبکه نام دارد. به علاوه در طراحی شبکه حلقه انبارش، فضاهای مناسب و کافی برای ادوات تابشی، انواع پمپ‌های خلا، محفظه‌های شتاب‌هی و تجهیزات اندازه‌گیری باید مد نظر قرار گیرد؛ و نهایتاً طراحی شبکه به صورتی باید باشد که شبکه‌ی نهایی بتواند باریکه‌ای در حلقه انبار کند که تابش سنکروترونی حاصل از آن مورد نظر کاربران باشد. لازم به ذکر است که قبل از طراحی شبکه بایستی محدودیت‌های اجتناب‌ناپذیری مانند میزان بودجه و همچنین تکنولوژی‌های قابل دسترس نیز مورد ارزیابی قرار گرفته شود.

بعد از مطالعه نیاز آزمایشگران ایرانی، شناخت اولیه تابش مورد نیاز کاربران و بررسی حلقه انبارش چشمه‌های مختلف تابش سنکروترونی در دنیا، طراحی شبکه حلقه انبارش چشمه نور ایران آغاز گردید. در دوره طراحی شبکه نشست‌های متعددی با گروه‌های مختلف فنی و کاربران حلقه انبارش ایران صورت گرفت و از نقطه نظرات آنها در هر مرحله به منظور بهینه‌سازی شبکه استفاده شد و نهایتاً گزینه‌های متعددی برای شبکه حلقه انبارش طراحی گردید [۴-۶]. در این مقاله نتایج و مشخصات آخرین طراحی حلقه انبارش که به کمیته مشاوران برای تصویب تقدیم خواهد شد ارائه می‌گردد. نرم



شکل ۱. نمای شبیه سازی شده یک ربع از حلقه انبارش چشمه نور ایران با استفاده از نرم افزار نقشه کشی اینونتور.



شکل ۲. نمای سه بعدی از یک شبکه پایه در حلقه انبارش با استفاده از نرم افزار نقشه کشی اینونتور. کمینه فاصله بین مغناطیس‌ها ۱۸۵ میلی متر می‌باشد.

جدول ۱. پارامترهای اصلی حلقه انبارش.

| پارامتر          | واحد             | مقدار |
|------------------|------------------|-------|
| انرژی            | گیگا الکترون ولت | ۳     |
| محیط حلقه انبارش | متر              | ۵۲۸   |
| گسیلندگی باریکه  | نانومتر رادیان   | ۰٫۴۷۷ |
| تقارن            | -                | ۲۰    |
| طول فضاهای خالی  | متر              | ۵٫۱۱  |

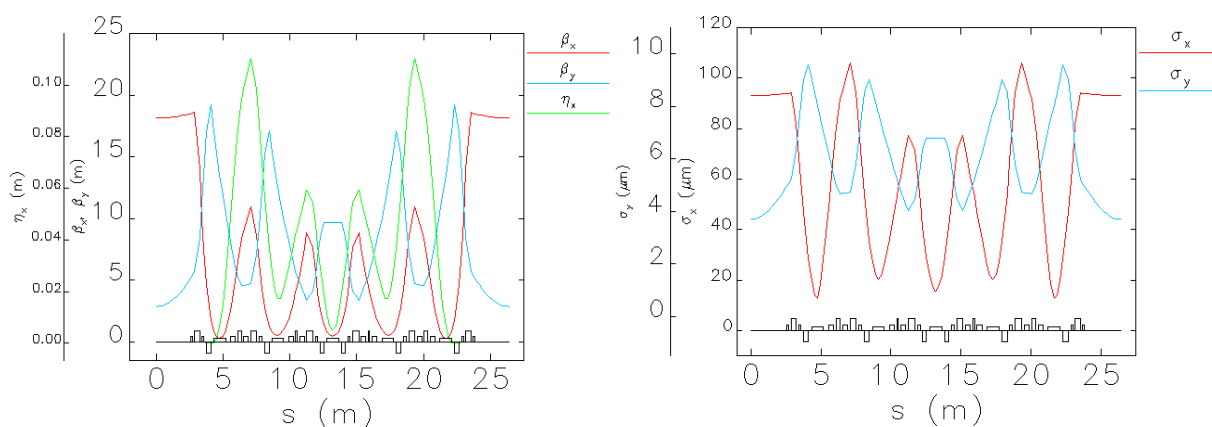
تزریق باریکه الکترونی، قرار دادن محفظه شتاب‌هی و ابزارهای تابشی در نظر گرفته شده است. پارامترهای اصلی حلقه انبارش در جدول ۱، توابع اپتیکی و ابعاد باریکه در طول یک شبکه پایه در شکل ۳ ارائه شده‌اند.

#### ۴. مغناطیس‌ها

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است هر شبکه پایه از ۵ مغناطیس دو قطبی، ۱۶ مغناطیس چهار قطبی در ۸ خانواده و ۱۶ مغناطیس شش قطبی در ۸ خانواده تشکیل شده است. اطلاعات کاملتر مغناطیس‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

افزارهای OPA [۷] و ELEGANT [۸] برای طراحی استفاده شده‌اند. نمایی کلی از ربع حلقه انبارش در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود شعاع تقریبی حلقه ۸۴ متر می‌باشد. نمای بالا از نقشه سه بعدی شبکه پایه در شکل ۲ آورده شده است.

محیط حلقه انبارش طراحی شده ۵۲۸ متر بوده و گسیلندگی باریکه الکترونی در آن ۰٫۴۷۷ نانو متر رادیان می‌باشد. تعداد بیست فضای خالی از مغناطیس، هر یک به طول ۵٫۱۱ متر در حلقه انبارش تعبیه شده است و به طور کلی حدود ۱۹٫۳۵ درصد حلقه عاری از هر نوع مغناطیس بوده و برای مواردی چون



شکل ۳. توابع اپتیکی (چپ) و ابعاد باریکه الکترونی (راست) در طول یک شبکه پایه تکرار شونده. حروف  $X$  و  $Y$  در شکل‌های فوق نشانگر جهات شعاعی و عمودی هستند.

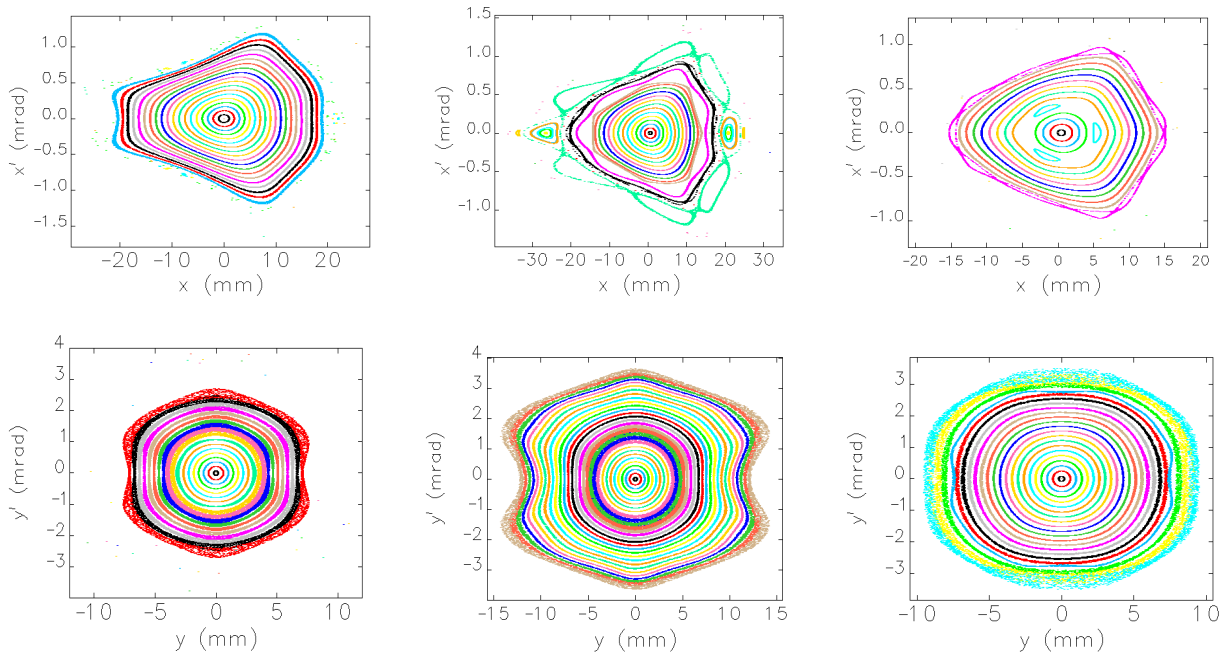
جدول ۲. پارامترهای اصلی مغناطیس‌ها در حلقه انبارش چشمه نور ایران.

| مقدار  | واحد             | پارامتر مغناطیس‌ها                                     |
|--------|------------------|--|
| ۰٫۸۴۰  | متر              | طول مغناطیس دو قطبی                                    |
| ۰٫۷۴۸  | تسلا             | میدان مغناطیسی خم کننده                                |
| ۳٫۶۰۰  | درجه             | زاویه خمش  |
| ۱۳٫۳۶۹ | متر              | شعاع خمش   |
| ۰٫۰۰۰  | تسلا بر متر      | گرادیان مغناطیس دو قطبی                                |
| ۲۵     | تسلا بر متر      | بیشینه گرادیان مغناطیس چهار قطبی                       |
| ۰٫۶۵۰  | تسلا             | میدان مغناطیسی چهار قطبی در محل قطب (شعاع=۲۶ میلی‌متر) |
| ۱۲۰۰   | تسلا بر متر مربع | بیشینه شدت مغناطیس شش قطبی                             |
| ۰٫۴۰۵  | تسلا             | میدان مغناطیسی شش قطبی در محل قطب (شعاع=۲۶ میلی‌متر)   |

## ۵. طراحی غیر خطی شبکه حلقه انبارش طرح چشمه نور ایران

منظور از طراحی غیر خطی شبکه، بهینه سازی شش قطبی‌ها برای حذف ابیراهی‌های موجود در باریکه الکترونی و ایجاد بیشترین ناحیه فیزیکی پایدار برای حرکت الکترون‌ها می‌باشد. این امر با قرار دادن شش قطبی‌ها در فازهای مناسب و مطالعه نتایج ردیابی باریکه الکترونی در طول حلقه انبارش انجام پذیرفت. فضای فاز الکترون‌ها در صفحه عرضی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل فضای فاز الکترون‌های با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت و همچنین الکترون‌هایی با  $\pm 3$  درصد انحراف انرژی پس از  $5000$  دور چرخش در یک نقطه از حلقه انبارش آورده شده است.

در مجموع تعداد  $100$  مغناطیس دو قطبی،  $320$  مغناطیس چهار قطبی و  $320$  مغناطیس شش قطبی در حلقه انبارش به کار رفته است. اگرچه که تجهیزات به کار رفته در حلقه انبارش دارای تکنولوژی پیشرفته بوده و امکان ساخت تمام آنها در کشور مطالعه نشده است ولی با توجه به میدان مغناطیسی نه چندان قوی مغناطیس‌ها که در طراحی در نظر گرفته شده است (اشاره شده در جدول فوق) و ساخت قطعات نمونه آنها در محل طرح چشمه نور ایران، امکان ساخت مغناطیس‌ها با استفاده از فولادهای تولید شده در داخل کشور و به کارگیری صنایع داخلی وجود دارد. این امر علاوه بر ایجاد پیشرفت در صنایع داخلی، منجر به کاهش هزینه ساخت مغناطیس‌ها خواهد شد. ضمن آنکه با بکارگیری مغناطیس‌های ضعیف، انرژی کمتری برای راه اندازی و فعالیت این آزمایشگاه مورد نیاز خواهد بود.



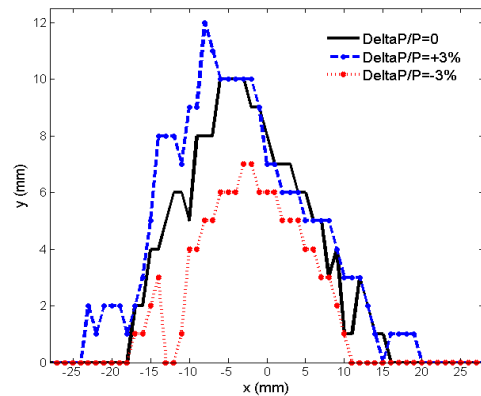
شکل ۴. فضای فاز الکترون‌های با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت (چپ)، +۳ درصد انحراف انرژی (وسط) و -۳ درصد انحراف انرژی (راست).

## ۶. ساختارهای تابشی، کیفیت تابش آنها و فازهای

### راه اندازی حلقه انبارش

در فاز صفر راه اندازی که تنها به آزمایش ماشین، اندازه گیری پارامترهای مختلف ماشین و انجام اموری از این دست اختصاص دارد بهینه سازی نهایی ماشین به منظور کار بهینه آن انجام می‌شود. جریان باریکه در این فاز ۱۰۰ میلی آمپر و ولتاژ فرکانس رادیویی لازم در حدود ۲ مگا ولت می‌باشد.

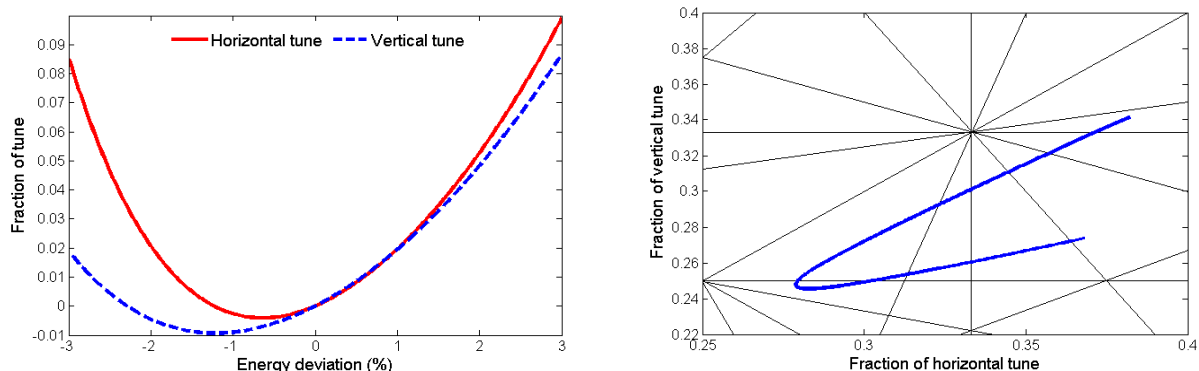
در فاز اول راه اندازی، استفاده اولیه از ماشین برای کاربران انجام می‌گیرد. اگر چه که میدان‌های مغناطیسی ضعیف برای حلقه انبارش دارای فوایدی بود که اشاره شد اما میدان ضعیف مغناطیس‌های دو قطبی منجر به تولید تابش سنکروترونی با انرژی بحرانی در حدود ۴٫۵ کیلو الکترون ولت هنگام عبور باریکه خواهد شد. این بازه از انرژی برای بسیاری از کاربران ماشین که تابشی در محدوده اشعه ایکس نرم مورد نیازشان می‌باشد دلخواه می‌باشد اما امکان انجام آزمایش‌هایی که نیازمند اشعه ایکس سخت هستند مقدور نمی‌باشد. یکی از خصوصیات بارز این طراحی شبکه حلقه انبارش، رفع این مشکل با کمترین تغییر در شبکه پایه آن می‌باشد. به منظور رفع



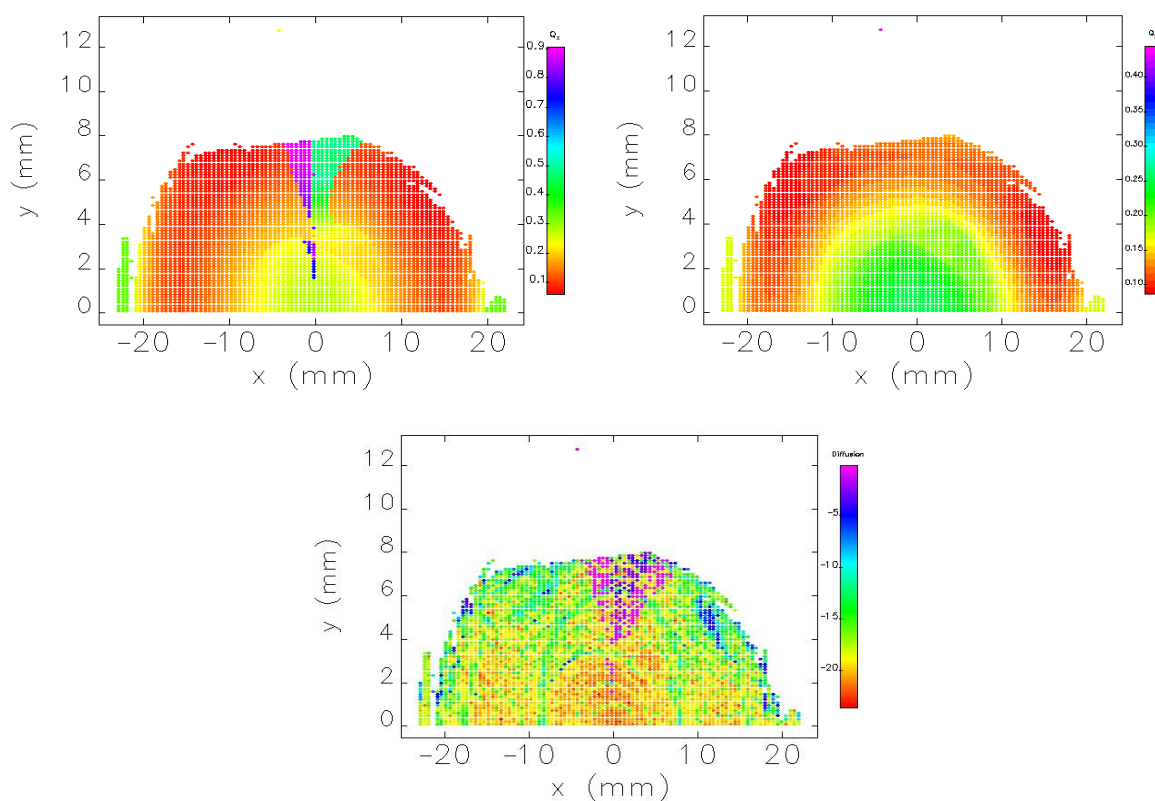
شکل ۵. فضای پایدار الکترون‌های با انرژی ۳ گیگا الکترون ولت و  $\pm 3\%$  درصد انحراف انرژی در مرکز فضای خالی شبکه پایه حلقه انبارش.

ناحیه فیزیکی پایدار ذرات در شکل ۵ نشان داده شده است و تغییرات نقطه کار حلقه انبارش نسبت به تغییرات انرژی الکترون‌ها در شکل ۶ آورده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود این تغییرات کم و قابل قبول بوده و نشانگر این است که شش قطبی‌ها در محل‌های مناسب در شبکه پایه قرار داده شده‌اند. تغییرات نقطه کار نسبت به تغییرات دامنه نوسانات الکترون‌ها در محدوده فضای پایدار در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶. نمودار تغییرات نقطه کار حلقه انبارش با تغییر در انرژی الکترون‌ها (چپ) و نمودار این تغییرات در دیاگرام خطوط تشدید (راست). نقطه کار شعاعی و عرضی اصلی حلقه  $(Q_x/Q_y)$  به ترتیب ۴۳،۲۸۳ و ۱۴،۲۵۵ می‌باشد.

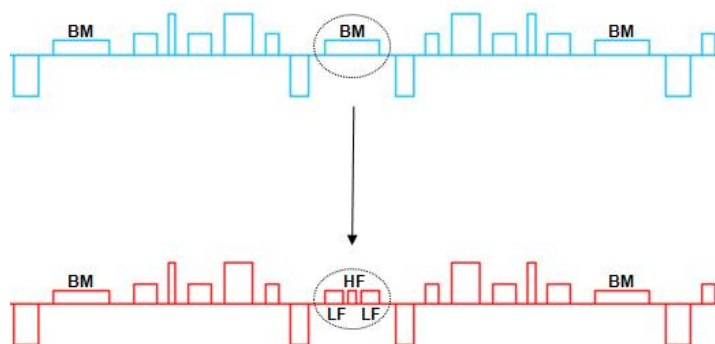


شکل ۷. فضای پایدار در مرکز فضای خالی یک پایه حلقه انبارش. رنگ‌ها در این سه نمودار به تغییرات نقطه کار (بالا-چپ) شعاعی (بالا-راست) عرضی و (پایین) ترکیب پخشی شعاعی و عرضی به صورت  $\log \sqrt{\Delta Q_x^2 + \Delta Q_y^2}$  دلالت دارد.

شده است.

در فاز اول راه اندازی حلقه انبارش استفاده از چهار مغناطیس قوی (HF) در نظر گرفته شده است. اما علاوه بر استفاده از دو قطبی‌ها، از ساختارهای تابشی نظیر ویگلر و انواع آندولیتور نیز برای تولید تابشی با درخشندگی بیشتر نسبت به

این مشکل کافی است مغناطیس دو قطبی مرکزی (BM) با ترکیبی از یک مغناطیس دو قطبی قوی (HF) که بین دو مغناطیس دو قطبی ضعیف (LF) قرار دارد جابه‌جا شود. این جابه‌جایی در شکل ۸ نشان داده شده است. پارامترهای مغناطیس‌ها در این تغییرات در جدول ۳ آورده



شکل ۸. تولید تابش اشعه ایکس سخت با جابه‌جایی مغناطیس دو قطبی مرکزی شبکه با ترکیبی از یک مغناطیس دو قطبی قوی که بین دو مغناطیس دو قطبی ضعیف قرار گرفته است.

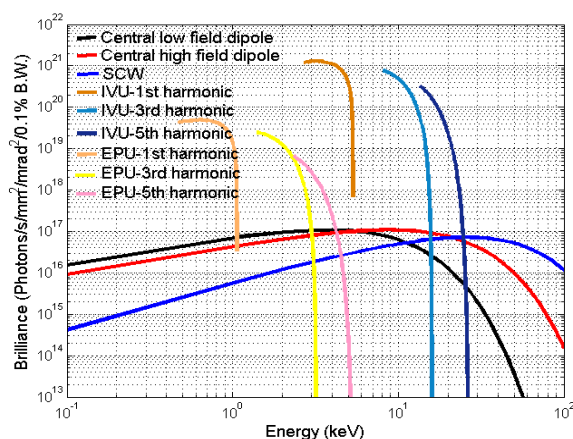
جدول ۳. پارامترهای اصلی دو قطبی‌ها برای تولید تابش پر انرژی.

| پارامتر        | واحد        | BM     | LF     | HF    |
|----------------|-------------|--------|--------|-------|
| طول            | متر         | ۰٫۸۴۰  | ۰٫۲۸۰  | ۰٫۱۲۰ |
| میدان مغناطیسی | تسلا        | ۰٫۷۴۸  | ۰٫۷۴۸  | ۱٫۷۴۵ |
| زاویه خمش      | درجه        | ۳٫۶۰۰  | ۱٫۲۰۰  | ۱٫۲۰۰ |
| شعاع خمش       | متر         | ۱۳٫۳۶۹ | ۱۳٫۳۶۹ | ۵٫۷۲۹ |
| گرادیان        | تسلا بر متر | ۰٫۰۰۰  | ۰٫۰۰۰  | ۰٫۰۰۰ |

جدول ۴. پارامترهای اصلی نوسان ساز مغناطیسی استفاده شده برای فاز اول راه‌اندازی حلقه انبارش چشمه نور ایران.

| پارامتر                      | واحد     | ویگلر ابرسانا  | آندولیتور خلاء | آندولیتور با قطبش بیضوی |
|------------------------------|----------|----------------|----------------|-------------------------|
| طول                          | متر      | ۱٫۲۰۰          | ۲٫۲۴۰          | ۲٫۴۰۰                   |
| میدان مغناطیسی (شعاعی، عرضی) | تسلا     | ۳٫۵۰۰ ، ۰٫۰۰۰  | ۰٫۸۵۰ ، ۰٫۰۰۰  | ۰٫۹۰۰ ، ۰٫۵۰۰           |
| طول پریود                    | میلی‌متر | ۶۰             | ۱۶             | ۸۰                      |
| تعداد پریود                  | -        | ۲۰             | ۱۴۰            | ۳۰                      |
| پارامتر K (شعاعی، عرضی)      | -        | ۱۹٫۶۱۴ ، ۰٫۰۰۰ | ۱٫۲۷۰ ، ۰٫۰۰۰  | ۶٫۷۲۵ ، ۳٫۷۳۶           |

دو قطبی‌ها استفاده خواهد شد. در این فاز امکان استفاده از یک ویگلر ابرسانا با میدان مغناطیسی ۳٫۵۰۰ تسلا و طول ۱٫۲۰۰ متر، از سه آندولیتور خلاء هریک با میدان مغناطیسی ۰٫۸۵۰ تسلا و طول ۲٫۲۴۰ متر و دو آندولیتور با قطبش بیضوی با میدان مغناطیسی شعاعی و عمودی ۰٫۹۰۰ و ۰٫۵۰۰ تسلا و طول ۲٫۴۰۰ متر وجود خواهد شد. اطلاعات بیشتر این ساختارهای تابشی در جدول ۴ آورده شده است. در این فاز بیشینه انرژی از دست رفته از باریکه ۶۸۵٫۵۰۰ کیلو الکترون ولت در هر دور بوده و ولتاژ فرکانس رادیویی در حدود ۲ مگا ولت برای انبار نمودن ۱۰۰ میلی آمپر استفاده خواهد شد. کیفیت تابش مجموعه تابش دهنده‌ها در فاز اول راه‌اندازی در



شکل ۹. نمودار لگاریتمی درخشندگی تابش سنکروترونی نوسان سازهای مغناطیسی قرارداده شده در فاز اول راه‌اندازی حلقه انبارش چشمه نور ایران.

شکل ۹ نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود بیشینه درخشندگی محاسبه شده به ضریبی از  $10^{21}$  فوتون در هر ثانیه، بر واحد سطح و بر واحد زاویه فضایی می‌باشد.

## سپاسگزاری

برخود لازم می‌دانم که از تمام همکارانم در طرح چشمه نور

## مراجع

1. SESAME Conceptual Design Report Yellow Book, (2003); <http://www.sesame.org.jo/sesame/>.
2. Candle design report, (2003); <http://www.candle.am/>.
3. Conceptual Design Report of ILSF, (2012); <http://ilsf.ipm.ac.ir/>.
4. H Ghasem, F Saeidi, and E Ahmadi, "Low field low emittance lattice for the storage ring of Iranian Light Source Facility", *JINST*, **8** (2013) P02023.
5. H Ghasem, D Einfeld, F Saeidi, and E Ahmadi, "Lattice candidates for the ILSF storage ring", in proceedings of International Particle Accelerator Conference, San Sebastian, Spain September 4–9, (2011) 2957.
6. H Ghasem, F Saeidi, and E Ahmadi, "High field or low field lattice for the storage ring of Iranian Light Source Facility?", *ILSF Beam Dynamic Group Internal Report, ILSF-A-SR- SR-2013-01-02* (2013).
7. A Streun, *OPA Lattice Design Code*, <https://abos.web.psi.ch/opa>.
8. M Borland, "Elegant: a flexible sdds-compliant code for accelerator simulation", Advanced Photon Source Report No. LS-287, Argonne National Laboratory, U.S.A. (2000).

ایران و پژوهشکده ذرات و شتابگرها که در طول طراحی یاریگر بودند تشکر نمایم. همچنین تشکر ویژه خود را تقدیم به مشاوران طراحی خصوصاً آقای پروفیسور ویدمن می‌نمایم که بدون تشویق و راهنمایی‌های ایشان طراحی به اتمام نمی‌رسید. شکل ۱ و ۲ این مقاله با همکاری صمیمانه گروه مکانیک چشمه نور ایران فراهم گردید.