Archive of SID

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شمارهٔ ۲، ویژه‌نامه، ۱۳۹۶
مقاله نامهٔ دومین کنفرانس ملی شتاب دهنده‌ها و کاربرد آنها، آذر ۱۳۹۴

# طراحی الکترومغناطیس‌های حلقهٔ انبارش طرح چشمهٔ نور ایران

**فرهاد سعیدی[۱،۲]، محمد رزازیان[۱]، جعفر دهقانی[۱]، اسماعیل احمدی[۱]، جواد رحیقی[۱] و رضا پورایمانی[۲]**

۱. طرح چشمهٔ نور ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران
۲. گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه اراک، اراک

**چکیده**

طرح چشمه نور ایران یک آزمایشگاه بزرگ تابش سنکروترونی با الکترون های با انرژیGeV ۳ در خاورمیانه است. حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران بر پایهٔ شبکهٔ با ۵ دو قطبی کانونی ساز (BA ۵) است که گسیلندگیnmrad ۰٫۴۸ را فراهم می‌کند. حلقهٔ انبارش دارای ۱۰۰ دو قطبی، ۳۲۰ چهار قطبی و ۳۲۰ شش قطبی است. در این مقاله به بررسی برخی از ویژگی‌های طراحی الکترومغناطیس‌های حلقهٔ انبارش پرداخته و جزییات طراحی فیزیکی آنها آورده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** حلقهٔ انبارش، الکترومغناطیس، کیفیت میدان مغناطیسی، سیستم الکتریکی و خنک کاری

## ۱. مقدمه

طرح چشمهٔ نور ایران(ILSF[۱])، اولین تسهیلات آزمایشگاهی مقیاس بزرگ برای تحقیقات و مطالعات بین رشته‌ای در کشور است که شامل شتابگر سنکروترون الکترون با انرژی GeV ۳ با کیفیت باریکه و فوتونی بسیار مطلوب خواهد بود که در هنگام تاسیس با بسیاری از تسهیلات روز جهان از نظر امکانات تجربی و تحقیقاتی برابری خواهد کرد.

حلقهٔ انبارش ILSF با انرژی GeV ۳ و محیط m ۵۲۸ از ۲۰ بخش تکرار شونده تشکیل شده است. هر بخش شامل ۵ دو قطبی شامل دو خانواده با بیشینهٔ میدان ۰٫۷۵T برای خم کردن مسیر حرکت باریکهٔ الکترونی و ۱۶ چهار قطبی شامل پنج خانواده با بیشینهٔ قدرت T/m ۲۵ برای کانونی کردن باریکه و ۱۶ شش قطبی شامل شش خانواده با بیشینه شدت $۱۲۰۰T/m^۲$ برای تصحیح ابیراهی است که در شکل ۱ قابل مشاهده است [۱] .

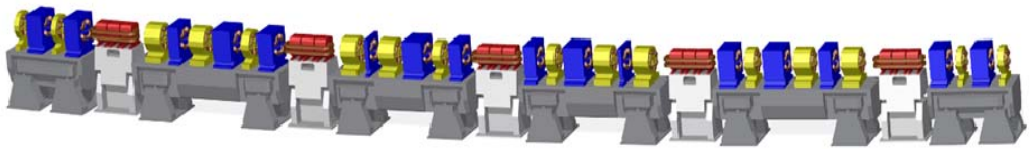
در این مقاله طراحی فیزیکی تمامی الکترومغناطیس‌های اصلی حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران ارائه شده است که شامل کیفیت میدان مغناطیسی، چند قطبی‌های مراتب بالاتر و محاسبات الکتریکی و خنک کاری است. طراحی‌های فیزیکی با استفاده از نرم افزارهای POISSON [۲]، FEMM [۳]، RADIA [۴] وMERMAID [۵] انجام شده است. شایان ذکر است که تجربیات تحقیق و توسعهٔ نمونهٔ مغناطیس‌های ساخته شده در طرح چشمهٔ نور ایران و با همکاری شرکت‌های داخلی، نشان از قابلیت فولاد کم کربن ST ۱۴ برای استفاده در مغناطیس‌های حلقهٔ انبارش است. استفاده از چنین موادی در ساخت مغناطیس‌ها و کمک صنایع داخلی کاهش قابل ملاحظه‌ای در

۱. Iranian Light Source Facility

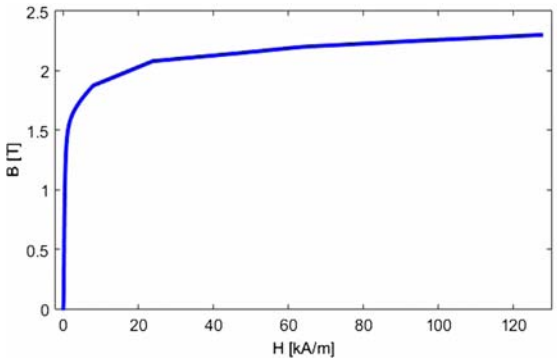
www.SID.ir

Archive of SID

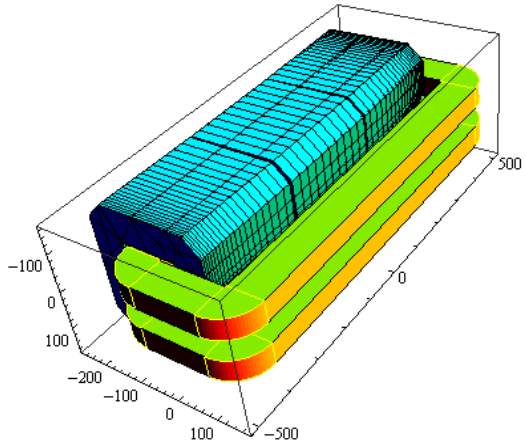




**شکل ۱.** چیدمان مغناطیس‌ها در یک بخش تکرارشوندهٔ حلقهٔ انبارش ILSF. رنگ‌های قرمز، آبی و زرد به ترتیب نشان دهندهٔ دو قطبی‌ها، چهار قطبی‌ها و شش قطبی‌ها است.




**شکل ۲.** منحنی پسماند مغناطیسی B-H استیل ST ۱۴ اندازه‌گیری شده.




**شکل ۳.** مغناطیس دو قطبی اصلی حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران که شامل سه مغناطیس مستقیم و هم اندازه است. زاویهٔ بین قطعهٔ مرکزی و قطعه‌های کناری $1{,}2^{\circ}$، است که همگی از یک سیم پیچ تغذیه می‌شود. واحد بر حسب میلی‌متر (mm) است.

هزینه‌های ساخت الکترومغناطیس خواهد داشت. با بررسی ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی، فولاد کم کربن ۱۴ Din ST با شمارهٔ استاندارد ۱٫۰۳۳۸، به عنوان مادهٔ اصلی مغناطیس‌های حلقهٔ انبارش انتخاب شده است که منحنی پسماند B-H اندازه‌گیری شدهٔ آن در شکل ۲ ترسیم شده است [۶].

## ۲. دو قطبی

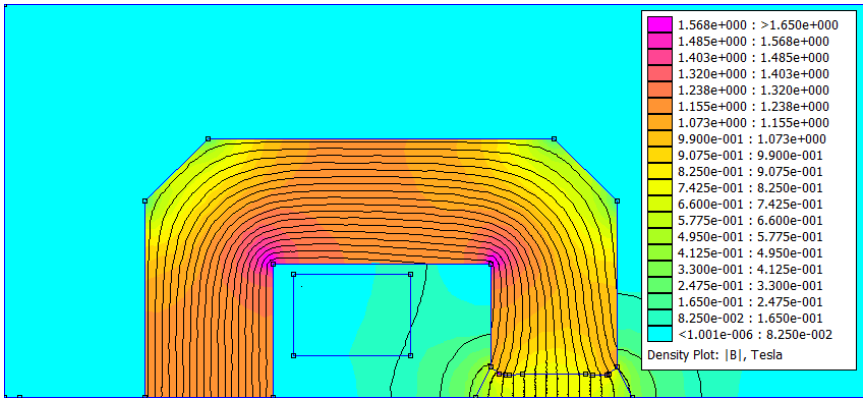
هر بخش تکرار شونده شبکهٔ حلقهٔ انبارش چشمهٔ نور ایران دارای ۵ دو قطبی با میدان ۰٫۷۴۸ T و بدون گرادیان است که با طول ۸۴ cm، الکترون با انرژی ۳ GeV را $3{,}6^{\circ}$ منحرف می‌کند [۵] .

دو قطبی اصلی شبکه به سه قطعه با مشخصات یکسان تقسیم می‌شود تا بتوان به سادگی دو قطبی میدان قوی را با دو قطبی میدان ضعیف جایگزین کرد. علاوه بر آن، با تقسیم طولی دو قطبی به سه قطعهٔ برابر و زاویهٔ انحراف $1{,}2^{\circ}$، طول سجیتا کمتر، محدودهٔ ناحیهٔ یکنواختی میدان، پهنای قطب کوچک‌تر و در نتیجه وزن ورق به کار رفته در هستهٔ مغناطیس کاهش چشمگیری خواهد داشت که یکی از علل اصلی طراحی مغناطیس بر پایهٔ سه قطعهٔ مجزا است. شکل ۳ نمایی از دو قطبی حلقهٔ انبارش را نشان می‌دهد.

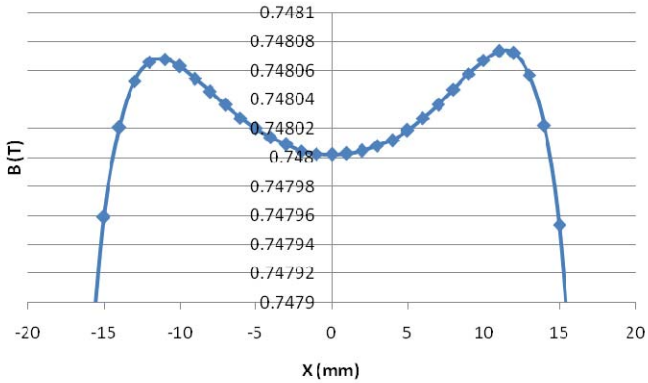
www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۴.** میدان مغناطیسی محاسبه شدهٔ FEMM در نیمهٔ بالایی مغناطیس دو قطبی. رنگ نشان دهندهٔ اندازه میدان مغناطیسی بر حسب تسلا (T) است.




**شکل ۵.** میدان مغناطیسی عمودی محاسبه شدهٔ POISSON بر حسب فاصلهٔ افقیx در دو قطبی.

با توجه به ناحیهٔ یکنواختی میدان افقی ۱۳٫۳mm± مورد نیاز دینامیکی باریکه در دو قطبی، ناحیهٔ پایداری کل مغناطیس دو قطبی حلقهٔ انبارش حداکثر۱۴ mm± در طراحی فیزیکی در نظر گرفته شده است.

الزامات سیستم خلأ و دینامیک باریکه اندازهٔ دهانهٔ مغناطیس را تعیین می‌کند. ضخامت بدنهٔ محفظهٔ خلأ ۲mm و از جنس استیل ۳۱۶ L انتخاب شده است. علاوه بر آن فاصلهٔ آزاد بین محفظهٔ خلأ و مقطع قطب مغناطیس ۲ میلی‌متر برای نصب و پخت سیستم خلأ در نظر گرفته شده است. با توجه به اعداد مذکور و همچنین با در نظر گرفتن ناحیهٔ یکنواختی میدان عمودی مورد نیاز دینامیکی ۱۱mm±، اندازهٔ دهانهٔ دو قطبی ۱۵ mm± در نظر گرفته شده است.

شکل ۴ میدان مغناطیسی در نیمهٔ بالایی دو قطبی طراحی شده توسط کد FEMM را نشان می‌دهد و میدان مغناطیسی محاسبه شده در شکل ۵ نشان داده شده است که میدانی متقارن و مطلوب برای هر دو مغناطیس است که در اثر لبه گذاری نامتقارن به دست آمده است.

کیفیت و یا یکنواختی میدان مغناطیسی توسط رابطهٔ (۱) تعریف می‌شود [۷].

$$\frac{\Delta B}{B}=\frac{B(x)-B_{\circ}}{B_{\circ}}, \qquad (۱)$$

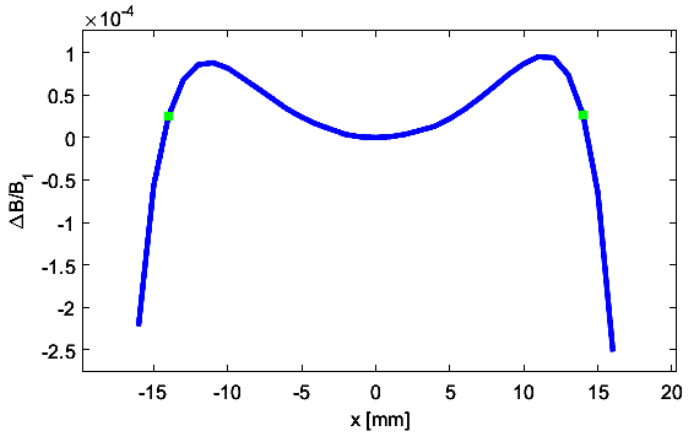
که در طراحی فیزیکی، $B_{\circ}$ میدان مغناطیسی در مرکز دو قطبی و B(x) میدان مغناطیسی محاسبه شده در نقاط مختلف افقی x است. شکل ۶ میدان مغناطیسی محاسبه شده در دو بعد توسط کد POISSON را نشان می‌دهد که در ناحیهٔ یکنواختی میدان ۱۴ mm±، در دو قطبی در محدودهٔ کمتر از $۱\times۱۰^{-۴}$ است.

چند قطبی‌های مجاز مراتب بالاتر که در اثر محدودیت

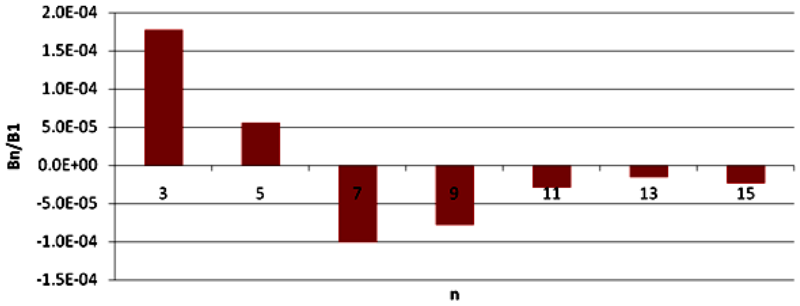
www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۶.** کیفیت میدان مغناطیسی دوبعدی دو قطبی. نقاط سبز رنگ ناحیهٔ یکنواختی میدان را نشان می‌دهد.




**شکل ۷.** چند قطبی‌های مجاز مراتب بالاتر به‌هنجار شده در دو قطبی در ناحیهٔ یکنواختی میدان ۱۴ mm.

پهنای مقطع قطب و یا اشباع در قطب هسته ظاهر می‌شوند باعث کاهش ناحیهٔ پایداری دینامیکی ذره خواهند شد. ضرایب چند قطبی‌ها با معادلهٔ زیر تعریف می‌شوند [۸].

$$B_y(x)=\sum_{n=1}^{n=\infty} B_n=\sum_{n=1}^{n=\infty} b_n x^{n-1}\ , \qquad (۲)$$

که n مرتبهٔ چند قطبی و $b_n$ ضریب چند قطبی است. چند قطبی‌های محاسبه شده برای مغناطیس دو قطبی توسط کد POISSON بر روی مسیر دایره‌ای به شعاع ۱۴ mm محاسبه و مقادیر به‌هنجار آن در شکل ۷ آورده شده است. نتایج نشان داده‌اند که تأثیر چند قطبی‌ها بر ناحیهٔ پایداری دینامیکی قابل اغماض و چشم پوشی است که خود تاییدی بر طراحی مغناطیسی قابل قبول و مطلوب است.

در طراحی سیم پیچ‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای الکتریکی و خنک کاری منابع معتبر و مقادیر رایج اکثر موارد مشابه مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب افت فشار آب داخل سیم پیچ‌های دارای حفره برای تمامی مغناطیس‌های حلقهٔ انبارش ILSF ثابت و ۶ bar در نظر گرفته شده است تا بتوان از یک سیستم خنک کنندهٔ یکسان برای تمامی آنها استفاده کرد. سرعت جریان آب برای اجتناب از خوردگی و ارتعاشات نامطلوب بین ۱ m/s تا ۴ m/s و تغییرات دمای خنک کاری کمتر از ۱۵ °C و عدد رینولدزی بالاتر از ۴۰۰۰ برای جریان‌های آشوبگر مورد نظر قرار گرفت [۷]. همچنین چگالی جریان الکتریکی با توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی و قیمت مس به کار رفته بین ۳– ۵ $A/mm^2$ منظور شده است.

با توجه به ملاحظات سیستم خنک کاری و الکتریکی منبع تغذیه، کویل سیم مسی[۱] OFC با اکسیژنی کمتر از ۱۰PPM، خلوص مس ۹۹/۹۹٪ و مقاومتی کمتر از ۱۰–۹×۱۷/۱ mΩ در

۱. Oxygen Free Copper

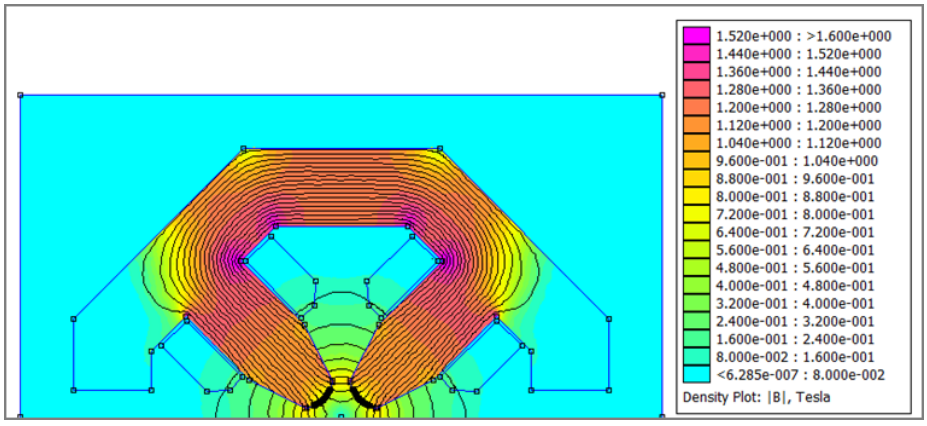
www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۱.** مشخصات الکتریکی و سیستم خنک کاری دو قطبی حلقهٔ انبارش.

| پارامتر | مقدار | واحد | پارامتر | مقدار | واحد |
|---|---|---|---|---|---|
| تعداد | ۱۰۰ | – | دور– آمپر کل | ۹۱۶۸ | A |
| نصف ارتفاع دهانه | ۱۵ | mm | مقاومت هر مغناطیس | ۲۳ | mΩ |
| میدان نوک قطب | ۰٫۷۴۸ | T | افت ولتاژ هر مغناطیس | ۸٫۸۱ | V |
| گرادیان میدان | ۰ | T/m | توان مصرفی | ۳٫۳۷ | kW |
| طول مغناطیسی | ۸۴۰ | mm | تعداد مدار خنک کننده | ۴ | – |
| ناحیه یکنواختی میدان | ± ۱۴ | mm | افزایش دمای آب | ۵٫۶۳ | °C |
| تعداد دور هر سیم پیچ | ۲۴ | – | سرعت آب خنک کننده | ۲٫۲۵ | m/s |
| سطح مقطع هادی | ۱۱ × ۱۱ | $mm^2$ | افت فشار | ۶ | bar |
| قطر سوراخ خنک کننده | ۴٫۵ | mm | عدد رینولدز | ۵۰۶۰ | – |




**شکل ۸.** نمای دوبعدی از خطوط میدان مغناطیسی مغناطیس چهار قطبی حلقهٔ انبارش با کمک نرم‌افزار FEMM.

دمای ۲۵°C، به عنوان دمای محیط و دمای ورودی آب خنک کاری در نظر گرفته شده است که در جدول ۱ مشخصات کامل سیم پیچ و سیستم الکتریکی و خنک کاری دو قطبی حلقهٔ انبارش آورده شده است.

## ۳. چهار قطبی

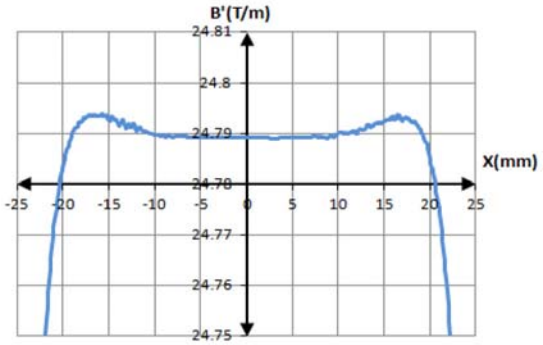
چهار قطبی‌های حلقه انبارش، ضمن رعایت حداکثر میدان مجاز مقطع قطب‌ها، یک نوع سطح مقطع برای تمامی چهار قطبی‌های حلقهٔ انبارش در نظر گرفته می‌شود و تنها قوی‌ترین مغناطیس چهار قطبی با شدت ۲۴٫۷۸T/m طراحی می‌شود و سایر مغناطیس‌ها تنها با تغییر دورجریان سیم پیچ‌های مغناطیس مذکور قابل حصول هستند.

قطب ایده‌آل یک چهار قطبی بر اساس معادلهٔ $xy = \frac{R^2}{2}$، که R شعاع دهانهٔ چهار قطبی است، در حالت تئوری می‌تواند حتی تا بی‌نهایت ادامه یابد. چنین قطبی به میدانی با بالاترین کیفیت ممکن منجر خواهد شد. با این حال در واقعیت به علت شرایط محدود کننده‌ای که در حین جادهی سیم پیچ‌ها حاکم است بهینه‌سازی چهار قطبی‌ها نیز با چالش‌هایی همراه است. حال برای رسیدن به بهینه میدان مغناطیسی با کیفیتی بهتر از $5\times10^{-4}$ در ناحیهٔ یکنواختی میدان مغناطیسی، وجود لبه گذاری مماس و متقارنی برای دو گوشه هر یک از قطب‌ها ضروری به نظر می‌رسد. خطوط میدان و شدت میدان

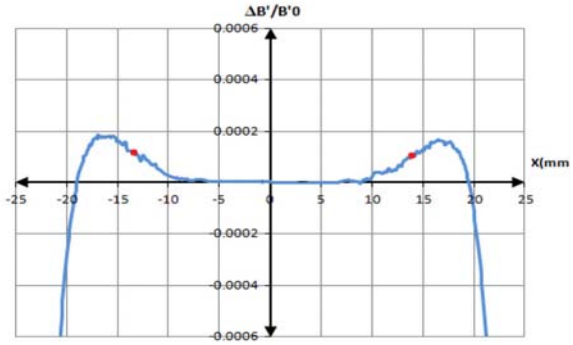
www.SID.ir

Archive of SID

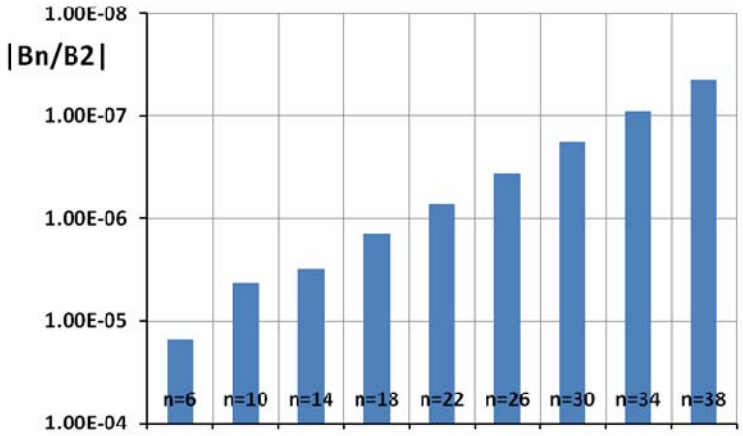





**شکل ۹.** گرادیان میدان چهار قطبی حلقهٔ انبارش در راستای افقی x




**شکل ۱۰.** کیفیت گرادیان میدان چهار قطبی حلقهٔ انبارش در راستای افقی x. نقاط قرمز رنگ ناحیهٔ پایداری میدان mm ۱۳٫۵ ± است.




**شکل ۱۱.** خطاهای چند قطبی یکه شدهٔ مغناطیس چهار قطبی در انتهای محدوده یکنواختی میدان (۱۳٫۵mm).

مغناطیسی در نقاط مختلف هستهٔ چهار قطبی را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. به دنبال شبیه‌سازی‌های دوبعدی با کمک نرم‌افزار POISSON، منحنی‌های گرادیان میدان مغناطیسی و کیفیت این میدان برای چهار قطبی را می‌توان در شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده کرد.

تحلیل مولفه‌های میدان جهت برآورد سهم چند قطبی‌های مراتب بالاتر برای محاسبهٔ ناحیهٔ یکنواختی دینامیکی باریکه همواره مورد بررسی قرار می‌گیرد. لذا بخش مهمی از طراحی هر مغناطیس، به تحلیل مولفه‌های میدان شبیه‌سازی شده اختصاص می‌یابد که نتیجهٔ یکه شده آن برای چهار قطبی‌های حلقهٔ انبارش طرح چشمهٔ نور ایران در شکل ۱۱ آمده است.

با توجه به ملاحظات سیستم خنک کاری و الکتریکی منبع تغذیه، پیچهٔ سیم مسی OFC با مشخصات سیم دو قطبی در دمای ۲۵°C در نظر گرفته شده است. این سیم پیچ‌ها با سطح مقطعی متفاوت ۷٫۵×۷٫۵ mm$^2$ با رزینی به ضخامت ۰٫۵ mm عایق شده‌اند و عایقی هم به ضخامت ۱ mm دور تا دور سیم پیچ‌ها را فراگرفته است. مشخصات اصلی خنک کاری و الکتریکی چهار قطبی در جدول ۲ آورده شده است.

## ۴. شش قطبی

شش قطبی‌های حلقهٔ انبارش با ۸ خانواده با بیشینهٔ شدت ۱۲۰۰T/mm$^2$ هستند که همگی با یک سطح مقطع و شعاع دهانهٔ ۲۶ میلی‌متر طراحی می‌شوند و مغناطیس تنها با تغییر

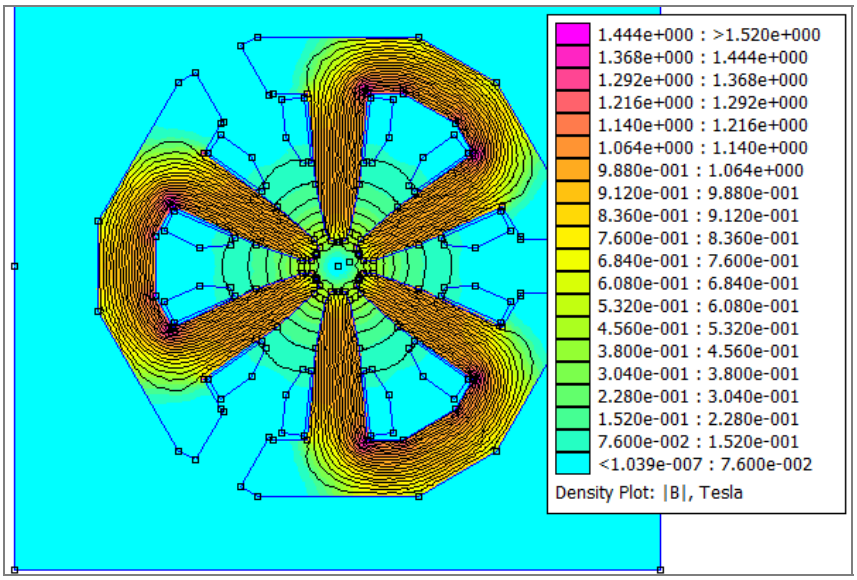
www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۲.** مشخصات الکتریکی و سیستم خنک کاری چهار قطبی حلقهٔ انبارش.

| پارامتر | مقدار | واحد | پارامتر | مقدار | واحد |
|---|---|---|---|---|---|
| تعداد | ۳۲۰ | – | دور– آمپر کل | ۶۸۳۵ | A |
| شعاع دهانه | ۲۶ | mm | مقاومت هر مغناطیس | ۴۵٫۵۷ | mΩ |
| میدان نوک قطب | ۰٫۶۵۰ | T | افت ولتاژ هر مغناطیس | ۱۱٫۳ | V |
| گرادیان میدان | ۲۴٫۷۸ | T/m | توان مصرفی | ۲٫۳۴ | kW |
| طول مغناطیسی | ۴۴۰ | mm | تعداد مدار خنک کننده | ۴ | – |
| ناحیه یکنواختی میدان | ± ۱۳٫۵ | mm | افزایش دمای آب | ۸٫۱۲ | °C |
| تعداد دور هر سیم پیچ | ۳۳ | – | سرعت آب خنک کننده | ۱٫۷۹ | m/s |
| سطح مقطع هادی | ۷٫۵ × ۷٫۵ | $mm^2$ | افت فشار | ۶ | bar |
| قطر سوراخ خنک کننده | ۳٫۵ | mm | عدد رینولدز | ۶۲۶۰ | – |




**شکل ۱۲.** نمای دوبعدی از خطوط میدان مغناطیسی مغناطیس شش قطبی حلقهٔ انبارش با کمک نرم‌افزار FEMM.

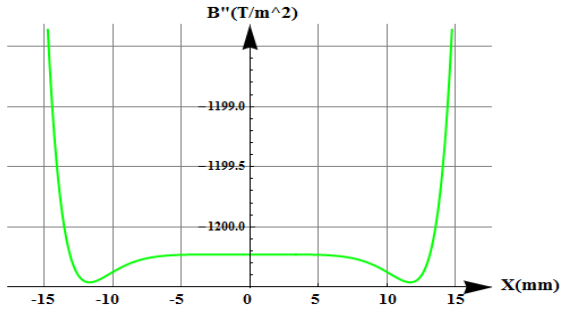
دورجریان سیم پیچ‌های مغناطیس مذکور قابل حصول هستند. منحنی قطب یک شش قطبی بر اساس معادلهٔ $3yx^2 - y^3 = R^3$ تعریف می‌شود که در تئوری می‌تواند حتی تا بی‌نهایت ادامه یابد. چنین قطبی به میدانی با بالاترین کیفت ممکن منجر خواهد شد. با این حال در عمل شرایط محدود کننده‌ای حاکم است که بهینه‌سازی شش قطبی را با چالش‌هایی همراه می‌سازد. حال برای رسیدن به بهینهٔ میدان مغناطیسی با کیفیتی بهتر از $1\times10^{-3}$ در ناحیهٔ یکنواختی میدان مغناطیسی، وجود لبه گذاری مماس و متقارنی برای دو گوشهٔ هر یک از قطب‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

همان طور که گفته شد پس از بررسی طیف گسترده‌ای از مواد مغناطیسی موجود در کشور، ورق ST ۱۴ به منظور استفاده در هستهٔ مغناطیس‌های حلقهٔ انبارش طرح چشمهٔ نور ایران انتخاب شد. خطوط میدان و شدت میدان مغناطیسی در نقاط مختلف هستهٔ شش قطبی را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد. به دنبال شبیه‌سازی‌های دوبعدی با کمک نرم‌افزار POISSON، منحنی‌های میدان مغناطیسی و کیفیت این میدان برای مغناطیس شش قطبی را می‌توان در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ مشاهده کرد.

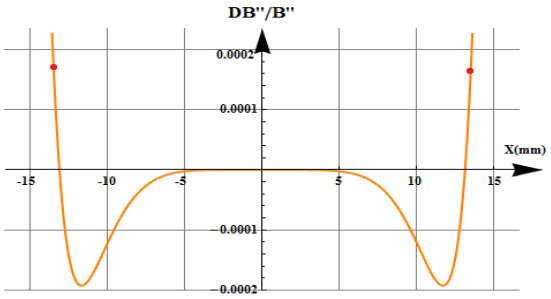
www.SID.ir

Archive of SID

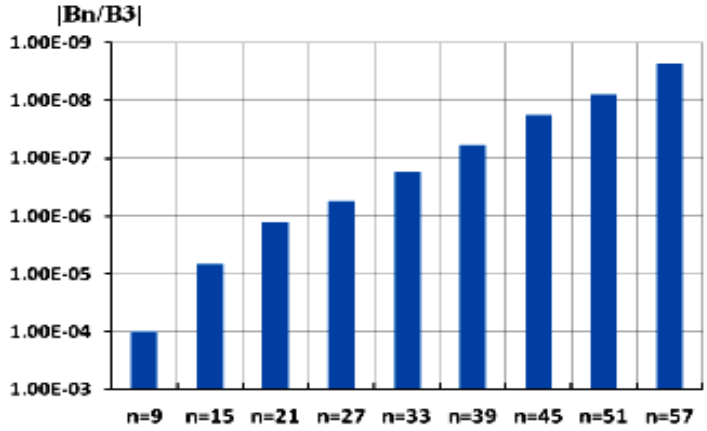





**شکل ۱۳.** شدت میدان مغناطیسی شش قطبی حلقه انبارش.




**شکل ۱۴.** کیفیت میدان مغناطیسی شش قطبی حلقه انبارش.




**شکل ۱۵.** خطاهای چند قطبی یکه شده مغناطیس شش قطبی در محدودهٔ یکنواختی میدان (۱۳٫۵ mm).

**جدول ۳.** مشخصات الکتریکی و سیستم خنک کاری شش قطبی حلقهٔ انبارش.

| پارامتر | مقدار | واحد | پارامتر | مقدار | واحد |
|---|---|---|---|---|---|
| تعداد | ۳۲۰ | – | دور– آمپر کل | ۲۹۵۷ | A |
| شعاع دهانه | ۲۶ | mm | مقاومت هر مغناطیس | ۶۱٫۷ | mΩ |
| میدان نوک قطب | ۰٫۴ | T | افت ولتاژ هر مغناطیس | ۸٫۶۷ | V |
| مولفه شش قطبی میدان | ۱۲۰۰ | $T/m^2$ | توان مصرفی | ۱٫۲۲ | kW |
| طول مغناطیسی | ۳۶۰ | mm | تعداد مدار خنک کننده | ۳ | – |
| ناحیه یکنواختی میدان | ± ۱۳٫۵ | mm | افزایش دمای آب | ۵٫۸۱ | °C |
| تعداد دور هر سیم پیچ | ۲۱ | – | سرعت آب خنک کننده | ۱٫۷۴ | m/s |
| سطح مقطع هادی | ۶٫۵ × ۶٫۵ | $mm^2$ | افت فشار | ۶ | bar |
| قطر سوراخ خنک کننده | ۳٫۵ | mm | عدد رینولدز | ۶۰۸۰ | – |

تحلیل مولفه‌های میدان به منظور برآورد سهم چند قطبی‌های مراتب بالاتر جهت محاسبات دینامیکی باریکه همواره مورد بررسی قرار می‌گیرد که مقادیر میدان‌های به‌هنجار شدهٔ شش قطبی حلقهٔ انبارش در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

مشخصات الکتریکی و سیستم خنک کاری پرشدت‌ترین مغناطیس شش قطبی حلقهٔ انبارش در جدول ۳ آمده است.

www.SID.ir

Archive of SID



## ۵. نتیجه‌گیری

طراحی فیزیکی تمامی الکترومغناطیس‌های حلقهٔ انبارش طرح چشمهٔ نور ایران به تفصیل در این مقاله توضیح داده شد و محاسبات الکتریکی و خنک کاری آن نیز آورده شده است. طراحی مکانیکی این مغناطیس‌ها در حال انجام است و ساخت نمونه‌های اولیه در طرح چشمهٔ نور ایران در دستور کار قرار دارد. ساخت این الکترومغناطیس‌ها تجربیات بسیار ارزنده‌ای در هر یک از زمینه‌های طراحی، ساخت و اندازه‌گیری مغناطیسی الکترومغناطیس‌های حلقهٔ انبارش سنکروترون در بر خواهد داشت.

## مراجع


1. H. Ghasem, F. Saeidi, and etc, "*Beam dynamics of a new low emittance third generation synchrotron light source facility*", *Phys. Rev*. ST Accel. Beams 18, (2015) 030710.
2. Poisson/Superfish Group of Codes, Available at the Los Alamos National Laboratory, LA-UR-87- 126 (1987).
3. Femm code, www.Femm.info
4. Radiacode,http:// ftp.esrf.eu/pub/InsertionDevices/
5. Mermaid code, Sim Limited, Novosibirsk department, 630058 Novosibirsk, P. O. Box 160, Russia.
6. ILSF magnet internal report No.ILSFMG-TN-RE17-00-20140501, 2014.
7. J Tanabe, Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurements,January 6, (2005).
8. Th Zickler, Basic design and engineering of normal-counducting, iron- dominated electromagnets, CERN.


www.SID.ir