

طراحی شبکه الکترومغناطیس با گسیلندگی بسیار پایین برای حلقه انبارش چشمه نور ایران

اسماعیل احمدی^۱، مسعود جزایری^۲، جواد رحیقی^۱، محمود ملا باشی^۲ و فرهاد سعیدی^۱

۱. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، چشمه نور ایران، تهران

۲. دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

پست الکترونیکی: i.ahmadi@ipm.ir

چکیده

حلقه‌های انبارش به طور گسترده در برخورد دهنده‌های ذرات، حلقه‌های میرا کننده و چشمه‌های نور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حال حاضر برای افزایش هر چه بیشتر درخشندگی در چشمه‌های نور و برخورد دهنده‌ها، گسیلندگی باریکه‌های شتاب داده شده در داخل حلقه‌های انبارش به طور روز افزون در حال کاهش است. در این مقاله طراحی از شبکه‌های الکترومغناطیس‌ها برای حلقه انبارش چشمه نور ایران مورد مطالعه قرار گرفته که در آن گسیلندگی شبکه حلقه انبارش $rad - nm / 27 \circ$ می‌باشد. این طراحی برای انرژی متوسط ۳ گیگا الکترون ولت و محیط حلقه انبارش ۵۲۸ متر انجام شده است. بر اساس این طراحی تعداد فضاهای خالی برای نصب ادوات الحاقی ۲۰ و طول هر فضای خالی برابر ۷ متر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حلقه انبارش، گسیلندگی، شبکه الکترومغناطیس‌ها

۱. مقدمه

گرفته از رفتار جمعی الکترون‌ها در جریان‌های زیاد، روش مؤثر برای افزایش درخشندگی کاهش گسیلندگی شبکه حلقه انبارش می‌باشد. به این ترتیب داشتن گسیلندگی بسیار کوچک از اهداف اصلی در طراحی حلقه انبارش می‌باشد. نسل جدید چشمه‌های نور با طراحی و ساخت حلقه‌های انبارش PETRA III در آلمان [۱]، NSLS II در ایالات متحده [۲] و MAX IV در سوئد [۳] شروع شده است. در این حلقه‌های انبارش، گسیلندگی افقی الکترون‌ها با کاهش چند برابری نسبت به حلقه‌های انبارش نسل سوم به زیر ۱ نانومتر-

هدف اصلی در طراحی حلقه انبارش چشمه نور ایران تولید باریکه فوتونی با بیشترین مقدار ممکن شار و درخشندگی می‌باشد. برابر تعریف درخشندگی تعداد فوتون‌های گسیل شده در واحد زمان در واحد پهنای باند انرژی در واحد زاویه فضایی و در واحد چشمه گسیل کننده می‌باشد. پارامتر ذکر شده متناسب با جریان باریکه الکترونی، نوع ابزارهای الحاقی و همچنین به صورت عکس متناسب با گسیلندگی الکترون‌ها در دو راستای عرضی می‌باشد. با توجه به ناپایداری‌های نشأت

چشمه نور به عنوان پیشگام در طراحی و ساخت حلقه انبارش با شبکه MBA از روش NEG برای تولید خلأ و همچنین ساخت مجموعه‌ای از مغناطیس‌ها در یک بلوک استفاده کرده است. در حلقه انبارش MAX IV از شبکه BA ۷ استفاده شده و گسیلندگی آن بدون استفاده از نوسان‌سازهای میرا کننده به ۰٫۳۸ نانومتر- رادیان رسیده است. روش‌های طراحی و فناوری به کار گرفته شده در ساخت حلقه انبارش MAX IV افق‌های جدیدی را برای چشمه‌های نور دیگر برای استفاده از روش MBA در طراحی و ساخت حلقه انبارش باز کرده است. چشمه نور جدید سیروس^۵، در حال ساخت در برزیل، دومین حلقه انبارش می‌باشد که از شبکه MBA استفاده کرده است. در این حلقه انبارش، مشابه با حلقه انبارش MAX IV، از روش NEG برای تولید خلأ استفاده شده است. در حلقه انبارش سیروس بر خلاف MAX IV، از مغناطیس‌های با شدت زیاد استفاده شده است. شدت تابع پاشندگی^۶ در محل مغناطیس‌های دو قطبی در حلقه انبارش سیروس در مقایسه با حلقه انبارش MAX IV کوچک بوده که علاوه بر کاهش گسیلندگی، امکان استفاده از دو قطبی ابر خم کننده^۷ (با میدان ۲ تسلا) را در مرکز نافام حلقه انبارش ایجاد کرده است. با طراحی انجام شده، گسیلندگی حلقه انبارش سیروس در حدود ۰٫۲۸ نانومتر رادیان است [۸]. این نوع طراحی همچنین در ارتقاء حلقه انبارش چشمه نور ALS [۹] مورد استفاده قرار گرفته است.

در طراحی حلقه انبارش چشمه نور ایران روند ذکر شده برای طراحی و ساخت چشمه‌های نور سنکرترونی مدرن مورد توجه قرار گرفته و یک شبکه BA ۵ با گسیلندگی بسیار پایین مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه BA ۵ توانایی تولید فوتون‌ها با درخشندگی زیاد و همدوسی نسبی بالا را خواهد داشت. به علت پایین بودن میدان مغناطیسی در مغناطیس‌های دو قطبی و مناسب نبودن آنها برای تولید پرتو ایکس سخت، از نوسان‌ساز سه قطبی برای تولید پرتو x سخت مشابه با دو قطبی‌ها استفاده خواهد شد. این نوسان‌ساز قبل از مغناطیس دو

رادیان کاهش داده شده است. در حلقه‌های انبارش نسل جدید در کنار افزایش درخشندگی، پارامتر مهم دیگری که در علم مطالعه مواد توسط پرتو ایکس از اهمیت بسزایی برخوردار است معرفی می‌شود، یعنی همدوسی. افزایش همدوسی فوتون‌های تولید شده در کنار افزایش درخشندگی یکی از اهداف اصلی در طراحی و ساخت حلقه‌های انبارش نسل جدید مورد توجه قرار گرفته است [۴]. در این نوع حلقه‌ها با به کار گیری شبکه^۱ یا چیدمان مغناطیس‌های موسوم به شبکه‌های نافام^۲ با مغناطیس‌های دو قطبی چندگانه (MBA)^۳، درخشندگی و همدوسی در مقایسه با حلقه‌های انبارش نسل سوم به میزان چشمگیری افزایش داده شده است. در حلقه‌های انبارش نسل سوم تنها روش مؤثر برای کاهش گسیلندگی، افزایش طول محیط حلقه انبارش بود که در این روش علاوه بر محدودیت در کاهش گسیلندگی، هزینه ساخت و کاربری به شدت افزایش یافته و مقرون به صرفه نمی‌باشد. در شبکه نافام با دو قطبی چندگانه در عین حال که به روش خیلی مؤثر گسیلندگی حلقه انبارش کاهش می‌یابد، طول محیط حلقه انبارش برای کاهش هزینه‌ها بهینه می‌شود. شبکه نافام با دو قطبی چندگانه برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ [۵، ۶] پیشنهاد شد، با این حال به علت محدودیت‌های فنی نشأت گرفته از ابعاد کوچک مغناطیس‌ها، لوله خلأ و پیچیدگی‌های دینامیک الکترون‌ها نشأت گرفته از محدودیت‌های فنی ذکر شده، این روش تا چند سال اخیر مورد توجه قرار نگرفته بود. اخیراً با پیشرفت‌های حاصل شده در فناوری خلأ NEG، فرصت استفاده از لوله‌های خلأ با ابعاد کوچک‌تر به وجود آمده است. همچنین با پیشرفت‌های به وجود آمده در روش‌های هم راستاسازی^۴ و ماشینکاری دقیق مغناطیس‌ها و بهینه‌سازی دینامیک غیر خطی الکترون‌ها امکان استفاده از شبکه‌های نافام با دو قطبی چند گانه حاصل شده است [۷]. شبکه حلقه انبارش چشمه نور سنکرترونی MAX IV اولین حلقه انبارشی بود که از شبکه MBA برای کاهش گسیلندگی استفاده کرده است [۳]. این

۱. Lattice

۲. Achromat

۳. Multi Bend Achromat

۴. Alignment

۵. Sirius

۶. Dispersion

۷. Super Bend

قطبی و ابزارهای الحاقی غیر صفر می‌باشد. همان طور که از رابطه (۱۴) آشکار است برای کمینه کردن گسیلندگی باید توابع بتاترونی و به خصوص تابع پاشندگی در محل دو قطبی‌ها تا حد ممکن کوچک بوده و بر عکس عدد پارش میرایی تا حد ممکن بزرگ باشد. از طرف دیگر کوچک بودن میدان مغناطیسی هم باعث کوچک شدن گسیلندگی شبکه خواهد شد.

شبکه نافام با دو قطبی‌های چند گانه شبکه‌ای است که تمام ویژگی‌های فوق را دارد. این نوع شبکه برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط دیترا آینفلد پیشنهاد شد [۱]. در این نوع شبکه، تعداد مغناطیس‌های دو قطبی زیاد بوده و برای کم کردن توابع بتاترونی و پاشندگی بین دو قطبی‌ها (کم کردن گسیلندگی) نیاز به مغناطیس‌های چهار قطبی با شدت زیاد وجود دارد. به همین علت در این نوع شبکه‌ها ابیراهی رنگی طبیعی عدد منفی بزرگی است که برای اصلاح آن نیاز به شش قطبی‌ها با شدت زیاد است. با توجه به معادلات (۱) و (۲)، در این طراحی سعی می‌شود هم زمان از تعداد زیاد مغناطیس‌های دو قطبی، بهینه کردن توابع بتاترون و پاشندگی در مغناطیس‌های دو قطبی و همچنین قرار دادن گرادیان میدان مغناطیسی در مغناطیس‌های دو قطبی (عدد پارش میرایی بزرگ) برای کاهش چشمگیر گسیلندگی استفاده شود.

این نوع شبکه به طور کلی از واحدهای تکرار شونده و واحد انطباق کننده^۳ تشکیل می‌شود. واحد تکرار شونده^۴ بین دو واحد انطباق کننده قرار می‌گیرد. این چیدمان طرح واره‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.

گسیلندگی یک شبکه نافام با دو قطبی چندگانه به تعداد و ساختار واحدهای تکرار شونده بستگی دارد [۲]. با ویژگی‌های ذکر شده برای شبکه نافام با دو قطبی‌های چندگانه، برای شبکه حلقه انبارش چشمه نور ایران نیز چنین شبکه‌ای پیشنهاد شد. با توجه به محدودیت‌ها و شرایط موجود، طول محیط در نظر گرفته شده برای حلقه انبارش چشمه نور

قطبی در مرکز یک بخش تکرار شونده شبکه قرار می‌گیرد. با انتخاب انجام شده برای شبکه حلقه انبارش، محیط و تعداد بخش‌های تکرار شونده آن به ترتیب برابر ۵۲۸ m و ۲۰ خواهد بود. همچنین طول هر مسیر مستقیم برابر ۷ m می‌باشد.

در بخش دوم مقاله به طراحی خطی شبکه پرداخته خواهد شد و پارامترهای اصلی حلقه انبارش در این بخش ارائه خواهد شد. در بخش سوم به ویژگی‌های تابشی حلقه انبارش اشاره شده و در بخش چهارم، نتایج محاسبات غیر خطی ارائه می‌شود. بخش پنجم مربوط به محاسبه طول عمر الکترون‌ها در حلقه انبارش و عوامل مؤثر بر آن می‌باشد.

۲. طراحی شبکه و اپتیک خطی

همان طور که در مقدمه اشاره شد سه پارامتر شار، درخشندگی و همدوسی سه عامل مهمی هستند که عملکرد یک حلقه انبارش مدرن را تعیین می‌کنند. برای داشتن شار فوتونی زیاد علاوه بر داشتن جریان بزرگ باریکه الکترونی، وجود ابزارهای الحاقی با طول بلند لازم و ضروری می‌باشد. به این ترتیب یکی از اهداف طراحی وجود بخش‌های مستقیم با طول مناسب می‌باشد. برای افزایش مقدار درخشندگی و همدوسی، گسیلندگی باریکه الکترونی باید کوچک باشد.

گسیلندگی افقی شبکه حلقه انبارش در نتیجه به تعادل رسیدن دو فرایند برانگیختگی کوانتومی^۱ S_x و میرایی نوسانات بتاترونی τ_x که طی فرایند تابش سنکروترونی اتفاق می‌افتد تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_x = S_x \tau_x, \quad (1)$$

$$S_x \approx E^{\diamond} \oint B^{\nabla} \frac{\eta_x^{\nabla} + \left(\beta_x \eta_x^{\nabla} \frac{\beta_x^{\nabla}}{\gamma} \eta_x \right)}{\beta_x} ds, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\tau_x} \approx J_x E^{\nabla} \oint B^{\nabla} ds.$$

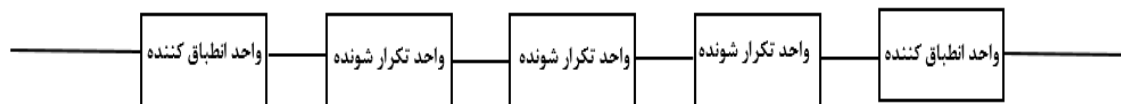
در روابط فوق η_x تابع پاشندگی و J_x عدد پارش میرایی^۲ است. مقدار هر دو انتگرال فوق تنها در طول مغناطیس‌های دو

۳. Matching cell

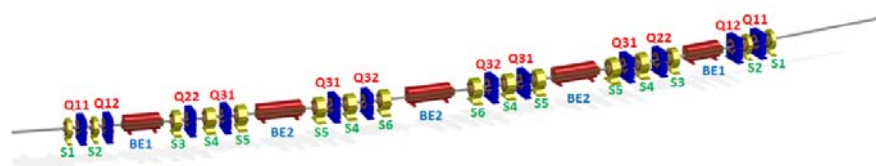
۴. Unit cell

۱. Quantum excitation

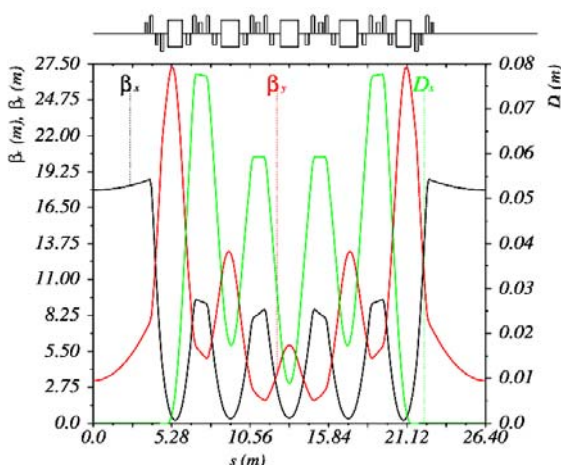
۲. Damping partition number



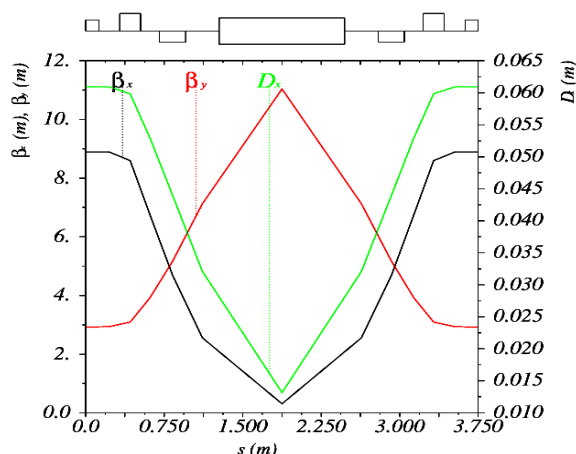
شکل ۱. طرح واره‌ای از چیدمان واحد تکرار شونده و انطباق کننده در یک بخش تکرار شونده از شبکه نافام با دو قطبی چندگانه.



شکل ۲. چیدمان مغناطیس‌های مختلف در یک بخش تکرار شونده از حلقه انبارش چشمه نور ایران.



شکل ۴. توابع بتاترونی و پاشندگی در یک بخش تکرار شونده از حلقه انبارش.



شکل ۳. توابع بتاترونی و پاشندگی در یک واحد تکرار شونده از حلقه انبارش.

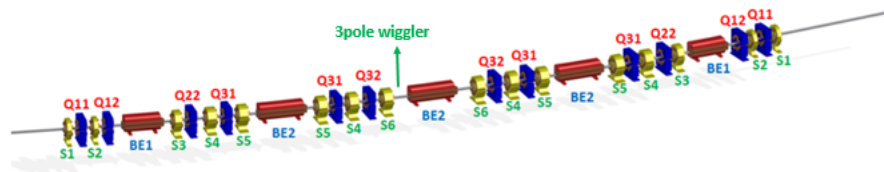
۳. ویژگی‌های تابشی حلقه انبارش چشمه نور ایران

با توجه به شبکه طراحی شده برای حلقه انبارش، تعداد ۲۰ بخش مستقیم با طول ۷ متر وجود دارد که از این تعداد یک بخش مستقیم برای تزریق به داخل حلقه انبارش و دو بخش مستقیم برای کاواک‌های رادیویی اختصاص می‌یابد. بنابراین ۱۷ بخش مستقیم برای نصب ابزارهای الحاقی در دسترس است. در حلقه‌های انبارش با گسیلندگی بسیار پایین، به علت زیاد بودن تعداد مغناطیس‌های دو قطبی شدت میدان دو قطبی برای تولید پرتو ایکس سخت کافی نمی‌باشد. به همین علت برای اینکه تابش سنکروترونی مشابه با تابش مغناطیس دو قطبی در دسترس کاربرها قرار بگیرد، استفاده از لرزاننده سه قطبی که

ایران در حدود ۵۰۰ متر می‌باشد. با چنین محیطی، یک شبکه نافام دو قطبی ۵ تایی BA ۵ و تعداد بخش‌های تکرار شونده ۲۰ تایی برای حلقه انبارش در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ یک بخش تکرار شونده از حلقه انبارش نشان داده شده است. در (نسخه الکترونیکی) این شکل مغناطیس‌های دو قطبی، چهار قطبی و شش قطبی به ترتیب با رنگ‌های قرمز، آبی و زرد نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب چیدمان مغناطیس‌ها به همراه توابع بتاترونی و پاشندگی در یک واحد و بخش تکرار شونده از حلقه انبارش نشان داده شده است. پارامترهای اصلی شبکه حلقه انبارش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای اصلی حلقه انبارش.

پارامتر	نماد	یکا	مقدار
انرژی	E	GeV	۳
محیط	C	m	۵۲۸
تعداد بخش‌های تکرار شونده	-	-	۲۰
تعداد بخش‌های مستقیم	-	m	۷/۰۲۱
گسیلندگی طبیعی	ε	pm rad	۲۷۰
تنظیم بتاترونی	Q_x / Q_y		۴۴/۱۶/۱۶/۲۰
ابراهی رنگی طبیعی	ξ_x / ξ_y		-۱۰۷/۷۹/۰۶۱/۳۰
ضریب فشردگی تکانه	α_c		$1,824 \times 10^{-2}$
اتلاف انرژی در هر دور چرخش	U_0	keV	۴۰۶,۴
پخش شدگی انرژی	δ		$6,79 \times 10^{-4}$
زمان‌های میرایی	$\tau_x / \tau_y / \tau_s$	ms/ms/ms	۱۸/۸۵۷/۲۶/۰۰۲/۱۶/۰۳۹
انتگرال تابش I _۱	I_1	m	$9,631 \times 10^{-2}$
انتگرال تابش I _۲	I_2	1/m	$3,564 \times 10^{-1}$
انتگرال تابش I _۳	I_3	1/m ^۲	$2,021 \times 10^{-2}$
انتگرال تابش I _۴	I_4	1/m	$-1,350 \times 10^{-1}$
انتگرال تابش I _۵	I_5	1/m	$1,003 \times 10^{-5}$
توابع بتاترونی در بخش‌های مستقیم	β_x / β_y	m/m	۱۷/۷۸۷/۳/۲۹۴
حداقل / حداکثر تابع بتاترونی افقی در بخش‌های مستقیم	$\beta_{x_max} / \beta_{x_min}$	m/m	۰/۲۰۷/۱۸/۶۰۸
حداقل / حداکثر تابع بتاترونی عمودی در بخش‌های مستقیم	$\beta_{y_max} / \beta_{y_min}$	m/m	۱/۷۴۰/۲۷/۱۹۵
حداقل / حداکثر تابع پاشندگی افقی	$\eta_{xMin} / \eta_{xMax}$	cm/cm	۰/۰۰۰/۷/۷۷۶
بسامد رادیویی		MHz	۱۰۰



شکل ۵. محل قرارگیری لرزاننده سه قطبی در شبکه حلقه انبارش.

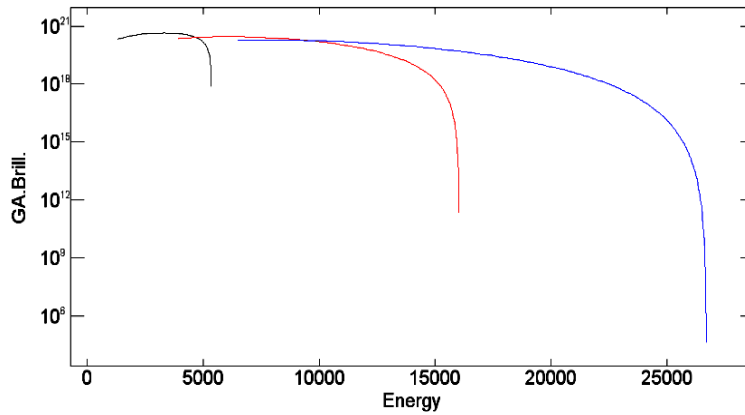
شده‌اند. پارامترهای مربوط به نوسان ساز در جدول ۲ ارائه شده است. درخشندگی فوتون‌های گسیل شده از مرتبه 10^{21} می‌باشد که قابل مقایسه با درخشندگی حلقه‌های انبارش نسل جدید می‌باشد.

۴. بهینه‌سازی اپتیک غیر خطی

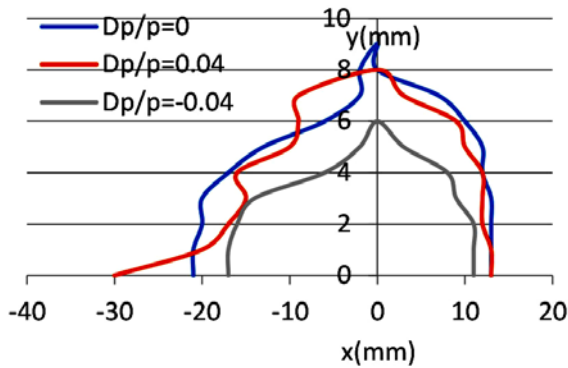
تحلیل دینامیک غیر خطی الکترون‌ها در حضور میدان‌ها و

دارای طول کوچکی است پیش بینی شده است. برای این لرزاننده فاصله ۴۷ سانتی‌متری در شبکه در نظر گرفته شده است. محل قرار گرفتن لرزاننده سه قطبی در شبکه حلقه انبارش در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای سنجش عملکرد شبکه طراحی شده برای حلقه انبارش، درخشندگی‌های فوتون‌های گسیل شده از یک نوسان ساز نوعی قرار گرفته در یکی از مسیرهای مستقیم در شکل ۶ نشان داده



شکل ۶. درخشندگی متناسب با سه هارمونیک اول نوسان ساز قرار گرفته در یکی از بخش های مستقیم.



شکل ۷. ناحیه پایداری دینامیکی ذرات در اختلاف انرژی های متفاوت که بعد از ۳۰۰۰ دور ردگیری ذرات در وسط یکی از فضاهای خالی بدون مغناطیس به دست آمده است.

جدول ۲. پارامترهای نوسان ساز نوعی قرار گرفته در حلقه انبارش.

پارامتر	یکا	نماد	مقدار
تعداد سلول ها	-	N_{ID}	۱۴۰
طول هر سلول	cm	λ_{ID}	۱٫۶
میدان مغناطیسی	T	B_y/B_x	۰٫۸۵۰/۰٫۰۰۰
طول ابزار الحاقی	m	L_{ID}	۲٫۲۴۰
پارامتر K	-	K_y/K_x	۱٫۲۷۰/۰٫۰۰۰
اتلاف انرژی در خلال تابش	keV	U_r	۹٫۲۲۵
توان	kW	P_{ID}	۰٫۹۲۲

ناحیه پایداری حرکت الکترون ها را که از ردگیری آنها در وسط یکی از فضاهای خالی بدون مغناطیس به دست آمده است نشان می دهد.

نتایج تحلیل نگاشت بسامدی که میزان پایداری ذرات در دامنه های مختلف و تغییرات تنظیم متناسب دامنه را نشان می دهد در شکل های ۸ و ۹ آمده اند.

۵. محاسبه طول عمر باریکه

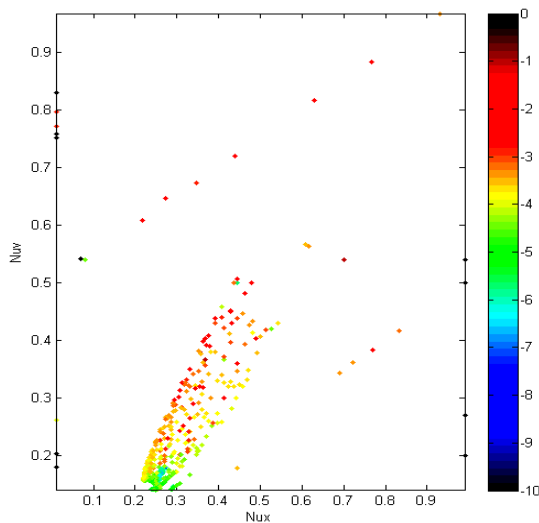
یکی از اصلی ترین ویژگی های حلقه های انبارش مدرن، کوچک بودن گسیلندگی افقی و وجود نوسان سازهایی با دهانه عمودی بسیار کوچک می باشد. هر دو ویژگی یاد شده باعث کاهش

اختلال های غیر خطی، از طریق بررسی اختلال به وجود آمده در هامیلتونین الکترون ها انجام می گیرد [۱۰، ۱۱]. هامیلتونین ذرات در صفحه عرضی به صورت یک سری توانی با مرتبه های مختلف بسط داده می شود که هر مرتبه می تواند متناسب با جملات محرک تشدیدی مختلف در حرکت الکترون تلقی شود. جملات محرک تشدیدی بعد از مشخص شدن، توسط مجموعه ای از شش قطبی که به شش قطبی های هارمونیک معروف هستند بهینه می شوند. این روش در بیشتر چشمه های نور مانند SLS، دیاموند^۱ و MAX IV [۱۲-۱۷] مورد استفاده قرار گرفته اند.

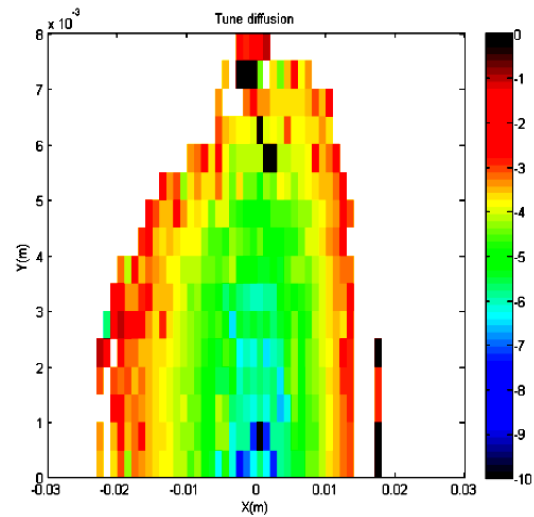
بهینه سازی شدت شش قطبی های و ردگیری ذرات با استفاده از نرم افزارهای OPA [۱۸] و AT [۱۹] انجام شده است. شکل ۷

۲. Tune

۱. Diamond



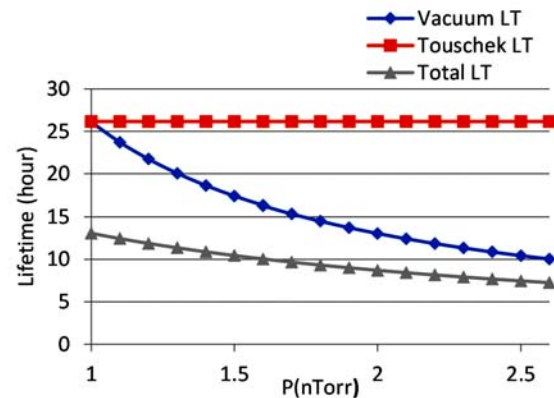
شکل ۹. پخش شدگی تنظیم در صفحه نمودار تنظیم که از تحلیل نگاشت بسامدی محاسبه شده است.



شکل ۸. نتایج تحلیل نگاشت بسامدی الکترون‌ها برای شبکه اولیه در نواحی آبی حرکت ذرات پایدار و در نواحی قرمز حرکت ذرات ناپایدار است.

عمر خلاً معروفند دو فرایند دیگری می‌باشند که روی طول عمر کل الکترون‌ها در داخل حلقه انبارش تأثیر می‌گذارند. این دو پراکندگی به ترتیب پراکندگی کشسان و غیر کشسان الکترون‌ها از گازهای زمینه موجود در خلاً می‌باشند. شکل ۱۰ طول عمر توشچک، طول عمر خلاً و طول عمر کل باریکه الکترونی را بر حسب فشارهای مختلف نشان می‌دهد.

برای فشار خلاً استاندارد ۱٫۵ نانو تور، طول عمر کل در حدود ۱۰ ساعت می‌باشد.



شکل ۱۰. تغییرات طول عمر توشچک، خلاً و طول عمر کل در فشارهای مختلف برای حلقه انبارش چشمه نور ایران.

۶. نتیجه گیری

یک شبکه از الکترومغناطیس‌ها با گسیلندگی بسیار کوچک ۰٫۲۷ برای حلقه انبارش چشمه نور ایران طراحی شد. بر اساس این طراحی، امکان تولید تابش سنکروترونی با درخشندگی زیاد که در آن انرژی فوتون‌ها می‌تواند از پرتو ایکس نرم تا پرتو ایکس تغییر کند وجود خواهد داشت. نتایج طراحی نشان می‌دهد که پارامترهای شبکه حلقه انبارش چشمه نور ایران مطابق با پارامترهای حلقه انبارش نسل جدید در حال ساخت یا طراحی می‌باشد. از نکات چالش برانگیز در حلقه‌های انبارش با گسیلندگی بسیار کوچک، کوتاه بودن طول عمر باریکه و ناحیه

شدید طول عمر الکترون‌ها از طریق پراکندگی توشچک و پراکندگی الکترون‌ها از گاز زمینه موجود در خلاً می‌شوند. طول عمر متأثر از پراکندگی توشچک با استفاده از ردگیری ذرات که در آن پذیرندگی تکانه ذرات به دست می‌آید محاسبه شده است. در فرایند ردگیری ذرات تغییرات غیر خطی توابع بتاترونی و پاشندگی با تکانه که در حلقه‌های انبارش با گسیلندگی بسیار کوچک غیر قابل اغماض می‌باشند در نظر گرفته شده است. پراکندگی کولنی و بر مشترانگ که به طول

پایداری دینامیکی کوچک می‌باشد. برای طراحی صورت گرفته برای حلقه انبارش چشمه نور ایران، طول عمر باریکه به طور نسبی بزرگ بوده و ناحیه پایداری دینامیکی برای تزریق بیرون محور به داخل حلقه انبارش کافی می‌باشد.

مراجع

1. K Balewski, *et al.*, PETRA III: a low emittance synchrotron radiation source, Technical Design Report, DESY 2004-035, (2004).
2. J Ablett, *et al.*, NSLS-II, Conceptual Design Report, (2006).
3. M Eriksson, *et al.*, Using multi-bend achromats in synchrotron radiation, in: Proceedings of the European Particle Accelerator Conference 2008, vol. 2007, Genova, (2008).
4. M Bei, *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, (2010) 518.
5. D Einfeld, D Hussmann, and M Plesko, Report ME-92-02, Bonn University, Bonn, August 1992. Germany, (1992).
6. D Einfeld, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **89**, (1994) 74.
7. R Hettel, *Journal of synchrotron radiation*, (2014) 843.
8. Lin Liu, *et al.*, The Sirius project, Journal of synchrotron radiation, (2014).
9. C Steier, J Byrd, R Falcone, S Kevan, D Robin, C Sun, H Tarawneh, and W Wan, Proceedings of IPAC'2013, Shanghai, People's Republic of China, (2013).
10. J Bengtsson, (SLSNote9/97), The Sextupole Scheme for The Swiss Light Source (SLS): An Analytical Approach, (1997).
11. S C Leeman, *et al.*, Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams **12** (2009) 120701.
12. J Bengtsson *et al.*, Proceedings of the European Particle Accelerator Conference, Scotland, Edinburgh, (2006).
13. H Owen *et al.*, Proceedings of the EPAC 2002, France, Paris, (2002).
14. G Guignard, (CERN 78-11), A General Treatment of Resonances in Accelerators, (1978).
15. Laurent S. Nadolski, Methods and tools to simulate, Optimize and analyze non-linear Dynamics in low Emittance Storage Rings, in: ICFA Beam Dynamics Newsletter, 57, (2012).
16. BNL (Conceptual Design Report), National Synchrotron Light Source-II, BNL, USA, (2006).
17. Y R E Tan, Proceedings of the PAC 2005, Knoxville, Tennessee, USA, (2005).
18. A Streun, OPA Version 3.39, PSI, Switzerland, (2012).
19. A Terebilo, "Accelerator Modeling with MATLAB Accelerator Toolbox", PAC'01, (2002) 3202.