



ارزیابی روش تزریق محوری باریکه با استفاده از مغناطیس PSM به درون حلقه‌های انبارش سینکروترونی

مهدوی، محمدرضا - طاهرپرور، پیوند* - منیری، سجاد

دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

یکی از مهم‌ترین موارد مورد توجه در طراحی هر شتابدهنده، انتخاب روش مناسب با حداکثر بازدهی برای تزریق باریکه در طول حلقه شتابدهنده است. در این مقاله روش تزریق محوری به عنوان مدرن‌ترین روش تزریق باریکه و استفاده از مغناطیس‌های شش قطبی پالسی (PSM) که سبب کاهش نوسان و انحراف باریکه ذخیره شده می‌شود، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. به منظور پیاده‌سازی این روش تزریق، از شبکه حلقه انبارش چشمه نور پیشرفته (APS)^۱ استفاده شده است. نتایج حاصل شده از کد ELEGANT نشان می‌دهد؛ با استفاده از مغناطیس شش قطبی پالسی برای تزریق محوری و نصب آن با توجه به روابط موجود و همچنین به منظور فراهم کردن فضای مناسب برای کاربران در انتهای فضای خالی دوم سبب افزایش دهانه دینامیکی و کاهش اتلاف باریکه در دوره‌های بالا گردید.

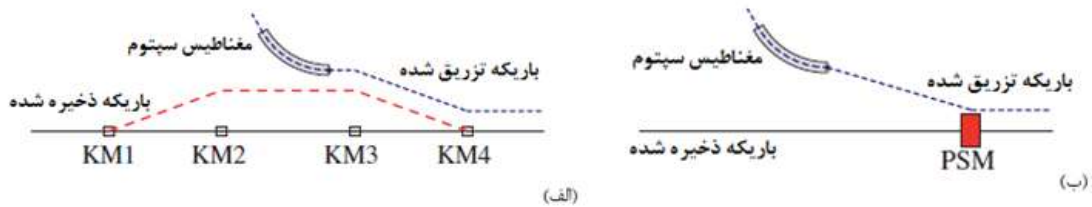
کلمات کلیدی: حلقه انبارش، تزریق باریکه، مغناطیس PSM

مقدمه:

امروزه تحقیقات و توسعه شتابدهنده‌های دایره‌ای به منظور دستیابی به انرژی‌های بالا در قلمرو فیزیک هسته‌ای، فیزیک انرژی‌های بالا و مطالعه پادذرات و ذرات بنیادی بسیار مورد توجه است. از طرفی دیگر، استفاده از شتابدهنده‌های دایره‌ای، کاربردهای وسیعی در تولید پرتوهای فوتونی شامل ایکس نرم و سخت (به عنوان چشمه‌های نور) یافته است. یک شتابدهنده دارای محدوده دینامیکی محدود می‌باشد، به طوری که برای رسیدن به انرژی زیاد، زنجیره‌ای از المان‌های شتابدهی مورد نیاز است. در دستیابی به باریکه فوتونی با کیفیت بالا در گذر از این زنجیره شتابدهی، علاوه بر بهره‌گیری از مغناطیس‌های چندقطبی بهینه و چینی دقیق و از پیش محاسبه شده آنها، استفاده از روش‌های بهینه تزریق باریکه با حداکثر بازدهی مورد نیاز است؛ که به کمک ابزارهای تزریق کننده و استخراج باریکه صورت می‌گیرد [۱]. تزریق عبارت است از فرآیند انتقال باریکه ذرات به حلقه شتابدهنده دایره‌ای یا حلقه انبارش، که باید در زمان مناسب صورت گیرد و در عین حال اتلاف باریکه را به حداقل رسانیده و ذرات تزریق شده را بر روی مسیر صحیح، با پارامترهای فاز مناسب

^۱Advanced Photon Source

قرار دهد. ترکیبی از مغناطیس‌های سپتوم و کیکر، اغلب برای تزریق و استخراج باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]- [۲].

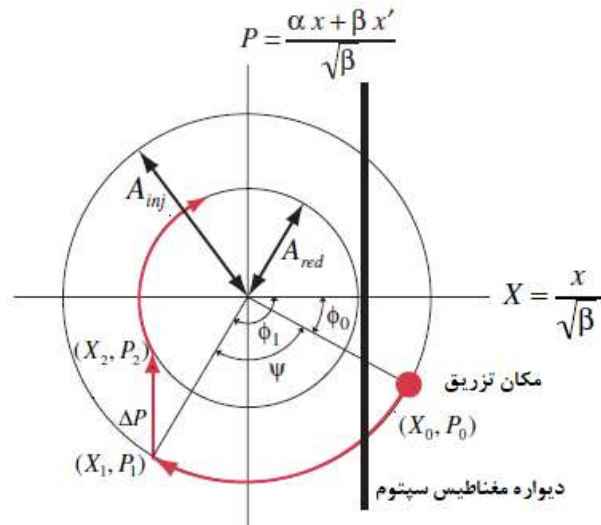


شکل ۱- روش‌های تزریق باریکه (الف) غیرمحوری، (ب) محوری

برای تزریق باریکه به درون حلقه‌های انبارش از دو روش متداول غیرمحوری و محوری انجام می‌شود (شکل ۱). در روش تزریق غیرمحوری (که یک روش متداول در مراکز سینکروترونی است) یک برآمدگی پالسی توسط مغناطیس‌های کیکر KM1 تا KM4 (شکل ۱-الف) برای تزریق باریکه تولید می‌شود. در این روش نوسان‌های همدوس دوقطبی حاصل شده از باریکه تزریق شده توسط مغناطیس‌های کیکر KM3 و KM4 کاهش می‌یابد. مدار برآمدگی به طور مرتب پس از هر چرخش باریکه در اطراف حلقه ناپدید می‌شود تا از برخورد باریکه‌ی تزریق شده به دیواره مغناطیس سپتوم جلوگیری کند [۳]. در این تکنیک تزریق، به منظور افزایش بازدهی، باریکه ذخیره شده باید تا آنجا که ممکن است برآمده شود و به باریکه تزریقی نزدیک گردد. با این حال فضای بین سپتوم و باریکه ذخیره شده باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا از برخورد باریکه‌ها جلوگیری گردد. از معایب روش غیرمحوری می‌توان به مواردی مانند نیاز به همزمانی، همترازی مغناطیس‌های کیکر و نیاز به فضای بیشتر برای نصب مغناطیس‌های کیکر اشاره کرد. همچنین اگر در ناحیه برآمدگی باریکه، شبکه شامل مغناطیس‌های شش‌قطبی و هشت‌قطبی باشد تنها به ازای یک انرژی (نه یک گستره‌ی محدود انرژی) و یک دامنه، برآمدگی رفع خواهد شد. برآمدگی‌های سایر ذرات با انرژی‌های متفاوت سبب ایجاد نوسان‌های همدوس دوقطبی برای باریکه ذخیره شده گشته و در نتیجه کیفیت باریکه فوتونی کاهش می‌یابد. به منظور رفع معایب تزریق غیرمحوری، روش تزریق محوری (شکل ۱-ب) که مورد توجه این مطالعه است، مطرح گردید. در این روش با استفاده از مغناطیس شش‌قطبی پالسی (PSM)، پتانسیلی به شکل هذلولی فراهم می‌گردد تا باریکه تزریق شده را به مرکز هذلولی هدایت کند و همچنین با فراهم کردن میدان صفر در ناحیه مرکزی سبب انحراف باریکه ذخیره شده نگردد.

روش کار

به منظور ارزیابی کیفیت باریکه، در ابتدا دینامیک فاز باریکه در هنگام تزریق مورد مطالعه قرار گرفته است. تاریخچه مسیر حرکت باریکه تزریق شده توسط مغناطیس PSM به صورت طرح‌وار توسط مولفه‌های بهنجار فضای فاز در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- تاریخچه مسیر حرکت باریکه تزریق شده در فضای فاز

در شکل، مولفه‌های بهنجار فضای فاز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P = \frac{\alpha x + \beta x'}{\sqrt{\beta}}, \quad X = \frac{x}{\sqrt{\beta}} \quad (1)$$

به طوری که x' و x موقعیت افقی و زاویه باریکه، و β و α پارامترهای پیچش در راستای افقی هستند. مسیر حرکت باریکه از نقطه تزریق (X_0, P_0) آغاز گشته و به شکل ساعتگرد حول دایره‌ای با شعاع بزرگتر به حرکت ادامه می‌دهد. شعاع دایره بزرگتر که توسط رابطه ۲ بیان می‌گردد، ریشه دوم ثابت کورانته-ا شنايدر است که به عنوان دامنه باریکه تزریق شده (A_{inj}) نام برده می‌شود [۳]:

$$A_{inj}^2 = X_0^2 + P_0^2 = \gamma_0 x_0^2 + 2\alpha_0 x_0' x_0 + \beta_0 x_0'^2 \quad (2)$$

اندیس‌های صفر در رابطه بالا بیانگر نقطه تزریق هستند. با توجه به اینکه زمان میرایی تابشی ده‌ها هزار بار بزرگتر از دوره تناوب حلقه انبارش است، در نتیجه رابطه ۲ در چندین دور ابتدایی تزریق باریکه حول حلقه انبارش ثابت باقی می‌ماند. موقعیت باریکه در نقاط تزریق را نیز می‌توان توسط مولفه زاویه فاز به صورت زیر تعریف کرد:

$$X_0 = A_{inj} \cos \phi_0, \quad P_0 = -A_{inj} \sin \phi_0 \quad (3)$$

همچنین موقعیت باریکه در مکان مغناطیس PSM به صورت زیر است:

$$X_1 = A_{inj} \cos \phi_1, \quad P_1 = -A_{inj} \sin \phi_1 \quad (4)$$



به طوری که اختلاف زاویه فاز منجر به تعریف فاز ویژه ψ به شکل زیر تبدیل می شود:

$$\psi = \int_{X_0}^{X_1} \frac{1}{\beta(s)} ds = \phi_1 - \phi_0 \quad (5)$$

به منظور اجتناب از برخورد باریکه با دیواره مغناطیس سپتوم و در نتیجه اتلاف باریکه، دامنه تزریق توسط ضربه مغناطیس PSM به دایره‌ای با شعاع کوچکتر هدایت می شود که این شعاع به عنوان دامنه تزریق کاهش یافته (A_{red}) نام برده می شود.

$$A_{red}^2 = X_2^2 + P_2^2 \quad (6)$$

که اندیس‌های ۲ در رابطه بالا بیانگر موقعیت باریکه پس از ضربه مغناطیس PSM هستند. زاویه ضربه باریکه تزریق شده توسط مغناطیس PSM توسط رابطه زیر بیان می گردد:

$$\theta = -\frac{1}{2} K_2 x_1^2 \quad (7)$$

که در رابطه بالا K_2 قدرت میدان مغناطیس شش قطبی است. با استفاده از معادلات فوق، می توان K_2 را به صورت زیر بدست آورد:

$$|K_2| = 2(A_{inj} \sin \phi_1 - \sqrt{A_{red}^2 - A_{inj}^2 \cos^2 \phi_1}) / \beta_1^{3/2} A_{inj}^2 \cos^2 \phi_1 \quad (8)$$

از رابطه فوق می توان برای تعیین مکان مغناطیس PSM بهره برد، به طوری که برای دستیابی به مقدار کمینه K_2 ، مغناطیس PSM باید در مکانی با تابع بتاترون حداکثر و زمانی که شرایط مطلوب معادله $\cos \phi_1 \sim \pm A_{red} / A_{inj}$ را فراهم می کند، نصب گردد.

نتایج

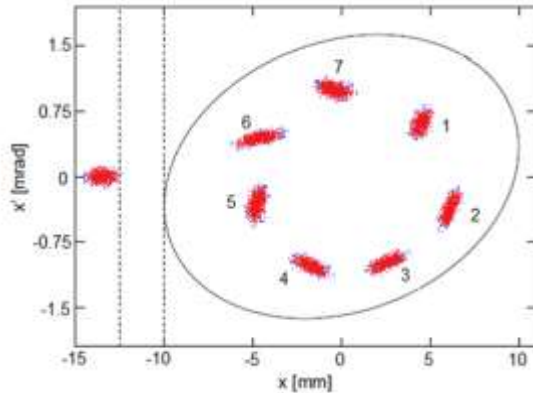
در این مقاله به منظور بررسی روش تزریق محوری باریکه، یکی از شناخته شده ترین و بزرگترین حلقه های انبارشی موجود به نام چشمه نور پیشرفته (APS) [۴] واقع در آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا مورد استفاده قرار گرفته و سپس پارامترهای مورد نیاز توسط کد شبیه سازی ELEGANT [۵] محاسبه شده است. با توجه به مشخصات حلقه انبارش APS (که در جدول ۱ بیان شده است)، این حلقه با داشتن محیطی برابر با ۱۱۰۴ متر دارای ۴۰ فضای خالی می باشد که با کسر ۵ فضای خالی برای تزریق باریکه و نصب ۱۶ کاواک شتابدهی رادیوفرکانسی برای جبران انرژی اتلافی باریکه الکترونی، ۳۵ فضای خالی برای افزایش انرژی باریکه فوتونی با نصب ابزارهای الحاقی همچون ویگنر در اختیار است. تغییرات توابع بتاترون و پراکندگی در یک سلول APS در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۳، مقدار تابع پراکندگی در دو انتهای شبکه به دلیل استفاده از شبکه آکرومات صفر است و توابع بتاترون نیز به منظور فراهم کردن باریکه مناسب برای همه کاربران در طول حلقه از تقارن مناسبی برخوردار هستند.



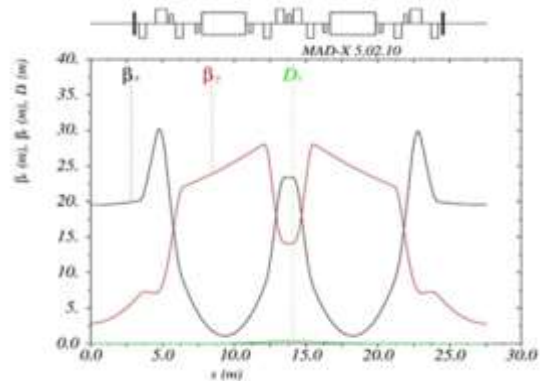
برای ردیابی ذرات تزریق شده در فضای فاز به ازای ۷ دور در مکان تزریق (شکل ۴) از کد ELEGANT استفاده شده است و نیز ۱۰۰۰ الکترون با توزیع گاوسی در هر بانچ، حول حلقه انبارش انتشار یافته است. مغناطیس سپتوم در انتهای فضای خالی اول و مغناطیس PSM نیز در انتهای فضای خالی دوم با توجه به رابطه ۸ و همچنین به منظور فراهم کردن فضای مناسب برای کاربران، نصب شده است. در شبیه‌سازی‌های تزریق باریکه، قدرت و طول مغناطیس PSM به منظور به حداقل رساندن نوسان مسیر ذرات به ترتیب $24m^{-3}$ و $0.4m$ و ضخامت دیواره سپتوم نیز $2/5mm$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات حلقه انبارش شبیه‌سازی شده

مقادیر	واحدها	پارامترها
۷	GeV	انرژی باریکه
۸/۲	nm	گسیلندگی
۰/۰۹۶	%	انتشار انرژی
آکرومات دوخمه (DBA)		ساختار خطوط انتقال باریکه
۶/۷۲	m	طول فضاهای خالی
۸۰/۴۰۰/۲۸۰		تعداد مغناطیس‌های شش قطبی / چهار قطبی / دو قطبی
۳۵/۲۲		تیون افقی
۱۴/۳۰		تیون قائم
۰/۵۹۹	T	میدان مغناطیس دو قطبی
۰/۹۰۳	m^{-2}	قدرت مغناطیس چهار قطبی
۲۱/۵-۳۰/۵	m^{-3}	قدرت مغناطیس شش قطبی
۱۱۰۴	m	محیط

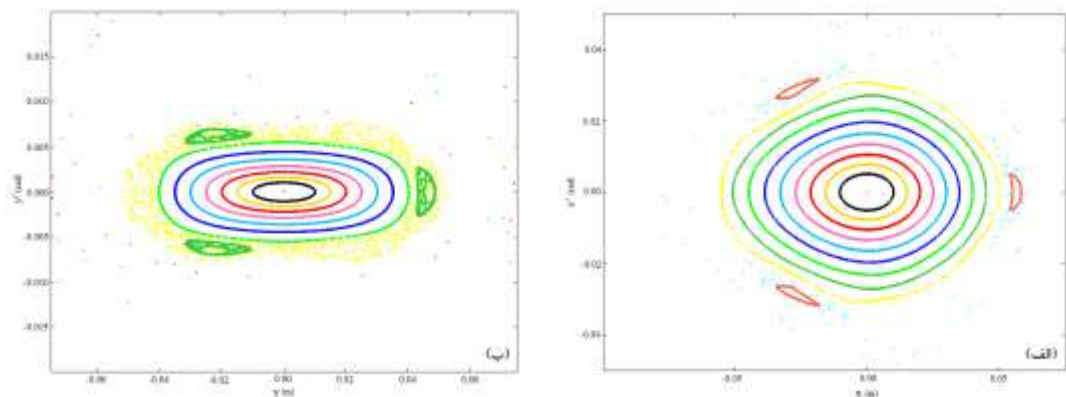


شکل ۴- ردیابی باریکه تزریق شده در فضای فاز



شکل ۳- نمایش توابع بتاترون و پراکندگی

نمودار مربوط به ردیابی باریکه تزریق شده در فضای فاز در شکل ۴ نشان می‌دهد که بدون از دست دادن الکترون‌ها، روش تزریق محوری بسیار موثر بوده است زیرا زاویه پذیرش کمتر از $\pm 1/5 \text{ mrad}$ را شاهد هستیم. از طرفی دیگر، باریکه تزریقی در اطراف مدار مرجع اصلی نوسان می‌کند و توسط تابش سینکروترون خنثی می‌شود. به منظور مشاهده ناحیه پایدار ذرات در فضای فاز با ردیابی ذرات، به ازای ۱۰۰۰ دور، در جهت‌های x و y در میانه فضای خالی توسط شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- ردیابی باریکه ذرات در صفحه (الف) $x - x'$ ، (ب) $y - y'$

برخلاف روش غیرمحوری که به سبب استفاده از مغناطیس‌های متعدد کیکر امکان اتلاف باریکه وجود دارد (که در نهایت نیازمند همترازی و بهینه‌سازی شبکه حلقه انبارش را می‌طلبد)، در روش تزریق محوری با توجه به نمودارهایی که در شکل ۵ نشان داده شده است امکان اتلاف باریکه در دورهای بالا به دلیل برخورداری از دهانه دینامیکی بزرگ به حداقل



کاهش پیدا می‌کند، زیرا به هر میزان که بیشینه مختصه‌های عرضی x و y در فضای فاز بزرگتر باشد، بیانگر ناحیه پایدار بزرگتر است.

نتیجه گیری

برای عملکرد پایدار باریکه، به حداقل رساندن اختلال در حلقه انبارش در تزریق باریکه باید بسیار موثر باشد به طوری که هیچ الکترونی اتلاف نگردد. این امر سبب حفظ کیفیت باریکه فوتونی می‌شود و بی‌وقفه پرتوهای ایکس پایداری را برای کاربران در طول آزمایش‌ها فراهم می‌کند. در این مقاله ضمن ارزیابی روش‌های تزریق باریکه به درون حلقه‌های انبارش، طراحی و شبیه‌سازی روش تزریق محوری با استفاده از مغناطیس PSM به کمک شبکه APS انجام گشته است. نتایج حاصل به کمک ارزیابی‌های انجام شده توسط ردیابی ذرات در فضای فاز بیانگر حداکثر بازدهی این روش برای تزریق باریکه است.

مراجع :

- [1] H. Wiedemann, (2015), Particle accelerator physics, *Springer*, Fourth edition.
- [2] S.Y. Lee, (2004), Accelerator Physics, *World Scientific*, Singapore.
- [3] H. Takaki, N. Nakamura, (2010), Beam injection with a pulsed sextupole magnet in an electron storage ring, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* 13.
- [4] J. N. Galayda, (1995), The Advanced Photon Source, *Proceedings of IPAC*, 1995.
- [5] M. Borland, (2000), ELEGANT: A flexible SDDS-compliant code for accelerator simulation, Advanced Light Source, *Technical Report LS-287*.