

## مقایسه تأثیر دو مقدار گسیلندگی کم و زیاد بر تابش سنکروترونی و طراحی خطوط باریکه

اعظم غلام پوراآزیر، سمیه امیری، محمد لامعی رشتی و جواد رحیقی

پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طرح چشمه نور ایران، تهران

پست الکترونیکی: azam.gholampour@ipm.ir

### چکیده

در این مقاله درباره نقش دو مقدار گسیلندگی ۳,۷۸۲ و ۰,۶۷۴ نانومتر رادیان، که برای چشمه نور ایران توصیه شده بودند، بر روی خصوصیات تابشی چشمه نورهای سنکروترونی (مغناطیس خم کننده، لرزاننده و نوسان ساز) نظیر اندازه و واگرایی پرتو در محل چشمه و درخشندگی و کمیت‌های مهم در طراحی خطوط باریکه نظیر سطح مقطع‌های فوتونی، اندازه قطعات اپتیکی و تفکیک پذیری انرژی، بحث خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: گسیلندگی، تابش سنکروترونی، خط باریکه

### ۱. مقدمه

استفاده از اندازه کوچک باریکه فوتونی [۲]، کاهش گسیلندگی باریکه الکترونی پیشنهادی مفید و خوب برای کاربران چشمه نور ایران خواهد بود. کاهش اندازه باریکه فوتونی با استفاده از شکاف‌ها برای کاهش اندازه در مکان نمونه، باعث کاهش شار فوتونی در مکان نمونه می‌شود که دلخواه کاربران تابش سنکروترون نیست زیرا یکی از دلایل اصلی استفاده از تابش سنکروترون به جای چشمه‌های نور معمولی همین شارفوتونی زیاد آن است. علاوه بر آن، کاهش گسیلندگی باعث بهبود کیفیت نور تابشی مانند پهنای باند کمتر در انرژی و افزایش همدوسی می‌شود. در این مقاله اثر کاهش گسیلندگی الکترونی بر کاهش اندازه و واگرایی باریکه فوتونی تابش شده در مغناطیس خم کننده، لرزاننده و نوسان ساز مورد بررسی قرار

برای آزمایش‌های گوناگون به خصوص وقتی که نیاز به اندازه سطح مقطع فوتونی کوچک و شار زیاد است، کاربران تابش سنکروترون به درخشندگی فوتونی بیشتری نیاز دارند. بخش اپتیکی خط باریکه تا اندازه‌ای می‌تواند با کانونی کردن باریکه فوتونی درخشندگی را افزایش دهد، اما با محدودیت‌هایی روبه روست. یکی از بهترین راه‌ها برای افزایش درخشندگی تابش سنکروترون، کاهش گسیلندگی الکترونی است. گسیلندگی با کاهش واگرایی و اندازه باریکه الکترونی، کاهش می‌یابد. از آنجا که چشمه نور ایران (ILSF) با ۳ GeV انرژی الکترون و ۴۰۰ mA شدت جریان الکترونی، برای استفاده در دهه بعد در حال طراحی است [۱]، و به دلیل روند گرایش دانشمندان به

**جدول ۱.** محاسبات مربوط به اندازه و واگرایی کل باریکه فوتونی در محل مغناطیس خم کننده چشمه نور ایران. با داشتن اندازه و واگرایی باریکه الکترونی برای دو مقدار گسیلندگی ۳,۲۷۸ nm.rad و ۰,۴۷۶ nm.rad در انرژی ۱ keV و زاویه پذیرش ۱,۵ mrad،  $\epsilon_x$  گسیلندگی در راستای افقی، B میدان مغناطیسی و  $E_c$  انرژی بحرانی مغناطیس خم کننده (با دوقطبی مغناطیسی) را نشان می دهد.

$\sum'_x \times \sum'_y \mu rad^2$	$\sum_x \times \sum_y \mu m^2$	$\sigma'_x \times \sigma'_y \mu rad^2$	$\sigma_x \times \sigma_y \mu m^2$	B(T) ( $E_c$ (keV))	$\epsilon_x$ (nm.rad)
۱۵۰۰×۲۵۵	۱۵,۴۱×۶,۷۸	۳۱,۷۸×۰,۷	۱۵,۴۱×۶,۷۸	۱,۷۴(۱۰,۴)	۰,۴۷۶
۱۵۰۰×۲۳۴	۴۶,۶×۲۵,۱۳	۸۷,۶×۱,۳۷	۴۶,۶×۲۵,۱۳	۱,۴۲(۸,۵)	۳,۲۷۸

**جدول ۲.** اندازه و واگرایی کل باریکه فوتونی در محل چشمه نور نوسان ساز برای دو مقدار گسیلندگی ۳,۲۷۸ nm.rad و ۰,۴۷۶ nm.rad در طول نوسان ساز ۲ m و L=۶ m برای دو مقدار انرژی ۱ keV و ۱۰ keV.

		۰,۴۷۶		۳,۲۷۸		$\epsilon_x$ (nm.rad)
		۹۲,۹۸ × ۳,۷۰		۱۵۶,۱۸ × ۶,۸۵		$\sigma_x \times \sigma_y \mu m^2$
		۵,۱۲ × ۱,۲۸		۳۷,۰۷ × ۴,۷۷		$\sigma'_x \times \sigma'_y \mu rad^2$
		۱		۱۰		E (keV)
		۳۲,۴۲		۱۰,۲۱		$\sigma'_r$ ( $\mu rad$ )
L=2 m		۹۳,۲۴ × ۷,۹۱		۹۳,۰۱ × ۴,۱۰		$\sum_x \times \sum_y \mu m^2$
		۳۲,۸۲ × ۳۲,۴۴		۱۱,۴۲ × ۱۰,۲۹		$\sum'_x \times \sum'_y \mu rad^2$
		۱۸,۷۱		۵,۹۵		$\sigma'_r$ ( $\mu rad$ )
L=6 m		۹۳,۸۸ × ۱۳,۵۰		۹۳,۰۶ × ۵,۴۵		$\sum_x \times \sum_y \mu m^2$
		۱۸,۷۴ × ۱۹,۳۹		۷,۸۹ × ۶,۱۳		$\sum'_x \times \sum'_y \mu rad^2$

دو راستای عمودی (y) و افقی (x) محاسبه شود [۴].  
 برای مغناطیس خم کننده و در انرژی ۱ keV (و نه بسیار دور از انرژی بحرانی)، اندازه باریکه فوتونی کل تقریباً اندازه باریکه الکترونی است  $\sum_{x(y)} \sim \sum_{x(y)}$ . بنابراین اندازه باریکه فوتونی کل با کاهش اندازه باریکه الکترونی تا ۳ برابر کاهش می یابد. از آنجا که واگرایی باریکه الکترونی در مقایسه با باریکه فوتونی بسیار کوچک است ( $\sigma'_{x(y)} \ll \sigma'_r$ ) بنابراین در واگرایی کل ( $\sum'_{x(y)}$ ) تأثیر اصلی را واگرایی فوتونی بر عهده دارد که از بزرگی میدان مغناطیسی مغناطیس خم کننده نتیجه می شود نه اندازه گسیلندگی.

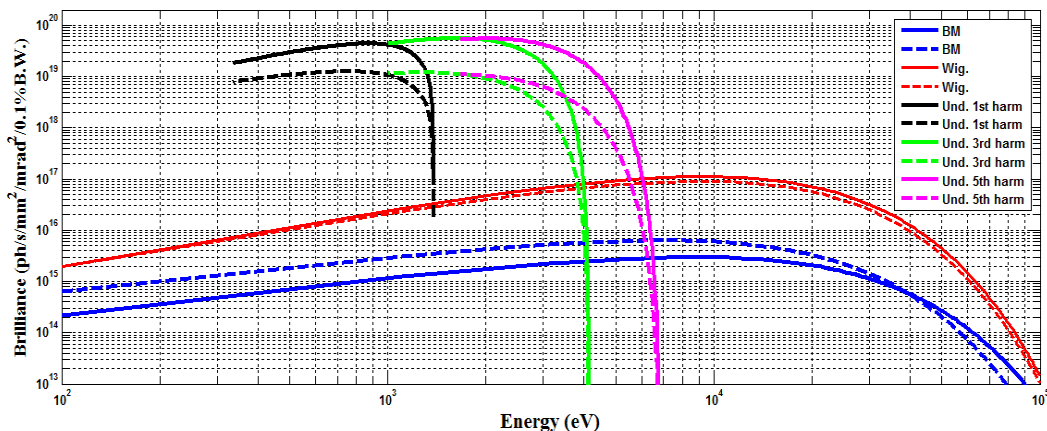
در مورد نوسان ساز، طول موج تابش و طول نوسان ساز دو کمیت اصلی در تعیین اندازه و واگرایی باریکه فوتونی در محل چشمه نور هستند. برای دو طول نوسان ساز (۲ m و ۶ m) و دو مقدار انرژی (۱ keV و ۱۰ keV)، اندازه و واگرایی کلی باریکه فوتونی محاسبه و در جدول ۱ جمع آوری شده اند. اندازه افقی باریکه فوتونی کل با اندازه باریکه الکترونی در تمام بازه

گرفته است (گسیلندگی خود حاصل ضرب اندازه در واگرایی باریکه الکترونی است). محاسبات ردگیری پرتو مربوط به دو خط باریکه نوعی در محدوده پرتو ایکس سخت و نرم در دو حالت گسیلندگی ۳,۷۸۲ nm.rad و ۰,۴۷۶ nm.rad انجام شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. در پایان نیز مقاله با یک جمع بندی به پایان می رسد.

## ۲. چشمه نور خط باریکه پراش پودری

### ۱. اندازه و واگرایی

اندازه ( $\sigma_r$ ) و واگرایی ( $\sigma'_r$ ) پرتو فوتونی در مکان چشمه نور با استفاده از مرجع [۳] برای مغناطیس خم کننده چشمه نور ایران و یک نوسان ساز نوعی محاسبه شده است (جدول ۱ و ۲). اندازه ( $\sum_{x(y)}$ ) و واگرایی ( $\sum'_{x(y)}$ ) کل باریکه فوتونی که از پیچش اندازه ( $\sigma_{x(y)}$ ) و واگرایی ( $\sigma'_{x(y)}$ ) باریکه الکترونی و اندازه ( $\sigma_r$ ) و واگرایی ( $\sigma'_r$ ) پرتو فوتونی به دست می آید، می تواند با فرمول های تحلیلی در



شکل ۱. مقایسه مقدار درخشندگی مغناطیس خم کننده، نوسان ساز (طول دوره تناوب: ۸٫۶۱ mm، تعداد دوره تناوب: ۲۷، میدان مغناطیسی: T: ۸۸٫۰، پارامتر قدرت انحراف: ۵٫۰۷، طول کل: ۶۷٫۱ m) و لرزاننده برای دو مقدار گسیلندگی ۳٫۲۷۸ nm.rad (خط توپر) و ۰٫۴۷۶ nm.rad (خط تیره) با استفاده از نرم افزار SPECTRA [۵].

مقدار درخشندگی در گسیلندگی کوچک تا ۵ برابر نسبت به گسیلندگی ۳٫۲۷۸ nm.rad افزایش می یابد (شکل ۱) که مقدار قابل ملاحظه ای برای کاربران است. در مورد لرزاننده، مقدار درخشندگی در نهایت تا ۱٫۵ برابر بیشتر می شود که مقدار قابل ملاحظه ای برای کاربران نیست. در مورد مغناطیس خم کننده تا انرژی ۴۰ keV مقدار درخشندگی در گسیلندگی ۳٫۲۷۸ nm.rad از درخشندگی در گسیلندگی ۰٫۴۷۶ nm.rad بیشتر است، زیرا بیشتر بودن شار در انرژی های کوچک، بزرگ تر بودن مقدار گسیلندگی را در درخشندگی جبران می کند. اما در انرژی های بزرگ تر از ۴۰ keV مقدار درخشندگی در گسیلندگی کوچک، افزایش می یابد.

### ۳.۲. خط باریکه

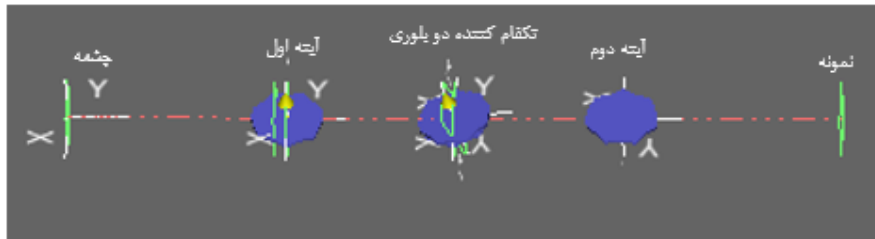
در خطوط باریکه نوعی، تأثیر گسیلندگی بر سطح مقطع باریکه فوتونی بر روی قطعات اپتیکی، توان تفکیک دهی انرژی، سطح مقطع باریکه فوتونی در مکان های مختلف در خط باریکه به ویژه در محل شکاف ها و در محل نمونه با استفاده از نرم افزار ردیابی پرتو شدو<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات برای دو خط باریکه نوعی در محدوده انرژی ایکس نرم و

انرژی تعیین می شود و در گسیلندگی ۰٫۴۷۶ nm.rad به نسبت ۱٫۱/۱٫۷ در مقایسه با گسیلندگی ۳٫۲۷۸ nm.rad کاهش می یابد. اندازه کلی باریکه فوتونی در راستای عمودی، بیشتر به وسیله حد پراش در انرژی های کوچک (کمتر از ۳ keV) تعیین می شود. در انرژی های بزرگ (بزرگ تر از ۳ keV) اندازه کلی باریکه فوتونی در راستای عمودی با اندازه عمودی باریکه الکترونی مشخص می شود. واگرایی کلی باریکه فوتونی نیز وابسته به انرژی است. واگرایی کلی در راستای افقی، در انرژی های کوچک از حد پراش تبعیت می کند ولی در انرژی های بزرگ تر از ۳ keV متأثر از واگرایی باریکه الکترونی در راستای افقی است. واگرایی عمودی کل، در تمام بازه انرژی تحت تأثیر حد پراش است [۲].

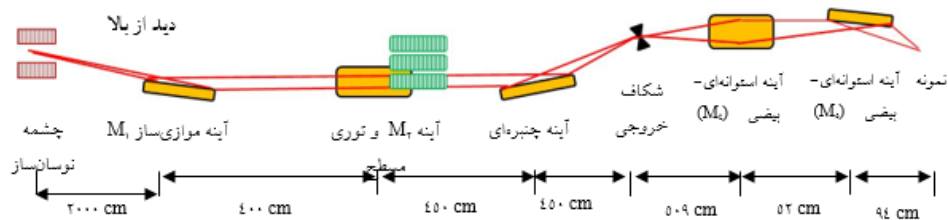
### ۲.۲. درخشندگی

درخشندگی کمیته بسیار مهم در چشمه های نوری سنکروترونی است که با آن می توان کیفیت یک چشمه نور را بررسی کرد. درخشندگی در محل چشمه نور مقدار شار فوتونی در سطح مقطع و واگرایی کل باریکه فوتونی در ۰٫۱ درصد پهنای باند انرژی است. در حالت استفاده از چشمه نوسان ساز، درخشندگی برای سه هارمونیک اول فرد در نزدیکی بیشترین

۱. Shadow



شکل ۲. تصویر شماتیک خط باریکه پراش پودری در محدوده انرژی ایکس سخت (طراحی شده با نرم افزار SHADOW) [۶ و ۷].



شکل ۳. طرحواره خط باریکه میکروسکوپی در محدوده انرژی ایکس نرم.

جدول ۳. اندازه باریکه فوتونی در محل چشمه نور نوسان ساز و صفحه کانونی آینه های KB.

$\epsilon_x$ (nm.rad)	
۳,۲۷۸	۰,۴۶۷
اندازه باریکه فوتونی در مکان چشمه نور (افقی×عمودی) $\mu\text{m}^2$	۱۴۰×۱۲
اندازه باریکه فوتونی در صفحه کانونی آینه KB (افقی×عمودی) $\mu\text{m}^2$	۱۹/۴×۴

$E/\Delta E$  در نوع رایج تکفام کننده، برای دو مقدار گسیلندگی محاسبه شده است. در محدوده انرژی ایکس نرم، دو روش اصلی در تکفام کننده های توری استفاده می شود. در یک روش در تکفام کننده، واگرایی عمودی باریکه فوتونی را با استفاده از آینه موازی ساز قبل از برخورد با توری کاهش می دهند. با فرض استفاده از این روش در ساختار تکفام کننده درون خط باریکه با چشمه نوسان ساز خطی، با طول در حدود ۴,۳ m، در دو مقدار گسیلندگی مورد نظر تغییری در مقدار توان تفکیک دهی انرژی در محاسبات مشاهده نمی شود، زیرا واگرایی عمودی باریکه فوتونی تقریباً در هر دو مقدار گسیلندگی یکسان باقی مانده است. در روش دیگر، از شکاف قبل از تکفام کننده برای افزایش توان تفکیک دهی انرژی استفاده می شود. به این ترتیب با فرض استفاده از روش دوم، با کاهش مقدار گسیلندگی، توان تفکیک دهی انرژی به دلیل کاهش اندازه عمودی باریکه فوتونی، افزایش یافته است. نرخ افزایش توان تفکیک دهی به انرژی، و

سخت انجام شده است. تصویر شماتیک خطوط باریکه مورد نظر در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. در خط باریکه در نظر گرفته شده در محدوده انرژی ایکس نرم، کوچک نمایی آینه های کانونی کننده KB، در راستای افقی و عمودی به ترتیب ۱/۷ و ۱/۳ فرض شده است. ویژگی های باریکه فوتونی بعد از چشمه نوری نوسان ساز و در نقطه کانونی آینه های KB در دو مقدار گسیلندگی ۳,۲۷۸ nm.rad و ۰,۴۶۷ nm.rad در جدول ۳ گردآوری شده است. در شرایط استفاده از چشمه نوسان ساز در کوچک نمایی یکسان، سطح مقطع باریکه فوتونی در هر دو راستای افقی و عمودی در مکان چشمه و صفحه کانونی آینه با کاهش گسیلندگی، کاهش یافته است. اندازه افقی و عمودی باریکه فوتونی در صفحه کانونی آینه ها در گسیلندگی ۰,۴۶۷ nm.rad نسبت به گسیلندگی ۳,۲۷۸ nm.rad از نصف بیشتر کاهش یافته است. در خطوط باریکه انرژی ایکس نرم، توان تفکیک دهی انرژی

جدول ۴. ویژگی‌های باریکه فوتونی در خط باریکه پراش پودری در محدوده ایکس سخت. چشمه نوری خط باریکه، مغناطیس خم کننده و نوسان ساز در نظر گرفته شده است.

$\varepsilon_x(\text{nm.rad})$		
۳,۲۷۸	۰,۴۷۶	مغناطیس خم کننده
۱۱۰×۶۰	۳۸×۱۸	اندازه باریکه فوتونی در محل چشمه ( $\mu\text{m}^2$ )
۱,۵۰۰×۰,۲۴۰	۱,۵۰۰×۰,۲۵۵	واگرایی باریکه فوتونی در محل چشمه ( $\text{mrad}^2$ )
۱۴۲×۲,۲۴	۹۷,۰۵×۲,۲۴	سطح مقطع باریکه بر روی آینه ( $\text{cm}^2$ )
۱,۱۸×۲,۹۰	۱,۷۰×۲,۹۰	سطح مقطع باریکه بر روی بلورها ( $\text{cm}^2$ )
۱۱۰×۶۰	۳۸×۱۸	اندازه باریکه فوتونی در محل نمونه ( $\mu\text{m}^2$ )
۱,۵۰۰×۰,۲۸۳	۱,۵۰۰×۰,۱۹۳	واگرایی باریکه فوتونی در محل نمونه ( $\text{mrad}^2$ )
۱,۰۴	۱,۰۴	تفکیک پذیری انرژی ( $\Delta E/E$ )
نوسان ساز		
۳۶۸×۱۷	۱۳۹×۷	اندازه باریکه فوتونی در محل چشمه ( $\mu\text{m}^2$ )
۹۰×۲۵	۴۲×۲۴	واگرایی باریکه فوتونی در محل چشمه ( $\text{mrad}^2$ )
۱۲,۹×۰,۱۴	۱۲,۵۰×۰,۰۶	سطح مقطع باریکه بر روی آینه ( $\text{cm}^2$ )
۰,۱۵×۰,۱۸	۰,۱۴×۰,۰۸	سطح مقطع باریکه بر روی بلورها ( $\text{cm}^2$ )
۳۶۸×۱۷	۳۹۷×۷	اندازه باریکه فوتونی در محل نمونه ( $\mu\text{m}^2$ )
۹۹×۲۵	۴۴×۲۵	واگرایی باریکه فوتونی در محل نمونه ( $\text{mrad}^2$ )
۱,۰۵	۱,۰۴	تفکیک پذیری انرژی ( $\Delta E/E$ )

در اندازه سطح مقطع باریکه فوتونی در موقعیت چشمه و نمونه ظاهر می‌شود. با کاهش گسیلندگی باریکه الکترونی، در چیدمان یکسان قطعات اپتیکی سطح مقطع کوچک‌تری در مکان چشمه و نمونه خواهیم داشت.

### ۳. نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر مقدار گسیلندگی باریکه الکترونی بر درخشندگی چشمه‌های نوری مغناطیس خم کننده و ابزارهای الحاقی، و اپتیک خط باریکه در دو مقدار گسیلندگی  $۳,۲۷۸ \text{ nm.rad}$  و  $۰,۴۶۷ \text{ nm.rad}$  پیشنهاد شده برای چشمه نور ایران بررسی شده است. در حالت استفاده از چشمه نوری نوسان ساز، درخشندگی باریکه فوتونی در گسیلندگی  $۳,۲۷۸ \text{ nm.rad}$  نسبت به گسیلندگی  $۰,۴۶۷ \text{ nm.rad}$  به اندازه ۵ برابر افزایش یافته است، در حالی که در درخشندگی حاصل از

طول نوسان ساز بستگی دارد. در انرژی‌های بالاتر، افزایش توان تفکیک‌دهی قابل توجه است، زیرا اندازه عمودی باریکه فوتونی در انرژی‌های بالاتر توسط اندازه عمودی باریکه الکترونی تعیین می‌شود. در محدوده انرژی ایکس سخت در خط باریکه نوعی، تفاوت در ویژگی‌های باریکه فوتونی در دو مقدار گسیلندگی در جدول ۴ آمده است. زمانی که از مغناطیس خم کننده به عنوان چشمه نوری خط باریکه پودری در شبیه سازی استفاده می‌شود، تفاوت اصلی گسیلندگی کم و زیاد در اندازه سطح مقطع باریکه فوتونی بر روی قطعات اپتیکی است. به عنوان مثال، سطح مقطع باریکه فوتونی بر روی آینه از  $۱۴۲ \text{ cm}$  به  $۹۸ \text{ cm}$  کاهش یافته است. البته کاهش سطح مقطع باریکه فوتونی بر روی آینه، باعث چگالی توان بیشتر بر روی آینه می‌شود، و به سیستم خنک کننده کارآمدتری برای قطعات اپتیکی نیاز دارد. در مورد چشمه نوسان ساز، تفاوت اصلی در دو مقدار گسیلندگی مورد نظر

در گسیلندگی  $0.476 \text{ nm.rad}$  بیشتر از حالت  $3.278 \text{ nm.rad}$  است. سطح مقطع باریکه فوتونی بر روی قطعات اپتیکی و سطح مقطع باریکه فوتونی در مکان نمونه با کاهش مقدار گسیلندگی کاهش یافته است. در نهایت، گسیلندگی کوچک باریکه فوتونی چشمه نور ایران امکان انجام آزمایش‌ها را که نیاز به سطح مقطع نانومتری با درخشندگی زیاد و شار فوتونی همدوس دارند، امکان‌پذیر می‌کند.

چشمه نوری لرزاننده در این دو مقدار گسیلندگی تغییری مشاهده نمی‌شود. در خصوص چشمه نوری مغناطیس خم کننده، تا حدود انرژی  $40 \text{ keV}$  درخشندگی باریکه فوتونی در حالت گسیلندگی زیاد نسبت به گسیلندگی کم به دلیل واگرایی عمودی کمتر در حالت  $3.278 \text{ nm.rad}$  بیشتر است. اما در انرژی بیشتر از  $40 \text{ keV}$ ، به دلیل شار فوتونی بیشتر مغناطیس خم کننده با میدان بحرانی  $1.47 \text{ T}$ ، درخشندگی باریکه فوتونی

## مراجع

- of IPAC (2011), San Sebastián, Spain.
5. T Tanaka and H Kitamura, *J. Synchrotron radiation* **8**, 1221 (2001).
6. [www.esrf.eu/usersandscience/experiments/TBSscisof/t/xop2.3](http://www.esrf.eu/usersandscience/experiments/TBSscisof/t/xop2.3).
7. H Khosroabadi, A Gholampour Azhir, S Amiri, and H Ghasem, "X-ray powder diffraction beamline for Iranian Light Source Facility", Proceedings of IPAC (2013), Shanghai, China.
1. ILSF CDR: <http://ilsf.ipm.ac.ir/Publications/ILSF-CDR.pdf>.
2. H Khosroabadi, S Amiri, and A Gholampour, "Effect of machine emittance on the synchrotron radiation, beamline and scientific cases", Internal report of ILSF, July (2013).
3. William Burling Peatman, "Grating mirrors and slits", Gordon and Breach Science Publisher, (1997).
4. H Ghasem, F Saeidi, and E Ahmadi, "Lattice Candidates for The Ilsf Storage Ring", Proceedings