



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه خوارزمی،  
تهران، ایران.  
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸



## تبدیل نمایه‌ی گاوسی پرتوی لیزر به نمایه‌ی بسل با استفاده از یک مدوله ساز فضایی دامنه

عاطفه کیخسروی<sup>۱</sup>؛ سعید قوامی صبوری<sup>۲</sup>؛ علیرضا خورسندی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، a.keikhosravi@sci.ui.ac.ir

<sup>۲</sup> گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ghavami@sci.ui.ac.ir

<sup>۳</sup> گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، a.khorsandi@sci.ui.ac.ir

چکیده - پرتوی بسل به عنوان یک پرتوی غیرپراشی، دارای کاربردهای وسیعی در حوزه‌ی علم و صنعت است. روش‌های مختلفی برای تولید پرتو با این نمایه وجود دارد. در بین این روش‌ها، استفاده از ابزار کنترل رایانه‌ای مانند مدولاتور فضایی نور، امکان تولید این پرتو را به صورت فعال فراهم می‌کند. در این پژوهش با ایده از تولید پرتوی بسل به وسیله یک حلقه، با استفاده از نرم افزار متلب المان پراشی مناسب برای تولید نمایه‌ی بسل را طراحی کرده و سپس با حل عددی انتگرال پراش، طرح پراش از این المان، شبیه سازی و بررسی شده است؛ در نهایت المان پراشی طراحی شده با استفاده از مدولاتور فضایی دامنه‌ای نور در مسیر یک پرتوی گاوسی قرار گرفته و پرتوی شبه بسل به صورت تجربی در آزمایشگاه تولید و اندازه گیری شده است.

کلید واژه- المان پراشی، پرتوبسل، پرتوگاوسی، نمایه‌ی پرتو، مدولاتور فضایی نور.

## Converting the profile of a Gaussian beam to a Bessel one using spatial amplitude modulator

Atefeh, Keikhosravi<sup>1</sup>; Saeed, Ghavami Sabouri<sup>2</sup>; Alireza, Khorsandi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, a.keikhosravi@sci.ui.ac.ir

<sup>2</sup> 1Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, ghavami@sci.ui.ac.ir

<sup>3</sup>Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, a.khorsandi@sci.ui.ac.ir

Abstract- The Bessel beam, as a non-diffracted beam, has wide applications in the field of science and industry. There are various ways to produce a beam with this profile. Among these methods, the use of computer-controlled tools such as the Spatial Light Modulator allows the active beam to be generated. In this paper, with the idea of producing a Bessel beam by a ring, using a mathematical software, the diffractive element is designed to generate the Bessel beam, and then, by numerical solution of the Fresnel diffraction integral, the outline model is simulated; eventually by putting the diffractive element on the path of Gaussian beam using a spatial amplitude modulator, generated Bessel-Gauss beams in laboratory.

Keywords: Beam profile, Bessel beam, Diffractive optical element, Gaussian beam, Special light modulator.

متلب المان پراشی مناسب برای تولید پرتو بسل را طراحی کردیم و سپس با حل عددی انتگرال پراش فرنل طرح خروجی شبیه سازی شده است. در نهایت المان طراحی شده با استفاده از مدولاتور فضایی دامنه‌ای در مسیر یک پرتو گاوسی لیزر قرار گرفته و پرتو بسل به طور تجربی در آزمایشگاه تولید شده است.

### مبانی نظری

پراش مبنای اصلی اپتیک موجی است. هر عاملی که سبب انحراف نور از مسیر مستقیم شود، در صورتیکه ناشی از شکست و بازتاب نباشد، پراش نامیده می‌شود. مطابق این تعریف، واگرایی پرتو در طی انتشار نیز پراش محسوب می‌شود. بر خلاف امواجی مانند موج گاوسی، امواج غیرپراشی مانند بسل بدون پراش منتشر می‌شوند؛ به عبارتی نمایه عرضی شدت آنها ضمن انتشار تغییر نمی‌کند. تئوری پراش این امکان را فراهم می‌کند تا نحوه تغییر جبهه‌ی موج و انتشار آن بعد از تابش به المان پراشی محاسبه گردد. پراش فرنل در ناحیه‌ای در نزدیک صفحه‌ی پراش اتفاق می‌افتد. اگر فرض شود که ابعاد المان پراشی از طول موج نور فرودی بزرگتر است؛ برای یک جبهه‌ی موج کروی، دامنه‌ی میدان پرتو خروجی بر اساس تئوری هویگنس و تقریب فرنل، در هر نقطه از صفحه‌ی تصویر به صورت رابطه‌ی (۱) می‌باشد [۶]. در رابطه‌ی (۱)،  $(x, y)$  مختصات صفحه‌ی المان پراشی،  $(u, v)$  مختصات صفحه‌ی تصویر و  $A(x, y)$  تابع المان پراشی در صفحه‌ی پراش است.

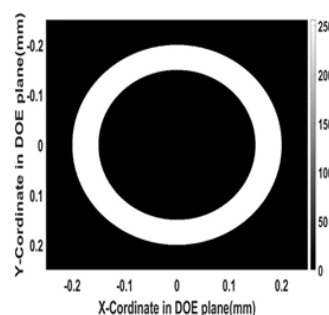
$$E(u, v) = \frac{e^{ikz} e^{i\frac{k}{2z}(u^2+v^2)}}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, y) \times \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda z}(xu + yv)\right] dx dy \quad (1)$$

### مقدمه

پرتو بسل برای نخستین بار به عنوان یک ساختار ریاضی، توسط دورنین در سال ۱۹۸۷ بیان شد. دورنین با نگاهی به پاسخ‌های وایتکر برای حل معادله موج هلمهولتز دریافت که پاسخ ویژه تابع بسل، مستقل از راستای انتشار است [۱]. این پاسخ دارای ویژگی‌هایی منحصر به فرد است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به حد پراش کم و خودترمیم‌کنندگی اشاره کرد. طبق تعریف تابع بسل انتظار می‌رود که نمایه‌ی عرضی توزیع شدت این پرتو، حلقه‌هایی هم مرکز باشند. دورنین و همکارانش نشان دادند که می‌توان پرتو بسل تقریب یافته (شبه بسل) را، به طور تجربی تولید کرد [۲]. تولید پرتو بسل به روش‌های مختلفی امکان پذیر است. یکی از معمول‌ترین روش‌ها، استفاده از عدسی اکسیکون است [۳]. در این روش پرتو گاوسی با عبور از اکسیکون، نمایه‌ی بسل را تولید می‌کند. از جمله دیگر روش‌های تولید پرتو بسل استفاده از یک حلقه با شعاع مشخص می‌باشد [۴]. از کارآمدترین روش‌ها در تولید این پرتو، تکنیک هولوگرافیک (تمام نگاری) است که در آن تغییر فاز مناسب برای تولید پرتو بسل، بر روی یک پرتو گاوسی اعمال می‌شود. این روش خود به دو دسته ثابت و متغیر تقسیم می‌شود. در روش ثابت ابتدا فاز مناسب برای تولید نمایه‌ی بسل طراحی شده و سپس آن را روی ماسک مناسب سونش می‌کنند. این روش مانند دو مورد قبل، یک روش غیر فعال است و بعد از چاپ ماسک ویژگی‌های پرتو قابل تغییر نیست. در روش متغیر، هولوگرام متغیر با ابزار کنترل کامپیوتری همانند مدولاتور فضایی نور (SLM) طراحی می‌شود [۵]. در سال‌های اخیر با استفاده از مدولاتور فضایی نور، این امکان فراهم شده است تا با طراحی الگوی فضایی مناسب، شکل دلخواه پرتو را ایجاد کرد. به عبارتی با استفاده از این ابزار می‌توان میزان عبور و یا بازتاب نور را کنترل و دستکاری کرد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از نرم افزار

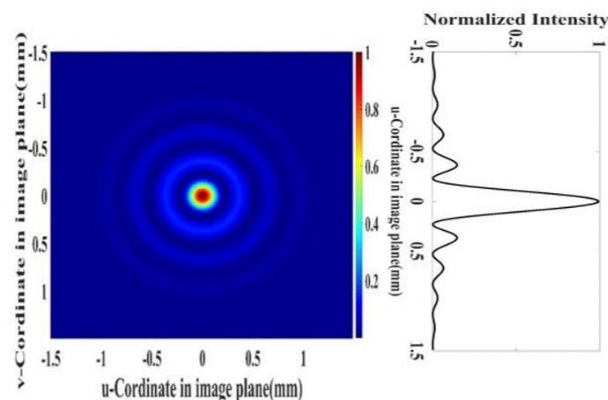
## طراحی المان پراشی و شبیه سازی

برای تولید پرتوی بسل ابتدا با استفاده از نرم افزار متلب تابع المان پراشی  $A(x, y)$  را به صورت حلقه‌هایی مطابق شکل (۱) با شعاع‌ها و ضخامت‌های مختلف طراحی می‌کنیم. ابعاد صفحه‌ی پراشی ۵/۰ میلی‌متر مربع و رزولوشن  $300 \times 300$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: حلقه‌ی طراحی شده با شعاع داخلی ۱۵۰ و شعاع خارجی ۲۰۰ میکرومتر.

در ادامه با حل عددی انتگرال پراش فرنل، توزیع شدت به دست آمده در صفحه‌ی تصویر به ازای حلقه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد صفحه‌ی تصویر ۳ میلی‌متر مربع و رزولوشن ماتریس توزیع شدت نیز  $300 \times 300$  می‌باشد. طول موج در نظر گرفته شده برای انجام محاسبات ۵۳۲ نانومتر است. به عنوان مثال نحوه‌ی توزیع شدت و تصویر نمایه‌ی عرضی پرتو حاصل از پراش المان حلقه در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از این المان در شکل (۲) نمایش داده شده است.

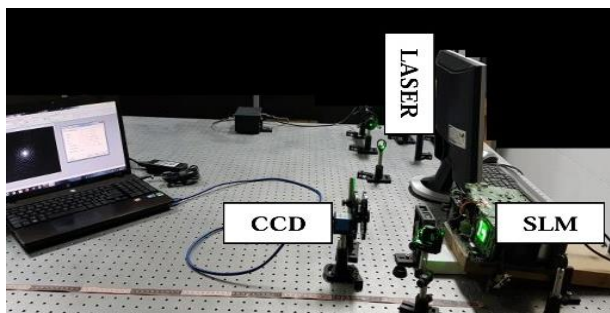


شکل ۲: توزیع شدت و طرح پراش حاصل از حل عددی انتگرال پراش با تابع پراشی حلقه در فاصله ۲۰ سانتی‌متری.

به منظور بررسی تأثیر ابعاد و ضخامت حلقه بر نمایه‌ی حاصل شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری به ازای حلقه‌های مختلف، محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در نمودارهای شکل ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

## چیدمان آزمایشگاهی و تولید پرتو شبه بسل

برای برپایی این چیدمان از یک لیزر هارمونیک دوم Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر استفاده شده است. نور لیزر پس از بازتاب از یک آینه تخت وارد مدولاتور فضایی دامنه‌ای می‌شود. در نهایت نور بازتاب شده از ریزآینه‌های موجود در مدولاتور یک نمایه شبه بسل را تشکیل می‌دهد. به منظور تصویر برداری از نمایه‌ی تولید شده از یک دوربین دیجیتال از نوع CCD با نام تجاری DMK 23U274 استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از آسیب CCD فیلتر کاهنده شدت در مقابل آن قرار داده ایم. در شکل (۳) چیدمان آزمایشگاهی تولید پرتو بسل نمایش داده شده است.



شکل ۳: چیدمان آزمایشگاهی تولید پرتو شبه بسل

در شکل (۴) نمونه‌ای از نمایه‌ی عرضی پرتو تولید شده در آزمایشگاه و نحوه‌ی توزیع شدت آن در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از مدولاتور قابل مشاهده است. تصاویر نمایه به ازای حلقه‌هایی با ابعاد و ضخامت‌های مختلف ثبت و سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب، شعاع لکه‌ی مرکزی هر تصویر اندازه‌گیری شده است. به این منظور با فراخوانی هر تصویر در نظر گرفتن اندازه‌ی مربوط به هر پیکسل دوربین، تعداد پیکسل‌های تشکیل دهنده‌ی لکه‌ی مرکزی شمارش

افزایش توان عبوری از حلقه قابل پیش‌بینی است. افزایش شعاع خارجی حلقه، با کاهش شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه همراه است. تفاوت مقادیر تجربی و شبیه‌سازی به دلیل عوامل مختلفی همچون تفاوت اندازه‌ی تصویر اعمالی در مدولاتور و المان موجود در شبیه‌سازی است. اگرچه نحوه‌ی تغییرات با هم تطابق دارند.

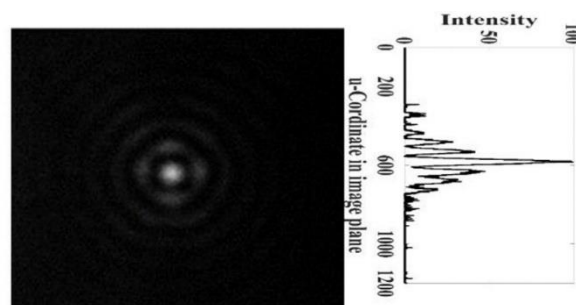
### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نحوه‌ی تولید پرتو شبه بسل با استفاده از المان پراشی حلقه فعال، به صورت نظری و تجربی بررسی شد. همچنین تأثیر ابعاد و ضخامت حلقه بر شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه مورد مطالعه قرار گرفت. به طور کلی تولید امواج بسل با استفاده از یک حلقه، پر بازده نیست زیرا بخش زیادی از توان پرتو ورودی، از حلقه عبور نمی‌کند. بنابراین برای کاربردهایی که نیازمند شدت بالا است، مناسب نیست. استفاده از المان حلقه فعال این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان پرتو شبه بسل با ویژگی‌های دلخواه را تولید کرد.

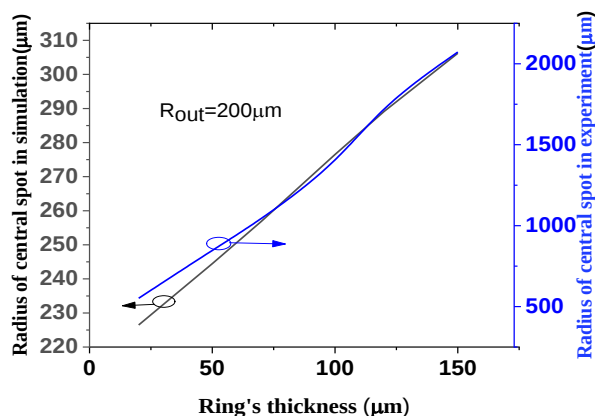
### مرجع‌ها

- [1] J. Durnin, J. Miceli Jr, and J. Eberly, "Diffraction-free beams," Physical review letters **58**, 1499 (1987)
- [2] J. Durnin, "Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory," JOSA A **4**, 651-654 (1987).
- [3] G. Scott, and N. McArdle, "Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon," Optical Engineering **31**, 2640-2644 (1992).
- [4] M. A. Mahmoud, M. Y. Shalaby, and D. Khalil, "Propagation of Bessel beams generated using finite-width Durnin ring," Applied optics **52**, 256-263 (2013)
- [5] D. McGloin, and K. Dholakia, "Bessel beams: diffraction in a new light," Contemporary Physics **46**, 15-28 (2005).
- [6] A. Vijayakumar, and S. Bhattacharya, Design and fabrication of diffractive optical elements with MATLAB (SPIE press, 2017).

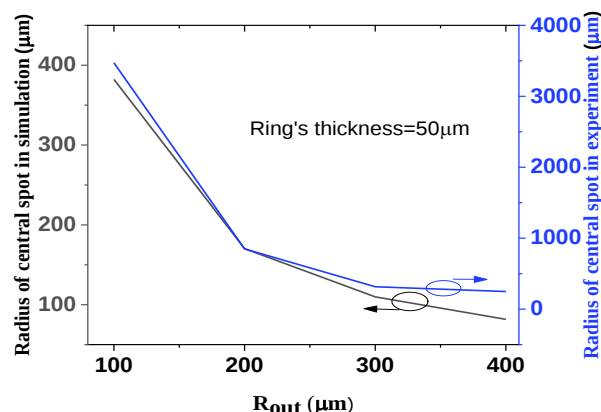
می‌شود. نتایج حاصل در منحنی‌های شکل ۵ و ۶ مشخص شده‌است.



شکل ۴: نمایه‌ی عرضی پرتو تولید شده در آزمایشگاه و نحوه‌ی توزیع شدت آن در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از مدولاتور.



شکل ۵: شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه‌های حاصل از المان‌های حلقه با شعاع خارجی ثابت ۲۰۰ میکرومتر و ضخامت‌های مختلف در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری از المان پراشی.



شکل ۶: شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه‌های حاصل از المان‌های حلقه با پهنای ثابت ۵۰ میکرومتر و شعاع خارجی مختلف. در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از المان پراشی.

نتایج نشان می‌دهد افزایش ضخامت حلقه سبب افزایش شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه می‌شود. این موضوع با توجه به