بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

بررسی تداخل گردابه‌های نوری با استفاده از تداخل سنج ماخ زندر

آرش ثباتیان[۱]، شراره جلالی[۲]

۱و۲ به ترتیب استاد و دانشجو کارشناسی ارشد گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

a.sabatyan@urmia.ac.ir, st_sh.jalali@urmia.ac.ir

چکیده – در این مقاله بر هم‌نهی پرتوهای گردابی نوری مورد برر سی قرار می‌گیرد، ا صول کار بر پایه ترکیب تیغه‌های منطقه‌ای فرنل مارپیچی اســـت. بر هم‌نهی پرتوهای گردابی نوری، حاصـــل از تیغه‌های منطقه‌ای فرنل مارپیچی، را در کانون مورد مطالعه قرار داده و نتیجه حاصل تولید تنوع بسیار زیادی از باریکه‌های گردابی نوری ا ست که دارای توزیع شدت مختلف اند که می‌توانند حامل بارهای توپولوژیکی صحیح یا غیر صحیح باشند. نتایج شبیه سازی شده در آزمایشگاه مورد راستی آزمایی قرار گرفت که مشخص شد نتایج شبیه سازی، با نتایج تجربی همخوانی بسیار نزدیکی دارد.

کلید واژه- بار توپولوژیکی، برهم‌نهی، پرتوهای گردابی نوری، تداخل، تیغه‌های منطقه‌ای فرنل مارپیچی.

Investigation of optical vortex interference using Mach Zander's interferometer

Arash Sabatyan[۱], Sharareh Jalali[۲]

The Physics Department, Faculty of Science, Urmia University

a.sabatyan@urmia.ac.ir, st_sh.jalali@urmia.ac.ir

Abstract- In this paper, The superposition of optical vortex beams will be examined. In order to produce, optical vortex beams, we used of Fresnel spiral regional plates and superposition of optical vortex beams, we used Fresnel spiral zone plates and studied the overlap of the optical vortex beams resulting from the spiral fresnel zonal plates inside the focus. The result is the production of huge variety of optical vortex beams with different intensities, that can carry integer and fractional topological charges.

Keywords: Fresnel spiral regional plates, Optical vortex beams, Superposition, Topological charge.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

مقدمه

باریکه‌های نوری (optical vortex)، پرتوهایی هستند که می‌توانند تکانه زاویه‌های مداری را با خود حمل کنند. این پرتوها به صورت پیچشی در فضا انتشار می‌یابند، از این رو اگر از این پیچش مقطعی (فرضی) بریده شود، آن گاه توزیع فازی آن سطح مقطع شبیه به یک گرداب خواهد بود، به همین دلیل این امواج یا پرتوها را با نام گردابه نوری می‌شناسند، بنابراین این توزیع فازی خواهد بود که به صورت گرداب است. در اصل باریکه‌های گردابی با تکینگی فازی و جابه جایی پیچشی فاز در جبهه موجشان به عنوان پرتو گردابی شناخته می‌شوند[۱]. این باریکه‌ها دارای اندازه حرکت زاویه‌ای مداری هستند و سطح موج این باریکه‌ها دارای فاز چرخشی با رابطه‌ی $\exp(ip\boldsymbol{\varphi})$ است، که در آن $\boldsymbol{\varphi}$ زاویه سمتی و p بار توپولوژیکی باریکه است. پرتوهای گردابی به دلیل داشتن این ویژگی منحصر بفرد مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند و کاربردهای بسیار وسیعی در مخابرات کوانتومی، تله اندازی اتم‌ها و پردازش تصویر دارند[۲]. کاربردهای گسترده، باعث مطالعه باریکه‌های گردابی نوری و اندازه‌گیری بار توپولوژیکی می‌گردد.

داده های شبیه سازی و تجربی

تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی یک عدسی پراشی است که در مقایسه با تیغه‌ی منطقه‌ی دایره‌ای از نواحی مارپیچی تشکیل شده است. بنابراین تابع عبور تیغه‌ی منطقه‌ای مارپیچی (SZP) به‌صورت زیر تعریف می شود[۳]:

$$\mathbf{T_{SZP1}(r,\theta)} = \sum_{\mathbf{n}} \mathbf{C_n}\left[\mathbf{exp}\left(\frac{\mathbf{-ikr^2}}{\mathbf{2f}} + \mathbf{ip_1\theta}\right)\right] \quad (1)$$

$$\mathbf{T_{SZP2}(r,\theta)} = \sum_{\mathbf{n}} \mathbf{C_n}\left[\mathbf{exp}\left(\frac{\mathbf{-ikr^2}}{\mathbf{2f}} + \mathbf{ip_2\theta}\right)\right] \quad (2)$$

که در آن $(\mathbf{r},\boldsymbol{\theta})$ مختصات قطبی در صفحه تیغه، f فاصله کانونی و p بار توپولوژیکی است.

پراش حاصل از تیغه‌ها را با استفاده ازقضیه همتافتگی و انتگرال فرنل کیرشهف بدست می‌آوریم[۳]:

$$\mathbf{U_i(r,\theta;z)} = \boldsymbol{\mathcal{F}}^{-1}\{\boldsymbol{\mathcal{F}}[\mathbf{T_i(r,\theta)}]\boldsymbol{\mathcal{F}}[\mathbf{h(r;z)}]\}, \quad \boldsymbol{i} = \mathbf{1,2} \quad (3)$$

که در آن $\mathbf{h(r;z)} = \exp(\frac{\mathbf{ikr^2}}{\mathbf{2z}})$ تابع پاسخ فضای آزاد و $\boldsymbol{\mathcal{F}}$ تبدیل فوریه است. پس شدت حاصل را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\mathbf{I} = |\mathbf{U_1} + \mathbf{U_2}| \quad (4)$$

مدل ریاضی ساده را برای برهم‌نهی دو پرتو گردابی با دامنه‌های یکسان را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

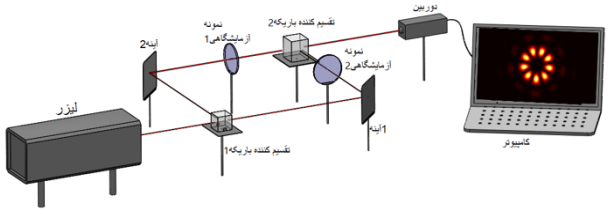
$$\boldsymbol{A_0 e^{iL_1\varphi} + A_0\, e^{iL_2\varphi} = 2A_0\, e^{i\frac{L_1+L_2}{2}\varphi}} \times \mathbf{cos}\left(\frac{\boldsymbol{L_1 - L_2}}{\mathbf{2}}\right) \quad (5)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

نتیجه کلی مدل نشان می‌دهد که حاصل بر هم‌نهی، پرتو گردابی است که، بار توپولوژیکی آن، میانگین بار توپولوژیکی دو پرتو اولیه و توزیع شدت آن تابع زاویه سمتی خواهد بود[۴].

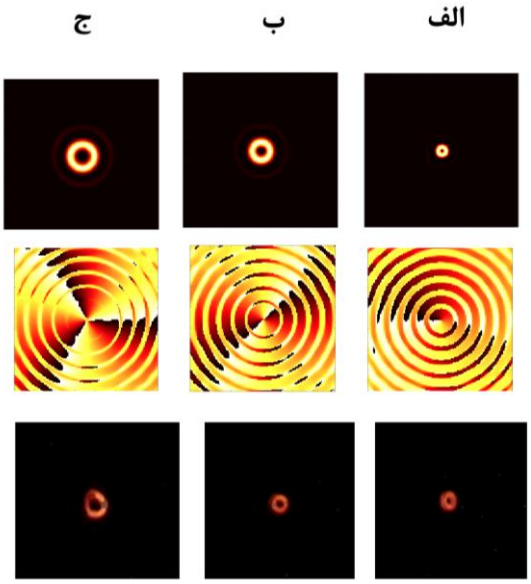
مثلا، اگر بار توپولوژیکی دو باریکه گردابی از لحاظ اندازه و علامت یکسان باشند، بار پرتو گردابی حاصل، پرتو گردابی با همان بار توپولوژیکی خواهد بود در غیر این‌صورت، اگر انداره بارها یکسان ولی علامت متفاوتی داشته باشند پرتو حاصل، پرتو گردابی نیست.

برای بررسی بر هم‌نهی باریکه‌های گردابی نوری، تعدادی تیغه فرنل مارپیچی با مقادیرمختلفی از بارهای توپولوژیکی که شامل صفر، مثبت و منفی در نظر گرفته شد و توزیع شدت توسط رابطه (۴) شبیه سازی شد. هم چنین تیغه های در نظر گرفته شده با روش فتولیتوگرافی تهیه و در آزمایشگاه تحت چیدمان تداخل سنج ماخ زندر مطابق شکل (۱) مورد راستی آزمایی قرار گرفت.



شکل۱:چیدمان آزمایشگاهی

درمطالعه اول دو پرتو گردابی با بار توپولوژیکی یکسان هم از نظر اندازه و هم از نظر علامت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و شکل (۲) نتایج حاصل از این مطالعه را نشان می‌دهد، که به ترتیب شکل الف ـ ج پرتوهای اولیه با بار توپولوژیکی ۱،۱، ۲،۲، ۳،۳، که پرتو حاصل یک پرتو گردابی با بار توپولوژیکی ۱، ۲، ۳، می‌باشد.



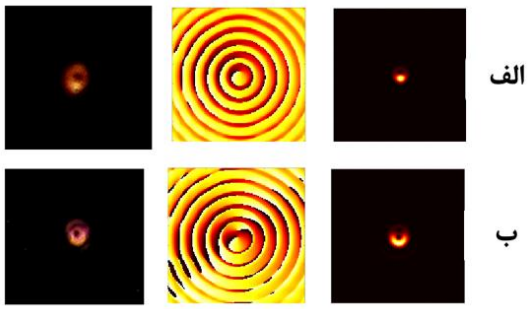
شکل۲: ردیف اول (شکل الف- ج)، توزیع شدت ناشی از برهم‌نهی دو پرتو گردابی نوری به ترتیب حامل بار توپولوژیکی ۱،۱، ۲،۲، ۳،۳..
ردیف دوم: توزیع فاز متناظر با این توزیع شدت.

ردیف سوم: نتایج تجربی منتاظر با نمونه‌های در نظر گرفته شده در شبیه سازی.

مطالعات بیشتر بر روی پرتوهای گردابی نوری با بارهای توپولوژیکی متفاوت صورت گرفت. و نشان داده شد که می‌توان تنوع بسیار زیادی از باریکه‌های نوری را تولید کرد. که شکل ۳ و ۴، نتایج حاصل از این مطالعات را نشان می-دهد.

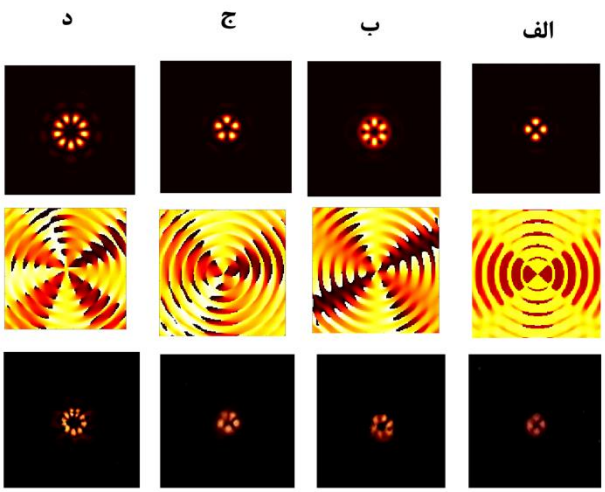
در شکل ۳ (الف ـ ب) ، توزیع شدت ناشی از بر هم‌نهی دو پرتو گردابی به ترتیب حامل بارهای توپولوژیکی ۱،۰، ۱،۲، را نشان می‌دهد که پرتو حاصل یک پرتو گردابی به ترتیب با بار توپولوژیکی غیر صحیح ۱/۲، ۳/۲، می‌باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]



شکل ۳: ستون اول: (شکل الف-ب) توزیع شدت ناشی از برهم‌نهی دو پرتو گردابی نوری، به ترتیب با بارهای توپولوژیکی ۰،۱، ۱،۲.
ستون دوم: توزیع فاز متناظر با این توزیع شدت.
ستون سوم: نتایج تجربی منتاظر با نمونه‌های در نظر گرفته شده در شبیه سازی.

شکل ۴، نمونه‌ای دیگری از بر هم‌نهی پرتوهای گردابی نوری را نشان می‌دهد، که بار توپولوژیکی پرتوها نسبت به هم علامت متفاوتی دارند در این صورت پرتوهای حاصل، به شکل پرتو گلبرگی مانند تشکیل می‌شود.



شکل۴: ردیف اول: (شکل الف-د) توزیع شدت ناشی از برهم‌نهی دو پرتو گردابی نوری، به ترتیب با بارهای توپولوژیکی ۲،۲- ، ۴-،۲ ، ۳،۲- .،۴،۵-
ردیف دوم: توزیع فاز متناظر با این توزیع شدت.
ردیف سوم: نتایج تجربی منتاظر با نمونه‌های در نظر گرفته شده در شبیه سازی.

نتیجه‌گیری

در این مقاله بر هم نهی پرتوهای گردابی نوری حامل طیف های متنوعی از بارهای توپولوژیکی در تداخل سنج ماخ زندر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. طراحی این عناصر با استفاده از محاسبات انجام شده در نرم افزار متلب انجام گرفت،. نتایج حاصل نشان داد که با استفاده از برهم نهی باریکه‌های گردابی نوری می‌توان تنوع بسیاری از پرتوهای گردابی حامل بارهای صحیح و کسری و همچنین باریکه‌های نوری در شکل‌های مختلفی همچون باریکه‌های گلبرگی و آرایه‌ی از نقاط کانونی را ایجاد کرد. نتایج شبیه سازی و تجربی نشان می‌دهد که حاصل بر هم‌نهی دو باریکه گردابی در تداخل سنج ماخ زندر، پرتو گردابی است که، بار توپولوژیکی آن، میانگین بار توپولوژیکی دو پرتو اولیه و توزیع شدت آن تابع زاویه ی سمتی خواهد بود نتایج تجربی و شبیه سازی با تقریبی خوبی با هم هماهنگ هستند.

مرجع‌ها

[۱] J.E Curtis, D.G Grier, Phys. Rev. Lett. ۹۰. ۱۳۳۹۰۱. ۲۰۰۳.

[۲] J.W Goodman. *Introduction to Fourier optics*. ۳rd edition. Roberts & Company. ۲۰۰.

[۳] A Sabatyan, & Z Behjat, The Annual Physics conference of Iran, Shiraz University. ۱۰٦٥. ۲۰۱٦.

[٤] S Tao, J. Lin, & X. Peng, Fractional optical vortex beam induced particles. Opt. Express, vol. ۱۳, pp. ۷۷۲٦-۷۷۳۱. ۲۰۰۵.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]