

## بررسی تاثیر ناهمسانگردی بر چرخش و نابودی پیچه‌های نوری حین انتشار فضای آزاد

بهمن پرمون، مهدی خدادادی کرهرودی، ابوالحسن مبشری و حسین ثقفی‌فر

پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان

چکیده - پیچه‌نوری غیرکانونیک از ترکیب دو پیچه‌نوری کانونیک با بار توپولوژیکی  $\pm 1$  ایجاد می‌شود. پیچه‌های غیرکانونیک ناهمسانگردی و جهت‌گیری معینی دارند. ناهمسانگردی دو پیچه نوری غیرکانونیک که در مجاور یکدیگر قرار دارند مسیر حرکت آنها در صفحه عرضی پرتو را تغییر می‌دهد. در این مقاله نتایج شبیه‌سازی و تجربی تاثیر ناهمسانگردی دو پیچه نوری بر مسیر حرکت یکدیگر ارائه شده است. برای این منظور ابتدا انتشار پیچه‌های نوری در فضای آزاد شبیه‌سازی شده و سپس به صورت تجربی انتشار آنها در فضای آزاد بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان می‌دهند، ناهمسانگردی دو پیچه نوری مجاور بر مسیر حرکت آنها تاثیر گذار است. در صورتی که اختلاف ناهمسانگردی کمتر از  $\pi/2$  باشد، دو پیچه نوری حین انتشار حول هم می‌چرخند. جهت چرخش دو پیچه نوری حول یکدیگر به ناهمسانگردی پیچه‌های نوری وابسته است. در صورتی که اختلاف ناهمسانگردی دو پیچه نوری مجاور بیشتر از  $\pi/2$  باشد، دو پیچه نوری حین انتشار نابود می‌شوند.

کلید واژه- پیچه نوری، ناهمسانگردی.

### **Evaluation of anisotropy effects on annihilation and gyration of optical vortices, propagating in free space**

Bahman Parmoon, Mahdi Khodadadi Karahroudi, Abolhasan Mobashery and Hossein Saghafifar

Abstract- Non-canonical optical vortex is a combination of two canonical optical vortices with the topological charges of  $\pm 1$ . Non-canonical optical vortices have a specific anisotropy and orientation. Anisotropy of two non-canonical optical vortices which adjacent to each other changes their path in the transverse plan of the beam. In this article, simulation and experimental results of the effect of anisotropy of two optical vortices on the trajectory of each other are provided. For this purpose at first, propagation of optical vortices in free space is simulated and then their propagation is experimentally investigated. Simulation and experimental results show that, anisotropy of two neighbor optical vortices effects on their trajectory. While anisotropy difference is less than  $\pi/2$ , two optical vortices rotate around each other during propagation. Direction of rotation of two optical vortices around each other depends on the optical vortices anisotropy. If anisotropy difference of optical vortices is more than  $\pi/2$ , two optical vortices will be annihilated.

Keywords: Anisotropy, Optical vortex.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت [www.opsi.ir](http://www.opsi.ir) قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پیچه نوری محلی در میدان نوری مختلط است که در آن دامنه به صفر میل می‌کند و فاز تعریف نشده است و به عنوان نابجایی پیشی در فاز جبهه‌موج شناخته می‌شود [۱]. پس از عبور باریکه نوری از تلاطم شدید جو، پیچه نوری در جبهه‌موج باریکه ایجاد می‌شود یا برای کاربردهای مختلف به صورت کنترل شده تولید می‌شود. باریکه حامل پیچه نوری به عنوان باریکه پس‌زمینه شناخته می‌شود. فاز پرتو چرخشی در راستای انتشار پرتو به اندازه  $2\pi l$  تغییر می‌کند که  $l$  نشان دهنده بار توپولوژیکی پرتو است. ویژگی چرخش فاز به صورت تجربی و شبیه‌سازی مشاهده شده است [۲]. در انبرک-های نوری، سیستم‌های مخابرات نوری در فضای آزاد و ارتباطات کوانتومی از پیچه‌های نوری با بارهای چرخشی فاز متفاوت استفاده می‌شود [۳ و ۴]. بیشتر پیچه‌های نوری ایجاد شده در باریکه پس‌زمینه ناهمسانگرد هستند. ناهمسانگردی بر جهت و میزان تغییرات فاز حول مرکز پیچه نوری تاثیر گذار است. دو پیچه نوری در مجاورت یکدیگر حین انتشار با توجه به میزان ناهمسانگردی روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند که بررسی این رفتار در کاربردهای ذکر شده دارای اهمیت است. در این مقاله ابتدا ناهمسانگردی و جهت‌گیری پیچه نوری معرفی شده است. سپس انتشار دو پیچه نوری با ناهمسانگردی‌های مختلف در فضای آزاد به صورت شبیه‌سازی و تجربی بررسی شده است.

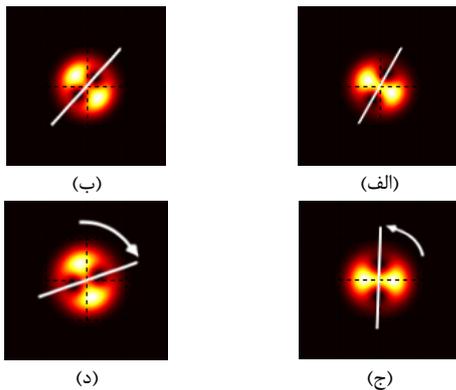
$$\eta = \begin{pmatrix} \cos(\psi/2) \exp(j\phi/2) \\ \sin(\psi/2) \exp(-j\phi/2) \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

$$v(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} x + jy \\ x - jy \end{pmatrix} \quad (3)$$

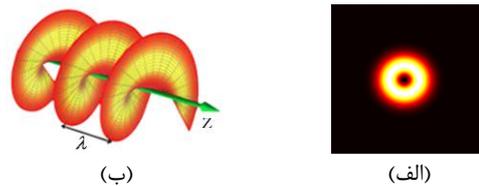
$\psi$  و  $\phi$  به ترتیب ناهمسانگردی و جهت‌گیری پیچه نوری هستند که محدوده تغییرات آنها به صورت  $0 < \psi < \pi$  و  $0 < \phi < 2\pi$  است. جهت چرخش پیچه نوری با افزایش ناهمسانگردی از مقدار  $\pi/2$  تغییر می‌کند و برعکس می‌شود. دو پیچه نوری با جهت چرخش متفاوت در مجاورت هم حالتی را ایجاد می‌کنند که به عنوان نابجایی لبه‌ای شناخته می‌شود. تاثیر جهت‌گیری بر پیچه‌های نوری ناچیز است به همین دلیل در این مقاله تاثیر ناهمسانگردی بر رفتار پیچه‌های نوری حین انتشار در فضای آزاد مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی عددی انتشار باریکه در فضای آزاد از تبدیل فوریه سریع (FFT) و تابع انتقال فرنل در نرم افزار متلب انجام استفاده شده است [۵]. طول موج باریکه پس‌زمینه گوسی  $\omega_0 = 1 \text{ mm}$  و کمر باریکه گوسی  $\lambda = 532 \text{ nm}$  شده است. بر مبنای تئوری نمونه‌گیری شان-ناکوئیست، بازه نمونه‌گیری  $\Delta x$  و  $\Delta y$ ، ۴ میکرومتر و فضای نمونه-گیری  $10.24 \times 10.24$  انتخاب شده است. فاصله دو پیچه نوری در تمام شبیه‌سازی‌ها، ۰.۵۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی انتشار باریکه گوسی حامل دو پیچه نوری با ناهمسانگردی‌های مختلف آورده شده است.



شکل ۳: چرخش دو پیچه نوری با ناهمسانگردی یکسان، الف)  $\psi = 0$  و ب)  $\psi = \pi$  در مبدأ، ج)  $\psi = 0$  و د)  $\psi = \pi$  پس از انتشار فاصله ۰/۷ متری. در شکل (۳-الف) دو پیچه نوری با ناهمسانگردی  $\psi = 0$  و در شکل (۳-ب) دو پیچه نوری با ناهمسانگردی  $\psi = \pi$  در مبدأ قرار دارند. پس از انتشار در مسافت ۷۰ سانتی‌متر



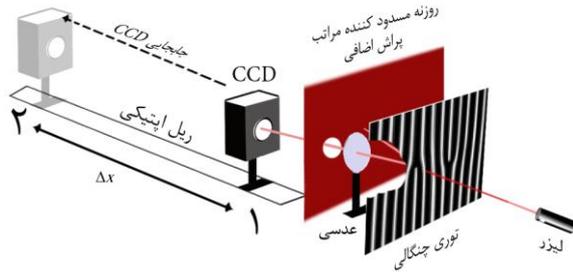
شکل ۱: الف) نمایه شدت، ب) ساختار پیشی جبهه‌موج [۱].

۲- ناهمسانگردی و جهت‌گیری پیچه نوری

ناهمسانگردی پیچه نوری سرعت افزایش فاز (با زاویه سمتی) در اطراف پیچه نوری را تعیین می‌کند. با افزایش ناهمسانگردی پیچه نوری ظاهری بیضوی پیدا می‌کند. راستای این بیضی جهت‌گیری پیچه نوری را تعیین می‌کند. پیچه نوری غیرکانونیک با مورفولوژی دلخواه حاصل از ترکیب دو پیچه نوری کانونیک با بارهای  $\pm 1$ ، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۷]:

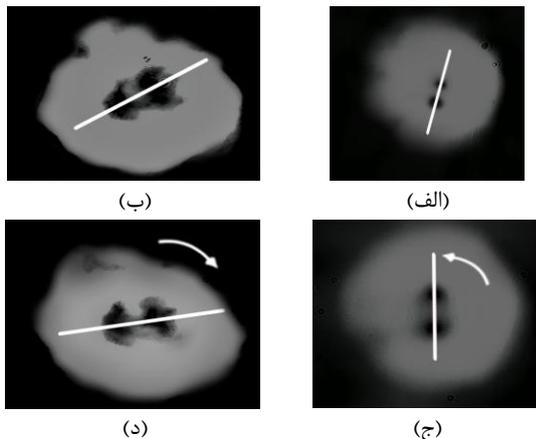
$$V(x, y) = \eta \cdot v(x, y) \quad (1)$$

از مراتب پراش استفاده شده است. مشاهدات به دست آمده از چیدمان آزمایش (بررسی همه حالت‌های شبیه‌سازی) به قرار زیر است.



شکل ۶: چیدمان آزمایشگاهی

در شکل (الف-۷) دو پیچه نوری با ناهمسانگردی  $\psi = 0$  و در شکل (ب-۷) دو پیچه نوری با ناهمسانگردی  $\psi = \pi$  در مبدأ قرار دارند. پس از انتشار در مسافت ۷۰ سانتی‌متر به ترتیب در جهت‌های ساعتگرد (شکل (ج-۷)) و پادساعتگرد (شکل (د-۷)) حول هم چرخیده‌اند. جهت گردش پیچه‌های نوری با توجه به تغییر ناهمسانگردی دو پیچه نوری تغییر کرده است که تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارند.

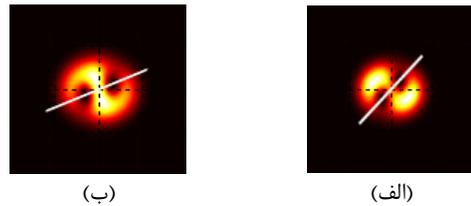


شکل ۷: چرخش دو پیچه نوری با ناهمسانگردی یکسان، الف)  $\psi = 0$  و ب)  $\psi = \pi$  در مبدأ، ج)  $\psi = 0$  و د)  $\psi = \pi$  پس از انتشار فاصله ۰/۷ متری.

همانطور در شکل ۸ قابل مشاهده است پیچه‌های نوری با ناهمسانگردی‌های  $\psi_1 = 9\pi/8$ ،  $\psi_2 = 9\pi/8$  پس از طی مسافت ۷۰ سانتی‌متر، ۳۹ درجه حول هم چرخیده‌اند. این اختلاف در مقدار چرخش با شبیه‌سازی به دلیل ایده‌آل بودن شرایط در شبیه‌سازی است. از ویژگی چرخش پیچه‌های نوری حول هم در انبرک‌های نوری برای جابجایی ذرات ریز استفاده می‌شود. نبود شدت در مرکز پیچه نوری آنها را برای استفاده در به دام اندازی با کمترین آسیب به سلول‌های زنده مورد توجه قرار داده است. از ویژگی چرخش پیچه‌های نوری حول هم در

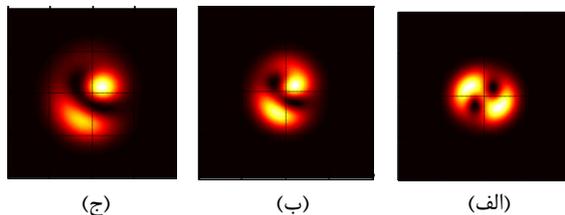
به ترتیب در جهت‌های ساعتگرد (شکل (ج-۳)) و پادساعتگرد (شکل (د-۳)) حول هم چرخیده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود جهت گردش پیچه‌های نوری برای ناهمسانگردی‌های مختلف، متفاوت است.

در شکل (۴) قابل مشاهده است دو پیچه نوری با ناهمسانگردی‌های  $\psi_1 = 9\pi/8$ ،  $\psi_2 = 9\pi/8$  پس از انتشار در مسافت ۷۰ سانتی‌متر، ۳۲ درجه حول هم چرخیده‌اند.



شکل ۴: چرخش دو پیچه نوری با ناهمسانگردی یکسان  $\psi = 9\pi/8$  حول هم، الف) مبدأ، ب) در فاصله ۰/۷ متری.

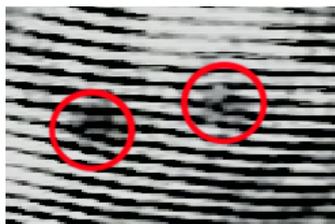
در شکل (۵) قابل مشاهده است دو پیچه نوری با ناهمسانگردی‌های  $\psi_1 = 0.1\pi$ ،  $\psi_2 = 0.9\pi$  پس از انتشار در مسافت ۰/۷ متر به هم نزدیک شده و پس از ۱/۵ متر به حالت نابجایی لبه‌ای تغییر حالت داده‌اند. این حالت بسیار ناپایدار است و با انتشار از بین می‌رود. پیچه‌های نوری در این حالت به دلیل داشتن جهت چرخش متفاوت حین انتشار نابود می‌شوند.



شکل ۵: نابودی دو پیچه نوری، الف) دو پیچه نوری با  $\psi_1 = 0.1\pi$ ،  $\psi_2 = 0.9\pi$  در مبدأ، ب) در فاصله ۰/۷ متری، ج) در فاصله ۱/۵ متری.

#### ۴- نتایج تجربی

برای تولید پیچه نوری از توری‌های تولید شده توسط تمام نگاری رایانه‌ای (CGH) [۵] استفاده شده است. توری‌های ایجاد شده برای پیچه‌های نوری مختلف با ناهمسانگردی مختلف دارای طرح چنگالی متفاوتی هستند [۶]. فاصله دو طرح چنگالی در توری پراش در تمام چیدمان‌ها، ۰.۵۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود صفحه مشاهده بر روی ریل حرکت داده شده است تا حالت پیچه‌های نوری در مسافت‌های مختلف مشاهده شود. در این چینش از عدسی برای ایجاد میدان دور و از روزنه برای انتخاب یکی



شکل ۱۰: تداخل دو پیچه نوری  $\psi_1 = 5\pi/8$  با باریکه گوسی  $\psi_2 = 5\pi/8$



شکل ۱۱: تداخل دو پیچه نوری  $\psi_1 = 0$  با باریکه گوسی  $\psi_2 = 0$

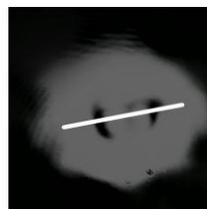
### نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر ناهمسانگردی و جهت‌گیری پیچه‌های نوری بر مسیر انتشارش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان می‌دهد دو پیچه نوری در باریکه پس‌زمینه گوسی با اختلاف ناهمسانگردی کمتر از  $\pi/2$ ، حول هم می‌چرخند سرعت و جهت چرخش پیچه‌های نوری وابسته به ناهمسانگردی آنهاست. در صورتی که اختلاف ناهمسانگردی پیچه‌های نوری بیشتر از  $\pi/2$  باشد پیچه‌های نوری جهت چرخش فاز متفاوت دارند و حین انتشار نابود می‌شوند.

### مراجع

- [1] F. S. Roux, "Paraxial modal analysis technique for optical vortex trajectories", J. Opt. Soc. Am Vol. 20, No. 7, pp. 1575-1580, 2003.
- [2] یگانه، محمد، رسولی، سیف‌اله، آخته، مصطفی و عبدالله پور، داریوش، "تولید و اندازه‌گیری همزمان بار توپولوژیکی مدهای لاگر-گوسی چندگانه با استفاده از توریهای خطی چنگالی شکل و انحرافسنجی مارهای"، بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه صنعتی شیراز، ۵۷-۶۰، ۱۳۹۲.
- [3] K. T. Gahagan and G. A. Swartzlander, "Optical vortex trapping of particles", Opt. Lett. 21, pp. 827-829, 1996.
- [4] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pasko, S. M. Barnett, S. Franke-Arnold, "Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum", Opt. Express 12, pp. 5448-5456, 2004.
- [5] D. G. Voelz, *Computational fourier optics: a MATLAB tutorial*, p. 63-85, SPIE Press, 2011.
- [6] خدادادی کرهرودی، مهدی، پرمون، بهمن، مبشری، ابوالحسن، تقفی‌فر، حسین، "شبیه‌سازی و تولید پیچه نوری‌های نوری با روش تمام‌نگاری رایانه‌ای"، کنفرانس فیزیک، مشهد، ۱۳۹۴.
- [7] I. Freund, "Optical vortices in Gaussian random wave fields: statistical probability densities", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 11, pp. 1644-1652, 1994.
- [8] M. Chen and F. S. Roux, "Accelerating the annihilation of an optical vortex dipole in a Gaussian beam"; OSA vol. 25, No. 6, pp. 1279-1286, 2008.

انبرک‌های نوری برای جابجایی ذرات ریز استفاده می‌شود. نبود شدت در مرکز پیچه نوری آنها را برای استفاده در به دام اندازی با کمترین آسیب به سلول‌های زنده مورد توجه قرار داده است.



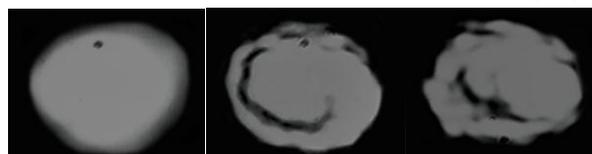
(ب)



(الف)

شکل ۸: چرخش دو پیچه نوری، الف) دو پیچه نوری با  $\psi = 9\pi/8$  در مبدأ، ب) در فاصله ۰/۷ متری.

در شکل (۹) دو پیچه نوری با ناهمسانگردی-های  $\psi_2 = 0.9\pi$ ،  $\psi_1 = 0.1\pi$  پس از انتشار در مسافت ۲/۵ متر نابود شده‌اند.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۹: نابودی دو پیچه نوری، الف) دو پیچه نوری با  $\psi_2 = 0.9\pi$ ،  $\psi_1 = 0.1\pi$  در فاصله ۰/۷ متری، الف) در فاصله ۱/۵ متری، الف) در فاصله ۲/۵ متری.

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود در این حالت ناهمسانگردی به دلیل جهت چرخش متفاوت پیچه‌های نوری، تغییر وضعیت سریع پیچه‌های نوری به حالت نابجایی لبه‌ای اتفاق می‌افتد. همچنین در این حالت مشاهده شد. پس از انتشار، پیچه‌های نوری نابود می‌شوند. پیچه‌های نوری در این حالت به کوچکترین تغییرات که می‌تواند با عبور از المان‌های اپتیکی ایجاد شود به حالت نابجایی لبه‌ای و سپس نابودی تغییر حالت می‌دهند. با سرعت بخشیدن به نابودی پیچه‌های نوری از این ویژگی استفاده می‌شود تا چگالی پیچه‌های نوری در باریکه نوری عبوری از جو را کاهش دهند که برای بهبود عملکرد سیستم اپتیک تطبیقی مورد نیاز است [۷]. با استفاده از چینش تداخل سنج ماخ-زندر طرح تداخل باریکه گوسی حامل دو پیچه نوری همسانگرد و ناهمسانگرد در ادامه آورده شده است. همانطور که از شکل‌های (۱۰ و (۱۱) مشخص است طرح چنگال ایجاد شده با افزایش ناهمسانگردی یک ناپیوستگی در محل چنگال دارد که اثباتی بر ناهمسانگردی پیچه‌های نوری تولید شده است.