



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## محاسبه نیروی وارد بر نمونه‌ی پلیمری به وسیله تابش باریکه‌ی قطبیده با قطبش متغیر در فضا به روش محاسباتی

محمد یوسف الوندی<sup>۱</sup>، ابراهیم کریمی<sup>۱-۲</sup> و حمید رضا خالصی فرد<sup>۱</sup>

۱-دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

۲-دانشکده فیزیک، دانشگاه اوتاوا، اوتاوا، کانادا

[Yuseph.alvandi@iasbs.ac.ir](mailto:Yuseph.alvandi@iasbs.ac.ir), [Ebi.karimi@gmail.com](mailto:Ebi.karimi@gmail.com), [khalesi@iasbs.ac.ir](mailto:khalesi@iasbs.ac.ir)

چکیده - در این مقاله ما به بررسی نیروهای وارد شده بر نمونه‌ای از پلیمر PAAD-22 توسط باریکه‌های قطبیده با قطبش متغیر در فضا یا باریکه‌های برداری به روش شبیه‌سازی کامپیوتری می‌پردازیم. به این منظور از نرم افزار MATHEMATICA استفاده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، برای نیروهای وارد شده به پلیمر و مقایسه آن با قطبش نور فرودی به دو نتیجه می‌رسیم؛ اول آن که در نیروی وارده به سطح پلیمر یک منطقه به اصطلاح گردابی وجود دارد که هم الگو با تکینگی در باریکه‌ی فرودی است و دوم این که به ازای هر مد، نیروی وارد شده به فیلم پلیمری با قطبش باریکه‌ی فرودی هم راستا است.

کلید واژه- باریکه‌های برداری، باریکه‌های گردابی، پلیمر PAAD-22.

## Calculating the force exerted on a Polymer Sample by a Space-varying Polarized Beam Using Simulation

Mohammad Yousef Alvandi<sup>1</sup>, Ebrahim Karimi<sup>1-2</sup>, and Hamid Reza Khalesifard<sup>1</sup>

1-Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

2-Department of Physics, University of Ottawa, Ottawa, Canada.

**Abstract-** In this paper, we have calculated the force exerted on a polymer PAAD-22 sample by a Space-varying polarized beam or known as a vector beam, based on simulation. To do this we have used the MATHEMATICA. A Space-varying polarized beam is produced by superposition of two different modes of vortex beams. Comparing the graphs of forces exerted on the polymer sample and the graphs showing their polarization directions, we come to two different results; first, there is a singularity in the force exerted on the polymer. The singularity is correspondent to the vortex area located on the beam. Second, for every mode of the vector beams, the forces exerted are approximately in the direction of polarization of the impinging beam.

Keywords: PAAD-22, Vector beams, Vortex beams.



بپردازیم. با فرض این که معادله میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی به شکل زیر باشد:

$$\vec{E} = A_{l,p}(r) \frac{(\hat{x} + i\sigma\hat{y})}{\sqrt{1+\sigma^2}} e^{i[kz - \omega t + l\varphi]} \quad (1)$$

که در آن  $\hat{x}$  و  $\hat{y}$  نشان دهنده بردارهای عمود بر راستای انتشار،  $z$  فاصله در راستای انتشار،  $\sigma$  عددی صحیح و حقیقی است که نشان دهنده نوع قطبش باریکه است به نحوی که مقدار ۰، یک و منفی یک برای آن نشان دهنده به ترتیب قطبش خطی در راستای  $\hat{x}$ ، قطبش‌های دایره‌ای چپگرد و راستگرد است،  $A_{l,p}(r)$  شناسه‌ی عرضی میدان الکتریکی که وابستگی به فاصله‌ی عرضی  $r$  از محور انتشار دارد،  $k$  عدد موج تکفام،  $\omega$  فرکانس زمانی موج،  $\varphi$  نشان دهنده زاویه‌ی سمتی که در صفحه عمود بر راستای انتشار قرار گرفته است واقع شده است،  $l$  عددی صحیح است که به آن بار توپولوژیکی باریکه گفته می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه‌ی  $\Delta\varphi = 2\pi = l\varphi$  می‌توان نتیجه گرفت که با طی زاویه‌ی سمتی  $\varphi = \frac{2\pi}{l}$  در صفحه‌ی عمود بر راستای انتشار یک بار فاز از صفر تا  $\pi$  تغییر می‌کند. بنابراین  $l$  نشان دهنده‌ی تعداد دفعاتی است که باریکه در صفحه‌ی عمود بر راستای انتشار، فاز از صفر تا  $\pi$  را می‌پذیرد. این ویژگی امواج گردابی موجب وجود جبهه‌ی موج مارپیچی می‌شود. با توجه به این که فاز در مرکز جبهه‌ی موج روی محور انتشار تعریف نشده است، یک تکینگی در مرکز این نوع امواج داریم، و در نهایت  $p$  شناسه‌ی شعاعی میدان است که نشان دهنده‌ی تعداد دفعات تغییرات فاز با شناسه‌ی  $l$  در راستای شعاعی است. در شکل‌های (۱) و (۲)، به ترتیب تغییرات فاز در صفحه‌ی عمود بر راستای

## مقدمه

فشار تابشی نور یکی از اثرات مهم برهم‌کنش نور و ماده است. این اثر می‌تواند در سطح ماده‌ای که در معرض تابش باریکه‌ی نوری قرار می‌گیرد تغییر شکل ایجاد کند. یکی از مدهای نوری که برهم‌کنش آن با ماده جالب توجه است باریکه‌های دارای تکینگی هستند. در سال‌های اخیر، این اثر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۶، بارادا و همکاران [۱] به طور نظری به بررسی اثر تغییر شکل سطح فیلم Azo-polymer در برابر تابش باریکه‌ی گردابی پیوسته با بار توپولوژیکی و قطبش دلخواه پرداختند. در سال ۲۰۱۳، نرسیسیان و همکاران [۲] با استفاده از مواد هم‌خط ساز نوری<sup>۱</sup> با حساسیت نوری بالا، روش‌های موجود برای کورنوگرافی یا تفکیک اجسام آسمانی رصد شده به وسیله تیغه موج‌های گردابی را تا حد قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیدند. بیان و همکاران بر روی تغییر شکل فیلم‌های آزوبنزن که توسط لیزر گاوسی القا شده بود کار کردند و به طور تجربی از نتیجه تغییر شکل فیلم‌ها عکس برداری کردند [۳ و ۴].

در این اثر، ما به محاسبه‌ی نیروی وارد بر سطح نمونه‌ی پلیمری توسط باریکه‌هایی با قطبش متغیر در فضا می‌پردازیم. این دسته خاص از باریکه‌ها که با نام باریکه‌های نوری برداری نیز شناخته می‌شوند، نتیجه برهم‌نهی دو باریکه لاگر-گاوسی با بارهای توپولوژیکی و قطبش‌های متفاوت هستند.

## بنیان نظری

ابتدا به معرفی باریکه‌های با قطبش متغیر در فضا می‌پردازیم. اما پیش از آن باید به معرفی امواج گردابی

<sup>۱</sup> Photoalignment materials

که در رابطه فوق  $\rho_p$ ،  $\vec{j}_p$  و  $\vec{B}$  به ترتیب بار الکتریکی قطبشی، جریان قطبشی و چگالی شار مغناطیسی هستند و نماد  $\langle \rangle$  نشان دهنده‌ی متوسط گیری زمانی است. برای موجی گردابی با بار توپولوژیکی  $l$ ، نمایه‌ی شعاعی  $p$  برابر صفر، نمایه‌ی قطبش  $\sigma$  و در نظر گرفتن تقریب پیرامحوری  $\partial A_l^2 / \partial z^2 \approx 0$  و با مقداری محاسبات ریاضی نیروی وارد بر ذرات قطبیده فیلم پلیمری با استفاده از رابطه (۳) به صورت زیر خواهد بود [۱]:

(۴)

$$\vec{F}(r, \varphi, z, t) = \frac{\varepsilon_0 \chi_r}{4} \left[ \frac{\sqrt{1-\sigma^2}}{2} \frac{\partial A_l^2}{\partial r} (-\cos \varphi \hat{e}_x + \sin \varphi \hat{e}_y) + \left( \frac{1}{2} \frac{\partial A_l^2}{\partial r} - l \sigma \frac{A_l^2}{r} \right) \hat{e}_r \right] + \frac{\varepsilon_0 \chi_i}{4} \left[ l \sqrt{1-\sigma^2} \frac{A_l^2}{r} (\sin \varphi \hat{e}_x + \cos \varphi \hat{e}_y) + \left( l \sigma \frac{A_l^2}{r} - \frac{\sigma}{2} \frac{\partial A_l^2}{\partial r} \right) \hat{e}_\varphi + 2k A_l^2 \hat{e}_z \right]$$

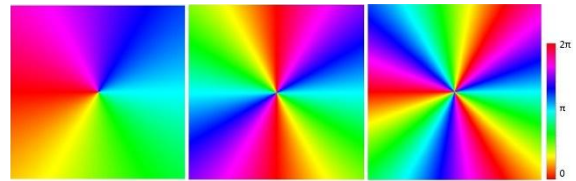
که در آن  $\hat{e}_\varphi, \hat{e}_r, \hat{e}_z, \hat{e}_y, \hat{e}_x$  بردارهای یکه در راستاهای به ترتیب  $x, y, z$ ، راستای شعاعی و راستای زاویه سمتی هستند.

### شبیه‌سازی و روش انجام پژوهش

در این کار، ما به بررسی نیروی وارد بر نمونه‌ی پلیمری که در معادله (۴) به دست آمد برای باریکه‌ای با قطبش فضایی متغیر می‌پردازیم. ما از نرم افزار MATHEMATICA استفاده کردیم و به عنوان مشخصات نورشناختی ماده‌ی پلیمری، مشخصات پلیمر PAAD-22 را وارد کرده که بخش حقیقی ضریب شکست  $(n)$  و بخش موهومی ضریب شکست  $(k)$  آن برای طول موج ۴۰۵ نانومتر به ترتیب ۱٫۶ و ۰٫۲۵ و برای طول موج ۶۳۳ نانومتر به ترتیب ۱٫۶۵ و ۰٫۱۷ است. در مدهای لاگر-گاوسی، مشخصه‌ی عرضی به صورت [۵]:

$$A_{l,p} = \sqrt{\frac{2^{|l|+1} l!}{\pi(l+|p|)!}} \left( \frac{i}{i+\zeta} \right)^p \left( \frac{i-\zeta}{i+\zeta} \right)^l \rho^{|p|} e^{\frac{i\rho^2}{i+\zeta}} L_l^p \left( \frac{2\rho^2}{1+\zeta^2} \right), \quad (5)$$

موج گردابی و تغییر شکل جبهه‌ی موج در راستای انتشار نمایش داده شده است.

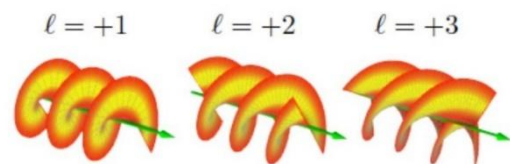


شکل ۱: تغییرات فاز در صفحه‌ای عمود بر راستای انتشار باریکه‌ی گردابی از چپ به راست برای بار توپولوژیکی ۱، ۲، و ۳.

با فرض برهم‌نهی دو موج گردابی مانند معادله شماره (۱) با قطبش‌ها و بارهای توپولوژیکی متفاوت و با ضرایب وزنی مختلف  $\alpha$  و  $\beta$  به شکل زیر:

$$\vec{E}(r, \varphi, z, t) = \alpha E_o \left( \frac{\hat{x} + i\sigma_1 \hat{y}}{\sqrt{2}} \right) e^{i[kz - \omega t + l_1 \varphi]} + \beta E_o \left( \frac{\hat{x} + i\sigma_2 \hat{y}}{\sqrt{2}} \right) e^{i[kz - \omega t + l_2 \varphi]}. \quad (2)$$

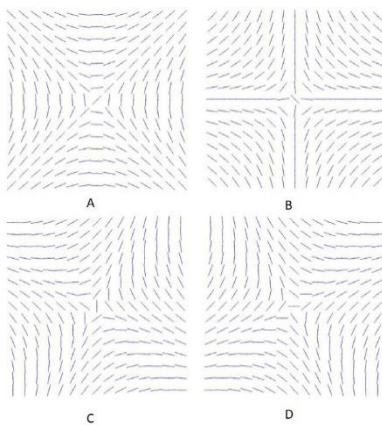
با انتخاب مقادیر مختلف برای  $l_1, l_2, \sigma_1, \sigma_2, \alpha$  و  $\beta$  به مدهای مختلف باریکه‌های نوری می‌رسیم که قطبش آن‌ها در نقاط مختلف فضا متفاوت است.



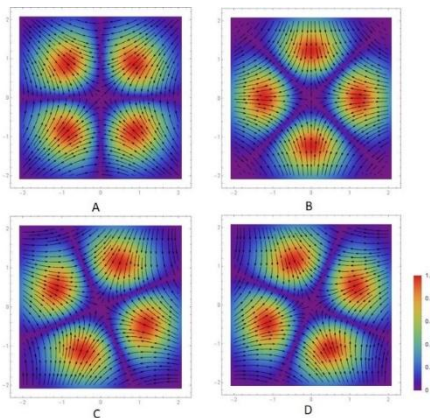
شکل ۲: شکل جبهه‌ی موج برای امواج گردابی از چپ به راست برای بار توپولوژیکی ۱، ۲ و ۳. [۵]

با فرض این که ماده‌ای که باریکه به آن فرود می‌آید دارای پذیرفتاری الکتریکی  $\chi = \chi_r + i\chi_i$  باشد که در آن  $\chi_r$  و  $\chi_i$  به ترتیب نمایشگر ویژگی‌های انتشاری و اتلافی محیط باشند، نیروی تابشی متوسط وارد بر ذرات محیط با استفاده از نیروی لورنتس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{F} = \langle \rho_p \vec{E} + \vec{j}_p \times \vec{B} \rangle \quad (3)$$



شکل ۳: خطوط میدان الکتریکی برای باریکه‌های با قطبش متغیر در فضا که در این اثر از آن‌ها استفاده شده است.



شکل ۴: نمودارهای نیروی وارد بر فیلم پلیمری. نمودارهای پیکانی نشان دهنده‌ی جهت نیرو و رنگ‌ها مقیاسی از شدت آن هستند.

## مرجع‌ها

- [1] Barada, D., Juman, G., Yoshida, I., Miyamoto, K., Kawata, S., Ohno, S., & Omatsu, T. (2016). "Constructive spin-orbital angular momentum coupling can twist materials to create spiral structures in optical vortex illumination", *Applied Physics Letters*, 108(5), 051108, 2016.
- [2] Nersisyan, Sarik R., et al. "Improving vector vortex waveplates for high-contrast coronagraphy", *Optics express*, 21.7 (2013): 8205-8213, 2013.
- [3] Bian, S., et al. "Single laser beam-induced surface deformation on azobenzene polymer films", *Applied Physics Letters*, 73.13 (1998): 1817-1819, 1998.
- [4] Bian, Shaoping, et al. "Photoinduced surface deformations on azobenzene polymer films", *Journal of Applied Physics* 86.8 (1999): 4498-4508, 1999.
- [5] Karimi, Ebrahim. "PhD Thesis", Diss, Universite degli Napoli Federica, 2009.

## نتیجه‌گیری

معادله (۵) در مختصات بی بعد نوشته شده است که در آن  $\zeta = z / z_0$  که  $z_0$  طول ریلی است،  $\rho = r / W_0$  که  $W_0$  پهنای کمره‌ی باریکه است و  $L_i^p$  چند جمله‌ای لژاندر تعمیم یافته است.

مدهایی که ما با آن‌ها کار کرده‌ایم برآیندهای مختلف دو مد لاگر-گوسی هستند؛

$$A_- LG_{0,+1} \hat{e}_L + LG_{0,-1} \hat{e}_R, B_- LG_{0,+1} \hat{e}_L + e^{i\pi} LG_{0,-1} \hat{e}_R,$$

$$C_- LG_{0,+1} \hat{e}_L + e^{i\pi/2} LG_{0,-1} \hat{e}_R, D_- LG_{0,+1} \hat{e}_L + e^{-i\pi/2} LG_{0,-1} \hat{e}_R,$$

در معادلات بالا  $\hat{e}_L$  و  $\hat{e}_R$  به ترتیب بردارهای یکه در راستای قطبش دایره‌ای راستگرد و چپگرد هستند.

با استفاده از معادله (۵) و جانمایی آن در معادله مربوط به میدان الکتریکی، با استفاده از نرم‌افزار MATHEMATICA اولاً به ترسیم خطوط میدان الکتریکی یا جهت قطبش باریکه‌هایی که از آن‌ها استفاده کرده‌ایم پرداختیم و سپس نمودار نیروهای وارد بر سطح مقطع نمونه‌ی پلیمری به ازای مدهای مذکور را به دست آوردیم که به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند.

از مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی می‌توان استنباط کرد که در خطوط میدان نیروی وارد شده بر فیلم پلیمری یک تکنیکی وجود دارد که منطبق با تکنیکی موجود در باریکه‌ی برداری فرودی است. علاوه بر آن، خطوط نیروی وارد شده به ماده پلیمری و خطوط میدان الکتریکی هم‌راستا هستند. به عنوان پژوهش آینده می‌توان این کار را به صورت تجربی انجام داد و با تولید باریکه‌های برداری در آزمایشگاه و تابش آن بر نمونه‌ی پلیمری، با استفاده از میکروسکوپی به بررسی اثر فشار تابشی بر آن پرداخت.