

ایجاد آرایه‌هایی دلخواه از پرتوهای گردابه کامل

زهرا بهجت و آرش ثباتیان

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه

پست الکترونیکی: a.sabatyan@urmia.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۶/۱۲)

چکیده

در این مقاله عنصر پراشی نوینی را برای تولید آرایه مطلوبی از باریکه‌های گردابی و گردابی کامل معرفی می‌کنیم. اصول کار برپایه ترکیب تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی انتقال یافته فازی شعاعی با توری‌های پراشی مختلف است. نشان می‌دهیم که این عنصر دارای پتانسیل زیادی برای ایجاد آرایه‌های گوناگونی از گردابه‌های نوری با شعاع و بار توپولوژیکی دلخواه است. نه تنها گردابه‌ها را می‌توان در آرایه شبکه‌ای چید بلکه در شبکه‌های دوران یافته یا آرایه‌های دایره‌ای نیز می‌توان آنها را قرار داد. آرایه‌های گزارش شده به صورت گروهی از گردابه‌ها دارای بار توپولوژیکی یکسان هستند به طوری که بار توپولوژیکی کل آرایه MP است که M تعداد گردابه‌ها و P بار توپولوژیکی است. نتایج آزمایشگاهی در توافق خوبی با پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی شده هستند.

واژه‌های کلیدی: پراش، تیغه منطقه‌ای فرنل، پرتو گردابی، پرتو گردابی کامل

۱. مقدمه

باریکه‌ای شامل مؤلفه‌ای در جهت انتشار باریکه و مؤلفه‌ای از زاویه سمتی به شکل $\exp(i\phi)$ است که در آن p بار توپولوژیکی و ϕ زاویه سمتی است. تکانه زاویه‌ای مداری می‌تواند باعث انتقال گشتاور مکانیکی به ذرات و چرخش آنها شود [۴ و ۵]. پرتوهای گردابی به دلیل داشتن این ویژگی منحصر بفرد مورد توجه ویژه محققان قرار گرفته‌اند و کاربردهای بسیار وسیعی در تله اندازی اپتیکی، مخابرات نوری، اطلاعات کوانتومی و میکروسکوپ‌های نوری یافته‌اند [۶-۹]. حتی انتشار و رفتار آنها در پراش از روزه‌های ساختار یافته نیز به زیبایی بررسی شده است [۱۰]. از آنجایی که گردابه‌های با

باریکه‌های نوری با تکنیکی فازی و جابه‌جایی پیچشی فاز در جبهه موجشان به عنوان پرتو گردابی شناخته می‌شوند [۱]. فاز یک پرتو گردابی حول محور اپتیکی می‌چرخد که این چرخش باعث می‌شود جبهه موج نور در حین انتشار به حالت مارپیچی تاب بخورد. تعداد تاب خوردگی‌هایی که نور در طول فاصله انتشاری به اندازه یک طول موج تجربه می‌کند، با عدد صحیحی به نام بار توپولوژیکی تعیین می‌شود. این عدد ممکن است مثبت و یا منفی باشد که علامت آن تعیین کننده جهت پیچش پادساعتگرد یا ساعتگرد است [۲ و ۳]. تکانه نوری چنین

بارهای توپولوژیکی متفاوت بر هم عمودند آنها قادر به خلق یک فضای ارتباطی OAM^1 چندگانه هستند که با افزایش ظرفیت تبادل اطلاعات در حوزه‌های ارتباطات اپتیکی در فضای آزاد و فیبرها تحولی عظیم در صنعت ارتباطات اپتیکی رخ می‌دهد. ولی وابستگی شدید شعاع حلقه شدتی گردابه‌ها به بار توپولوژیکی باعث بروز مشکلاتی به هنگام تزویج باریکه‌هایی با تکانه زاویه‌ای متفاوت به فیبر نوری با شعاع ثابت می‌شود [۱۱]. برای غلبه بر این محدودیت، مفهوم پرتو گردابی کامل که در آن شعاع حلقه شدتی باریکه گردابی مستقل از بار توپولوژیکی است، در سال ۲۰۱۳ ارائه شد [۱۲]. روش‌هایی برای تولید چنین باریکه‌هایی بیان شده‌اند که به عنوان مثال می‌توان به تبدیل فوریه از باریکه بسل - گوسی اشاره کرد [۱۳]. اخیراً یک قطعه پراشی جدید به نام تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی نیز برای تولید پرتوهای گردابی کامل ارائه شده است [۱۴].

یکی از موضوعات مورد توجه در حوزه اپتیک، ارائه روش‌هایی برای تولید آرایه‌ای از پرتوهای اپتیکی مختلف و مطالعه نحوه پراش آنها از این روزه‌های ساختارمند است. آرایه‌های اپتیکی کاربردهای وسیعی در شاخه‌های مختلف علوم همانند تولید آرایه‌ای از تصاویر، سیستم‌های ذخیره‌سازی، تله اندازی اپتیکی چندگانه یا ارتباطات اپتیکی با کانال‌های متعدد دارند. تاکنون روش‌های متعددی برای تولید آرایه‌های اپتیکی مانند استفاده از مدولاتورنوری - فضایی [۱۵]، استفاده از هولوگرام‌های کامپیوتری [۱۶]، استفاده از روش تداخل سنجی [۱۷]، استفاده از ساختارهای پریودیک دوبعدی عمود بر هم [۱۷ و ۱۸] ارائه شده‌اند اما تمامی روش‌های بیان شده عمدتاً بر مبنای ایجاد آرایه‌های شبکه‌ای عمود بر هم هستند که انعطاف لازم برای تولید آرایه‌های مختلفی با اشکال هندسی مختلف از باریکه‌های نوری ندارند. لذا ما در این کار پژوهشی به دنبال ایجاد آرایه‌هایی منعطف و قابل کنترل با هندسه‌های مختلف مانند آرایه‌های دایره‌ای، لوزی شکل و مربعی هستیم. اخیراً روشی برای دستیابی به آرایه‌های شبکه‌ای از نقاط کانونی

و پرتوهای حلقوی با استفاده از ترکیب تیغه فرنل کلاسیک و تیغه فرنل جابه‌جایی شعاعی با توری‌های پراشی تعمیم‌یافته ارائه شده است [۱۹] که با استفاده از تغییر تابع عبور توری‌ها، سعی در یکسان‌سازی شدت باریکه‌های تولید شده و کاهش اثرات مراتب بالاتر پراش را داشته‌اند. اما در این کار تحقیقاتی با اعمال تغییرات زاویه‌ای فازی به تیغه فرنل، ماهیت باریکه فرودی تغییر یافته و مد گوسی باریکه لیزری مانند مد لاگر گوسی شامل تکانه زاویه‌ای مداری شده است. در مرجع [۱۹] ماهیت نور فرودی تغییر نمی‌کرد و تنها نحوه کانونی شدن باریکه لیزر فرودی در صفحه کانونی تغییر می‌کرد اما در این مقاله ماهیت نور فرودی در حین انتشار تغییر می‌کند و پرتو گردابی^۲ و پرتو گردابی کامل^۳ در صفحه کانونی تیغه ایجاد می‌شود. به علاوه در این مقاله روشی برای تولید آرایه‌های منعطف از پرتوهای گردابی کامل برای اولین بار ارائه خواهد شد، به عبارتی پرتوهای گردابی کامل در این کار علاوه بر چیدمان آرایه‌ای شبکه‌ای به شکل آرایه‌های دایره‌ای نیز به تعداد دلخواه در کنار هم چیده می‌شوند. همچنین با بحث در مورد توزیع فاز گردابه‌ها در هر آرایه نشان می‌دهیم که پرتوهای گردابی کامل در آرایه، توزیع شدت و بار توپولوژیکی یکسانی دارند و بنابراین بار توپولوژیکی کل آرایه MP خواهد بود که M تعداد گردابه‌ها و P بار توپولوژیکی هر گردابه است.

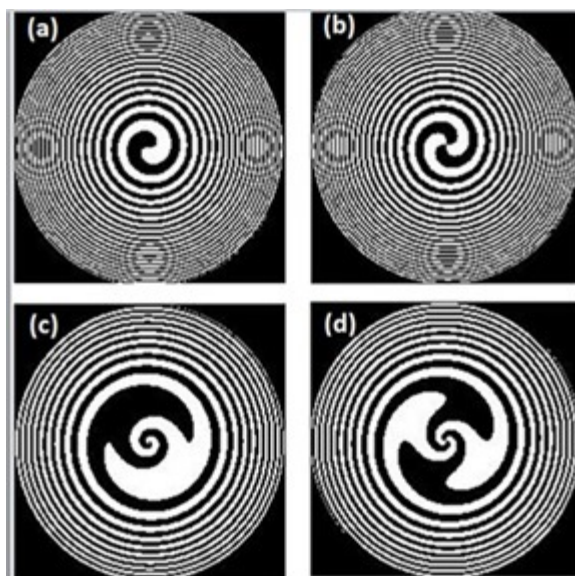
اساس کار بر پایه ترکیب تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی ($RSSZP^4$) با توری‌های متعدد است. به عبارتی دیگر ترکیب توری پراشی به عنوان یک عنصر تناوبی با تیغه منطقه‌ای فرنل که شبه تناوبی است، موجب تولید یک عنصر پراشی نوین خواهد شد که عملکردی همچون مولد آرایه‌ای نوری دارد که در حوزه اپتیک پراشی بسیار منحصر به فرد است [۲۰]. همچنین در مدل ارائه شده تعداد گردابه‌ها و مکان هندسی قرار گرفتن پرتوها در صفحه کانون، قابل کنترل است که بر اساس نیاز در کاربردهای تولید آرایه‌ای می‌توان عنصر پراشی مورد نیاز را طراحی کرده و توزیع شدت کانونی

۲. Vortex beam

۳. Perfect vortex beam

۴. Radial Shift Spiral Zone Plate

۱. Orbital Angular Momentum



شکل ۱. (a) تیغه فرنل مارپیچی با $p=1$ ، (b) تیغه فرنل مارپیچی با $p=2$ ، (c) تیغه فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی و با $p=1$ و (d) تیغه فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی و با $p=2$.

در مرجع [۱۴] نشان داده شده است که در صفحه کانونی این تیغه‌ها، باریکه‌های گردابی کامل که شعاع آنها مستقل از بار توپولوژیکی است، حاصل خواهد شد. در رابطه (۲)، R شعاع قطعه پراشی و α پارامتر جابه‌جایی شعاعی است که به عنوان پارامتر کنترل کننده شعاع هر گردابه کامل در آرایه عمل می‌کند. برای درک بهتر، در شکل ۱ نمونه‌هایی نوعی از تیغه‌های SZP و RSSZP نشان داده شده‌اند. در سطر اول شکل ۱، تیغه‌های SZP و در سطر دوم تیغه‌های RSSZP نشان داده شده است (در ستون اول $p=1$ و در ستون دوم $p=2$ است در (C) پارامتر $\alpha = 0.3$ و در (d) پارامتر $\alpha = 0.6$ در نظر گرفته شده است).

اکنون برای به دست آوردن توزیع آرایه‌ای از پرتوهای گردابی کامل، ساختار تیغه‌های منطقه‌ای مشخص شده را با ساختارهای تناوبی توری‌ها تغییر خواهیم داد و گردابه‌ها را در آرایه‌هایی متعدد متشکل از آرایه‌های شبکه‌ای و دایره‌ای در کنار هم خواهیم چید. یعنی با برهم‌نهی همدوس توری پراشی به عنوان یک عنصر متناوب با تیغه منطقه‌ای فرنل شبه تناوبی، یک عنصر نوین پراشی تولید می‌کنیم که منجر به ایجاد آرایه خواهد شد. شکل ۲ طرح‌واره مراحل انجام کار را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که برهم‌نهی توابع عبور با استفاده از تابع مدولاسیون

را بررسی کرد. تمامی مراحل کار پس از بررسی نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی تطبیق داده شده‌اند و نتایج تجربی نیز تأییدی بر نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.

۲. مبانی نظری

تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی یک لنز پراشی است که در مقایسه با تیغه فرنل عادی به جای نواحی دایره‌ای، از نواحی مارپیچی تشکیل یافته است. بنابراین تابع عبور تیغه فرنل منطقه‌ای مارپیچی (SZP)^۱ به صورت زیر است:

$$T_{SZP}(r, \theta) = \sum_n \left[\exp \left(-i\pi n \frac{r^2}{\lambda f} + ip\theta \right) \right], \quad (1)$$

که در آن (r, θ) مختصات قطبی در صفحه تیغه، f فاصله کانونی، λ طول موج نور و p بار توپولوژیکی است. در مرجع [۲۱] نشان داده شده است که توزیع شدت در صفحه کانونی چنین تیغه‌ای منطبق بر باریکه‌های گردابی است.

با انتقال فازی شعاعی تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی، تابع عبور تیغه RSSZP به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_{RSSZP}(r, \theta) = \sum_n \left[\exp \left(-i\pi n \frac{(r - \alpha R)^2}{\lambda f} + ip\theta \right) \right], \quad (2)$$

۱. Spiral Zone Plate

زیر به دست خواهد آمد:

$$T = \text{mod}(T_{RSSZP}, T_G), \quad (3)$$

تابع mod در برنامه متلب برای محاسبه باقی مانده یک عمل تقسیم به کار می رود. این دستور دو آرگومان را می پذیرد و ترتیب قرارگیری این دو آرگومان بسیار حایز اهمیت است. به عنوان مثال $\text{mod}(B, A)$ باقی مانده تقسیم B بر A را محاسبه می کند. در حقیقت این تابع ترکیب بهینه ای است از ترکیب ساختار توری در تیغه پراشی که نمونه خیلی ساده تر شده و قابل درک آن می تواند حاصل ضرب مستقیم دو تابع در یکدیگر باشد یعنی:

$$T(x, y; 0) = T_{RSSZP}(x, y; 0) T_G(x, y; 0), \quad (4)$$

بنابراین با استفاده از قضیه همتافتگی در پراش فرنل که میدان پراش یافته $U(x, y; z)$ در فاصله z از یک عامل پراشی $T(x, y; 0)$ را می توان بر حسب میدان فرودی بر آن $U(x, y; 0)$ به شکل

$$U(x, y; z) = T(x, y; 0) U(x, y; 0) \otimes h(x, y; z), \quad (5)$$

نوشت که در آن $h(x, y; z) = e^{\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)}$ تابع پاسخ فضای آزاد است [۲۲]. با استفاده از قضیه تبدیل فوریه می توان رابطه ای به شکل زیر برای موج تخت نوشت:

$$U(x, y; z) = \mathcal{J}[T(x, y; 0)] \mathcal{J}[h(x, y; z)], \quad (6)$$

با استفاده از ترکیب معادلات (۴) و (۶) رابطه زیر به سادگی به دست می آید:

$$U(x, y; z) = \left\{ \mathcal{J}[T_{RSSZP}(x, y; 0)] \otimes \mathcal{J}[T_G(x, y; 0)] \right\} \mathcal{J}[h(x, y; z)], \quad (7)$$

که نتیجه آن تکثیر دامنه میدان پراش یافته از RSSZP یا گردابه های توری در محل مرتبه های پراش توری است که با رابطه $U_{RSSZP}(x, y; 0) = \mathcal{J}[T_{RSSZP}(x, y; 0)]$ تعریف شده است.

به عنوان مثال اگر تابع توری به شکل $T_G(x, y; 0) = \cos\left(\pi \frac{x}{L_x}\right)$ باشد میدان پراش یافته از ترکیب توری و RSSZP به شکل زیر است:

$$U(x, y; z) = \left\{ U_{RSSZP}\left(x - \frac{\lambda z}{L_x}, y; 0\right) + U_{RSSZP}\left(x + \frac{\lambda z}{L_x}, y; 0\right) \right\} \mathcal{J}[h(x, y; z)], \quad (8)$$

که در رابطه بالا ضرایب ثابتی حذف شده اند. بنابراین با توجه به نوع تابع توری و تعداد مرتبه های پراش می توان انتظار همان تعداد گردابه های توری را با همان شکل هندسی مرتبه های پراش داشت.

در این مقاله عنصر پراشی تولید شده متشکل از دو عنصر مجزا است که با استفاده از تابع mod با یکدیگر تلفیق شده اند. این عناصر هر کدام متشکل از نواحی روشن و تاریک هستند. زمانی که از دستور تلفیق یا تابع mod به شکل رابطه (۳) استفاده می کنیم، این تابع ایجاب می کند که اگر ناحیه تاریک قطعه اول روی ناحیه روشن قطعه دوم افتاد، ناحیه حاصل از برهم نهی یک ناحیه روشن باشد چون باقی مانده تقسیم $(1+0)$ بر ۲ برابر ۱ خواهد شد. یا برهم نهی ناحیه روشن قطعه اول با ناحیه روشن قطعه دوم برابر ناحیه تاریک است، چون باقی مانده تقسیم $(1+1)$ بر ۲ برابر صفر خواهد شد همچنان که در شکل ۲ طرحواره ای از آن نشان داده شده است.

برای طراحی تیغه پراشی بر پایه ی توری، ساده ترین حالت استفاده از توری یک بعدی افقی و یا عمودی است که می تواند گردابه های توری را در راستای افقی یا عمودی ایجاد کند. تابع عبور توری را در حالت کلی می توان به شکل زیر نوشت:

$$T_G(x, y) = \sum_{m,n} \exp\left[\left(\imath \pi i m \frac{x}{\lambda z}\right) + \left(\imath \pi i n \frac{y}{\lambda z}\right)\right], \quad (9)$$

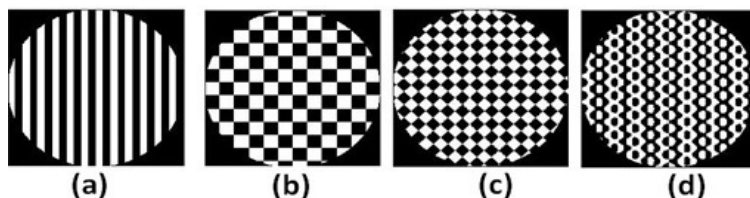
که دوره تناوب توری در جهت های x و y به ترتیب برابر با m و n است، λ در آن برابر طول موج تابشی و z فاصله بین صفحه تیغه و صفحه مشاهده است که به هنگام بررسی ویژگی های کانونی قطعه پراشی، می توان این فاصله را برابر فاصله کانونی در نظر گرفت. در شکل ۳، (a) توری یک بعدی، (b) توری دوبعدی، (c) توری دوبعدی چرخیده و (d) توری مربوط به آرایه های دایره ای ساز نشان داده شده است.

۳. شبیه سازی عددی

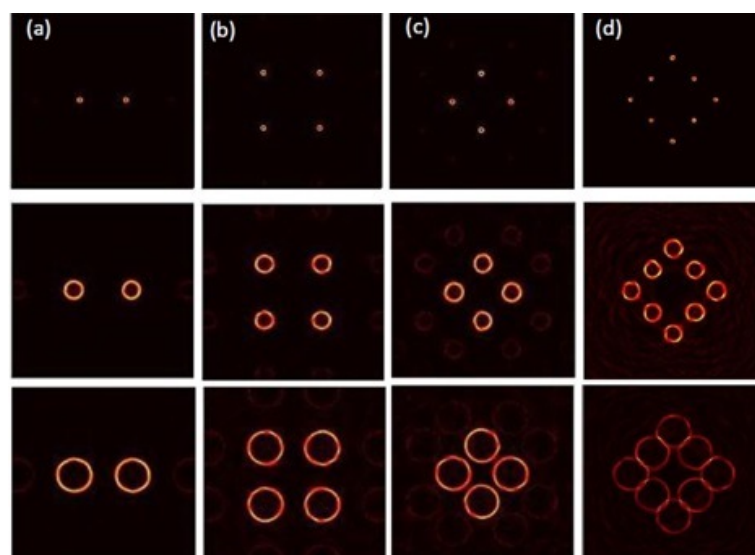
با استفاده از رابطه (۴) و جایگذاری توابع عبور توری های مختلف و برهم نهی توابع عبور تیغه های SZP و RSSZP المان های پراشی نوین طراحی می شوند. برای اندازه گیری دامنه میدان پراش یافته $U(\rho, \phi)$ در راستای انتشار محور z و در صفحه



شکل ۲. تغییر ساختار تیغه منطقه‌ای و تولید المان پراشی نوین به عنوان عنصر آرایه‌ساز.



شکل ۳. چند مثال از توری‌های استفاده شده برای ترکیب همدوس با تیغه‌های فرنل.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) آرایه‌های شبکه‌ای از توزیع شدت ثبت شده در صفحه کانونی برای تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی ادغام شده با توری‌های مختلف (سطر اول) و برای تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی ادغام شده با توری‌های مختلف (سطر دوم و سوم با $\alpha = 0.03$ و $\alpha = 0.06$ به ترتیب).

مختلف را به دست آورد. تمامی نتایج شبیه‌سازی و تجربی بر روی نمونه‌هایی با شعاع ۵ میلی‌متر و فاصله کانونی ۵۰۰ میلی‌متر که تحت تابش باریکه تخت لیزر هلیوم-نئون با طول موج ۶۳۲٫۸ نانومتر قرار دارند، انجام گرفته‌اند.

شکل ۴ سطر اول آرایه‌ای از پرتوهای گردابی را نشان می‌دهد که حاصل هم‌پوشانی تیغه‌های SZP با توری‌های یک بعدی و دوبعدی است. تابع عبور توری‌های برهم‌نهی مربوط به آرایه‌های شکل ۴، ستون اول به شکل رابطه (۱۱) است که در

کانونی از انتگرال فرنل - کیرشهف [۲۲ و ۲۳] استفاده می‌کنیم:

$$U(\rho, \phi) = \int_0^R r dr \int_0^{2\pi} T(r, \theta) \exp \left\{ \frac{ik}{2f} \left[r^2 - 2r\rho \cos(\theta - \phi) \right] + i p \theta \right\} d\theta, \quad (10)$$

که در آن (ρ, ϕ) مختصات قطبی در صفحه کانونی، $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ مختصات استوانه‌ای در صفحه المان پراشی، $T(r, \theta)$ تابع عبور المان پراشی و R شعاع المان مورد استفاده است. با محاسبه دامنه میدان پراشی در صفحه کانونی، می‌توان توزیع شدت برای طرح‌های

تولید شده متناسب با بار تولوژیکی تیغه مارپیچی مورد استفاده نیز تغییر می‌کند و با انتخاب بار توپولوژیکی بالاتر برای هر گردابه کامل، بار توپولوژیکی کل برای آرایه نیز تغییر می‌کند.

در شکل ۵ با تغییر ساختار توری می‌توان آرایه‌هایی از گردابه‌ها را روی محیط یک یا دو دایره در صفحه کانونی کنار هم چید. به عنوان مثال در شکل ۵ سطر اول تعداد ۶، ۱۰، ۱۲، ۱۷ و ۱۷ گردابی با پارامتر کنترل کننده α برابر صفر به ترتیب از راست به چپ در کنار هم در محیط دایره‌ای فرضی قرار گرفته‌اند. در سطر دوم و سوم شکل ۵ همان تعداد پرتو گردابی کامل با پارامتر کنترل کننده α به ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۰/۰۶ در نظر گرفته شده‌اند. تابع عبور توری مولد آرایه‌های دایره‌ای به طور کلی طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$T_G(x,y) = \exp \frac{\gamma \pi i (mx - ny)}{\gamma \lambda z} + \exp \frac{\gamma \pi i (mx + ny)}{\gamma \lambda z} + \exp \frac{\gamma \pi i \sqrt{(m^2 + n^2)} x}{\gamma \lambda z}, \quad (15)$$

همان طور که در قسمت ایجاد آرایه‌های شبکه‌ای دیدیم، می‌توان با ایجاد تغییراتی در ساختار توری‌ها به آرایه مطلوب رسید، یا اگر بخواهیم n عنصر کانونی روی محیط m دایره هم مرکز مانند آنچه در شکل ۵، ستون ۴ می‌بینیم به شکل کلی زیر خواهد بود:

$$T_G(x,y) = \sum_{m,n} \exp \left\{ \gamma \pi i \left(\sqrt{(m^2 + n^2)} \frac{x}{\gamma \lambda z} \right) + \left(\sqrt{n} \frac{y}{\gamma \lambda z} \right) + \sqrt{m-n} \frac{x}{\gamma \lambda z} - \sqrt{n} \frac{x}{\gamma \lambda z} \right\}, \quad (16)$$

تا به اینجا، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد چنانچه هم‌پوشانی مابین یک توری - چند شبکه‌ای ساز و دایروی ساز - و تیغه فرنل ایجاد شود، عنصر به دست آمده همچون تولید کننده‌ای آرایه‌ای در صفحه کانونی عمل می‌کند. همچنین کنترل پذیری هر بخش از آرایه تولید شده با استفاده از تغییر ساختار توری، منجر به ثبت آرایه‌ای جدید و منحصر بفرد خواهد بود.

علاوه بر تغییرات کلی در ساختار توری‌ها، می‌توان دوره تناوب توری‌ها را نیز تغییر داد و نتیجه جالب توجه این است که فاصله بین هر تکرار الگوی شدتی انعطاف‌پذیر بوده و

سطر اول یک نسخه از پرتو گردابه ایجاد شده است.

$$T_G(x,y) = \exp \left\{ \left(\gamma \pi i m \frac{x}{\lambda z} \right) \right\}, \quad (11)$$

در سطر دوم توری دوبعدی یا توری مولد آرایه شبکه‌ای دو در دو را داریم که در واقع ترکیبی از توری‌های افقی و عمودی یک بعدی است و تابع عبور توری متناظر می‌تواند به شکل رابطه (۱۲) باشد.

$$T_G(x,y) = \exp \left(\frac{\gamma \pi i (mx - ny)}{\gamma \lambda z} \right) + \exp \left(\frac{\gamma \pi i (mx + ny)}{\gamma \lambda z} \right), \quad (12)$$

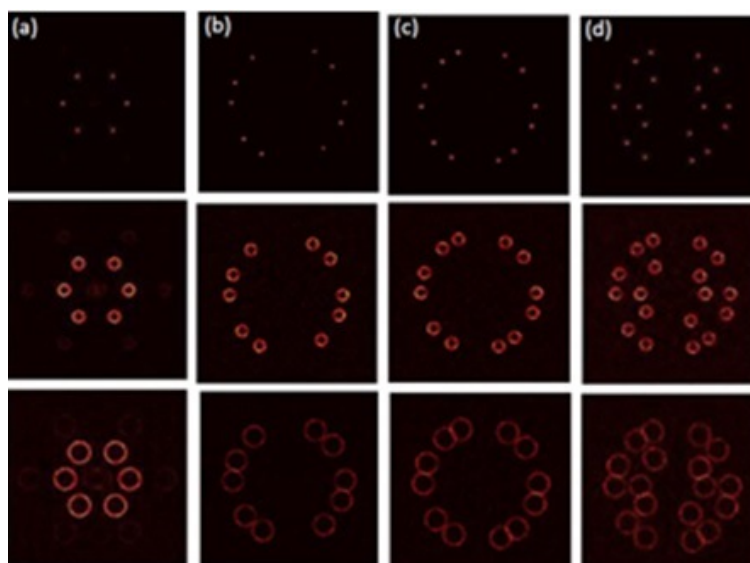
در ستون سوم از شکل ۴، از توری دوبعدی چرخیده برای آرایه مد نظر استفاده کرده‌ایم، تابع عبور توری در رابطه (۱۳) داده شده است:

$$T_G(x,y) = \exp \left(\frac{\gamma \pi i (mx + ny)}{\gamma \lambda z} \right), \quad (13)$$

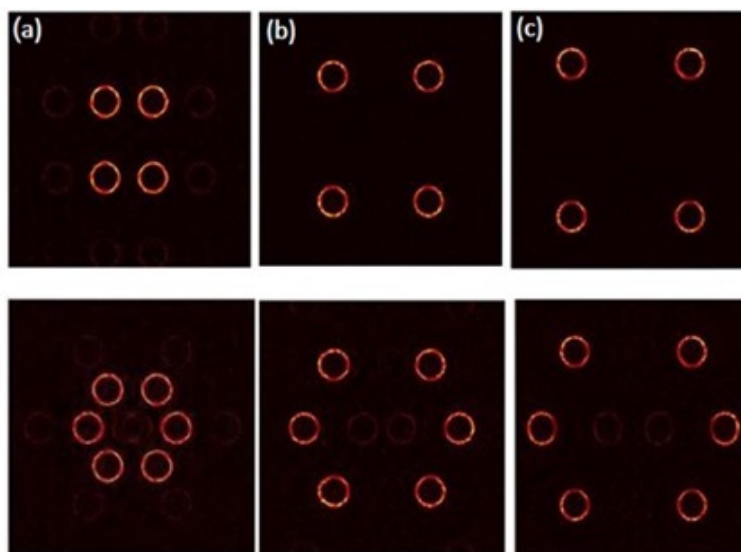
در ستون چهارم از شکل ۴ عناصر کانونی به تعداد ۸ عدد روی اضلاع یک مربع چرخیده شده قرار گرفته‌اند، لذا با استفاده از رابطه عبور توری به شکل رابطه (۹) توزیع شدت کانونی همانند آرایه نشان داده شده در شکل ۴ خواهیم داشت:

$$T_G(x,y) = \exp \left\{ \gamma \pi i \left[\left(\frac{mx}{\gamma \lambda z} + \frac{ny}{\gamma \lambda z} \right) + \left(\frac{m}{\gamma} \frac{x}{\lambda z} + \frac{n}{\gamma} \frac{y}{\lambda z} \right) + \left(\frac{m}{\gamma} \frac{x}{\lambda z} - \frac{n}{\gamma} \frac{y}{\lambda z} \right) \right] \right\}, \quad (14)$$

در آرایه‌های ذکر شده، پرتوهای گردابی کامل را به طرق مختلف در آرایه‌های شبکه‌ای چیده‌ایم که این پرتوها از هم‌پوشانی تیغه‌های RSZP با توری‌های ذکر شده به دست آمده‌اند. در مورد تیغه‌های RSZP، پارامتر کنترل کننده α در سطر اول تا سوم به ترتیب برابر ۰، ۰/۰۳ و ۰/۰۶ در نظر گرفته شده‌اند. همان طور که از شکل مشخص است با افزایش پارامتر α ، شعاع حلقه شدتی پرتو گردابی کامل افزایش می‌یابد. در کل آرایه‌ها بار توپولوژیکی برابر $P=1$ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که شعاع حلقه شدتی مستقل از بار توپولوژیکی است [۱۳] از نمایش سایر آرایه‌ها با بار توپولوژیکی متفاوت صرف‌نظر شده است. اما می‌دانیم که بار توپولوژیکی گردابه‌های



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) آرایه‌های دایره‌ای از توزیع شدت ثبت شده در صفحه کانونی برای تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی ادغام شده با توری‌های مختلف (سطر اول) و برای تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی ادغام شده با توری‌های مختلف (سطر دوم و سوم با $\alpha = 0.03$ و $\alpha = 0.06$ به ترتیب).

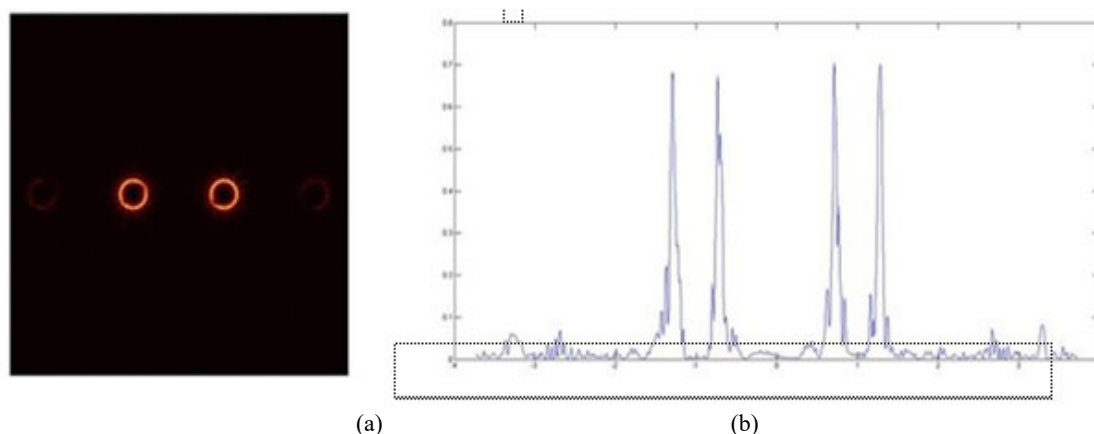


شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بررسی تأثیر دوره تناوب توری بر محل گردابه‌های نوری از راست به چپ به ترتیب دوره تناوب توری کمتر می‌شود.

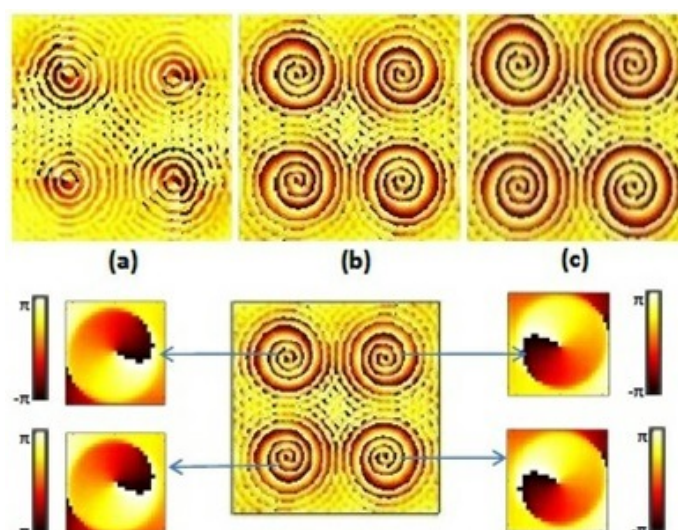
سوم برابر است با (۲،۱)، (۳،۲) و (۴،۴).

به منظور بررسی بازده پراش هر المان در ساختار آرایه‌ای، و مقایسه با سایر المان‌ها می‌توان پروفایل توزیع شدت عرضی آنها را رسم کرده و با بررسی توزیع شدت آنها و استفاده از رابطه (۱۷) بازده پراش هر المان را محاسبه کرد. در این قسمت برای وضوح بیشتر تصویر، آرایه افقی با دو پرتو گردابه کامل در

بستگی به دوره تناوب توری مورد استفاده دارد. به عبارتی فاصله بین نقاط کانونی و موقعیت آنها انعطاف‌پذیر بوده و تابعی از دوره تناوب توری مورد استفاده و زاویه دوران است. در شکل ۶ توری شبکه‌ای‌ساز و دایره‌ای‌ساز برای پرتو گردابی کامل با α برابر 0.03 و $p=1$ با دوره تناوب‌های مختلف رسم شده‌اند. دوره تناوب توری به ترتیب از ستون اول تا ستون



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (a) توزیع شدت کانونی و (b) پروفایل عرضی توزیع شدت.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات فاز میدان پراشی برای تیغه منطقه‌ای مارپیچی. (a) تیغه‌های منطقه‌ای مارپیچی با انتقال فازی شعاعی $\alpha=0.03$ (b) $\alpha=0.06$ و (c) با بار توپولوژیکی یکسان ۱.

قطعه یکنواخت است و تمام باریکه‌های گردابی شدت فرودی یکسانی دارند. با استفاده از رابطه (۱۷) و با توضیحات بیان شده، بازده پراش هر باریکه یا مقدار نسبی انرژی انتقالی در مرتبه پراش اول به هر المان آرایه ایجاد شده، یکسان خواهد بود. در رابطه (۱۷)، m مرتبه پراش است که ما برای پراش مرتبه اول یکسان بودن بازده پراشی را استنتاج کرده‌ایم.

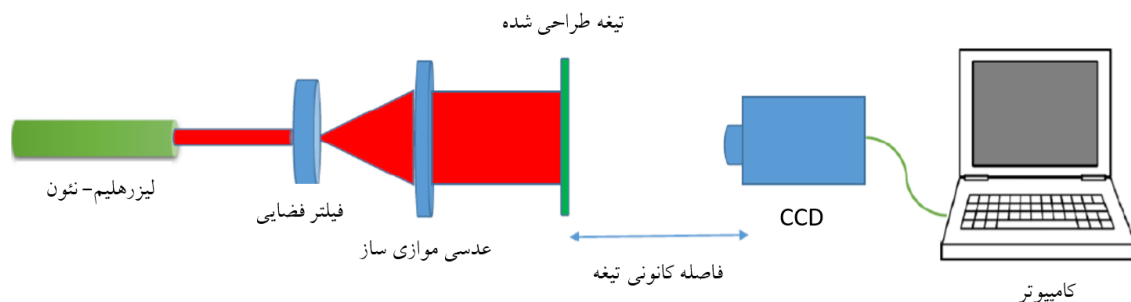
$$\eta_m = \frac{I_m}{I_0}, \quad (17)$$

در شکل ۸ توزیع فاز مربوط به توزیع شدت ستون دوم شکل ۴ نشان داده شده است. چون در تمام موارد بار توپولوژیکی ۱ در

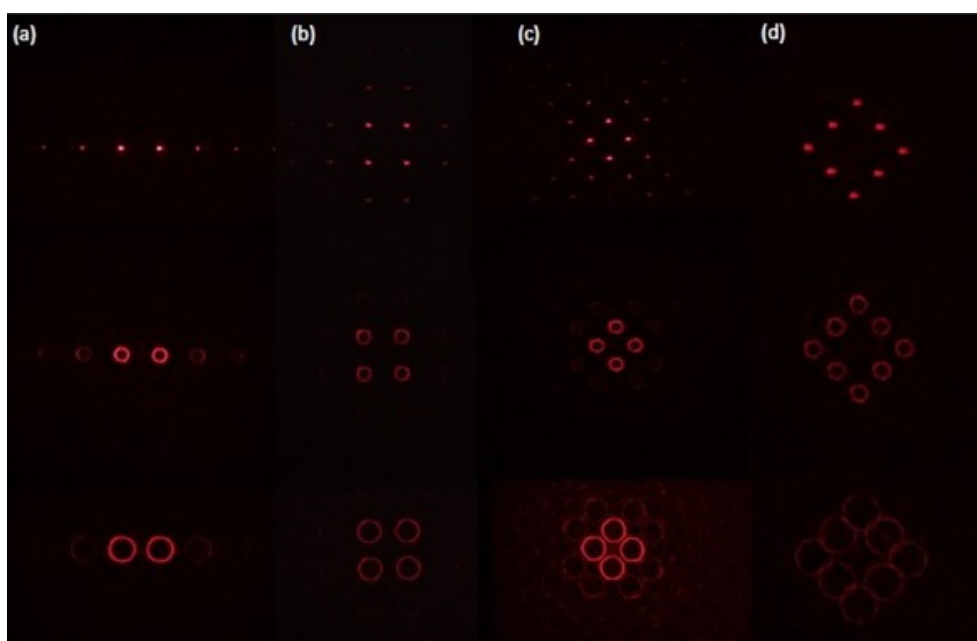
جهت افقی را در نظر می‌گیریم.

از آنجایی که دامنه میدان پراشی مرتبه اول بسیار بزرگ‌تر از مراتب بالاتر، می‌توان از سایر مراتب پراش به عنوان نوفه در زمینه صرف‌نظر کرد و شدت اندازه‌گیری شده در صفحه مشاهده را شدت مربوط به پراش مرتبه اول در نظر گرفت.

با رسم پروفایل شدت عرضی در صفحه مشاهده همان طور که در شکل ۷. b نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که باریکه‌های گردابی کامل دارای شدت پراشی مرتبه اول یکسانی هستند و از آنجایی که نور فرودی به قطعه پراشی آرایه‌ساز با تقریب بسیار خوبی تخت است، لذا شدت تابش فرودی به



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) چیدمان تلسکوپی مورد استفاده در انجام آزمون‌های تجربی.



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نتایج تجربی از آرایه‌های شبکه‌ای از توزیع شدت ثبت شده در صفحه کانونی برای ترکیب همدوس تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی با توری‌های مختلف (سطر اول) و برای تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی با توری‌های مختلف (سطر دوم و سوم با $\alpha=0.03$ و $\alpha=0.06$ به ترتیب).

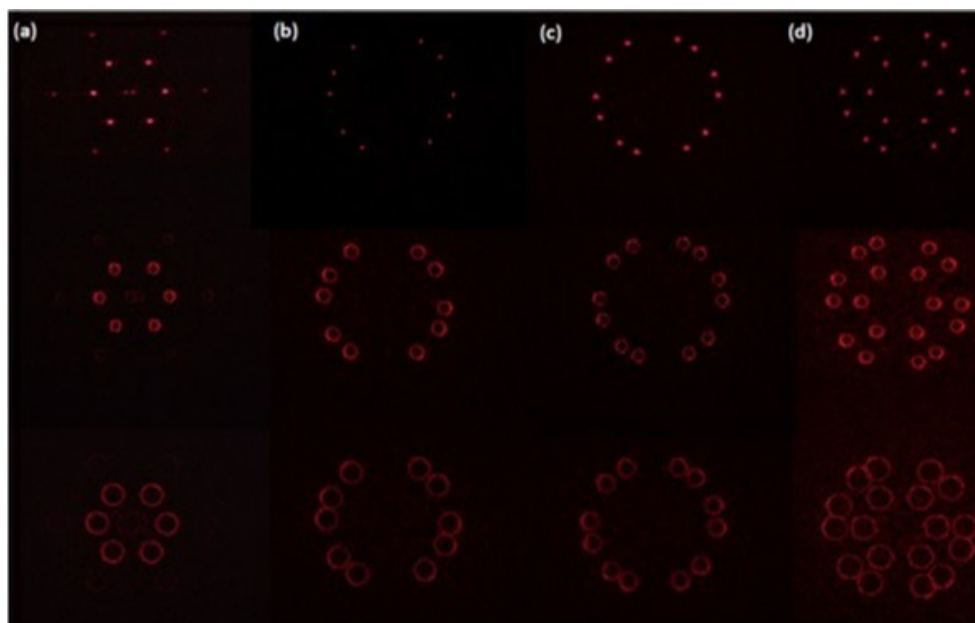
موازی‌سازی توسط قطعه پراشی کانونی می‌شود و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که نور کانونی شده توسط دوربین CCD ثبت و ذخیره می‌شود.

عناصر پراشی را که نتیجه شبیه‌سازی آنها در اشکال ۵ و ۶ داده شده است پس از تولید در چیدمان تجربی قرار دادیم و توزیع شدت در کانون آنها ثبت شد. نتایج به ترتیب در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که به سادگی می‌توان آرایه‌های مختلفی از گردابه‌ها و گردابه‌های کامل را در اشکال مختلفی از آرایه‌ها و با دوره‌های تناوب یا بسامد فضایی مختلف قرار داد. پس در حقیقت مؤید همان نتایجی است که در اشکال ۵

نظر گرفته شده است، چرخش فازی از مقدار بیشینه خود به صفر یک بار اتفاق می‌افتد که تکینگی فاز مرتبه اول است.

۴. ترتیبات تجربی

در این کار تحقیقاتی با استفاده از روش لیتوگرافی نمونه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی تولید شدند. سپس نمونه‌ها در چیدمان اپتیکی تلسکوپی که در شکل ۹ نشان داده شده است قرار می‌گیرند. عنصر پراشی با محور اپتیکی چیدمان هم‌تراز شده و سیستم برای ثبت تصویر آماده می‌شود. در این چیدمان از نور لیزر هلیوم-نئون استفاده شده است. نور لیزر پس از



شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نتایج تجربی از آرایه‌های دایره‌ای از توزیع شدت ثبت شده در صفحه کانونی برای تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی ادغام شده با توری‌های مختلف (سطر اول) و برای تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی با انتقال فازی شعاعی ادغام شده با توری‌های مختلف (سطر دوم و سوم با $\alpha=0.03$ و $\alpha=0.06$ به ترتیب).

ایجاد کند. همین طور نشان دادیم که گردابه‌های کلاسیک و کامل دارای توزیع شدت یکسان و بار توپولوژیکی یکسان هستند. روش بیان شده برای ایجاد آرایه بسیار ساده و انعطاف‌پذیر است، یعنی می‌توان با تغییر ساختار عنصر پراشی آرایه‌هایی متنوع با الگوی شدتی متفاوت در صفحه کانونی تولید کرد. فواصل و موقعیت بین آرایه‌ها از موارد دیگری است که قابلیت انعطاف‌پذیری را دارد. عنصر پیشنهادی را می‌توان در حوزه‌های مختلفی از جمله تولید آرایه‌ای از تصاویر، ارتباطات نوری، سیستم‌های ذخیره‌سازی و ... استفاده کرد.

و ۶ به دست آورده شدند. در نتیجه نتایج تجربی این نکته را تأکید می‌کنند که با استفاده از تکنیک ارائه شده می‌توان به آرایه‌های مطلوبی از گردابه‌های نوری کامل رسید که فاصله و شکل هندسی آرایه‌ها کاملاً قابل کنترل و مدیریت هستند.

۵. نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی با طراحی تیغه‌های فرنل مارپیچی و مارپیچی با انتقال فازی شعاعی بر پایه توری‌های مختلف، عنصر پراشی نوینی تولید کرده‌ایم که این عنصر منحصر به فرد می‌تواند آرایه‌هایی دلخواه از پرتوهای گردابی کلاسیکی و کامل

مراجع

1. J E Curtis and D G Grier, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 133901.
2. G A Swartlander, E L ford, R S Abdul Malik, L M Close, M A peters, D M.Palacios and D W Wilson, *Opt. express* **16** (2008) 10200.
3. G Foo, D M Palacios and G A Swartlander, *Opt. Lett.* **30** (2005) 3308.
4. L Allen, M W Beijersbergen, R J C. Spreeuw, and J P Woerdman, *Physical Review A* **45** (1992) 8185.
5. L Paterson, M P MacDonald, J Arlt, W Sibbett, P E Bryant, and K Dholakia, *Science* **292** (2001) 912.
6. D G Grier, *Nature* **424** (2003) 810.
7. J Wang, J Y Yang, I M Fazal, N Ahmed, Y Yan, H Yan, H Huang, Y Ren, Y Yue, S Dolinar, M Tur and A E Willner, *Nature Photonics* **6** (2012) 488.
8. A Mair, A Vaziri, G Weihs, and A Zeilinger, *Nature* **412** (2001) 313.
9. M Ritsch-Marte, *Philos. Trans. R. Soc. A. Math. Phys. Eng. Sci.* **375** (2017) 20150437.
10. D Hebri, S Rasouli, and A Mardan Dezfouli, *J. Opt.*

- 800.
19. A Sabatyan and B Fathi, *Opt. Quant. Electron.* **50** (2017) 338.
 20. A Sabatyan and J Rafighdoost; *Appl. Opt.* **56** (2017) 5355.
 21. A Sabatyan, and Z Behjat, *The Annual Physics conference of Iran*, Shiraz University, **1065** (2016).
 22. J W Goodman, “*Introduction to Fourier optics*”, 3rd ed. Roberts & Company (2005).
 ۲۳. م ح توسلی، ح سهل البیع و ح ر خالصی فرد، *مجله پژوهش فیزیک ایران*، ۲، ۵ (۱۳۸۰) ۲۴۶.
 23. M T Tavassoly, H Sahl-ol-bei, M Salehi, and H R Kholesifard, *Iranian. J. Phys. Res.* **2**, 5 (2001) 237.
 - Soc. Am. A* **36** (2019) 839.
 11. C Brunet, B Ung, L Wang, Y Messaddeq, S LaRochelle, E Bernier, and L Rusch, *Opt. Express* **23** (2015) 10533.
 12. A S Ostrovsky, C Rickenstorff-Parrao, V Arrizn, *Opt. Lett.* **38** (2013) 534.
 13. P Vaity, L Rusch, *Opt. Lett.* **40** (2015) 597.
 14. A Sabatyan, Z Behjat, *Opt Quant Electron* **49** (2017) 371.
 15. A Kumar, P Vaity, J Banerji, and R P Singh, *Phys. Lett. A* **3634** (2011).
 16. Y Lu, B Jiang, S Lu, Y Liu, S Li, Z Cao, and X Qi, *Opt. Commun.* **363** (2016) 85.
 17. D P Ghai, S Vyas, P Senthilkumaran, and R S Sirohi, *Opt. Commun.* **282** (2009) 2692.
 18. S Rasouli and D Hebri, *J. Opt. Soc. Am. A* **36** (2019)