

# کدگذاری و انتقال اطلاعات مبتنی بر باریکه‌های نور کارپت شعاعی و آشکارسازی شبکه عصبی کانولوشن

مهدی خدادادی کرهرودی و محمدرضا جعفرفر

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

پست الکترونیکی: Mrjafarfard@iust.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱)

## چکیده:

باریکه‌های نور کارپت شعاعی، نوع جدیدی از نور ساختاریافته هستند که در گروه باریکه‌های نوری شبه بسلی دسته‌بندی می‌شوند. در این مقاله، باریکه نور کارپت شعاعی به عنوان بستری برای انتقال اطلاعات و راهکاری برای افزایش درجات آزادی در کدگذاری اطلاعات معرفی شده است و روش شبکه عصبی کانولوشن به عنوان رویکرد پایه در آشکارسازی و دسته‌بندی این باریکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، یک مجموعه داده شامل ۱۶ کلاس مختلف از مدهای کارپت شعاعی پس از انتشار در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری در شرایط تلاطم زیر آب تهیه و شبکه عصبی کانولوشن مورد نظر بر پایه معماری معروف DenseNet-201 و با تکیه بر تکنیک انتقال یادگیری، آموزش داده شده است که نشان دهنده دقت ۹۷٪ در آشکارسازی و دسته‌بندی مدها است. سپس، عملکرد مدل مذکور، از طریق ارسال و دریافت یک نمونه تصویر خاکستری ۴ بیتی با ابعاد  $200 \times 150$  پیکسل از طریق یک لینک ارتباطی زیر آب بر مبنای مدهای کارپت شعاعی مورد آزمون واقع شده است. نتایج ارزیابی، به وضوح تأیید کننده امکان دستیابی به درجات آزادی جدید در کدگذاری اطلاعات بر مبنای باریکه‌های کارپت شعاعی و همچنین توانایی تکنیک شبکه عصبی کانولوشن به عنوان روشی بهینه در آشکارسازی و دسته‌بندی باریکه‌های نور ساختاریافته است. این روش، دشواری‌های ناشی از به‌کارگیری المانهای اپتیکی متعدد در تکنیکهای آشکارسازی همدوس به کمک توریه‌های پراش را حذف می‌کند و علاوه بر ساده‌سازی تنظیمات سیستم اپتیکی، حجم و هزینه پیاده‌سازی را به ویژه در کاربردهای ارتباط نوری کاهش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** نور ساختاریافته، شبکه عصبی کانولوشن، ارتباط نوری، آشکارسازی ناهمدوس نوری

## ۱. مقدمه

بیشتر، باید درجات آزادی جدیدی را برای افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات در لینک‌های ارتباطی بیابیم. از طرفی همواره یکی از چالش‌های اصلی سامانه‌های ارتباطی نوری، حضور عوامل آشفتگی در محیط انتشار است که به شدت بر کیفیت سیگنال و یا الگوی شدت دریافتی در محل گیرنده تأثیرگذار است. نقش این اثرات حتی در محیط‌هایی مثل زیر آب بسیار پررنگ‌تر دیده می‌شود. از این عوامل می‌توان به جذب، اتلاف نور، پراکندگی، سوسوزنی ناشی از گرادیان‌های دمایی و تغییرات موضعی ضریب شکست در مسیر انتشار نور در محیط

به طور کلی انتقال بیشترین حجم اطلاعات با بالاترین سرعت ممکن، پائین‌ترین آمار خطا و کمترین میزان مصرف انرژی از ویژگی‌های اصلی سیستم‌های ارتباطی است. در دهه‌های گذشته برای افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات در ارتباطات نوری تقریباً از تمام ویژگی‌های نور یعنی دامنه، قطبش، و طول موج به منظور مدولاسیون امواج نور بهره برده شده است. بنابراین برای پاسخ به نیاز روز افزون جوامع به پهنای باند ارتباطی

اشاره کرد. از روش‌های مرسوم مقابله با اثرات تلاطم، می‌توان به سامانه اپتیک تطبیقی، و روش‌های پردازش سیگنال اشاره کرد [۱]. اما از طرفی یک راه حل بالقوه برای مقابله با اثرات مخرب محیط انتشار، پیاده‌سازی مدولاسیون فضایی برمبنای باریکه‌های نور ساختاریافته است. از مشهورترین باریکه‌های نور ساختاریافته می‌توان به باریکه‌های لاگر-گوسی، بسل-گوسی، و پیچیده‌های نوری کامل اشاره کرد. از مهمترین ویژگی‌های آن‌ها می‌توان به وجود تکانه زاویه‌ای مداری، مقاومت بیشتر در برابر اثرات محیطی، و خاصیت خود ترمیمی اشاره کرد [۲]. این ویژگی‌ها علاوه بر خلق درجات آزادی جدید در کدگذاری اطلاعات، امکان افزایش فاصله لینک‌های ارتباطی را در مقایسه با منابع نور لیزری مرسوم که دارای توزیع شدت گوسی هستند، فراهم می‌کند [۳ و ۴]. نور ساختاریافته از طریق مهندسی جبهه موج قابل تولید است. از معروفترین روش‌ها و ابزارهای مهندسی جبهه موج نور می‌توان به صفحات فازی، عدسی‌های مخروطی، توری‌های چنگالی، آینه‌های DMD، و مدولاتورهای فضایی نور اشاره کرد. همانگونه که انتخاب روش‌های تولید باریکه‌های ساختاریافته در کیفیت و حتی در ویژگی‌های باریکه تولید شده اثر گذار است انتخاب روش آشکارسازی مناسب با هر نور ساختاریافته نیز امری ضروری است [۵ و ۶]. قابل توجه است که اکثر روش‌هایی که به منظور آشکارسازی باریکه‌های ساختاریافته استفاده می‌شوند، نیازمند به کارگیری المان‌های اپتیکی و الکترونیکی متعددی برای آشکارسازی صحیح مدهای نور هستند. بنابراین، علاوه بر افزایش تلفات انرژی دریافت شده، پیچیدگی ساختاری و در نتیجه هزینه پیاده‌سازی سامانه مورد نظر نیز افزایش می‌یابد. از اینرو، در سال‌های اخیر به منظور رهایی از این مشکلات، تحقیقات به سمت استفاده از الگوریتم‌های پردازش و دسته‌بندی تصاویر سوق پیدا کرده است. به عنوان مثال در حوزه ارتباط نوری می‌توان به تحقیقات گزارش شده در مراجع [۷ و ۸] اشاره کرد که محققان به کمک الگوریتم‌های شبکه عصبی به دسته‌بندی باریکه‌های نور ساختاریافته پرداخته‌اند. همچنین، ترکیبی از آشکارسازی هم‌دوس و تکنیک شبکه عصبی کانولوشن در یک سیستم ارتباط نوری بیسیم زیر آب نیز در

مرجع [۹] گزارش شده است. بررسی نتایج تحقیقات انجام شده بر روی انتشار باریکه‌های ساختاریافته نشان دهنده کاهش کیفیت مدها بر اثر عوامل حاضر در محیط متلاطم است که در نتیجه آشکارسازی هم‌دوس آنها را با مشکل روبرو می‌کند. البته شایان ذکر است که علیرغم تأثیر پذیری مدهای ساختاریافته از عوامل محیطی، همچنان عملکرد مطلوبتری را در قیاس با منابع نوری مرسوم مانند باریکه‌های لیزری گوسی نشان می‌دهند [۴]. از اینرو، در راستای تحقیقات انجام پذیرفته در این حوزه، در مقاله حاضر از طریق به کارگیری تکنیک شبکه عصبی کانولوشن به عنوان رویکرد پایه در آشکارسازی و دسته‌بندی مدهای نوری دریافتی در واحد گیرنده یک لینک ارتباط نوری مبتنی بر عضو جدیدی از باریکه‌های ساختاریافته با نام کارپت شعاعی، گامی در جهت افزایش درجات آزادی در کدگذاری اطلاعات برداشته شده است. مبانی ریاضی گروهی جدید از باریکه‌های ساختاریافته که با عنوان باریکه‌های شبه بسلی نیمه صحیح شناخته می‌شوند در سال ۲۰۱۸ معرفی شده است [۱۰ و ۱۱]. باریکه‌های کارپت شعاعی بعنوان عضوی از خانواده مذکور، حاصل از پراش جبهه موج تخت از توری‌های شعاعی هستند. شایان ذکر است که الگوی شدت عرضی این باریکه‌ها در حین انتشار تغییر نمی‌کند و تنها اندکی پهن شدگی را تجربه می‌کند که یعنی باریکه‌های بسلی نیمه صحیح، کاملاً غیرپراشی نیستند. البته به کمک روشی مبتنی بر اصل فاز پایا که در مرجع [۱۲] مطرح شده است، مسأله پهن شدگی الگوی شدت عرضی در باریکه‌های بسلی نیمه صحیح در حین پراش قابل برطرف شدن است. ویژگی خودترمیمی باریکه‌های کارپت شعاعی نیز به صورت تجربی اثبات شده است [۱۱].

در مقاله حاضر، رویکرد آشکارسازی ناهم‌دوس را برای آشکارسازی ۱۶ کلاس از مدهای کارپت شعاعی پیشنهاد شده است که بر اساس آموزش یک مدل شبکه عصبی کانولوشن مبتنی بر تصاویر ثبت شده از مدهای کارپت شعاعی پس از انتشار در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری در محیط متلاطم زیر آب است. معماری به‌کار گرفته شده نیز برگرفته از ساختار DenseNet-201 است.

## ۲. مبانی نظری باریکه‌های نوری کارپت شعاعی

باریکه‌های کارپت شعاعی به‌عنوان جواب‌هایی از معادله موج هستند که در گروه باریکه‌های شبه بسلی دسته‌بندی می‌شوند. رابطه (۱)، توصیف کننده یک ساختار شعاعی است که با عنوان توری شعاعی سینوسی شناخته می‌شود [۱۱].

$$T(\theta) = e^{i\gamma \cos(m\theta)} = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} (i)^q J_q(\gamma) e^{iqm\theta} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\gamma$  دامنه تغییرات فاز، و  $m$  نیز تعداد پره‌های توری شعاعی را تعیین می‌کند. هنگامی که این توری شعاعی تحت تابش یک موج تخت قرارگیرد الگوی شدت حاصل در طرح پراش، با نام باریکه کارپت شعاعی شناخته می‌شود. رابطه ریاضی توصیف کننده باریکه کارپت شعاعی به صورت رابطه (۲) قابل بیان است:

$$\psi(r, \theta; z) = e^{ikz} \left\{ J_0(\gamma) + \Re e^{j\Re r} \times \sum_{q=1}^{+\infty} \psi_q \left[ \frac{J_{qm+1/2}(\Re r)}{2} + j \frac{J_{qm-1/2}(\Re r)}{2} \right] \right\} \times \cos(qm\theta) \quad (2)$$

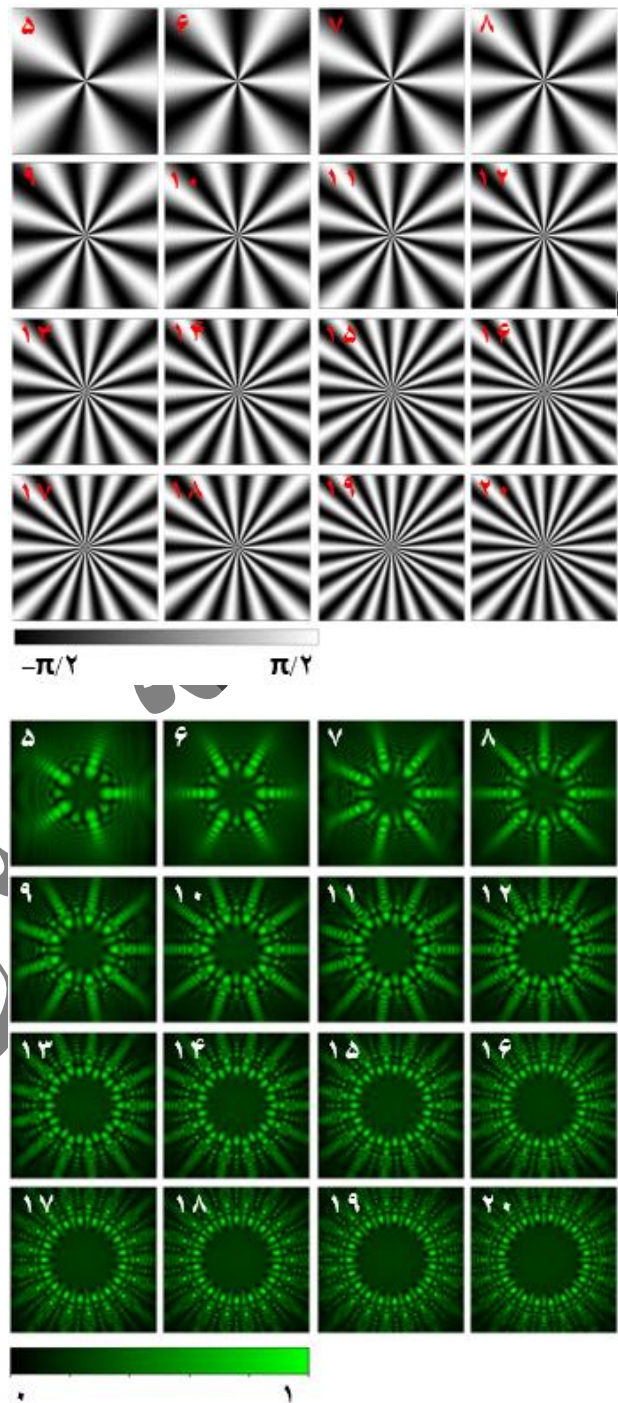
در این رابطه،  $k$  عدد موج،  $\lambda$  طول موج نور،  $z$  طول انتشار،  $J_{qm+1/2}(0)$  تابع بسلی مرتبه  $-qm+1/2$  نوع اول،

همانطور که از شکل ۱ واضح است هر مد کارپت شعاعی دارای تعداد معینی نقاط شدت روشن در صفحه پروفایل عرضی است که متناظر با تعداد پره‌های توری شعاعی است و یک ساختار حلقوی را شکل می‌دهند. با افزایش تعداد نقاط روشن، سایز حلقه مرکزی نیز افزایش می‌یابد. شکل الگوی پراش از توری شعاعی، در حین انتشار تقریباً بدون تغییر است اما تمام الگوی پراش به آرامی در حین انتشار پهن می‌شود. همچنین، علاوه بر توری شعاعی، می‌توان از یک توری پراش سمتی نیز برای تولید باریکه‌های کارپت شعاعی بهره برد و بازه متنوعی از مدهای کارپت شعاعی را در مراتب پراش تولید کرد که ممکن است در کاربردهایی مانند سوئیچ‌های اپتیکی مفید واقع شود [۱۳].

## ۳. آماده‌سازی مجموعه داده و آموزش شبکه عصبی

### کانولوشن

به منظور ایجاد یک مجموعه داده از تصاویر مدهای کارپت



شکل ۱. نتایج شبیه‌سازی توری‌های شعاعی (ردیف بالا) به‌ازای  $m=5, \dots, 20$  و  $\gamma = \pi/2$ ، به‌همراه الگوهای شدت حاصل از پراش موج تخت از ساختار شعاعی متناظر (ردیف پایین).

این رویکرد، قیود ناشی از به‌کارگیری المانهای اپتیکی متعدد در تکنیک‌های آشکارسازی همدوس به کمک توریهای پراش را حذف می‌کند و علاوه بر ساده‌سازی تنظیمات سیستم اپتیکی، حجم و هزینه پیاده‌سازی را به ویژه در کاربردهای ارتباطی کاهش می‌دهد.

شعاعی و آموزش مدل شبکه عصبی برای آشکارسازی این مدها، چیدمان آزمایشگاهی مطابق شکل ۲ برپا شده است.

همانگونه که از شکل ۲ قابل مشاهده است، باریکه گوسی خروجی از یک لیزر دیود Nd-YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر، توسط یک پرتوگستر، پهن و موازی می‌شود و پس از عبور از یک قیشر خطی، سطح یک مدولاتور فضایی نور با رزولوشن  $1024 \times 768$  پیکسل، فاصله بین پیکسلی ۱۷ میکرومتر و پاسخ فرکانسی تقریبی ۶۰ هرتز را که نمایش دهنده یک توری شعاعی سینوسی است مورد تابش قرار می‌دهد. مدولاتور فضایی نور امکان کنترل فاز نور را به صورت پویا فراهم می‌آورد. طرح پراش حاصل، حاوی باریکه کارپت شعاعی مورد نظر است که پس از عبور از یک دیافراگم، فاصله‌ای به طول ۵۰ سانتی‌متر را در فضای آزاد طی می‌کند سپس از میان یک تانک حاوی آب به ابعاد  $120 \times 30 \times 30$  سانتی‌متر که محتوی ۷۵ لیتر آب است عبور می‌کند. تانک آب شرایط مختلفی از تلاطم محیطی را شبیه سازی می‌کند. دو عدد هیتر ۲۰۰ وات برای ایجاد گرادیان دمایی استفاده شده است که بر اساس ابعاد تانک مورد نظر، گرادیان دمایی ۰/۲ درجه سانتیگراد بر سانتی‌متر را ایجاد می‌کند. اختلاف دمای سطح و عمق تانک نیز به کمک دو ترمومتر به طور همزمان ثبت می‌شود. یک عدد پمپ هوا با دبی قابل کنترل ۴/۵ لیتر بر دقیقه حبابهای هوا را در طول مسیر انتشار باریکه در تانک آب اضافه می‌کند. از لوله‌هایی در کف مخزن به منظور ایجاد و توزیع یکنواخت حباب‌ها در مسیر بهره برده شده است. الگوی شدت نهایی باریکه نور سرانجام به کمک یک لنز با فاصله کانونی ۶۰ سانتی‌متر، بر سطح یک پرده نمایش که در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از تانک قرار دارد نقش می‌بندد. الگوی شدت توسط دوربینی که با فاصله ۱۵ سانتی‌متری و به صورت زاویه دار نسبت به پرده قرار دارد ثبت می‌شود.

معمولا اثرات ناشی از اعمال تغییرات در فاز جبهه موج نور عبوری از مدولاتور در الگوی شدت آن منعکس می‌شود و به همین دلیل فرصت استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پردازش تغییرات در دامنه امواج نوری از طریق بررسی تصاویر الگوی شدت باریکه‌های نور فراهم است. باریکه نور

پس از عبور از محیط زیر آب، سوسوزنی، جابجایی، و تلفات ناشی از جذب نور را تجربه می‌کند. در این میان، آثار جابجایی در حضور گرادیان دمایی شدیدتر و آثار سوسوزنی در حضور حباب‌های هوا شاخصتر است. در صورت حضور عواملی مانند ناخالصی، اثرات پخششی نیز قابل توجه خواهد بود. در فرایند ثبت تصاویر لازم است تا مواردی مانند حد بالا و پائین شدت برای جلوگیری از اشباع و یا از دست رفتن جزئیات کلیدی لازم در هر مد به صورت بهینه و براساس ویژگی‌های شدت هر یک از ۱۶ مد مورد نظر در شرایط محیطی مختلف، انتخاب شود. همچنین، از تغییر کنتراست دوربین و ویرایش دیجیتال تصاویر به هنگام ثبت، اجتناب شده است تا تصاویر در حد امکان خام و ویژگی‌های شدت برخوردار باشد از ذات باریکه لیزری باشد نه یک اثر اعمال شده مصنوعی. بعلاوه برای کاهش اثرات نویز نوری ناشی از بازتاب‌های ناخواسته از سطوح محفظه آب و ثبت آنها در دوربین، از روزنه مسدود کننده در خروجی باریکه عبوری از محفظه استفاده شده است تا اثر نورهای ناخواسته در محیط را در سطح دوربین کاهش دهد. سایز روزنه و محل قرارگیری دوربین به نحوی تنظیم شده است تا تناسب لازم بین اندازه مدهای دریافتی در سطح دوربین و سایز دهانه لنز دوربین وجود داشته باشد به طوریکه اطلاعات هر مد به طور کامل در هر فریم ثبت شود. به عنوان مثال در اثر جابجایی، مدها نباید از دهانه روزنه و لنز دوربین خارج شوند. برای ثبت تصاویر نیز به این صورت عمل شده است که در هر مرتبه از تصویر برداری تعداد ۱۶ مد متوالی ارسال و ثبت شدند تا اثرات ناشی از تغییرات احتمالی تلاطم محیط در طول زمان بر روی تمامی ۱۶ مد یکسان باشد. این کار باعث می‌شود تا خطای احتمالی در آشکارسازی مدها توسط مدل آموزش دیده به حداقل برسد. به طور دقیقتر، در این حالت تمامی مدها شرایط محیطی یکسانی را تجربه می‌کنند و هیچ یک از مدها از این نظر برتری بر دیگری ندارد تا سبب آشکارسازی بهتر آن یک مد خاص شود.

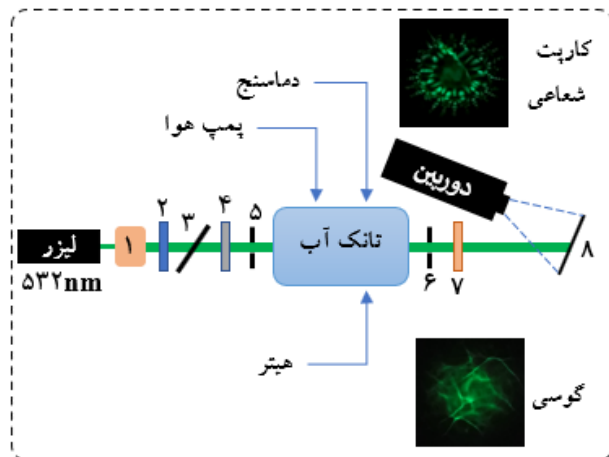
بر اساس نرخ داده برداری ۱۲۰ فریم بر ثانیه، تأخیر زمانی میان هر یک از مدها برابر با ۱/۰ ثانیه در نظر گرفته شده است که معادل با ۱/۶ ثانیه به ازای یک سیکل ۱۶ تایی از مدهاست.

مدولاتور و دوربین، تصاویر ثبت شده از نظر وجود اشکالاتی از قبیل تداخل و برهم‌نهی میان دو مد متوالی مورد بازبینی قرار گرفته است. تصاویر خام ثبت شده رنگی و دارای سایز ۵۱۲×۵۱۲ پیکسل است که پس از پردازش تصویر، با هدف کاهش حجم محاسبات رایانه‌ای در مرحله آموزش مدل، به سایز ۶۴×۶۴ پیکسل مقیاس شده است. بر این اساس، ۱۶ کلاس مختلف از مدهای کارپت شعاعی (۲۰، ۶، ۵، m) در حضور عوامل محیطی مختلف مانند آب ساکن، گردآیان دمایی، و حضور حباب‌های هوا در مسیر انتشار باریکه نور تولید و تعداد ۱۲۲۰۰۰ تصویر رنگی با ابعاد ۶۴×۶۴ پیکسل آماده شده است که به عنوان مجموعه داده مورد نیاز برای فرایند آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. الگوهای شدت تجربی متناظر با ۱۶ کلاس از مدهای مذکور پس از انتشار در شرایط آب ساکن در شکل ۳ نمایش داده شده است که کاملاً با نتایج شبیه‌سازی‌های شکل ۱ همخوانی دارند.

### ۳.۱. آموزش شبکه عصبی کانولوشن

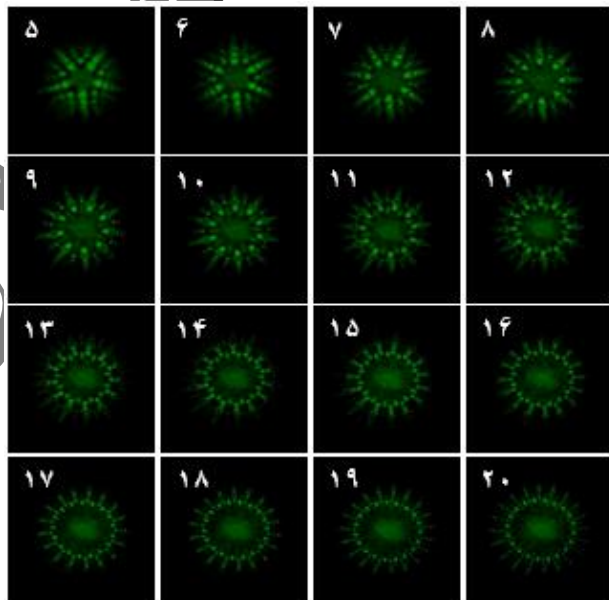
در این بررسی از مدل شبکه عصبی با معماری DenseNet-201 و رویکرد انتقال یادگیری به منظور آموزش مدل استفاده شده است. در حین آموزش، تعداد تصاویر ثبت شده از طریق فرایندهای دوران، انعکاس، مقیاس کردن، و ایجاد اعوجاج رندوم در تصاویر، افزایش پیدا کرده است. معماری یاد شده دارای ۲۰۱ لایه است که ۱۹۰ لایه آن از نوع کانولوشنی است. همچنین مدل مذکور دارای ۴ لایه تجمیع بیشینه و یک لایه تجمیع میانگین است. در این بررسی، لایه تماماً متصل پایانی نیز ۱۶ کاناله و تابع فعالساز پایانی از نوع تابع SoftMax انتخاب شده است. تابع بهینه ساز مورد استفاده نیز Nadam با نرخ یادگیری  $4 \times 10^{-4}$  تعیین شده است. شمای کلی این مدل در جدول ۱ خلاصه شده است.

۷۰٪ تصاویر مجموعه داده به آموزش (۷۸۴۰۰ تصویر)، ۲۰٪ به اعتبارسنجی (۲۲۴۰۰ تصویر) و ۱۰٪ باقیمانده (۱۱۲۰۰ تصویر) نیز برای تست مدل اختصاص داده شده است. بر این اساس، هر یک از ۱۶ کلاس مدها شامل ۴۹۰۰ تصویر آموزش، ۱۴۰۰ تصویر اعتبارسنجی، و ۷۰۰ تصویر تست است.



- ۱: پرتوگستر  
۲: قطبشگر خطی  
۳: پرتوشکاف  
۴: مدولاتور فضایی نور  
۵ و ۶: روزنه  
۷: عدسی  
۸: صفحه مشاهده

شکل ۲. شماتیک چیدمان اپتیکی برای تهیه تصاویر مجموعه داده.



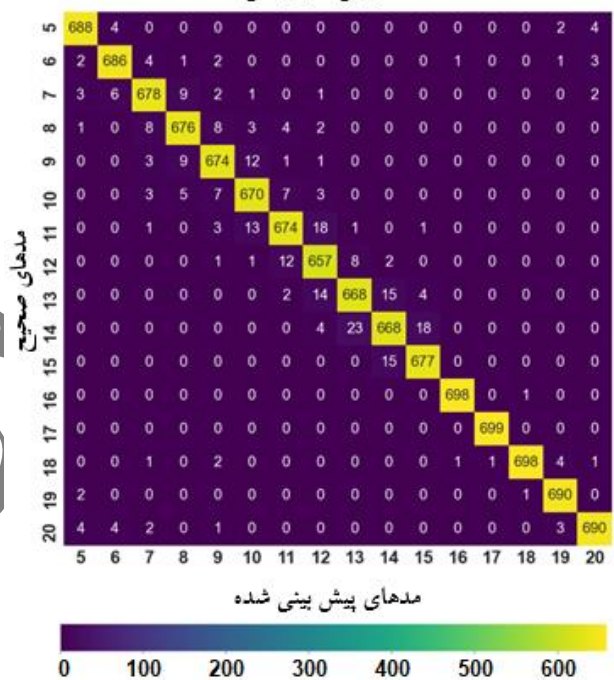
شکل ۳. ۱۶ کلاس از مدهای کارپت شعاعی ثبت شده پس از انتشار در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری درون آب ساکن.

در این حالت، تعداد ۱۹۲ تصویر در بازه زمانی ۱/۶ ثانیه توسط دوربین ثبت می‌شود. این یعنی در هر سیکل، از هر مد ۱۲ تصویر توسط دوربین ثبت می‌شود. برای کنترل بهتر شرایط تلاطم، این فرایند در طی دو مرحله در حضور گردآیان دمایی و حباب‌های هوا و برای ۳۲۰ سیکل متوالی تکرار شده است. در هر مرحله، ۶۱۴۴۰ تصویر ثبت شده است. در مجموع تعداد کل تصاویر پیش از بازبینی و حذف موارد نامناسب ۱۲۲۸۸۰ است. شایان توجه است که دلیل عدم وجود همزمانی میان

جدول ۱. خلاصه‌ای از شرایط آموزش مدل عصبی

انتقال یادگیری	نوع فرایند آموزش
DenseNet-201	نوع معماری پایه
۷۸۴۰۰	تعداد تصاویر آموزش
۲۲۴۰۰	تعداد تصاویر اعتبارسنجی
۱۱۲۰۰	تعداد تصاویر تست
SoftMax	تابع بهینه ساز
categorical crossentropy	Sparse تابع خطا
۱۰۰	تعداد سیکل آموزش
۶۴	سایز دسته‌بندی داده‌های ورودی

ماتریس سردرگمی



شکل ۴. ماتریس سردرگمی حاصل از ارزیابی مدل عصبی به کمک تصاویر تست.

داده‌ها در دسته‌های ۶۴ تایی به شبکه تزریق شده است و تعداد سیکل‌های آموزش ۱۰۰ انتخاب شده است. قابل توجه است که به منظور جلوگیری از بیش برآزش مدل، با کمک قید توقف زود هنگام، مقادیر خطای اعتبارسنجی به طور پیوسته ارزیابی شده است. فرایند آموزش نیز در یک رایانه با پردازنده Intel i5 و رم ۸GB انجام شده است. تعداد پارامترهای آموزش پذیر برابر است با ۱۲۳۱۶۸.

به منظور تست عملکرد مدل پس از آموزش، ۱۱۲۰۰ تصویر از مدهای کارپیت شعاعی در قالب ۱۶ کلاس که هر یک شامل

۷۰۰ تصویر است که در فرایند آموزش مشارکتی نداشته‌اند و برای مدل مورد نظر جدید محسوب می‌شوند در قالب گروه‌های ۶۴ تایی به مدل تزریق شده است. نتایج این ارزیابی به صورت ماتریس سردرگمی شکل ۴ نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۴ واضح است، ستونهای عمودی ماتریس سردرگمی نمایش دهنده مدهای صحیح و ردیفهای این ماتریس نیز متناظر با خروجی مدل است. در بهترین حالت، هرچه ساختار ماتریس سردرگمی، به قطری نزدیکتر باشد، مدل پیشنهادی در آشکارسازی مدها موفقتر است. به عنوان مثال، مدهای با لیبیل کلاس ۱۷، بهترین وضعیت را در مقایسه با سایر مدها دارند. تنها یک مد از تمامی ۷۰۰ مورد آزمون نادرست تشخیص داده شده است. پس از آن لیبیل‌های ۱۸ و ۱۹ در جایگاه‌های بعدی از نظر دقت هستند. در مقابل، توانایی مدل در دسته بندی لیبیل ۱۲ دچار ضعف است چرا که تنها ۶۵۷ مد از ۷۰۰ مد را درست تشخیص داده است. نگاهی دقیقتر به رفتار مدل این حقیقت را آشکار می‌کند که بیشترین خطا در تشخیص دو مد مجاور رخ داده است. بنابراین، صرف نظر از تلاش برای بهبود عملکرد مدل پیشنهادی، یکی از روش‌های ممکن، انتخاب مدهای کارپیت شعاعی غیر مجاور و با فواصل بیشتر است. در این صورت احتمال خطای مدل در تشخیص مدها به حداقل خواهد رسید. این ارزیابی، دقت ۹۷٪ را در آشکارسازی مدها در پس از عبور از محیط متلاطم زیر آب نشان می‌دهد. آگاهی از شرایط چیدمان آزمایش سبب می‌شود تا مدل را در استفاده‌های آتی در شرایطی با ویژگی‌های مشابه به کار ببریم تا شاهد عملکردی بهینه در دسته بندی مدها باشیم. در واقع عملکرد مدل مورد نظر در حضور تلاطم‌های قوی می‌تواند دستخوش تغییر شود و حتی کاهش یابد که این امر باید مورد توجه قرارگیرد. البته می‌توان در صورت نیاز، عملکرد مدل را با تکرار فرایند آموزش، به کمک مجموعه داده‌های جدیدتر از شرایط محیطی متنوع مجدداً بهبود بخشید.

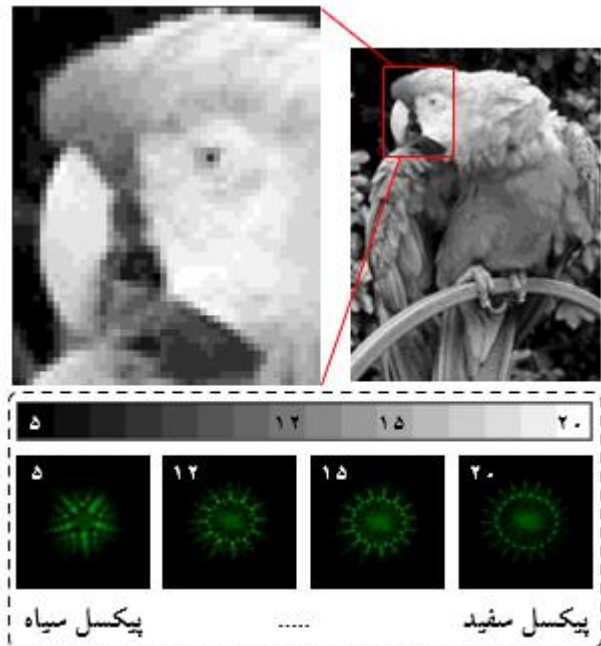
#### ۴. کدگذاری، انتقال اطلاعات و آشکارسازی

در این بخش، امکان کدگذاری، ارسال و دریافت اطلاعات به کمک مدهای کارپیت شعاعی بررسی شده است.

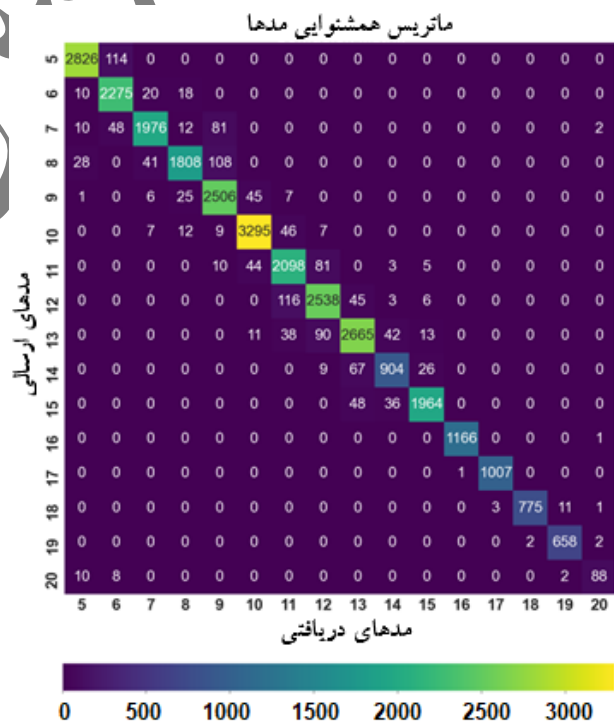


می‌شوند. بنابراین قطاری از مدهای کارپت شعاعی، یکی پس از دیگری به صورت متوالی در واحد فرستنده تولید می‌شوند، انتشار می‌یابند و سپس در واحد گیرنده توسط مدل عصبی، آشکارسازی و دسته‌بندی می‌شوند. برای اجتناب از مشکلات ناشی از همزمانی در واحد فرستنده و گیرنده و ساده‌تر شدن پیاده‌سازی تجربی، عمل ارسال و دریافت مدها از طریق یک رایانه انجام شده است. بدین ترتیب توالی مورد نیاز بین تولید، ارسال و دریافت مدها حفظ می‌شود. لازم به ذکر است که سیستم‌های تجاری از بیت‌های آغاز و پایان برای ایجاد همزمانی در میان واحد فرستنده و گیرنده استفاده می‌کنند. توجه داریم که حداکثر نرخ به روز رسانی مدولاتور فضایی نور به توانایی پردازش رایانه و سرعت آن در تولید الگوهای فازی نیز وابسته است.

از طرفی واحد گیرنده نیز متشکل از یک دوربین است که آن نیز پاسخ زمانی محدودی برای ثبت تصاویر دارد. همه‌ی این عوامل در کنار یکدیگر سبب محدودیت در آهنگ ارسال و دریافت سیگنال‌های نور می‌شود. در این مقاله با توجه به قدرت پردازشی رایانه‌ی خوبی که برای تولید و آشکارسازی بهینه کسب شده است برابر با ۳۰ مد در ثانیه است. شماتیک فرایند کدگذاری یک تصویر خاکستری ۴ بیتی با ابعاد  $200 \times 150$  پیکسل با استفاده از مدهای کارپت شعاعی ( $m=5, \dots, 20$ ) در شکل ۵، نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود کدگذاری بر اساس تعداد رنگ‌های موجود در تصویر انجام شده است. قابل توجه است که هر تصویر خاکستری  $N$  بیتی، حاوی  $2^N$  درجه رنگ متفاوت است. از اینرو تصویر ۴ بیتی نمایش داده شده در شکل ۵، دارای  $2^4=16$  رنگ متفاوت است که از سیاه، خاکستری، ... تا سفید است. اختصاص مدهای کارپت شعاعی به رنگ متناظر، به طور دلخواه صورت گرفته است. همچنین می‌توان با انتخاب مدهای غیرمجاور، از طریق کاهش تشابه مدها، تا حدی از بروز خطا در آشکارسازی جلوگیری کرد. ماتریس همشنوایی حاصل از فرایند ارسال و دریافت تصویر، در شکل ۶ نمایش داده شده است. ساختار قطری ماتریس همشنوایی نشان دهنده عملکرد قابل قبول لینک ارتباطی است. در واقع هر گونه خطا در آشکارسازی، سبب



شکل ۵. شماتیکی از نحوه کدگذاری اطلاعات تصویر بر اساس ۱۶ کلاس از مدهای کارپت شعاعی. هر رنگ متناظر با یک مد کارپت است.



شکل ۶. ماتریس همشنوایی مدها حاصل از ارسال و دریافت تصویر.

برای این منظور از چیدمان اپتیکی مشابه با شکل ۲ استفاده شده است با این تفاوت که در این حالت، تصاویر ثبت شده توسط دوربین مستقیماً به عنوان ورودی به مدل آموزش دیده وارد

می‌شود مد ارسالی به عنوان عضوی از دیگر کلاس‌ها دسته‌بندی شود و در نتیجه رنگ پیکسل بازسازی شده، به رنگ تعریف شده برای آن کلاس خاص تغییر کند. با توجه به اینکه بخش اعظم اطلاعات ارسال شده به درستی دریافت شده است همچنان می‌توان عملکرد این رویکرد را مطلوب در نظر گرفت. شایان ذکر است که در صورتی که نیاز به آزادی عمل بیشتری در کدگذاری اطلاعات است کفایت متناسب با امکانات سخت افزاری و پردازشی، تعداد کلاس‌های مدل عصبی و همچنین دقت مدل را افزایش دهیم.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان استفاده از باریکه‌های کارپت شعاعی به عنوان حامل اطلاعات در یک لینک ارتباطی زیر آب مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشن مورد آزمون قرار گرفته است. باریکه‌های نور کارپت شعاعی، نوع جدیدی از نور ساختاریافته هستند که در گروه باریکه‌های نوری شبه بسلی دسته‌بندی می‌شوند.

## مراجع

برای این منظور، یک مجموعه داده شامل ۱۶ کلاس مختلف از تصاویر مدهای کارپت شعاعی پس از انتشار در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری در شرایط تلاطم زیر آب تهیه و شبکه عصبی کانولوشن مورد نظر بر پایه معماری معروف DenseNet-201 و با تکیه بر تکنیک انتقال یادگیری، آموزش داده شده است. مدل مورد نظر دقت ۹۷٪ قابلیت آشکارسازی و دسته‌بندی ۱۶ کلاس مختلف از مدهای کارپت شعاعی را دارد. نتایج بدست آمده از ماتریس همشنوایی حاصل از انتقال یک تصویر خاکستری ۴ بیتی ۱۵۰×۲۰۰ پیکسلی نیز تأیید کننده امکان افزایش درجات آزادی در کدگذاری اطلاعات بر مبنای مدهای کارپت شعاعی و همچنین توانایی تکنیک شبکه عصبی کانولوشن در آشکارسازی نور ساختاریافته است. این روش، دشواری‌های ناشی از به کارگیری المان‌های اپتیکی متعدد در تکنیک‌های آشکارسازی همدوس به کمک توری‌های پراش را حذف می‌کند و علاوه بر ساده سازی تنظیمات سیستم اپتیکی، حجم و هزینه پیاده‌سازی را به ویژه در کاربردهای ارتباط نوری کاهش می‌دهد.

1. Y Ren et al., Opt. Lett. 39 (2014) 2845.
2. A Forbes, Laser & Photonics Reviews 13 (2019) 1900140.
3. G Gbur and R K Tyson, JOSA A 25 (2008) 225.
4. S A Arpali and Y K Baykal, PIERS Online 5 (2009) 633.
5. J Wang and Y Liang, Front. Phys. 9 (2021) 688284.
6. T Lei, M Zhang, Y Li, P Jia, G N Liu, X Xu, Z Li, C Min, J Lin, C Yu, and H Niu, Light Sci. Appl. 4 (2015) e257.
7. A Trichili, C B Issaid, B S Ooi, and M S Alouini, IEEE Internet of Things Journal 7 (2020) 10038.
8. M Krenn et al., Proceedings of the National Academy of Sciences 113 (2016) 13648.
9. Z Wang, M Chen, M Wan, J Ren, and J Ding, Opt. Commun. 534 (2023) 129316.
10. D Hebri and S Rasouli, Phys. Rev. A 98 (2018) 043826.
11. S Rasouli, A M Khazaei, and D Hebri, Physical Review A 97 (2018) 033844.
12. N Gong, F Xu, J Yang, Y Shi, Y Qian, and Z Ren, Results Phys. 39, (2022) 105698.
13. S Rasouli, and A M Khazaei, Sci. Rep. 9 (2019) 12472.